

Sustainable Agriculture: The Vision, Impact, and production of Slow-Release Fertilizers

Hassan Seddighi¹; Keivan Shayesteh^{2*}

1. MSc. student, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

*2. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

* Email Address: k.shayesteh@uma.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper	<p>Slow-release fertilizers (SRFs) play a significant role in fertilizer applications within the agricultural industry. They are specifically designed to optimize the release of nutrients and enhance nutrient delivery to crops over an extended period. By effectively managing nutrient release, SRFs improve fertilizer performance and efficiency, ultimately preventing nutrient loss and reducing waste. Additionally, the slow-release mechanism allows plants to utilize nutrients more efficiently. SRFs can be produced using two main methods: matrix-based and coated fertilizers. Various technologies such as fluidized bed coating, pan coating, rotary drum, melt extrusion, inverse suspension polymerization, solution polymerization/cross-linking, and microwave irradiation are employed in producing coated fertilizers. The fluidized bed method is one of the most important techniques for producing coated fertilizers. The global demand for sustainable agricultural practices has significantly increased the production and adoption of SRFs. With its vast oil and gas reserves and abundant access to sulfur, Iran holds a unique position for producing sulfur-coated SRFs. Due to the availability and low cost of sulfur, Iran has a significant advantage in economically producing sulfur-coated fertilizers compared to other countries. This study provides a comprehensive insight into the production processes, advantages, and limitations of SRFs and emerging production trends worldwide.</p>
Article History:	
Received Date: 2024/08/03	
Revised Date: 2024/08/08	
Accepted Date: 2024/11/04	
Published Date: 2024/12/10	
Keywords: The importance of slow-release fertilizers, Statistics on the production and consumption of nitrogen fertilizers, methods for producing matrix and coated fertilizers, statistics on the production and consumption of slow-release fertilizers	

Cite this article: Hassan Seddighi, Keivan Shayesteh (2024). Sustainable Agriculture: The Vision, Impact, and production of Slow-Release Fertilizers, Journal of Environmental Sciences Studies,10 (1), Pages 9917-9932.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The planet's population is increasing daily, which has caused an increase in the demand for food. Fertilizers are essential for increasing crop yields. Nitrogen, phosphorus, and potassium are vital nutrients for plant growth, with nitrogen being one of the most challenging to obtain. Typically, nitrogen used as fertilizer in agriculture will be lost through various pathways, such as water dissolution, oxidation and regeneration, sublimation, nitrification, and denitrification. These losses reduce the yield and quality of the product and cause severe problems for the environment and human health. In addition to economic loss, nitrogen waste causes air and water pollution, greenhouse gas emissions, eutrophication, and many diseases such as cancer. The high solubility of nitrogen fertilizer in water leads to nitrogen absorption, in the form of nitrate and ammonia, by plant roots. However, the roots cannot immediately absorb a significant portion of nitrate and ammonia, leading to their entry into surface and underground waters. Tragically, long-term consumption of food and water contaminated with nitrates and nitrites can lead to serious health conditions, including cancer, methemoglobinemia, heart attacks, lung and respiratory issues, and adverse pregnancy outcomes. These health risks underscore the need for a change in our fertilizer practices. This article mentions the importance of using nitrogen fertilizers and their production and consumption in Iran and the world. Then, SRFs are introduced, and their production methods, the importance, and their disadvantages are briefly described. Then, the world's approach to SRFs is analysed. The main goal of this article is to show the tendency to produce and use SRFs worldwide.

Materials and methods

To evaluate the impact of SRFs, a comprehensive search was conducted using the keywords Slow and Controlled-release fertilizers, Production and consumption of nitrogen fertilizers, and Coated and Matrix fertilizers across Google Scholar, ScienceDirect, ResearchGate, Scopus, and ACS databases. The dataset included various articles, books, and organizational reports, primarily focusing on recent scientific research published in these databases. Additionally, production statistics used in this research were obtained from Iran's Ministry of Agricultural Jihad.

Results and discussion

The global market of coated fertilizers is predicted to increase at a compound annual growth rate of 7.2% between 2023 and 2028. It is predicted that the financial turnover of the fertilizer production industry will reach 5.9 billion dollars in 2028. Therefore, Asia-Pacific, North America, and Europe will have a more significant share of coated fertilizers. Among the most commonly coated fertilizers are urea coated with sulfur, urea coated with a polymer, and urea coated with sulfur and polymer. The amount of production of SRFs depends on the type of coating, thickness, and quality of the fertilizer grains. China produces about 36% of the world's coated fertilizer using sulfur. 25% of its fertilizers are made in India using gypsum, 15% in Brazil with bentonite, 10% in Russia with the help of talc, and other countries produce the remaining 14%. Several Iranian companies are also active in urea fertilizer with sulfur coating. Amot Iranian Trading Company, Sabz Biomedicals Company, Salaf Shimi Company, Lordegan Urea Fertilizer Company, and Sarkhas Petrochemical are active in this field. Considering the many benefits of SRFs and the abundance and cheapness of sulfur in Iran, a more serious investment is expected to be made.

Conclusion

SRFs have revolutionized the agricultural industry by providing a sustainable and environmentally friendly alternative to traditional fertilizers. These innovative fertilizers release nutrients slowly and consistently, improving crop performance, reducing environmental pollution, and minimizing surface and underground water source contamination. The global production of SRFs is on the rise. Iran benefits from this trend due to its abundant oil and gas resources, which can be utilized to produce cost-effective sulfur-based SRFs. Furthermore, the country's wood and paper factories can serve as a viable source of lignin for manufacturing these fertilizers. Research findings have highlighted the potential of this biopolymer for creating SRFs with an extended-release period. With the necessary backing and investment, Iran has the potential to emerge as a frontrunner in the production and application of SRFs, thereby contributing to a more sustainable and eco-friendlier agricultural sector.



کشاورزی پایدار: چشم انداز، تأثیر و تولید کودهای آهسته رهش

حسن صدیقی^۱، کیوان شایسته^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: k.shayesteh@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳	کودهای آهسته رهش نقش مهمی در مصارف کود در صنعت کشاورزی دارند؛ زیرا به طور خاص برای بهینه سازی رهش مواد مغذی و افزایش تحویل مواد مغذی به محصول در یک دوره طولانی، طراحی شده اند. کودهای آهسته رهش با مدیریت موثر رهش مواد مغذی، به بهبود عملکرد و کارایی کود کمک می کند و در نهایت با کاهش از دست رفتن مواد مغذی، از اتلاف کود جلوگیری به عمل می آید. همچنین، به دلیل رهش آهسته کود، گیاه از مواد مغذی کود به صورت کارآمدتر استفاده می کند. کودهای آهسته رهش را می توان به دو روش ماتریسی و پوشش دار تولید کرد. در روش تولید کودهای پوشش دار، از تکنولوژی های مختلف نظیر بستر سیال، پوشش دهنده پن، روتاری درام، ذوب و اکستروژن، پلیمریزاسیون معکوس، پلیمریزاسیون محلول / اتصال عرضی و تابش میکروویو استفاده می شود. یکی از مهمترین روش های تولید صنعتی کودهای پوشش دار، روش بستر سیال می باشد. تقاضای جهانی برای شیوه های کشاورزی پایدار منجر به افزایش قابل توجهی در تولید و پذیرش کودهای آهسته رهش شده است. ایران با توجه به منابع عظیم نفت و گاز و دسترسی فراوان به گوگرد، موقعیت منحصر به فردی برای تولید کودهای آهسته رهش با پوشش گوگردی دارد. به دلیل فراوانی و ارزانی گوگرد، امکان تولید کود با پوشش گوگردی در ایران نسبت به سایر کشورها از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. این مطالعه بینش جامعی را در مورد فرآیندهای تولید، مزایا و محدودیت های کودهای آهسته رهش و آینده کودهای آهسته رهش ارائه می دهد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰	
کلید واژه ها: اهمیت کودهای آهسته رهش، آمار تولید و مصرف کودهای ازته، روش های تولید کودهای ماتریسی و پوشش دار، آمار تولید و مصرف کودهای کند رهش	

