



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه تحقیقات خاک و آب

نقش کلسیم و مدیریت مصرف آن در درختان مرکبات

نگارندگان

علی اسدی کنگرشاهی، هیات علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، ساری
نگین اخلاقی امیری، هیات علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، ساری
سید علی غفاری نژاد، هیات علمی موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج

نشریه فنی: 615

سال 1401

مشخصات اثر

عنوان: نقش کلسیم و مدیریت مصرف آن در درختان مرکبات
نگارندگان: علی اسدی کنگرشاهی، نگین اخلاقی امیری و سید علی غفاری نژاد
ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات سنا
کارشناس انتشارات: سمانه پورمنصور
ویراستار: زهرا محمدی
طراح جلد: راضیه محمدی
سال انتشار: 1401
نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

این اثر با شماره 62339 در تاریخ 1401/7/26 در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

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

کد پستی: 3177993545 صندوق پستی: 311-31785

نمابر: 02636210121 تلفن: 026-36201900

وبسایت: <http://www.swri.ir> پست الکترونیکی: info@swri.ir

مسئولیت صحت مطالب به عهده نگارندگان است.

1	فصل اول: مقدمه
5	فصل دوم: کلسیم در خاک
6	تحرك کلسیم در خاک و انتقال آن به سطح ریشه
9	فصل سوم: کلسیم در درختان مرکبات
10	نشانه های کمبود کلسیم در درختان مرکبات
13	فصل چهارم: مهمترین وظایف کلسیم در درختان میوه
13	پایداری دیواره سلولی
14	رشد و تقسیم سلولی
15	پایداری غشای سلولی
15	تنظیم پتانسیل اسمزی
17	فصل پنجم: کلسیم میوه و محلول پاشی آن مطابق فنولوژی رشد
18	روند تغییرات کلسیم در میوه
19	ساختار میوه و جذب کلسیم
25	فصل ششم: مهمترین عوامل موثر در کلسیم میوه
25	رشد و حجم ریشه
25	مدیریت تغذیه
26	شوری
26	رطوبت خاک و مانداب
27	رطوبت نسبی محیط
27	نور

27	درجه حرارت محیط
27	تنش خشکی
27	تراکم خاک
28	بافت خاک
29	هرس
29	pH محلول خاک
29	محلول پاشی کلسیم

31..... فصل هفتم: مدیریت تغذیه و آبیاری و کلسیم

31	نیتروژن
31	پتاسیم و منیزیم
32	بور
32	مدیریت آبیاری

37..... فصل هشتم: منابع کودی کلسیم

41..... فصل نهم: راهکارهای عملی رفع کمبود کلسیم در مرکبات

45..... فصل دهم: کلسیم، ناهنجاری‌های فیزیولوژی، تنش‌ها و انبارمانی

45	کلسیم و شکاف خوردن میوه
45	کلسیم و شکستگی پوست داخلی یا کریزینگ
47	کلسیم و تنش سرما و یخبندان
48	کلسیم و بیماری‌های قارچی
50	کلسیم و تنش خشکی
50	کلسیم و انبارمانی

53..... فصل یازدهم: نتیجه‌گیری و توصیه ترویجی

57	منابع
----	-------

فصل اول

مقدمه

میانگین غلظت کلسیم در پوسته زمین حدود 3/6 درصد است. کلسیم به شکل کانی، تبادلی، محلول در خاک وجود دارد. کلسیم محلول و قابل تبادل، شکل‌های اصلی کلسیم قابل جذب گیاه در خاک هستند. در خاک‌های آهکی، کربنات کلسیم، کانی غالب کلسیم در خاک است و کلسیم محلول توسط آن بافر می‌شود. اما در خاک‌های غیرآهکی معمولاً کلسیم قابل تبادل، کلسیم محلول خاک را بافر می‌کند. مکانیسم اصلی انتقال کلسیم به ریشه، جریان توده‌ای است اما غلظت کلسیم در محلول خاک بر مقدار نسبی مکانیسم‌های انتقال این عنصر به سطح ریشه (توده‌ای یا انتشار) تأثیر دارد (یانگ و همکاران، 2010؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1397). کلسیم یک عنصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان بوده، ولی نیاز بیشتر گیاهان به آن، کم است. به طوری که در برخی موارد، کلسیم می‌تواند یک ریزمغذی (از نظر نیاز گیاه) محسوب شود. در مقابل، نیاز برخی گیاهان به ویژه مرکبات به کلسیم زیاد است به طوری که برگ‌های درختان مرکبات 5 تا 7 درصد وزن خشک کلسیم دارند. کلسیم چندین وظیفه در رشد و توسعه گیاهان و نقشی ساختاری در دیواره و غشای سلولی دارد. بیشتر کلسیم سلولی در آپوپلاست جا در پیوند با مولکول‌های پکتین وجود دارد و موجب پایداری دیواره سلولی می‌شود. کلسیم پیوند سلول‌های مجاور به یکدیگر نیز کمک می‌کند. افزون‌براین، کلسیم با پیوند فسفات و گروه‌های کربوکسیلات در پروتئین‌ها و فسفولیپیدها موجب پایداری غشای پلاسمایی می‌شود. کلسیم سیتوپلاسمی به عنوان انتقال دهنده پیام عمل کرده و در هماهنگی پاسخ‌های سلولی به فرآیندهای توسعه و چالش‌های محیطی موثر است. همچنین کلسیم در موازنه بار آنیون‌های آلی و غیرآلی در واکوئل‌ها موثر است (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1397 و 1393).

