



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



کودهای آهسته رهش: تولید، دسته بندی و کاربرد

ذوالفقار آلاداغلو*

استادیار گروه علوم و مهندسی علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران* (z.aladaghlo@ut.ac.ir)

چکیده

کود به هر نوع ماده‌ای که برای تأمین مواد مغذی ضروری برای رشد گیاه به خاک یا بافت‌های گیاهی اضافه می‌شود، گفته می‌شود. کودها می‌توانند به صورت طبیعی یا مصنوعی (تولید صنعتی) تولید شوند. از ۵۰ سال گذشته نیاز به کودهای تجاری در حال افزایش است. مصرف کودهای معدنی هم باعث هدر رفت کود و هم آلودگی منابع خاک و آب را به همراه دارد. آزاد شدن آهسته یا کنترل شده کود، یک راه حل مناسب برای مسائل زیست محیطی ایجاد شده و کنترل مصرف کود است. مزایای زیادی از جمله قابلیت کاهش میزان هدر رفت، تأمین پایدار مواد مغذی، کاهش دفعات استفاده، و به حداقل رساندن اثرات منفی بالقوه در رابطه با این نوع کودها وجود دارد. در این مقاله به بررسی مختصر دسته بندی و کاربرد کودهای آهسته رهش پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: کشاورزی، کود آهسته رهش، خاک، تغذیه گیاه

مقدمه

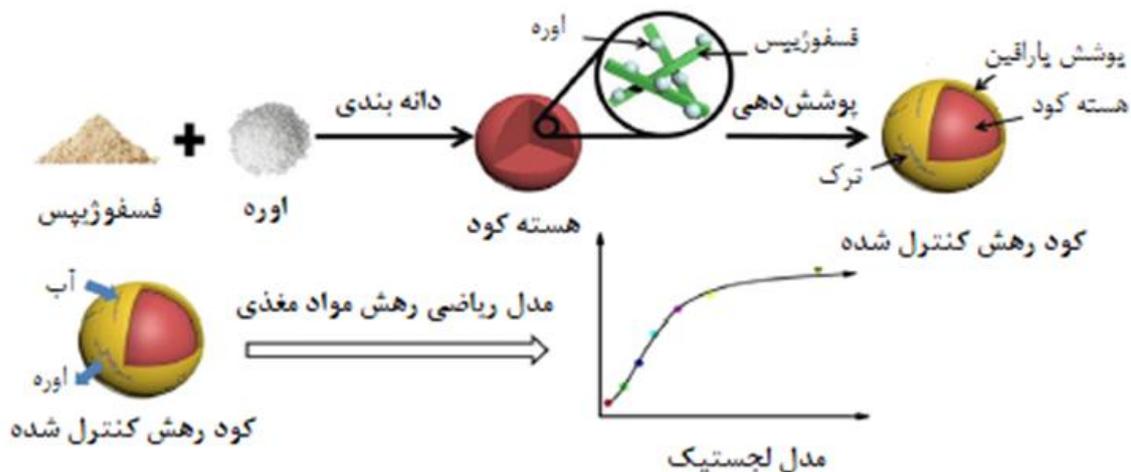
کود، اصطلاحی متداول برای موادی است که از قصد به خاک یا سطح گیاه اضافه می‌شوند تا نیازهای تغذیه‌ای آن را در دوره رشد، فراهم کند. این ماده از تنوع گسترده‌ای از مواد طبیعی و مصنوعی تشکیل می‌شود و به شکل مایع و جامد در دسترس است. از ۵۰ سال گذشته نیاز به کودهای تجاری مرتباً افزایش یافته است. استفاده از کودهای فسفاته از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ افزایش یافته است (Vance et al., 2003). به عنوان مثال، براساس پلیمرهای حاصل از ترکیب اوره و فرمالدهید، فناوری‌های کنترل رهش نیتروژن در سال ۱۹۵۵ تولید و تجاری سازی شد. محصولات اولیه کودها با رهش کنترل شده نیتروژن دارای ۶۰ درصد از کل نیتروژن نامحلول در آب سرد و کمتر از ۱۵ درصد بخش واکنش نداده (رهش سریع) بودند. اما این مشکل در دهه ۱۹۷۰ با استفاده از متیلن اوره و ۲۵ درصد و ۶۰ درصد نیتروژن نامحلول در آب سرد و ۳۰-۱۵ درصد نیتروژن اوره واکنش نداده، حل شد. کودهای اوره با پوشش گوگرد توسط مرکز ملی توسعه کود تولید شده است و گوگرد بدلیل ارزش آن به عنوان عنصر مغذی ثانویه و هزینه پایین، ماده پوشش دهنده اصلی است. برای توسعه و افزایش خواص آهسته رهش براساس تخریب پوشش توسط ضربه مکانیکی و همچنین میکروبیوم‌های خاک از پلیمرها به عنوان پوشش به همراه یا جایگزین گوگرد استفاده شد (Zhao et al., 2016).

