



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

مدیریت تغذیه آهن در گیاهان

فرآیندهای خاک، چالش‌های زیستی و فناوری‌های نوین

نگارندگان

ساناز اشرفی سعیدلو و حسین عزیزی

محققین مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ارومیه

نشریه فنی: 661

1404

مشخصات اثر

عنوان: مدیریت تغذیه آهن در گیاهان: فرایندهای خاک، چالش‌های زیستی و فناوری‌های نوین

نگارندگان: ساناز اشرفی سعیدلو و حسین عزیزی

ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات اسرار علم

کارشناس انتشارات: سمانه پورمنصور

ویراستار ادبی: آرش تافته

طراح جلد: سید هادی میرغیائی

سال انتشار: 1404

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این نشریه با شماره 68268 در تاریخ 1404/8/13 در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به

ثبت رسیده است.

نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: کرج، میدان استاندارد، جاده مشکین‌دشت، بلوار امام خمینی (ره)، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

صندوق پستی: 311-31785

کد پستی: 3177993545

تلفن: 026-36201900

نمابر: 02636210121

پست الکترونیکی: info.swri@areeo.ac.ir

وبسایت: <http://www.swri.ir>

مسئولیت صحت مطالب به عهده نگارندگان است.

فهرست مطالب

1- مقدمه	1
2- تشکیل کانی‌های آهن در خاک	2
3- نقش آهن در گیاهان	7
3-1- حضور در ساختار پروتئین‌ها	7
3-1-1- پروتئین‌های هم	7
3-1-2- پروتئین‌های غیر هم	8
3-2- تأثیر بر فعالیت آنزیم‌ها	8
3-3- تکوین کلروپلاست	9
4- عوامل موثر در قابلیت دسترسی آهن	9
5- راهبردهای جذب آهن در گیاهان آهن-کارا	15
5-1- راهبرد I (مربوط به گیاهان دولپه‌ای و تک‌لپه‌ای غیرگرامینه)	15
5-2- راهبرد II (مربوط به گیاهان تک‌لپه‌ای گرامینه نظیر گندم، جو، یولاف، چاودار، ذرت) ...	16
6- روش‌های تشخیص کلروز آهن در گیاهان	18
6-1- تجزیه خاک	20
6-2- تجزیه گیاه	20
7- تأثیرات کمبود و بیشبود آهن بر رشد گیاهان	23
7-1- علائم ظاهری کمبود آهن در گیاهان	23
7-2- تأثیر کمبود آهن بر ریشه گیاهان	26
7-3- گیاهان حساس به کمبود آهن	26
7-4- بیشبود یا سمیت آهن	27
7-5- علائم ظاهری سمیت آهن در گیاهان	28
8- پراکنش جغرافیایی وضعیت آهن	30
9- منابع کودی برای تامین آهن	30
9-1- منابع کودی آلی	30

- 9-2- منابع کودی معدنی..... 31
- 10- نانوکودهای آهن جایگزینی برای منابع کودی رایج..... 34
- 10-1- نحوه کاربرد نانواکسیدها بعنوان کودهای آهن..... 39
- 10-1-1- محلول پاشی برگ..... 40
- 10-1-2- مصرف خاکی..... 42
- 10-1-3- تیمار بذر..... 43
- 10-2- جذب نانوذرات بعنوان کود آهن در گیاهان..... 43
- 10-1-2- ریشه‌ها و روزنه‌ها بعنوان نقطه ورودی برای جذب نانوذرات اکسید آهن..... 46
- 10-2-2- انتقال نانوذرات اکسید آهن در داخل گیاه..... 47
- 10-3- سازوکارهای جذب و انتقال نانوذرات اکسید آهن در سطح گیاه..... 48
- 10-1-3- جذب و تغییر شکل نانوذرات اکسید آهن در سطح ریشه..... 48
- 10-1-3-1- جذب توسط ریشه‌ها..... 48
- 10-1-3-2- تغییرات محیطی..... 48
- 10-1-3-3- تغییرات میکروبی..... 49
- 10-1-3-1-3- فرایندهای دخیل در برهمکنش‌های میکروبی با نانوذرات اکسید آهن..... 49
- 10-1-3-1-3-1- احیاء زیستی..... 49
- 10-1-3-1-3-2- تجمع زیستی..... 49
- 10-1-3-1-3-3- معدنی شدن زیستی..... 49
- 10-1-3-1-3-4- برهمکنش‌های متابولیکی..... 49
- 10-1-3-1-3-5- تغییرات سطح..... 49
- 10-1-3-1-3-6- برهمکنش ترشحات ریشه‌ای با نانوذرات اکسید آهن..... 50
- 10-1-3-1-3-7- تغییر شکل بیولوژیکی..... 50
- 10-4- جذب و تغییر شکل نانوذرات اکسید آهن در سطح برگ..... 50
- 10-4-1- رسوب گذاری در سطوح برگ..... 50
- 10-4-2- جذب از طریق روزنه و کوتیکول..... 50
- 10-4-3- تغییرات شیمیایی در سطوح برگ..... 51
- 10-5- انواع نانوکودهای اکسید آهن موجود در بازار بعنوان کود آهن..... 51
- 11- روش‌های مصرف کودهای آهن..... 52
- 11-1- چالکود..... 53
- 11-2- کودآبیاری..... 54
- 11-3- محلول پاشی..... 56
- 11-4- تزریق تنه‌ای..... 58

60	12- زمان مناسب برای کوددهی
61	13- اصلاح کلروز آهن در درختان میوه
61	1-13- تیمارهای اعمال شده برای خاکها
63	2-13- تیمارهای اعمال شده برای درختان
64	3-13- سایر تیمارها
65	14- کمبود آهن در گیاهان در ایران: چالش ها و راه حل ها
65	1-14- علل اصلی کمبود آهن در ایران
68	2-14- جدیدترین روش های مدیریت کمبود عناصر کم مصرف در گیاهان
68	1-2-14- روش زراعی
69	1-1-2-14- کاربرد کود در خاک و آب آبیاری
70	2-1-2-14- کودهای معدنی و آلی
73	3-1-2-14- کودهای زیستی
75	4-1-2-14- تقویت زراعی از طریق محلول پاشی
76	2-2-14- فناوری اصلاح نباتات
78	3-2-14- روش تراریخته
81	15- نتیجه گیری کلی
84	منابع

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

-
- جدول 1- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رایج کانی‌های اکسید آهن 3
- جدول 2- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رایج کانی‌های غیراکسیدی آهن 6
- جدول 3- حد کفایت آهن در برخی از گیاهان زراعی و باغی 24
- جدول 4- منابع کودی معدنی آهن 32
- جدول 5- تأثیر نانوذرات اکسید آهن بعنوان کود عناصر کم‌مصرف برای گیاهان تک‌لپه‌ای و دولپه‌ای در غلظت‌های مختلف 38
- جدول 6- نانوکودهای آهن تجاری موجود در بازار جهانی 52
- جدول 7- مقایسه چندجانبه روش‌های مختلف کوددهی برای کنترل کلروز آهن در باغات 59
- جدول 8- اشکال معدنی عناصر غذایی مصرف شده همراه با کودهای NPK در خاک 71
- جدول 9- مقدار عناصر کم‌مصرف موجود در کودهای آلی 73
- جدول 10- تقویت گیاهان از طریق اصلاح نباتات 78
- جدول 11- تقویت زیستی گیاهان از طریق روش تراریخته 80

فهرست شکل‌ها

-
- شکل 1- چرخه آهن در خاک 9
- شکل 2- تأثیر pH بر قابلیت دسترسی آهن برای گیاهان 20
- شکل 3- عوامل موثر بر قابلیت دسترسی آهن و سازوکارهای مقابله با کمبود آهن در گیاهان 17
- شکل 4- سازوکارهای افزایش دسترسی آهن و انتقال از طریق کمپلکس‌های فیتوسیدروفور 18
- شکل 5- علائم کمبود آهن در گیاهان مختلف 26
- شکل 6- علائم سمیت آهن در گیاهان مختلف 28
- شکل 7- تأثیر مقادیر مختلف آهن بر رشد گیاه 29
- شکل 8- منابع کودی معدنی رایج آهن 33
- شکل 9- روش‌های مصرف نانو اکسیدهای آهن بعنوان کود در گیاهان 40
- شکل 10- جذب و انتقال نانوذرات از مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی از طریق ورودی برگ و ریشه 45
- شکل 11- روش‌های کوددهی 60
- شکل 12- روش‌های مختلف غنی‌سازی زیستی 68

1- مقدمه

آهن به‌عنوان یکی از عناصر مغذی اصلی برای گیاهان، در انجام فرایندهای زیستی و فیزیولوژیکی تاثیرگذار بوده و بر عملکرد گیاهان اثرات مثبت زیادی دارد. کمبود آهن نوعی عارضه‌ی فیزیولوژیک است که محصولات بسیاری از مناطق دنیا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کلروز آهن عمدتاً ناشی از pH بالای خاک‌های آهکی است که آهن خاک را از دسترس گیاهان خارج می‌سازد. کلروز آهن به دلایل مختلفی رخ می‌دهد. در خاک‌های آهکی به دلیل pH بالا، کمبود عناصر کم‌مصرف و مواد آلی، تولید محصول همواره با مشکلاتی مواجه است. در این خاک‌ها به علت وجود pH قلیایی و غلظت بالای یون کلسیم، عناصر غذایی مختلفی که قابلیت جذب آن‌ها توسط pH کنترل می‌شود، به ترکیب‌های نامحلول و غیرقابل استفاده برای گیاه تبدیل می‌شوند. از طرفی، در خاک‌های آهکی مقدار زیادی یون بی‌کربنات تولید می‌شود که این یون ضمن افزایش pH خاک، باعث کاهش قابلیت جذب عناصر کم‌مصرف، بخصوص آهن شده و همچنین پس از جذب، با افزایش pH بافت‌های گیاهی، متابولیسم آن را کاهش می‌دهد. کمبود آهن در درختان میوه منجر به اختلالات جدی در کیفیت و عملکرد آن‌ها می‌شود و در موارد شدید می‌تواند به مرگ درختان منجر گردد، که این امر در سطح کلان تأثیرات اقتصادی منفی قابل توجهی به همراه دارد (Álvarez-Fernández *et al.*, 2003; Ye *et al.*, 2006). وجود درصدهای بالایی از آهک در خاک‌ها باعث بروز کمبود عناصر کم‌مصرف به ویژه آهن در گیاهان حساس می‌شود. بر این اساس آشنایی با عوامل موثر در قابلیت دسترسی آهن، علائم ظاهری مربوط به وضعیت عنصر غذایی در گیاهان و راهکارهای مدیریت آن در این خاک‌ها در راستای تولید پایدار محصولات کشاورزی امری انکارناپذیر است.

2- تشکیل کانی‌های آهن در خاک

آهن به‌عنوان چهارمین عنصر فراوان بعد از اکسیژن، سیلیسیم و آلومینیوم در طبیعت، حدود 5 درصد از پوسته خارجی زمین را تشکیل می‌دهد (Becker and Asch, 2005). الیون، پیروکسن، آمفیبول، هماتیت، مگهمایت، لپیدوکروسایت، گئوتایت، مگنتایت، فری هیدرایت، پريت، سیدریت، سیلیکات‌های از جمله کانی‌های اولیه و ثانویه‌ی حاوی آهن در خاک می‌باشند (جدول‌های 1 و 2). حلالیت این کانی‌ها در خاک خیلی پایین است و بسته به pH خاک، 10^{-6} تا 10^{-24} مول در محلول می‌باشد. آهن معدنی به رسوب $\text{Fe}(\text{OH})_3$ بی‌شکل اطلاق می‌شود که حلالیت آهن را در خاک‌ها تعیین می‌کند. غلظت Fe^{3+} در مقایسه با کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم در محلول خاک بسیار پایین است. در خاک‌هایی با تهویه مطلوب Fe^{2+} محلول همواره کمتر از Fe^{3+} می‌باشد. این درحالی است که غلظت Fe^{2+} محلول در شرایط غرقابی بطور معنی‌داری بالا می‌باشد. به‌ازای هر یک واحد افزایش در pH خاک، غلظت Fe^{3+} و Fe^{2+} به ترتیب هزار و صد برابر کاهش می‌یابد. در محدوده‌ی pH‌های معمول خاک، غلظت کل آهن محلول برای رفع نیاز گیاهان حتی در خاک‌های اسیدی کافی نیست. بااین‌وجود، کمبود آهن در خاک‌های اسیدی نسبت به خاک‌های آهکی با pH بالا، اغلب کمتر مشاهده می‌شود (خلدبرین و اسلام‌زاده، 1381؛ هاشمی‌مجد، 1392). به دنبال جذب آهن موجود در محلول خاک توسط گیاهان، کانی‌های حاوی آهن به منظور بافر نمودن آهن تخلیه شده، حل می‌شوند. آهن محلول می‌تواند توسط ریزجانداران و تشکیل کمپلکس‌های ترکیبات آلی در محلول خاک پویا شود. از آنجایی که غلظت آهن در مقایسه با پتاسیم، منیزیم، کلسیم، سدیم (در خاک‌های آهکی) و آلومینیوم (در خاک‌های اسیدی) کم است، کاتیون‌های کم‌مصرف از جمله آهن جذب سطحی سطوح تبدالی می‌شوند، بنابراین آهن جذب سطحی شده تأثیر کمی بر آهن قابل استفاده گیاه دارد (شکل 1) (هاشمی‌مجد، 1392).

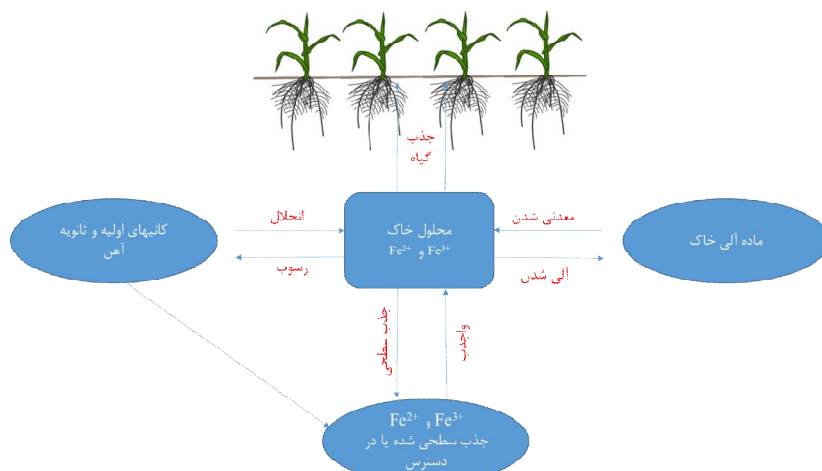
جدول 1- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رایج کانی‌های اکسید آهن
(Schwertmann and Fitzpatrick, 1993)

نام کانی	همانیت	مگهمایت	مگنتایت	گئوتایت	لیپیدوکرو سایت	فری هیدریت	فروکسایت
فرمول شیمیایی	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe_3O_4	$\alpha\text{-FeOOH}$	$\gamma\text{-FeOOH}$	$\text{Fe}_3\text{HO-4H}_2\text{O}$	$\delta\text{-FeOOH}$
سیستم بلوری	سه‌وجهی	مکعبی یا چهار گوش	مکعبی	ارتوومبیک	ارتوومبیک	سه‌وجهی	شش‌وجهی
ابعاد واحد سلولی (nm)	a=0/50340 c=1/3752	a=0/834 c=2/5014	a=0/839	a=0/4608 b=0/9956 c=0/30215	a=0/388 b=1/254 c=0/307	a=0/508 c=0/94	a=0/293 c=0/460
شکل بلوری رایج	صفحات شش‌وجهی	مکعب	مکعب	سوزنی، میله‌ای	میله‌ای	کروی	سوزنی
چگالی (g m ³)	5/26	4/87	5/18	4/26	4/09	3/96	4/20
رنگ	قرمز روشن	قرمز تا قهوه‌ای	سیاه	قهوه‌ای مایل به زرد	نارنجی	قهوه‌ای مایل به قرمز	قهوه‌ای مایل به قرمز
دمای نیل (K)	955	850	400	77	115-25	440	295

دمای نیل یا دمای انتظام مغناطیسی دمایی است که در آن مواد آنتی فرومغناطیس به پارامغناطیس تبدیل می‌شوند.

جدول 2- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رایج کانی‌های غیراکسیدی آهن
(Schwertmann and Fitzpatrick, 1993)

نام کانی	سیدریت	جارسایت	پیریت	مارکاسیت	گریگیت	میکیناوایت	ویونایت
فرمول شیمیایی	FeCO_2	$\text{KFe}_2(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$	FeS_2	FeS_2	Fe_3S_4	Fe_9S_8	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
سیستم بلوری	سه‌وجهی	شش‌وجهی/ مستطیلی	مکعبی	ارتوومبیک	مکعبی	چهار گوش	مونوکلینیک
ابعاد واحد سلولی (nm)	a=0/472 c=1/546	a=0/729 c=1/716	a=0/542	a=0/339 b=0/445 c=0/542	a=0/988	a=0/368 c=0/503	a=1/008 b=1/343 c=0/470
چگالی (g m ³)	3/9 – 3/7	3/3 – 2/9	5/2 – 5	4/9 – 4/8	4/08	4/29	2/7 – 2/6
شکل بلوری رایج	رومبوهدرال، منشوری	مکعبی	اکتاهدرال، هرمی	-	مکعبی، اکتاهدرال	اکتاهدرال	-



شکل 1- چرخه آهن در خاک (هاشمی مجد، 1392)

آهن عمدتاً از طریق هوازدگی کانی‌های سیلیکاتی و سولفیدی اولیه از لیتوسفر به محیط‌های سطحی آزاد می‌شود. در حضور O_2 و H_2O و در محدوده pH رایج در محیط‌های سطحی، Fe^{2+} آزاد شده به Fe^{3+} اکسید می‌شود که به نوبه خود بلافاصله هیدرولیز شده و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن سه‌ظرفیتی را تشکیل می‌دهد. این واکنش‌ها شامل شکستن پیوند $Fe(II)-O-Si$ و تشکیل گروه‌های $FeOH$ و $SiOH$ هستند. به‌عنوان مثال، گئوتایت ($\alpha-FeOOH$) ممکن است از اکسیداسیون و هیدرولیز الیوین (فایالیت) تشکیل شود (واکنش 1) (Schwertmann and Fitzpatrick, 1993).

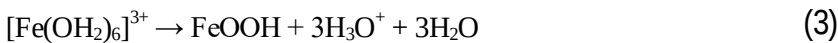


به طور مشابه، تجزیه سولفید آهن (پیریت) نیز می‌تواند از طریق واکنش 2 منجر به تشکیل گئوتایت شود.



در این واکنش‌ها، اکسیژن به‌عنوان پذیرنده الکترون عمل می‌کند. ممکن است میکروارگانیسم‌ها در فرایند اکسیداسیون Fe^{2+} به Fe^{3+} دخیل باشند یا دخالتی نداشته

باشند. هر چه pH محلول بالاتر باشد، Fe^{2+} انحلال یافته سریع‌تر اکسید می‌شود و احتمال اکسیداسیون غیرزیستی بیشتر است. از سوی دیگر، در شرایط بسیار اسیدی ($\text{pH} < 3$)، اکسیداسیون و تشکیل کانی‌های حاوی Fe^{3+} باید توسط میکروارگانیسم‌ها هدایت شود. هیدرولیز کاتیون Fe^{3+} در محلول از طریق کاتیون 6 آبه آهن $[\text{Fe}(\text{OH}_2)_6]^{3+}$ به‌عنوان واسطه انجام می‌شود. این کاتیون در معرض دی‌پروتونه شدن قرار می‌گیرد (واکنش 3).



بنابراین، هیدرولیز کامل و در نتیجه تشکیل اکسیدهای Fe^{3+} جامد طبق واکنش 3 تنها در pH پایین (واکنش به سمت چپ پیش می‌رود) و یا در حضور لیگندهایی با تمایل بالا به Fe^{3+} که لیگندهای H_2O را در کاتیون آبدار جایگزین می‌کنند، می‌تواند مهار شود. در شرایط بسیار اسیدی ($\text{pH} < 2.5$) و در حضور یون‌های K^+ و SO_4^{2-} ، ممکن است جاروسیت ($\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$) تشکیل شود. در این کانی، نسبت OH/Fe برابر 2 است، در حالی که این نسبت در اکسیدها برابر 3 است و یون SO_4^{2-} در پوسته لیگاندی Fe^{3+} شرکت می‌کند. در شرایط اسیدی و در حضور فسفات، کانی استرانگایت ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) تشکیل می‌شود که در آن لیگندهای Fe^{3+} فسفات هستند (Schwertmann and Fitzpatrick, 1993).

پس از تشکیل، اکسیدهای Fe^{3+} به دلیل پایداری ترمودینامیکی بالای خود معمولاً در یک محیط هوازی برای مدت‌زمان طولانی پایدار می‌مانند. بااین‌حال، در محیط‌های بی‌هوازی، اکسیدهای Fe^{3+} ممکن است توسط فعالیت میکروبی احیا شوند (واکنش 4).



این فرایند معمولاً شامل انتقال آنزیمی الکترون‌ها توسط میکروارگانیسم‌ها از بیومس در حال تجزیه (که در معادله فوق به‌صورت CH_2O نشان داده شده است) به Fe^{2+} است. باتوجه‌به اینکه فرایند احیا، پروتون مصرف می‌کند؛ هر چه pH پایین‌تر باشد، این فرایند بیشتر پیشروی می‌کند. فرایند احیا در خاک‌های اشباع از آب یا در بخش‌های بی‌هوازی دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و باتلاق‌ها رخ می‌دهد. در خاک‌های بی‌هوازی ایجاد

شده توسط آب راکد، واکنش احیا در اطراف ریشه‌های زنده یا مرده که زیست‌توده کافی برای تجزیه میکروبی تأمین می‌شود، به‌وضوح رخ می‌دهد؛ جایی که شرایط برای وقوع اکسیداسیون بدون وجود مقادیر کافی O_2 به‌عنوان پذیرنده الکترون، فراهم است. بلافاصله در اطراف ریشه، Fe^{3+} موجود در اکسیدهای Fe^{3+} به Fe^{2+} احیا شده و متحرک می‌شود. این آهن متحرک از ریشه فاصله می‌گیرد، اکسید شده و در فاصله‌ای دورتر با پتانسیل رداکس بالاتر به‌عنوان گئوتایت زرد یا لپیدوکروسایت نارنجی رسوب می‌کند (Schwertmann and Fitzpatrick, 1993).

وضعیت نسبتاً معکوسی در خاک‌های گلی‌سول رخ می‌دهد. در افق‌های بی‌هوازی، کانال‌های ریشه و جانوران تنها بخش‌های هوازی با تهویه مطلوب هستند؛ لذا احیا آهن سه‌طرفیتی به Fe^{2+} در داخل ماتریس خاک انجام می‌شود. Fe^{2+} به سمت پتانسیل رداکس بالاتر حرکت می‌کند، یعنی به سمت کانال‌های دارای تهویه و در سطح آن‌ها به‌صورت اکسیدهای Fe^{3+} رسوب می‌کند. اکسیدهای آهن به‌تدریج کانال‌ها را پوشانده و سطوح لوله‌ای سخت شده‌ای به نام "پیپ‌استم" تشکیل می‌دهند که به دلیل مقاومت مکانیکی پایین و/یا تأمین کافی اکسیژن، به طور مکرر توسط ریشه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور مشابه، ریشه‌های برنج که در خاک‌های بی‌هوازی رشد می‌کنند، با تأمین O_2 از طریق سیستم انتقال گاز درون گیاه به فضای خاک ریشه، از مسمومیت ناشی از غلظت‌های بالای Fe^{2+} جلوگیری می‌کنند که این امر باعث رسوب آهن به‌صورت اکسیدهای $Fe(III)$ می‌شود.

ممکن است Fe^{2+} به‌جای اکسیداسیون مجدد و تبدیل‌شدن به ترکیبات $Fe(III)$:
 1. توسط موجودات زنده جذب شود؛ 2. توسط مواد هومیک کمپلکس شود؛ و یا
 3. کانی‌های حاوی $Fe(II)$ را تشکیل دهد (Schwertmann and Fitzpatrick, 1993).

نوع کانی‌های $Fe(II)$ یا $Fe(II,III)$ که تشکیل می‌شوند بستگی به pH و غلظت آنیون‌های مرتبط (هیدروکسیل، کربنات، فسفات و سولفید) دارد. با توجه به اینکه حلالیت کانی‌های حاوی $Fe(II)$ بالاتر از اکسیدهای $Fe(III)$ است، کانی‌های $Fe(II)$ تنها در شرایط اسیدی ضعیف تا خنثی تشکیل می‌شوند. کانی‌های سفیدرنگ سیدریت و کانی‌های آبی‌رنگ ویونیت معمولاً در محیط‌های به‌شدت غیرهوازی خنثی و

باتلاقی یافت می‌شوند. انواع سولفیدهای آهن، عمدتاً سیاه‌رنگ، در جایی که پتانسیل رداکس به اندازه‌ای پایین است که SO_4^{2-} به S^{2-} احیا می‌شود، مانند کف دریاچه‌های غنی از عناصر غذایی، تشکیل می‌شوند. مگنتایت ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$) نیز در محیط‌های دریایی و خشکی وجود دارد و توسط باکتری‌های مگنتوتاکتیک تشکیل می‌شود (Schwertmann and Fitzpatrick, 1993).

3- نقش آهن در گیاهان

3-1- حضور در ساختار پروتئین‌ها

پروتئین‌های حاوی آهن به دودسته پروتئین‌های هم و پروتئین‌های غیرهم (دارای آهن-گوگرد) تقسیم می‌شوند (خلدبرین و اسلام‌زاده، 1381؛ اکبری، 1398؛ رسولی صدقیانی و همکاران، 1401).

3-1-1- پروتئین‌های هم: شناخته‌شده‌ترین پروتئین‌های هم، سیتوکروم‌ها هستند،

که به‌عنوان گروه پروستتیک، دارای ترکیبات پیچیده‌ی آهن هم-پورفیرین می‌باشند. سیتوکروم‌ها اجزاء دستگاه‌های اکسیداسیون-احیاء (رداکس) کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها هستند. کاتالاز و پراکسیدازها از دیگر آنزیم‌های هم می‌باشند. در شرایط کمبود آهن، فعالیت هر دو آنزیم کاهش می‌یابد. فعالیت آنزیم کاتالاز معرف وضعیت تغذیه‌ای آهن در گیاهان است. این آنزیم آب اکسیژنه (H_2O_2) را به آب و اکسیژن تجزیه کرده و در کلروپلاست‌ها در همکاری با آنزیم سوپراکسیددیسموتاز و نیز در تنفس نوری و مسیر گلیکولیز نقش کلیدی ایفا می‌کند.

پراکسیدازها نیز به شکل‌های مختلف در گیاهان وجود دارند. این آنزیم‌ها فرایند پلیمرشدن فنول‌ها به لیگنین را کاتالیز می‌نمایند. این آنزیم‌ها به‌وفور در دیواره‌های سلول‌های ریزودرم و آندودرم ریشه وجود دارند. شواهد فراوانی مبنی بر نقش پراکسیدازهای موجود در دیواره‌های سلول ریزودرم در تنظیم جذب آهن وجود دارد. در ریشه‌هایی که دچار کمبود آهن هستند، فعالیت آنزیم پراکسیداز بسیار بیشتر از فعالیت کاتالاز کاهش می‌یابد. اختلال در تشکیل دیواره سلولی و چوبی شدن آن و انباشت

ترکیبات فنولی در ریزودرم از جمله پیامدهای کاهش شدید فعالیت آنزیم پراکسیداز است. هم‌زمان با کاهش فعالیت این آنزیم، اکسیداسیون NADH و یا NADPH در سطح بیرونی غشا سیتوپلاسمی نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه، به ظرفیت غشا سیتوپلاسمی برای احیاء سوبستراهای دیگر از جمله کلات‌های Fe^{3+} افزوده می‌شود.

3-1-2- پروتئین‌های غیرهم: در این گروه از پروتئین‌ها، آهن به گروه تیول اسید آمینه سیستئین و یا گوگرد غیرآلی متصل شده است. فردوکسین¹ به‌عنوان مهم‌ترین پروتئین غیرهم، در واکنش‌های متابولیکی مهمی از جمله فتوسنتز و انتقال الکترون از فتوسیستم I در جهت آسمیلاسیون CO_2 ، بیوسنتز کلروفیل، فیتوکروم و اسیدهای چرب، آسمیلاسیون² گوگرد و نیتروژن، تثبیت نیتروژن، حفظ تعادل ردکس از طریق سیستم تیوردوکسین³ و چرخه هالیول-اسادا⁴ نقش بسزایی ایفا می‌کند (Fukuyama, 2004; Hanke and Mulo, 2013).

3-2- تأثیر بر فعالیت آنزیم‌ها

در برخی دیگر از آنزیم‌ها، آهن یا به‌عنوان جزء فلزی در واکنش‌های ردکس ایفای نقش می‌نماید و یا به‌عنوان رابط میان آنزیم و سوبسترا عمل می‌کند. در گیاهان مبتلا به کمبود آهن، فعالیت این آنزیم‌ها دچار اختلال می‌شود. تجمع ریبوفلاوین در ریشه‌ها (کاهش فعالیت آنزیم گزانتین اکسیداز)، انباشتگی اسیدهای آلی به‌ویژه اسیدهای سیتریک و مالیک (کاهش فعالیت آنزیم آکونیتاز)، افزایش میزان تثبیت گازکربنیک در برگ‌ها و ریشه‌های گیاهان (توقف فعالیت آنزیم آکونیتاز)، کاهش میزان کلروفیل، کاهش تشکیل اسید دلتا-آمینولولولینیک، پروتوکلروفیلید و ماده منیزیم-پروتوپورفیرین (کاهش فعالیت آنزیم کوپروپورفیرینوژن اکسیداز) در اثر اختلالات ناشی از کمبود آهن و توقف فعالیت‌های آنزیمی رخ می‌دهند (خلدبرین و اسلام‌زاده، 1381؛ رنجبر مالی‌دره و همکاران، 1395؛ اکبری، 1398).

1- Ferredoxin

2- Assimilation

3- Thioredoxin

4- Halliwell-Asada

3-3- تکوین کلروپلاست

قسمت اعظم آهن (50 تا 80 درصد) در کلروپلاست‌ها یافت می‌شود. آهن نقش مهمی در سنتز rRNA و mRNA کلروپلاست‌ها ایفا می‌کند. در شرایط بروز کمبود آهن، میزان پروتئین در سطح برگ، حجم سلول و شمار کلروپلاست‌ها بدون تغییر بوده ولی حجم کلروپلاست و میزان پروتئین در کلروپلاست کاهش می‌یابد و این کاهش در کلروپلاست‌های سلول‌های برگ بیشتر از سیتوپلاسم است (Al-Bamarny et al., 2010).

4- عوامل موثر در قابلیت دسترسی آهن

کمبود آهن (کلروز آهن) از عارضه‌های فیزیولوژیکی است که محصولات بسیاری از مناطق دنیا را تحت تأثیر قرار داده و عمده‌تأ ناشی از pH بالای خاک‌های آهکی است که آهن خاک را تثبیت نموده و به فرم‌های غیرقابل جذب تبدیل می‌کند و از دسترس گیاهان خارج می‌سازد. کمبود آهن، به دلیل تأثیر منفی بر عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی، باعث ایجاد آثار اقتصادی نامطلوب در سطح کلان می‌شود. کمبود آهن می‌تواند علل گوناگونی داشته باشد. pH بالا و حلالیت پایین آهن در خاک‌های قلیایی (شکل 2)، عدم تحرک نسبی در گیاه، بر همکنش با سایر عناصر غذایی، رطوبت بالا و تهویه ضعیف، فشردگی خاک، دمای پایین خاک، پایین بودن ماده آلی در خاک، ویژگی‌های گیاه و نسبت کم ریشه به شاخساره از جمله عواملی هستند که نقش اساسی در بروز کمبود آهن دارند (شکل 3) (مقدم و همکاران، 1391؛ اکبری، 1398؛ خرمی و رحمانیان، 1399).

انحلال آهن به شدت وابسته به pH می‌باشد. آهن در خاک در دو حالت اکسیداسیون وجود دارد: فریک (Fe^{3+}) و فرو (Fe^{2+}). در شرایط اسیدی (pHهای پایین) یون‌های آهن محلول هستند؛ با افزایش pH، یون‌های Fe^{2+} به سرعت اکسید شده و به Fe^{3+} تبدیل می‌گردد و به شکل‌های نامحلول مانند اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن رسوب می‌نماید (واکنش 5). براین اساس کمبود آهن اغلب در خاک‌های آهکی مناطق خشک مشاهده می‌شود. با این وجود احتمال کمبود آهن در خاک‌های اسیدی با مقدار آهن کل پایین نیز وجود دارد. در خاک‌های آهکی با pH در محدوده 7/3 تا 8/5 به دلیل حلالیت پایین

آهن، کمبود این عنصر مشاهده می‌شود (Shirsat and K, 2024). در شرایط اسیدی، آهن به شکل محلول یعنی Fe^{2+} وجود دارد.



بنابراین، کلروز آهن در خاک‌های قلیایی شایع است. افزایش pH به اندازه یک واحد می‌تواند انحلال ترکیبات Fe را تا 1000 برابر کاهش دهد و بدین ترتیب غلظت Fe را کاهش دهد.

مهم‌ترین عامل کمبود آهن در خاک‌های آهکی، زیادی بی‌کربنات در محلول خاک و گاهی اوقات غلظت بالای آن در آب آبیاری است. بر اساس مطالعات انجام شده مقدار بالای بی‌کربنات که در محلول‌های خاک آهکی بسته به محتوای آب خاک از 0/4 تا 3 میلی مولار متغیر است، می‌تواند از طریق افزایش pH، در جذب و انتقال آهن به برگ‌ها اختلال ایجاد نموده و منجر به غیرمتحرک شدن¹ آهن در برگ‌ها شود (Ding et al., 2020). غلظت بیش از 3 میلی‌اکی‌والان در لیتر آب آبیاری نیز منجر به تشدید کمبود آهن در گیاهان می‌شود (Elkins and Fichtner, 2016). به‌طور کلی میزان بالای بی‌کربنات از رشد ریشه ممانعت کرده و انتقال سایتوکینین به اندام هوایی را کاهش می‌دهد و در نهایت با ایجاد اختلال در تشکیل پروتئین و توسعه کلروپلاست‌ها، منجر به بروز کلروز می‌گردد (Mehrotra et al., 2022).