کمبود کلسیم در بسیاری از باغ‌های مرکبات جهان به ویژه در باغ‌های دارای خاک‌های اسیدی، خاک‌های با بافت سبک، خاک‌های دارای تنش مانداب، خاک‌های با

بارندگی زیاد یا آبیاری سنگین وجود دارد. افزون‌براین‌ها، عملیات مدیریتی نامناسب کف باغ مانند استفاده مداوم و زیاد از کودهای آمونیمی به‌ویژه سولفات آمونیم، خروج کلسیم را از خاک منطقه ریشه تشدید می‌کند. کمبود کلسیم در مرکبات به صورت کلروز حاشیه برگ‌ها و نواحی بین رگبرگ‌ها ظاهر می‌شود که می‌تواند موجب کاهش عملکرد دستگاه فتوسنتزی و تولید محصول شود. در شرایط کمبود شدید کلسیم ممکن است نکرور شدن مریستم‌های سرشاخه‌ها، ریزش برگ‌ها در سرشاخه‌ها و رشد جوانه‌های متعدد در برگ‌های جدید رخ دهد. به هر حال، در شرایط کمبود کلسیم یا با فراهمی ناکافی کلسیم، پیش از آشکار شدن نشانه‌های کمبود، رشد درختان و عملکرد میوه کاهش می‌یابد. یکی از مهمترین نقش‌های پیام‌رسانی کلسیم، تنظیم روزه‌ها است به طوری که با کاهش غلظت کلسیم آپوپلاسمی، بسته شدن مناسب روزه‌ها با اختلال مواجه خواهد شد که ممکن است تأثیر زیادی در بهره‌وری آب محصول داشته باشد. حرکت کلسیم در آوندهای چوبی از ریشه به اندام هوایی درختان با جریان تعرق انجام می‌شود. با توجه به تحرک کم کلسیم در داخل اندام گیاهان، کمبود موقت آن می‌تواند در سرعت رشد و توسعه اندام‌های در حال رشد تأثیرگذار باشد.

ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی ناشی از کمبود کلسیم یک چالش اقتصادی برای بسیاری از محصولات باغبانی است و این چالش در سال‌های اخیر، به علت کشت‌های متراکم و همچنین افزایش عملکرد در واحد سطح، بیشتر شده است. در بیشتر مواقع کمبود کلسیم ناشی از ناتوانی گیاهان برای انتقال مقدار کافی کلسیم به اندام‌های با تعرق کم، بیشتر از کمبود کلسیم ناشی از مقدار ناکافی یا کمبود کلسیم در خاک است. از این‌رو کمبود فیزیولوژیکی کلسیم، اغلب با کوددهی خاکی کلسیم جبران نمی‌شود و این ناهنجاری یک چالش واقعی در بیشتر محصولات باغبانی است (سریواستاوا و سینک، 2003؛ اسدی کنگرگاهی و اخلاقی امیری، 1393).

عوامل بسیاری در توسعه کمبود کلسیم و شدت خسارت این ناهنجاری در درختان میوه تأثیر دارند. یک مجموعه از این عوامل خاکی هستند و بر جذب کلسیم توسط ریشه تأثیر دارند که از مهمترین آن‌ها می‌توان به رطوبت خاک، شوری محلول خاک، تهویه خاک (اکسیژن خاک)، درجه حرارت خاک، غلظت کلسیم در محلول خاک، توازن

کاتیون‌ها و آنیون‌ها، توسعه و تولید ناکافی ریشه‌های جدید در خاک اشاره کرد. عوامل دیگری که در توسعه و تشدید کمبود کلسیم تأثیر دارند اقلیمی هستند که شامل درجه حرارت هوا، غلظت دی اکسیدکربن، فتوپریود (طول روز)، رطوبت نسبی محیط، نوسان روزانه پتانسیل آب و سطح تابش نور خورشید هستند. کمبود کلسیم موجب کاهش یا توقف رشد درختان، کاهش اندازه برگ‌ها، گرد یا قلبی شکل شدن برگ‌ها، تشدید زردی و ریزش برگ‌ها، افزایش پوسیدگی ریشه‌ها، کاهش عملکرد و کاهش نسبی اندازه میوه‌ها می‌شود. به طور معمول برگ‌های دارای کمبود کلسیم، مقدار بیشتری پتاسیم و منیزیم دارند. کمبود کلسیم در برگ پرتقال‌ها، معمولاً با توسعه کم رنگ شدن کلروفیل در حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی و همچنین لکه‌های نکروتیک کوچک در ناحیه کم رنگ شده در سطح برگ مشخص می‌شود. اما در برگ لیموها، این کاهش کلروفیل به صورت بلوک‌های بزرگ سوخته شده ظاهر می‌شود. کم رنگ شدن کلروفیل در طول حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی ناشی از کمبود کلسیم در درختان مرکبات در مناطق شمالی کشور بیشتر در زمستان رخ می‌دهد و سبب کاهش توان این درختان، کاهش تولید، کوچک شدن برگ‌ها و برگ‌های کوچک ضخیم می‌شود (سریواستاوا و سینک، 2003؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393).