کودهای آهسته رهش توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند و این جدیدترین و پیچیده‌ترین روش کوددهی جهت تولید گیاه و میوه در کشاورزی است. در این روش پوشش‌ها مانند یک پوسته بر روی مواد مغذی هسته پوشش داده می‌شوند. عمدتاً پوشش پلیمری براساس ضخامت پوشش و ترکیب پلیمر تعیین می‌شود. کودهای آهسته رهش با پوشش پلیمری به جای کود معمولی، سه ماده مغذی نیتروژن، فسفر و پتاسیم را همراه با کلسیم، گوگرد و سایر ریز مغذی‌ها را تأمین می‌کنند. کودهای آهسته رهش دارای مزایای زیادی از جمله سهولت در تنظیم سرعت رهش کود، برای بسیاری از محصولات زراعی کارا و باعث آلودگی کمتری

نسبت به استفاده از کودهای بدون پوشش دارند (Chen et al., 2018). بنابراین بحث در مورد این موضوع اهمیت زیادی پیدا کرده است.

تولید کودهای آهسته رهش

کودهای آهسته رهش کودهای پوشش دار هستند که از طریق قرار دادن پوشش بر ذرات کود با مواد مختلف، تهیه می‌شوند (Yu et al., 2019). گزارش شده که بسیاری از مواد مانند گوگرد، پلی سولفون، پلی وینیل کلرید، پلی استیرن به عنوان پوشش استفاده می‌شوند، انواع مختلفی از مواد پوشاننده طبیعی و زیست تخریب پذیر مانند نشاسته و کیتوزان، تا پلیمرهای تجزیه ناپذیر، استفاده شده‌اند. بازار جهانی، از این روش در خط تولید خود، با ظرفیت کل حدود بیش از ۳ میلیون تن در سال ۲۰۱۷، بهره می‌برند. مکانیسم آزاد شدن ماده مغذی از هسته به محیط زیست، انتشار از طریق مواد نازک پوشاننده پس از باز شدن منافذ با آب است. بنابراین، پوشاندن کل سطح به شکلی یکسان با پوشش جهت جلوگیری از انحلال نگرانی، ضروری است. به علاوه، پوشش باید بتواند حجیم شدن هسته به واسطه نفوذ آب و انحلال کود را تحمل کند. معیار برای انتخاب ماده پوشاننده، هزینه پایین، عدم سمیت، و استفاده آسان بر کودهای متداول است. دو نوع معمول از تجهیزات برای آماده سازی کودهای پوشش دار به نام‌های ماشین‌های درام و فواره، وجود دارد. درام پوشاننده، معمولاً برای کود پوشیده شده با گوگرد استفاده می‌شود، در حالیکه روش فواره، با یک پلیمر پوشیده می‌شود (Yu et al., 2019). شکل ۱ مراحل ساخت و پوشش کود اوره آهسته رهش را نشان می‌دهد.