خاک‌های آهکی به دلیل وجود کربنات کلسیم، دارای pH بالایی هستند. توزیع اندازه ذرات، سطح ویژه و واکنش‌پذیری ذرات کربنات کلسیم نقش مهمی در خصوصیات پدوژنیک، شیمیایی و فرایندهای ریزوسفری این خاک‌ها ایفا می‌کند. ذرات ریز کربنات کلسیم (در اندازه رس) به دلیل ایجاد سطوح واکنش‌پذیر برای وقوع واکنش‌های تثبیت عناصر کم‌مصرف، در کاهش فراهمی این عناصر تأثیرگذارتر هستند (Bolan et al., 2023). زیادی آهک در خاک، غالباً موجب کلروز شدید آهن در بسیاری از گیاهان می‌شود. لازم به ذکر است که آهک به‌تنهایی مشکل چندانی در جذب آهن ایجاد نمی‌کند، ولی رابطه متقابل آن با شرایط خاص محیطی خاک منجر به بروز کمبود می‌شود. مقدار آهک کل و

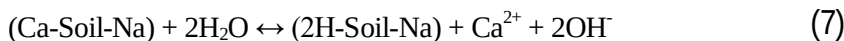
فعال تأثیر قابل توجهی بر قابلیت دسترسی آهن دارند. آهن فعال معمولاً با آهن کل در ارتباط است و تقریباً 50 درصد از آهن کل را تشکیل می‌دهد. مطالعات حاکی از آن هستند که وجود بیش از 7 الی 9 درصد آهن، فعال رشد ضعیف گیاهان و بروز کلروز را در پی دارد. در شناسایی کلروز ناشی از آهن، آهن فعال شاخص مزرعه‌ای قابل اعتمادتری نسبت به آهن کل می‌باشد؛ لذا تعیین آن در ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای و قابلیت دسترسی عناصر غذایی برای گیاهان از اهمیت بالایی برخوردار است. اگرچه ممکن است ظرفیت جذب کانی‌های کربناتی خیلی متفاوت نباشد، با این حال، این کانی‌ها محیط مطلوبی برای وقوع واکنش‌های جذب و رسوب که منجر به تشکیل کربنات‌ها، هیدروکسیدها و هیدروکسی کربنات‌های عناصر کم‌مصرف می‌شوند، ایجاد می‌کنند. این امر اثربخشی عناصر را حتی در شرایطی که مقدار کل آن‌ها در خاک بالا است، کاهش می‌دهد؛ لذا کمبود عناصر کم‌مصرف در خاک‌های آهنی اغلب مشاهده می‌شود. کربنات کلسیم فعال به عنوان شاخصی از واکنش‌پذیری آهن و یون‌های بی‌کربنات در محلول خاک عمل می‌کند و ارتباط نزدیکی با کمبود آهن در خاک‌ها دارد (Kadifeci *et al.*, 2024).

در مطالعات مختلف گزارش شده است که گیاهانی که در خاک‌های غنی از کربنات کلسیم، به‌ویژه کربنات کلسیم ریز، رشد می‌کنند و دارای علائم کلروز هستند، غلظت بالایی از آهن کل را دارند که برابر یا حتی بیشتر از برگ‌های گیاهان سالم سبز است (Martínez-Cuenca *et al.*, 2017; Singh, 2000; Mehrotra *et al.*, 2022). این پدیده از فرایند قلیایی‌شدن ناشی می‌شود که منجر به غیرفعال‌شدن فیزیولوژیکی آهن در آپوپلاست برگ می‌شود. به علاوه، آهن در حضور آب و دی‌اکسیدکربن تجزیه می‌شود و منجر به تشکیل و انباشت بی‌کربنات‌ها و کلسیم می‌گردد که به نوبه خود افزایش pH خاک را در پی دارد. علائم شدید کلروز ناشی از آهن، نه تنها باعث انباشت بیشتر آهن در برگ‌ها می‌شود، بلکه به‌طور جدی توسعه کلروپلاست و رشد برگ را نیز مختل می‌کند (Mehrotra *et al.*, 2022).

ریشه گیاه با ایجاد شرایط ویژه‌ای در اطراف خود (ترشح H^+ یا پروتون، اسیدهای آلی و کلات‌های طبیعی) از قلیایی بودن خاک در نزدیکی ریشه کاسته و بدین ترتیب حلالیت ترکیبات آهن موجود در خاک را افزوده و آهن موردنیاز گیاه را در حد کافی تأمین

می‌نماید. آبیاری سنگین، فشردگی یا هر عامل دیگری که تهویه خاک را کاهش دهد، به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در خاک منجر می‌شود و در واکنش با آهن، بی‌کربنات تولید می‌نماید (واکنش 6). بی‌کربنات کلسیم تولید شده در خاک‌های آهنی هم در جذب آهن و هم در تحرک آن در گیاه اثر می‌گذارد. بی‌کربنات خاصیت بافری دارد و با جلوگیری نسبی از کاهش pH در اطراف ریشه، حلالیت ترکیبات آهن‌دار و قابلیت جذب آهن را کاهش می‌دهد (موسیوند و همکاران، 1388؛ هاشمی‌مجد، 1392).

در خاک‌های آهنی انحلال کربنات کلسیم به‌عنوان یک سازوکار بافرکننده pH عمل می‌کند (Zhang *et al.*, 2016). فرایند انحلال به طور مستقیم به غلظت یون‌های کلسیم بستگی دارد. تحقیقات آماری نشان‌دهنده وجود یک رابطه معنی‌دار بین غلظت یون‌های Ca^{2+} و pH خاک هستند (Al-Busaidi and Cookson, 2003). در سیستم‌های ناهمگن، روابط بین pH خاک و مقادیر کربنات کلسیم و یون‌های کلسیم به‌صورت واکنش‌های شیمیایی مشخصی نمایان می‌شود (واکنش‌های 6، 7 و 8). تقریباً 100 درصد مکان‌های تبادل در خاک‌های آهنی با کاتیون‌های بازی اشباع شده و یون‌های Ca^{2+} به‌عنوان کاتیون غالب در سطوح تبدالی و محلول خاک حضور دارند. هنگامی که غلظت یون‌های کلسیم در محلول خاک افزایش می‌یابد، اثر بافری کلسیم سبب رسوب کربنات کلسیم می‌شود (واکنش 6). در نتیجه، pH خاک بافر شده و معمولاً از 8/5 فراتر نمی‌رود (Bolan *et al.*, 2023). در مقابل، انحلال کربنات کلسیم از طریق فراهم نمودن مقادیر بالای OH^- منجر به خنثی‌سازی یون‌های H^+ شده و به‌این ترتیب تأثیر ترکیبات اسیدی ترشح شده توسط گیاهان را بافر می‌نماید (Jalali and Moradi, 2020).



این واکنش‌ها به‌خوبی نشان‌دهنده روابط پیچیده و دینامیک بین اجزای تشکیل‌دهنده خاک‌های آهنی و اثرات آن‌ها بر pH و شیمی خاک هستند.

زردی ناشی از کمبود آهن معمولاً در شرایط آب‌وهوایی سرد و مرطوب، زمانی که **رطوبت خاک بالا** و **تهویه آن ضعیف** است، مشاهده می‌شود. در این شرایط، توسعه ریشه و جذب عناصر غذایی به شدت کاهش می‌یابد که این امر به نوبه خود به ایجاد تنش آهن کمک می‌کند. رطوبت بالای خاک از طریق تأثیر بر متابولیسم گیاه، اثرات قابل توجهی بر کلروز ناشی از کمبود آهن دارد. تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که آبیاری بیش از حد یا دوره‌های طولانی خیس بودن خاک‌های آهکی، به دلیل تولید بی‌کربنات، می‌تواند به بروز کلروز آهن منجر شود. علاوه بر این، وجود بی‌کربنات و pH بالا به همراه مقادیر پایین آهن در خاک‌هایی با تهویه ضعیف، می‌تواند به پوسیدگی ریشه‌های نازک کمک کند و ظرفیت جذب کل سیستم ریشه‌ای را کاهش دهد. این عوامل به نوبه خود منجر به تشدید کلروز آهن می‌شوند (پیرمادیان، 1398). لازم به ذکر است که ایجاد شرایط غرقاب و ماندابی در خاک، زمانی که تشکیل بی‌کربنات در کمبود آهن دخیل نباشد، می‌تواند از طریق افزایش Fe^{2+} قابلیت استفاده آهن را افزایش دهد.

در خاک‌های فشرده و ریزافت که زهکشی ضعیفی دارند، دی‌اکسیدکربن تجمع می‌یابد و با کربنات کلسیم فعال موجود در خاک‌های آهکی واکنش می‌دهد و موجب تولید بی‌کربنات می‌گردد. یون‌های بی‌کربنات که با افزایش pH ارتباط دارند، به تشکیل رسوب هیدروکسید آهن منجر می‌شوند. از طرف دیگر مقادیر مازاد دی‌اکسیدکربن در خاک‌های غرقاب از فعالیت آنزیم‌های دخیل در جذب آهن توسط گیاه ممانعت می‌نماید. در نتیجه، آهن در خاک غرقاب و متراکم با تهویه ضعیف غیرقابل دسترس می‌گردد. در مقابل، قابلیت دسترسی آهن در خاک‌های دارای اکسیژن کافی یا تهویه مطلوب افزایش می‌یابد که خود به بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه کمک می‌کند (Shirsat and K, 2024; Mehrotra et al., 2022).

افزودن مواد آلی، از جمله کودهای دامی، به خاک‌هایی با زهکشی مطلوب می‌تواند با تأثیرگذاری بر حلالیت عناصر کم‌مصرف، به افزایش قابلیت دسترسی آهن کمک کند. تأثیرات مثبت افزودن این مواد به خاک غالباً به توانایی کلاته کردن آهن توسط ترکیبات آلی مانند اسید هیومیک، آمینواسیدها، فنول‌ها و هیدروکسامات‌ها و همچنین تحریک فعالیت میکروبی در منطقه ریشه مرتبط می‌شود. علاوه بر این، ریز جانداران موجود در مواد آلی دارای قدرت ترشح سیدروفور هستند. باتوجه به میل ترکیبی بالای لیگاندهای آلی

شامل اسیدهای آلی، ترکیبات هیومیک و سیدروفورها با Fe^{3+} و نیز قابلیت فراهمی بالای آهن موجود در این ترکیبات نسبت به منابع معدنی نامحلول آهن، آهن کمپلکس شده با لیگاندهای آلی از معرض رسوب و تثبیت به شکل هیدروکسیدهای آهن در امان مانده و به این ترتیب وضعیت تغذیه‌ای آهن در گیاهان بهبود می‌یابد. به‌طور کلی، مواد آلی با افزایش فعالیت ریز جانداران که نقش قابل توجهی در فرایندهای اکسیداسیون و احیای آهن ایفا می‌کنند، به بهبود عملکرد بیولوژیک، ساختار خاک، تهویه و افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی کمک می‌کنند و به تبع آن، فراهمی آهن در خاک و گیاه را افزایش می‌دهند (برمکی و همکاران، 1389؛ Krouma, 2023).

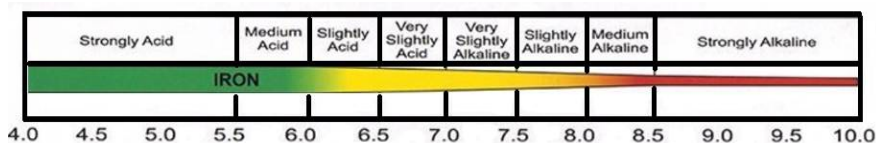
تنش سرما تأثیرات قابل توجهی بر فعالیت میکروبی و آنزیم‌های مؤثر در دسترسی عناصر کم‌مصرف در گیاهان دارد. با گرم‌شدن زمین در فصل بهار، این تأثیرات کاهش می‌یابند، اما دماهای پایین خاک می‌توانند منجر به بروز کمبود آهن در گیاهان شوند (Shirsat and K, 2024). علاوه بر این، دمای پایین می‌تواند انحلال دی‌اکسیدکربن در خاک‌ها را افزایش دهد که در پی آن غلظت بی‌کربنات در خاک افزایش می‌یابد و بروز کلروز در گیاهان تشدید می‌گردد. تولید فیتوسیدروفورها و به تبع آن تحرک و جذب آهن، در دماهای پایین خاک کاهش می‌یابد. همچنین، در دماهای بالای خاک، به دلیل تحریک فعالیت میکروبی و افزایش تولید دی‌اکسیدکربن، احتمال افزایش سطح بی‌کربنات و بروز کلروز آهن نیز وجود دارد (Mehrotraa et al., 2022).

کمبود و یا بیش بود برخی از عناصر پرمصرف و کم‌مصرف (اثرات آنتاگونیستی)¹

نیز می‌تواند منجر به بروز کمبود آهن در گیاهان شود. کمبود آهن به دلیل زیادی مس، منگنز، روی و مولیبدن یا اثرات متقابل آهن و فسفر در برخی گیاهان دیده می‌شود که احتمالاً به رسوب کانی‌های حاوی آهن و فسفر مربوط می‌باشد. علاوه بر این، احتمال مواجهه با تنش آهن در گیاهانی که نیتروژن را به شکل نترات دریافت می‌کنند بیشتر از گیاهانی است که نیتروژن آمونیومی دریافت می‌نمایند، چرا که در هنگام جذب نترات توسط گیاهان، OH^- در ریزوسفر آزاد می‌شود و pH ناحیه ریشه افزایش می‌یابد، لذا در سیستم‌هایی با خاصیت بافری ضعیف، قابلیت استفاده آهن کاهش می‌یابد. به این ترتیب، حلالیت آهن و قابلیت دسترسی آن با کاهش

1- Antagonist effect

pH که در نتیجه مصرف آمونیوم و آزادسازی یون‌های H^+ از ریشه صورت می‌گیرد، افزایش می‌یابد (شکل 2) (هاشمی مجد، 1392؛ رسولی صدقیانی و همکاران، 1401).



شکل 2- تأثیر pH بر قابلیت دسترسی آهن برای گیاهان (Roques et al., 2013)

گیاهان از نظر قابلیت جذب آهن با هم تفاوت دارند و بر اساس حساسیت یا مقاومت به غلظت‌های پایین آهن قابل استفاده، تقسیم‌بندی می‌شوند. توانایی گیاهان در جذب و انتقال آهن مربوط به فرایندهای سازگاری ژنتیکی است که در پاسخ به شرایط کمبود یا تنش آهن به وجود می‌آید. ریشه گیاهان کارآمد یا به اصطلاح آهن-کارا، محیط رشد را تغییر داده و قابلیت استفاده و جذب آهن را از طریق برخی راهبردها بهبود می‌بخشند (پیرمادیان، 1398؛ Shirsat and K, 2024).

5- راهبردهای جذب آهن در گیاهان آهن-کارا¹

آهن در خاک به شکل‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} موجود می‌باشد ولی Fe^{3+} شکل عمده آن است که به صورت ترکیبات کم محلول و نامحلول اکسید و هیدروکسیدهای آهن به وفور یافت می‌شود. هنگامی که کود حاوی Fe^{2+} به خاک افزوده می‌شود، در کمترین زمان ممکن، در اثر اکسیداسیون به Fe^{3+} تبدیل می‌گردد. Fe^{3+} تحرک کمتری در خاک دارد، لذا گیاه برای رفع نیاز آهن و استفاده از منبع Fe^{3+} به راهبردها متوسل می‌شود (شکل 3) (Mehrotra et al., 2022). به‌طور کلی دو راهبرد برای جذب یا تغذیه آهن در گیاهان توسط مارشنر پیشنهاد شده است (Marschner, 2011).

5-1- راهبرد I (مربوط به گیاهان دولپه‌ای و تک‌لپه‌ای غیرگرامینه): در این گیاهان

با ترشح یون‌های H^+ از ریشه، تحرک Fe^{3+} افزایش می‌یابد و می‌تواند از طریق جریان

پخشیدگی به نزدیکی ریشه برسد. از طرف دیگر، Fe^{3+} توسط عوامل کلات‌کننده به سطح ریشه منتقل شده و توسط آنزیم احیاکننده آهن III (Fe^{3+} -Reductase) متصل به غشاء سلولی، به آهن II احیا می‌شود. در ادامه Fe^{2+} به‌راحتی توسط ناقل‌هایی که در سطح سلول‌های ریشه مستقر هستند، جذب گیاه می‌گردد. فعالیت آنزیم Fe^{3+} -Reductase بستگی شدیدی به pH خاک دارد. بطوری‌که با افزایش pH، فعالیت این آنزیم کاهش می‌یابد. علاوه بر این، این آنزیم از جمله آنزیم‌های القایی است که با بروز کمبود آهن فعالیت آن تشدید می‌شود. نکته: ترشح H^+ از سلول‌های ریشه که در شرایط بروز کمبود آهن افزایش می‌یابد، در نتیجه‌ی فعالیت پمپ پروتونی ATPase موجود در غشاء پلاسمایی است، این بدان معناست که یون‌های H^+ در اثر فعالیت آنزیم Fe^{3+} -Reductase ترشح نمی‌شوند.

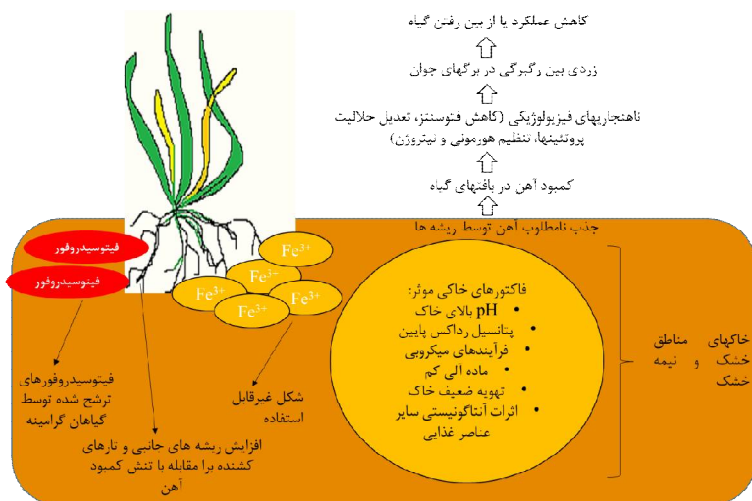
2-5- راهبرد II (مربوط به گیاهان تک‌لپه‌ای گرامینه نظیر گندم، جو، یولاف، چاودار، ذرت): در این راهبرد دو مشخصه اصلی شامل 1- افزایش ترشح ترکیبات غیرپروتئینی و کمپلکس‌کننده بنام فیتوسیدروفور (Phytosiderophores) یا سیدروفور گیاهی 2- ایجاد سیستم اختصاصی جذب کمپلکس‌های Fe^{3+} -PS وجود دارد. فیتوسیدروفورها ترکیبات شش دندانه‌ای هستند و از ترکیب اسیدآمین‌های غیرپروتئینی به وجود می‌آیند. این ترکیبات میل ترکیبی بالایی با Fe^{3+} دارند. به هنگام بروز کمبود آهن، مقادیر بالایی از فیتوسیدروفورها توسط ریشه گیاهان راهبرد II به ریزوسفر ترشح می‌شوند که می‌توانند با Fe^{3+} کم‌محلول، کمپلکس تشکیل داده و تحرک آن را افزایش دهند. این بدان معناست که کمپلکس‌های Fe^{3+} -PS محلول بوده و می‌توانند خود را به نزدیکی سطح ریشه برسانند. در سطح ریشه، در اثر تشکیل سیستم اختصاصی جذب برای این کمپلکس‌ها، Fe^{3+} همراه با فیتوسیدروفور می‌تواند توسط سیستم جذب یا ناقل، از غشاء سلول‌های ریشه وارد گیاه شود. در ادامه، Fe^{3+} در داخل گیاه به Fe^{2+} احیا شده و سایر مراحل جذب و انتقال ادامه می‌یابد. فیتوسیدروفورها نیز یا در داخل گیاه هضم می‌شوند و یا مجدداً به ریزوسفر ترشح شده و چرخه جذب و انتقال آهن را تکرار می‌نمایند (شکل 4).

نکته: در زمان کمبود آهن، بیان ژن‌های فریک اکسید ردوکتاز افزایش می‌یابد که پروتئین‌های مسئول جذب و توزیع مجدد آهن را کدگذاری می‌کنند. این پروتئین‌ها ژن‌هایی مانند ZIPs، NRAMPs، YS1 و YSL و آنزیم‌هایی نظیر نیکوتین آمین سنتاز و

فیتوسیدروفورها را برای سنتز نیکوتینامید کدگذاری می‌کنند و به جذب بیشتر آهن توسط سلول‌های ریشه گیاه کمک می‌نمایند (Yadav et al., 2008).

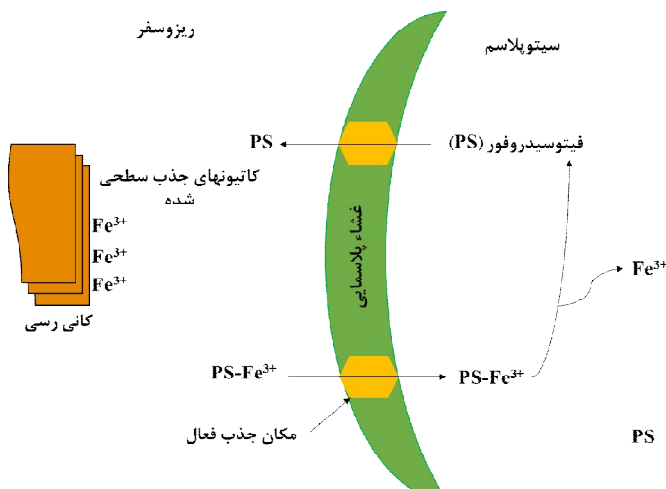
نکته: فیتوسیدروفورها با آهنگ منظمی از ریشه غلات ترشح می‌شوند. پیک ترشح معمولاً دو ساعت پس از روشنایی آغاز شده و تا سه ساعت ادامه می‌یابد. مقدار این ترکیبات با افزایش غلظت آهن در ریزوسفر به شدت کاهش می‌یابد و در واقع این فرایند، سازوکار پاسخ غلات به کمبود آهن است. مهم‌ترین نوع فیتوسیدروفور، موژنئیک اسید و سایر انواع فیتوسیدروفوری است که از این نوع حاصل می‌شود (از جمله دزوکسی موژنئیک اسید، هیدروکسی موژنئیک اسید و آنیک اسید).

نکته: برخی از باکتری‌ها به‌ویژه خانواده سودوموناس‌ها، در شرایط کمبود آهن سیدروفور ترشح می‌کنند. قدرت جذب سیدروفورها برای آهن بیش از فیتوسیدروفورها می‌باشد. ترشح سیدروفور توسط میکروارگانیسم‌ها به تغذیه گیاهان نیز کمک به سزایی می‌نماید؛ چراکه کمپلکس‌های تشکیل شده Fe^{3+} با سیدروفورها از جابه‌جایی خوبی در خاک برخوردارند و می‌توانند آهن را به نزدیکی سطح ریشه برسانند. باین‌حال غلظت فیتوسیدروفورها در نزدیکی سطح ریشه در مقایسه با سیدروفورهای میکروبی همواره بالاتر است.



شکل 3- عوامل موثر بر قابلیت دسترسی آهن و سازوکارهای مقابله با کمبود آهن در

گیاهان (Mehrotra et al., 2022)



شکل 4- سازوکارهای افزایش دسترسی آهن و انتقال از طریق کمپلکس‌های فیتوسیدروفور (هاشمی مجد، 1392)

6- روش‌های تشخیص کلروز آهن در گیاهان

تجزیه خاک و گیاه می‌تواند برای تشخیص کلروز آهن در گیاهان مورد استفاده قرار گیرد (رسولی صدقیانی و همکاران، 1401).

مسئله مناسب‌تر بودن تجزیه خاک یا تجزیه گیاه به عنوان مبنای توصیه‌های کودی، سال‌هاست که مورد بحث و اختلاف نظر قرار دارد. هر دو روش به کالبراسیون متکی هستند که به معنای تعیین رابطه بین غلظت عناصر غذایی در خاک یا گیاهان و منحنی‌های رشد و عملکرد متناسب است که معمولاً از طریق آزمایش‌های گلدانی یا مزرعه‌ای با غلظت‌های مختلف کودها به دست می‌آید. هر دو روش مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و نتایج کیفی متفاوتی نیز ارائه می‌دهند (Römheld, 2012).

تجزیه شیمیایی خاک قابلیت دسترسی بالقوه عناصر غذایی را نمایش می‌دهد که ریشه‌ها در شرایط مساعد برای رشد و فعالیت خود قادر به جذب آن‌ها هستند. از سوی دیگر، تجزیه گیاه به طور دقیق وضعیت واقعی تغذیه‌ای گیاهان را منعکس می‌کند؛ بنابراین، ترکیبی از هر دو روش مبنای بهتری برای ارائه توصیه‌های کودی فراهم می‌کند.

بالین‌حال، اهمیت نسبی هر یک از این روش‌ها برای ارائه توصیه‌ها به گونه گیاهی، ویژگی‌های خاک و عناصر غذایی موردنظر بستگی دارد (Römheld, 2012).

در درختان میوه و درختان جنگلی، تجزیه خاک به‌تنهایی نمی‌تواند راهنمای مناسبی برای توصیه‌های کودی باشد، زیرا شناسایی دقیق ناحیه ریزوسفر که درختان با ریشه‌های عمیق بیشتر عناصر غذایی را از آنجا جذب می‌کنند، دشوار است. به‌علاوه، در این گیاهان دائمی، نوسانات فصلی در غلظت عناصر غذایی در برگ‌ها به دلیل ظرفیت بافری تنه‌ها، نسبت به گونه‌های گیاهی یک‌ساله نسبتاً پایین است. به همین دلیل، غلظت عناصر غذایی در برگ‌های بالغ نماینده دقیقی از وضعیت تغذیه‌ای طولانی‌مدت گیاه محسوب می‌شود. همچنین، منحنی‌های کالیراسیون، حد بحرانی غلظت عناصر غذایی و دامنه مناسب آن‌ها می‌تواند به طور دقیق برای محل خاص، گونه گیاهی و حتی نژاد خاص تنظیم شود؛ بنابراین، در گونه‌های دائمی، تجزیه برگ اغلب به‌عنوان روش انتخابی مطرح است. اما ضروری است که تجزیه شیمیایی خاک حداقل یک‌بار برای یک محل خاص انجام شود تا سطح کلی عناصر غذایی بالقوه دارای قابلیت دسترسی شناسایی شود (Römheld, 2012).

در مراتع، نه‌تنها به دلیل ویژگی‌های الگوی ریشه‌زنی گونه‌های ترکیبی (عمق و سطحی) بلکه به دلیل اهمیت ترکیب عناصر غذایی گیاهان مرتعی و علوفه‌ای برای تغذیه دام، تجزیه گیاه به طور متداول‌تری نسبت به تجزیه خاک استفاده می‌شود. در محصولات زراعی، نوسانات کوتاه‌مدت غلظت عناصر غذایی می‌تواند محدودیت‌های جدی برای استفاده از تجزیه گیاه به‌عنوان مبنایی برای ارائه توصیه‌های کودی ایجاد کند؛ بنابراین، برای پیش‌بینی دامنه تغییرات غلظت عناصر غذایی در گیاهان طی فصل رشد، تجزیه خاک ضروری است. در محصولات یک‌ساله، مقادیر زیادی از عناصر غذایی از خاک سطحی جذب می‌شود که این امر تجزیه خاک را آسان‌تر کرده و اهمیت آن را به‌عنوان یک ابزار در توصیه‌های کودی افزایش می‌دهد. عدم تعادل در عناصر غذایی گیاهان، به‌ویژه کمبود پنهان عناصر کم‌مصرف، یکی از مشکلات جهانی به‌ویژه در کشاورزی متراکم است که به‌طور کلی پیامدهایی برای عملکرد گیاه، تحمل آن به بیماری‌ها و آفات و برای تغذیه دام و انسان دارد (Römheld, 2012).

علاوه بر این، روش‌های آنزیمی، بیوشیمیایی و بیوفیزیکی در صورتی که غلظت کل یا بخش محلول یک عنصر با دسترسی فیزیولوژیکی آن همبستگی ضعیفی داشته باشد، می‌توانند ارزشمند باشند. قابلیت دسترسی این روش‌ها به‌عنوان جایگزینی برای تجزیه شیمیایی در ارائه توصیه‌های کودی بستگی زیادی به‌دقت، صحت و سادگی آن‌ها برای انجام آزمون‌های سریع دارد. این نیازها در مورد آهن و آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز ممکن است برآورده شود. با این حال، به‌ویژه وقتی که استاندارد مناسبی (گیاهانی با غلظت کافی از عنصر غذایی موردنظر) در دسترس نباشد و هیچ علامت کمبودی در گیاهان مشاهده نشود، کالیراسیون این روش‌ها همچنان یک چالش باقی می‌ماند. این روش‌ها بیشتر برای اهداف تشخیصی و حل مشکلات خاص اختلالات تغذیه‌ای در تجزیه برگ مناسب هستند و به‌عنوان مکملی برای تجزیه برگ در نظر گرفته می‌شوند، نه اینکه بتوانند به طور کامل جایگزین آن‌ها شوند (Chaney, 1984; Römheld, 2012).

1-6- تجزیه خاک

تجزیه خاک به‌صورت معمول برای ارائه توصیه‌های کوددهی در محصولات یک‌ساله استفاده می‌شود. با این حال، تجزیه خاک در ارزیابی‌های مربوط به درختان کارایی محدودی دارد، چراکه سیستم ریشه‌ای عمیق با توزیع غیریکنواخت باعث دشواری در برداشت یک نمونه خاک معرف می‌شود. دو رویکرد اصلی برای تشخیص کلروز آهن ناشی از آهک¹ در خاک بر اساس تجزیه خاک می‌تواند انجام شود: (1) اندازه‌گیری آهن قابل دسترسی با استفاده از عصاره‌گیرهایی که قابلیت کلات کردن فلزات را دارند؛ (2) تعیین محتوای آهک خاک (Pestana et al., 2003).

2-6- تجزیه گیاه

کلروز آهن می‌تواند با استفاده از علائم ظاهری که یک روش سریع و اقتصادی است، شناسایی شود. محققان مختلف استفاده از امتیازات دیداری از 0 (بدون علائم) تا 5 (درختان با شاخه‌های مرده و برگ‌های جوان سفید) را برای درجه‌بندی شدت کمبود

1- Lime-induced iron chlorosis

پیشنهاد داده‌اند (Romera *et al.*, 1991). در حال حاضر میزان کلروز می‌تواند به سرعت توسط ارزیابی محتوای کلروفیل با استفاده از دستگاه SPAD که نور را در دو طول موج 650 و 950 نانومتر اندازه‌گیری می‌کند، کمی‌سازی شود. باین‌حال، زمانی که علائم کمبود آشکار می‌شوند، برای جلوگیری از تأثیرات منفی ناهنجاری‌ها بر عملکرد و کیفیت میوه اغلب بسیار دیر است. تجزیه شیمیایی گیاه، به‌ویژه تجزیه برگ بر اساس رابطه بین نرخ رشد گیاهان و محتوای عناصر غذایی، هنوز رایج‌ترین روش استفاده شده برای اهداف تشخیصی در درختان است (Sanz and Montañés, 1995). تجزیه بافتی برخی مزایا و چالش‌هایی را ارائه می‌دهد. تجزیه برگ، همه عواملی را که ممکن است در قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک و جذب گیاه تأثیر داشته باشند را تلفیق می‌کند و تعادل تغذیه‌ای گیاه را در زمان نمونه‌برداری مشخص می‌نماید. باین‌حال، تجزیه برگ در ارزیابی کلروز ناشی از آهک محدودیت‌هایی را در پی دارد، زیرا در بسیاری از گیاهانی که در خاک کاشته می‌شوند هیچ ارتباطی بین غلظت آهن برگ و میزان کلروز که به‌عنوان محتوای کلروفیل بیان می‌شود، وجود ندارد (Mengel *et al.*, 1994). علاوه بر این، غلظت آهن در برگ‌های کلروزه، بر اساس وزن خشک، اغلب حتی بیشتر از برگ‌های سبز است. این پدیده توسط روم‌هلد پارادوکس کلروز نامیده شده است و ناشی از غیرفعال شدن آهن در برگ‌ها یا جلوگیری از رشد برگ به دلیل کلروز آهن است (Römheld, 2000). تجزیه منبع فعال آهن در برگ‌ها (معمولاً با Fe^{2+} شناخته می‌شود)، با استفاده از عصاره‌گیرهایی مانند اسید استیک، اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک، اغلب مطرح شده است (Bavaresco *et al.*, 1993). باین‌حال، طبق گزارش‌های Abadía (1992)، ممکن است در این روش‌ها بخشی از آهن سه‌ظرفیتی از جمله آهن موجود در فریتین¹ نیز توسط عصاره-گیرها استخراج شود. محدودیت دیگر تجزیه برگ این است که تاریخ نمونه‌برداری توصیه شده برای درختان میوه، در انتهای فصل رشد، معمولاً بسیار نزدیک به موعد برداشت است. به‌عنوان مثال، در تاریخ توصیه شده برای تجزیه برگ هلو، 120 روز پس از گلدهی کامل، بسیاری از ارقام کاشته شده در منطقه مدیترانه از قبل برداشت شده یا بسیار نزدیک به برداشت هستند. در این هنگام دیگر امکان اصلاح اختلالات تغذیه‌ای به‌منظور

جلوگیری از کاهش عملکرد وجود ندارد. به‌عنوان یک رویکرد نوین در پیش‌بینی کمبود آهن در درختان گلابی، روش‌هایی بر اساس تعیین ترکیب معدنی گل‌ها پیشنهاد شده‌اند (Sanz and Montañés, 1993). امروزه تجزیه گل‌ها برای تعداد زیادی از درختان میوه از جمله گلابی، هلو، زردآلو، شفتالو، سیب، گردو، زیتون، پسته، بادام، و مرکبات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pestana et al., 2003). اصلی‌ترین مزیت تجزیه گل نسبت به برگ این است که ارزیابی می‌تواند در ابتدای فصل رشد انجام شود. در درختان میوه برگ‌ریز و همیشه‌سبز، با استفاده از تجزیه گل‌ها، امکان شناسایی و اصلاح هر نوع کمبودی قبل از تشکیل میوه¹ وجود دارد. این امر زمان کافی برای اصلاحات تغذیه‌ای را فراهم می‌نماید و عملکرد و کیفیت میوه را بهبود می‌بخشد (Pestana et al., 2001).

