



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

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



تهیه نانوکود هیبریدی اوره-هیدروکسی آپاتیت برای آزادسازی آهسته نیتروژن

مهرزاد محمص مستشاری*، حمیده آقاحسینی، احمد ستاری

بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و

ترویج کشاورزی، قزوین، ایران؛ *Email: mm_mohasses@yahoo.com

چکیده

توسعه فناوری‌هایی که هزینه کودها را از طریق رساندن کارآمد و هدفمند آنها به محصولات کشاورزی به حداقل می‌رسانند، بسیار حائز اهمیت است. تا کنون پژوهش‌های اندکی بر روی رهاسازی آهسته مواد مغذی به محصولات کشاورزی، با استفاده از فناوری نانو انجام شده است. اوره منبع غنی از نیتروژن و بنابراین یک کود رایج است. ما کار خود را بر روی سنتز نانوذرات بی‌خطر برای محیط زیست که اوره را به عنوان ماده مغذی محصولات کشاورزی حمل می‌کنند و می‌توانند به صورت برنامه‌ریزی شده برای استفاده به عنوان نانوکود آزاد شوند، متمرکز نمودیم. ما با به کار گیری روش طراحی آزمایشات (DOE) و بر مبنای روش سنتز مکانیکی-شیمیایی، نانوهیبریدی از نانوذرات هیدروکسی آپاتیت حامل اوره را در نسبت‌های مختلف سنتز نمودیم. در این روش، حلالیت بالای مولکول‌های اوره، از طریق قراردادن آن در ماتریسی از نانوذرات هیدروکسی آپاتیت کاهش یافته است. سطح بالای نانوذرات امکان اتصال مقدار زیادی از مولکول‌های اوره را فراهم می‌کند. روش گزارش شده در اینجا ساده و مقیاس پذیر است و امکان سنتز نانوهیبرید هیدروکسی آپاتیت اصلاح شده با اوره را به عنوان کود با نسبت وزنی اوره به هیدروکسی آپاتیت ۳ به ۱ فراهم می‌کند. این نانوهیبرید بستری مناسب برای آزادسازی آهسته نیتروژن را فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: رهایش آهسته، کود نیتروژن، نانوذرات، نانوکود هیبریدی اوره-هیدروکسی آپاتیت.