کلسیم به دلیل دو نقش کلیدی در رشد و نمو درختان مرکبات، اهمیت زیادی در مقاومت درختان مرکبات به بیماری‌ها دارد: 1) کلسیم در توسعه و پیوستگی ساختاری غشاء سلولی موثر است. در شرایط کمبود کلسیم، ترکیبات با وزن مولکولی کم مانند قندها و آمینواسیدها به فضای بین سلولی (آپوپلاست) نشت کرده و برای مصرف در دسترس عوامل بیماری‌زا قرار می‌گیرند و. 2) نقش کلیدی کلسیم در ترکیب دیواره سلولی است که به صورت کلسیم پلی‌گالاکتورونیک در تیغه میان سلولی در پایداری دیواره سلولی موثر است. کمبود کلسیم موجب حساسیت درختان به عوامل بیماری‌زا به‌ویژه بیماری‌های قارچی، می‌شود. کمبود کلسیم موجب افزایش حساسیت درختان مرکبات به بیماری‌های قارچی می‌شود که به آوندها حمله می‌کنند و این قارچ‌ها موجب حل شدن دیواره سلولی این اندام هدایتی شده و پیدایش نشانه‌های پژمردگی در سرشاخه‌های این درختان می‌شوند. همچنین میوه‌های دارای کمبود کلسیم به عوامل بیماری‌زا در دوره انبارمانی حساس‌تر هستند (هیرسچی، 2004؛ مارشور،

1995). در این نشریه تلاش شده است که وضعیت کلسیم در خاک، جذب و انتقال، تحرک در برگ و میوه، مدیریت بهینه کف باغ (به‌ویژه مهمترین عواملی که جذب و انتقال کلسیم نقش دارند)، مدیریت مصرف کلسیم به‌ویژه محلول‌پاشی کودهای کلسیمی متناسب با فنولوژی رشد میوه و همچنین ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی ناشی از کمبود کلسیم و راهکارهای جلوگیری آن‌ها نشان و در پایان توصیه‌های لازم به باغداران ارائه شود.

فصل دوم

کلسیم در خاک

کلسیم، پنجمین عنصر از نظر فراوانی در پوسته زمین است. این عنصر به شکل ساختار کانی، تبادلی و محلول در خاک وجود دارد. کلسیم در سطح تبادلی ذرات خاک یا در محلول خاک به شکل یونی (Ca^{2+}) وجود دارد. کم و بیش 80 درصد از سایت‌های تبادلی ذرات خاک، توسط یون‌های کلسیم اشغال شده و این کلسیم تبادلی با دیگر یون‌ها در محلول خاک در تعادل است. کلسیم در سطوح تبادلی برای حفظ و پایداری ساختمان خاک بسیار مهم است به طوری که سبب افزایش تجمع ذرات خاک به صورت خاکدانه، بهبود حرکت آب در خاک، نفوذ ریشه و همچنین افزایش پایداری ذرات خاک (خاکدانه) می‌شود. کلسیم محلول و قابل تبادل، شکل‌های اصلی کلسیم قابل جذب در خاک هستند. سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، کانی‌های عمده کلسیم در خاک هستند و بیشترین حلالیت را دارند. سولفات کلسیم معمولاً در خاک‌های خشک (خاک‌هایی با غلظت سولفات بیش از 0/01 مول در لیتر) و کربنات کلسیم در خاک‌هایی با pH بیشتر از 7 وجود دارد. مقدار کلسیم در این خاک‌ها تحت تأثیر غلظت دی‌اکسیدکربن (CO_2) محلول خاک است که غلظت کربنات و بی‌کربنات را کنترل می‌کند. اما در pH حدود 7/5 تا 8، سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، هر دو می‌توانند در خاک وجود داشته باشند (باشور و سایه، 2007؛ یانگ و همکاران، 2010).