جمعیت کره زمین روزانه در حال افزایش است که این امر باعث افزایش تقاضا برای غذا شده است. کودها برای افزایش عملکرد محصول ضروری هستند. نیتروژن، فسفر و پتاسیم که به NPK معروف اند، مواد مغذی حیاتی برای رشد گیاه می باشند و نیتروژن از مهمترین آن ها است (Versino et al., 2019; Xiaoyu et al., 2013). به طور معمول، نیتروژن مورد استفاده به عنوان کود در کشاورزی از طریق مسیرهای مختلف مانند انحلال، اکسیداسیون، نیتریفیکاسیون و نیترات زدایی از بین می رود (Dimkpa et al., 2020). این تلفات باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصول می شود و مشکلات شدیدی را برای محیط زیست به خصوص سلامت انسان ایجاد می کند. علاوه بر زیان اقتصادی، ضایعات نیتروژن باعث آلودگی هوا و آب و بسیاری از بیماری ها مانند متهموگلوبین و سرطان می شود (Matassa et al., 2015). استفاده بیش از حد از کودها منجر به اوتروفیکاسیون در آب می شود (Ayoub, 1999). این امر جلبک ها و گیاهان آبی را افزایش داده و منجر به کاهش کیفیت آب و تخریب محیط زیست می شود (Olson, 1978). اوتروفیکاسیون محیطی بدون اکسیژن ایجاد می کند، باعث تولید بوی نامطبوع می شود و آب را برای آشامیدن نامناسب می کند (Chauhan et al., 2012). کودهای ازته در آب به شدت محلول می باشند و به شکل نیترات و آمونیاک توسط ریشه گیاهان قابل جذب هستند. با این حال، ریشه ها نمی توانند فوراً بخش قابل توجهی از نیترات و آمونیاک را جذب کنند که متأسفانه بخش زیادی از ترکیبات مختلف ازت حل شده در آب، نمی تواند جذب ریشه گیاه شود؛ لذا این بخش جذب نشده به آب های سطحی و زیرزمینی وارد می شود (Masclaux-Daubresse et al., 2010; Rahikainen & Kangasjärvi, 2020). علاوه بر این، استفاده بیش از حد از کودهای ازته در مناطق خشک منجر به آلودگی محصول به نیترات و نیتريت می شود. نیترات موجود در آب آشامیدنی در مجاری روده جذب می شود. هنگامی که نیترات وارد بدن شد، به سرعت در سراسر بافت های بدن پخش می شود. نیتريت پس از ورود به بدن، در شرایط اسیدی معده، بخشی از آن به ترکیبات N-nitroso تبدیل می گردد. این ترکیبات به عنوان عوامل سرطان زا شناخته می شوند و احتمال بروز سرطان های دستگاه گوارش از جمله معده، مری و کولورکتال را افزایش می دهند (Seyyedsalehi et al., 2023). شواهد اپیدمیولوژیک نشان می دهند که مصرف نیتريت از طریق رژیم غذایی به ویژه در سطوح بالا، خطر ابتلا به سرطان معده و مری را افزایش می دهد (Ward et al., 2018; WHO, 2011). متأسفانه، مصرف طولانی مدت غذا و آب آلوده به نیترات و نیتريت می تواند منجر به بیماری های جدی از جمله سرطان، متهموگلوبین، حملات قلبی، مشکلات ریوی و تنفسی و پیامدهای نامطلوب بارداری شود (Brender, 2020; Seddighi & Shayesteh, 2024). با توجه به این خطرات، نیاز به تغییر در شیوه های کوددهی متداول ضرورت پیدا می کند. در این مقاله ابتدا به اهمیت استفاده از کودهای ازته، میزان تولید و مصرف آن در ایران و جهان اشاره می شود. سپس کودهای آهسته رهش معرفی و روش های تولید آن به اختصار تشریح می شوند. همچنین انواع مواد آلی و معدنی که از آن ها در سیستم ماتریسی و یا پوشش دار جهت رهش کند مواد مغذی مورد استفاده قرار می گیرند، ارائه می شوند. در ادامه اهمیت استفاده از کودهای آهسته رهش و معایب آن ها بررسی می شوند. سپس، رویکرد ایران و جهان به کودهای آهسته رهش براساس داده های آماری، مورد توجه قرار می گیرد. به بیان دیگر، این مقاله به بررسی وضعیت کنونی و چشم انداز آینده ایران و جهان در زمینه تولید و مصرف کودهای آهسته رهش می پردازد.

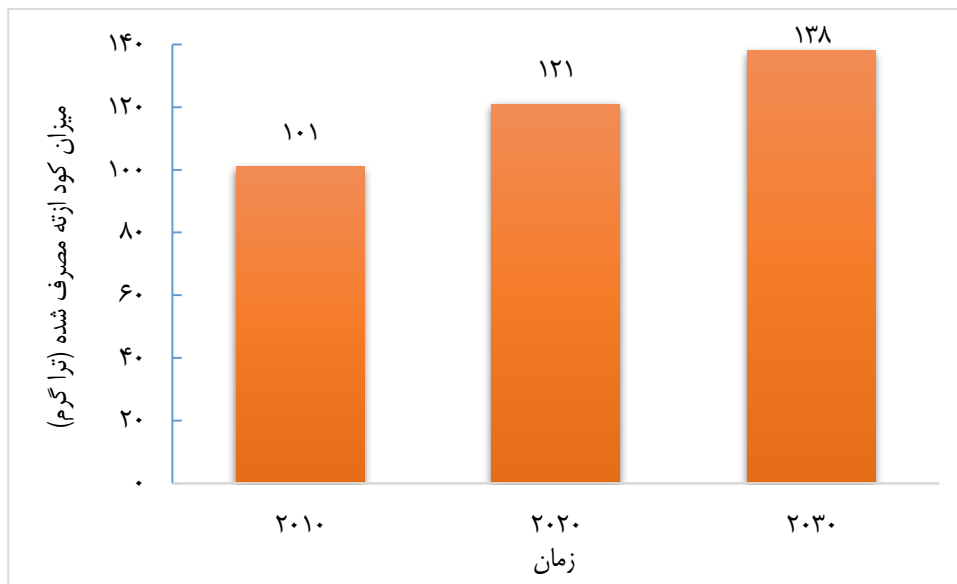
۲- روش انجام تحقیق

برای ارزیابی تأثیر کودهای آهسته رهش، جستجوی جامعی با استفاده از کلمات کلیدی نظیر "کودهای آهسته رهش"، "تولید و مصرف کودهای ازته"، "اهمیت کودهای پوشش دار و ماتریسی"، "روش های تولید کودهای پوشش دار و ماتریسی"، "میزان تولید و مصرف کودهای آهسته رهش در کشورهای مختلف"، و "استفاده از مواد معدنی و آلی به عنوان پوشش یا ماتریس ماده مغذی" در پایگاه های علمی Google Scholar، ScienceDirect، ResearchGate، Scopus و ACS صورت گرفت. داده های استخراج شده شامل مقالات، کتب، و گزارش های سازمانی مختلف بود که عمدتاً بر تحقیقات علمی اخیر منتشر شده در این پایگاه های اطلاعاتی تمرکز داشتند. علاوه بر این، آمار مربوط به تولید و مصرف کودهای ازته و کودهای آهسته رهش در ایران نیز از طریق وزارت جهاد کشاورزی اخذ گردید.

۳- نتایج

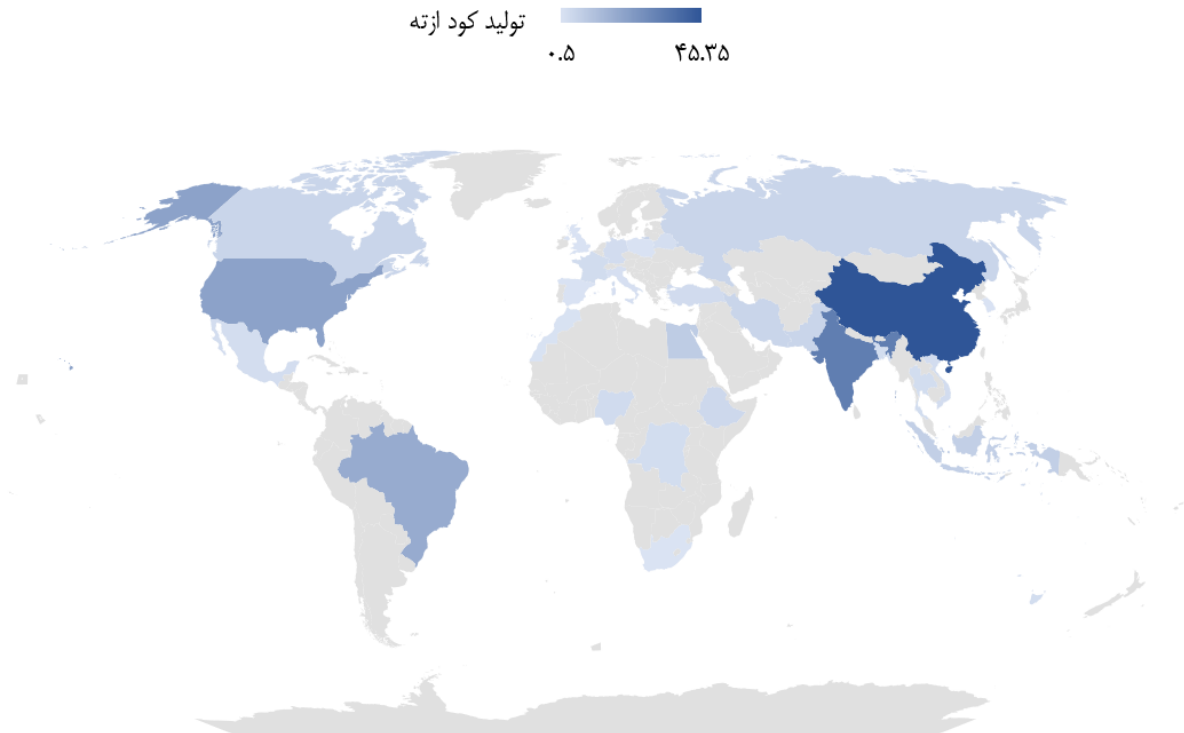
سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (فائو) در سال ۲۰۱۰ حدود ۱۵۴۷ میلیون هکتار زمین قابل کشت در سطح جهان را گزارش کرد که پیش بینی می شود این رقم در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰، ۱۸۰ میلیون هکتار در سطح جهان افزایش یابد. همچنین فائو رشد سالانه ۲ درصدی در مورد نیاز کلی کود را تا سال ۲۰۳۰ پیش بینی کرده است. در نتیجه، متوسط نیاز سالانه کود نیتروژن ۱۳۲ تراگرم برآورد شده است. در مقابل، پیش بینی می شود که کودهای فسفره و پتاسه به ترتیب نرخ رشد سالانه ۱/۹٪ و ۲/۳٪ را تجربه کنند. بسته به نرخ رشد تقاضای کودهای ازته، پیش بینی می شود تا سال ۲۰۳۰ تقاضای کودهای ازته به بین ۱۲۴ تا ۱۳۸ تراگرم برسد. همچنین انتظار می رود سهم منطقه ای در رشد تقاضای کود ازته به طور قابل توجهی تغییر کند. پیش بینی ها نشان می دهد که چین و هند تأثیر کمتری نسبت به سال ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۰ بر میزان تولید کودهای ازته خواهند داشت، ولی همچنان کشورهای تولیدکننده برتر کودهای ازته، چین، هند،

آمریکا و اتحادیه اروپا هستند. همچنین، غلات با ۴۶٪ افزایش در تقاضای جهانی برای کودهای ازته، در مکان اول و سبزیجات و میوه‌ها با سهم ۲۰٪، در مکان دوم قرار دارند (Heffer & Prud'homme, 2016). شکل ۱، پیش‌بینی مصرف جهانی کود ازته را تا سال ۲۰۳۰ نشان می‌دهد (Gil-Ortiz et al., 2020).