برای تشخیص کلروز آهن بر اساس مقدار آهن گل‌ها، نتایج باید اجازه پیش‌بینی کلروفیل برگ‌ها در فصل بعد از آن را فراهم کند. مطالعات بلندمدت نشان داده‌اند که احتمال ایجاد کلروز آهن در درختان هلو زمانی بالاست که غلظت آهن در گل‌ها کمتر از 160 میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک باشد (Sanz et al., 1997). تفسیر نتایج تجزیه گل‌ها همانند تفسیر نتایج تجزیه برگ پیچیده است و نیاز به ابزارهای مشابه برای تشخیص صحیح دارد. در حال حاضر برای دستیابی به شاخص خوبی از وضعیت کلروز آهن، به‌جای استفاده از غلظت عنصر، تعادل‌های تغذیه‌ای عناصر موردبررسی قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد الگوی تجمع آهن در درختان میوه به چرخه زندگی آن‌ها بستگی دارد. در گونه‌های برگ‌ریز مانند هلو، گلابی و سیب، میانگین غلظت آهن در گل‌ها بیشتر از برگ‌هاست، درحالی‌که در پرتقال عکس این حالت مشاهده می‌شود (Sanz and Montañés, 1993; Pestana et al., 2001). ضریب همبستگی برای رابطه بین میزان آهن در گل‌ها و کلروفیل در برگ‌ها در درختان برگ‌ریز به طور معنادار مثبت و در پرتقال منفی است. در درختان برگ‌ریز گلدهی قبل از رشد رویشی رخ می‌دهد، در مقابل، گلدهی کامل در مرکبات با رشد رویشی جدید هم‌زمان است؛ بنابراین، احتمالاً برگ‌های جوان به‌عنوان مکان‌های مصرف‌کننده² قوی برای جذب آهن در مرکبات عمل می‌کنند و در جذب آهن با گل‌ها رقابت می‌کنند. احتمالاً به دلیل این تفاوت‌ها، غلظت‌ها

1- Fruit set

2- Sink

یا نسبت‌های عناصر غذایی که می‌توانند به‌عنوان شاخص‌ها استفاده شوند، بین گونه‌ها متفاوت است (Pestana *et al.*, 2003).

افزایش محتوای پتاسیم و نسبت K:Ca ناشی از کلروز آهن در گل‌های هلو، نمونه‌هایی از عناصر غذایی و تعادل‌های مرتبط با کلروز آهن می‌باشند. علاوه بر این، باتوجه‌به اینکه غلظت آهن در گل‌های هلو سال‌به‌سال تغییر می‌کند، استفاده از این شاخص برای پیش‌بینی کلروز آهن در سال بعد دشوار می‌باشد، لذا غلظت‌های پتاسیم و روی و نسبت K:Zn در گل‌ها که مقادیر ثابتی در طول زمان دارند، به‌عنوان شاخص‌های محتمل در جهت شناسایی کلروز آهن مورد استفاده قرار می‌گیرند. نسبت K:Zn بیش از 450 در گل‌ها در زمان گلدهی کامل، ممکن است با کلروز آهن در هلو مرتبط باشد (غلظت کلروفیل برگ‌ها کمتر از 200 میکرومول در مترمربع). درحالی‌که 120 روز بعد، با نسبت K:Zn کمتر از 375 ممکن است کلروز توسعه یابد (Igartua *et al.*, 2000). با استفاده از تجزیه عناصر غذایی، میزان یک عنصر تعیین می‌شود؛ اما به‌ندرت می‌توان اشکال متابولیک (فعال) را از اشکال غیرفعال تشخیص داد. برای پیشگیری از این مشکل و تشخیص کلروز آهن در درختان میوه، برخی از پژوهشگران اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های کلیدی را پیشنهاد نموده‌اند. Garcia و Galindo (1991) استفاده از فعالیت کلروفیلاز را به‌عنوان یک شاخص بیوشیمیایی از کمبود منگنز و آهن در مرکبات پیشنهاد داده‌اند. در برگ‌های لیمو، کمبود آهن باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، کاتالاز و برخی از سوپراکسید دیسموتازها می‌شود. به نظر می‌رسد نیاز به تحقیقات بیشتری وجود دارد تا بتوان از یک شاخص قابل‌اعتماد برای ارزیابی کلروز آهن با اهداف تشخیصی در درختان میوه استفاده کرد.

7- تأثیرات کمبود و بیش‌بود آهن بر رشد گیاهان

7-1- علائم ظاهری کمبود آهن در گیاهان

محدوده کفایت آهن در بافت‌های گیاهی بین 50 تا 250 پی‌پی‌ام است (جدول 3) (Fageria *et al.*, 1990; Urrestarazu *et al.*, 1994). عموماً هنگامی که مقدار آهن بافت

کمتر از 50 پی‌پی‌ام باشد کمبود آهن بسیار محتمل است. آهن در گیاه متحرک نیست، بنابراین، علائم کمبود آن از برگ‌های جوان و قسمت‌های بالای ساقه شروع می‌شود و با شدت یافتن کمبود، کل گیاه را در بر می‌گیرد. علائم کمبود آهن به صورت شبکه‌ای از رگبرگ‌های سبز کم‌رنگ در متن سبز روشن یا زرد برگ، در شاخه‌های انتهایی درخت کاملاً مشهود است. با پیشرفت کمبود، برگ‌ها بطور کامل زرد می‌شوند. در غلات، برگ‌های دچار کمبود آهن، راه‌راه به نظر می‌رسند. در درختان میوه، کلروز بین رگبرگی به صورت شبکه نامنظم پدیده رایجی است (شکل 5). رگبرگ‌ها سبز بوده و بافت‌های مابین آن‌ها کلروزه می‌شوند. با شدت یافتن کمبود، حاشیه برگ‌ها به سفیدی گراییده سپس علائم سوختگی (نکروز) ظاهر می‌شود (Crane et al., 2007؛ خرمی و رحمانیان، 1399؛ رسولی صدقیانی و همکاران، 1401).

جدول 3- حد کفایت آهن در برخی از گیاهان زراعی و باغی

(Fageria et al., 1990; Urrestarazu et al., 1994)

گیاه	محدوده کفایت (mg/kg)
گندم	150-50
جو	150-50
ذرت	200-50
برنج	300-70
سورگوم	100-65
کتان	300-30
چغندر قند	140-60
نیشکر	600-20
سیب	168-154
انگور	300-40
گل‌ابی	149-133
بادام	160-138
انار	167-149
خرمالو	138-129
فندق	202-190

لازم به ذکر است که گاهی در اواخر بهار که سرعت رشد درختان زیاد است، به علت عدم تکافوی جذب آهن، برگ‌ها زرد می‌شوند. سپس با کاهش آهنگ رشد، رنگ برگ درختان دوباره سبز شده و مجدداً در اواخر تابستان، با تشدید رشد رویشی علایم کمبود آهن بروز می‌کند. باید توجه داشت که تنها کمبود آهن به زردی برگ منجر نمی‌شود؛ بلکه کمبود ازت، گوگرد، منیزیم و برخی عناصر غذایی دیگر، آفات و بیماری‌های گیاهی و نور کم نیز در مواردی رنگ‌پریدگی برگ را در پی دارد.

میوه‌ها ممکن است به رنگ نارنجی روشن تغییر رنگ دهند و اندازه آن‌ها کاهش یابد. شاخه‌ها و اندام‌های به شدت آسیب‌دیده، نیز دچار سر خشکیدگی می‌شوند. آسیب‌دیدگی ریشه‌ها در اثر غرقاب بودن زمین، نماتدها و یا مسمومیت ناشی از زیادی عناصر غذایی در درخت منجر به توسعه کمبود آهن می‌شوند. ریزش غیرطبیعی برگ و تولید کم میوه از جمله عوارضی هستند که حتی در شرایط خفیف کمبود هم قابل مشاهده هستند. میوه‌های تولید شده، نسبت به شرایط نرمال کوچک‌تر شده و اسیدیته (ترشی) آن‌ها تا حدودی افزایش می‌یابد. در کمبود آهن، برگ‌ها قبل از رسیدن به اندازه طبیعی، می‌ریزند و میوه‌ها در قسمت انتهایی درخت نارس و سبز باقی می‌مانند (Pestana et al., 2003).

نکته: مقدار آهن کل گیاه، شاخص مناسبی برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای آن نیست. زیرا ممکن است مقدار آن در بافت‌های کلروزه بیش از بافت‌های سالم باشد (پدیده پارادوکس آهن¹). بنابراین در ارزیابی آهن بایستی مقدار آهن فعال از نظر فیزیولوژیک (Fe^{2+}) که در بافت گیاه انباشته نشده و در متابولیسم گیاه شرکت می‌کند) و یا نسبت Fe^{2+} به آهن کل بررسی شود. این بدان علت است که وجود آهن کل بالا در برگ‌ها ملاک عمل نیست و باید از طریق محلول‌پاشی و ایجاد شرایط خوب مدیریتی، حرکت آهن را در گیاه بهبود بخشید تا علایم کمبود آهن در برگ‌ها مشاهده نشود (هاشمی مجد، 1392).

نکته: باتوجه به اینکه کمبود آهن می‌تواند تغییراتی در نسبت‌های عناصر غذایی در برگ‌ها ایجاد کند، بعضی از این نسبت‌ها به عنوان ابزارهای مفید برای پایش کمبود آهن پیشنهاد شده‌اند. از جمله این نسبت‌ها می‌توان به نسبت‌های P/Fe و K/Ca اشاره

1- Iron paradox

کرد که معمولاً با کمبود آهن افزایش می‌یابند و با رفع آن کاهش پیدا می‌کنند (Abadía Bayona *et al.*, 2004).



شکل 5- علائم کمبود آهن در گیاهان مختلف

2-7- تأثیر کمبود آهن بر ریشه گیاهان

علی‌رغم اینکه نشانه اصلی کمبود آهن در برگ‌ها، جلوگیری از گسترش کلروپلاست می‌باشد، با این حال در ریشه‌های تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی (به‌غیر از علف‌ها)، کمبود آهن با تغییرات آشکار در شکل ظاهری ریشه همراه است. جلوگیری از طویل شدن ریشه، افزایش در قطر انتهایی ریشه، تشکیل تعداد زیادی تارهای کشنده و نیز تشکیل سلول‌های ریزودرم با دیواره‌های دارای اعوجاج از جمله تغییراتی هستند که در اثر کمبود آهن در ریزوسفر اتفاق می‌افتند (خلدبرین و اسلام‌زاده، 1381؛ Marzorati *et al.*, 2022).

3-7- گیاهان حساس به کمبود آهن¹

- ✓ درختان میوه: سیب، آلو، هلو، آووکادو، موز، زغال‌اخته، تمشک جنگلی، کاکائو، زیتون، گیلان، نارگیل، قهوه، انگور.
- ✓ درختان خشکبار: بادام، فندق، گردوی آمریکایی، گردو.

1- Iron-sensitive

✓ سایر گیاهان: ذرت، برنج، سورگوم، سویا، نیشکر، (اکبری، 1398؛ رسولی صدقیانی و همکاران، 1401).

4-7- بیش‌بود یا سمیت آهن

حداکثر جذب آهن از خاک در محدوده اسیدیته 5/5 تا 6/5 اتفاق می‌افتد و اسیدی شدن خاک، آهن در دسترس را افزایش می‌دهد. سمیت آهن ممکن است در محدوده وسیعی از خاک‌ها اتفاق بیفتد. این‌گونه خاک‌ها مقادیر بالایی آهن احیا شده و اسیدیته پایین دارند (Munch and Ottow, 1980). سمیت آهن ممکن است با کمبود روی و فسفر و سمیت سولفید هیدروژن همراه باشد (Kirk and Bajita, 1995). عامل بسیار مهم در سمیت آهن وجود شرایط غرقابی است که حالت غیرهوازی برای خاک به وجود می‌آورد. از آنجایی‌که انتشار اکسیژن در خاک بیشتر از آب یا خاک اشباع از آب می‌باشد، اکسیژن موجود در خاک سریعاً به وسیله تنفس میکروارگانیسم‌های خاک و ریشه گیاه در خاک اشباع مصرف می‌شود. با مصرف اکسیژن، SO_4^{2-} ، NO_3^- ، Fe^{3+} و Mn^{4+} به عنوان پذیرنده الکترون در تنفس میکروبی عمل می‌کنند و به صورت مداوم در زمین‌های غرقاب برنج احیا می‌شوند، اکسیژن و نیترات در همان ساعات و یا روز اول غرقابی مصرف می‌شوند و بعداً این، احیا Mn^{4+} سریعاً اتفاق می‌افتد. چند روز بعد از شرایط غرقابی زمانی که پتانسیل کاهش به کمتر از 150-180 می‌رسد، احیا Fe^{3+} آغاز می‌شود (Patrick, 1978). سمیت آهن دومین عامل محدودکننده اصلی تولید برنج در زمین‌های جلگه‌ای می‌باشد (De Dordodot et al., 2005). غلظت بحرانی سمیت آهن به کل مواد تغذیه‌ای گیاه بستگی دارد. اگر چه آهن یکی از عناصر ضروری در چرخه رشد گیاه می‌باشد؛ اما فراوانی آن در بافت‌های گیاهی با بالا رفتن واکنش‌های فنتون¹ (واکنش ترکیب Fe^{2+} با H_2O_2 یا $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) که منجر به تولید مقادیر بالایی از رادیکال سمی هیدروکسیل و دیگر اشکال اکسیژن آزاد می‌شود، همراه است (Fernández and Ebert, 2005). بروز سمیت آهن در برنج به جذب مقادیر بالای Fe^{2+} توسط ریشه و انتقال آن از طریق آوند چوبی به بخش هوایی بستگی دارد. در داخل برگ مقادیر اضافی Fe^{2+} سبب افزایش رادیکال‌های آزاد

می‌شود که به طور برگشت‌ناپذیری به ساختارهای سلولی آسیب می‌رسانند و در نهایت باعث افزایش مقدار اتیلن در برگ می‌شود (Yamauchi and Peng, 1995). حد بحرانی سمیت آهن در برگ‌ها 500 پی‌پی‌ام می‌باشد. البته مقاومت ارقام و گونه‌های مختلف گیاهی، غلظت سایر عناصر معدنی، دما و تابش خورشید نیز در حد بحرانی سمیت آهن تأثیرگذار است (مهربان و همکاران، 1390).

7-5- علائم ظاهری سمیت آهن در گیاهان

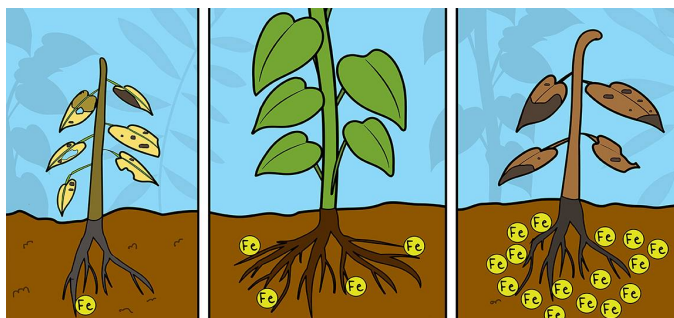
علائم مشخص سمیت آهن با فرایندهای تولید رادیکال‌های آزاد، اکسیدشدن کلروفیل و به‌خصوص تجمع پلی‌فنل‌های اکسید شده مرتبط می‌باشد. این نشانه‌ها معمولاً می‌توانند در مراحل مختلف رشد مانند جوانه‌زنی، رشد رویشی و حتی در مرحله زایشی در گیاه بروز کنند (Becker and Asch, 2005). نشانه‌های مشخص سمیت آهن معمولاً به‌صورت لکه‌های قهوه‌ای ریزی است که از نوک برگ به‌طرف پایه برگ‌ها گسترش پیدا می‌کند و در نهایت منجر به خشک‌شدن آن می‌شود (شکل 6). به‌علاوه در سمیت آهن ریشه کم، کوتاه، کلفت و خشن می‌شود (Becker and Asch, 2005; Sahrawat, 2005). کم‌شدن محصول مرتبط با سمیت آهن از 12 تا 35 درصد گزارش شده است (Sahrawat, 2005). اگرچه سمیت در جوانه‌زنی و یا مراحل ابتدایی رویش می‌تواند شدیداً بر رشد تأثیرگذار باشد و در نتیجه محصول کاملاً از بین برود، در بعضی مواقع نیز کاهش محصول تا 30 درصد بدون وجود علائم سمیت در برگ‌ها اتفاق می‌افتد (مهربان و همکاران، 1390).



شکل 6- علائم سمیت آهن در گیاهان مختلف (ارومیه، 1403، نگارنده)

شکل 7 تأثیرات کمبود، کفایت و بیشبود آهن بر رشد گیاهان را نشان می‌دهد. در حالت اول (سمت چپ)، گیاه به طور واضح با کمبود آهن مواجه است. نقش حیاتی آهن

در فتوسنتز و تولید کلروفیل موجب بروز پدیده کلروز یا بعبارت دیگر زردی و خشکیدگی برگ‌ها شده است. شدت اثربخشی در برگ‌های جدیدتر بیشتر از برگ‌های مسن بوده و رشد نامطلوب ریشه، کاهش سطح فتوسنتز و عدم رشد بهینه گیاه، منجر به کاهش کیفیت و کمیت محصول شده است. در حالت دوم (وسط)، آهن به مقدار کافی در دسترس است و گیاه در شرایط ایده‌آل رشد قرار دارد. به دلیل سنتز مناسب کلروفیل، رشد قوی و متعادل ریشه و جذب مطلوب عناصر غذایی، برگ‌ها سبز و سلامت به نظر می‌رسند و گیاه قادر است به حداکثر پتانسیل خود برسد. این شرایط بهبود مقدار و کیفیت محصولات کشاورزی را تسهیل می‌کند. حالت سوم (سمت راست) نمایانگر مشکل ناشی از تجمع بیش از حد آهن در خاک است. در این حالت، علائم سوختگی در نوک و حاشیه برگ‌ها به وضوح قابل مشاهده است و ریشه‌ها نیز دچار سمیت شده و رشد مناسبی ندارند. تجمع آهن از طریق ایجاد اختلال در روند جذب سایر عناصر غذایی منجر به برهم زدن تعادل تغذیه‌ای گیاهان می‌شود. در این وضعیت، گیاهان به طور کلی آسیب دیده و رشد آنها متوقف می‌شود، لذا کیفیت و عملکرد محصول نهایی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی در راستای بهینه‌سازی شرایط رشد و تولید محصولات با کیفیت، انجام اقدامات مناسب در مدیریت تغذیه گیاهی از جمله ایجاد تعادل مناسب از نظر تغذیه آهن امری ضروری است. کمبود و بیشبود آهن بر سلامت و توسعه گیاه تأثیر منفی می‌گذارند، بر این اساس مدیریت و پایش سطح آهن در خاک و گیاه اهمیت ویژه‌ای دارد (Marzorati et al., 2022; López-Pérez et al., 2024).



شکل 7- تأثیر مقادیر مختلف آهن بر رشد گیاه (Marzorati et al., 2022)

8- پراکنش جغرافیایی وضعیت آهن

اطلاعات اندکی در مورد پراکنش جغرافیایی کمبود یا بیش بود عناصر غذایی از جمله عناصر کم‌مصرف در جهان در دست است. در مطالعه جامعی که فائو در سال 1982 در بیش از 30 کشور جهان انجام داد، مشخص شد که بیش از 30 درصد خاک‌های کشورهای مورد بررسی به کمبود یک یا چند عنصر کم‌مصرف از جمله آهن مبتلا هستند (Sillanpää, 1982; Mehrotra et al., 2022). گزارش‌های متعددی از مناطق مختلف جهان از جمله در گیاهانی که در مناطق خشک، آهکی و خاک‌های غیرشور آهکی کشورهای شرق مدیترانه، خاورمیانه، آفریقا، هند و بنگلادش رشد کرده‌اند، حاکی از بروز کمبود آهن در این کشورها نیز می‌باشد (White and Zasoski, 1999; Rashid and Ryan, 2004; Shukla et al., 2014). در ایران گزارش مستند و کاملی از وضعیت و پراکندگی کمبود آهن در گیاهان وجود ندارد. شواهد موجود حاکی از کمبود شدید آهن به ویژه در درختان میوه در اغلب استان‌های کشور است. زردبرگی ناشی از آهن، شکل خاصی از کمبود آهن در گیاهان است که بخش وسیعی از کشور ما را فراگرفته است. در این بین، استان‌های تهران، سمنان، خوزستان، خراسان، مرکزی، همدان، کردستان، لرستان، زنجان و آذربایجان بیش از سایر مناطق دچار این مشکل هستند (طهرانی و همکاران، 1391).

9- منابع کودی برای تامین آهن

9-1- منابع کودی آلی

افزایش مقدار ماده آلی در خاک به طور قابل توجهی خطر بروز کلروز آهن را کاهش می‌دهد. برای افزایش میزان ماده آلی و بهبود حاصلخیزی خاک، کودهای حیوانی، به‌ویژه کود گاوی، به طور سنتی در باغات مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کودها اغلب حاوی مقادیر کمی آهن قابل استفاده هستند که معمولاً بین 0/02 تا 0/1 درصد می‌باشد. اثر مثبت ماده آلی در جلوگیری از کلروز آهن به توانایی کلات‌کنندگی مواد هیومیک و فولیک و همچنین تحریک فعالیت‌های میکروبی خاک و رشد ریشه‌ها بستگی دارد (هاشمی‌مجد، 1392؛ Rombola and Tagliavin, 2006). علاوه بر این، ماده آلی به بهبود تهویه خاک

کمک کرده و می‌تواند از تبلور مجدد فری‌هیدریت به اکسیدهای کم محلول در خاک‌هایی با pH بالا جلوگیری کند. کود دامی و کمپوست به‌عنوان بسترهای مناسب برای باکتری‌هایی مانند *Citrobacter diversus* عمل می‌کنند که از طریق تولید سیدروفورها در جذب آهن توسط ریشه‌ها نقش حیاتی دارند (Crowley, 2000; Yehuda et al., 2000). همچنین، تحقیقات Masalha و همکاران (2000) نشان داده‌اند که استریل‌سازی و نابود کردن میکروفلور خاک می‌تواند بر تغذیه آهن در گیاهان با استراتژی I و II تأثیر منفی بگذارد.

سیدروفورهای متعددی از کودهای دامی جداسازی شده‌اند که قادر به کمپلکس کردن آهن موجود در ساختار هیدروکسیدهای آهن هستند. تأثیر مثبت این مواد بر تغذیه آهن به تحریک ATPase پروتونی و رشد ریشه وابسته است. غلظت‌های بسیار پایین کمپلکس‌های مواد هومیک و آهن در محلول غذایی می‌توانند باعث رنگ‌گیری سریع درختان دچار کلروز شوند (Baldi et al., 2004).

افزایش کارایی کودهای دامی از طریق غنی‌سازی با سولفات آهن موردتوجه قرار گرفته است. گزارش‌های متعددی در زمینه تأثیر کودهای دامی غنی‌شده یا غنی‌نشده در حل مشکلات کلروز آهن وجود دارند (Shenker and Chen, 2005; Rombola and Tagliavin, 2006). کود مرغی به‌عنوان ماده‌ای مؤثر برای کاهش کمبودهای Zn و Fe توصیه شده است. ترکیبات آلی موجود در این کودها در حفظ آهن اضافه‌شده به‌صورت $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ به شکل‌های قابل‌دسترس برای گیاهان، مؤثر هستند. در آزمایش‌های میدانی که در خاک‌های آهکی انجام شده‌اند، افزایش عملکرد برای تیمارهای حاوی کود دامی غنی‌شده با آهن بیشتر از مجموع کاربرد آهن و کود به‌صورت جداگانه بوده است (هاشمی مجد، 1392; Shenker and Chen, 2005).

2-9- منابع کودی معدنی

به‌طور کلی افزودن آهن معدنی در خاک‌هایی با pH بالا، از جمله خاک‌های آهکی کشور ما، تأثیری در برطرف نمودن کمبود آهن ندارد، زیرا به‌سرعت به شکل غیرمحلول $\text{Fe}(\text{OH})_3$ تبدیل می‌شود. با این حال، منابع کودهای معدنی (شکل 8) می‌توانند مقدار کافی

آهن را در خاک‌های اسیدی مبتلا به کمبود تامین نمایند. منابع معدنی آهن در جدول 4 ارائه شده‌اند (هاشمی مجد، 1392).

جدول 4- منابع کودی معدنی آهن

منبع	فرمول شیمیایی	درصد آهن
سولفات فرو	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	19
سولفات فریک	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	23
اکسید فرو	FeO	77
اکسید فریک	Fe_2O_3	69
فروآمونیم فسفات	$\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	29
فروآمونیم سولفات	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	14
پلی فسفات آمونیوم	$\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{HP}_2\text{O}_7$	22
کلات‌های آهن	NaFe-EDTA	14-5
	NaFe-EDDHA	6
	NaFe-DTPA	10

بعد از سولفات آهن، بیشترین مصرف کودهای آهن مربوط به انواع مختلف کلات‌ها می‌باشد. کلات‌های آهن باقابلیت زیادی که در ایجاد آهن محلول و قابل جذب برای گیاه دارند، برای رفع کمبود آهن در کشاورزی مدرن کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. در حال حاضر عمده‌ترین کودهای کلاته که در داخل و خارج کشور به مصرف می‌رسند؛ کودهایی با بنیان آلی EDTA و EDDHA هستند. در ایران سه نوع کلات آهن به بازار عرضه می‌شود، Fe-EDTA^1 با نام فتریلون (مناسب برای خاک‌های اسیدی)، Fe-HEEDTA^2 با نام تجاری رکسنول (مناسب برای خاک‌های خنثی تا کمی قلیایی) و Fe-EDDHA^3 با نام سکوسترین آهن 138 (مؤثرترین منبع برای خاک‌های آهکی و قلیایی). این مواد محلول در آب بوده و به هر دو صورت خاکی و محلول‌پاشی مصرف می‌شوند (رنجبر مالی‌دره و

1- Fe- Ethylenediaminetetraacetic Acid

2- Fe- Hydroxy-2-ethylenediaminetriacetic Acid

3- Ethylenediamine-N, N'-bis(o-hydroxyphenyl) acetic Acid

همکاران، 1395؛ Klem-Marciniak *et al.*, 2021). کلات آهن EDTA می‌تواند تا حداکثر 13/5 درصد آهن داشته باشد. در حالت جامد تا pH 6/5 آهن خود را به‌صورت قابل جذب نگه می‌دارد ولی در خاک‌های قلیایی نمی‌تواند آهن موردنیاز گیاه را از طریق خاک و ریشه تأمین نماید. کلات سکوسترین آهن با بنیان آلی EDDHA، حداکثر می‌تواند تا 6 درصد محتوی آهن در فرم جامد باشد. EDDHA در خاک‌های قلیایی 2/4 درصد آهن قابل جذب دارد و تا pH 5/1 آهن خود را به‌صورت محلول نگه می‌دارد و از طریق خاک و ریشه به مصرف گیاه می‌رساند. مقدار آهن برای این کلات در فرم مایع و در خاک‌های قلیایی حدود 1/2 درصد خواهد بود (Cakmak and Horst, 1991).

نکته: باتوجه‌به اینکه انتقال ضعیف آهن در داخل گیاه در روش محلول‌پاشی برگی و نیاز به تکرار محلول‌پاشی، ممکن است برگ سوختگی را در پی داشته باشد (Singh *et al.*, 2003)، لذا محلول‌های آهنی که برای محلول‌پاشی برگی استفاده می‌شوند، باید به‌وسیله موادی همانند اسیدسیتریک، به فرم اسیدی درآورده شوند. پایین‌بودن pH محلول مورد پاشش باعث افزایش مقدار جذب و در نتیجه انتقال آهن در گیاه می‌شود (رنجبر مالی‌دره و همکاران، 1395).

نکته: میزان دقیق استفاده از کلات‌های آهن، متناسب با وضعیت آب‌و‌خاک هر منطقه، توسط کارشناسان مجرب تعیین می‌شود. این مقدار برای گیاهان دچار کمبود آهن که علائم کلروز برگ دارند، تا بیست درصد بیشتر استفاده می‌شود.



کلات آهن



سولفات آهن



سولفات آهن کربناتالی

شکل 8- منابع کودی معدنی رایج آهن

10- نانوکودهای آهن جایگزینی برای منابع کودی رایج

افزایش روزافزون جمعیت انسانی و نیاز به غذای بیشتر از یک سو و کاهش وسعت خاک‌های قابل کشت و حاصلخیزی آن‌ها از سوی دیگر بشر را به کاربرد کودهای شیمیایی بیشتر سوق داده است. فراهمی عناصر غذایی کم‌مصرف در برخی خاک‌های آهکی دنیا با pH قلیایی، مقدار ماده آلی کم (شرایط بیشتر خاک‌های ایران) و یا درشت‌بافت، کم است (مقصودی و نجفی، 1395). محققان تلاش می‌کنند تا با استفاده از فناوری‌های نوین موجب افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی کم‌مصرف و کاهش مقدار مصرف کودهای آن‌ها برای کاهش هزینه‌ها و کاهش آلودگی محیط‌زیست شوند. در این راستا نانوفناوری توانسته با تغییر ویژگی‌های کودها، محققان را برای رسیدن به کودهایی با کارایی مصرف بیشتر و در نتیجه کاهش مقدار مصرف آن‌ها و کاهش خطرات زیست‌محیطی، امیدوار کند. نانومواد شامل موادی است که حداقل در یک بعد، اندازه‌ای کوچک‌تر از 100 نانومتر داشته باشند. نانومواد مختلفی به‌عنوان کود برای گیاهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند که بیشتر آن‌ها در گلخانه و در بسترهای کشت مصنوعی بوده است. ذرات نانو به دلیل اندازه بسیار کوچکی که دارند، می‌توانند به‌راحتی توسط ریشه گیاهان جذب شوند و در نتیجه کارایی انتقال عناصر غذایی را افزایش دهند و از این طریق منجر به افزایش تولید محصولات کشاورزی شوند. این موضوع می‌تواند به مقابله با بحران‌های غذایی و ازدست‌رفتن محصولات غذایی در مناطق مختلف کمک کند. استفاده از نانو کودها می‌تواند نیاز به استفاده از سموم شیمیایی را کاهش دهد و با کاهش میزان آلاینده‌ها در زنجیره غذایی، به حفظ سلامت انسان کمک نماید. نانو کودها از طریق افزایش کیفیت محصولات کشاورزی نیز در بهبود ارزش غذایی و افزایش سطح سلامت انسان تأثیر می‌گذارد. استفاده از نانو کودها به‌عنوان یک فناوری نوین در کشاورزی می‌تواند فرصت‌های زیادی برای بهبود تولید محصولات، افزایش تحمل گیاهان در برابر انواع تنش‌های محیطی، افزایش کیفیت خاک و کاهش آلاینده‌های ناشی از مصرف مقادیر مازاد کودهای شیمیایی و در نتیجه بهبود سلامت انسان فراهم کند. با این حال، تأثیرات بلندمدت این نانو کودها بر سلامت انسان، موضوعی است که به دلیل استفاده روزافزون از این فناوری در کشاورزی، نیاز به بررسی و تحقیق بیشتری دارد. برای اطمینان از ایمنی این فناوری،

باید مطالعات دقیقی در زمینه تأثیرات احتمالی نانو کودها در بلندمدت انجام شود و رویکردهای مناسبی برای ارزیابی ریسک‌ها و فواید آنها توسعه یابد. استفاده هوشمندانه از نانوفناوری ممکن است چشم‌انداز جدیدی برای دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار و مقابله با پدیده تغییر اقلیم فراهم نماید (Dubey and Mailapalli, 2016; Babu et al., 2022).