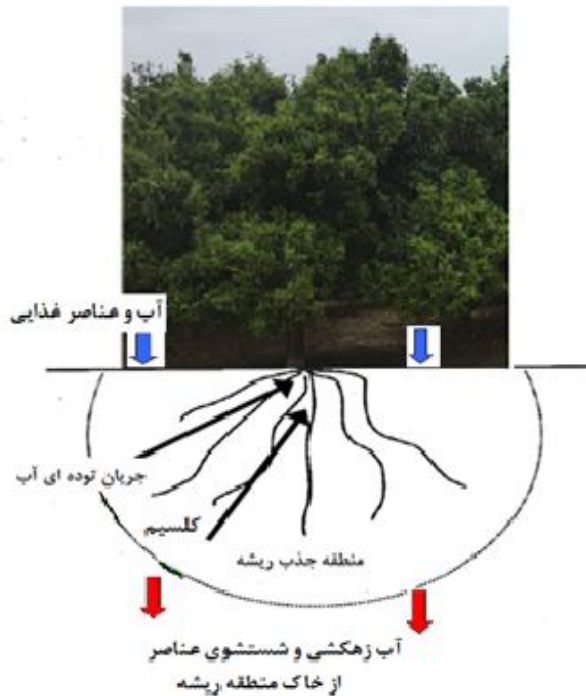
کلسیم قابل تبادل در تعادل با کلسیم محلول خاک است. قدرت نسبی اتصال کلسیم به محل‌های تبادلی، تعادل بین کلسیم تبادلی و محلول را کنترل می‌کند. قدرت نسبی اتصال، به ویژگی سایت‌های تبادل کاتیونی، درجه اشباع کلسیم در سایت‌های تبادل کاتیونی، کاتیون‌های مکمل و آنیون‌های محلول خاک بستگی دارد. اختلاف در قدرت اتصال کلسیم به سایت‌های تبادلی، توسط قدرت جذب سطحی سایت‌های تبادلی نسبت به انرژي هیدراته کلسیم تعیین می‌شود. اما برای سایت‌های تبادلی آلی، قدرت نگهداری به اندازه کافی زیاد است به طوری که جذب کاتیون‌ها در این سایت‌ها، به شعاع دهیدراته

کاتیون (شعاع کریستالی) بستگی دارد. در مقابل، در سایت‌های با بار دائمی در رس‌های خاک، قدرت نگهداری کاتیون‌ها ضعیف‌تر است و ترتیب جذب کاتیون‌ها در این سایت‌ها به شعاع هیدراته کاتیون‌ها بستگی دارد و یون‌های بزرگتر با قدرت کمتری نگهداری می‌شوند. کلسیم تبادل‌ی محکم‌تر از پتاسیم و منیزیم در سایت‌های تبدالی نگهداری می‌شود. غلظت کلسیم در محلول خاک، قدرت بافری و ضریب انتشار موثر کلسیم، بیشترین نقش را در انتقال کلسیم به سطح ریشه دارند. غلظت کلسیم در محلول خاک با pH خاک و ویژگی‌های خاک تغییر می‌کند و معمولاً بین 20 تا 40 میلی‌گرم در لیتر است. ولی در خاک‌های مناطق خشک، حدود 100 تا 200 میلی‌گرم در لیتر است. قدرت بافری کلسیم (نسبت کلسیم قابل تبادل به کلسیم محلول) به علت دامنه گسترده ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از 20 تا 100 متغیر است. در خاک‌های غیرآهکی معمولاً کلسیم قابل تبادل، کلسیم محلول خاک را بافر می‌کند. اما در خاک‌های دارای کربنات کلسیم یا گچ، کلسیم محلول توسط این کانی‌ها بافر خواهد شد (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393؛ اسدی کنگرشاهی، 1398).

تحرك کلسیم در خاک و انتقال آن به سطح ریشه

کلسیم موجود در خاک و هر کود کلسیمی (نیترات کلسیم و ...) که به خاک منطقه ریشه درختان داده شود برای جذب، ابتدا باید حل شده و وارد محلول خاک شوند و سپس همراه با جریان آب به سطح ریشه منتقل شوند. حرکت آب به سطح ریشه تحت تأثیر اختلاف پتانسیل آبی خاک اطراف ریشه و پتانسیل آبی سطح ریشه است. برای ایجاد و تشدید این اختلاف پتانسیل آبی، وجود ریشه‌ها و برگ‌های فعال و موثر ضروری است. تبخیر و تفرق از برگ‌ها موجب ایجاد کشش و حرکت جریان آب در آوندهای چوبی می‌شود که در آخر به سلول‌های سطح ریشه می‌رسد و موجب کاهش پتانسیل آب در سطح ریشه شده و آب از خاک اطراف ریشه (با پتانسیل آبی بیشتر) به سطح ریشه (با پتانسیل آبی کمتر) منتقل می‌شود. همراه با حرکت و انتقال آب به سطح ریشه، عناصر غذایی محلول در آن (به‌ویژه عناصر نیتروژن، منیزیم، کلسیم، سولفور، پتاسیم و بور) نیز به سطح ریشه منتقل می‌شوند (شکل 1). از نشانه‌های شروع فعالیت دوباره درختان

مرکبات، رشد سرشاخه‌های سال جاری است که در منطقه شمال کشور رشد دوباره سرشاخه‌ها بیشتر اوقات از اواسط فرودین ماه شروع شده و در اواسط تا اواخر اردیبهشت ماه کامل می‌شود. از این‌رو در باغات مرکبات شمال شروع جذب عناصر غذایی از اواسط فروردین ماه با کمترین راندمان شروع می‌شود و سپس به ترتیب افزایش می‌یابد و در اوایل تا اواسط تابستان (با توجه به نوع رقم) به حداکثر می‌رسد. در بیشتر مناطق جنوب کشور، رشد دوباره سرشاخه‌ها از اوایل تا اواخر اسفند ماه شروع و در اواخر فروردین ماه کامل می‌شوند. از این‌رو جذب و انتقال عناصر به سطح ریشه با کمترین راندمان از اسفندماه شروع و در فروردین و اردیبهشت به بیشترین می‌رسند (اسدی کنگرگاهی، 1398؛ اسدی کنگرگاهی و اخلاقی امیری، 1393).