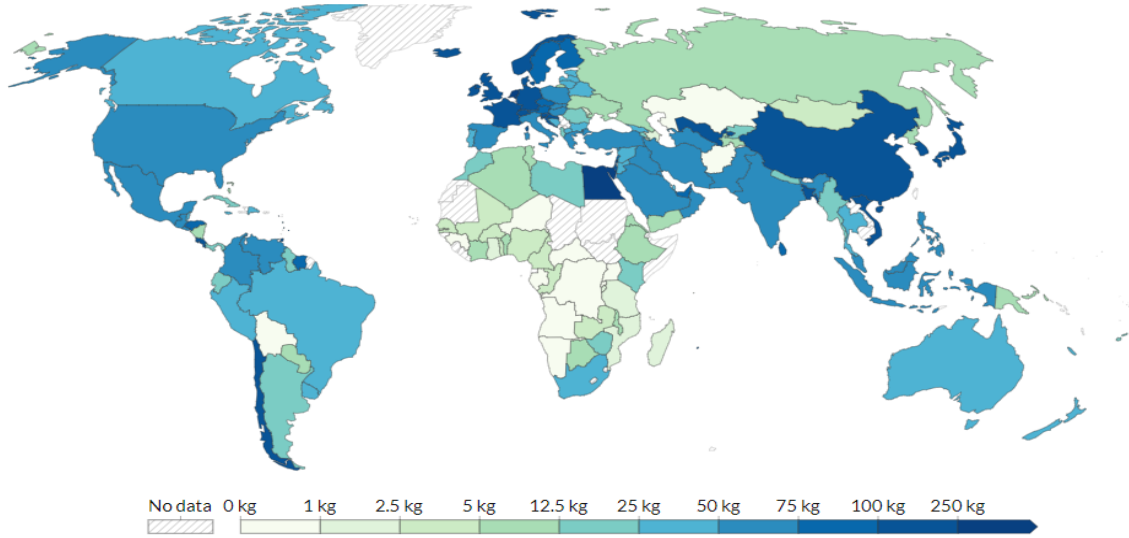


شکل ۱. تخمین مصرف جهانی کود ازته تا سال ۲۰۳۰ (Heffer & Prud'homme, 2016)

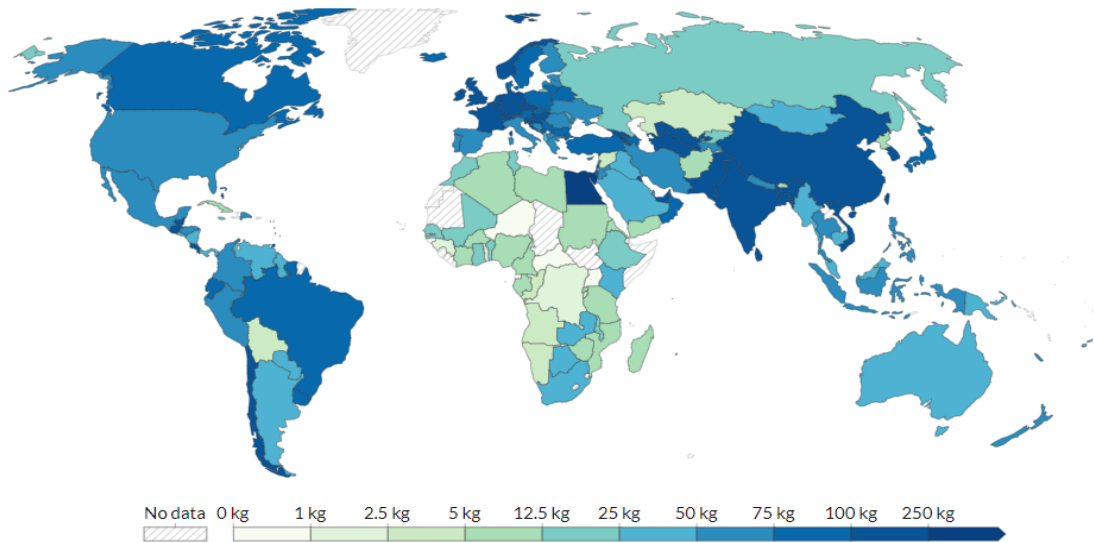
شکل ۲ تولید جهانی کودهای ازته در سال ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست، بزرگترین تولیدکننده کود در جهان قاره آسیاست (Hannah Ritchie, 2022). همچنین شکل‌های ۳ و ۴ مصرف کودهای ازته در کشورهای مختلف را به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. همان‌طوری که از رنگ پهنه‌بندی پیداست، مصرف کود ازته در سراسر جهان رو به افزایش است. همچنین شکل ۵ روند مصرف کودهای ازته، فسفره و پتاسه را براساس گزارش وزارت جهاد کشاورزی ایران نشان می‌دهد. این اعداد با تحقیقات و پیگیری‌های گسترده به‌دست آمده‌اند. همچنین داده‌های ارائه‌شده، با تلورانس حدود ۵ درصد خطا قابل قبول می‌باشند.



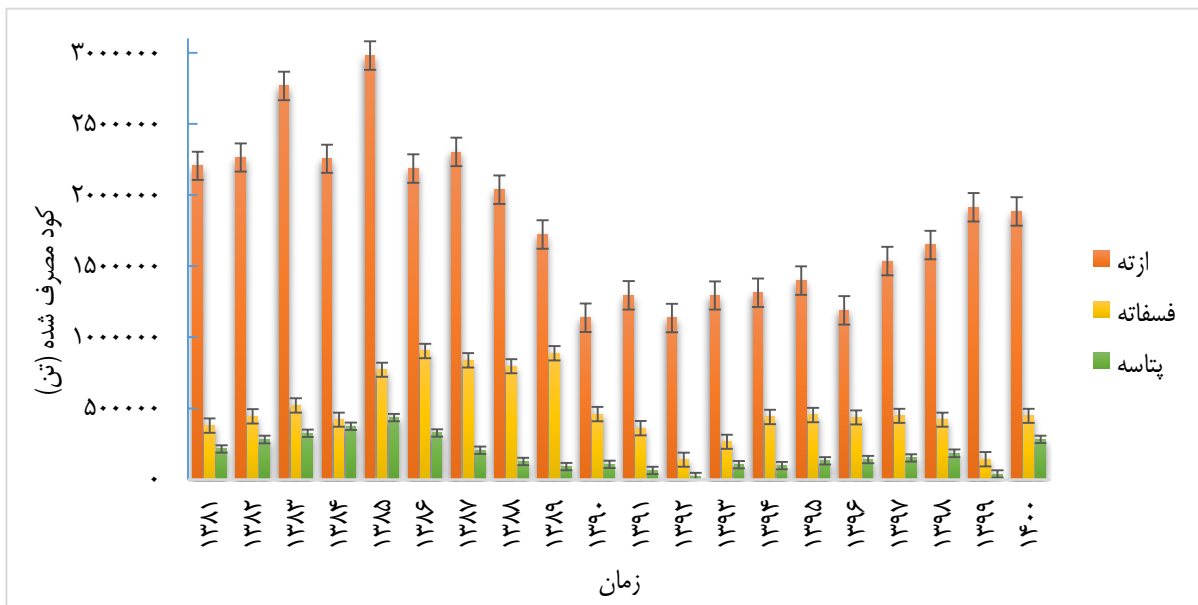
شکل ۲. نقشه تولید کودهای ازته در برخی کشورها در سال ۲۰۲۰ برحسب میلیون تن (Statista, 2023b)



شکل ۳. نقشه مصرف کودهای ازته در هر هکتار از زمین کشاورزی در سال ۲۰۰۰ (Hannah Ritchie, 2022)



شکل ۴. نقشه مصرف کودهای ازته در هر هکتار از زمین کشاورزی در سال ۲۰۲۲ (Hannah Ritchie, 2022)



شکل ۵. نمودار مصرف کودهای ازته، فسفره و پتاسه در ایران طبق گزارش وزارت جهاد و کشاورزی (statistics, 1381-1400)

• کودهای آهسته‌رهش

استفاده از کودهای آهسته‌رهش یکی از امیدوارکننده‌ترین راه‌ها برای افزایش فواصل کوددهی، استفاده کمتر از کود، بهبود کیفیت محصول و کاهش نگرانی‌های زیست‌محیطی است (Moradi et al., 2022). پوششی که روی این کودها قرار می‌گیرد، آزادسازی مواد مغذی محلول در آب را کاهش می‌دهد (Du et al., 2006). کودهای آهسته‌رهش را می‌توان به دو روش ماتریسی و پوشش‌دار تولید کرد (Lawrencia et al., 2021). کودهای پوشش‌دار با پوشاندن مواد مغذی با لایه‌ای از ماده پوشاننده، سرعت رهاسازی مواد مغذی را تنظیم می‌کنند (Dimkpa et al., 2020). در کودهای کنترل‌رهش، انتشار طولانی و هماهنگ کودهای پوشش‌دار با نیازهای گیاه مطابقت دارد. این امر علاوه بر بهبود تغذیه و بهره‌وری محصول، استفاده مؤثرتر از نیتروژن را تضمین می‌کند و اعتماد کشاورزان را به تولید محصول با هزینه پایین‌تر، افزایش می‌دهد (Seddighi et al., 2023a). در هر حال ایجاد پوشش مناسب بر روی ماده موثره، سرعت رهش کود را کاهش می‌دهد. کودهای آهسته‌رهش را می‌توان با استفاده از رویکرد ماتریسی نیز تولید کرد. این تکنیک با پراکندگی کود در سراسر ماتریس پلیمر، باعث می‌شود که مواد مغذی با کندی در آب حل و به محیط نفوذ کنند (Seddighi et al., 2023b). به‌طور کلی، در سیستم‌های آهسته‌رهش از دو دسته مواد آلی و معدنی استفاده می‌شود. پوشش‌های معدنی شامل گوگرد، فسفوژن و بنتونیت هستند. در حالی که پوشش‌های آلی شامل پلی‌اتیلن، پلی‌بورتان، پلی‌اتر سولفون، پلی‌استایرن و آلکید رزین می‌باشند. دسته‌ای دیگر از پلیمرهای آلی، پلیمرهای طبیعی می‌باشند. برخی از پلیمرهای طبیعی شامل دی‌اکسید سیلیکون، کیتوزان، سلولز، لیگنین، نشاسته، آلژینات و لاستیک طبیعی هستند (Mumtaz et al., 2019; Shi et al., 2020). کودهای پوشش‌دار آهسته‌رهش می‌توانند مواد مغذی پایدار و بادوامی را برای گیاه فراهم کنند و بازده و کیفیت محصول نهایی را بهبود بخشند. آن‌ها همچنین سبب صرفه‌جویی در هزینه‌ها، حفاظت از محیط‌زیست و استفاده حداکثر گیاه از مواد مغذی می‌شوند (Lam et al., 2022; Lawrencia et al., 2021).