اثرات مثبت نانو کودهای آهن، روی، منگنز، مس و مولیبدن بر شاخص‌های رشد گیاهان گندم، کلزا، سورگوم، انواع لوبیا، خیار، گوجه‌فرنگی، بادام‌زمینی، یونجه، خرفه، ریحان، بابونه کبیر، پریوش و غیره گزارش شده است (مقصودی و نجفی، 1395؛ عسگری و همکاران، 1393). نانو کودها به آسانی جذب گیاهان می‌شوند و از کودهای شیمیایی کارآمدتر هستند، دوستدار محیط‌زیست هستند، آلودگی ندارند، شوری خاک را افزایش نمی‌دهند و افزایش کیفیت خاک را در پی دارند. استفاده از نانوذرات اکسید آهن در افزایش غلظت آهن در گیاهان کارآمدتر از کودهای معمولی است (Babu et al., 2022; Zafar et al., 2024). علت این امر، خصوصیات ذرات نانو، یعنی حلالیت بیشتر و سطح تماس بیشتر ذرات نانو باریشه گیاهان است (Ranjbar and Shams, 2009). نتایج بررسی اثرات نانو کود آهن بر رشد برگ، مقدار کربوهیدرات و آنتی‌اکسیدان‌های پریوش *Catharanthus roseus* نشان داد کاربرد نانوذرات اکسید آهن تغییرات معنی‌داری در شاخص‌های رشدی این گیاه ایجاد کرد. با افزایش غلظت نانوذرات اکسید آهن از 5 تا 40 میکرولیتر، افزایش معنی‌دار شاخص‌های رشد برگ مشاهده گردید. بیشترین میزان افزایش متعلق به گیاهان تحت تیمار غلظت 30 میکرولیتر نانو اکسید آهن بود (عسگری و همکاران، 1393). نتایج مشابه توسط محققین مختلف گزارش شده است (جدول 5). در مطالعه‌ای که گیاه ریحان *basilicum Ocimum* در معرض غلظت‌های مختلفی از کود کلات آهن (1/5، 4/5 و 7/5 کیلوگرم در هکتار) و نانو کود کلات آهن (1، 3 و 5 کیلوگرم در هکتار) قرار گرفت، بررسی‌ها نشان داد که ویژگی‌های رشد گیاه در معرض کلات آهن 7/5 کیلوگرم در هکتار و نانو کود 1 کیلوگرم در هکتار نسبت به گیاهان شاهد افزایش یافته است. بیشترین میانگین وزن تر و خشک برگ‌ها در تیمار نانو کود کلات آهن مشاهده شد. نتایج فوق نشان داد که جایگزینی کود آهن تهیه شده با

فناوری نانو در مقایسه با کودهای آهن رایج، در غلظت مناسب یا کمتر نسبت به کود آهن می‌تواند سبب افزایش رشد گیاه ریحان شود (پیوندی و همکاران، 1390). بررسی اثرات نانو اکسید آهن (Fe_2O_3) بر روی شاخص‌های رشد گیاه بادام‌زمینی، افزایش تمامی شاخص‌های رشد در اثر کاربرد نانو کسید آهن را نشان داد (Liu et al., 2005). همچنین سطح برگ در گیاه اسفناج *Spinacia oleracea* در اثر به‌کارگیری کود نانو آهن نسبت به گیاهان شاهد افزایش معنی‌داری را نشان داد (Moghadam et al., 2012). اسپری نانو ذرات آهن روی برگ‌های گیاه چغندر قند سبب افزایش وزن، طول و عرض برگ در تمامی مراحل رشد گیاه شد (Mamyandi et al., 2012). در بررسی‌های انجام شده توسط فتحی و زاهدی (1393) محلول‌پاشی نانو ذرات آهن و روی بر فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گندم (*Triticum aestivum* L.) نشان داد که تأثیر این محلول‌پاشی بر فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز معنی‌دار بوده است. بررسی تأثیر تیمار نانو کود آهن و کلات آهن بر رشد گیاه سالیکورنیا تحت تنش شوری نشان داد که اعمال تیمار نانو کود آهن و کلات آهن جوانه‌زنی را بهبود بخشیدند و شاخص‌های رشدی سالیکورنیا را نسبت به شاهد به طور قابل‌توجهی افزایش دادند (ریاحی‌نیا و دانایی‌پور، 1401). کاربرد نانو کود آهن در شرایط تنش، رشد ریشه را نیز افزایش داد. به‌طوری که بیشترین مقدار نسبت ریشه به اندام هوایی در تیمار نانو کود آهن در شوری 600 میلی‌مولار مشاهده شد. با مقایسه میانگین حجم ریشه و ارتفاع اندام هوایی بیشترین مقدار برای نانو کود آهن و کلات آهن بود که تفاوت معنی‌داری برای آن‌ها مشاهده نشد، بنابراین هر دو نوع کود آهن از نظر تعدیل اثرات شوری به‌ویژه به‌صورت محلول‌پاشی در نواحی گرم و خشک می‌توانند مفید باشند (ریاحی‌نیا و دانایی‌پور، 1401). در تحقیقی برای بررسی و مقایسه اثر نانو کود کلات آهن و کود کلات آهن معمولی بر عملکرد و رشد گیاه دارویی مرزه آزمایشی در مزرعه اجرا شد (پیوندی و همکاران، 1390). فعالیت کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در تیمار نانو آهن (4/5 کیلوگرم بر هکتار) افزایش معنی‌داری را نشان داد. کاربرد کلات آهن در غلظت 1/5 کیلوگرم بر هکتار و همه غلظت‌های نانو آهن موجب افزایش معنی‌دار غلظت کلروفیل a شد. کاربرد نانو کود آهن در افزایش میزان کلروفیل a و b مؤثرتر از همه غلظت‌های کلات آهن بود. نتایج فوق در این بررسی به نقش آهن

در گیاهان نسبت داده شد. نانو کودها به دلیل اندازه کوچک و سطح بالای نسبت به حجم، قابلیت بیشتری برای تعامل با گیاه دارند. این خصوصیت باعث می‌شود نانو کود کلات آهن به راحتی به گیاه منتقل شده و در فرایندهای بیوشیمیایی، از جمله سنتز کلروفیل، شرکت کند (Askary et al., 2017). در بررسی تأثیر محلول پاشی اکسید آهن نانو و معمولی آزمایشی مزرعه‌ای اجرا شد (برقی و همکاران، 1393). نتایج نشان داد که اثر غلظت‌های مختلف نانو اکسید آهن بر میزان سدیم، آهن برگ، فسفر غده و عملکرد در هکتار، اثر مراحل محلول پاشی بر میزان پتاسیم و عملکرد غده در هکتار و اثر متقابل این عوامل بر غلظت آهن غده سیب زمینی معنی دار بود. ضمن آنکه اثر عامل‌های فوق روی غلظت کلسیم غده از نظر آماری معنی دار نبود (برقی و همکاران، 1393). نتایج مقایسه میانگین اثر غلظت نانو اکسید آهن نشان داد که بیشترین مقادیر سدیم و فسفر غده در تیمار شاهد بدون مصرف کود آهن، بیشترین آهن برگ در تیمار شاهد با مصرف کود آهن معمولی و بیشترین عملکرد غده در هکتار در غلظت دو درصد نانو اکسید آهن حاصل شد. مقایسه میانگین اثر متقابل عوامل فوق نیز نشان داد که ترکیب تیماری غلظت دو درصد نانو اکسید آهن با محلول پاشی در زمان پر شدن غده بیشترین غلظت آهن غده را به خود اختصاص داد. ایشان بیان داشتند باتوجه به اینکه خاک محل آزمایش دارای pH بالایی بود و در چنین وضعیتی گیاه از نظر عناصر غذایی در تعادل نیست و کمبود عناصر ضروری نظیر آهن مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد گیاهان تیمار شده با نانو اکسید آهن وضعیت تغذیه‌ای متعادلی داشته‌اند. این امر سبب بهبود سیستم فتوسنتزی گیاه شده که نتیجه آن تولید انرژی بیشتر است و از این طریق غلظت عناصری مانند پتاسیم را که به صورت فعال و با صرف انرژی جذب گیاه می‌شوند را افزایش داده است و چون در جذب پتاسیم و سدیم در گیاه رقابت وجود دارد، با مهیا بودن انرژی کافی در گیاه جذب پتاسیم افزایش یافته و موجب کاهش سدیم در غده گردیده است (برقی و همکاران، 1393).

جدول 5- تأثیر نانوذرات اکسید آهن بعنوان کود عناصر کم‌مصرف برای گیاهان تک‌لپه‌ای و دولپه‌ای در غلظت‌های مختلف

نوع گیاه	نام گیاه	نوع نانوذره (اندازه (nm))	غلظت	تأثیرات بر گیاه	منبع
تک‌لپه‌ای	<i>Triticum aestivum</i>	Fe ₃ O ₄ (80)	0, 40, 200, 500 mg L ⁻¹	افزایش مقدار آهن، پتاسیم و فسفر، افزایش رشد گیاه، فتوسنتز و تنفس	Feng <i>et al.</i> , 2022
	<i>Oryza sativa</i>	Fe ₃ O ₄ + Biochar (NA)	20 ppm	بهبود کیفیت خاک-گیاه، افزایش فراهمی زیستی عناصر پرمصرف خاک، افزایش تحمل گیاه به تنش‌ها محیطی	Majumdar <i>et al.</i> , 2023
	<i>Kobresia capillifolia</i>	Fe ₂ O ₃ (21.7)	10, 50, 100, 500, 1000 mg L ⁻¹	بهبود فعالیت آنزیم روبیسکو، فتوسنتز و آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی، افزایش فاکتور انتقال آهن-منیزیم	Sun <i>et al.</i> , 2023
	<i>Moringa oleifera</i>	Fe ₂ O ₄ (NA)	0, 20, 40, 60 ppm	کاهش تشکیل رادیکال‌های آزاد، کاهش H ₂ O ₂ و مالون دی‌آلدهید، تحریک سنتز پرولین و افزایش مقدار ایندول استیک اسید	Tawfik <i>et al.</i> , 2021
	<i>Cicer arietinum</i>	Fe ₂ O ₃ (50)	0, 5, 10, 15, 20 mg L ⁻¹	افزایش طولی شدن اندام هوایی و تحریک ریشه	Irum <i>et al.</i> , 2020
دولپه‌ای	<i>Vigna radiate</i>	Fe ₂ O ₃ (33)	0, 100, 250, 500 mg kg ⁻¹	افزایش نرخ جوانه‌زنی بذر، طول و بیومس خشک گیاه و رنگدانه‌ها	Saleem and Khan, 2023
	<i>Linum usitatissimum</i>	Fe ₂ O ₃ (100)	0, 25, 50, 75, 100 ppm	بهبود قطر و ارتفاع ساقه، افزایش وزن تر، و خشک گیاه، افزایش شاخه‌ها و کیسول‌های میوه، تعداد بذر در هر کیسول، بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی	Mazhar <i>et al.</i> , 2022

مواد نانو مخصوصاً نانوذرات می‌توانند به مولکول‌های فعال بیولوژیکی مختلف متصل شوند که این اتصال می‌تواند به طور مستقیم به مکان‌های خاص درون بیومولکول‌ها شامل پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک و ساختارهای زیر سلولی صورت بگیرد و بدین‌طریق نانوذرات از غشاهای سلولی عبور نمایند (Krystofova *et al.*, 2013). ترکیبات نانوآهن به علت کوچک بودن و حلالیت بالا سریع‌تر توسط گیاهان جذب می‌شوند و کمبود مواد

غذایی و نیازهای گیاهان را رفع می‌کنند. بنابراین در کاربرد این مواد معمولاً افزایش رشد گیاه رخ می‌دهد. محققین مطرح نمودند که کود نانو آهن به‌خاطر ثبات بالای آن و آزادسازی تدریجی آهن در یک محدوده وسیع pH (3 تا 11) می‌تواند به‌عنوان یک منبع غنی و قابل‌اعتماد از آهن دوظرفیتی برای گیاه در نظر گرفته شود (Moghadam et al., 2012).

باتوجه‌به اینکه معرفی فناوری‌های جدید برای افزایش رشد گیاهان و بررسی قابلیت آن‌ها برای غلبه بر تنش‌های محیطی امری ضروری است و موجب پیشرفت‌های گسترده در بخش کشاورزی و منابع طبیعی می‌شود، جایگزینی کودها و مکمل‌های شیمیایی با تیمارهای فیزیکی و مواد نانو، میزان سموم را در مواد خام گیاهی کاهش داده و باعث افزایش سلامت غذا و محیط می‌گردد. از طرفی با درنظرگرفتن این نکته که یکی از مشکلات عمده خاک‌های قلیایی که بخش عمده‌ای از خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ایران را تشکیل می‌دهد، کمبود آهن قابل‌استفاده گیاه به دلیل pH بالای این خاک‌ها می‌باشد و با افزایش یک واحد pH، حلالیت آهن 1000 برابر کاهش می‌یابد (عسگری و همکاران، 1393؛ Ksouri et al., 2007)، لذا در این خاک‌ها، کودهای معدنی مشکل کمبود آهن خاک را حل نمی‌کنند (Mazaherinia et al., 2010). براین‌اساس باتوجه‌به نوظهور بودن فناوری نانو و روند روبه‌رشد آن، تحقیقات در زمینه اثر این نانو کودها در افزایش کمی و کیفی رشد، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و نیز میزان متابولیت‌های ثانویه گیاهان از اهمیت بالایی برخوردار است.

10-1- نحوه کاربرد نانو اکسیدها بعنوان کودهای آهن

نواوری در نانوتکنولوژی به طور قابل‌توجهی پژوهش در زمینه کاربرد نانوذرات مهندسی‌شده به‌عنوان نانو کودها، نانوحامل‌ها و نانوحسگرها را در دامنه وسیعی از صنایع کشاورزی ترویج می‌دهد. نانوذرات اکسید آهن دارای فعالیت مغناطیسی هستند و می‌توانند گروه‌های عاملی مختلفی را حمل کنند که این امر سبب افزایش جذب سلولی می‌شود. روش‌های مختلفی از جمله مصرف خاکی، محلول‌پاشی بر روی برگ، تیمار بذر و هیدروپونیک برای کاربرد نانوذرات اکسید آهن در گیاهان وجود دارد (Shirsat and K,

The diagram illustrates three methods of applying liquid fertilizers to plants:

- اسپری کردن بر روی برگ‌ها** (Spraying on leaves): A blue spray bottle is shown spraying a blue liquid onto the leaves of a plant.
- تزریق به بخش‌های هوایی گیاه** (Injection into aerial parts): A medical syringe is shown injecting a blue liquid into the stem of a plant.
- مصرف خاکی** (Soil application): A beaker containing a pink liquid with yellow granules is shown pouring the liquid into a brown pot containing a plant. Arrows indicate the liquid being applied to the soil around the plant's roots.

A bracket on the left side groups the first two methods under the label **محلول پاشی** (Foliar spray).

Below the diagram, three labels identify the methods:

- هیدروپونیک** (Hydroponics) is associated with the first two methods (foliar spray and injection).
- تسمار بذر** (Seed treatment) is associated with the soil application method.
- مصرف خاکی** (Soil application) is associated with the soil application method.

شکل 9- روش‌های مصرف نانواکسیدهای آهن بعنوان کود در گیاهان (Shirsat and K, 2024)

10-1-1- محلول یاشی برگی

در مورد محلول‌پاشی برگ‌گی، نانوذرات اکسید آهن باید از مانع ایجاد شده توسط کوتیکول توسط مسیرهای لیپوفیلیک یا هیدروفیلیک عبور کنند. مسیر لیپوفیلیک شامل نفوذ از طریق لایه‌های کوتیکولی است، درحالی‌که مسیر هیدروفیلیک از طریق منافذ آبی قطبی موجود در کوتیکول و روزنه‌ها انجام می‌شود. از آنجاکه قطر منافذ کوتیکولی حدود 2 نانومتر برآورد شده است، به نظر می‌رسد که مسیر روزنه‌ای محتمل‌ترین مسیر برای نفوذ نانوذرات با اندازه بزرگ‌تر از 10 نانومتر است. شکاف‌ها یا منافذ، کانال‌های یونی، حامل‌های پروتئینی، اندوسیتوز، کلاله، زخم و برش‌ها و تریکوم‌ها (کرک‌های ترش‌چی) از دیگر روش‌های جذب نانوذرات اکسید آهن هستند. نفوذ روزنه‌ای و جذب اپیدرمی اصلی‌ترین راه‌های جذب نانوذرات اکسید آهن در روی برگ‌ها هستند. برخی از روش‌های اصلاح سطح نانوذرات اکسید آهن، مانند فناوری‌های پوشش‌دار نمودن یا کپسوله‌سازی، جسیبندگی، لیپوفیل، یا هیدروفیل، نانوذرات اکسید آهن را تغییر می‌دهند تا ورود نانوذرات

را به برگ‌ها تسهیل کنند، لازم به ذکر است که تأثیر نانوذرات اکسید آهن به متغیرهای مختلفی مانند مقدار مصرف، گونه‌های گیاهی، میکروارگانیسم‌های فعال در ریزوسفر، اندازه ذرات، شکل، بار، pH و ساختار خاک بستگی دارد (Morab et al., 2021). مزایای محلول‌پاشی برگی نانوذرات اکسید آهن شامل کاهش تولید اکسیژن فعال درون موجود زنده¹، بهبود جوانه‌زنی بذر، افزایش عمر مفید محصولات کشاورزی، بهبود جذب و آسمیلایسیون کودهای مصرف شده در محلول‌پاشی برگی، آزادسازی کنترل‌شده نانوذرات در مکان‌های هدف، و کاهش آسیب ناشی از تنش‌های غیرزیستی است. گزارش شده است که محلول‌پاشی برگی نانوذرات اکسید آهن هم‌زمان با کاهش جذب فلزات سنگین (کادمیوم و سرب) توسط گیاه، با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، باعث افزایش مقاومت به تنش نیز می‌شود (Gutiérrez-Ruelas et al., 2021). مطالعات نشان داده‌اند که اسپری کردن نانو کودهای آهن بر روی برگ می‌تواند بدون ایجاد سمیت شدید، یون‌های آهن موردنیاز گیاه را در غلظت‌های پایین آزاد کند. اصلاحات سطحی نانوذرات با مواد مختلفی مانند ایزوتیوسیانات فلوروسین، آمینوپروپیل تری اتیوکسی سیلان، سیترات، اسید هیومیک، پلی‌وینیل پیرولیدون، پلی‌اتیلن گلیکول، و مواد آلی طبیعی، شانس جذب برگ را افزایش می‌دهد (Kanjana, 2020). در مقایسه با کودهای سنتی که به خاک اضافه می‌شوند، نانو کودهایی که به صورت محلول‌پاشی برگی مصرف می‌گردند توسط گیاهان سریع‌تر جذب شده، از نظر هزینه مقرون به صرفه‌تر بوده و تأثیر کمتری بر سلامت خاک دارند. محلول‌پاشی برگی می‌تواند ویتامین‌ها و برخی عناصر را که در خاک‌ها موجود نیستند، تأمین نماید. محلول‌پاشی برگی نانوذرات اکسید آهن همچنین می‌تواند عناصر غذایی موردنیاز در محصولات را تأمین کرده، به سرعت به غنی‌سازی بیولوژیکی دست یابد و علائم کمبود آهن را کاهش دهد (Reshma and Meenal, 2022). روزه‌های گیاهی در مقایسه با سلول‌های ریشه سرعت جذب عناصر غذایی بالایی دارند؛ بنابراین، در مقایسه با کوددهی خاک، محلول‌پاشی برگی نانو کودهای آهن می‌تواند از طریق انباشت عناصر غذایی و بدون تأثیر بر محیط خاک، به سرعت کمبود آهن را در گیاهان رفع نماید. علاوه بر این، نانو کودهای مصرفی در روش محلول‌پاشی دارای زیست‌فراهمی مختلفی هستند این

در حالی است که جذب ریشه‌ای محدودیت‌های محیطی خاصی از جمله جذب خاک، واجذب، انتقال و تغییر شکل دارد. در جذب عناصر غذایی توسط برگ، وضعیت روزنه‌ها (باز یا بسته‌بودن)، ضخامت کوتیکول، تخلخل دیواره سلولی برگ، اندازه منافذ صفحه‌ای در آوندهای آبکش، کشش سطحی ترکیبات نانو، ترکیب شیره سلولی و سرعت جریان شیره سلولی عوامل اصلی هستند که بر کارایی جذب نانوذرات اکسید آهن مصرف شده در محلول‌پاشی برگی تأثیر می‌گذارند (Wu and Li, 2022).

10-1-2- مصرف خاکی

نانوذرات اکسید آهن در خاک تحت تأثیر یک سری تغییرات قرار می‌گیرند که بر فراهمی زیستی و سمیت آن‌ها اثر می‌گذارد. نانوذرات اکسید آهن پس از بر همکنش با ریشه‌های گیاه، به بخش‌های هوایی منتقل شده و در اندام‌های سلولی یا زیر سلولی تجمع می‌یابند. جذب نانوذرات اکسید آهن از خاک توسط ریشه‌های گیاه، اولین مرحله تجمع زیستی¹ است (Kalwani et al., 2022). مطالعات حاکی از آن هستند که اسیدهای هیومیک و سایر مواد آلی موجود در خاک می‌توانند پایداری نانوذرات اکسید آهن را بهبود بخشند و در نتیجه، فراهمی زیستی بهتری را فراهم کنند. در مقابل، یون‌های نمکی ممکن است باعث رسوب‌گذاری و ایجاد اثر معکوس شوند. میکروارگانیزم‌هایی نظیر باکتری‌ها و قارچ‌ها نیز، به‌ویژه در شرایطی که این میکروارگانیزم‌ها با گیاهان هم‌زیستی برقرار می‌کنند؛ مانند قارچ‌های میکوریزا، بر جذب نانوذرات اکسید آهن توسط گیاه تأثیر می‌گذارند (Negi et al., 2023). به دلیل بارندگی و جذب بر روی کمپلکس‌های خاک، مقدار استفاده از نانو کودهای آهنی که به خاک اضافه می‌شوند توسط گیاهان پایین است، این امر منجر به افزایش مصرف کودهای شیمیایی شده و یوتریفیکاسیون را در پی دارد. کودهایی با حلالیت پایین باعث می‌شوند به دلیل عدم جذب کافی عناصر غذایی، گیاهان به‌خوبی رشد نکنند. علاوه بر این، برخی از کودهای آهن معدنی ممکن است رسوب‌کرده یا با کلونیدهای خاک و مواد آلی پیوند برقرار کنند و در نتیجه، قابلیت دسترسی آن‌ها برای گیاهان کاهش یابد. ترکیب‌های نانو مختلف، مانند پلیمرهای

1- Bioaccumulation

سنتزی شامل کوپلیمرهای پلی لاکتید و پلی گلیکولید، پلی کاپرولاکتون‌ها و پلی اکریلات‌ها، به عنوان ماتریس‌های جذب استفاده می‌شوند. از میان پلیمرهای طبیعی، آلژینات، آلبومین و کیتوزان به طور گسترده‌ای برای افزایش فراهمی زیستی آهن در گیاهان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Ates et al., 2020). فرایند تجمع ترکیب‌های نانو به طور قابل توجهی ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند هدایت آب، نفوذ و تهویه را بهبود می‌بخشد. پس از بر همکنش نانوذرات اکسید آهن با ریشه‌ها؛ تخلخل دیواره سلولی ریشه، تعرق، اندازه منافذ غشا، ترکیب شیره سلولی و سرعت جریان شیره سلولی، عوامل اصلی تأثیرگذار بر کارایی مصرف نانوذرات مصرف شده در ریشه هستند (Shirsat and K, 2024).

10-1-3- تیمار بذر

نانوذرات اکسید آهنی که بر روی سطح ریشه‌های تجمع‌یافته در خاک جذب نمی‌شوند، می‌توانند جذب عناصر غذایی را بهبود بخشند. جذب مستقیم نانوذرات اکسید آهن در بذرها می‌تواند از طریق ورود به پوشش بذر از طریق فضاهای بین سلولی پارانشیمی اتفاق بیفتد که بانفوذ در لپه همراه است. جوانه‌زنی بذرها پایه‌ای برای تولید، رشد و توسعه گیاه فراهم می‌کند. روش طبیعی جوانه‌زنی زمان‌بر است و بازده آن بسیار بالا نیست (Kasote et al., 2019). با این حال، جوانه‌زنی بالا در مورد بذرها تیمار شده با نانوذرات اکسید آهن به دست آمده است که این امر نانو تکنولوژی را به یک تکنیک قدرتمند برای بهبود جوانه‌زنی و افزایش عملکرد تبدیل می‌کند. تیمارهای نانوذرات اکسید آهن جذب بذر و نگهداشت آب را بهبود می‌بخشند که ممکن است به افزایش جوانه‌زنی بذر نسبت داده شود (Ali et al., 2021).

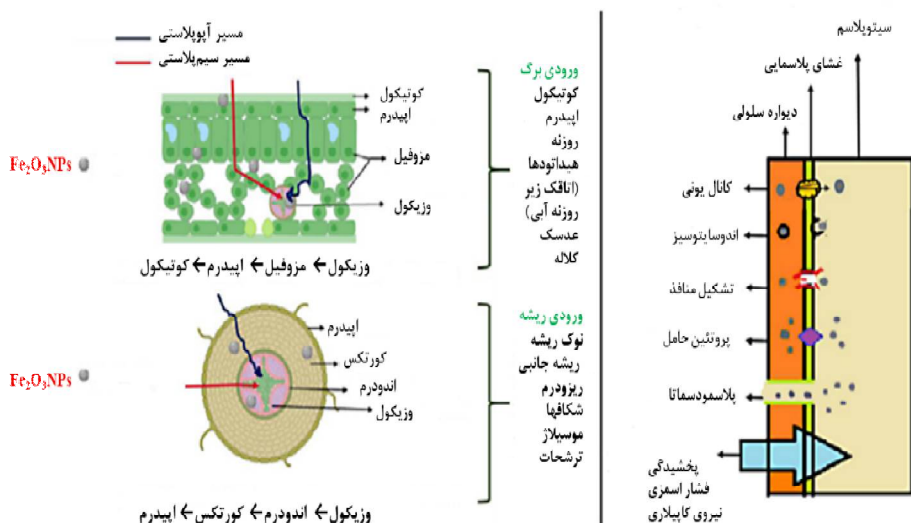
10-2- جذب نانوذرات بعنوان کود آهن در گیاهان

هر چیزی که توسط گیاهان جذب می‌شود، در بافت‌های مختلف تجمع می‌یابد و اگر قابلیت تجزیه نداشته باشد، ممکن است اثرات سمی ایجاد نماید؛ بنابراین، بحث درباره سازوکارهای جذب، انتقال و تجمع نانوذرات اکسید آهن برای بهره‌برداری حداکثری از این نانوذرات به جای تأثیرات جبران‌ناپذیر آن‌ها، بسیار حیاتی است. بر اساس گزارش‌های موجود،

نانوذرات اکسید آهن با سطح ویژه بالا می‌توانند با ترکیبات آلی یا پروتئین‌های حامل پیوند برقرار کرده و وارد بافت‌های گیاهی شوند (Gracheva et al., 2023). بر اساس یک دیدگاه دیگر، وجود حامل‌های یونی در غشای پلاسمایی باعث جذب نانوذرات اکسید آهن توسط گیاهان می‌شود. دو مسیر مشخص برای جذب و انتقال نانوذرات اکسید آهن در سیستم‌های گیاهی وجود دارد: (1) مسیر ریشه به برگ یا میوه؛ (2) مسیر برگ به ریشه. گیاهان دارای جذب و انتقال انتخابی نانوذرات هستند. ابتدا، نانوذرات اکسید آهن به فضای بین سلولی (آپوپلاست) نفوذ کرده و سپس جذب یا با کلات‌ها ترکیب می‌شوند. بر همکنش بین نانوذرات و بافت‌های گیاهی تحت تأثیر pH آپوپلاست قرار دارد. گیاهان سازوکارهای مختلفی برای حفظ سطح یون‌های H^+ در آپوپلاست در جهت انحلال نانوذرات اکسید آهن دارند. این سازوکارها شامل پمپ‌های پروتونی غشای پلاسمایی، آزادسازی آنیون‌های آلی، تنفس ریشه و فرایندهای وابسته به اکسیداسیون و احیا است. سازوکارهای مذکور با کاهش pH آپوپلاست، حلالیت نانوذرات اکسید آهن را افزایش می‌دهند (Singh et al., 2023). در pH های بالاتر از 7، حلالیت نانوذرات اکسید آهن در آپوپلاست کاهش یافته و منجر به رسوب و تجمع می‌شود. علاوه بر این، استفاده از بی‌کربنات و نیتрат pH را از 6/2 به 7 افزایش می‌دهد و با مهار فعالیت Fe^{3+} -ردوکتاز واقع در غشای پلاسمایی، حلالیت نانوذرات اکسید آهن را کاهش می‌دهد (Shirsat and K, 2024).

از یک سو، انتقال گزارش‌شده نانوذرات اکسید آهن از دانه‌ها، نهال‌ها یا غده‌های بالغ آغاز می‌شود و تحقیقات در مورد مسیر ریشه به برگ یا میوه یا از طریق کشت هیدروپونیک یا خاک انجام می‌شود (Rai et al., 2022). بر اساس مطالعات، نانوذرات اکسید آهن ممکن است ابتدا از طریق مسیرهای آپوپلاست به اندودرم ریشه وارد شده و سپس از طریق مسیرهای سیم‌پلاست به استوانه آوندی منتقل شوند. انتقال بیشتر به ساقه، برگ، میوه یا دانه گیاه ممکن است از طریق آوند چوبی یا آوند آبکشی انجام شود. از سوی دیگر، مسیرهای برگ به ریشه شامل نفوذ نانوذرات اکسید آهن از طریق روزنه‌ها یا گیرافتادن نانوذرات اکسید آهن در کوتیکول، توزیع مجدد در ساقه‌ها و در نهایت انتقال به ریشه‌ها از طریق آوند آبکشی است (Ha et al., 2021). مطالعات هر دو مسیر، پارامترهای فیزیولوژیکی از جمله میزان جوانه‌زنی، طولیل شدن، محتوای آب و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی ناشی از وجود آنزیم‌ها، سطح H_2O_2 و پراکسیداسیون لیپید؛ پارامترهای

کشاورزی مانند مقادیر عناصر کم‌مصرف و پرمصرف، کیفیت غذا و پارامترهای فتوسنتزی نظیر محتوای کلروفیل، تعداد کلروپلاست‌ها و میزان فتوسنتز را به دلیل وجود نانوذرات اکسید آهن نشان دادند (Kaniningini *et al.*, 2022). پیش‌تر تصور می‌شد که نانوذرات اکسید آهن عمدتاً در بافت‌های برگ و اطراف ریشه‌های گیاهان تولید شده در کشت مایع تجمع می‌یابند. تجمع نانوذرات اکسید آهن باتوجه‌به گونه‌های گیاهی، اندازه ذرات و زمان، به‌عنوان مهم‌ترین عامل، در بافت‌های مختلف گیاهی متفاوت است. علاوه بر این، روش کاربرد و غلظت نانوذرات اکسید آهن متغیرهای مهمی در توسعه تکنیک‌هایی هستند که به کاهش اثرات مضر استفاده از این مواد و نیز افزایش اثرات مثبت با تشویق به توسعه ویژگی‌های مفید در گیاهان کمک می‌کنند. شکل 10 مسیر ورودی نانوذرات اکسید آهن و سازوکارهای جذب آن‌ها را از طریق مسیرهای مختلف نشان می‌دهد.

مکانیسمهای مختلف جذب Fe_2O_3 NPs

شکل 10- جذب و انتقال نانوذرات از مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی از طریق ورودی برگ و ریشه (Shirsat and K, 2024)

10-2-1- ریشه‌ها و روزنه‌ها بعنوان نقطه ورودی برای جذب نانوذرات اکسید آهن

فراهمی زیستی و سمیت نانوذرات اکسید آهن به‌وسیله یک سری از تغییرات شکل در خاک تعیین می‌شود. نانوذرات اکسید آهن پس از بر همکنش با ریشه‌های گیاه، به قسمت‌های هوایی منتقل شده و در اندامک‌های سلولی یا زیر سلولی انباشته می‌شوند. جذب نانوذرات اکسید آهن از خاک توسط ریشه‌های گیاه را می‌توان به‌عنوان مرحله اولیه تجمع زیستی توصیف نمود. محققان مختلف اظهار کرده‌اند که انباشتگی نانوذرات اکسید آهن در گیاه از طریق جذب ریشه و توزیع در بافت‌های گیاه و با استفاده از تغییرات خاصی مانند انحلال فاز کریستالی، تبدیلات زیستی و تجمع زیستی رخ می‌دهد (Wu and Li, 2022).

اندازه نانوذرات اکسید آهن یک عامل کلیدی در توانایی آن‌ها برای ورود از طریق منافذ دیواره سلولی یا روزنه‌های گیاهی است. گزارش شده است که نانوذرات کوچک (با قطرهای بین 3 تا 5 نانومتر) می‌توانند از طریق فشار اسمزی، نیروی موئینگی، یا با عبور مستقیم از سلول‌های اپیدرمی وارد ریشه‌های گیاه شوند. گیاهان دارای یک مانع منحصربه‌فرد به نام دیواره سلولی هستند که چگونگی ورود نانوذرات اکسید آهن به داخل سلول را کنترل نموده و بسته به نوع نانوذرات به آن‌ها اجازه انحلال یا عبور می‌دهد. ورود نانوذرات بزرگ به‌وسیله سلول‌های اپیدرمی نیمه‌تراوا و منفذدار دیواره سلولی ریشه محدود می‌شوند. نانوذرات اکسید آهن می‌توانند موجب تشکیل منافذ مازاد در دیواره سلولی اپیدرمی شوند که به نفوذ آن‌ها کمک می‌کند. تحقیقات نشان داده‌اند که مانع اصلی ورود نانوذرات به سلول‌های گیاهی اندازه منافذ موجود در دیواره سلولی است (Kurczyńska et al., 2021). نانوذرات اکسید آهن باید اندازه‌ای بین 40 تا 50 نانومتر داشته باشند تا امکان رسیدن به سلول‌ها از سطح گیاه برای آن‌ها فراهم شود. علاوه بر این، انتقال نانوذرات اکسید آهن به داخل سلول‌ها از طریق پلاسمودسماتا یا اندامک‌های سلولی گیاهی، به‌اندازه آن‌ها بستگی دارد که بر تجمع، سمیت و سینتیک انتقال آن‌ها به سلول‌های گیاهی تأثیر می‌گذارد. شکل نانوذرات با سطح ویژه، تجمع و واکنش‌پذیری آن‌ها در سطح سلول یا داخل ساختارهای گیاهی ارتباط دارد. ماهیت نانوذرات اکسید آهن، به‌عنوان دومین عامل محدودکننده، بر نفوذ آن‌ها از طریق دیواره سلولی و غشای سلولی تأثیر می‌گذارد. بار

نانوذرات اکسید آهن نیز بر چسبندگی این ذرات به دیواره سلولی تأثیر می‌گذارد. پوشش و مورفولوژی نانوذرات اکسید آهن می‌تواند به طور قابل توجهی بر رفتار آن‌ها در ریشه و نحوه اثرگذاری بر گیاهان تأثیر بگذارند (Lv et al., 2019).

10-2-2- انتقال نانوذرات اکسید آهن در داخل گیاه

نانوذرات اکسید آهن از طریق فضاهای خارج سلولی به صورت آپوپلاستیک از دیواره‌های سلولی عبور می‌کنند و در نهایت به وزیکول‌های استوانه‌ای مرکزی می‌رسند و در آوند چوبی به صورت یک‌طرفه بالا می‌روند. با این حال، برای اینکه نانوذرات اکسید آهن بتوانند به وزیکول‌های استوانه‌ای مرکزی نفوذ کنند، باید از سد نوار کاسپاری¹ عبور کنند. انتقال نانوذرات اکسید آهن از طریق پدیده‌هایی مانند پخشیدگی یا انتشار، درون خواری²، ایجاد منافذ و پیوند با پروتئین‌های حامل غشای سلولی اندودرم انجام می‌شود (Azim et al., 2023). هنگامی که نانوذرات اکسید آهن در سیتوپلاسم جذب می‌شوند، از طریق پلاسمودسماتا بین سلول‌ها حرکت می‌کنند. هنگامی که این ذرات به آوند چوبی رسیدند، به اندام‌های هوایی منتقل شده و از طریق آوند آبکشی دوباره به ریشه‌ها برمی‌گردند. نانوذراتی که نمی‌توانند به درون سلول‌ها نفوذ نمایند، در نوار کاسپاری تجمع می‌یابند. نانوذرات جذب شده توسط گیاهان ممکن است در هسته، سیتوپلاسم و دیواره‌های سلولی سلول‌های پوسته قرار گیرند. نانوذراتی که توسط سطح ریشه از خاک جذب نشده‌اند، می‌توانند جذب سایر عناصر غذایی را تحت تأثیر قرار دهند (Banerjee et al., 2019). جذب مستقیم نانوذرات اکسید آهن در دانه‌ها می‌تواند زمانی رخ دهد که این ذرات از طریق شکاف‌های بین سلولی پارانشیمی به پوشش دانه نفوذ کرده و سپس در لپه پخش شوند. نانوذراتی که در ریشه‌های گیاهی تجمع می‌یابند، به بافت‌های مختلف در بخش هوایی گیاه، از جمله دانه‌های تازه تشکیل شده منتقل می‌شوند. خاصیت آگریزی سطح گیاه و بار و اندازه ذرات در فرایند جذب و انتقال بسیار حائز اهمیت هستند. تحلیل ساختارهای اساسی نانوذرات به درک بهتر ما از نحوه تأثیر آن‌ها بر جذب، انتقال و تجمع این مواد در گیاهان کمک می‌کند. ویژگی‌های گیاه و نانوذرات به طور چشمگیری بر انتقال نانوذرات تأثیر می‌گذارد (Ali et al., 2021).