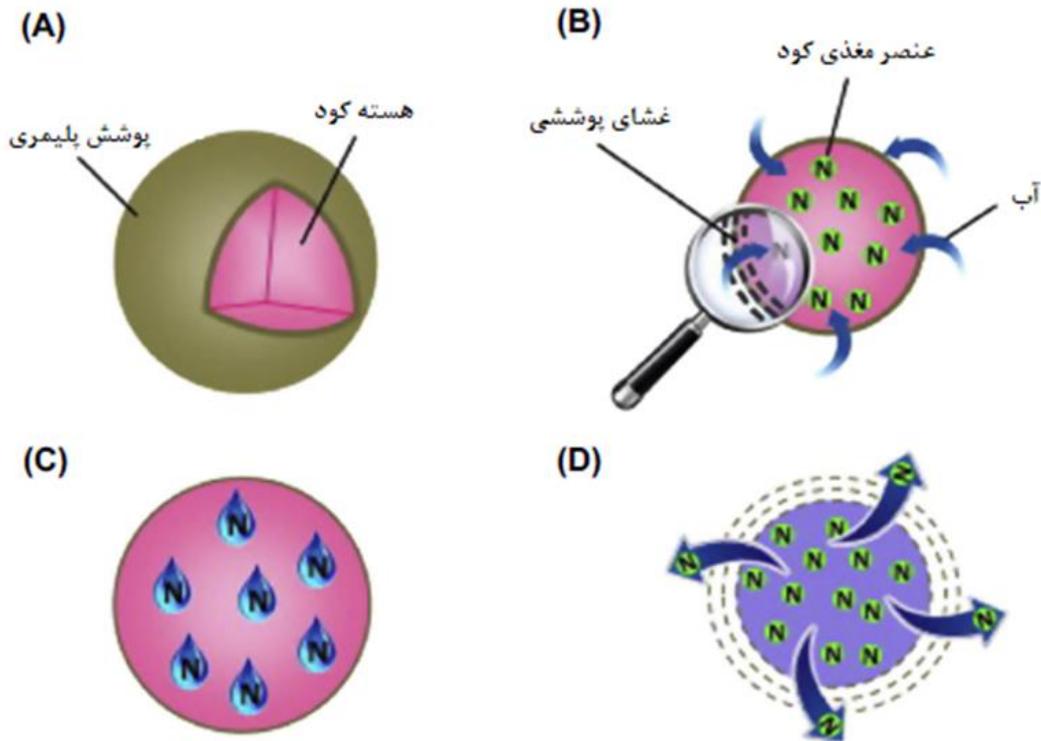


شکل ۱- مراحل پوشش کود آهسته رهش اوره

کارکرد و مکانیسم

کود آهسته رهش مواد مغذی را به تدریج با دوره رها سازی کنترل شده در خاک آزاد می‌کند. این کودها عناصر غذایی را به صورت کند ولی مداوم در اختیار گیاهان قرار می‌دهند و با این امر گیاه در طول فصل رشد دچار کمبود نشده و همچنین نیاز

به تکرار مصرف کودها از بین می رود. در ادامه به عنوان نمونه مکانیسم رهش آهسته کود نیتروژن بررسی شده است. مکانیسم رهش نیتروژن از کود آهسته رهش اوره فرمالدئید عمدتاً شامل سه مرحله است. در مرحله اول، مواد پوشش دهنده با جذب آب از خاک متورم شده و به هیدروژل منتقل می شوند. این امر به نفوذ کود در هسته شبکه ژل کمک می کند. لایه هایی از آب بین پوشش متورم و گرانول ایجاد می شود. در مرحله دوم، آب به شبکه پلیمری با اتصال عرضی نفوذ می کند. این امر باعث افزایش انحلال قسمت محلول می شود و در نتیجه قسمت محلول کود به آرامی در خاک آزاد می شود. در مرحله آخر، میکروارگانیزم های خاک از طریق پوشش های متورم نفوذ کرده و اطراف گرانول جمع می شوند. از این طریق، قسمت نامحلول نیتروژن در گرانول به اوره و آمونیاک تجزیه می شود و به آرامی از طریق تبادل دینامیکی در خاک آزاد می شود (Yu et al., 2019). شکل ۲ مکانیسم رهش کنترل شده کود نیتروژن را نشان می دهد، مولکول های آب در زمین از طریق پوشش به درون کود نفوذ می کنند، روی کود جامد متراکم و منجر به رهش آهسته کود می شوند.



شکل ۲- مکانیسم نفوذ برای رهش کنترل شده کود نیتروژن.