مقدمه

نیترژن که به عنوان یک منبع غذایی کلیدی برای تولید مواد غذایی، فیبر و زیست توده در کشاورزی شناخته می‌شود، مهمترین عنصر موجود در کودها است. از آنجا که ۵۰ تا ۷۰ درصد نیترژن مصرفی با استفاده از کودهای معمولی با ابعاد ذرات بیشتر از ۱۰۰ نانومتر به دلیل شستشو در خاک از بین می‌روند، راندمان استفاده از نیترژن (NUE) توسط گیاهان پایین است. نیترژن می‌تواند به صورت نیترات‌های محلول در آب، انتشار به صورت آمونیاک و اکسیدهای نیترژن و ادغام در مواد آلی خاک با واسطه‌ی میکروارگانیسم‌های خاک در طول زمان شسته شود (Monreal et al., 1986). تلاش‌ها برای افزایش NUE در فرمول‌های کود معمولی تاکنون به موفقیت کمی منجر شده است. از سوی دیگر، راهبردهای در حال ظهور نانوفناوری نشان می‌دهند که به دلیل نسبت سطح به حجم بالا در این ذرات، انتظار می‌رود که نانوکودها حتی از کودهای آهسته رهش معمولی با پوشش پلیمری مؤثرتر باشند (bin Hussein et al., 2002; DeRosa et al., 2010; Hossain et al., 2008; Kaymaz and Eren, 2025; Morrow et al., 2010; Sastry et al., 2010). در این پژوهش، ما با به کار گیری یک راهبرد مبتنی بر نانوفناوری، یک نانوکود هیبریدی آهسته رهش مبتنی بر نانوذرات هیدروکسی آپاتیت (HA) اصلاح‌شده با اوره را گزارش می‌نماییم. نانوذرات $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ به عنوان یکی از نامزدهای برجسته در کاربردهای کشاورزی رتبه بندی می‌شوند که می‌توانند مواد مغذی فسفر را تامین کنند. با این حال، پژوهش‌های با محوریت HA، به دلیل زیست سازگاری و زیست فعالی عالی، بیشتر بر کاربردهای زیست پزشکی آن متمرکز شده است (Suba Sri and Usha, 2025; Zhao et al., 2025). در حالی که کاربردهای کشاورزی بالقوه‌ی HA به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است. چندین گروه تحقیقاتی روش‌های مختلفی را برای سنتز نانوذرات HA اقتباس کرده‌اند (Zhao et al., 2025)، مانند ترسیب شیمیایی مرطوب، روش هیدروترمال، روش سل-ژل، فرآیند اسپری پیرولیز و غیره. صورتبندی و سطح بلورینگی نانوذرات وابستگی زیادی به روش آماده‌سازی و شرایط انجام آزمایش‌ها دارد. کوموتریکس یا شیمی‌سنجی، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری برای تحلیل داده‌های شیمیایی است. این علم با مدل‌سازی داده‌های شیمیایی، بهینه‌سازی شرایط سنتز، و کاهش هزینه و زمان، نقش مهمی در تولید نانوذرات دارد (Kalinowska et al., 2021). طراحی آزمایشات (Design of Experiments - DOE) یکی از ابزارهای قدرتمند علم شیمی‌سنجی، برای بهینه‌سازی فرآیندهای سنتز نانوذرات می‌باشد (Javed et al., 2021). طراحی آزمایشات نیز با روش‌هایی مانند طرح عاملی و سطوح پاسخ، شرایط بهینه واکنش را مشخص می‌کند. استفاده از این ابزار باعث کنترل دقیق اندازه و مورفولوژی نانوذرات، بهبود پوشش‌دهی سطحی، و افزایش بهره‌وری تولید در مقیاس صنعتی می‌شود. در این پژوهش، ما با به کار گیری روش طراحی آزمایشات (DOE) و بر مبنای روش سنتز مکانیکی-شیمیایی، نانوهیبریدی از نانوذرات HA حامل اوره را در نسبت‌های مختلف (اوره:HA) سنتز نمودیم. نانوذرات هیبریدی به دلیل اثرات هم افزایی ناشی از برهمکنش‌های بین سطحی ذره-ذره، خواص چند منظوره‌ای را ایجاد می‌کنند (Sanchez et al., 2014). متغیرهای مستقل مربوط به سنتز نانوهیبریدها در دامنه تغییرات غربالگری شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. متغیرهای وابسته مربوط به این فرآیند، شامل اندازه ذرات حاصل و میزان پایداری (عدم جدایش فاز) نیز تعیین شدند. در خاتمه متغیرهای مستقل بهینه تعیین گردیدند. بر این اساس، در این کار، یک رویکرد ساده و سبز برای آزادسازی آهسته اوره با بارگذاری ۳ برابری اوره به نانوذرات هیدروکسی آپاتیت گزارش شد. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های ما در این پژوهش، استنباط می‌شود که اوره به دلیل نسبت بالای سطح به حجم و شیمی سطح غنی نانوذرات HA، برهمکنش‌هایی را بین گروه‌های کربونیل و آمین خود با پهنه‌ی مرزی HA برقرار می‌نماید که منجر به آزادسازی آهسته و دقیق نیترژن در این نانوکود هیبریدی می‌شود. آزادسازی آهسته اوره از این نانوهیبرید منجر به کاهش سرعت تجزیه اوره در خاک و در نتیجه منجر به افزایش راندمان استفاده‌ی زراعی از نیترژن (NAE) می‌شود (Gao et al., 2015).

مواد و روش‌ها

سنتز نانوهیبریدهای اوره-HA

طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design-Expert® 7.0 و به روش طراحی مرکب مرکزی (Central Composite Design-CCD) انجام گردید (جدول ۱). این روش برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای پیچیده استفاده می‌شود و امکان بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ مورد نظر را فراهم می‌کند و کمک می‌کند تا ترکیب بهینه شرایط آزمایشگاهی تعیین گردد.