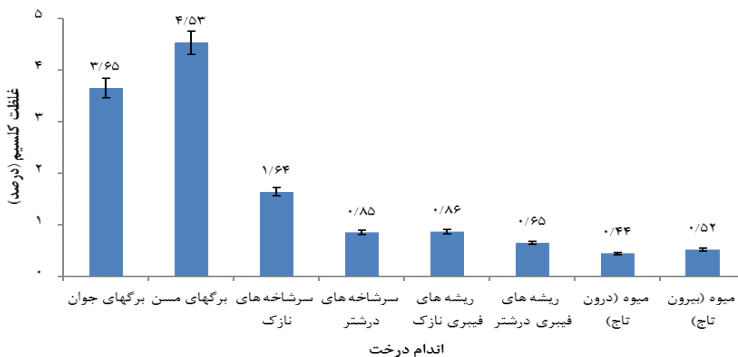


شکل 1- منطقه جذب، انتقال کلسیم با جریان توده‌ای کلسیم به سطح ریشه درختان

فصل سوم

کلسیم در درختان مرکبات

نتایج پژوهشی نگارندگان نشان داده است که غلظت کلسیم در برگ‌ها، با افزایش سن برگ درختان افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که غلظت کلسیم در برگ‌ها در اواسط خرداد ماه، کمتر از برگ‌ها در مرداد ماه است. همچنین با افزایش سن و قطر سرشاخه‌ها و چوبی شدن آن‌ها، غلظت کلسیم در آن کاهش می‌یابد به‌طوری‌که غلظت کلسیم در سرشاخه‌های کمتر از یک سانتی‌متر، کم و بیش 1/64 درصد بر اساس وزن خشک است و در سرشاخه‌های بزرگ‌تر به حدود 0/85 درصد می‌رسد. درمقابل، نتایج غلظت کلسیم در ریشه‌ها نشان داد که غلظت کلسیم در ریشه‌های فیبری کمتر از غلظت کلسیم در سرشاخه‌ها است. غلظت کلسیم در ریشه‌های فیبری کمتر از یک سانتی‌متر حدود 0/86 درصد و در ریشه‌های فیبری بزرگ‌تر حدود 0/65 درصد است (شکل 2). راهنمای دامنه مطلوب غلظت کلسیم در برگ ارقام مختلف مرکبات در جدول (1) آورده شده است. همچنین در جدول (2)، مدیریت برنامه کودی بر اساس نتایج تجزیه برگ نشان داده شده است. اگر غلظت کلسیم در برگ کمتر از دامنه مطلوب باشد با توجه به نوع خاک ممکن است دلایل متفاوتی داشته باشد. در خاک‌های آهکی مهم‌ترین دلیل می‌تواند توقف رشد ریشه، سنگینی بافت خاک، پوسیدگی ریشه، ماندابی شدن منطقه ریشه باشد ولی در خاک‌های اسیدی، مقدار کلسیم قابل تبادل خاک باید کنترل شود. عوامل اقلیمی، خاکی و فیزیولوژی ممکن است در کمبود کلسیم موثر باشند (اسدی کنگرگاهی و اخلاقی امیری، 1397).



شکل 2- غلظت کلسیم در اندام‌های مختلف درختان پرتقال تامسون ناول

**جدول 1- راهنمای دامنه مطلوب غلظت کلسیم برگ در ارقام مختلف مرکبات
(اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393)**

رقم	دامنه مطلوب غلظت کلسیم در برگ (درصد)
ناول‌ها	3-5/5
انشوها	3-5/5
کلمانتین و پیچ‌ها	4/4-5/5
خونی‌ها و سانگین‌ها	4/8-6
والنسیا	3-5/5
گریپ‌فروت	3-5/5
لیموها و لایم‌ها	3/2-5/2

جدول 2- تنظیم برنامه کودی مرکبات بر اساس آزمون برگ (اسدی کنگرشاهی و همکاران، 1398)

اگر غلظت عنصر غذایی در برگ بیشتر از مقدار مطلوب باشد.	اگر غلظت عنصر غذایی در برگ کمتر از مقدار مطلوب باشد.
1) در خاک‌های آهکی، مانداب منطقه ریشه کنترل شود. 2) pH خاک کنترل شود. 3) در خاک‌های اسیدی، مقدار کلسیم خاک کنترل شود. 4) در خاک‌های اسیدی (با توجه به pH خاک)، آهک به روش خاکی در منطقه ریشه و کودهای محلول کلسیم (مانند نیترات کلسیم و کلرید کلسیم) به روش کود آبیاری توصیه می‌شود. اما در خاک‌های آهکی، محلول‌پاشی کودهای محلول کلسیم (مانند نیترات کلسیم یا کلات‌های آلی کلسیم) انجام شود.	
هیچ اقدامی لازم نیست.	