1- Casparian strip

2- Endocytosis

10-3- سازوکارهای جذب و انتقال نانوذرات اکسید آهن در سطح گیاه

آهن معمولاً به صورت‌های مختلفی مانند سولفات آهن، کلات‌های آهن و نانوذرات اکسید آهن به کودها اضافه می‌شود. با این حال، گیاهان آهن را در دو فرم جذب می‌کنند: (1) نانوذرات آهن؛ (2) یون‌های آزاد آهن. یون‌های آزاد آهن موجود در کودها به راحتی جذب می‌شوند. سولفات آهن، که محلول در آب است، و کلات‌های آهن، ترکیبات آلی که آهن را به صورت قابل استفاده نگه می‌دارند، دو منبع رایج یون‌های آزاد آهن در کودها به شمار می‌روند. در این بخش فرایندهای انتقال و تغییر شکل نانوذرات اکسید آهن در سطح ریشه و برگ مورد بحث قرار می‌گیرد.

10-3-1- جذب و تغییر شکل نانوذرات اکسید آهن در سطح ریشه

10-3-1-1- جذب توسط ریشه‌ها

ریشه‌های گیاه می‌توانند نانوذرات آهن موجود در خاک را جذب کنند. اندازه کوچک نانوذرات ممکن است به آن‌ها این امکان را بدهد که در دیواره‌های سلولی ریشه نفوذ کرده و مستقیماً وارد سلول‌های ریشه شوند. جذب نانوذرات آهن شامل سازوکارهای انتقال فعال مانند درون‌خواری است که به اندازه نانوذرات، بار سطحی و پوشش آن‌ها بستگی دارد (Shirsat and K, 2024).

10-3-1-2- تغییرات محیطی

نانوذرات اکسید آهن به دلیل اکسیداسیون، تجمع، پوشش سطحی و برهم‌کنش‌های میکروبی در معرض تغییرات هستند. نانوذرات در حضور اکسیژن و آب به اکسیدهای آهن تبدیل می‌شوند. این تغییر می‌تواند بر انحلال و زیست‌فراهمی آن‌ها تأثیر بگذارد. علاوه بر این، تجمع نانوذرات آهن در محیط می‌تواند تحرک و فراهمی زیستی آن‌ها را کاهش دهد. پوشش‌های سطحی بر روی نانوذرات نیز می‌توانند رفتار آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده و از طریق افزایش پایداری این ذرات از بروز تغییرات جلوگیری نمایند (Shirsat and K, 2024).

10-3-1-3- تغییرات میکروبی

برخی میکروب‌ها با نانوذرات اکسید آهن برهمکنش دارند. این میکروب‌ها قابلیت دسترسی نانوذرات را از طریق احیاء افزایش می‌دهند، در حالی که گروه دیگری از میکروب‌ها از طریق ایجاد تغییر در شیمی سطح نانومواد فراهمی آن‌ها را کاهش می‌دهند.

10-3-1-3-1- فرایندهای دخیل در برهمکنش‌های میکروبی با نانوذرات اکسید آهن

10-3-1-3-1-1- احیاء زیستی

برخی میکروارگانیسم‌ها می‌توانند نانوذرات اکسید آهن را احیا کرده و از حالت اکسید شده (Fe^{3+}) به شکل‌های محلول و قابل دسترس‌تر (Fe^{2+}) تبدیل کنند. این فرایند می‌تواند قابلیت دسترسی آهن را برای رشد میکروبی یا جذب گیاه افزایش دهد.

10-3-1-3-1-2- تجمع زیستی

میکروارگانیسم‌ها می‌توانند نانوذرات را بر روی سطوح سلولی خود انباشته کنند. این عمل می‌تواند به تشکیل بیوفیلیم‌ها منجر شود و بر انتقال و توزیع نانوذرات در محیط تأثیر بگذارد.

10-3-1-3-1-3- معدنی شدن زیستی

میکروارگانیسم‌ها می‌توانند از طریق تاثیرگذاری بر واکنش‌های رسوب و انحلال اکسیدهای آهن بر تشکیل کانی‌های آهن اثر بگذارند. این امر می‌تواند ژئوشیمی آهن را در خاک‌ها و رسوبات تحت تأثیر قرار دهد.

10-3-1-3-1-4- برهمکنش‌های متابولیکی

میکروارگانیسم‌ها می‌توانند از نانوذرات اکسید آهن به‌عنوان دهنده یا پذیرنده الکترون در فرایندهای متابولیکی خود استفاده کنند. این موضوع می‌تواند در فرایند زیست‌پالایی حائز اهمیت باشد.

10-3-1-3-5- تغییرات سطح

میکروارگانیسم‌ها ممکن است با جذب یا ترشح مولکول‌های زیستی، شیمی سطح نانوذرات اکسید آهن را تغییر دهند که این امر می‌تواند واکنش‌پذیری و پایداری آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

10-3-1-3-6- برهمکنش ترشحات ریشه‌ای با نانوذرات اکسید آهن

ترشحات ریشه می‌توانند از طریق جذب شدن بر سطح نانوذرات، پوششی ایجاد نمایند و بدین طریق پایداری و واکنش‌پذیری آن‌ها را در خاک تحت تأثیر قرار دهند. این ترشحات می‌توانند با جلوگیری از تجمع، نانوذرات را پایدار کنند یا با تسهیل اتصال نانوذرات از طریق پلیمرهای ترشح‌شده، موجب تجمع آن‌ها شوند. برخی از ترشحات ریشه، مانند اسیدهای آلی، می‌توانند بر انحلال یا تغییر شکل نانوذرات تأثیر بگذارند و به این ترتیب، آهن را برای گیاهان قابل دسترس‌تر نمایند. علاوه بر این، ترشحات ریشه می‌توانند جامعه میکروبی ریزوسفر را تحت تأثیر قرار دهند؛ و این میکروب‌ها می‌توانند از طریق برهمکنش با نانوذرات منجر به بروز تغییر و تبدیلات زیستی شوند.

10-3-1-3-7- تغییر شکل بیولوژیکی

نانوذرات درون بافت‌های گیاهی، ممکن است تحت تأثیر تغییر و تبدیلات بیولوژیک قرار بگیرند. این فرایند ممکن است شامل تغییراتی در اندازه نانوذرات، شیمی سطح و حالت اکسیداسیون باشد. آنزیم‌های گیاهی و ساختارهای سلولی می‌توانند بر تغییر شکل نانوذرات تأثیر بگذارند. به‌عنوان مثال، نانوذرات ممکن است با مولکول‌های زیستی پوشش داده شوند یا در واکوئل‌های گیاهی محبوس گردند.

10-4- جذب و تغییر شکل نانوذرات اکسید آهن در سطح برگ

10-4-1- رسوب‌گذاری در سطوح برگ

نانوذرات اکسید آهن می‌توانند از طریق سازوکارهای مختلفی مانند ترسیب هوایی، استفاده از محلول‌های حاوی نانوذرات برای محلول‌پاشی برگ‌ها یا تماس مستقیم با سطوح آلوده بر روی سطح برگ‌های گیاه انباشته شوند. این نانوذرات ممکن است به دلیل اندازه کوچک و بار سطحی خود به سطوح برگ بچسبند.

10-4-2- جذب از طریق روزنه و کوتیکول

برگ‌های گیاه دارای ساختارهای خاصی به نام روزنه‌ها هستند که تبادل گاز با اتمسفر را تسهیل می‌کنند. این روزنه‌ها می‌توانند به‌عنوان نقاط ورودی برای نانوذرات، از جمله

نانوذرات اکسید آهن عمل کنند. این نانوذرات می‌توانند از طریق کوتیکول برگ، یک لایه مومی بر روی سطح برگ، نفوذ کرده و به درون برگ دسترسی پیدا کنند. میزان نفوذ به کوتیکول به عواملی مانند اندازه و خواص سطحی نانوذرات بستگی دارد.

10-4-3- تغییرات شیمیایی در سطوح برگ

نانوذرات اکسید آهن موجود بر روی سطوح برگ ممکن است تحت تأثیر عوامل محیطی دستخوش تغییراتی شوند. این تغییرات می‌توانند شامل واکنش‌های اکسیداسیون یا احیاء باشند که می‌توانند نوع شیمیایی یون‌های آهن را تغییر دهند. برخی از این واکنش‌ها ممکن است توسط تابش نور خورشید، اکسیژن اتمسفری یا ترشحات برگ هدایت شوند. شرایط محیطی از جمله رطوبت، دما و شدت نور می‌توانند بر رفتار نانوذرات در سطح برگ تأثیر بگذارند. این شرایط ممکن است بر پایداری نانوذرات و تغییرات شیمیایی آن‌ها اثرگذار باشند.

10-5- انواع نانوکودهای اکسید آهن موجود در بازار بعنوان کود آهن

با افزایش تقاضا برای کودها، تأثیرات مضر آن‌ها بر محیط زیست نیز افزایش می‌یابد. سموم موجود در خاک، آب و هوا، بهره‌وری کشاورزی را مختل کرده، رشد گیاهان را محدود می‌کند و باعث تجمع سموم در میوه‌ها و سبزیجات می‌شود. علاوه بر این، استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی باعث آلودگی، یوتروفیکاسیون، آلودگی و تأثیرات ماندگار بر محصولات می‌شود. تمایل به تغییر کودها از کودهای شیمیایی به نانو کودها به رشد بازار جهانی نانو کودها در سال‌های آینده کمک می‌کند (Chaitra et al., 2021). بازار جهانی نانو کودها در سال 2021 به ارزش 353/9 میلیون دلار آمریکا برآورد شد و در حال حاضر با نرخ رشد سالانه قابل توجهی معادل 17/9 درصد از سال 2022 تا 2030 در حال گسترش است (Pro Arc Market Insights, 2023). استفاده از نانو کودها می‌تواند مصرف کودهای شیمیایی را 80 تا 100 برابر کاهش داده و واردات اضافی کودهای شیمیایی توسط یک کشور را تقلیل نماید (Poudel et al., 2023). به دلیل پیشرفت‌های کشاورزی در کشورهایی مانند ایالات متحده و کانادا، انتظار می‌رود که در 5 سال آینده منطقه آمریکای شمالی کنترل جهانی را در این زمینه به دست آورد (Yara, 2022).

علاوه بر این، تحقیقات و پیشرفت‌های فنی در این حوزه به سرعت در حال گسترش است و از رشد بازار جهانی نانو کودها در 5 سال آینده حمایت می‌کند. علاوه بر این، کشاورزی درآمد قابل توجهی برای کشورهایمانند چین، هند و تایوان تولید می‌کند. شرکت‌های جدید در بازار ممکن است با ترکیب و همکاری با غول‌های صنعت موجود، محصولات نوآورانه‌ای را معرفی کرده و برند جدیدی ایجاد نمایند. باتوجه به اینکه نانو کودها می‌توانند جایگزین کودهای سنتی شده و درعین حال هزینه کمتر، بازده و کیفیت بالاتری در محصولات تولید نمایند؛ تقاضا برای این کودها در سطح جهانی به طور قابل توجهی در حال افزایش است. برخی از نانو کودهای اکسید آهن که به عنوان مکمل آهن در بازار وجود دارند در جدول 6 ارائه شده‌اند (Shirsat and K, 2024).

جدول 6- نانو کودهای آهن تجاری موجود در بازار جهانی (Shirsat and K, 2024)

نام محصول	نام شرکت	مقدار آهن (درصد)	کشور سازنده
Geolife Nano FE	Geolife Agritech India Pvt. Ltd	12	هندوستان
Organic Iron Dust (Magnetic Iron Oxide Powder)	Erwon	-	هندوستان
Nano frammin	Dr. Linnfield Laboratories	12	هندوستان
AgroFerrum	Hortus supply international	15	هلند
High-Tech Nano Chelated Iron Fertilizer	Trademax Corporation FZE LLC	9	امارات متحده عربی
Nano Chelated Complete Micro fertilizer	Khazra	-	ایران

11- روش‌های مصرف کودهای آهن

اثربخشی روش‌های مختلف کوددهی در خاک تحت تأثیر ویژگی‌های گیاه، اقلیم و چگونگی مدیریت باغدار در ابعاد مختلف از جمله مدیریت خاک و آب قرار دارد (شه‌ایان و همکاران، 1385). انتخاب روش صحیح مصرف کود، برای باغدارانی که به دنبال افزایش کارایی مصرف کودها و کاهش تلفات (از طریق آ‌شویی، رواناب سطحی و

رسوب) هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است (مرادی و همکاران، 1395). کودهای آهن اغلب به یکی از روش‌های چالکود، کودآبیاری و محلول‌پاشی مورد استفاده قرار می‌گیرند (جدول 7، شکل 11).

11-1- چالکود

چالکود یک روش خاص و موضعی برای جاگذاری کودهای آلی و شیمیایی است که به‌ویژه در باغ‌هایی با بافت خاک سبک و سنگین و دارای مقادیر بالای آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به‌عنوان روشی مناسب برای ذخیره‌سازی مواد غذایی در فصل زمستان و تأمین نیاز کودی درختان در فصل بهار شناخته می‌شود. با تأمین کامل مواد غذایی مورد نیاز درختان در فصل بهار، آن‌ها قادر خواهند بود به طور مؤثرتری به مرحله رشد و نمو وارد شوند. در روش چالکود، باتوجه به سن درختان، بین 2 تا 4 چاله در یک سوم بیرونی سایه‌انداز درختان حفر می‌شود و سپس این چاله‌ها با مخلوطی از مواد آلی (کودهای دامی پوسیده، ورمی‌کمپوست و بقایای گیاهی) و کودهای شیمیایی توصیه‌شده پر می‌گردند. حفر چاله با فاصله مناسب از تنه درخت و در مسیر حرکت آب باعث می‌شود که ریشه به سمت مواد غذایی حرکت کرده و رشد و گسترش زیادی پیدا کند. ابعاد چاله‌ها به طور معمول به این صورت است: عرض حدود 50 سانتی‌متر، طول حداقل 60 سانتی‌متر و عمق بین 40 تا 50 سانتی‌متر (مطابق با عمق پراکنش ریشه درختان). نکته مهم در اجرای این روش جلوگیری از ورود خاک به داخل چاله‌ها است، زیرا این مشکل باعث کاهش کارایی چالکود می‌شود. چالکودها در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر قطره‌چکان‌ها و در سیستم آبیاری سطحی در مسیر حرکت آب حفر می‌شوند. با نگهداری و مراقبت از چاله‌ها دیگر نیازی به حفر چاله در هر سال نمی‌باشد. برای اینکه ریشه بتواند به محتویات داخل چاله دسترسی کامل داشته باشد، میزان رطوبت و تهویه در داخل چاله‌ها باید به اندازه کافی باشد. کم یا زیاد بودن رطوبت باعث می‌شود که ریشه به طور کامل به مواد غذایی دسترسی نداشته باشد. با افزایش قطر تاج و سایه‌انداز درختان پس از چند سال، ضروری است که چالکودهای جدید حفر شود که در درازمدت می‌تواند به بهبود وضعیت خاک در منطقه ریشه کمک کند. بهترین زمان برای استفاده از روش چالکود، اواخر پاییز تا اوایل

زمستان است؛ زمانی که درختان به خواب رفته و برگ‌های آنها زرد شده و در حال ریختن هستند. برای تعیین مقدار کود مورد استفاده نیز باید آزمون خاک انجام گیرد و بر اساس نتایج به دست آمده و نیازهای رشدی گیاهان اقدام شود. در این روش کوددهی معمولاً سولفات آهن همراه با مواد آلی و گوگرد مورد استفاده قرار می‌گیرند (شهابیان و همکاران، 1385؛ رحیمی لاکه و همکاران، 1388؛ مرادی و همکاران، 1395؛ اسدی کنگرشاهی و همکاران، 1396).

11-2- کودآبیاری

کودآبیاری ابزاری مؤثر برای مدیریت زمان، مکان و نوع کود مورد نیاز بر اساس حاصلخیزی خاک و مراحل رشد محصول است. هنگامی که این روش با سیستم‌های آبیاری کارآمد ترکیب شود، عناصر غذایی و آب به گونه‌ای کنترل می‌شوند که حداکثر تولید از این ورودی‌ها حاصل گردد. با مصرف مداوم مقادیر کمی از عناصر غذایی محلول و توزیع آن‌ها در نزدیکی ریشه‌های گیاه، میزان جذب عناصر افزایش می‌یابد. از مزایای این روش می‌توان به بهبود کارایی مصرف کود، انعطاف‌پذیری در زمان استفاده، افزایش عملکرد و کیفیت محصولات، و کاهش هزینه‌های نیروی کار اشاره کرد (Grace et al., 2019; Ashrafi et al., 2020).

مشابه با کاربرد مکرر آب، استفاده بهینه و تقسیطی از کودها می‌تواند کیفیت و کمیت عملکرد محصولات را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. باین‌حال، مدیریت صحیح کودآبیاری مستلزم آگاهی از توزیع عناصر غذایی در خاک و چگونگی جذب آن‌ها توسط گیاه است. پایش وضعیت عناصر غذایی در خاک و گیاه نشانه‌ای از کیفیت مدیریت کوددهی است. ویژگی‌های خاک، خصوصیات گیاه و شرایط رشد در جذب مؤثر عناصر غذایی نقش دارند. کودآبیاری این امکان را فراهم می‌آورد که کودهای محلول و سایر مواد شیمیایی به طور مؤثر و یکنواخت همراه با آب آبیاری توزیع شوند. بر اساس مطالعات، کارایی جذب آهن از کلات‌ها می‌تواند با بهبود فناوری‌های توزیع و انتخاب زمان مناسب مصرف افزایش یابد. اضافه کردن مکرر مقادیر کمی از کلات‌های آهن از طریق آبیاری قطره‌ای، دسترسی به آهن در نواحی ریشه را حفظ می‌کند و خطر آبشویی

آن را کاهش می‌دهد. تحقیقات میدانی نشان داده‌اند که استفاده از کلات‌های آهن به روش کودآبیاری در برخی باغات میوه، مانند کیوی، در جلوگیری از وقوع کلروز آهن در اوایل پاییز تا اواخر تابستان، به مراتب مؤثرتر از قبل از شکوفه‌دهی است. همچنین، تلاش‌هایی برای کاهش آبشویی کلات‌های آهن از طریق تثبیت آن‌ها در یک ماتریس آلی در حال انجام است (Rombolà and Tagliavini, 2006; Grace *et al.*, 2019; Ashrafi *et al.*, 2020). مزایا و معایب کلی کودآبیاری عبارت هستند از:

مزایا:

- ✓ هم‌زمانی مصرف کود با نیاز گیاه که باتوجه به نیازهای متفاوت گیاهان تنظیم می‌شود.
- ✓ صرفه‌جویی در مقدار کود مصرفی به دلیل کارایی بالاتر و کاهش آبشویی.
- ✓ بهینه‌سازی تعادل عناصر غذایی در خاک باعرضه مستقیم آن‌ها به ناحیه مؤثر ریشه.
- ✓ کاهش هزینه‌های نیروی کار و انرژی با استفاده از سیستم‌های توزیع آب.
- ✓ افزایش عملکرد و کیفیت محصولات.
- ✓ حفظ جریان یکنواخت آب و عناصر غذایی.
- ✓ بهبود قابلیت دسترسی و جذب عناصر غذایی توسط گیاه.
- ✓ ایمنی در کوددهی به واسطه کاهش خطر آسیب به ریشه‌ها ناشی از غلظت‌های بالا.
- ✓ جلوگیری از فرسایش خاک و آب.

معایب:

- ✓ هزینه بالای دو جزء (آبیاری قطره‌ای و کودهای محلول).
- ✓ دشواری در نگهداری سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و خطر سرقت و آلودگی با جوندگان.
- ✓ ضرورت وجود آب باکیفیت بالا و احتمال مسدودشدن خروجی‌ها.
- ✓ محدودیت در دسترسی به کودهای محلول.
- ✓ دشواری در تنظیم کودها مطابق با نیازهای گیاهی.

- ✓ افزایش خطر آلودگی به آفات و بیماری‌ها.
- ✓ مساحت تحت آبیاری قطره‌ای در حال حاضر به دلیل یارانه‌های موجود در حال افزایش است؛ اگر یارانه‌ها حذف شوند، امکان کاهش مساحت این نوع از سیستم‌های آبیاری وجود دارد. براین اساس سرنوشت کودآبیاری نامعلوم است.

11-3- محلول‌پاشی

تاریخچه کاربرد آهن به‌صورت محلول‌پاشی در گیاهان به زمان‌های دور برمی‌گردد. Gris در سال 1843 نخستین کسی بود که متوجه شد، آهن توسط برگ‌ها جذب می‌شود و کمبود آن منجر به کلروز ناشی از آهک می‌گردد. او نشان داد که محلول‌پاشی با سولفات آهن سبب سبز شدن برگ‌های کلروزه می‌شود. این روش به مرور توسعه یافت و به یک رویه زراعی تبدیل شد. منابع مختلف آهن از جمله نمک‌های معدنی (FeSO_4)، کمپلکس‌ها (مانند لیگنوسولفونات‌های آهن) و کلات‌های آهن (EDTA و DTPA) آزمایش شده‌اند. در حالی که فرم‌های کلاته آهن پایدارتر هستند، کارایی آن‌ها به‌عنوان منابع محلول‌پاشی معمولاً از فرم‌های معدنی آهن بیشتر نیست. به طور کلی، مقدار آهن مورد استفاده در روش‌های محلول‌پاشی بسیار کمتر از کاربرد خاکی است و به همین دلیل، این روش‌ها معمولاً به لحاظ اقتصادی مطلوب‌تر محسوب می‌شوند (Shenker and Chen, 2005; Abadía et al., 2001; Fernández and Ebert, 2005). بااین‌حال، هیچ‌کدام از این مواد نتوانسته‌اند به طور مؤثر مشکل کلروز را رفع کنند و تیمار با روش محلول‌پاشی اغلب منجر به سبز شدن ناهمگن در نقاط کلروزه می‌شود. نقاط سبز معمولاً در بخش‌هایی که با قطرات اسپری تماس داشته‌اند، به‌ویژه در قسمت پایینی برگ، ظاهر می‌شوند. همچنین، نقاط نکروز به دلیل سوختگی‌های ناشی از محلول FeSO_4 به طور منظم پدیدار می‌شوند. اضافه کردن مواد سطحی به بهبود پوشش برگ کمک کرده، اما برخی از این مواد نیز ممکن است سوختگی برگ را تشدید کنند (Shenker and Chen, 2005).

دو مشکل عمده که موفقیت کاربرد محلول‌پاشی برگی آهن را مختل می‌کنند، عبارت هستند از (1) نفوذ آهن از طریق کوتیکول برگ؛ (2) محدودیت در انتقال آهن در

درون گیاه. مشاهدات اولیه نشان داده‌اند که کارایی محلول‌پاشی زمانی بهبود می‌یابد که در صبح زود انجام شود و رابطه‌ای مثبت بین نفوذ آهن و چگالی روزه‌ها وجود دارد. پوشش قسمت زیرین برگ، که دارای چگالی بالای روزه‌ها است، اهمیت زیادی دارد (Shenker and Chen, 2005). با این حال، Marschner (1995) بیان کرده است که نفوذ ماده حل شده از طریق کوتیکول در روزه‌های ریز که کمتر از 1 نانومتر قطر دارند، انجام می‌گیرد. این روزه‌ها در دیواره‌های سلولی که دور روزه‌های نگهبان قرار دارند، چگالی بیشتری دارند. علاوه بر این، نفوذ یون‌های کوچکتر (Fe^{2+}) نسبت به یون‌های بزرگتر ($Fe-EDTA$) حساس‌تر است. بنابراین، طراحی فرمولاسیون‌های مناسب می‌تواند به بهبود نفوذ آهن به داخل برگ‌ها کمک کند. انتقال آهن بعنوان دومین مشکل عمده در محلول‌پاشی برگ‌ها وجود دارد. تکرار مکرر محلول‌پاشی به‌ویژه در دوره‌های رشد سریع گیاه معمولاً ضروری است، زیرا برگ‌های جدید از محلول‌پاشی‌های قبلی بهره‌مند نمی‌شوند.

دشواری در انتقال آهن درون گیاه می‌تواند با مدیریت مناسب خاک و شرایط تغذیه‌ای بهبود یابد. مقادیر بالای HCO_3^- در محیط ریشه، نسبت بالای NO_3^-/NH_4^+ در جریان تأمین و سطح بالای فسفر، همگی به کاهش انتقال آهن از طریق محلول‌پاشی کمک می‌کنند؛ بنابراین، ترکیب روش‌های مدیریت خاک با محلول‌پاشی می‌تواند به افزایش کارایی این روش منجر شود. برخی دیگر از شیوه‌ها که هدف آن‌ها افزایش انتقال آهن از طریق افزودن موادی مانند اسیدهای سیتریک و مالیک در فرمولاسیون محلول‌پاشی است، پیشنهاد شده‌اند. با وجود گزارش‌هایی از پاسخ‌های مثبت در این زمینه، به نظر می‌رسد این پاسخ‌ها به نوع گیاه وابسته بوده و به‌اندازه کافی مؤثر نیستند (Shenker and Chen, 2005).

در روش محلول‌پاشی برگ‌ها غلظت محلول مورد استفاده معمولاً بین 0/1 تا 0/5 درصد برای کلات‌های آهن یا سولفات آهن توصیه می‌شود که بسته به نوع گیاه و شدت کلروز متغیر است. بهتر است محلول‌پاشی در ساعات اولیه صبح یا عصر انجام شود تا تبخیر کاهش یافته و جذب به حداکثر برسد. تعداد دفعات محلول‌پاشی نیز با توجه به شدت کلروز تعیین شده و هر 7 تا 14 روز یک بار تکرار می‌شود. کیفیت آب آبیاری،

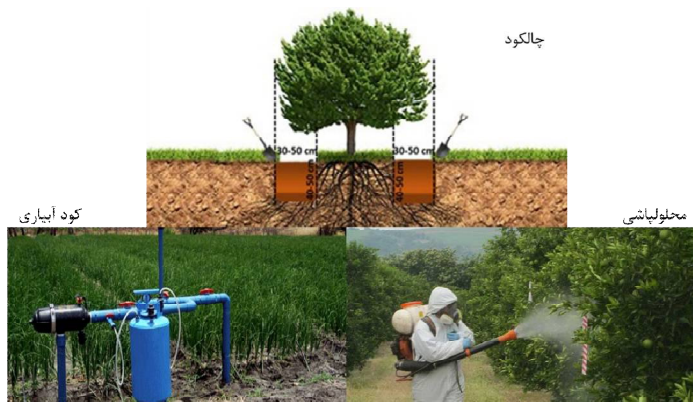
استفاده از کودهای مورد تایید موسسه خاک و آب کشور، محلول‌پاشی در هوای خنک، عدم محلول‌پاشی در هنگام وزش باد، استفاده از سمپاش‌های مناسب، استفاده از مویان در راستای افزایش سطح تماس برگ با مواد کودی، آبیاری مزرعه 2 الی 3 روز قبل از محلول‌پاشی با هدف جلوگیری از افزایش ضخامت کوتیکول در اثر خشکی و عدم اختلاط سموم شیمیایی با کودهای محلول از جمله نکات حائز اهمیتی هستند که در محلول‌پاشی بایستی مورد توجه قرار گیرند (اسدی کنگرشاهی و همکاران، 1396؛ Abadía et al., 2001; Fernández and Ebert, 2005).

11-4- تزریق تنه‌ای

روش تزریق مستقیم مواد غذایی در تنه درختان یا درون‌درمانی روش جدیدی است که در آن حجم کمتری از عناصر غذایی با حداقل تلفات و خسارات زیست‌محیطی به‌کاررفته و تمام مواد تزریق شده نیز وارد گیاه می‌شود. این روش مزایایی نظیر کاربرد آسان، ایمن، اقتصادی و نیز عدم نیاز به وسایل مخصوص دارد (نیکبخت و همکاران، 1401). تزریق نمک‌های آهن (به‌ویژه سولفات آهن و آمونیوم فریک سیترات) به‌صورت مایع در آوند چوبی، به‌عنوان روشی برای کاهش کلروز آهن در درختان سیب، گلابی، هلو، کیوی، پسته، زیتون و چنار گزارش شده است (رئیزی و شهابی، 1380؛ نیکبخت و همکاران، 1401؛ Rombolà and Tagliavini, 2006). علی‌رغم سبزشدن سریع و اثر ماندگار (2-3 ساله)، این روش به‌عنوان یک راهکار اضطراری برای درمان درختان شدیداً کلروزه در نظر گرفته می‌شود و ممکن است تنها برای سیستم‌های کشت کم‌تراکم قابل اجرا باشد. مشکلات اصلی در تزریق تنه‌ای کودهای مایع، در شرایطی که غلظت آهن و زمان تزریق به‌درستی انتخاب نشوند، مربوط به خطر ایجاد سمیت بر روی برگ‌ها است. باین‌حال، تزریق شکل جامد کودهای آهن در کنترل کلروز که در اسپانیا با موفقیت اجرا شده است، مشکل ایجاد سوختگی در برگ‌ها را ندارد (Rombolà and Tagliavini, 2006).

جدول 7- مقایسه چندجانبه روش‌های مختلف کوددهی برای کنترل کلروز آهن در باغات
(Rombolà and Tagliavini, 2006)

تیمار	کارایی	پایداری	هزینه سالانه	تأثیرات زیست‌محیطی	توضیحات
مصرف خاکی					
کلات‌های آهن	بالا	پایین-متوسط	خیلی بالا	بالا	ممکن است در آینده محدودیت‌های قانونی وجود داشته باشد.
سولفات آهن	پایین	پایین	پایین	متوسط	رطوبت بالای خاک اکسیداسیون سریع Fe^{2+} را کاهش می‌دهد.
کودهای حیوانی	متوسط-بالا	بالا	پایین-متوسط	خیلی پایین	اثر بخشی این کودها ممکن است با افزودن سولفات آهن افزایش یابد.
کمپوست	متوسط-بالا	بالا	پایین-متوسط	خیلی پایین	-
پودر خون	متوسط	پایین	متوسط	خیلی پایین	برای کودآبیاری مناسب می‌باشد.
محلول‌پاشی					
کلات‌های آهن	متوسط	پایین	پایین	بالا	پاسخ سریع، کارایی پایین در کلروز شدید، ممکن است در آینده محدودیت‌های قانونی وجود داشته باشد.
سولفات آهن	متوسط	پایین	پایین	پایین	پاسخ سریع، کارایی پایین در کلروز شدید، امکان ایجاد سمیت در میوه‌ها در مقادیر بالا.
آهن کمپلکس شده با ترکیبات آلی	پایین-متوسط	پایین	پایین	پایین	پاسخ سریع، کارایی وابسته به عامل کمپلکس‌کننده دارد.
تزریق تنه‌ای	متوسط-بالا	بالا	متوسط	پایین	خطر ریزش زودهنگام برگ‌ها، پایداری بالا، خطر ایجاد عوامل بیماری‌زا.
کودآبیاری					
کلات‌های آهن	متوسط-بالا	بالا	بالا	بالا	-



شکل 11- روش‌های کوددهی

12- زمان مناسب برای کوددهی

بسته به نوع گیاه، نوع خاک، نوع کود و شرایط محیطی، زمان مناسب برای کوددهی تعیین می‌شود. مناسب‌ترین زمان برای استفاده کود آهن در **سبزی‌ها**، مراحل آغازین رشد می‌باشد. از مصرف کود در زمان جوانه‌زنی باید اجتناب نمود، چرا که ممکن است در گیاه سوختگی ایجاد نماید. بهترین زمان محلول‌پاشی کود آهن در سبزی‌های چند برگه، پس از 4-5 برگ شدن و در **صیفی‌جات** از جمله خربزه و هندوانه که مصرف خام دارند، بعد از کاشت نشا و در زمان 6-7 برگ شدن می‌باشد و در مورد صیفی‌جاتی که مصرف خام ندارند، بهترین زمان پس از 8 برگ شدن است.

در طول فصل رشد **گندم و جو**، کودهای حاوی آهن دو تا سه بار مصرف می‌شوند. این کودها در صورت کاربرد در خاک بایستی قبل از کاشت مصرف شده و با شخم زیر خاک شوند و یا با غلظت 3 تا 4 در هزار در مراحل پنجه‌زنی، اوایل ساقه‌دهی و حتی در مرحله گلدهی محلول‌پاشی گردند (مشیری و همکاران، 1393).

به طور معمول بهترین زمان مصرف کودهای آهن برای **درختان میوه** در روش چالکود، اواخر اسفندماه و قبل از بیدارشدن جوانه‌ها است. در روش‌های کودآبیاری و محلول‌پاشی نیز فصل رشد درختان (بهار) بهترین زمان کوددهی است.

نکته: درختان در فصل بهار دارای رشد سریعی بوده و زردی شدید برگ‌ها در اردیبهشت‌ماه الی اواخر خردادماه ظاهر می‌گردد. با کاهش شدت رشد درختان، میزان زردی به تدریج کاهش می‌یابد. در صورت کمبود شدید آهن در درختان میوه، باید چندین بار کود آهن مصرف شود.