جدول ۱- خلاصه فاکتورهای طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design-Expert® 7.0

نوع مطالعه:		تعداد اجراها: ۲۵		مدل طراحی: درجه دوم		پاسخ سطح		طراحی اولیه: D-اپتیمال	
فاکتور	نام متغیر	واحد	نوع	سطح پایین (واقعی)	سطح بالا (واقعی)	سطح پایین (کد شده)	سطح بالا (کد شده)	میانگین	انحراف معیار
A	نسبت اوره/HA	w/w	عددی	۰/۱	۱/۰۰	-۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۴۵	۰/۳۹
B	سرعت آسیاب	rpm	عددی	۱۰۰/۰۰	۵۰۰/۰۰	-۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۲۸۵/۹۷	۱۶۹/۰۶
C	زمان آسیاب	h	عددی	۱/۰۰	۴/۰۰	-۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۲/۴۵	۱/۲۷
D	نسبت حلال/مواد جامد	w/w	عددی	۰/۰۰۰	۱/۰۰	-۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۲	۰/۴۱

بر این اساس، آزمایشات مربوط به تهیه نانوهیبریدهای اوره-HA با نسبت‌های مختلفی از اوره:HA طراحی گردیدند (جدول ۲). این نانوهیبریدها، از طریق مخلوط کردن مقادیر معینی از Ca(OH)_2 با $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ و به دنبال آن اختلاط مقادیر معینی از اوره جامد تهیه شدند. سپس حجم معینی از آب به عنوان عامل مرطوب کننده و تسهیل کننده برای تشکیل دوغاب مرطوب اضافه شد و با استفاده از آسیاب با سرعت و زمان معین تهیه گردید. محصولات در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد خشک شدند.

جدول ۲- جدول طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design-Expert® 7.0

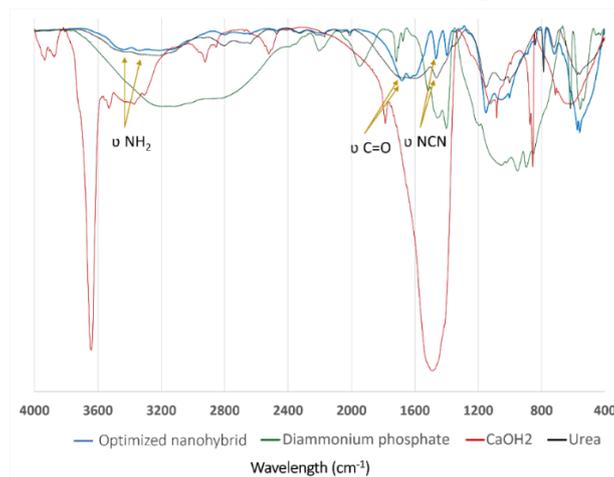
شماره اجرای آزمایش	نسبت اوره/HA	سرعت آسیاب	زمان آسیاب	نسبت حلال/مواد جامد
۱	۰/۹۴	۲۰۴/۰۰	۲/۱۲	۱/۰۰
۲	۰/۱۰	۱۰۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۴۹
۳	۰/۱۰	۲۹۱/۰۰	۲/۴۴	۱/۰۰
۴	۰/۱۰	۵۰۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۰
۵	۰/۵۲	۱۰۰/۰۰	۲/۴۱	۰/۰۰
۶	۰/۱۰	۱۶۷/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۷	۰/۳۴	۴۰۰/۰۰	۲/۵۶	۰/۵۰
۸	۰/۵۷	۳۰۸/۰۰	۴/۰۰	۰/۵۰
۹	۱/۰۰	۵۰۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱۰	۰/۲۱	۱۰۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱۱	۱/۰۰	۳۱۰/۰۰	۲/۵۶	۰/۰۰
۱۲	۱/۰۰	۵۰۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱۳	۱/۰۰	۱۰۰/۰۰	۴/۰۰	۱/۰۰
۱۴	۱/۰۰	۱۰۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۰
۱۵	۱/۰۰	۵۰۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱۶	۰/۲۱	۱۰۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱۷	۰/۱۰	۱۶۷/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱۸	۰/۴۳	۱۵۰/۰۰	۳/۶۷	۱/۰۰
۱۹	۰/۶۵	۳۵۰/۰۰	۱/۷۵	۰/۵۲
۲۰	۰/۱۰	۵۰۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۵۱
۲۱	۱/۰۰	۵۰۰/۰۰	۳/۶۴	۰/۵۱
۲۲	۱/۰۰	۵۰۰/۰۰	۳/۶۴	۰/۵۱
۲۳	۱/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۵۰
۲۴	۰/۱۰	۱۰۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۴۹
۲۵	۰/۱۰	۵۰۰/۰۰	۴/۰۰	۱/۰۰