• مزایا و معایب به‌کارگیری کودهای آهسته‌رهش پوشش‌دار و ماتریسی

کودهای پوشش‌دار منبع ثابتی از مواد مغذی را ارائه می‌دهند. کاهش اوتروفیکاسیون، افزایش راندمان استفاده از مواد مغذی، آلودگی کمتر آب و کاهش تلفات مواد مغذی تنها برخی از مزایای کودهای پوشش‌دار است. آن‌ها همچنین به کاهش شسته‌شدن و تصعید، طولانی‌شدن رهاسازی مواد مغذی و صرفه‌جویی در هزینه‌های نیروی کار کمک می‌کنند (Dimkpa et al., 2023; Es' haggi et al., 2024). با دادن مواد مغذی کافی و متعادل به گیاهان، کودهای پوشش‌دار می‌توانند رشد گیاه را تسریع کرده و عملکرد کشاورزی را افزایش دهند. این کودها همچنین می‌توانند pH خاک را تغییر دهند. در نتیجه، بر روی کیفیت خاک و رشد گیاه تاثیر مثبتی می‌گذارند (Dobermann et al., 2022; Gruhn et al., 2000). همچنین کودهای پوشش‌دار می‌توانند با تقویت ساختار خاک و حفظ آب، به کاهش فرسایش خاک کمک کنند. علاوه بر این، کودهای پوشش‌دار ممکن است مقاومت بسیار بیشتری در برابر شستشوی مواد مغذی در رواناب از خود نشان دهند (Vejan et al., 2021). با تغییر ضخامت و کیفیت پوشش کودهای پوشش‌دار، براساس نیازهای منحصر به فرد گیاهان، می‌توان کنترل بهتری بر رهش مواد مغذی داشت (Shaviv & Mikkelsen, 1993). این امر علاوه بر جلوگیری از کوددهی بیش از حد، می‌تواند منجر به تغذیه پایدارتر گیاه، بهبود رشد و افزایش عملکرد شود. در نتیجه، با توجه به مزایای ارائه‌شده، کودهای پوشش‌دار مقرون به‌صرفه هستند (Chandra et al., 2019). علیرغم مزایای بسیار خوب کودهای پوشش‌دار، این کودها دارای معایبی هم هستند (ME Trenkel, 2021; Qi et al., 2021; Shaviv, 2001):

- ❖ **هزینه:** کشاورزان و افراد کم درآمد کمتر از کودهای آهسته‌رهش استفاده می‌کنند؛ زیرا کودهای پوشش‌دار اغلب گران‌تر از کودهای متداول هستند.
- ❖ **آهسته‌رهش:** چون کودهای پوشش‌دار مواد مغذی را به تدریج آزاد می‌کنند، رشد و نمو گیاه ممکن است در ابتدا کند باشد. هنگامی که رشد گیاهان سرعت پیدا کند، کودهای پوشش‌دار کمتر موثر هستند.
- ❖ **اثرات زیست‌محیطی:** استفاده بیش از حد یا نادرست از کودهای پوشش‌دار ممکن است منجر به آلودگی آب شود. شکوفه‌های جلبکی ناشی از مواد مغذی زیاد می‌تواند کیفیت آب را کاهش داده و زندگی آبزیان را به خطر بیندازد.
- ❖ **مشکلات تولید:** اطمینان از ضخامت پوشش، استحکام کود و کیفیت پوشش در طول تولید کود آهسته‌رهش مسائلی را ایجاد می‌کند که کنترل کیفیت دقیق‌تری را می‌طلبد.

• تولید کود آهسته‌رهش ماتریسی

کودهای معمولی با استفاده از این تکنیک به‌طور مساوی در سراسر ماتریس پراکنده می‌شوند. سپس مواد مغذی در حین استفاده در ماتریس آزاد شده و متعاقباً به‌صورت محلول در آب به محیط تخلیه می‌شوند (Al-Rawajfeh et al., 2021). جاسازی و آزادسازی اوره در ماتریس لیگنین سولفونات استیل‌شده توسط شایسته و صادقی (Shayesteh & Sadeghi, 2017) بررسی شد. ابتدا اوره و لیگنین

سولفونات استیل‌شده را در ظرف شیشه‌ای قرار دادند. سپس، آن را در یک حمام پارافین گرم کردند تا مواد اولیه به خمیر تبدیل شوند. مواد اولیه با هم مخلوط تا ترکیب یکنواختی حاصل شود. سپس مذاب در قالب قرار داده شدند تا فرآیند قالب‌گیری انجام شد. به نظر می‌رسد که استحکام کامپوزیت تابع زمان و شیب دمای قالب‌گیری است. آن‌ها سپس رهش نیتروژن در آب را بررسی کردند (Mohammadzadeh, 2020). کاوسینا و همکاران (Kaavessina et al., 2021) از پلی‌اسید لاکتیک در یک سیستم ماتریس برای ایجاد کود اوره آهسته‌رهش استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که پلی‌اسید لاکتیک با وزن مولکولی بالاتر با کاهش نفوذپذیری، آزادسازی اوره را کاهش می‌دهد. مرادی و همکاران در مطالعه خود (Moradi, Shayesteh, & Mohammadzadeh, 2022) یک کامپوزیت اوره/لیگنین سولفونات استیل‌شده ایجاد کردند. از طریق مدل‌سازی ریاضی فرآیند رهاسازی، تاثیر آشفته‌گی محیط بر نرخ رهاسازی را بررسی کردند. تکنیک تولید کامپوزیت اوره/لیگنین سولفونات استیل‌شده در شکل ۶ ارائه شده است.



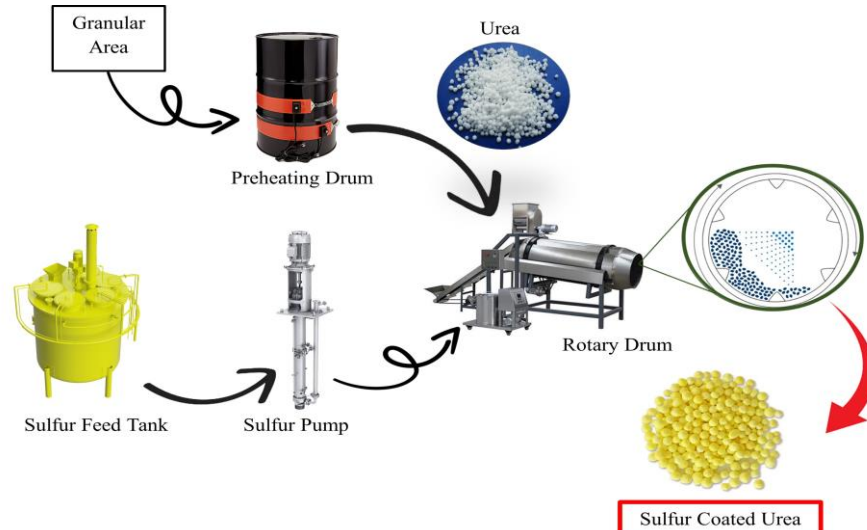
شکل ۶. تولید کود اوره آهسته‌رهش به روش ماتریس با استفاده از لیگنین سولفونات استیل‌شده (Mohammadzadeh et al., 2024; Moradi, Shayesteh, & Mohammadzadeh, 2022)

در تحقیقی دیگر، کود اوره ابتدا توسط نی و همکاران (Ni et al., 2009) در ماتریسی از آلزینات، پلی‌نیتروژن و وینیل پیرولیدون کپسوله شد. پس از ۳۰ روز، آن‌ها متوجه شدند که کمتر از ۷۵٪ از کود در خاک رها شده است. جین و همکاران (Jin et al., 2013) از هیدروژل پلی‌اکریلیک اسید کو-آکریل آمید و نشاسته ذرت برای تولید کودهایی با فسفر و نیتروژن بالا استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که ۶۰٪ نیتروژن در ۳۰ روز منتشر شد. لوم و همکاران (Lum et al., 2016) اسید بوریک و کود اوره را در یک ماتریس پلیمری نشاسته/پلی وینیل الکل ترکیب کردند. آن‌ها متوجه شدند که با افزایش مقدار اسید بوریک و طولانی شدن زمان واکنش در دماهای بالا، تورم کاهش و استحکام مکانیکی ماتریس افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) از سیستم ماتریس برای ایجاد کود اوره آهسته‌رهش استفاده کردند. اوره آهسته‌رهش حاوی حدود ۵٪ مواد ماتریس آلی- معدنی بود که عمدتاً شامل پلی‌آکریل آمید (۰/۰۴٪)، نشاسته (۰/۰۶٪)، مونت موریلونیت (۳/۰٪) و سولفات آهن (۱/۹٪) بود. آن‌ها دریافتند که این کود برای رشد برنج بسیار عالی است؛ زیرا این پوشش، از دست‌رفتن ازت را کاهش می‌دهد.