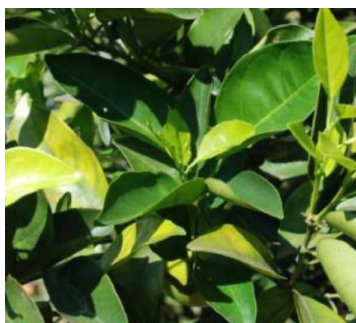
نشانه‌های کمبود کلسیم در درختان مرکبات

نشانه‌های کمبود کلسیم در درختان مرکبات به شکل کم رنگ شدن کلروفیل در طول حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی در زمستان است. لکه‌های نکروتیک کوچک در نواحی کم رنگ شده می‌توانند توسعه یابند (شکل 4). کمبود کلسیم سبب کاهش توان درختان، کاهش تولید، تنک شدن برگ‌ها و برگ‌های کوچک ضخیم می‌شود. در درختان با کمبود شدید کلسیم، دای‌بک شاخه‌های انتهایی و رشد جوانه‌های ثانویه برگ افزایش می‌یابد. درختان با کمبود کلسیم میوه‌های کوچک، بد شکل با کیسه‌های عصاره چروکیده

شده تولید می‌کنند. همچنین میوه‌های این درختان دارای مقدار عصاره کمتر اما اسید و مواد جامد محلول بیشتر هستند (اسدی کنگرشاهی، 1398). کمبود کلسیم در مرکبات توسط بسیاری از پژوهشگران گزارش شده است. افزایش ریزش و زردی برگ‌ها، کاهش اندازه، گرد یا قلبی شکل شدن برگ‌ها (شکل 3)، افزایش پوسیدگی ریشه‌ها، کاهش عملکرد و کاهش نسبی اندازه میوه‌ها از دیگر نشانه‌های ظاهری کمبود کلسیم است. برگ‌های دارای کمبود کلسیم، مقدار بیشتری پتاسیم و منیزیم دارند. کمبود کلسیم در برگ پرتقال، با توسعه کم رنگ شدن کلروفیل در طول حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی و همچنین لکه‌های نکروتیک کوچک در ناحیه کم رنگ شده در سطح برگ مشخص می‌شود (شکل 4). اما در برگ لیمو، این کاهش کلروفیل به صورت بلوک‌های بزرگ سوخته شده ظاهر می‌شود. همچنین با کمبود کلسیم، ریزش برگ‌ها پیش از بلوغ رخ می‌دهد که به دنبال آن، برگ‌های جدید تولید می‌شوند که آن‌ها هم پیش از بلوغ ریزش می‌کنند و سرانجام سرشاخه‌هایی ضعیف از جوانه‌های جانبی این شاخه‌ها، توسعه می‌یابند (سریواستاوا و سینک، 2003).

ناهنجاری دیگری که با کمبود کلسیم ظاهر می‌شود کمبود منگنز است که بیشتر در زمستان و اوایل بهار مشاهده می‌شود. همه درختان دارای کمبود کلسیم معمولاً دارای سیستم ریشه‌ای ضعیف‌تر بوده و نشانه‌های کمبود منگنز را نشان می‌دهند که به علت کاهش ظرفیت ریشه این درختان برای جذب منگنز است. با مدیریت تغذیه مناسب یا فراهمی بهینه کلسیم، تحمل درختان مرکبات به تنش مانداب، کاهش تهویه، پوسیدگی ریشه و کمبود اکسیژن در منطقه ریشه بیشتر از درختان با کمبود کلسیم است. از این‌رو درختان با کمبود کلسیم، به کمبود اکسیژن خاک حساس هستند و پوسیدگی ریشه و رشد ضعیف درختان از نشانه‌های اصلی کمبود کلسیم است. یکی از ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی ناشی از کمبود کلسیم و منیزیم همراه با فسفر و پتاسیم زیاد، لکه‌های کوچک زرد روی پوست نزدیک انتهای خامه (stylar end) میوه است که گاهی این لکه‌ها به صورت قهوه‌ای ظاهر و یا اینکه پوسیده می‌شوند. میوه‌های رنگی حاشیه خارجی درختان، حساس‌تر از میوه‌های با رنگ‌پذیری ضعیف‌تر درون تاج درخت هستند (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393).

به طور معمول، کمبود کلسیم معمولا در خاک‌های اسیدی که کلسیم طبیعی خاک شسته شده است بیشتر دیده می‌شود. استفاده پیاپی از کودهای آمونیومی، به ویژه سولفات آمونیوم، شستشوی کلسیم از خاک را تشدید می‌کند (استفاده از پتاسیم و گوگرد نیز چنین تأثیری دارد). مصرف آهک در خاک‌های اسیدی نه تنها pH خاک را خنثی می‌کند بلکه قابلیت استفاده کلسیم در خاک را نیز بهبود می‌بخشد. کمبود کلسیم در خاک‌های با شوری زیاد نیز به علت غلظت زیاد سدیم، بیشتر رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، مصرف گچ می‌تواند کمبود کلسیم را تصحیح کند و اثرات زیان‌آور سدیم را کاهش دهد. همچنین کمبود کلسیم می‌تواند با محلول‌پاشی کودهای کلسیم محلول در آب (مانند نترات کلسیم و ...)، به خوبی تصحیح شود (سریواستاوا، 2012؛ اسدی کنگرشاهی، 1398).