خصوصیات نانوهیبریدها

برای به دست آوردن الگوهای XRD نانوهیبریدهای اوره-HA با تابش $Cu K\alpha$ ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) از پراش سنج پودر اشعه ایکس استفاده شد. الگوهای XRD با اندازه گام 0.05° درجه و زمان گام $1/00$ ثانیه در محدوده 2θ $20-80^\circ$ درجه ثبت شد. تجزیه و تحلیل گروه‌های عاملی و برهمکنش‌های پیوند نمونه‌های سنتز شده با استفاده از اسپکتروفتومتر Bruker Vertex 80 FTIR محدود به 400 تا 4000 cm^{-1} انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع آوری شده با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert® 7.0 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

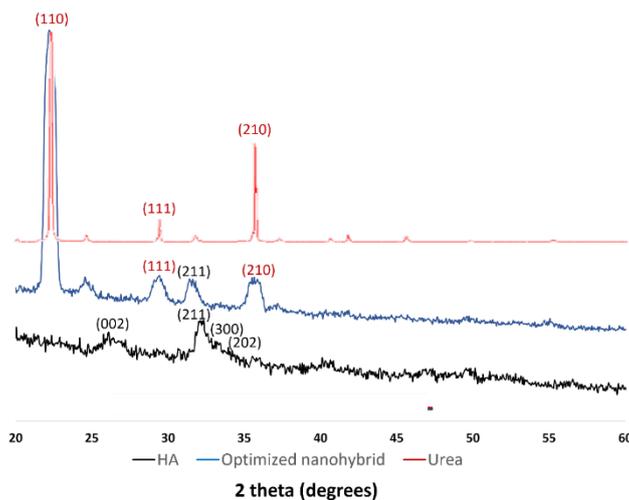
نتایج و بحث

در نانوهیبریدهای طراحی شده در این پژوهش، بهترین نتیجه از آزمایش طراحی شده در ردیف ۷ جدول ۲ حاصل گردید. این نمونه، طی مدت زمان ۳ ساعت، با سرعت 400 دور در دقیقه و نسبت حلال/مواد جامد معادل 0.50 تهیه شد و در آن نسبت اوره به هیدروکسی آپاتیت حدود ۳ به ۱ بود. هیچگونه جدایش فازی در این نمونه مشاهده نشد. ساختار نانوذرات HA اصلاح شده با اوره بهینه شده (جدول ۲، ردیف ۷) با استفاده از تعدادی تکنیک مشخص شدند. طیف‌های مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) نشان دهنده تشکیل نانوذرات هیدروکسی آپاتیت از مواد اولیه کلسیم هیدروکسید و دی آمونیوم فسفات است. همچنین داده‌های FTIR نشان می‌دهد که پیوندهای هیدروژنی بین اوره و هیدروکسی آپاتیت وجود دارند. طیف‌های FTIR (شکل ۱) تأیید می‌کنند که محیط‌های پیوندی N- و H- در نانوهیبرید اوره-HA در مقایسه با اوره خالص تغییر کرده‌اند. پیوند اوره به HA، می‌تواند به صورت تغییر اندک در نواحی کششی N-C-N و C=O منعکس شود. داده‌های FTIR نشان می‌دهند که اوره از طریق کربونیل و آمین خود به نانوذرات HA پیوند می‌خورد.