13- اصلاح کلروز آهن در درختان میوه

اصلاح کلروز آهن در گیاهان کشت شده در خاک‌های کلسیمی یک مشکل قدیمی است که راه‌حل آسانی ندارد. تا زمانی که ریشه‌های مقاوم به کلروز آهن با ویژگی‌های مثبت دیگر در دسترس قرار بگیرند، پیشگیری یا اصلاح کلروز آهن برای میوه‌کاران بسیار اهمیت دارد. بدیهی است که نیاز به اصلاح کلروز آهن با اثرات آن بر عملکرد، اندازه و کیفیت میوه و در نتیجه کاهش حاشیه سود میوه‌کاران در ارتباط است. در پژوهش انجام شده توسط Tagliavini و همکاران (2000)، تأثیر اقتصادی کلروز آهن در باغات کیوی، هلو و انجیر که در خاک‌های کلسیمی در ایتالیا، اسپانیا و یونان احداث شده بودند بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاهش عملکرد مستقیماً با شدت کلروز آهن مرتبط بود. یک قسمت قابل توجه از هلوها و کیوی‌ها قابلیت عرضه به بازار را نداشتند. باین‌حال، Sanz و همکاران (1997) متوجه شدند که کلروز آهن تنها زمانی بر کیفیت هلو تأثیر دارد که علائم ظاهری آشکار هستند و کاهش شدید عملکرد به‌وضوح مشخص است. روش‌هایی که برای اصلاح کلروز آهن وجود دارند، می‌توانند به‌صورت مستقیم در خاک‌ها یا به‌صورت محلول‌پاشی اعمال شوند.

13-1- تیمارهای اعمال شده برای خاک‌ها: اصلاح کلروز آهن در درختانی که در

خاک‌های کلسیمی رشد می‌کنند، معمولاً با استفاده از کلات‌های آهن سه ظرفیتی از جمله اتیلن دی آمین دی اتیلین هیدروکسی فنیل استات (Fe-EDDHA) صورت می‌گیرد. کارایی اصلاح با Fe-EDDHA به پایداری بالای این کلات مربوط است. این کلات حتی در pHهای بالاتر از 9 خاک، از رسوب آهن جلوگیری می‌نماید. در مقابل، پایداری فنیل استات اتیلن دی آمین آهن (Fe-EDTA) در pHهای بالاتر از 6/5 کاهش می‌یابد، که

منجر به تبادل آهن توسط فلزاتی نظیر Ca^{2+} ، Zn^{2+} و Cu^{2+} شده و رسوب‌گذاری آهن را در پی دارد. بنابراین، استفاده از Fe-EDTA در خاک‌های قلیایی موثر نیست. در باغ‌های میوه با آبیاری تحت فشار، آهن می‌تواند از طریق کودآبیاری¹ اعمال شود، اما در موارد دیگر، استفاده از کلات‌های آهن زمان‌بر است، چرا که معمولاً در بهار بین مراحل شروع گلدهی و شکوفایی کامل گل، در اطراف هر درخت منفرد جاگذاری می‌شوند. این روش بسیار پرهزینه است و باید هر ساله تکرار شود چراکه آهن به سرعت در خاک غیرمتحرک² شده یا از منطقه ریشه خارج می‌شود. Tagliavini و همکاران (2000) هزینه‌ای معادل 250 یورو در هکتار تخمین زده‌اند، که تا 60 درصد از کل هزینه‌های کود را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، عوامل کلات‌کننده پس از جذب Fe^{2+} توسط گیاهان در خاک باقی می‌مانند و برای واکنش با فلزات دیگر مانند منگنز، مس و نیکل در دسترس قرار می‌گیرند و این باعث افزایش قابلیت فراهمی زیستی³ آن‌ها می‌شود.

محققان سعی نموده‌اند که با استفاده از تیمارهای خاکی و بدون کاربرد کلات‌های مصنوعی نیز کلروز آهن را برطرف نمایند. تزریق فسفات آهن ($\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) در خاک، از بروز کلروز آهن در درختان گلابی که در خاک کلسیمی رشد می‌کردند با موفقیت جلوگیری می‌نماید. این در حالی است که افزودن سولفات آهن دوزفیتی به تنهایی در خاک‌های کلسیمی مؤثر نیست، زیرا آهن رسوب نموده و از دسترس گیاهان خارج می‌شود. ترکیب نمودن سولفات آهن با مواد آلی، منجر به بهبود اثربخشی آن می‌شود. مواد آلی می‌توانند به دلیل تشکیل کمپلکس و افزایش حلالیت آهن، از بروز کلروز آهن ناشی از آهک جلوگیری نموده و یا منجر به اصلاح آن شوند. با این حال اثربخشی این روش به ترکیب مواد آلی مورد استفاده، توانایی کمپلکس نمودن آهن و پایداری کلات‌های آهن تشکیل شده بستگی دارد. استفاده از پسماندها و فرآورده‌های صنعتی نیز در گیاهان علفی با درجات مختلف اثربخشی مورد آزمون قرار گرفته است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، هومات آهن، فرآورده جانبی حاصل از فرایند تصفیه آب آشامیدنی، منبع مؤثری از آهن برای مرکبات کشت شده در خاک‌های قلیایی است.

1- Fertigation

2- Immobilized

3- Bioavailability

افزایش رشد، غلظت آهن در برگ‌ها و عملکرد میوه پس از استفاده از هومات آهن نیز گزارش شده است (Alva and Obrez, 1998). کارایی آهن غنی شده با لجن فاضلاب به عنوان یک جایگزین برای کلات‌های فلزی در اصلاح کلروز آهن در پرتقال، هلو و سیب نیز اثبات شده است (Pérez-Sanz et al., 2002).

پیشگیری از کلروز ناشی از آهک از طریق اسیدی کردن کل منطقه ریشه واقع‌بینانه نیست. پخش سطحی مقادیر کمی از اسیدهای قوی در خاک‌های کلسیمی نیز باعث کاهش معنی‌داری در pH نمی‌شود و ممکن است تأثیرات منفی مانند سمیت و افزایش شوری خاک را در پی داشته باشد. در مقابل، اسیدی کردن حجم‌های کوچکی از خاک امکان‌پذیر است و می‌تواند وضعیت تغذیه‌ای درختان میوه را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. استفاده از گوگرد عنصری که به صورت نواری در دو طرف ردیف‌های درختان قرار داده می‌شود، به کنترل عالی کلروز در درختان کمک نموده و هم‌زمان دسترسی به فسفر، منگنز و روی برای گیاهان را بهبود می‌بخشد (Pestana et al., 2003). در خاک‌های کلسیمی، تغذیه نیتروژن به طور غالب بر پایه نیترات است، اما اسیدی شدن منطقه ریزوسفر به دلیل جذب کاتیون توسط گیاهان به واسطه مصرف بازدارنده‌های نیتریفیکاسیون همراه با اوره یا آمونیوم امکان‌پذیر است. به تازگی، یک تکنیک مبتنی بر سیستم کشت جذب تنظیم‌شده تغذیه آمونیوم بلندمدت¹ (CULTAN) توسط Sommer (2000) ایجاد شده است که برای پیشگیری و کنترل کلروز آهن ناشی از آهک به کار گرفته می‌شود.

2-13- تیمارهای اعمال شده برای درختان: محلول‌پاشی برگی می‌تواند یک

جایگزین ارزان و سازگار با محیط زیست برای رفع کلروز آهن در خاک باشد. استفاده از ترکیب‌های آهن یا محلول‌های اسیدی در اندام‌های هوایی، اثرات بازدارندگی ترکیب بی‌کربنات خاک بر جذب و انتقال آهن را حذف می‌کند (Mengel, 1994). همچنین، رهاسازی آهن غیرمتحرک (آلی) شده در گیاه، نیز قابل دستیابی است. موفقیت در درمان کلروز آهن با استفاده از ترکیبات آهن، به توانایی آن‌ها برای نفوذ در کوتیکول، انتقال در فضای آزاد آپوپلاستی و عبور از پلاسمای سلول‌های برگ و رسیدن به سیتوپلاسم

1- Controlled uptake long term ammonium nutrition cropping system

وابسته است (Rombolà *et al.*, 2000). محلول‌پاشی سولفات آهن دو ظرفیتی موجب افزایش محتوای کلروفیل در برگ‌های کیوی و مرکبات می‌شود. اگرچه این تیمار ممکن است اندازه و کیفیت میوه را بهبود دهد، اما اثرات مثبت بر محتوای کلروفیل برگ همیشه به افزایش عملکرد منجر نمی‌شود، زیرا ممکن است انتقال آهن اعمال شده به برگ‌ها یا میوه‌های جدید در حال توسعه کم باشد (Legaz *et al.*, 1992). محققان مختلف، به بررسی کاربردهای برگ‌گی کلات‌های آهن در گیاهانی مثل پرتقال، ماندارین، انگور و کیوی، پرداخته‌اند (Pestana *et al.*, 2003). ممکن است کارایی محلول‌پاشی برگ‌گی کلات‌ها، به دلیل جذب محدود توسط اندام‌های هوایی، نسبت به مصرف خاکی آن‌ها کم‌تر باشد، باین‌حال نتایج حاصل از مطالعات Rombolà و همکاران (2000) نشان می‌دهد که برگ‌های کیوی کشت شده در مزرعه قادر به احیاء آهن سه ظرفیتی از اسید دی‌اتیلن‌تری‌آمین‌پنتااستات (DTPA) بودند و آن را به سلول‌های مزوفیل جذب کردند. این موضوع در مورد مرکبات (پرتقال و ماندارین) نیز صحیح است، زیرا بهبود علائم کلروز آهن پس از محلول‌پاشی‌های برگ‌گی مکرر با Fe-EDDHA حاصل می‌شود (Pestana *et al.*, 1999). سایر تیمارهای قابل اعمال مستقیم به درختان، ترکیباتی هستند که فعالیت ردوکتاز آهن-کلات واقع در پلاسماالمای سلول‌های میزوفیل برگ را بهبود می‌دهند. محلول‌های رقیق شده‌ی اسیدهای معدنی یا آلی، هورمون‌ها، الکل‌ها و اوره نمونه‌هایی از این ترکیبات هستند. تیمارهای اسیدی آهن غیرمتحرک شده‌ی درون گیاه را با تغییر pH فضای آپوپلاستی آزاد می‌کنند. محلول‌پاشی با اسید سولفوریک، سیتریک و آسکوربیک در کیوی، گلابی و پرتقال منجر به بهبود ناقص علائم کلروز آهن می‌شود (Pestana *et al.*, 1999; Pestana *et al.*, 2003). استفاده از موادی که پمپ‌های پروتونی موجود در پلاسماالمای سلول‌ها را تحریک می‌کنند نیز می‌تواند به کاهش کلروز آهن منجر شود، چراکه pH آپوپلاست برگ بر فعالیت آهن-کلات ردوکتاز تأثیر می‌گذارد.

13-3- سایر تیمارها: مطالعات نشان می‌دهد که تزریق سولفات آهن (II) به

تنه‌های درختان می‌تواند کلروز آهن را رفع کند، اما این یک راهکار پر هزینه می‌باشد و زخم‌هایی که در درخت‌ها ایجاد می‌شود، ریسک آلودگی‌های باکتریایی یا ویروسی را

افزایش می‌دهند. در خاک‌های آهکی با غلظت کمی از آهک فعال، استفاده از یک سیستم مدیریت تلفیقی در مقابله با کلروز آهن می‌تواند موثر باشد. خاکورزی حداقل، به ویژه طی فصل بارندگی، اجازه می‌دهد تا گندمیان که نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک را بهبود می‌بخشند و فیتوسیدروفورها را ترشح می‌کنند، رشد نمایند. این تاثیرات از طریق بهبود تهویه خاک و کلاته شدن آهن باعث افزایش زیست فراهمی عناصر غذایی می‌شود. به نظر می‌رسد خاکورزی تنها زمانی ضروری باشد که رقابت قوی برای عناصر غذایی و آب بین گیاهان علفی و درختان میوه وجود دارد. استفاده از کودهایی با واکنش‌های اسیدی مانند سولفات پتاسیم، روش دیگری است که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Mengel, 1995). محققان ادعا می‌کنند که سیدروفورها یک منبع مهم از آهن برای گیاهانی هستند که در خاک‌های آهکی رشد می‌کنند. کلنیزایسون ریشه با باکتری سودوموناس فلوتورسنس و قارچ گلوموس موسه به افزایش آهن برگ در انگوری که بر ریشه‌های حساس به کلروز پیوند زده شده است، منجر می‌شود (Bavaresco et al., 2015).

14- کمبود آهن در گیاهان در ایران: چالش‌ها و راه‌حل‌ها

کمبود آهن در گیاهان یک چالش مهم برای کشاورزی در ایران است که بر عملکرد محصولات و امنیت غذایی تأثیر می‌گذارد. با این حال، با اجرای شیوه‌های مدرن می‌توان به طور مؤثری این مشکل را کاهش داد. با اتخاذ این راهبردها، کشاورزان می‌توانند دسترسی به آهن را در خاک‌ها افزایش دهند، سلامت گیاهان را بهبود بخشند و تولیدات کشاورزی پایدار را در این منطقه تضمین نمایند. در این بخش به بررسی علل اصلی کمبود آهن در گیاهان در ایران و جدیدترین روش‌ها و شیوه‌ها برای رفع این مشکل پرداخته می‌شود.

14-1- علل اصلی کمبود آهن در ایران

1- ترکیب خاک: بسیاری از مناطق ایران دارای خاک‌های کربناته هستند که حاوی سطوح بالای کربنات کلسیم می‌باشند. در خاک‌هایی که بیش از 20 درصد کربنات کلسیم یا بیش از 10 درصد آهک فعال وجود دارد، کلروز آهن به شدت در گیاهان حساس ظاهر می‌شود. این ترکیب می‌تواند از طریق اتصال به آهن، قابلیت جذب آن را برای گیاهان

کاهش دهد. از طرف دیگر pH قلیایی این خاک‌ها با کاهش حلالیت آهن مشکلات مربوط به کمبود این عنصر را تشدید می‌نماید (پیرمادیان، 1398).

2- روش‌های آبیاری: روش‌های آبیاری نامنظم می‌توانند منجر به آب‌گرفتگی یا ایجاد شرایط خشکی در خاک شوند. خاک‌های آب‌گرفته یا ماندابی و متراکم، حاوی دی اکسید کربن بالایی هستند. این دی اکسید کربن با آهن موجود در خاک واکنش داده و بی-کربنات بیشتری ایجاد می‌کند. شرایط ماندابی بواسطه‌ی ایجاد شرایط بی‌هوازی و شرایط خشکی از طریق ممانعت از رشد ریشه و جذب عناصر غذایی، و نیز جلوگیری از فعالیت ریزجانداران موثر در انحلال و کلات نمودن آهن، منجر به تشدید کلروز آهن می‌شوند (Elkins and Fichtner, 2016).

3- کیفیت آب آبیاری: استفاده از آب‌هایی با غلظت بالای بی‌کربنات (بیش از 3 میلی‌اکی‌والان در لیتر) از طریق افزایش pH ریزوسفر قابلیت انحلال ترکیبات آهن را کاهش داده و منجر به رسوب آهن می‌شود و به این ترتیب قابلیت دسترسی این عنصر برای گیاه کاهش می‌یابد (Elkins and Fichtner, 2016).

4- انتخاب محصول: بسته به شرایط خاک، بایستی در انتخاب نوع گیاه برای کشت دقت شود. برخی از محصولات نسبت به کمبود آهن حساس‌تر هستند؛ لذا در خاک‌هایی با محدودیت منابع آهن نباید کشت شوند و یا در صورت کشت باید تمهیدات لازم برای جلوگیری از بروز مشکلات ناشی از کمبود آهن اندیشیده شود (پیرمادیان، 1398).

5- عوامل محیطی: شرایط اقلیمی، مانند دماهای بالا و بارندگی‌های کم، از طریق تاثیرگذاری بر رطوبت خاک و قابلیت دسترسی عناصر غذایی می‌توانند به کمبود آهن کمک کنند. دمای پایین ریزوسفر نیز به واسطه ایجاد اختلال در فعالیت‌های زیستی و کاهش فعالیت متابولیکی میزان جذب آهن را با محدودیت مواجه می‌نماید (Tagliavin and Rombola, 2001).

6- تهویه ضعیف و فشردگی خاک: تهویه ضعیف و فشردگی خاک از طریق کاهش فعالیت میکروبی، کاهش میزان اکسیژن، ممانعت از رشد ریشه و توسعه ریشه‌های ضعیف و کم‌عمق، کاهش قابلیت جذب عناصر غذایی، کاهش میزان جذب و نگهداشت آب در

خاک و نیز تغییر pH خاک و به‌طور کلی ایجاد اختلال در عملکرد ریشه، جذب و تغذیه آهن را در گیاهان با مشکل مواجه می‌نماید (Tagliavin and Rombola, 2001).

7- وجود مقادیر مازاد نیتروژن نیتراتی: تغذیه نیتراتی تأثیر قابل توجهی بر کارایی فیزیولوژیکی آهن در ریشه‌ها و برگ‌ها دارد. این وضعیت عمدتاً منجر به کاهش تشکیل برگ‌های جدید، محدودیت در رشد برگ و کاهش غلظت کلروفیل می‌شود. نیترات می‌تواند از طریق جابه‌جایی هم‌بر¹ با یون H^+ توسط ریشه‌های گیاهان جذب شود. شرایط لازم برای احیای نیترات به نیتريت و آمونیوم در فاز جامد خاک قبل از احیای Fe^{3+} به‌وجود می‌آید. در این راستا، الکترون‌های آزاد شده توسط گیاه به طور مستقیم توسط نیترات (و نه Fe^{3+}) جذب می‌شوند و همچنین Fe^{2+} تشکیل شده ممکن است دوباره توسط نیترات اکسید گردد.

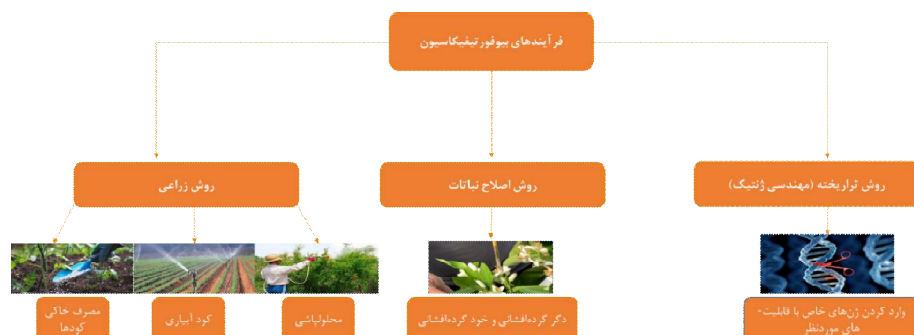
اگر احیای نیترات و نیتريت در سطح ریشه رخ دهد، pH در خارج از غشای پلاسمایی افزایش‌یافته و آهن در ریشه تجمع می‌یابد. این امر منجر به کاهش میزان انتقال آهن از ریشه به برگ‌ها می‌شود. علاوه بر این، انتقال نیترات به اندام هوایی گیاهان، از طریق افزایش pH در آپوپلاست برگ‌ها، کارایی آهن در برگ‌ها را کاهش می‌دهد (Kosegarten et al., 1998).

8- باردهی زیاد در سال قبل: باردهی بالا در فصل رشد قبل می‌تواند منجر به تخلیه ذخایر کربن، که در توسعه ریشه در سال آتی نقش بسزایی دارد، شود. این پدیده ممکن است توانایی گیاه برای تشکیل ریشه‌های قوی با قابلیت بالای جذب آهن را کاهش دهد (Tagliavin and Rombola, 2001).

9- سطح پایین ماده آلی: مقدار مطلوب ماده آلی در خاک‌ها 5 الی 6 درصد می‌باشد. این درحالی است که در خاک‌های کشور ما میزان ماده آلی اغلب کمتر از 1 درصد می‌باشد. باتوجه‌به اهمیت و نقش بسزایی مواد آلی در قابلیت استفاده آهن در خاک، که پیش‌تر به آن اشاره شد، وجود سطوح پایین این مواد منجر به تشدید پدیده کلروز آهن در گیاهان می‌شود (پیرمردیان، 1398).

14-2- جدیدترین روش‌های مدیریت کمبود عناصر کم‌مصرف در گیاهان

برای مدیریت کمبود عناصر کم‌مصرف و حفظ تعادل بین عناصر ضروری، گیاهان سعی می‌کنند خودشان را با شرایط وفق دهند. با این حال، در زمان کمبود شدید این عناصر، گیاهان نمی‌توانند به‌تنهایی با این شرایط وفق یابند؛ در این حالت، راهکارهای دیگری برای مقابله با وضعیت به کار گرفته می‌شود. در این راستا، غنی‌سازی یا تقویت زیستی¹ یکی از فرایندهایی است که می‌توان برای افزایش قابلیت دسترسی زیستی و انحلال عناصر غذایی ضروری به روش‌های مختلف اعمال نمود (Yadav et al., 2020). از دیدگاه اقتصادی، غنی‌سازی زیستی به‌عنوان یک سرمایه‌گذاری یک‌بارمصرف محسوب می‌شود؛ زیرا رویکردی مقرون‌به‌صرفه، بلندمدت و پایدار برای مدیریت گرسنگی پنهان ارائه می‌دهد. سه روش اصلی برای مدیریت کمبود عناصر کم‌مصرف از جمله آهن در گیاهان وجود دارد: روش زراعی²، روش اصلاح نباتات³ و روش تراریخته⁴ (شکل 12).



شکل 12- روش‌های مختلف غنی‌سازی زیستی (Yadav et al., 2020)

14-2-1- روش زراعی

روش زراعی شامل استفاده از کودها می‌باشد که بدون تغییر در ساختار ژنتیکی گیاهان به افزایش ارزش غذایی آن‌ها کمک می‌کند (Almendros et al., 2015). این تکنیک قادر

1- Biofortification

2- Agronomic approach

3- Plant breeding method

4- Transgenic method

به تأمین غلظت‌های مؤثر عناصر کم‌مصرف در گیاهان خوراکی است و یکی از بهترین و مؤثرترین رویکردها به شمار می‌رود (de Valenca *et al.*, 2017). کمبود عناصر کم‌مصرف در خاک، به‌صورت ترکیب نامناسب عناصر در محصولات بازتاب می‌یابد. این مشکل با کشت غلات در زمین‌هایی که ممکن است از لحاظ عناصر غذایی کمبود داشته باشند، تشدید می‌شود. عموماً در مناطقی که محصولات در خاک‌های فقیر کاشته می‌شوند، کمبود عناصر غذایی در انسان‌ها نیز مشاهده می‌شود (Bilski *et al.*, 2012). استفاده از روش‌های جدید کشاورزی برای بهبود تولید غذاهای سرشار از عناصر کم‌مصرف یکی از حوزه‌های اصلی پژوهش و از جمله راهکارهای مؤثر برای تأمین عناصر غذایی در محصولات است (Pandey *et al.*, 2016). به نظر می‌رسد که غنی‌سازی زیستی زراعی غلات، راه‌حلی سریع و ساده برای مدیریت کمبود عناصر مهم در خاک‌ها و گیاهان باشد. در این رویکرد، باید توجه داشت که کوددهی بیش از حد می‌تواند برای گیاهان سمی باشد. پتانسیل فورتیفیکاسیون زراعی به‌شدت با فراهمی زیستی عناصر کم‌مصرف در سه مرحله ارتباط دارد: از خاک به گیاهان، از ریشه‌های گیاه به قسمت‌های قابل خوردن و از قسمت‌های قابل خوردن به انسان‌ها. غنی‌سازی زیستی زراعی تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های گیاه و وضعیت تغذیه‌ای آن دارد. استفاده از کودهای عناصر کم‌مصرف در ترکیب با کودهای NPK و کودهای ارگانیک، می‌تواند به بهبود واریته‌های زراعی و به‌ویژه برجسته‌سازی اهمیت مدیریت یکپارچه حاصلخیزی خاک کمک نماید.

غنی‌سازی زیستی از طریق روش‌های کشاورزی، شامل افزودن مستقیم عناصر غذایی به خاک و آب است که بر وضعیت سلامت محصولات تأثیر می‌گذارد و غذای باکیفیتی را برای انسان‌ها فراهم می‌کند. غنی‌سازی زیستی زراعی یک تکنیک آسان و مقرون‌به‌صرفه است، اما نیاز به آگاهی بیشتر و مطالعات دقیق‌تری دارد تا در مورد انواع کودها، روش‌های کاربرد و تأثیر آن‌ها بر سایر اجزای محیط‌زیست درک بهتری حاصل شود.

14-2-1-1- کاربرد کود در خاک و آب آبیاری

ساده‌ترین راه برای افزایش غلظت عناصر غذایی در محصولات، افزایش فراهمی آن‌ها از طریق مصرف انواع مختلفی از کودها است، به‌طوری که گیاهان بتوانند عناصر را به طور

مؤثرتری از خاک جذب نمایند (Almendros *et al.*, 2015). نوع منبع عناصر غذایی و ویژگی‌های خاک تأثیر زیادی بر غنی‌سازی زیستی زراعی دارند و از این طریق بر ویژگی‌های کیفی و کمی محصولات غذایی تأثیر می‌گذارند. خاک‌ها بر اساس عوامل مختلفی از جمله pH، ظرفیت نگهداری آب، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، سطح ویژه و چگالی بار سطحی؛ در ترکیب معدنی و قابلیت دسترسی گیاه به عناصر غذایی با یکدیگر متفاوت هستند (Pinto and Ferreira, 2015). بر اساس ویژگی‌های جذب و واجذب خاک‌ها¹، کاربرد کودها منجر به افزایش غلظت عناصر در قسمت‌های مختلف گیاه می‌شود (Dai *et al.*, 2009). ترکیب کودها نقش مهمی در تأمین عناصر غذایی ایفا می‌کند و بر همکنش بین آن‌ها می‌تواند تأثیرات مثبت، خنثی یا حتی منفی بر عملکرد و کارایی مصرف عناصر² داشته باشد (Saha *et al.*, 2015).

14-2-1-2- کودهای معدنی و آلی

با افزایش انتظارات از تولیدات کشاورزی، اهمیت کوددهی عناصر کم‌مصرف به طور چشمگیری افزایش یافته است. عناصر غذایی خاک، به‌ویژه عناصر کم‌مصرف، برای تأمین نیازهای فزاینده گیاهان ناکافی هستند؛ لذا بر هر دو جنبه عملکرد و کیفیت محصولات تأثیر می‌گذارند. معمولاً کوددهی استاندارد مبتنی بر NPK باید با عناصر کم‌مصرف تلفیق شود. چندین شکل معدنی از عناصر کم‌مصرف وجود دارد که برای حمایت از رشد گیاهان همراه با کودهای NPK استفاده می‌شود (جدول 8) (Jones and Jacobsen, 2009). در عمل غنی‌سازی زیستی زراعی، رایج‌ترین روش برای افزایش سطح عناصر غذایی در خاک‌های زراعی، افزودن کودها به‌صورت نمک‌های معدنی است. این روش بر اساس نوع عناصر کم‌مصرف افزوده شده و خواص شیمیایی خاک کوددهی شده نتایج خوبی به همراه دارد. سولفات روی ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) و سولفات مس ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) از جمله کودهای آزمایش شده هستند. مطالعات نشان داده‌اند که مصرف کودهای معدنی پس از کاشت بذر، عملکرد بهتری نسبت به کوددهی خاک قبل از کاشت در پی دارد (Smoleń and Sady, 2012). رویکرد جالب دیگر برای غنی‌سازی زیستی، استفاده از نمک‌های معدنی برای به‌دست‌آوردن

1- Adsorption-Desorption

2- Nutrient use efficiency

یک فرمولاسیون جدید است، مانند پیت‌ماس غنی‌شده با سلیوم، اگرچه سلیوم (Se) برای گیاهان ضروری نیست، اما مقادیر معینی از آن برای فعالیتهای متابولیکی انسان و حیوانات اهمیت دارد. پیت‌ماس از طریق اختلاط کامل آن با محلول سدیم سلیت غنی شده و سپس در مرحله پیش از کاشت مصرف می‌شود (Businelli et al., 2015).

جدول 8- اشکال معدنی عناصر غذایی مصرف شده همراه با کودهای NPK در خاک

نوع عنصر	نمک	فرمول شیمیایی
آهن	سولفات فرس	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	سولفات روی	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
روی	کلات	ZnEDTA
	اکسید روی	ZnO
مس	سولفات مس	CuSO_4
منگنز	سولفات منگنز	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
کلر	کلرید پتاسیم	KCl

کودهای آلی نیز منبع عناصر کم‌مصرف برای گیاهان هستند. در گذشته، در مراحل اولیه کشاورزی مشاهده شد که با افزودن کود حیوانی یا بقایای گیاهی به خاک، عملکرد محصولات افزایش می‌یابد. یک مطالعه جدید نشان می‌دهد که کشاورزان نئولیتیک، در زمانی که نخستین توسعه‌های کشاورزی ظاهر شد، از کود دامی برای افزایش عملکرد محصولات استفاده می‌کردند (Bogaard et al., 2013). این روش با افزودن منظم مواد آلی (از منابع مختلف) ادامه دارد که عمدتاً در سیستم‌های کشاورزی ارگانیک و یکپارچه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kizos et al., 2010). کودهای آلی موادی هستند که ماده اصلی آن‌ها ماده آلی است. این کودها به طور سنتی از فضولات حیوانی (مانند کود دام، لجن، و فضولات طیور) و مواد گیاهی (کاه و کود سبز) به دست می‌آیند. کودهای آلی طبیعی شامل پیت‌ماس، جلبک‌های دریایی و گوانو (فضولات انباشته شده پرندگان دریایی

و خفاش‌ها) هستند. گوانو¹ به دلیل مقادیر بسیار بالا از عناصر غذایی، یک کود مؤثر نیز به شمار می‌آید (Hazra, 2016). به‌تازگی، زباله‌های شهری و صنعتی به‌عنوان منابع تجدیدپذیر آلی برای بهبود وضعیت تغذیه گیاهان در نظر گرفته می‌شوند. مهم‌ترین مواد آلی که در کشورهای صنعتی انباشته می‌شوند، لجن فاضلاب²، کمپوست بیولوژیکی³ و محصولات جانبی از صنعت غذا و مواد غذایی هستند که چندین ماده مغذی را تأمین می‌کنند (جدول 9). زباله‌های صنایع غذایی و کالاهای لوکس نیز می‌توانند به‌عنوان زباله‌های آلی در مزارع کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند. این زباله‌های آلی به‌عنوان منبع ثانویه مهمی از عناصر کم‌مصرف عمل کرده و در دسترس بودن آن‌ها به ریز جانداران خاک بستگی دارد (Jones and Jacobsen, 2009).

خون به‌عنوان مهم‌ترین فرآورده جانبی تولید شده در کشتارگاه‌ها، در فرایند رندرینگ با اعمال فشار و دمای زیاد به پودر خون تبدیل شده و در تغذیه دام و یا به‌عنوان کود آلی استفاده می‌شود (قربان‌زاده و همکاران، 1387؛ Rombola and Tagliavin, 2006). پودر خون یک منبع آلی آهن است که حاوی 20 تا 30 گرم Fe^{2+} در هر کیلوگرم می‌باشد. آهن موجود در آن توسط گروه هم موجود در هموگلوبین کلاته شده است. اثربخشی پودر خون در مطالعات مختلف گزارش شده است (Rombola and Tagliavin, 2006; Tagliavin et al., 2000; Tagliavin and Rombola, 2001). بر اساس تحقیقاتی که انجام شده، انتقال آهن از هموگلوبین به سلول‌های ریشه از مکانیزمی مشابه با جذب آهن در سلول‌های جانوری پیروی می‌کند. آزمایش‌های میدانی نشان داده‌اند که کاربرد 70 گرم پودر خون به‌ازای هر درخت، علائم کلروز آهن در درختان گلابی را کاهش می‌دهد (Rombola and Tagliavin, 2006). کاربرد پودر خون در سطحی معادل با کود سکوسترین آهن قبل از کاشت گیاه نیز بر غلظت آهن در اندام هوایی گیاه و وزن خشک اندام هوایی آن تأثیر مثبت دارد. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که پودر خون به‌تنهایی و یا به‌عنوان مکمل همراه با سایر کودهای شیمیایی و کلات‌های آهن به کار رود تا هم نقش مکمل در برآورده کردن نیاز گیاه به آهن و نیتروژن داشته باشد و هم به‌عنوان ماده آلی

1-Guano

2- Sewage sludge

3- Bio-compost

موجب بهبود شرایط خاک شود و در کنار کاهش هزینه‌ها، عواقب سوء ناشی از کاربرد کودهای شیمیایی را نیز تقلیل نماید (قربان‌زاده و همکاران، 1387).

جدول 9- مقدار عناصر کم‌مصرف موجود در کودهای آلی

انواع کودهای آلی	آهن (mg/kg)	مس (mg/kg)	منگنز (mg/kg)	روی (mg/kg)	منابع
لجن فاضلاب	2275-3322	7-11	100-287	68-177	Tennakoon and Bandrara, 2003
کود سبز (آکاسیا)	870-994	7-9	72-98	54-610	Tennakoon and Bandrara, 2003
کود گاوی	1075	880	247	44	Uyanoz, 2007
کود خوکی	1416	502	367	563	Li et al., 2009
کاه و کلش برنج	225	3/73	467	49/6	Li et al., 2009
کمپوست کود گوسفندی	1248/9	4	45/6	68/9	Wang et al., 2016

14-2-1-3- کودهای زیستی

استفاده از کودهای زیستی یکی از روش‌های غنی‌سازی زیستی زراعی در راستای افزایش محتوای عناصر غذایی در گیاهان است (Almendros et al., 2015). کودهای زیستی به گروه‌های متنوعی از میکروب‌های خاکزی، مانند قارچ‌های اندوفیت ریشه، قارچ‌های میکوریزا، باکتری‌های محرک رشد گیاه و ریزوبیوم‌هایی که از طریق سازوکارهای مستقیم و گیاه محور منجر به افزایش میزان انحلال و تحرک عناصر می‌شوند و تأثیرات مثبتی بر عملکرد و بقای گیاهان دارند؛ تقسیم می‌شوند. این میکروارگانیسم‌ها به تثبیت نیتروژن و انحلال مواد معدنی نامحلول کمک کرده و هورمون‌های گیاهی تولید می‌کنند و از گیاهان در برابر پاتوژن‌ها محافظت می‌نمایند (Olivares et al., 2015). میکروارگانیسم‌ها می‌توانند به‌عنوان جایگزینی برای انواع کودهای شیمیایی عمل کنند و تغذیه و سلامت گیاهان را بهبود بخشند. معمولاً، کودهای زیستی حاوی بستر واحدی از ریز جانداران مفید نبوده و همواره دارای ترکیبی از ریز جانداران مختلف می‌باشند. خاک، به‌خصوص ناحیه ریزوسفری، حاوی برخی گونه‌های باکتریایی است که رشد گیاهان را تقویت می‌نمایند و

به‌عنوان باکتری‌های محرک رشد گیاه¹ (PGPR؛ شامل گونه‌های ریزوبیا و فرانکیا) شناخته می‌شوند. PGPRها می‌توانند دستیابی به منابع را تسهیل کرده و سطوح هورمون‌های گیاهی را تنظیم نمایند. با این وجود توانایی سوبیه‌های مختلف PGPRها در تثبیت یا انحلال عناصر غذایی در ناحیه ریزوسفری برای بهبود رشد و عملکرد گیاهان متفاوت است (Amaya-Gómez et al., 2020). این میکروارگانیسم‌ها قادرند در برابر عوامل پاتوژنی مختلف نیز در گیاهان مقاومت ایجاد کنند. مطالعات حاکی از آن است که مصرف سوبیه‌های باکتریایی مختلف از جمله *Bacillus sp.*، *Providencia sp.*، *Pseudomonas putida* MPJ6، *Pantoea dispersa* MPJ9، *Brevundimonas sp.*، *Enterobacter ludwigii*، *Acinetobacter tandoii* و *Enterobacter* sp. همراه با کودهای NPK، منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار آهن، مس، روی و منگنز در گیاهان مختلف می‌شود (Rana et al., 2012; Gopalakrishnan et al., 2016; Ghosh et al., 2019).