شکل 3- نشانه‌های کمبود کلسیم در برگ درختان مرکبات

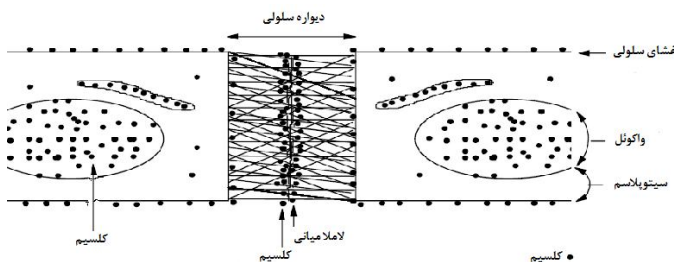


شکل 4- نشانه‌های کمبود کلسیم در برگ درختان مرکبات

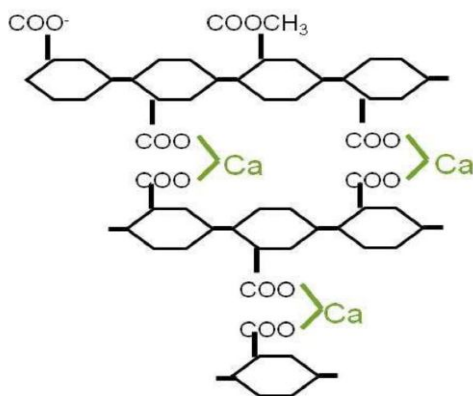
فصل چهارم

مهمترین وظایف کلسیم در درختان میوه

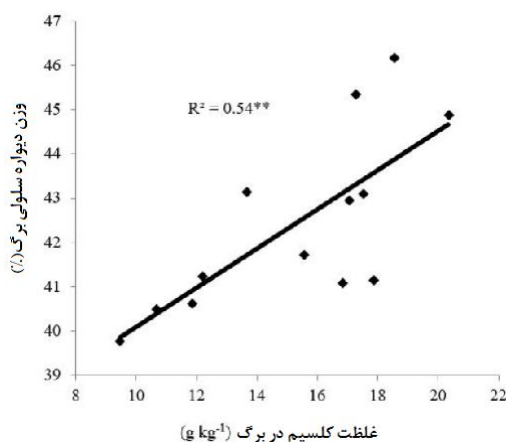
پایداری دیواره سلولی: بخش زیادی از کلسیم (بر خلاف دیگر عناصر غذایی پر مصرف) در دیواره سلولی بافت‌های گیاهی قرار دارد که به علت وجود جایگاه‌های زیاد برای قرار گرفتن آن در دیواره‌های سلولی و همچنین انتقال بسیار کم کلسیم از غشای سیتوپلاسم و ورود آن به سیتوپلاسم سلول است. در تیغه میانی دیواره سلولی، کلسیم به شدت به گروه‌های کربوکسیل در اسید گالاکتورونیک (پکتین‌ها) می‌چسبد و کم و بیش غیرقابل تبادل می‌شود (شکل‌های 5 و 6). در بیشتر دولپه‌ای‌ها از جمله مرکبات، نزدیک به 50 درصد از کلسیم به شکل پکتات‌های کلسیم است. تجزیه پکتات‌ها، توسط آنزیم پلی‌گالاکتوروناز انجام می‌شود و غلظت زیاد کلسیم در بافت‌ها به شدت از فعالیت این آنزیم جلوگیری می‌کند. در مقابل، در بافت‌های دارای کمبود کلسیم، فعالیت آنزیم افزایش می‌یابد. از این رو مقدار پکتات کلسیم در دیواره‌های سلولی گیاهان و میوه‌ها، در حساسیت این بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی بسیار موثر است، به طوری که هر چه مقدار کلسیم بیشتر باشد، حساسیت بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی کمتر خواهد بود. کلسیم زیاد در برگ و میوه، خسارت ناشی از تنش‌های سرمزدگی را نیز کاهش می‌دهد. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که با افزایش غلظت کلسیم در برگ، وزن دیواره سلولی نسبت به وزن برگ افزایش می‌یابد (شکل 7) این افزایش نسبی وزن دیواره سلول، استحکام بافت‌ها در مقابل تنش‌های زنده و غیر زنده را افزایش می‌دهد (وایت و برادلی، 2003؛ دمارتی و همکاران، 1984).



شکل 5- تجمع کلسیم در تیغه میانی دیواره سلولی، واکوئل و شبکه آندوپلاسمی



شکل 6- اتصال کلسیم به گروه‌های کربوکسیل تیغه میانی دیواره سلولی



شکل 7- تأثیر غلظت کلسیم بر دیواره سلولی در درختان مرکبات

رشد و تقسیم سلولی: کلسیم در زنجیره‌های پکتیکی تیغه میانی موجب سفتی و استحکام دیواره سلولی می‌شود. از سوی دیگر برای رشد سلول، دیواره سلولی باید نرم و شل شود. از این رو با افزایش تولید هورمون اکسین، آپوپلاسم اسیدی شده و کلسیم با پروتون جایگزین و در نتیجه زنجیره‌های پکتیکی روی همدیگر لغزیده و دیواره سلولی شل شده و سلول رشد می‌کند و بزرگ می‌شود. همچنین کلسیم به احتمال زیاد برای