شکل ۱- طیف‌های FTIR کلسیم هیدروکسید، دی آمونیوم فسفات، اوره و نانوهیبرید اوره-HA. نواحی NH_2 ، $C=O$ و $N-C-N$ مربوط به نانوهیبرید اوره-HA در مقایسه با اوره خالص.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در الگوی XRD مربوط به نانوهیبرید اوره-HA دو فاز مجزا قابل شناسایی هستند. ساختارهای کریستالی HA و همچنین اوره. در اینجا، صفحات شبکه کریستالی کاملاً با فضای شبکه‌ای حدود 3.5 آنگستروم همسو هستند که مربوط به فاصله بین صفحات (0.2) برای HA شش ضلعی است، که نشان می‌دهد رشد نانوذرات HA در جهت (0.2) رخ داده است. ماهیت پلی کریستالی نانوذرات HA با الگوی پراش الکترونی ناحیه انتخاب شده و پیک پراش پهن و با شدت کم (0.2) در الگوی پراش پرتو ایکس نانوهیبرید اوره-HA نشان داده شده است. اندازه کریستالیت محاسبه شده با استفاده از فرمول شرر حدود 20 نانومتر بود. ما هیچ تغییری در موقعیت پیک‌های XRD قبل و بعد از اصلاح سطح نانوذرات HA مشاهده نکردیم، که نشان می‌دهد ساختار کلی نانوذرات HA به طور قابل توجهی تغییر نکرده است.



شکل ۲- الگوهای الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به نانوذرات HA، نانوهیبرید اوره-HA، و اوره.

نتیجه گیری

نتایج ما نشان می‌دهد که اوره با نانوذرات HA از طریق گروه‌های آمین و کربونیل برهمکنش می‌کند. این امر امکان آزادسازی آهسته نیتروژن، یک ماده مغذی مهم برای گیاهان، را فراهم می‌کند. تا کنون گزارشاتی در مورد سنتز نانوکودهای هیبریدی حاوی نیتروژن منتشر شده است (جدول ۳).

جدول ۳- جدول مقایسه‌ای برای نانوکودهای هیبریدی سنتز شده به عنوان کود آهسته رهش نیتروژن

ردیف	نوع نانوهیبرید	روش سنتز	ماده فعال	ویژگی‌های رهایش	منبع
۱	هیدروژل نانوکامپوزیتی آلژینات/کیتوزان/مونت موریلونیت	پلیمریزاسیون در حضور نانوذرات	NPK, FeEDDHA, ZnEDDHA	رهایش کنترل شده، زیست تخریب پذیر، بهبود ظرفیت نگهداری آب	پورخیایی، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶
۲	اوره پوشش دار با نشاسته	پوشش دهی با روتاری درام، سنتز همزمان و دو مرحله‌ای	اوره	کاهش سرعت انحلال، افزایش کارایی نیتروژن، بهبود رشد گوجه فرنگی	سلیمی و همکاران، دانشگاه تهران، ۱۴۰۱
۳	نانوکامپوزیت ژنولیت/آلژینات/کیتوزان	کپسوله سازی با پلیمرهای زیستی	کود کامل و آفت کش‌ها	رهایش آهسته در آب و خاک، کاهش دفعات آبیاری	رشیدزاده، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۲
۴	اوره پوشش دار با واکس کارنوبا	غوطه‌وری در واکس طبیعی	اوره	افزایش زمان رهایش تا ۴۱ روز، زیست سازگار	رضانی و معتمدی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، ۱۴۰۳
۵	Chitosan-PMAA Nanohybrid	کمپلکس پلی الکترولیتی	N, P, K, Fe, Mg	رهایش ۳۰ روزه، مدل سینتیکی مرتبه دوم، کاهش آبشویی	Easwaran et al., 2025