دسته بندی و انواع پوشش های کودی

آزاد شدن آهسته کودها معمولاً به چهار دسته تقسیم بندی می شود: (۱) مواد غیر ارگانیک با حلالیت پایین، مثل فسفات های فلزی آمونیوم؛ (۲) مواد تخریب پذیر زیستی یا شیمیایی با حلالیت پایین مثل فرمالدهید اوره، (۳) مواد نسبتاً محلول که به تدریج



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



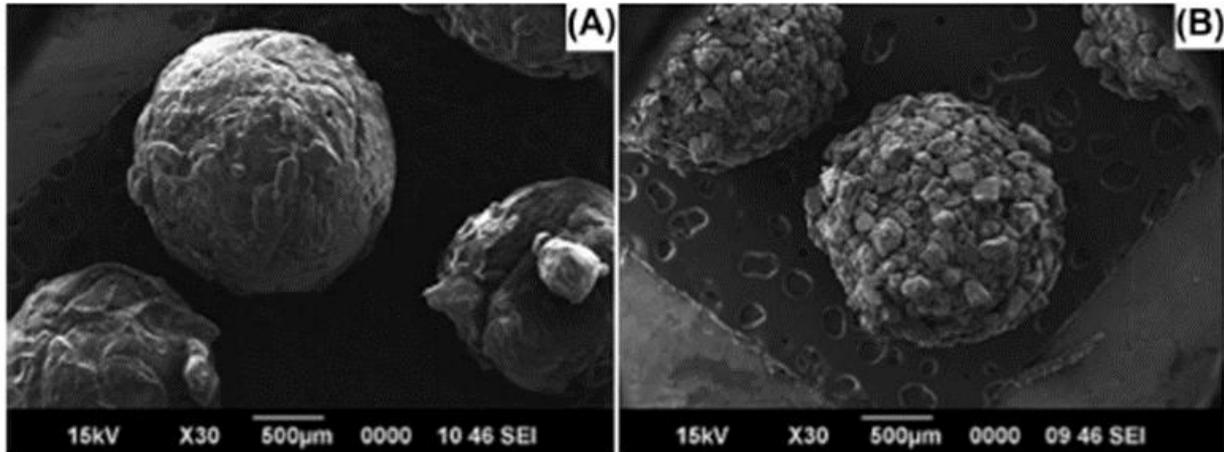
در خاک تجزیه می‌شوند، ۴) کودهای محلول در آب که با سدی فیزیکی کنترل می‌شوند، مانند مواد پوشش‌دار با بافت زمينه که برای کنترل آزاد شدن ماده مغذی از طریق مکانیسم جذب-دفع استفاده می‌شوند (Chandra et al., 2021). در ادامه به بررسی مختصری از انواع پوشش‌ها و کودهای آهسته‌رهش پرداخته شده است.

کودهای پوشیده شده با گوگرد

یکی از تلاش‌های اولیه در افزودن مانعی برای آزاد شدن به کودهای بازار، به وسیله پوشش گوگرد است. گوگرد به دلیل تجزیه پذیری انتخاب شده و به عنوان یکی از مواد مغذی گیاه، در نظر گرفته می‌شود (Chandra et al., 2021).