• تولید کود آهسته‌رهش پوشش داده‌شده

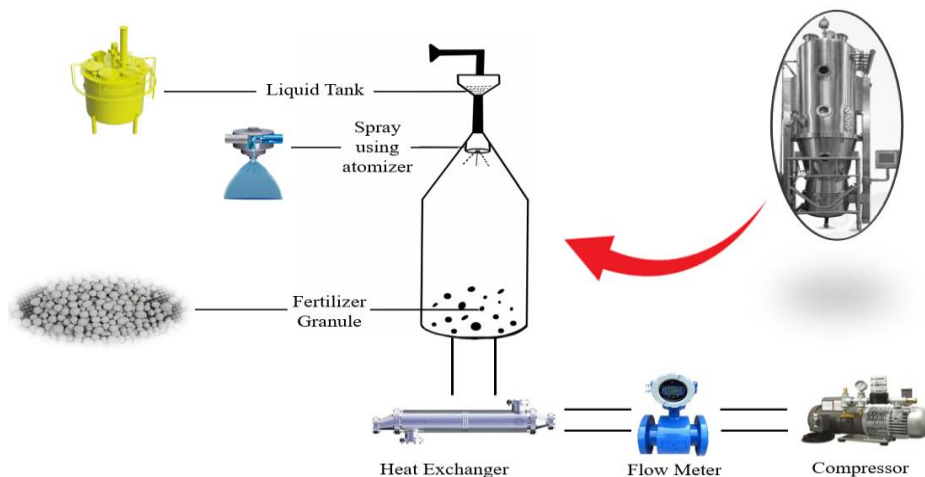
معمولاً برای پوشش‌دار کردن کودها از بسترهای سیال، دستگاه پن و روتاری درام^۱ استفاده می‌شود (Devassine et al., 2002). علیرغم کاربرد گسترده صنعتی آن‌ها، هر سه روش دارای اشکالاتی است. مواد اضافی را می‌توان در فرآیند روتاری درام برای ایجاد ضخامت لایه پوششی همگن استفاده کرد. از مکانیزم دستگاه پن برای جابجایی کود درون یک ظرف استوانه‌ای استفاده می‌شود و پوشش روی دانه‌ها اسپری می‌گردد. علاوه بر این، خشک کردن با استفاده از هوای گرم صورت می‌گیرد (Dawn et al., 2009). گچ، اپوکسی و پلی‌یورتان اغلب به عنوان مواد پوشش‌دهنده در این تکنیک استفاده می‌شوند (Beig et al., 2020; Sun et al., 1999). جهت تولید کود اوره با پوشش گوگردی، استفاده از روتاری درام یک روش مناسب می‌باشد. پوشش گوگردی یکی از اولین پوشش‌ها جهت تولید تجاری کود آهسته‌رهش است. گوگرد به دلیل تخریب‌پذیر بودن و قابل استفاده بودن برای رشد گیاه خصوصاً در اراضی قلیایی، بسیار مورد توجه می‌باشد (Purnomo & Saputra, 2021). فرآیند تولید اوره پوشش‌دار با گوگرد در شکل ۷ نشان داده شده است.

¹ Fluidized bed, Pan coater, and rotary drum



شکل ۷. فرآیند تولید اوره پوشش داده شده با گوگرد (Purnomo & Saputra, 2021; Seddighi et al., 2024)

تولید اوره با پوشش گوگردی شامل استفاده از یک درام برای پاشیدن گوگرد مذاب بر روی دانه‌های اوره است. برای دستیابی به یک پوشش ثابت، گرم کردن گرانول‌ها در دمایی بین ۵۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد ضروری است. ساخت و کنترل صحیح سیستم پاشش گوگرد مذاب برای به دست آوردن پوشش نازک و یکنواختی روی سطح اوره بسیار مهم است. هر گونه پوشش ناهموار می‌تواند منجر به انحلال سریع اوره در نواحی بدون پوشش یا با پوشش ضعیف در حین استفاده از کود در محیط آبی شود. اوره مذاب در دمای ۱۵۰-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اسپری می‌گردد (Purnomo & Saputra, 2021). در روش بستر سیال ابتدا کودی که می‌خواهد پوشش‌دار شود را با استفاده از جریان هوای گرم، پیش‌گرم می‌کنند. سپس با پاشیدن مواد مذاب موردنظر، مانند گوگرد یا پلیمرها از جمله پلیمرهای زیستی، کود پوشش‌دار تولید می‌شود. این تکنیک دارای مزایایی مانند انتقال حرارت و جرم بالا، مصرف انرژی کم، ضخامت پوشش یکنواخت و هزینه عملیاتی پایین است. با این حال، دارای معایبی مانند زمان پردازش طولانی، هزینه‌های بالای تجهیزات، و کاهش اثربخشی برای دانه‌های بزرگتر است (Nickerson et al., 2014; Seddighi et al., 2024; Teunou & Poncelet, 2002). در فرآیند کپسوله‌سازی، سرعت جریان و دمای هوای گرم باید به گونه‌ای باشد که دانه‌های کود وارد شده، به خوبی گرم شوند. هنگامی که دمای دانه‌های کود به مقدار مشخصی رسید، محلول مذاب یا محلولی که به عنوان پوشش استفاده می‌شود از طریق نازل روی بذر کود پاشیده می‌شود. با توجه به ویسکوزیته مذاب و اهمیت بالای اندازه مایع پاشیده شده، تامین فشار پشت اتومایزر ضروریست. بنابراین انتخاب پمپ مناسب بسیار مهم است. لوله‌های منتهی به نازل اتومایزر، توسط بخار گرم می‌شوند تا از انجماد مذاب در فرآیند اتمایزه شدن جلوگیری شود. پس از زمان ماند کافی برای کپسوله‌سازی مناسب گرانول‌ها، محصول از طریق درگاه خروج از ستون اسپری خارج می‌شود (Beig et al., 2020). شکل ۸ اجزای این ستون را نشان می‌دهد.



شکل ۸. تولید کودهای با پوشش پلیمری به روش بستر سیال (Beig et al., 2020; Purnomo & Saputra, 2021; Seddighi et al., 2024)

تحت شرایط عملیاتی معمولی و هنگام استفاده از دستگاه پم، کنترل رطوبت نسبی غیرممکن است. همچنین، با این دستگاه نمی‌توان ضخامت یکسانی برای کودها ایجاد کرد. در مقابل، در فرآیند بستر سیال، کودهای پوشش‌دار با ضخامت ثابت و کیفیت بالا تولید می‌شود (Naz & Sulaiman, 2016). عظیم و همکاران (Azeem et al., 2016) از تکنیک بستر سیال به کمک پوشش نشاسته تیمار شده با پلی‌وینیل الکل جهت تولید کود اوره پوشش‌دار استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش ضخامت پوشش، رها سازی کاهش