با نگاهی به ساختار این نانوکودها و مقایسه آنها با نانوکود هیبریدی اوره-HA گزارش شده در این پژوهش، می‌توان به این نتیجه رسید که نانوکود هیبریدی اوره-HA به دلیل ساختار معدنی منحصربه‌فرد و روش سنتز سبز و کارآمد، جایگاه ویژه‌ای در میان سایر کودهای آهسته رهش گزارش شده (جدول ۳) دارد. ساختار بلوری HA به‌طور طبیعی دارای تخلخل نانومتری و سطح فعال بالاست که امکان جذب و تثبیت اوره را فراهم می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود اوره به‌صورت یونی یا فیزیکی درون ساختار HA جای‌گیری کرده و به تدریج در خاک آزاد شود، بدون آنکه دچار آبشویی سریع شود. از نظر روش سنتز، می‌توان گفت روش مکانیکی-شیمیایی، نه تنها ساده و کم‌هزینه است، بلکه نیاز به حلال‌های سمی یا شرایط واکنش پیچیده ندارد. در این روش اوره و پیش‌ماده‌های HA در آسیاب با هم واکنش داده و نانوهیبریدی با سطح ویژه بالا تولید می‌شود. این ساختار باعث افزایش بارگذاری نیتروژن و در نتیجه افزایش عملکرد گیاه خواهد شد. در مقایسه با نانوهیبریدهای پلیمری مانند آلژینات-کیتوزان، که بیشتر به‌واسطه شبکه‌های ژلی و پیوندهای هیدروژنی عمل می‌کنند، نانوکود هیبریدی اوره-HA از اتصالات یونی قوی‌تر و پایدارتری بهره می‌برد. این اتصالات باعث می‌شوند اوره در برابر تجزیه آنزیمی و آبشویی مقاوم‌تر باشد. همچنین، برخلاف پلیمرهای زیستی که ممکن است در شرایط قلیایی یا اسیدی ناپایدار شوند، HA در طیف وسیعی از pH خاک پایدار باقی می‌ماند. از منظر عملکرد، HA نه تنها قادر به رهایش آهسته‌ی نیتروژن خواهد بود، بلکه به‌عنوان منبع کلسیم و فسفر نیز عمل می‌کند.

این ویژگی آن را به یک کود چندمنظوره تبدیل می‌کند که در بهبود رشد ریشه، گل‌دهی و مقاومت گیاه نقش دارد. همچنین، قابلیت بارگذاری عناصر ریزمغذی مانند Zn، Cu و Fe بر سطح HA، آن را به یک پلتفرم مناسب برای کودهای ترکیبی تبدیل کرده است. در مجموع، نانوکود هیبریدی اوره-HA با تکیه بر ساختار معدنی پایدار، روش‌های سنتز سبز و قابلیت بارگذاری چندانگانه، نسبت به سایر نانوهیبریدهای آهسته‌رهش، برتری ساختاری، عملکردی و زیست‌محیطی دارد.