کودهای پوشیده شده با پلیمر

کودهای آهسته رهش با پوشش پلیمری رایج ترین کودهای مورد استفاده و در حال پیشرفت هستند و در جنگل‌ها، حفاظت از گیاهان و نهالستان‌های بومی به جای سایر کودهای معمولی مؤثر هستند. رهش کنترل شده این کودها براساس میزان انتشار است، یعنی این کودها مواد مغذی خود را در دوره‌های ۳ تا ۱۸ ماهه براساس پوشش و دمای محیط آزاد می‌کنند. روش اصلی پوشاندن کود محلول معمولی با یک پوشش محافظ (کپسوله کردن) از مواد نامحلول در آب، نیمه تراوا، یا غیرقابل نفوذ با مواد متخلخل است. این امر نفوذ آب و در نتیجه سرعت انحلال را کنترل می‌کند و به طور مطلوب رهش مواد مغذی را با نیاز گیاهان هماهنگ می‌کند. ضخامت پوشش روی کود آن را قادر می‌سازد در مدت زمان طولانی آزاد شود و در نتیجه الگوی رهش و راندمان مصرف عناصر مغذی را کنترل می‌کند و می‌تواند عرضه مداوم مقادیر زیاد کود در مزارع را برطرف کند. برای تهیه کودها از پلاستیک و همچنین الاستومرهای مختلف استفاده می‌شود. تا به امروز چندین پوشش پلیمری نامحلول در آب مانند پلی استایرن، پلی اکریلونیتریل، پلی اتیلن، لیگنین کرافت کاج و پلی آکریل آمید در فرمولاسیون این کودها استفاده شده است. دوره رهش شامل سه مرحله مجزا است: (۱) مرحله اولیه که طی آن تقریباً هیچ رهشی مشاهده نمی‌شود (دوره تاخیر)، (۲) مرحله رهش ثابت و (۳) مرحله کاهش تدریجی سرعت رهش. فرض بر این است که مدت دوره تاخیر به زمان مورد نیاز برای پر شدن حفرات داخلی یک گرانول پوشش داده شده با مقدار بحرانی آب و در نتیجه تماس خوب محلول با قسمت داخلی پوشش مرتبط است، پس از آن یک حالت پایا بین نفوذ آب به داخل گرانول و خروج مواد مغذی از آن حاصل می‌شود. مرحله رهش خطی تا زمانی ادامه می‌یابد که کود جامد در گرانول وجود داشته باشد و بنابراین یک گرادیان ثابت بین محلول‌های گرانول و محیط حفظ شود. در مقایسه با پوشش‌های مبتنی بر پلیمر، اغلب پوشش‌های گوگردی برای کودها استفاده می‌شود، زیرا پوشش گوگردی راحت‌تر از پوشش پلیمری شکسته می‌شود. نرخ رهش مواد مغذی از کود با پوشش پلیمری تحت تأثیر عواملی مانند ضخامت پوشش، سرعت نفوذ و دمای خاک قرار می‌گیرد (Chandra et al., 2021). به عنوان نمونه شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی ذرات اوره با پوشش کاپلیمری را نشان می‌دهد. اوره پوشش داده شده کنترل رهش بهتری نسبت به اوره بدون پوشش نشان می‌دهد و سرعت رهش به درصد پیوند کاپلیمر بستگی دارد. وجود گروه‌های اکریلونیتریل آبگریز در فرمول پوشش، نفوذ مولکول‌های آب به داخل اوره را به شدت کاهش و در نتیجه انحلال و رهش متعاقب در خاک را کاهش می‌دهد.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی ذرات اوره بدون پوشش (B) و با پوشش (A)

پوشش هیبرید

تلاش‌هایی در جهت ترکیب کردن پوشش گوگرد با پلیمر، صورت گرفته است. این ترکیب می‌تواند اثر مقاومت کود پوشیده شده با گوگرد را با قابلیت کاهش ضخامت پوشش پلیمر، ارتقاء دهد که به هزینه‌های کمتر تولید، منجر می‌شود. مانند کود اوره پوشیده شده با پلیمر ترموست و لایه‌های گوگرد و موم که باعث کنترل بهتر انحلال پذیری و رهش کود می‌شود، و همچنین از نظر اقتصادی تا حدود ۳۰ درصد مناسب‌تر است (Chandra et al., 2021).

پوشش بر پایه مواد زیستی

به طور کلی پوشش زیستی، به دلیل ویژگی‌هایی مانند قیمت نسبتاً پایین، فراوانی، تجدیدپذیری و زیست تخریب‌پذیر بودن، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این مواد شامل کیتوزان، کراتین، پلی‌آمینو اسیدها، سلولز، و نشاسته هستند که مستقیماً برای آزاد شدن کودها به شکل آهسته، استفاده می‌شوند. در میان این مواد، نشاسته ذرت، سیب‌زمینی شیرین، و بلوط وحشی، به عنوان پلی‌ساکاریدهای طبیعی تجدیدپذیر و فراوان استفاده فراوانی دارند. این به خصوصیات متعدد جالب آن، مانند زیست تخریب‌پذیری، عدم سمیت، قیمت پایین، دسترسی آسان، و قابلیت اصلاح نسبت داده می‌شود. هر چند، استفاده از نشاسته اصلاح‌نشده برای زمین‌های کشاورزی غیر غذایی، معمولاً محدود است، چون محدودیت‌هایی مانند انحلال‌پذیری کم، ویژگی‌های مکانیکی ضعیف و عدم ثبات در دمای بالا را دارد (Chandra et al., 2021).