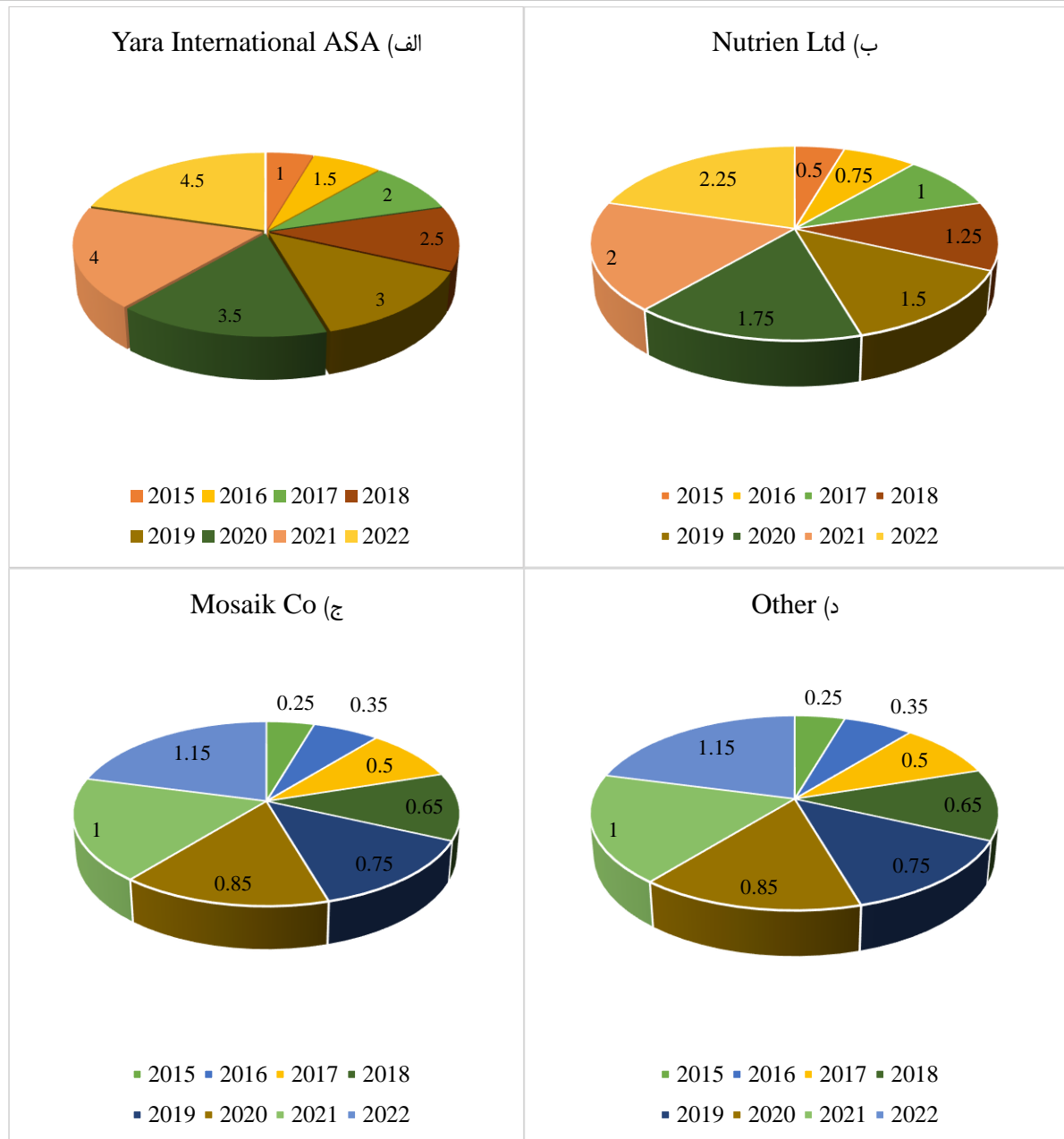
می‌یابد. بیگ و همکاران (Beig et al., 2020) با استفاده از گوگرد و در روش بسترسیال، کود اوره را پوشش دادند. در مقایسه با اوره بدون پوشش، آن‌ها متوجه شدند که استحکام گرانول‌ها تا سه برابر افزایش یافته است. صدیقی و همکاران (Seddighi et al., 2024) کود اوره را با لیگنین سولفونات استیل‌شده پوشش دادند. آن‌ها ابتدا لیگنین را با استفاده از دکانویل کلراید استیل‌شده پوشش دادند. سپس اوره را با لیگنین سولفونات استیل‌شده به روش بستر سیال پوشش دادند. در ادامه مقدار آزاد سازی ازت در آب را در زمان‌های مختلف مطالعه کردند. در نهایت با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، فرایند رهش را بررسی کردند. چند روش شیمیایی نیز جهت پوشش‌دهی کودها وجود دارد. این روش‌ها شامل پلیمریزاسیون معکوس سوسپانسیون، پلیمریزاسیون محلول / اتصال عرضی و تابش امواج مایکروویو است (Seddighi et al., 2024). مونومرها، آغازگرها و اتصال‌دهنده‌های عرضی از مهم‌ترین عوامل جهت تولید هیدروژل هستند؛ زیرا غلظت آن‌ها بر خواص هیدروژل تأثیر می‌گذارد. پلیمریزاسیون محلولی، به‌عنوان یک واکنش اتصال عرضی نیز شناخته می‌شود. این فرایند با مخلوط کردن مونومر و آغازگر، که باید در حلال انتخاب‌شده محلول باشند، انجام می‌گردد. حلال مورد استفاده ویسکوزیته واکنش را کاهش داده و موجب ساده‌تر شدن واکنش می‌شود. با این حال، بازیابی حلال به دلیل مخلوط شدن مونومر و آغازگر با عوامل اتصال‌دهنده عرضی، دشوار است و به دلیل سرعت کند واکنش، کارایی فرایند کپسوله‌سازی، کاهش می‌یابد (Ahmed, 2015; El Assimi et al., 2022). پلیمریزاسیون سوسپانسیون معکوس از مونومرها و آغازگرهای آبدوست استفاده می‌کند که به‌طور همگن در فاز هیدروکربنی (آب در روغن) پراکنده می‌شوند. این سیستم از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است و نیاز به هم‌زدن مداوم دارد. از آنجایی که واکنش حاصل در حلال نامحلول است، حلال را می‌توان بازیافت کرد که موجب صرف‌جویی در هزینه‌ها می‌شود. همچنین، سرعت بیشتر واکنش می‌تواند راندمان کپسوله‌سازی را بهبود بخشد. با این حال، احتمال آلودگی در داخل سوسپانسیون وجود دارد که نیازمند فرایندهای تصفیه بیشتر در مراحل بعدی است (Ahmed, 2015; Bajpai et al., 2007; Singh et al., 2023). روش دیگر برای تولید هیدروژل کودهای آهسته‌رهش، استفاده از پلی‌ساکاریدهای طبیعی از جمله نشاسته، آلژینات و ژلاتین یا پلیمرهای آبدوست مصنوعی مانند پلی‌وینیل پیرولیدون پیوند شده با اسید اکریلیک و مونومر آکریل آمید است. N,N-متیلن بیاکریلامید به‌عنوان اتصال‌دهنده عرضی و پر سولفات آمونیوم از پرکاربردترین مواد در این فرایند محسوب می‌شوند. بیشتر مواد لازم در فرمولاسیون در آب محلول هستند و این فرایند را از نظر زیست‌محیطی ایمن می‌کند. با این حال، برخی از مواد لازم در فرمولاسیون نیاز به استفاده از حلال‌های آلی مانند ایزوپروپانول، N,N-دی‌متیل فرمامید و ۲،۲-دی‌متوکسی پروپان دارند (El Assimi et al., 2022; Ibrahim et al., 2016; Olad et al., 2018; Tariq et al., 2023). روش دیگر پلیمریزاسیون، تابش است که منجر به تشکیل ماکرورادیکال‌ها می‌شود. زمانی که این ماکرورادیکال‌ها روی زنجیره‌های مختلف باز ترکیب می‌شوند، پیوندهای کووالانسی و ساختارهای اتصال عرضی ایجاد می‌کنند (Qi et al., 2016; Wen et al., 2022). شبکه‌های نیمه‌نفوذی بر پایه ساقه‌های پنبه، ذرت و بیوچار، با استفاده از تابش مایکروویو در توان ۳۲۰ وات به مدت ۴/۵ دقیقه سنتز شدند. این روش به‌عنوان یک مسیر سازگارتر با محیط زیست برای سنتز شیمیایی شناخته می‌شود؛ زیرا ساده، کارآمد و کم‌مصرف است. با این حال، این روش هنوز به‌طور گسترده در تهیه کودهای آهسته‌رهش مورد استفاده قرار نگرفته است (Ahmed, 2015; Qi et al., 2022).

• آمار تولید کود آهسته‌رهش

انتظار می‌رود بین سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۸، بازار کودهای پوشش‌دار با نرخ رشد سالانه ۷/۲ درصدی در سراسر جهان توسعه یابد. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۸ گردش مالی صنعت تولید کود به ۵/۹ میلیارد دلار برسد. در نتیجه، کودهای پوشش‌دار به‌طور فزاینده‌ای در آسیا-اقیانوسیه، آمریکای شمالی و اروپا توسعه می‌یابند (Statista, 2023a). از جمله بزرگترین شرکت‌های تولیدکننده کودهای آهسته‌رهش پوشش‌دار در سراسر جهان می‌توان به Yara International ASA در نروژ، Nutrien Ltd در کانادا، The Mosaic Company در فلوریدا ایالات متحده آمریکا و Kingenta Ecological Engineering Group در چین اشاره کرد. مطابق شکل ۹، میزان تولید کودهای پوشش‌دار برخی از شرکت‌های مهم ارائه شده است. اوره پوشش‌دار با گوگرد، اوره پوشش‌دار با پلیمر و اوره پوشش‌دار با سولفور و پلیمر برخی از پرمصرف‌ترین کودهای پوشش‌دار هستند. میزان تولید کودهای آهسته‌رهش به نوع پوشش، ضخامت و کیفیت دانه‌های کود بستگی دارد (Garcia et al., 1998). چین حدود ۳۶٪ از کودهای پوشش‌دار جهان را با استفاده از پوشش گوگردی تولید می‌کند. ۲۵٪ درصد کودهای پوشش‌دار در هند با استفاده از گچ، ۱۱٪ در برزیل با پوشش بنتونیت، ۱۰٪ در روسیه با پوشش تالک و ۱۴٪ باقی‌مانده در سایر کشورها تولید می‌شوند. چند شرکت ایرانی نیز در زمینه کود اوره با پوشش گوگردی، فعال هستند. شرکت بازگانی آموت ایرانیان، شرکت زیست پزشکی سبز، شرکت سلف‌شیمی، شرکت کود اوره لردگان و پتروشیمی سرخس در این زمینه فعال‌اند. با توجه به مزایای فراوان کودهای آهسته‌رهش و فراوانی و ارزان بودن گوگرد در ایران، انتظار می‌رود سرمایه‌گذاری جدی‌تری صورت گیرد.

¹ N,N-methylene biacrylamide

² N,N-di-methyl-formamide & 2,2- di-methoxy-propane



شکل ۹. میزان تولید کودهای پوشش‌دار در شرکت‌های مهم جهان (میلیون تن): الف) Yara International ASA، ب) Nutrien Ltd، ج) شرکت Mosaik، و د) سایر شرکت‌ها (Yadav, 2023)

• آینده کودهای آهسته‌رهش

تقاضای بازار، در دسترس بودن مواد خام، قیمت‌های تولید و محدودیت‌های زیست‌محیطی، همگی بر سرمایه‌گذاری در تولید کودهای آهسته‌رهش تأثیر می‌گذارند. بنظر می‌رسد که با افزایش آگاهی بیشتر کشاورزان از مزایای دیگر کودهای آهسته‌رهش از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر، بهبود سلامت خاک و محصول و همچنین صرفه‌جویی در هزینه، تمایل برای استفاده بیشتر از کودهای آهسته‌رهش افزایش یابد؛ لذا با آگاهی بیشتر کشاورزان از اهمیت استفاده از کودهای آهسته‌رهش، میزان تقاضا جهت استفاده از کودهای آهسته‌رهش بیشتر شود. به‌دلیل منابع عظیم نفت و گاز ایران، پالایشگاه‌های نفت و گاز جهت شیرین‌سازی نفت و گاز، گوگرد زیادی تولید می‌کنند. با توجه به فراوانی گوگرد در ایران، هزینه تولید کودهای آهسته‌رهش با پوشش گوگردی در مقایسه با سایر مناطق جهان پایین‌تر می‌باشد. در نتیجه افزایش تولید این محصول در ایران ممکن است با انگیزه صادرات کمک زیادی به تولیدکنندگان کند؛ لذا سرمایه‌گذاری بر روی کودهای ازته با پوشش گوگردی می‌تواند برای سرمایه‌گذاران، بسیار جذاب باشد. یکی از پلیمرهای زیستی که می‌تواند در تولید کودهای آهسته‌رهش بسیار مفید باشد، لیگنین است. لیکور سیاه و پساب کارخانه‌های چوب‌کاغذ منبع طبیعی بایوپلیمر لیگنین هستند. در صورت وارد شدن لیکور سیاه به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، مشکلات زیست‌محیطی جدی ایجاد می‌شود. در نتیجه، حذف لیگنین از لیکور سیاه می‌تواند به کاهش سطح آلودگی در محیط کمک کند (Behboudi et al., 2021). همچنین تولید لیگنین از لیکور سیاه می‌تواند یک محصول جانبی ارزشمند برای کارخانه‌های چوب و کاغذ باشد. از آنجایی که لیگنین آب‌دوست است، باید ابتدا استیله شود تا به ماده‌ای آب‌گریز تبدیل گردد. لذا با مواد مختلفی مانند دکانووایل کلراید، اگزالیک اسید و انیدرید اسید می‌توان به این مهم دست یافت (Sadeghi et al., 2017; Seddighi et al., 2024; Shayesteh & Mohammadzadeh, 2024; Shayesteh)

(Zamanloo, 2020). مطالعات نشان می‌دهد که لیگنین به‌عنوان پوشش کودهای آهسته‌رهش، عملکرد بهتری در رهش ماده مغذی از کود نسبت به پوشش‌های گوگردی دارد. (Mohammadzadeh, 2020; Sadeghi, 2016; Sadeghi et al., 2017). پیش‌بینی می‌شود بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، صنعت محصولات کشاورزی ایران با نرخ رشد مرکب سالانه ۳/۸٪ توسعه یابد. به‌منظور افزایش صادرات و تامین نیاز داخلی مواد غذایی، دولت به رشد این صنعت کمک می‌کند. به‌عنوان بخشی از این تلاش، دولت قصد دارد تا سال ۲۰۲۷ سطح زیرکشت گلخانه‌ای را به‌میزان زیادی افزایش دهد. پیش‌بینی می‌شود که این استراتژی منجر به استفاده بیشتر از کودها، به ویژه کودهای آهسته‌رهش شود. تولید کود به‌ویژه کودهای ازته در مقیاس جهانی در حال افزایش است. در نتیجه، ایران به‌مانند دنیا، روند افزایشی در تولید کودهای آهسته‌رهش خواهد داشت (Intelligence, 2023).