کارایی استفاده از کودهای عناصر کم‌مصرف در غنی‌سازی زیستی گیاهان نه تنها تحت تأثیر نوع کود قرار دارد بلکه از روش کاربرد کود نیز تأثیر می‌پذیرد. در گیاهان زراعی، عناصر کم‌مصرف ممکن است به صورت محلول‌پاشی برگ، تلقیح بذر، یا از طریق کود-آبیاری به خاک اضافه شوند. انتخاب روش کاربرد؛ به نیاز گیاه به عنصر غذایی خاص و شکل کودها بستگی دارد. محلول‌پاشی برخی از عناصر غذایی نظیر آهن و منگنز باعث بهبود رشد گیاهان می‌شود. کودهای آلی به طور یکنواخت در مزرعه پخش شده و چند روز قبل از کاشت با خاک مخلوط می‌شوند. نمک‌های عناصر کم‌مصرف می‌توانند به صورت مواد دانه‌ای یا مواد حل شده در کودهای مایع بکار برده شوند (Yadav et al. 2020).

یکی دیگر از روش‌های مصرف کود، کود-آبیاری می‌باشد (در بخش‌های قبل به شکل کامل تشریح شده است). در این روش، کود همراه با آب آبیاری از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای اعمال می‌شود (Bell and Dell, 2008). در این فرایند، محلول کودی به طور یکنواخت با آب آبیاری توزیع می‌شود. با این روش، قابلیت دسترسی عناصر غذایی به‌ویژه در ناحیه ریزوسفر افزایش می‌یابد. در طول این فرایند، فقط از کودهای مایع و کودهای محلول در آب استفاده می‌شود. کود-آبیاری به طور گسترده‌ای در کشاورزی تجاری و

1- Plant growth-promoting rhizobacteria

باغبانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای افزودن عناصر غذایی اضافی یا مدیریت کمبودهای عناصر شناسایی شده در بافت گیاه به کار می‌رود. معمولاً این روش در محصولات باارزش بالا مانند سبزی‌ها، درختان میوه و غلات باهدف غنی‌سازی زیستی استفاده می‌شود. کودهای مورد استفاده در کود-آبیاری باید دارای قابلیت انحلال بالایی در آب باشند، مانند مونوآمونیم فسفات (نیترژن و فسفر)، کودهای مرکب (نیترژن، فسفر و پتاسیم)، و سولفات پتاسیم (پتاسیم و گوگرد). برخی از عناصر غذایی مورد استفاده در کود-آبیاری عبارتند از:

- نیترات آمونیوم
- سولفات آمونیوم
- اوره
- فسفات مونوپتاسیم
- سولفات پتاسیم
- نیترات پتاسیم
- کلرید پتاسیم
- فسفات دی‌آمونیم

از طریق کود-آبیاری، آب و کود به طور یکنواخت برای گیاهان عرضه می‌شود، بنابراین احتمال افزایش عملکرد 25 تا 50 درصد بیشتر می‌شود. این روش مقدار کودهای مصرف شده و زمان، نیروی کار و انرژی مورد استفاده را نیز کاهش می‌دهد. باتوجه به اینکه در این روش عناصر غذایی از طریق آبیاری قطره‌ای اعمال می‌شوند؛ لذا فرسایش خاک در این فرایند کاهش می‌یابد (Khalid et al., 2015).

14-2-1-4- تقویت زراعی از طریق محلول‌پاشی

علاوه بر افزودن عناصر غذایی به خاک به‌عنوان کود، برخی از مواد معدنی می‌توانند بر روی برگ‌ها اسپری شوند و این فرایند به نام محلول‌پاشی برگی شناخته می‌شود (در بخش‌های قبل به شکل کامل تشریح شده است). به دلیل افزایش جذب و توزیع عناصر غذایی در

بخش‌های مختلف گیاه؛ محلول‌پاشی نسبت به کوددهی خاک مفیدتر است. مزایای دیگر محلول‌پاشی برگ‌ی شامل سهولت توزیع یکنواخت و پاسخ سریع گیاه به عناصر غذایی مصرف شده است؛ به این ترتیب، می‌توان کمبودها را به آسانی مدیریت نمود. تغذیه برگ‌ی با عملکرد بالاتر و کیفیت بهتر میوه‌ها همراه است. کارایی جذب عناصر غذایی در هنگام محلول‌پاشی برگ‌ی، 8 تا 9 برابر بیشتر از کاربرد خاکی است (de Valenca *et al.*, 2017).

محلول‌پاشی برگ‌ی توانایی بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی مورد نیاز گیاه برای دستیابی به حداکثر رشد و عملکرد را دارد. مزیت اصلی کوددهی برگ‌ی، جذب سریع عناصر غذایی اعمال شده است. مهم‌ترین کاربرد محلول‌پاشی برگ‌ی این است که تنها مقدار محدودی از عناصر کم‌مصرف و پرمصرف به کار برده می‌شود که هیچ‌گونه سمیتی در گیاه ایجاد نمی‌کند (Oosterhuis and Weir, 2010).

این روش همچنین عناصر غذایی نظیر آهن را که از طریق جذب ریشه برای گیاهان در دسترس نیستند، فراهم می‌نماید. محلول‌پاشی زمانی توصیه می‌شود که شرایط محیطی از جمله تغییرات pH، رطوبت و عدم تعادل عناصر غذایی در خاک جذب آن‌ها را توسط ریشه‌ها محدود کند. در pH بالای خاک، دسترسی به عناصر غذایی کاهش می‌یابد؛ لذا در چنین شرایطی، بهترین روش برای عرضه عناصر به گیاه، محلول‌پاشی برگ‌ی است (Adams, 1984).

14-2-2- فناوری اصلاح نباتات

گیاهان تقویت شده می‌توانند از طریق روش‌های اصلاح نباتات توسعه یابند، اما این امکان تنها زمانی وجود دارد که تنوع ژنتیکی کافی در جمعیت‌های گیاهی برای صفات مورد نظر وجود داشته باشد. اصلاح نباتات به روش سنتی، از طریق روش‌های دگر گرده‌افشانی و خود گرده‌افشانی نقش مهمی در بهبود بهره‌وری کشاورزی ایفا می‌کند. در روش سنتی اصلاح نباتات، برای تولید صفات زراعی مطلوب، گیاهان والد غنی از عناصر غذایی طی چند نسل با گیاهان پذیرنده تلاقی داده می‌شوند (Garg *et al.*, 2018).

مهم‌ترین و سیستماتیک‌ترین برنامه غنی‌سازی زیستی از طریق اصلاح نباتات، "Harvest Plus" است. هدف اصلی این برنامه، توسعه و بهبود تولید محصولات غذایی

تقویت شده‌ای است که به بهبود سلامت عمومی کمک می‌کند. این برنامه به طور بنیادی سطح سه عنصر غذایی (آهن، روی و پرو ویتامین A) را در هفت محصول اصلی (لوبیا، کاساوا، ذرت، برنج، گندم، سیبزمینی شیرین و ارزن) افزایش داده است (Nestel et al., 2006). برنامه Harvest Plus عمدتاً با کمک‌های بنیادها، دولت‌ها و نهادهای بین‌المللی تأمین مالی شده است و در سال 2003 به‌وسیله گروه مشورتی تحقیقات کشاورزی بین‌المللی (CGIAR) آغاز شده است. چشم‌انداز اصلی این برنامه، ارائه غذای مغذی‌تر برای 1 میلیارد نفر تا سال 2030 است.

نرخ موفقیت تکنیک‌های اصلاح نباتات برای تولید محصولات تقویت شده به پذیرش آن‌ها توسط کشاورزان و همچنین نرخ جذب عناصر غذایی در مصرف‌کنندگان بستگی دارد. تنها واریته‌های غذایی اصلی که بذرهایی غنی از عناصر کم‌مصرف دارند، برای اصلاح نباتات قابل قبول هستند. واریته‌های کارآمد از نظر عناصر کم‌مصرف که از طریق اصلاح نباتات توسعه یافته‌اند، می‌توانند در خاک‌های دچار کمبود معدنی تا عمق بیشتری رشد کنند. ریشه‌های واریته‌های جدید به طور مؤثرتری می‌توانند مواد معدنی خارجی را جابه‌جا کرده و از رطوبت و عناصر غذایی موجود در لایه‌های زیرین خاک استفاده کنند. این امر باعث کاهش میزان مصرف کود و آبیاری می‌شود. جذب کارآمد مواد معدنی از خاک و انتقال آن‌ها به دانه‌ها منجر به بالاترین عملکرد می‌شود؛ بنابراین، کشاورزان به راحتی می‌توانند واریته‌های جدید با بذرهایی غنی از مواد معدنی و عملکرد بالاتر را بپذیرند (Bouis, 2003). برخی مطالعات انجام شده‌اند که در آن‌ها غلظت‌های آهن در انواع مختلف گیاهان تخمین زده شده است تا بهترین واریته با بالاترین غلظت آهن برای برنامه‌های اصلاح نباتات شناسایی شود (Garg et al., 2018; Jha and Warkentin, 2020). در کنار غلات و لگوها، برخی از واریته‌های سبزی‌های که منبع اصلی آنتی‌اکسیدان‌ها در رژیم غذایی انسان هستند، نیز توسعه یافته‌اند. برخی از انواع سیبزمینی با جمع‌آوری 1000 ژنوتیپ که دارای آنتی‌اکسیدان‌ها و غلظت‌های بالاتری از مس، آهن، منگنز و روی هستند، به دست آمده‌اند (Andre et al., 2007). از طریق فناوری اصلاح نباتات، می‌توان محصولات غنی شده با عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن بالا تولید کرد که قطعاً وضعیت سلامت و اقتصادی جمعیت جهان را بهبود خواهد بخشید (جدول 10) (Garg et al., 2018).

جدول 10- تقویت گیاهان از طریق اصلاح نباتات

منابع	کشور/لواریته	عناصر غذایی	گیاهان
CIAT, HarvestPlus; Garg <i>et al.</i> , 2018	BRRIdhan 62, BRRIdhan 72, BRRIdhan	بنگلادش؛ 64	برنج
Maziya-Dixon <i>et al.</i> , 2000	Cassava clones	آهن	کاساوا
Haynes <i>et al.</i> , 2012	BTD0054, BTD0118	روی، آهن، مس، منگنز	سیب‌زمینی
Chatrath <i>et al.</i> , 2018	WB2	هندوستان؛ آهن	گندم
Chapke <i>et al.</i> , 2016	ICSR 14001, ICSH 14002, ICSA 661×ICSA 196, ICSA 318×ICSR 94, ICSA 336×IS 3760	آهن	سورگوم
Yadav <i>et al.</i> , 2020	12KNICSV(Deko)-188, 12KNICSV-22 (Zabuwa)	نیجریه؛ آهن	
Singh <i>et al.</i> , 2017	Pant Lobia-1, Pant Lobia-2, Pant Lobia-3, Pant Lobia-4	هندوستان؛ آهن	لوبیاچشم‌بلبلی
Jha and Warkentin, 2020	RWR 2245, RWR 2154, MAC 42, MAC 44, CAB 2, RWV1129, RWV 3006, RWV 3316, RWV 3317, RWV 2887	رواندا؛ آهن و روی بالا	لوبیا
Govindaraj, 2019	Dnanashakti Hybrid ICMH 1201 (Shakti-1201)	هندوستان؛ آهن، روی	ارزن
	Barimasur-4, Barimasur-5, Barimasur-6, Barimasur-7, Barimasur-8	بنگلادش؛	
	ILL 7723-Khajurah-1, Khajurah-2, Shital, Sisir, Shekhar, Simal	نپال؛	
Darai <i>et al.</i> , 2020	L4704, Pusa Vaibhav	هندوستان؛ آهن، روی	عدس
	Alemaya	ایتوپی؛	
	Idlib-2, Idlib-3	سوریه؛	

14-2-3- روش تراریخته

استفاده از بیوتکنولوژی در توسعه محصولات تراریخته غنی از عناصر غذایی از 20 سال پیش آغاز شده است. مهندسی ژنتیک تکنیکی است که به ژن‌های خاص با ویژگی‌های مطلوب مربوط می‌شود. هنگامی که یک ژن با ویژگی خاص شناسایی شد، با کمک ژن‌های نشان‌گر و بواسطه‌ی وارد کردن ژن ویژه توسط ویروس غیرزنده‌ای به نام آگروباکتریوم به‌عنوان حامل، گیاه جدیدی با محتوای عناصر غذایی بهبود یافته تولید

می‌شود. مهندسی ژنتیک به ایجاد محصولات تراریخته که به‌عنوان موجودات تغییر یافته ژنتیکی (GMOs¹) نیز شناخته می‌شوند، منجر می‌شود. زمانی که در میان واریته‌های گیاهی تنوع ژنتیکی در غلظت عناصر غذایی کم است یا هیچگونه تنوعی وجود ندارد، روش تراریخته می‌تواند گزینه‌ای قابل اجرا برای توسعه محصولات غنی از عناصر غذایی باشد (Aung et al., 2013). ادغام ویژگی‌های مطلوب شامل مواردی نظیر افزایش عناصر کم‌مصرف و فراهمی زیستی آن‌ها و نیز کاهش غلظت ترکیباتی که از طریق برقراری پیوند با عناصر قابلیت دسترسی آن‌ها را کاهش می‌دهند، می‌شود. تغییرات ژنتیکی به شکلی ویژه بر توزیع مجدد عناصر کم‌مصرف در بافت‌های گیاهی تأثیر می‌گذارد و عمدتاً غلظت آن‌ها را در بخش‌های خوراکی محصولات کلیدی افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه در میان عناصر کم‌مصرف، آهن و روی بیشتر دچار کمبود هستند؛ لذا در تحقیقات متعدد محصولات به‌صورت ژنتیکی دستکاری شده‌اند تا سطح این دو عنصر بهبود یابد. در گیاه برنج، تغییرات ژنتیکی با افزایش بیان ناقل آهن (II)-نیکوتین آمین به نام OsYSL2 انجام می‌شود تا انتقال آهن در اندوسپرم افزایش یابد (Masuda et al., 2012). مقدار آهن در برنج تراریخته در مقایسه با برنج عادی 4 برابر بیشتر بود. اسید موژنئیک به‌عنوان یک کلات‌کننده یون‌های فریک عمل می‌کند و تولید آن در محصول برنج تراریخته با بیان ژن اسید موژنئیک سنتتاز (IDS3) افزایش می‌یابد. بیان ژن IDS3 نیز با بیان ژن پروتئین ذخیره‌سازی آهن (SoyferH2) افزایش تجمع آهن در اندوسپرم بیشتر می‌شود. برنج تراریخته در خاک‌های دارای کمبود آهن مقاوم بوده و 2/5 برابر غلظت آهن بیشتری نشان می‌دهد (Trijatmiko et al., 2016).

گزارش شده است که ژن Gpc-B1 در گندم، مسئول افزایش انتقال پروتئین به دانه می‌باشد و از این طریق غلظت‌های آهن، روی و منگنز را در دانه افزایش می‌دهد (Uauy et al., 2006). وجود رابطه‌های مثبت بین محتوای پروتئین و غلظت آهن، روی و منگنز توسط محققان مختلف تأیید شده است (Ozturk et al., 2016). از طریق تغییر ژنتیکی locus Gpc-B1 از گندم تتراپلوئید وحشی *Triticum turgidum* ssp. غلظت روی، آهن، منگنز و محتوای پروتئین می‌تواند در دانه‌های گندم خطوط جانشینی کروموزومی تا 10 تا

1- Genetically modified organism

34 درصد افزایش یابد (Distelfeld *et al.*, 2007). با روش تراریخته، می‌توان چندین محصول اصلی را تغییر داد و محصولات غنی شده با عناصر غذایی تولید نمود (جدول 11) (Yadav *et al.*, 2020).

جدول 11- تقویت زیستی گیاهان از طریق روش تراریخته

عناصر کم‌مصرف و محصولات زراعی	ژن‌های بیان شده	گیاهان	منابع
افزایش ذخیره آهن در دانه‌های برنج	OsGluB 1 proSoyferH 1 OsGlb 1 proSoyferH 1	<i>Oryza sativa Japonica</i> cv. Kitaake	Qu <i>et al.</i> , 2005
افزایش آهن، روی و منگنز در گندم	Gpc-B 1 locus	<i>Triticum turgidum</i> ssp. dicoccoides	Distelfeld <i>et al.</i> , 2007
افزایش جابه‌جایی آهن	35S pro- OsNAS1, 2, 3	<i>Oryza sativa Japonica</i> cv. Tsukinohikari	Johnson <i>et al.</i> , 2011
انتقال آهن	Nicotianamine synthase gene HvNAS1	<i>Oryza sativa</i>	Aung <i>et al.</i> , 2013
افزایش جذب آهن	OsYSL9	<i>Oryza sativa Japonica</i> cv. Tsukinohikari	Senoura <i>et al.</i> , 2017
تجمع مقادیر بالای آهن و روی	OsHMA7 transcript levels	<i>Oryza sativa</i>	Kappara <i>et al.</i> , 2018
افزایش غلظت آهن و روی	IRT1 (iron transporter) and FER1 (ferritin) genes	Cassava	Ghislain <i>et al.</i> , 2019

محصولات تقویت شده با عناصر غذایی به دلیل نبود آگاهی کافی درباره فواید آن‌ها برای سلامت انسان توسط کشاورزان فقیر به راحتی پذیرفته نمی‌شوند. به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه، سوءتغذیه یکی از مشکلات اجتناب‌ناپذیر به دلیل افزایش جمعیت است. به همین دلیل، غذایی که به آن‌ها ارائه می‌شود، مقادیر کافی از عناصر کم‌مصرف را ندارد که نه تنها به سلامت آن‌ها آسیب می‌زند، بلکه حساسیت آن‌ها را نسبت به بیماری‌های مختلف افزایش می‌دهد. در نتیجه، این وضعیت منجر به خسارت قابل توجهی در تولید ناخالص داخلی می‌شود و تأثیرات ویرانگری بر وضعیت اجتماعی-اقتصادی کشور دارد. برای مقابله با این وضعیت، تقویت ژنتیکی واریته‌های محصولات یکی از پایدارترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌ها است. با استفاده از روش‌های مختلف تقویت، چه از طریق کشاورزی و چه ژنتیکی، می‌توان محصولات تقویت‌شده مختلفی تولید کرد که عناصر غذایی را به طور مستقیم به

مردم عادی در شکل طبیعی خود ارائه می‌دهند. وارسته‌های محصول تقویت‌شده به‌عنوان منابع مهمی از مواد مغذی برای افراد فقیر عمل کرده و همچنین امنیت غذایی را فراهم می‌کنند. در راستای تسهیل‌پذیرش محصولات تراریخته توسط کشاورزان و مصرف‌کنندگان، وجود برنامه‌های آموزشی و آگاهی‌رسانی کارآمد ضرورت دارد. سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی نقش کلیدی در فعالیتهای ترویجی دارند. درگیری جامعه و آموزش برای غلبه بر مقاومت‌های فرهنگی و جایابی محصولات تراریخته به‌عنوان عناصر اصلی رژیم غذایی ضروری به نظر می‌رسد.

15- نتیجه‌گیری کلی

آهن به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی و کم‌مصرف در فرایندهای فیزیولوژیکی گیاهان، نقشی حیاتی در سلامت و عملکرد آن‌ها ایفا می‌کند. این عنصر به‌ویژه در فرایندهای مهمی چون فتوسنتز، تنفس و تولید انرژی در گیاهان ضروری است و به‌عنوان یک کاتالیزور در واکنش‌های بیوشیمیایی عمل می‌کند. با این حال، کمبود آهن، به‌ویژه در خاک‌های قلیایی و آهکی، به یکی از چالش‌های عمده در کشاورزی مدرن تبدیل شده است. پدیده کلروز آهن که ناشی از کمبود این عنصر در گیاهان است، نه تنها بر رشد و توسعه آن‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی را نیز کاهش می‌دهد و به تبع آن، ممکن است سلامت انسان را نیز تهدید کند.

عوامل اصلی مؤثر در کاهش قابلیت دسترسی آهن برای گیاهان شامل pH بالای خاک، وجود بی‌کربنات‌های بالا و کمبود مواد آلی است. این عوامل می‌توانند تأثیرات منفی بر روی فعالیت زیستی میکروارگانیسم‌های خاک و در نتیجه روند کلاته شدن آهن داشته باشند. به همین دلیل، لازم است که استراتژی‌های مدیریتی چندگانه‌ای برای بهبود وضعیت موجود و افزایش دسترسی گیاهان به آهن در نظر گرفته شود.

از جمله روش‌هایی که برای مدیریت کمبود آهن در گیاهان پیشنهاد شده است، استفاده از کلات‌های آهن (مانند Fe-EDDHA) به‌خصوص در خاک‌های قلیایی می‌باشد. این کلات‌ها به دلیل پایداری زیادی که در pH بالا دارند، قادر به تأمین آهن در شرایط نامناسب خاک هستند. همچنین، کشت گیاهان به همراه کود آلی به افزایش محتوای مواد

آلی در خاک و بهبود کلاته شدن آهن کمک می‌کند. این برنامه‌ها می‌توانند به‌عنوان راهکارهای مؤثری در راستای افزایش جذب آهن توسط گیاهان به کار روند.

علاوه بر این، مدیریت خاک و تنظیم pH از طریق استفاده از مواد اسیدی مانند اسیدسولفوریک یا گوگرد عنصری، به بهبود شرایط برای جذب آهن کمک می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که اجرای تکنیک‌هایی نظیر چال کود، کودآبیاری و محلول‌پاشی می‌توانند در رفع سریع و مؤثر مشکلات ناشی از کلروز آهن به گیاهان یاری رسانند. این روش‌ها همچنین می‌توانند به‌عنوان رویکردهای قابل‌اعتمادی در کشاورزی پایدار در نظر گرفته شوند.

در گزارش‌های اخیر، تحقیق و توسعه در زمینه نانو کودها به‌عنوان یک راهکار نوین برای بهبود جذب و کارایی مصرف آهن در گیاهان نیز موردتوجه قرار گرفته است. به‌کارگیری نانو کودهای آهن به دلیل سطح بالا و اندازه کوچک، کارایی جذب آهن را به نحو چشمگیری افزایش می‌دهد و می‌تواند جزء کلیدی در بهینه‌سازی فرایندهای کشاورزی باشد. همچنین، تعامل نانو کودها با میکروفلور خاک که نقشی کلیدی در جذب مواد مغذی دارد، می‌تواند زمینه‌ساز تأثیرات مثبت دیگری نیز باشد.

اصلاح نباتات و توسعه واریته‌های مقاوم به کمبود آهن از طریق مهندسی ژنتیک نیز از دیگر استراتژی‌های مؤثر در این زمینه به‌حساب می‌آید. این روش‌ها می‌توانند به بهبود جذب و انتقال آهن توسط گیاهان کمک کنند. بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از محصولات تراریخته با ژن‌هایی که موجب بهبود وضعیت جذب آهن می‌شوند، نه تنها بر میزان توانایی گیاه در جذب این عنصر تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند به افزایش تولید پایدار نیز منجر شود.

بااین‌حال، برای رسیدن به نتایج مطلوب در این زمینه، لازم است که یک رویکرد جامع و همگرا در مدیریت کمبود آهن اتخاذ گردد. یکپارچه‌سازی روش‌های زراعی پایدار با اصلاحات ژنتیکی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند نانو کودها، می‌تواند به کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و بهبود کیفیت خاک و عملکرد گیاهان کمک کند. به‌علاوه، افزایش آگاهی و آموزش کشاورزان در خصوص مزایای استفاده از این فناوری‌ها و روش‌ها می‌تواند فرایندپذیرش اجتماعی این تکنیک‌ها را تسهیل کند.

در نهایت، مواجهه با چالش‌های کمبود آهن نیازمند یک استراتژی جامع است که شامل بهینه‌سازی منابع خاک، اتخاذ رویه‌های زراعی پایدار و پاسخ به تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت باشد. اجرای چنین رویکردی می‌تواند به حفظ و بهبود سلامت خاک‌ها و گیاهان، ارتقا امنیت غذایی و در راستای بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها کمک کند.

منابع

- اسدی کنگرشاهی، ع. بصیرت، م. اخلاقی، ن. حقیقت‌نیا، ح. شیخ اشکوری، ع.ر. سلیم‌پور، س. صباح، آ. شهبان، م. صالح، ج. قاسمی، ا. رجالی، ف. 1396. مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه در درختان مرکبات شمال و جنوب کشور. انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب. 97 ص.
- اکبری، م. 1398. مبانی علمی و کاربردی کوددهی برگساره‌ای گیاهان زراعی و باغی. انتشارات تحقیقات آموزش کشاورزی. 246 ص.
- برقی، ع. قلیپوری، ع. توبه، ا. جهانبخش، س. جماعتی، ش. 1393. بررسی اثر محلول‌پاشی نانواکسید آهن بر جذب عناصر غذایی در غده سیب‌زمینی. مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی. جلد 16، 1-12.
- برمکی، س. مدرس ثانوی، م. مهدی زاده، و. 1389. کاربرد فناوری نانو در راستای مصرف بهینه کودهای شیمیایی با تأکید بر نانو کودها. اولین کنگره چالش‌های کودی. تهران.
- پیرمردیان، م. 1398. نقش پایه و رقم در بروز کلروز آهن ناشی از آهک در درختان میوه مناطق معتدله. انتشارات مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری. 38 ص.
- پیوندی، م. پرنده، ه. میرزا، و. 1390. مقایسه تأثیر نانو کلات آهن با کلات آهن بر پارامترهای رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان ریحان *Ocimum Basilicum*. مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی-مولکولی. جلد 1، 89-98.
- تهرانی، م.م. بلالی، م.ر. مشیری، ف. دریاشناس، ا.ح. 1391. توصیه و برآورد کود در ایران: چالش‌ها و راهکارها. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). جلد 26، 123-144.
- خرمی، م. رحمانیان، ش. 1399. اصول تغذیه و محاسبات در گلخانه. انتشارات تحقیقات آموزش کشاورزی. 167 ص.
- خلدبرین، ب. اسلام‌زاده، ط. 1381. تغذیه معدنی گیاهان عالی (جلد 1). انتشارات دانشگاه شیراز. 500 ص.
- رحیمی لاکه، ه. جانی نوده‌ی، س.ع. اکبرزاده، ع. مصلحت‌جو، ع. نصیری، ع. 1388. بررسی عملکرد درختان زیتون (*Olea europaea* L.) تحت کشت خاک‌های آهکی در بکارگیری

- عناصر کم‌مصرف و پرمصرف در روش چالکود، مطالعه موردی باغات زیتون شهرستان رودبار (استان گیلان). یازدهمین کنگره ملی علوم خاک ایران. گرگان.
- رسولی صدقیانی، م.ح. مرادی، ص. مرادی، ن. سپهر، ا. 1401. راهنمای تغذیه گیاه و حاصلخیزی خاک. انتشارات دانشگاه ارومیه، 375 ص.
- رنجبر مالی‌دره، ط. باباپور، م. عسگری سرچشمه، م.ع. نصیری، ا. 1395. اثرات تغذیه آهن در گیاهان. همایش ملی یافته‌های پژوهش و فناوری در اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی. دانشگاه تهران.
- ریاحی‌نیا، ش. دانایی‌پور، ز. 1399. بررسی تأثیر تیمار نانو کود آهن و کلات آهن در دو مرحله زیستی گیاه سالیکورنیا تحت تنش شوری. مجله پژوهش‌های گیاهی (علمی). جلد 35، 174-188.
- رئیزی، ف. شهابی، ع. 1380. رفع کلروز آهن و کمبود روی به روش تزریق عناصر غذایی با پایین به تنه درختان پسته. هفتمین کنگره ملی علوم خاک. 567-569.
- شهبان، م. رستگار، ح. سمیر، س.م. 1385. تأثیر منابع مختلف کود آهن بر عملکرد کمی و کیفی میوه درختان پرتقال. مجله علوم خاک و آب. جلد 20، شماره 1. 11-15.
- عسگری، م. امیرجانی، م.ر. صابری، ط. 1393. بررسی اثرات نانو کود آهن بر رشد برگ، مقدار کربوهیدرات و آنتی‌اکسیدان‌های پرپوش *Catharanthus roseus*. فرایند و کارکرد گیاهی. جلد 3، 43-56.
- فتحی، ع.ر. زاهدی، م. 1393. تأثیر محلول‌پاشی نانو ذرات اکسید آهن و روی بر رشد و محتوای یونی دو رقم گندم تحت تنش شوری. مجله تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی. جلد 4، 295-304.
- قربان‌زاده، ن. حق‌نیا، غ.ج. لکزیان، ا. فتوت، ا. 1387. فراهمی نیتروژن و آهن از خاک غنی شده با پودر خون و تأثیر آن بر رشد گیاه ذرت. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد 22، شماره 2. 175-186.
- مرادی، ب. رئیزی، ط. شاهنظری، س. 1395. اثر روش‌های مختلف کوددهی بر ویژگی‌های کمی و کیفی میوه کیفی. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). جلد 30، شماره 3، 237-248.

مشیری، ف.، طهرانی، م.م.، شهابی، ع.ا.، کشاورز، پ.، خوگر، ز.، فیضی اصل، و.، اسدی رحمانی، ه.، سماوات، س.، سدري، م.ح.، رشیدی، ن.، سعادت، س.، خادمی، ز.، 1393. دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گندم. انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب. 88 ص.

مقدم، ح.، دشتکی، م.، محمدی، م.، 1391. بررسی اثر فسفر، آهن و روی بر خصوصیات کمی و کیفی شلغم علوفه‌ای. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. دوره 43، شماره 4. 689-681.

مقصودی، م.ر.، نجفی، ن.ا.، 1395. بررسی تأثیر کاربرد نانوکودهای عناصر غذایی کم‌مصرف در تغذیه گیاهان. مدیریت اراضی. جلد 4، شماره 115-132.

موسیوند، م.، خورگامی، ع.، رفیعی، م.، 1388. بررسی تأثیر غلظت آهن، بر رشد و اجزا عملکرد در ژنوتیپ‌های مختلف سویا. فصلنامه علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی. جلد 4، 35-45.

مهربان، پ.، عبدالزاده، ا.، 1390. اثرات سمیت آهن بر رشد چهار رقم برنج ایرانی با تأکید بر برخی جنبه‌های بیوشیمیایی در متحمل‌ترین رقم. مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی. جلد 4، شماره 3، 103-120.

نیکبخت، ع.، شیخان، ا.، اخبارفر، ق.، 1401. تأثیر منابع مختلف آهن بر بهبود رشد و وضعیت کلروز برگی چنار (*Platanus orientalis* L.) به روش تزریق تنه در فضای سبز. نشریه فرایند و کارکرد گیاهی. جلد 11، شماره 50، 213-229.

هاشمی مجد، ک.، 1392. حاصلخیزی خاک و کودها مقدمه ای بر مدیریت عناصر غذایی. انتشارات آبیژ. 392 ص.

Abadía Bayona, J., Álvarez-Fernández, A., Rombolà, A.D., Sanz Encinas, M., Tagliavini, M. and Abadía Bayona, A. 2004. Technologies for the diagnosis and remediation of Fe deficiency.

Abadía, J. 1992. Leaf responses to Fe deficiency: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 15(10):1699-1713.

Abadía, J., Álvarez-Fernández, A., Morales, F., Sanz, M. and Abadía, A. 2001. Correction of iron chlorosis by foliar sprays. In *International Symposium on Foliar Nutrition of Perennial Fruit Plants* 594: 115-121.

Adams, F. 1984. Crop response to lime in the southern United States. *Soil acidity and liming*, 12: 211-265.

Al-Bamarny, S.F., Salman, M.A. and Ibrahim, Z.R. 2010. Effect of NAA. KNO₃ and Fe on some characteristics of leaf and fruit of peach, pp.14-16.

Al-Busaidi, A.S. and Cookson, P. 2003. Salinity-pH relationships in calcareous soils. *Journal of Agricultural and Marine Sciences [JAMS]*, 8(1): 41-46.