فهرست منابع

- پورخیایی، م. (۱۳۹۶). تهیه فرمولاسیونهای آهسته رهش کودهای شیمیایی و ریز مغذی ها با استفاده از هیدروژل های پلیمری با هدف بهبود رهش مواد مغذی و جلوگیری از اتلاف آنها. پایان نامه کارشناسی ارشد، وزارت علوم، تحقیقات، و فناوری - دانشگاه تبریز.
- رشیدزاده، ا. (۱۳۹۲). تهیه و فرمولاسیون کود و آفت کش کیسوله شده با استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمرهای زیست تخریب پذیر با هدف رهش آهسته و افزایش کارایی مواد کشاورزی. رساله دکتری، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه تبریز - دانشکده شیمی.
- رضائی تازه آباد، م.، معتمدی، ا. (۱۴۰۳). تهیه کودهای آهسته-رهش اوره با استفاده از پوشش‌دهی توسط واکس‌های گیاهی و سنتزی. به‌زراعی کشاورزی، ۲۷(۱)، ۵۷-۶۷.
- سلیمی، م.، معتمدی، ا.، متشوع زاده، ب.، علیخانی، ح.، میر سیدحسینی، ح. (۱۴۰۱). تولید کود اوره آهسته‌رهش به سه روش پوشش‌دهی با روتاری درام، سنتز هیدروژل همزمان و دو مرحله‌ای و بررسی عملکرد آنها در کشت گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی. تحقیقات آب و خاک ایران ۵۳(۸)، ۱۷۱۵-۱۷۲۶.
- bin Hussein, M.Z., Zainal, Z., Yahaya, A.H. and Foo, D.W.V. (2002). Controlled release of a plant growth regulator, α -naphthaleneacetate from the lamella of Zn-Al-layered double hydroxide nanocomposite. *Journal of controlled release* 82(2-3), 417-427.
- DeRosa, M.C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R. and Sultan, Y. (2010). Nanotechnology in fertilizers. *Nature nanotechnology* 5(2), 91-91.
- Easwaran, C., Christopher, S.R., Ramasamy, R., Solomon, R.V., Kumar, M., Mohan, P., Marimuthu, R., Koothan, V. and Nallusamy, S. (2025). Design and Characterization of a Chitosan-Based Nanohybrid Fertilizer: Molecular Insights and Nutrient Release Kinetics. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 1-18
- Gao, X., Li, C., Zhang, M., Wang, R. and Chen, B. (2015). Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil. *Field crops research* 181, 60-68.
- Hossain, K.-Z., Monreal, C.M. and Sayari, A. (2008). Adsorption of urease on PE-MCM-41 and its catalytic effect on hydrolysis of urea. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 62(1), 42-50.
- Javed, M.N., Pottou, F.H., Shamim, A., Hasnain, M.S. and Alam, M.S. (2021). Design of experiments for the development of nanoparticles, nanomaterials, and nanocomposites. *Design of Experiments for Pharmaceutical Product Development: Volume II: Applications and Practical Case studies*, 151-169.
- Kalinowska, K., Bystrzanowska, M. and Tobiszewski, M. (2021). Chemometrics approaches to green analytical chemistry procedure development. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 30, 100498.
- Kaymaz, A. and Eren, T. (2025). Synthesis of UV-Curable Biodegradable Polymer Membrane for Coating of Urea Fertilizer. *ACS Agricultural Science & Technology* 5(4), 649-655.
- Monreal, C., McGill, W. and Nyborg, M. (1986). Spatial heterogeneity of substrates: effects on hydrolysis, immobilization and nitrification of urea-N. *Canadian journal of soil science* 66(3), 499-511.
- Morrow, M., Sharma, V., Singh, R.K., Watson, J.A., Maltais-Landry, G. and Hochmuth, R.C. (2025). Impact of Polymer-Coated Controlled-Release Fertilizer on Maize Growth, Production, and Soil Nitrate in Sandy Soils. *Agronomy* 15(2), 455.
- Sanchez, C., Boissiere, C., Cassaignon, S., Chanéac, C., Durupthy, O., Faustini, M., Grosso, D., Laberty-Robert, C., Nicole, L. and Portehault, D. (2014). Molecular engineering of functional inorganic and hybrid materials. *Chemistry of Materials* 26(1), 221-238.
- Sastry, R.K., Rashmi, H., Rao, N. and Ilyas, S. (2010). Integrating nanotechnology into agri-food systems research in India: a conceptual framework. *Technological Forecasting and Social Change* 77(4), 639-648.
- Suba Sri, M. and Usha, R. (2025). An insightful overview on osteogenic potential of nano hydroxyapatite for bone regeneration. *Cell and Tissue Banking* 26(2), 13.
- Zhao, R., Meng, X., Pan, Z., Li, Y., Qian, H., Zhu, X., Yang, X. and Zhang, X. (2025). Advancements in nanohydroxyapatite: synthesis, biomedical applications and composite developments. *Regenerative Biomaterials* 12, rbae129.

Preparation of urea-hydroxyapatite hybrid nanofertilizer for slow release of nitrogen

Mehrzad Mohasses Mostashari*, Hamideh Aghahosseini, Ahmad Sattari

Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (Areco), Qazvin, Iran; *Email: mm_mohasses@yahoo.com

Abstract

It is of great importance to develop technologies that minimize the cost of fertilizers by delivering them efficiently and targetedly to agricultural crops. So far, little research has been conducted on the slow release of nutrients to agricultural crops using nanotechnology. Urea is a rich source of nitrogen and therefore a common fertilizer. We focused our work on the synthesis of environmentally friendly nanoparticles that carry urea as a nutrient to agricultural crops and can be released in a programmed manner for use as nanofertilizers. Employing the design of experiments (DOE) approach and based on the mechanochemical synthesis method, we synthesized nanohybrids of hydroxyapatite nanoparticles carrying urea in different ratios. In this method, the high solubility of urea molecules is reduced by embedding it in a matrix of hydroxyapatite nanoparticles. The high surface area of the nanoparticles allows for the binding of a large amount of urea molecules. The method reported here is simple and scalable and allows the synthesis of urea-modified hydroxyapatite nanohybrid as fertilizer with a urea to hydroxyapatite weight ratio of 3:1. This nanohybrid provides a suitable substrate for slow nitrogen release.

Keywords: slow release, nitrogen fertilizer, nanoparticles, urea-hydroxyapatite hybrid nanofertilizer.