۴- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های مهم جهت علاقمند نمودن کشاورزان به استفاده از کودهای آهسته‌رهش، شناساندن مزایای این دسته از کودها به کشاورزان و مروجین کشاورزی است. کودهای آهسته‌رهش با ارائه یک جایگزین پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای کودهای سنتی، صنعت کشاورزی را متحول کرده‌اند. این کودها مواد مغذی را به آرامی و به‌طور مداوم آزاد می‌کنند، عملکرد محصول را بهبود می‌بخشند و آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی به نیترات و نیتريت را به‌حداقل می‌رسانند. علاوه بر این، با آگاهی بیشتر کشاورزان از مزایای کودهای آهسته‌رهش از جمله انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای، بهبود سلامت خاک و محصول و همچنین صرفه‌جویی در هزینه، میزان تقاضا جهت استفاده از کودهای آهسته‌رهش افزایش می‌یابد. تقاضای بازار، در دسترس بودن مواد خام، قیمت‌های تولید و محدودیت‌های زیست‌محیطی، همگی بر سرمایه‌گذاری در تولید کودهای آهسته‌رهش تأثیر می‌گذارند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تولید جهانی کودهای آهسته‌رهش در حال افزایش است. ایران به‌دلیل داشتن منابع عظیم نفت و گاز و دسترسی به گوگرد ارزان قیمت می‌تواند با سرمایه‌گذاری بیشتر در زمینه تولید کودهای ازته آهسته‌رهش با پوشش گوگردی در این رقابت جهانی، گوی سبقت را از رقبای براباید؛ لذا با توجه به نیاز جهانی کودهای آهسته‌رهش تولید کودهای ازته با پوشش گوگردی می‌تواند برای سرمایه‌گذاران و تولیدکنندگان ایرانی، بسیار پرمفعت باشد. علاوه بر این، کارخانه‌های چوب و کاغذ کشور می‌توانند به‌عنوان منبع پایدار لیگنین برای تولید کودهای آهسته‌رهش بسیار حائز اهمیت باشند. مطالعات نشان می‌دهد که لیگنین به‌عنوان پوشش کودهای آهسته‌رهش، عملکرد بهتری در رهش ماده مغذی نسبت به پوشش‌های گوگردی دارد. برای استفاده کامل از مزایای کودهای آهسته‌رهش در ایران، آموزش کشاورزان در مورد مزایای آن‌ها و جلب حمایت سرمایه‌گذاران و صنعتگران برای تقویت توسعه این محصول، حیاتی است. با پشتوانه و سرمایه‌گذاری لازم، ایران این پتانسیل را دارد که به‌عنوان یک پیشرو در تولید و کاربرد کودهای آهسته‌رهش معرفی شود و از این طریق به بخش کشاورزی پایدارتر و دوستانه‌تر محیط‌زیست کمک کند.

منابع

- Ahmed, E. M. 2015. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of advanced research*, Vol. 6, P. 105-121
- Al-Rawajfeh, A. E., Alrbaihat, M. R., & AlShamaileh, E. M. 2021. Characteristics and types of slow-and controlled-release fertilizers. In *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture*, Elsevier, P. 57-78
- Ayoub, A. T. 1999. Fertilizers and the environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Vol. 55, P. 117-121
- Azeem, B., KuShaari, K., & Man, Z. 2016. Effect of coating thickness on release characteristics of controlled release urea produced in fluidized bed using waterborne starch biopolymer as coating material. *Procedia engineering*, Vol. 148, P. 282-289
- Bajpai, S., Bajpai, M., & Sharma, L. 2007. Inverse suspension polymerization of poly (methacrylic acid-co-partially neutralized acrylic acid) superabsorbent hydrogels: synthesis and water uptake behavior. *Designed monomers and polymers*, Vol. 10, P. 181-192
- Behboudi, G., Shayesteh, K., Yarak, M. T., Ebrahimi, H. A., & Moradi, S. 2021. Optimized synthesis of lignin sulfonate nanoparticles by solvent shifting method and their application for adsorptive removal of dye pollutant. *Chemosphere*, Vol. 285, P. 131576
- Beig, B., Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Hussain, A., Zia, M. H., & Mehran, M. T. 2020. Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: A review. *Journal of plant nutrition*, Vol. 43, P. 1510-1533
- Brender, J. D. 2020. Human health effects of exposure to nitrate, nitrite, and nitrogen dioxide. *Just enough nitrogen: Perspectives on how to get there for regions with too much and too little nitrogen*, Vol., P. 283-294

- Chandra, M. S., Lal, M., Naresh, R., Yadav, S., Kumar, R., Kumar, R., Chand, S. W., Varsha, N., Chandan, P., & Lavanya, N. 2019. Role of polymer coated fertilizers (PCFS) an advance technology for improving nutrient use efficiency and crop productivity: A review. *International Journal of Chemical Studies*, Vol. 7, P. 2667-2679
- Chauhan, P., Singh, A., Singh, R., & Ibrahim, M. H. 2012. Environmental impacts of organic fertilizer usage in agriculture. *Organic fertilizers: types, production and environmental impact*, Vol., P. 63-84
- Dawn, Z., Liew, C. V., & Heng, P. W. 2009. Layered growth with bottom-spray granulation for spray deposition of drug. *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 377, P. 16-24
- Devassine, M., Henry, F., Guerin, P., & Briand, X. 2002. Coating of fertilizers by degradable polymers. *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 242, P. 399-404
- Dimkpa, C., Adzawla, W., Pandey, R., Atakora, W. K., Kouame, A. K., Jemo, M., & Bindraban, P. S. 2023. Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa: an overview of soil health implications. *Frontiers in Soil Science*, Vol. 3, P. 13
- Dimkpa, C. O., Fugice, J., Singh, U., & Lewis, T. D. 2020. Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency—Trends and perspectives. *Science of the Total Environment*, Vol. 731, P. 139113
- Dobermann, A., Bruulsema, T., Cakmak, I., Gerard, B., Majumdar, K., McLaughlin, M., Reidsma, P., Vanlauwe, B., Wollenberg, L., & Zhang, F. 2022. Responsible plant nutrition: A new paradigm to support food system transformation. *Global Food Security*, Vol. 33, P. 100636
- Du, C.-w., Zhou, J.-m., & Shaviv, A. 2006. Release characteristics of nutrients from polymer-coated compound controlled release fertilizers. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 14, P. 223-230
- El Assimi, T., Beniazza, R., Raihane, M., Youcef, H. B., El Meziane, A., Kricheldorf, H., & Lahcini, M. 2022. Overview on progress in polysaccharides and aliphatic polyesters as coating of water-soluble fertilizers. *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 19, P. 989-1007
- Es' hagi, P., Seddighi, H., Shayesteh, K., & Omrani, N. 2024. Exploring Nitrogen Release from Urea Fertilizer Coated with Biodegradable Acetylated Lignin Sulfonate: A Numerical Analysis Using the Crank-Nicolson Method. *Chemical Review and Letters*, Vol., P. -
- Garcia, C., Garcia, L., Vallejo, A., Cartagena, M., & Diez, J. 1998. Forecasting by laboratory tests of nitrogen leached and absorbed in soil-plant system with urea-based controlled-release fertilizers coated with lignin. *Communications in soil science and plant analysis*, Vol. 29, P. 2479-2491
- Gil-Ortiz, R., Naranjo, M. Á., Ruiz-Navarro, A., Caballero-Molada, M., Atares, S., García, C., & Vicente, O. 2020. New eco-friendly polymeric-coated urea fertilizers enhanced crop yield in wheat. *Agronomy*, Vol. 10, P. 438
- Gruhn, P., Goletti, F., & Yudelman, M. 2000. Integrated nutrient management, soil fertility, and sustainable agriculture: current issues and future challenges. *Intl Food Policy Res Inst.*
- Hannah Ritchie, M. R. a. P. R. 2022. Fertilizers. <https://ourworldindata.org/fertilizers>
- Heffer, P., & Prud'homme, M. 2016. Global nitrogen fertilizer demand and supply: Trend, current level and outlook. *International nitrogen initiative conference*. Melbourne, Australia,
- Ibrahim, S., Nawwar, G. A., & Sultan, M. 2016. Development of bio-based polymeric hydrogel: green, sustainable and low cost plant fertilizer packaging material. *Journal of environmental chemical engineering*, Vol. 4, P. 203-210
- Intelligence, M. 2023. IRAN AGRICULTURAL SECTOR ANALYSIS - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2023 - 2028). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/iran-agricultural-sector-analysis>
- Jin, S., Wang, Y., He, J., Yang, Y., Yu, X., & Yue, G. 2013. Preparation and properties of a degradable interpenetrating polymer networks based on starch with water retention, amelioration of soil, and slow release of nitrogen and phosphorus fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 128, P. 407-415