کود پراکنده شده در زمینه یا ماتریکس

در این نوع کودها، به دلیل استفاده از مواد جامد آب‌گریز مثل ماتریس‌ها، بسیار ساده‌تر است. این کود با پودر کود معمول، مخلوط و شکل‌دهی می‌شود تا ذرات مرکب را شکل دهد. هرچند، وقتی این کود ماتریکس ترکیبی در زمین کشاورزی با رطوبت تماسی استفاده شود، ماده مغذی آزاد شده با متورم شدن ذره، انتشار از طریق ماتریکس متخلخل آزاد می‌شود. این مکانیسم‌های درهم‌تنیده معمولاً دشواری‌هایی در کنترل آزادسازی مواد مغذی ایجاد می‌کند. این نوع کودهای آهسته‌رهش در کشورهای در حال توسعه مثل اندونزی به دلیل هزینه تولید پایین و مراحل ساده ساخت نسبتاً متداول هستند. مواد طبیعی مثل زئولیت،



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



رس، زغال، خاکستر، کمپوست، و کود فرآوری شده پرنندگان، به عنوان بافت طبیعی استفاده می‌شوند. هرچند، این مواد نیازمند فرایند ذوب، در مقایسه با کود معمولی، نیستند. این نوع از مواد زمینه تنها نیازمند مخلوط شدن در دمای اتاق و شکل‌گیری با ویژگی‌های چسبندگی، مثل رس یا لجن هستند. هرچند، بعضی مواد به چسبندگی کمی مثل نشاسته یا ملاس، نیاز دارند (Chandra et al., 2021).

نتیجه‌گیری

توسعه اکوسیستم‌های کشاورزی جدید، پایدار و مفید مانند کودهای شیمیایی برای بهبود تولید مواد غذایی حائز اهمیت در سال‌های اخیر شده است. در این مقاله، مکانیسم و طبقه‌بندی کودهای آهسته‌رهش را مورد بحث قرار دادیم. رهش کنترل شده بر مبنای مواد پلیمری و سوپرجاذب پتانسیل امیدبخشی را از نظر رهش کنترل شده طولانی مدت و نگهداشت آب ارائه می‌دهد. با وجود این، پیچیدگی فرآوری، هزینه‌های بالا و عوارض جانبی غیر سازگار با محیط زیست برخی از مواد مانع تولید در مقیاس صنعتی می‌شود. بنابراین، اخیراً برخی از کارهای تحقیقاتی بر مبنای رهش کنترل شده کودها با مواد پوشش‌دهنده مبتنی بر نشاسته، لیگنین و سلولز گزارش شده‌اند که نسبتاً ارزان‌تر، زیست تخریب‌پذیر و تجدیدپذیر هستند.

فهرست منابع

- C.P. Vance, C. Uhde-Stone, D.L. Allan, Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource, *New Phytol.* 157 (3) (2003) 423-447.
- J. Zhao, T. Ni, J. Li, Q. Lu, Z. Fang, Q. Huang, Q. Shen, Effects of organiceinorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice wheat cropping system, *Appl. Soil Ecol.* 99 (2016) 1-12.
- J. Chen, S. Lü, Z. Zhang, X. Zhao, X. Li, P. Ning, M. Liu, Environmentally friendly fertilizers: a review of materials used and their effects on the environment, *Sci. Total Environ.* 613 (2018) 829-839.
- X. Yu, B. Li, Release mechanism of a novel slow-release nitrogen fertilizer, *Particuology* 45 (2019) 124-130.
- W. Chandra, S. Hens, Manufacturing of slow and controlled release fertilizer, (2021) 95 – 110.



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۷ تا ۲۹ شهریور ۱۴۰۴



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj 31587-77871, Islamic Republic of Iran

Abstract

Fertilizer is any substance added to soil or plant tissues to provide essential nutrients for plant growth. Fertilizers can be produced naturally or artificially (industrially produced). The need for commercial fertilizers has increased steadily over the past 50 years. The increased use of mineral fertilizers has both resulted in fertilizer waste and pollution of soil and water resources. Slow or controlled release of fertilizer is the best solution to the environmental problems created and the control of fertilizer consumption. There are many advantages, including the ability to reduce waste, provide a stable supply of nutrients, reduce the frequency of use, and minimize potential negative effects associated with this type of fertilizer. In this article, due to the limitation of the text in terms of the number of pages, a brief review of the classification and function of slow-release fertilizers has been given.

Keywords: Agriculture, Slow-release fertilizer, Soil, Plant nutrition