- Ali, S., Mehmood, A. and Khan, N. 2021. Uptake, translocation, and consequences of nanomaterials on plant growth and stress adaptation. *Journal of Nanomaterials*, 2021(1): 6677616.
- Almendros, P., Obrador, A., Gonzalez, D. and Alvarez, J.M. 2015. Biofortification of zinc in onions (*Allium cepa* L.) and soil Zn status by the application of different organic Zn complexes. *Scientia Horticulturae*, 186: 254-265.
- Alva, A.K. and Obreza, T.A. 1998. By-product Iron-humate Increases. *HortScience*, 33: 1.
- Álvarez-Fernández, A., Paniagua, P., Abadía, J. and Abadía, A. 2003. Effects of Fe deficiency chlorosis on yield and fruit quality in peach (*Prunus persica* L. Batsch). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(19): 5738-5744.
- Amaya-Gómez, C.V., Porcel, M., Mesa-Garriga, L. and Gómez-Álvarez, M.I. 2020. A framework for the selection of plant growth-promoting rhizobacteria based on bacterial competence mechanisms. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(14): e00760-20.
- Andre, C.M., Ghislain, M., Bertin, P., Oufir, M., del Rosario Herrera, M., Hoffmann, L., Hausman, J.F., Larondelle, Y. and Evers, D. 2007. Andean potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) as a source of antioxidant and mineral micronutrients. *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(2): 366-378.
- Ashrafi, M.R., Raj, M., Shamim, S., Lal, K. and Kumar, G. 2020. Effect of fertigation on crop productivity and nutrient use efficiency. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(5): 2937-2942.
- Askary, M., Amirjani, M.R. and Saberi, T. 2017. Comparison of the effects of nano-iron fertilizer with iron-chelate on growth parameters and some biochemical properties of *Catharanthus roseus*. *Journal of Plant Nutrition*, 40(7): 974-982.
- Ates, B., Koytepe, S., Ulu, A., Gurses, C. and Thakur, V.K. 2020. Chemistry, structures, and advanced applications of nanocomposites from biorenewable resources. *Chemical Reviews*, 120(17): 9304-9362.
- Aung, M.S., Masuda, H., Kobayashi, T., Nakanishi, H., Yamakawa, T. and Nishizawa, N.K. 2013. Iron biofortification of Myanmar rice. *Frontiers in Plant Science*, 4: 158.
- Azim, Z., Singh, N.B., Singh, A., Amist, N., Niharika, Khare, S., Yadav, R.K., Bano, C. and Yadav, V., 2023. A review summarizing uptake, translocation and accumulation of nanoparticles within the plants: current status and future prospectus. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 32(2): 211-224.
- Babu, S., Singh, R., Yadav, D., Rathore, S.S., Raj, R., Avasthe, R., Yadav, S.K., Das, A., Yadav, V., Yadav, B. and Shekhawat, K. 2022. Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability. *Chemosphere*, 292: 133451.
- Baldi, E., Rombola, A.D., Cesco, S., Tagliavini, M. and Pinton, R. 2004. Utilizzo di ferro complessato da molecole miche in viti ferro-carenti. In *Atti VII Giornate Scientifiche SOI*. SOI.

- Banerjee, K., Pramanik, P., Maity, A., Joshi, D.C., Wani, S.H. and Krishnan, P. 2019. Methods of using nanomaterials to plant systems and their delivery to plants (mode of entry, uptake, translocation, accumulation, biotransformation and barriers). In *Advances in phytonanotechnology*. Academic Press. pp. 123-152.
- Bavaresco, L., Frascini, P. and Perino, A. 1993. Effect of the rootstock on the occurrence of lime-induced chlorosis of potted *Vitis vinifera* L. cv. 'Pinot blanc'. *Plant and Soil*, 157: 305-311.
- Bavaresco, L., Fregoni, M. and Perino, A. 2015. Physiological aspects of lime-induced chlorosis in some *Vitis* species. 2. Genotype response to stress conditions. *VITIS-Journal of Grapevine Research*, 34(4): 233.
- Becker, M. and Asch, F. 2005. Iron toxicity in rice—conditions and management concepts. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4): 558-573.
- Bell, R.W. and Dell, B., 2008. Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy production. International Fertilizer Industry Association (IFA).
- Bilski, J., Jacob, D., Soumaila, F., Kraft, C. and Farnsworth, A. 2012. Agronomic biofortification of cereal crop plants with Fe, Zn, and Se, by the utilization of coal fly ash as plant growth media. *Advances in bioresearch*, 3(4): 130.
- Bogaard, A., Fraser, R., Heaton, T.H., Wallace, M., Vaiglova, P., Charles, M., Jones, G., Evershed, R.P., Styring, A.K., Andersen, N.H. and Arbogast, R.M. 2013. Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31): 12589-12594.
- Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C.S., Satyanaraya, P.V., Anderson, G.C., Bolan, S., Nortjé, G.P., Kronenberg, R., Bardhan, S., Abbott, L.K. and Zhao, H. 2023. Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in agronomy*, 182: 81-130.
- Bouis, H.E. 2003. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(2): 403-411.
- Businelli, D., D'Amato, R., Onofri, A., Tedeschini, E. and Tei, F. 2015. Se-enrichment of cucumber (*Cucumis sativus* L.), lettuce (*Lactuca sativa* L.) and tomato (*Solanum lycopersicum* L. Karst) through fortification in pre-transplanting. *Scientia Horticulturae*, 197: 697-704.
- Cakmak, I. and Horst, W.J. 1991. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiologia plantarum*, 83(3): 463-468.
- Chaitra, A.K.P., Ahuja, R., Sidhu, S.P.K. and Sikka, R. 2021. Importance of nano fertilizers in sustainable agriculture. *Environmental Science and Pollution Research (ESECR)*, 5: 1029.
- Chaney, R.L. 1984. Diagnostic practices to identify iron deficiency in higher plants. *Journal of plant nutrition*, 7(1-5): 47-67.
- Chapke, R.R. and Tonapi, V.A. 2016. Best practices for sorghum cultivation and importance of value-addition. *Training Manual 2016*: 17.

- Chatrath, R., Tiwari, V., Gupta, V., Kumar, S., Singh, S.K., Mishra, C.N., Venkatesh, K., Saharan, M.S., Singh, G., Tyagi, B.S. and Tiwari, R. 2018. WB 2: A high yielding bread wheat variety for irrigated timely sown conditions of North Western Plains Zone of India. *Wheat and Barley Research*, 10(1): 40-44.
- Crane, J., Schaffer, B., Li, Y., Evans, E., Montas, W. and Li, C. 2007. Effect of foliarly-applied acids and ferrous sulfate on iron nutrition of avocado trees. *Proc VI World Avocado Cong (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate) Viña Del Mar, Chile* (pp. 12-16).
- Crowley, D. 2000. Function of siderophores in the plant rhizosphere. In *The rhizosphere*. CRC Press. pp. 239-278.
- Dai, J.L., Zhang, M., Hu, Q.H., Huang, Y.Z., Wang, R.Q. and Zhu, Y.G. 2009. Adsorption and desorption of iodine by various Chinese soils: II. Iodide and iodate. *Geoderma*, 153(1-2): 130-135.
- Darai, R., Sarker, A., Pandey, M.P., Dhakal, K., Kumar, S. and Sah, R. 2020. Genetic variability and genotype X environment interactions effect on grain iron (Fe) and zinc (Zn) concentration in lentils and their characterization under Terai environments of Nepal. *Advances in Nutrition & Food Science*, 5(1): 1-12.
- De Dorlodot, S., Lutts, S. and Bertin, P. 2005. Effects of ferrous iron toxicity on the growth and mineral composition of an interspecific rice. *Journal of plant nutrition*, 28(1): 1-20.
- De Valença, A.W., Bake, A., Brouwer, I.D. and Giller, K.E. 2017. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global food security*, 12: 8-14.
- Ding, W., Clode, P.L. and Lambers, H. 2020. Effects of pH and bicarbonate on the nutrient status and growth of three *Lupinus* species. *Plant and Soil*, 447: 9-28.
- Distelfeld, A., Cakmak, I., Peleg, Z., Ozturk, L., Yazici, A.M., Budak, H., Saranga, Y. and Fahima, T. 2007. Multiple QTL-effects of wheat Gpc-B1 locus on grain protein and micronutrient concentrations. *Physiologia plantarum*, 129(3): 635-643.
- Dubey, A. and Mailapalli, D.R. 2016. Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. *Sustainable Agriculture Reviews*: 19: 307-330.
- Elkins, R. and Fichtner, E. 2016. Causes and Control of Lime-induced Fe Deficiency in California Fruit and Nut Crops. University of California Agriculture and Natural Resources Publication, 21637.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Wright, R.J. 1990. Iron nutrition of plants: an overview on the chemistry and physiology of its deficiency and toxicity. *Brazilian Journal of Agricultural Research*, 25(4): 553-570.
- Feng, Y., Kreslavski, V.D., Shmarev, A.N., Ivanov, A.A., Zharmukhamedov, S.K., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S.I. and Shabala, S. 2022. Effects of iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*) Plants. *Plants*, 11(14): 1894.

- Fernández, V. and Ebert, G. 2005. Foliar iron fertilization: a critical review. *Journal of plant nutrition*, 28(12): 2113-2124.
- Fukuyama, K. 2004. Structure and function of plant-type ferredoxins. *Photosynthesis research*, 81: 289-301.
- Garcia, A.L. and Galindo, L. 1991. Chlorophyllase activity as biochemical indicator of Mn and Fe deficiencies in citrus.
- Garg, M., Sharma, N., Sharma, S., Kapoor, P., Kumar, A., Chunduri, V. and Arora, P. 2018. Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world. *Frontiers in Nutrition*, 5: 12.
- Ghislain, M., Muzhing, T. and Low, J.W. 2019. Zinc and iron fortification in cassava. *Nature Biotechnology*, 37(2): 130-132.
- Ghosh, A., Hasim Reja, M., Nalia, A., Kanthal, S., Maji, S., Venugopalan, V. and Nath, R. 2019. Micronutrient biofortification in pulses: an agricultural approach. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 35(4): 1-12.
- Gopalakrishnan, S., Vadlamudi, S., Samineni, S. and Sameer Kumar, C. 2016. Plant growth-promotion and biofortification of chickpea and pigeonpea through inoculation of biocontrol potential bacteria, isolated from organic soils. *Springerplus*, 5: 1-11.
- Govindaraj, M., Rai, K.N., Cherian, B., Pfeiffer, W.H., Kanatti, A. and Shivade, H. 2019. Breeding biofortified pearl millet varieties and hybrids to enhance millet markets for human nutrition. *Agriculture*, 9(5): 106.
- Grace, U.M., Patel, V.B., Singh, A.K., Singh, S.K., Khanna, M. and Pandey, R. 2019. Effect of fertigation on available soil micro-nutrient under Kinnow Mandarin. *Rwanda Journal of Agricultural Sciences*, 1(1): 15-20.
- Gracheva, M., Klencsár, Z., Kis, V.K., Béres, K.A., May, Z., Halasy, V., Singh, A., Fodor, F., Solti, Á., Kiss, L.F. and Tolnai, G. 2023. Iron nanoparticles for plant nutrition: Synthesis, transformation, and utilization by the roots of *Cucumis sativus*. *Journal of Materials Research*, 38(4): 1035-1047.
- Gutiérrez-Ruelas, N.J., Palacio-Márquez, A., Sanchez, E., Muñoz-Márquez, E., Chávez-Mendoza, C., Ojeda-Barrios, D.L. and Flores-Córdova, M.A. 2021. Impact of the foliar application of nanoparticles, sulfate and iron chelate on the growth, yield and nitrogen assimilation in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(3): 12437-12437.
- Ha, N., Seo, E., Kim, S. and Lee, S.J. 2021. Adsorption of nanoparticles suspended in a drop on a leaf surface of *Perilla frutescens* and their infiltration through stomatal pathway. *Scientific Reports*, 11(1): 11556.
- Hanke, G.U.Y. and Mulo, P. 2013. Plant type ferredoxins and ferredoxin-dependent metabolism. *Plant, cell & environment*, 36(6): 1071-1084.
- Hazra, G. 2016. Different types of eco-friendly fertilizers: An overview. *Sustainability in Environment*, 1(1): 54-70.

- Igartua, E., Grasa, R., Sanz, M., AbadÂa, A. and AbadÂa, J. 2000. Prognosis of iron chlorosis from the mineral composition of flowers in peach. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 75(1): 111-118.
- Irum, S., Jabeen, N., Ahmad, K.S., Shafique, S., Khan, T.F., Gul, H., Anwaar, S., Shah, N.I., Mehmood, A. and Hussain, S.Z. 2020. Biogenic iron oxide nanoparticles enhance callogenesis and regeneration pattern of recalcitrant *Cicer arietinum* L. Plos one, 15(12): 0242829.
- Jalali, M. and Moradi, A. 2020. Measuring and simulating pH buffer capacity of calcareous soils using empirical and mechanistic models. Archives of Agronomy and Soil Science.
- Jha, A.B. and Warkentin, T.D. 2020. Biofortification of pulse crops: Status and future perspectives. Plants, 9(1):73.
- Johnson, A.A., Kyriacou, B., Callahan, D.L., Carruthers, L., Stangoulis, J., Lombi, E. and Tester, M. 2011. Constitutive overexpression of the OsNAS gene family reveals single-gene strategies for effective iron-and zinc-biofortification of rice endosperm. PloS one, 6(9): 24476.
- Jones, C. and Jacobsen, J. 2009. Micronutrients: cycling, testing and fertilizer recommendations. Nutrition Management Module, 7: 2-4.
- Kadifeci, H., Dikici, H. and Demir, Ö.F. 2024. The Effect of Active Lime on the Availability of Metal Micronutrients in Narlı Plain Soils. Turkish Journal of Agricultural & Natural Sciences, 11(2).
- Kalwani, M., Chakdar, H., Srivastava, A., Pabbi, S. and Shukla, P. 2022. Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives. Chemosphere, 287: 132107.
- Kaningini, A.G., Nelwamondo, A.M., Azizi, S., Maaza, M. and Mohale, K.C. 2022. Metal nanoparticles in agriculture: A review of possible use. Coatings, 12(10): 1586.
- Kanjana, D. 2020. Evaluation of foliar application of different types of nanofertilizers on growth, yield and quality parameters and nutrient concentration of cotton under irrigated condition. International Journal of Current Microbiology and Applied, 9(7): 429-441.
- Kappara, S., Neelamraju, S. and Ramanan, R, 2018. Down regulation of a heavy metal transporter gene influences several domestication traits and grain Fe-Zn content in rice. Plant Science, 276: 208-219.
- Kasote, D.M., Lee, J.H., Jayaprakasha, G.K. and Patil, B.S. 2019. Seed priming with iron oxide nanoparticles modulate antioxidant potential and defense-linked hormones in watermelon seedlings. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 7(5): 5142-5151.
- Khalid Elhindi, K.E., Salah El-Hendawy, S.E.H., Eslam Abdel-Salam, E.A.S., Abdallah Elgorban, A.E. and Mukhtar Ahmed, M.A. 2016. Impacts of fertigation

- via surface and subsurface drip irrigation on growth rate, yield and flower quality of *Zinnia elegans*.
- Kirk, G.J.D. and Bajita, J.B. 1995. Root-induced iron oxidation, pH changes and zinc solubilization in the rhizosphere of lowland rice. *New Phytologist*, 131(1): 129-137.
- Kizos, T., Veikontis, G. and Marín-Guirao, J.I. 2010. Comparison of organic and integrated farming systems: The case of sultana table grapes in Korinthos, Greece. *Journal of Sustainable Agriculture*, 35(1): 27-47.
- Klem-Marciniak, E., Huculak-Mączka, M., Marecka, K., Hoffmann, K. and Hoffmann, J. 2021. Chemical stability of the fertilizer chelates Fe-EDDHA and Fe-EDDHSa over time. *Molecules*, 26(7):1933.
- Kosegarten, H., Wilson, G.H. and Esch, A. 1998. The effect of nitrate nutrition on iron chlorosis and leaf growth in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *European Journal of Agronomy*, 8(3-4): 283-292.
- Krouma, A. 2023. Potential of animal manure amendments in combating calcareous induced iron deficiency in pearl millet. *Plant Stress*, 7: 100139.
- Krystofova, O., Sochor, J., Zitka, O., Babula, P., Kudrle, V., Adam, V. and Kizek, R. 2013. Effect of magnetic nanoparticles on tobacco BY-2 cell suspension culture. *International journal of environmental research and public health*, 10(1): 47-71.
- Ksouri, R., Debez, A., Mahmoudi, H., Ouerghi, Z., Gharsalli, M. and Lachaâl, M. 2007. Genotypic variability within Tunisian grapevine varieties (*Vitis vinifera* L.) facing bicarbonate-induced iron deficiency. *Plant Physiology and biochemistry*, 45(5): 315-322.
- Kurczyńska, E., Godel-Jędrzychowska, K., Sala, K. and Milewska-Hendel, A. 2021. Nanoparticles—plant interaction: what we know, where we are? *Applied Sciences*, 11(12): 5473.
- Legaz, F., Serna, M.D., Primo-Millo, E. and Martin, B. 1994. Leaf spray and soil application of Fe-chelates to 'Navelina' orange trees.
- Liu, X., Zhang, F., Zhang, S., He, X., Fang, R., Feng, Z. and Wang, Y.-J. 2005. Effects of nano-ferric oxide on the growth and nutrients absorption of peanut. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 11: 14-18.
- López-Pérez, M.C., Espinoza-Acosta, J.L. and Pérez-Labrada, F. 2024. Iron nutrition management in calcisol soils as a tool to mitigate chlorosis and promote crop quality—An overview. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 12(1): 17-29.
- Lv, J., Christie, P. and Zhang, S. 2019. Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. *Environmental Science: Nano*, 6(1): 41-59.
- Majumdar, A., Upadhyay, M.K., Giri, B., Karwadiya, J., Bose, S. and Jaiswal, M.K. 2023. Iron oxide doped rice biochar reduces soil-plant arsenic stress, improves nutrient values: an amendment towards sustainable development goals. *Chemosphere*, 312: 137117.

- Mamyandi, M.M., Pirzad, A. and Zardoshti, M.R. 2012. Effect of Nano-iron spraying at varying growth stage of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) on the size of different plant parts. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4: 740-745.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants 2nd edn. Institute of Plant Nutrition University of Hohenheim: Germany.
- Marschner, H. 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.
- Martínez-Cuenca, M.R., Primo-Capella, A. and Forner-Giner, M.A. 2017. Tolerance response mechanisms to iron deficiency stress in citrus plants. *Stress Signaling in Plants: Genomics and Proteomics Perspective*, 2: 201-239.
- Marzorati, F., Midali, A., Morandini, P. and Murgia, I. 2022. Good or bad? The double face of iron in plants. *Front. Young Minds*, 10: 718162.
- Masalha, J., Kosegarten, H., Elmaci, Ö. and Mengel, K. 2000. The central role of microbial activity for iron acquisition in maize and sunflower. *Biology and Fertility of Soils*, 30: 433-439.
- Masuda, H., Ishimaru, Y., Aung, M.S., Kobayashi, T., Kakei, Y., Takahashi, M., Higuchi, K., Nakanishi, H. and Nishizawa, N.K. 2012. Iron biofortification in rice by the introduction of multiple genes involved in iron nutrition. *Scientific reports*, 2(1): 543.
- Mazaherinia, S., Astaraei, A.R., Fotovat, A. and Monshi, A. 2010. Nano iron oxide particles efficiency on Fe, Mn, Zn and Cu concentrations in wheat plant. *World Applied Sciences Journal*, 7.
- Maziya-Dixon, B., Kling, J.G., Menkir, A. and Dixon, A. 2000. Genetic variation in total carotene, iron, and zinc contents of maize and cassava genotypes. *Food and Nutrition Bulletin*, 21(4): 419-422.
- Mehrotra, R., Verma, R.K. and Pal, A. 2022. Iron deficiency chlorosis in aromatic grasses—A review. *Environmental Challenges*, 9: 100646.
- Mengel, K. 1994. Iron availability in plant tissues-iron chlorosis on calcareous soils. *Plant and soil*, 165: 275-283.
- Mengel, K. 1995. Iron availability in plant tissues—iron chlorosis on calcareous soils. *In: Iron Nutrition in Soils and Plants: Proceedings of the Seventh International Symposium on Iron Nutrition and Interactions in Plants*, June 27–July 2, 1993, Zaragoza, Spain (pp. 389-397). Springer Netherlands.
- Mengel, K., Planker, R. and Hoffmann, B. 1994. Relationship between leaf apoplast pH and iron chlorosis of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 17(6): 1053-1065.
- Moghadam, A., Vattani, H., Baghaei, N. and Keshavarz, N. 2012. Effect of different levels of fertilizer nano_iron chelates on growth and yield characteristics of two varieties of Spinach (*Spinacia oleracea* L.): Varamin 88 and Viroflay. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(22): 4813-4818.

- Morab, P.N., GV, S.K., Rameshbhai, K.A. and Uma, V. 2021. Foliar nutrition of nano-fertilizers: A smart way to increase the growth and productivity of crops. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(1): 1325-1330.
- Munch, J.C. and Ottow, J.C.G. 1980. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. *Soil Science*, 129(1): 15-21.
- Negi, M., Sharma, S., Sharma, U., Kumar, P., Sharma, U. and Sharma, K. 2023. Aspects of the current and prospective sustainable usage of nanofertilizers in agriculture and their effects on health of the soil: an updated review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1): 594-611.
- Nestel, P., Bouis, H.E., Meenakshi, J.V. and Pfeiffer, W. 2006. Biofortification of staple food crops. *The Journal of nutrition*, 136(4): 1064-1067.
- Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Rosa, R.C.C. and Canellas, L.P. 2015. Substrate biofortification in combination with foliar sprays of plant growth promoting bacteria and humic substances boosts production of organic tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 183: 100-108.
- Oosterhuis, D.M. and Weir, B.L. 2010. Foliar fertilization of cotton. *In: Physiology of cotton*. Dordrecht: Springer Netherlands. pp. 272-288.
- Ozturk, L., Yazici, M.A., Yucel, C., Torun, A., Cekic, C., Bagci, A., Ozkan, H., Braun, H.J., Sayers, Z. and Cakmak, I. 2006. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia plantarum*, 128(1): 144-152.
- Pandey, N., Hossain, F., Kumar, K., Vishwakarma, A.K., Muthusamy, V., Saha, S., Agrawal, P.K., Guleria, S.K., Reddy, S.S., Thirunavukkarasu, N. and Gupta, H.S. 2016. Molecular characterization of endosperm and amino acids modifications among quality protein maize inbreds. *Plant Breeding*, 135(1): 47-54.
- Patrick, W.H. 1978. Chemical changes in rice soils. *Soils and rice*, pp.361-379.
- Pérez-Sanz, A., Álvarez-Fernández, A., Casero, T., Legaz, F. and José Lucena, J. 2002. Fe enriched biosolids as fertilizers for orange and peach trees grown in field conditions. *Plant and soil*, 241: 145-153.
- Pestana, M., Correia, P.J., de Varennes, A., Abadía, J. and Faria, E.A. 2001. Effectiveness of different foliar iron applications to control iron chlorosis in orange trees grown on a calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*, 24(4-5): 613-622.
- Pestana, M., de Varennes, A. and Faria, E.A. 2003. Diagnosis and correction of iron chlorosis in fruit trees: a review. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 1: 46-51.
- Pestana, M., Gonçalves, D.A., De Varennes, A. and Faria, E.A. 1999. The recovery of citrus from iron chlorosis using different foliar applications. Effects on fruit quality. *Improved crop quality by nutrient management*, 95-98.
- Pinto, E. and Ferreira, I.M. 2015. Cation transporters/channels in plants: tools for nutrient biofortification. *Journal of Plant Physiology*, 179: 64-82.

- Poudel, A., Singh, S.K., Jiménez-Ballesta, R., Jatav, S.S., Patra, A. and Pandey, A. 2023. Effect of nano-phosphorus formulation on growth, yield and nutritional quality of wheat under semi-arid climate. *Agronomy*, 13(3): 768.
- Pro Arc Market Insights. 2023. Nano-fertilizers market global opportunity analysis and industry forecast 2022–2030. Pro Arc Market Insights. Nano-Fertilizers Market Global Opportunity Analysis and Industry Forecast 2022-2030. <https://www.proarcmarketinsights.com/industryreport/nano-fertilizers-market/1031/>
- Qu, L.Q., Yoshihara, T., Ooyama, A., Goto, F. and Takaiwa, F. 2005. Iron accumulation does not parallel the high expression level of ferritin in transgenic rice seeds. *Planta*, 222: 225-233.
- Rai, P., Sharma, S., Tripathi, S., Prakash, V., Tiwari, K., Suri, S. and Sharma, S. 2022. Nanoiron: Uptake, translocation and accumulation in plant systems. *Plant Nano Biology*, 2:100017.
- Rana, A., Joshi, M., Prasanna, R., Shivay, Y.S. and Nain, L. 2012. Biofortification of wheat through inoculation of plant growth promoting rhizobacteria and cyanobacteria. *European Journal of Soil Biology*, 50: 118-126.
- Ranjbar, M. and Shams, G.A. 2009. Using of nanotechnology. *Journal of Environment Green*, 3: 29-34.
- Rashid, A. and Ryan, J. 2004. Micronutrient constraints to crop production in soils with Mediterranean-type characteristics: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 27(6): 959-975.
- Reshma, Z. and Meenal, K. 2022. Foliar application of biosynthesised zinc nanoparticles as a strategy for ferti-fortification by improving yield, zinc content and zinc use efficiency in amaranth. *Heliyon*, 8(10).
- Rombolà, A.D. and Tagliavini, M. 2006. Iron nutrition of fruit tree crops. In *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms*. Dordrecht: Springer Netherlands. pp. 61-83.
- Rombolà, A.D., Brüggemann, W., Tagliavini, M., Marangoni, B. and Moog, P.R. 2000. Iron source affects iron reduction and re-greening of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) leaves. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11-12): 1751-1765.
- Romera, F.J., Alcántara, E. and De La Guardia, M.D. 1991. Characterization of the tolerance to iron chlorosis in different peach rootstocks grown in nutrient solution: I. Effect of bicarbonate and phosphate. In: *Iron Nutrition and Interactions in Plants: "Proceedings of the Fifth International Symposium on Iron Nutrition and Interactions in Plants"*, 11–17 June 1989, Jerusalem, Israel, 1989 (pp. 145-149). Springer Netherlands.
- Römhelt, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. *Journal of plant nutrition*, 23(11-12): 1629-1643.
- Römhelt, V. 2012. Diagnosis of deficiency and toxicity of nutrients. In *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press. pp. 299-312

- Roques, S., Kendall, S., Smith, K., Newell Price, P. and Berry, P. 2013. A review of the non-NPKS nutrient requirements of UK cereals and oilseed rape Research Review No. 78. HGCA, Kenilworth.
- Saha, S., Mandal, B., Hazra, G.C., Dey, A., Chakraborty, M., Adhikari, B., Mukhopadhyay, S.K. and Sadhukhan, R. 2015. Can agronomic biofortification of zinc be benign for iron in cereals. *Journal of Cereal Science*, 65: 186-191.
- Sahrawat, K.Á. 2005. Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients. *Journal of plant nutrition*, 27(8): 1471-1504.
- Saleem, S. and Khan, M.S. 2023. Phyto-interactive impact of green synthesized iron oxide nanoparticles and *Rhizobium pusense* on morpho-physiological and yield components of greengram. *Plant Physiology and Biochemistry*, 194: .146-160.
- Sanz, M. and Montañés, L. 1993. Diagnóstico foliar continuado en melocotonero: Valores de Referencia. *ITEA*, 89(2): 79-89.
- Sanz, M. and Montañés, L. 1995. Flower analysis as a new approach to diagnosing the nutritional status of the peach tree. *Journal of Plant Nutrition*, 18(8): 1667-1675.
- Sanz, M., Belkhodja, R., Toselli, M., Montañés, L., Abadía, A., Tagliavini, M., Marangoni, B. and Abadía, J. 1996. Floral analysis as a possible tool for the prognosis of iron deficiency in peach. *In: III International Symposium on Mineral Nutrition of Deciduous Fruit Trees*, 448: 241-246.
- Sanz, M., Pascual, J. and Machín, J. 1997. Prognosis and correction of iron chlorosis in peach trees: Influence on fruit quality. *Journal of Plant Nutrition*, 20(11): 1567-1572.
- Schwertmann, U. and Fitzpatrick, R.W. 1993. Iron minerals in surface environments. *Catena Supplement*, 21: 7-7.
- Senoura, T., Sakashita, E., Kobayashi, T., Takahashi, M., Aung, M.S., Masuda, H., Nakanishi, H. and Nishizawa, N.K. 2017. The iron-chelate transporter OsYSL9 plays a role in iron distribution in developing rice grains. *Plant molecular biology*, 95: 375-387.
- Shenker, M. and Chen, Y. 2005. Increasing iron availability to crops: fertilizers, organo-fertilizers, and biological approaches. *Soil Science & Plant Nutrition*, 51(1), pp.1-17.
- Shirsat, S. and K, S. 2024. Iron oxide nanoparticles as iron micronutrient fertilizer—Opportunities and limitations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(5): 565-588.
- Shukla, A.K., Tiwari, P.K. and Prakash, C. 2014. Micronutrients deficiencies vis-a-vis food and nutritional security of India. *Indian Journal of Fertilisers*, 10(12): 94-112.
- Sillanpää, M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study (Vol. 48). Food and Agriculture Org.
- Singh, A.L. 2000. Assessment of yield losses due to micronutrient deficiencies in groundnut in calcareous soil. In *Proceeding of the International Conference On Managing Natural Resources for Sustainable Agricultural Production in the 21st Century* (Eds. AK Singh et al.). 2: 151-153.

- Singh, A., Gracheva, M., Kis, V.K., Keresztes, Á., Sági-Kazár, M., Müller, B., Pankaczi, F., Ahmad, W., Kovács, K., May, Z. and Tolnai, G. 2023. Apoplast utilisation of nanohaematite initiates parallel suppression of RIBA1 and FRO1&3 in *Cucumis sativus*. *NanoImpact*, 29: 100444.
- Singh, K., Sharma, H.C., Saraangi, S.K. and Sudhakar, P.C. 2003. Iron nutrition in rice. *Fertilizer News*, 48(2): 21-24, 27-31.
- Singh, Y.V., Singh, B.B., Massey, P. and Singh, P.K. 2017. Short duration cowpea varieties for cultivation as a niche crop in various cropping systems for enhanced pulse production. *Agricultural Science Digest-A Research Journal*, 37(3): 232-236.
- Smoleń, S. and Sady, W. 2012. Influence of iodine form and application method on the effectiveness of iodine biofortification, nitrogen metabolism as well as the content of mineral nutrients and heavy metals in spinach plants (*Spinacia oleracea* L.). *Scientia horticulturae*, 143: 176-183.
- Sommer, K. 2000. CULTAN-cropping system: fundamentals, state of development and perspectives. *Nitrogen in a Sustainable Ecosystem: From the Cell to the Plant*, 361-375.
- Sun, H., Qu, G., Li, S., Song, K., Zhao, D., Li, X., Yang, P., He, X. and Hu, T. 2023. Iron nanoparticles induced the growth and physio-chemical changes in *Kobresia capillifolia* seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 194: 15-28.
- Tagliavini, M. and Rombola, A.D. 2001. Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems. *European Journal of Agronomy*, 15(2): 71-92.
- Tagliavini, M., Abadía, J., Rombolà, A.D., Abadía, A., Tsipouridis, C. and Marangoni, B. 2000. Agronomic means for the control of iron deficiency chlorosis in deciduous fruit trees. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11-12): 2007-2022.
- Tawfik, M.M., Mohamed, M.H., Sadak, M.S. and Thaloorth, A.T. 2021. Iron oxide nanoparticles effect on growth, physiological traits and nutritional contents of *Moringa oleifera* grown in saline environment. *Bulletin of the National Research Centre*, 45: 1-9.
- Trijatmiko, K.R., Dueñas, C., Tsakirpaloglou, N., Torrizo, L., Arines, F.M., Adeva, C., Balindong, J., Oliva, N., Sapasap, M.V., Borrero, J. and Rey, J. 2016. Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. *Scientific reports*, 6(1): 19792.
- Uauy, C., Distelfeld, A., Fahima, T., Blechl, A. and Dubcovsky, J. 2006. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. *Science*, 314(5803): 1298-1301.
- Urrestarazu, M., Sanchez, A., Alvarado, J. and Romero, L. 1994. Iron indices and micronutrients in deciduous fruit trees. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(9-10):1685-1701.
- Waqas Mazhar, M., Ishtiaq, M., Maqbool, M., Akram, R., Shahid, A., Shokralla, S., Al-Ghobari, H., Alataway, A., Dewidar, A.Z., El-Sabrou, A.M. and Elansary, H.O.

2022. Seed priming with iron oxide nanoparticles raises biomass production and agronomic profile of water-stressed flax plants. *Agronomy*, 12(5): 982.
- White, J.G. and Zasoski, R.J. 1999. Mapping soil micronutrients. *Field crops research*, 60(1-2): 11-26.
- Wu, H. and Li, Z. 2022. Nano-enabled agriculture: How do nanoparticles cross barriers in plants? *Plant Communications*, 3(6).
- Yadav, P.K., Singh, A. and Agrawal, S.B. 2020. An overview on management of micronutrients deficiency in plants through biofortification: a solution of hidden hunger. *Sustainable Solutions for Elemental Deficiency and Excess in Crop Plants*, 183-208.
- Yamauchi, M. and Peng, X.X. 1995. Iron toxicity and stress-induced ethylene production in rice leaves. *Plant and soil*, 173: 21-28.
- Yara. 2022. Fertilizer industry handbook 2022. <https://www.yara.com/contentassets/29b0f7802aae4f7face19d5c3495be77/fertilizer-industry-handbook-2022.pdf/>
- Ye, F., Ren, Y., Huang, Q., Fernandez-Baca, J.A., Dai, P., Lynn, J.W. and Kimura, T. 2006. Spontaneous spin-lattice coupling in the geometrically frustrated triangular lattice antiferromagnet Cu FeO_2 . *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 73(22): 220404.
- Yehuda, Z., Hadar, Y. and Chen, Y. 2003. Immobilized EDDHA and DFOB as iron carriers to cucumber plants. *Journal of plant nutrition*, 26(10-11): 2043-2056.
- Zafar, S., Bilal, M., Ali, M.F., Mahmood, A., Kijssomporn, J., Wong, L.S., Harshini, M., Kumar, V. and Alotaibi, S.S. 2024. Nano-biofertilizer an eco-friendly and sustainable approach for the improvement of crops under abiotic stresses. *Environmental and Sustainability Indicators*, p.100470.
- Zhang YongYong, Z.Y., Zhang ShuiQing, Z.S., Wang RuZhen, W.R., Cai JiangPing, C.J., Zhang YuGe, Z.Y., Li Hui, L.H., Huang ShaoMin, H.S. and Jiang Yong, J.Y. 2016. Impacts of fertilization practices on pH and the pH buffering capacity of calcareous soil.