- Shayesteh, K., Sadeghi, N. 2017. The potential application modified lignin sulfonate matrix to controlled-release urea and predict the release profile. *Journal of Separation Science and Engineering*, Vol. 9, P. 1-9
- Kaavessina, M., Distantina, S., & Shohih, E. N. 2021. A slow-release fertilizer of urea prepared via melt blending with degradable poly (lactic acid): formulation and release mechanisms. *Polymers*, Vol. 13, P. 1856
- Lam, S. K., Wille, U., Hu, H.-W., Caruso, F., Mumford, K., Liang, X., Pan, B., Malcolm, B., Roessner, U., & Suter, H. 2022. Next-generation enhanced-efficiency fertilizers for sustained food security. *Nature Food*, Vol. 3, P. 575-580
- Lawrenciana, D., Wong, S. K., Low, D. Y. S., Goh, B. H., Goh, J. K., Ruktanonchai, U. R., Soottitantawat, A., Lee, L. H., & Tang, S. Y. 2021. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release. *Plants*, Vol. 10, P. 238
- Lum, Y.-H., Shaaban, A., Mohamad, N., Dimin, F., & Yatim, N. M. 2016. Boric acid modified starch polyvinyl alcohol matrix for slow release fertilizer. *e-Polymers*, Vol. 16, P. 151-158
- Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., & Suzuki, A. 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of botany*, Vol. 105, P. 1141-1157
- Matassa, S., Batstone, D. J., Hülsen, T., Schnoor, J., & Verstraete, W. 2015. Can direct conversion of used nitrogen to new feed and protein help feed the world? In: ACS Publications.
- ME Trenkel, T. 2021. Slow-and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA).
- Mohammadzadeh, Q. 2020. Application of urea coated with modified ligninsulfonate in animal feed formulation as a slow-release non-protein nitrogen source [University of Mohaghegh Ardabili]. Ardabil.
- Mohammadzadeh, Q., Shayesteh, K., Seifdavati, J., & Pourbayramian, R. 2024. Investigation of the Bioconversion of Urea with Modified Lignosulfonate Biomass as Slow-Release Urea in Aqueous Medium and Rumen Fluid. *Waste and Biomass Valorization*, Vol., P. 1-13
- Moradi, S., Shayesteh, K., & Lotfiman, S. 2022. The Modelling of the Urea Fertilizer Dissolution Process in Finite/Infinite Volumes of Water. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 41, P. 1348-1359
- Moradi, S., Shayesteh, K., & Mohammadzadeh, Q. 2022. Production of Urea/Acetylated-lignin Sulfonate Matrix as SRFs and an Investigation on the Effect of Hydrodynamic Conditions on Release Rate Using the Biot Number. *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*, Vol. 15, P. 31-46
- Mumtaz, I., Majeed, Z., Ajab, Z., Ahmad, B., Khurshid, K., & Mubashir, M. 2019. Optimized tuning of rosin adduct with maleic anhydride for smart applications in controlled and targeted delivery of urea for higher plant's uptake and growth efficiency. *Industrial Crops and Products*, Vol. 133, P. 395-408
- Naz, M. Y., & Sulaiman, S. A. 2016. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *Journal of controlled release*, Vol. 225, P. 109-120
- Ni, B., Liu, M., & Lü, S. 2009. Multifunctional slow-release urea fertilizer from ethylcellulose and superabsorbent coated formulations. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 155, P. 892-898
- Nickerson, M., Yan, C., Cloutier, S., & Zhang, W. 2014. Protection and masking of omega-3 and-6 oils via microencapsulation. In *Microencapsulation in the food industry*, Elsevier, P. 485-500
- Olad, A., Zebhi, H., Salari, D., Mirmohseni, A., & Tabar, A. R. 2018. Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil. *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 90, P. 333-340

- Olson, R. 1978. Effects of intensive fertilizer use on the human environment. Effects of Intensive Fertilizer Use on the Human Environment: Report of the Consultation Convened at Rome 20-25 February 1972, Vol., P. 15
- Purnomo, C. W., & Saputra, H. 2021. Manufacturing of slow and controlled release fertilizer. In *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture*, Elsevier, P. 95-110
- Qi, Y., Wang, Z., Ge, P., Wang, M., Zhang, C., Wang, H., Zhao, L., Wu, J., & Li, Y. 2022. The preparation of slow-release fertilizers with biomass ash and water/waste acid solutions from desulfurization and denitrification of flue gas. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, P. 57566-57578
- Qi, Z., Dong, Y., He, M., Wang, M., Li, Y., & Dai, X. 2021. Coated, stabilized enhanced-efficiency nitrogen fertilizers: preparation and effects on maize growth and nitrogen utilization. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 12, P. 3144
- Rahikainen, M., & Kangasjärvi, S. 2020. On the roots of nitrogen uptake. *The New Phytologist*, Vol. 228, P. 802-804
- Sadeghi, N. 2016. Laboratory study of nitrogen release from lignin sulfonate coating urea fertilizer University of Mohaghegh Ardabili]. Ardabil.
- Sadeghi, N., Shayesteh, K., & Lotfiman, S. 2017. Effect of Modified Lignin Sulfonate on Controlled-Release Urea in Soil. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 25, P. 792-799
- Seddighi, H., & Shayesteh, K. 2024. Slow-Release Fertilizers: A Promising Solution to Environment Pollution. *Journal of Environmental Science Studies*, Vol. 9, P. 8407-8417
- Seddighi, H., Shayesteh, K., & Arjmand, M. 2023a. An overview of the models presented for drug or fertilizer release based on mathematical and experimental models 12th International Chemical Engineering Congress & Exhibition,
- Seddighi, H., Shayesteh, K., & Arjmand, M. 2023b. A review of drug or fertilizer release mechanism 12th International Chemical Engineering Congress & Exhibition,
- Seddighi, H., Shayesteh, K., & Omrani, N. 2024. Acetylated lignin sulfonate as a biodegradable coating for controlled-release urea fertilizer: A novel acetylation method and diffusion coefficient analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol., P. 134190
- Seddighi, H., Shayesteh, K., Omrani, N., & Es' hagh, P. 2024. Fertilizers Coating Methods: A Mini Review of Various Techniques. *Chemical Research and Technology*, Vol. 1, P. 38-48
- Seyedsalehi, M. S., Mohebbi, E., Tourang, F., Sasanfar, B., Boffetta, P., & Zendehtdel, K. 2023. Association of dietary nitrate, nitrite, and N-nitroso compounds intake and gastrointestinal cancers: A systematic review and meta-analysis. *Toxics*, Vol. 11, P. 190
- Shaviv, A. 2001. *Advances in controlled-release fertilizers*. Vol., P.
- Shaviv, A., & Mikkelsen, R. 1993. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation-A review. *Fertilizer research*, Vol. 35, P. 1-12
- Shayesteh, K., & Mohammadzadeh, G. 2024. Stepwise removal of Lignin sulfonate hydroxyl ion to reduce its solubility in an aqueous environment: As a Coating in slow-release systems or absorbent base. *Chemical Review and Letters*, Vol. 7, P. 253-262
- Shayesteh, K., & Zamanloo, M. 2020. Study and optimization of parameters affecting the acetylation process of lignin sulfonate biopolymer. *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 163, P. 1810-1820
- Shi, W., Ju, Y., Bian, R., Li, L., Joseph, S., Mitchell, D. R., Munroe, P., Taherymoosavi, S., & Pan, G. 2020. Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*, Vol. 701, P. 134424
- Singh, J., Kumar, A., & Dhaliwal, A. S. 2023. Superabsorbent Polymers Application in Agriculture Sector. In S. Arpit & T. Jaya (Eds.), *Properties and Applications of Superabsorbent Polymers: Smart Applications with Smart Polymers*, Springer Nature Singapore, P. 83-117

- Statista. 2023a.. Fertilizer industry in the UK - statistics & facts. <https://www.statista.com/topics/4588/agricultural-fertilizer-market-in-the-uk/#topicOverview>
- Statista. 2023b. Global consumption of fertilizers 2020, by country. <https://www.statista.com/statistics/1287852/global-consumption-fertilizer-by-country/>
- statistics, A. 1381-1400. Agricultural statistics. Retrieved from <https://eg.maj.ir/page-amar/FA/65/form/pId3353>
- Sun, Y.-M., Huang, W.-F., & Chang, C.-C. 1999. Spray-coated and solution-cast ethylcellulose pseudolatex membranes. *Journal of membrane science*, Vol. 157, P. 159-170
- Tariq, Z., Iqbal, D. N., Rizwan, M., Ahmad, M., Faheem, M., & Ahmed, M. 2023. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. *RSC Advances*, Vol. 13, P. 24731-24754
- Teunou, E., & Poncelet, D. 2002. Batch and continuous fluid bed coating—review and state of the art. *Journal of food engineering*, Vol. 53, P. 325-340
- Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., & Ahmad, N. 2021. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *Journal of controlled release*, Vol. 339, P. 321-334
- Versino, F., Urriza, M., & García, M. A. 2019. Eco-compatible cassava starch films for fertilizer controlled-release. *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 134, P. 302-307
- Ward, M. H., Jones, R. R., Brender, J. D., De Kok, T. M., Weyer, P. J., Nolan, B. T., Villanueva, C. M., & Van Breda, S. G. 2018. Drinking water nitrate and human health: an updated review. *International journal of environmental research and public health*, Vol. 15, P. 1557
- Wen, P., Wu, Z., He, Y., Ye, B.-C., Han, Y., Guan, X., & Wang, J. 2016. Microwave-assisted one-step synthesis and characterization of a slow release nitrogen fertilizer with inorganic and organic composites. *RSC Advances*, Vol. 6, P. 37337-37346
- WHO. 2011. Nitrate and nitrite in drinking-water. In: World Health Organization Geneva, Switzerland.
- Xiaoyu, N., Yuejin, W., Zhengyan, W., Lin, W., Guannan, Q., & Lixiang, Y. 2013. A novel slow-release urea fertiliser: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism. *Biosystems Engineering*, Vol. 115, P. 274-282
- Yadav, N. 2023. Controlled Release Fertilizer Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/controlled-release-fertilizers-market-136099624.html>
- Yang, Y., Binmei, L., Xiaoyu, N., Liangzhi, T., Lixiang, Y., Ye, Y., Mengxi, F., Zhong, W., & Yuejin, W. 2021. Rice productivity and profitability with slow-release urea containing organic-inorganic matrix materials. *Pedosphere*, Vol. 31, P. 511-520