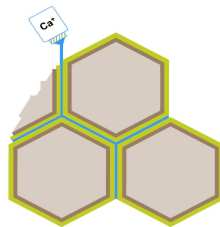
ورود مواد به ساختمان دیواره‌های سلولی ضروری است (برملاژ، 1994؛ مارشنر، 1995). پایداری غشای سلولی: پیوند کلسیم با گروه‌های فسفات و کربوکسیلات فسفولیپیدها و همچنین پروتئین‌ها در سطح غشاهای سلولی موجب افزایش پایداری غشاهای سلولی می‌شود. این کلسیم می‌تواند با دیگر کاتیون‌ها مانند پتاسیم، منیزیم و سدیم جایگزین شود ولی هیچ یک از این کاتیون‌ها نمی‌توانند نقش کلسیم را در پایداری غشای سلولی انجام دهند. در کمبود شدید کلسیم، ساختمان غشا آسیب دیده و نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد. همچنین در بافت‌هایی که کمبود کلسیم دارند به علت نشت مواد تنفسی از واکوئل‌ها به سیتوپلاسم، فعالیت آنزیم‌های تنفسی و در نتیجه شدت تنفس افزایش می‌یابد (مارشنر، 1995).

تنظیم پتانسیل اسمزی: بخش بیشتر کلسیم در داخل سلول‌ها (به ویژه در سلول‌های برگ) در واکوئل قرار دارد و به عنوان یون همراه، برای آنیون‌های آلی و معدنی عمل می‌کند و در موازنه کاتیون - آنیون نقش دارد. همچنین تشکیل اغزالات کلسیم در واکوئل‌ها در پایین نگه داشتن غلظت کلسیم در سیتوپلاسم و کلروپلاست موثر است. اغزالات کلسیم نیز به علت حلالیت کم، در تنظیم اسمزی سلول‌ها اهمیت زیادی دارد (وایت و برادی، 2003؛ گیلهام و همکاران، 2011).

فصل پنجم

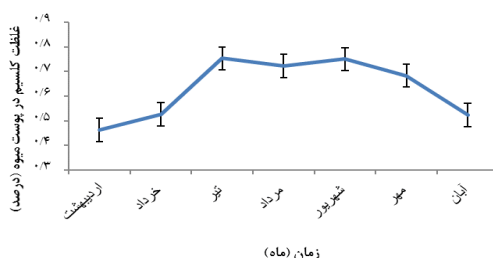
کلسیم میوه و محلول پاشی آن مطابق فنولوژی رشد

کلسیم دومین عنصر غذایی از نظر فراوانی در پوست میوه مرکبات است. بخش زیادی از کل کلسیم در بافت گیاهان در دیواره سلولی قرار دارد. کلسیم درون سلولی همچنین در شبکه اندوپلاسمی و کلروپلاست وجود دارد و بیشترین کلسیم محلول در آب در واکوئل‌ها قرار دارد. کلسیم همچنین در دیواره سلول و غشاهای به عنوان یک کاتیون برای آنیون‌های آلی و غیرآلی در واکوئل و همچنین به عنوان یک پیغام‌بر در سیتوزول نیاز است. کلسیم متصل به پکتات در لایه میانی برای استحکام دیواره سلول و سفتی دیواره سلول توسط پیوند متقابل زنجیره‌های پکتیک لاملای میانی ضروری است. افزون‌بر این کلسیم، در حفظ ویژگی مکانیکی ژل پکتیک لایه میانی تأثیر دارد (شکل 8). کلسیم همچنین به عنوان کوفاکتور در تغییر و تبدیل‌های آنزیمی، تنظیم کننده‌های اسمزی و پیغام‌بر ثانویه در واکنش‌های آنزیمی عمل می‌کند. در بافت‌های با کمبود کلسیم، فعالیت پلی‌گالاکتورناز افزایش می‌یابد و این افزایش منجر به تجزیه دیواره‌های سلولی و اضمحلال بافت‌های تحت تأثیر می‌شود. ناهنجاری کمبود کلسیم زمانی ایجاد می‌شود که کلسیم کافی لحظه‌ای برای توسعه بافت‌های در حال توسعه فراهم نباشد. بافت‌های در حال رشد برای تأمین فوری کلسیم به کلسیم موجود در آوندهای چوبی نیاز دارند که وابسته به جریان تعرق است. از این‌رو، کمبود کلسیم به شکل ویژه در نواحی مریستمی که تقسیم سلولی در حال رخ دادن و سلول‌های جدید در حال بوجود آمدن هستند، ظاهر می‌شود (اتیچا و همکاران، 2017؛ دمیچیک و همکاران، 2018).

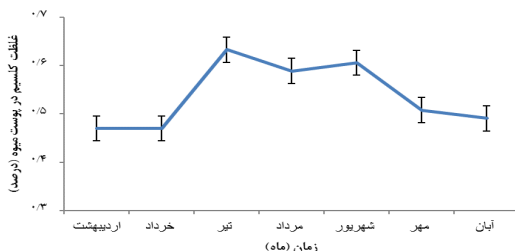


شکل 8- نقش کلسیم در تیغه میانی و استحکام اتصال دو سلول مجاور

روند تغییرات کلسیم در میوه: نتایج اندازه‌گیری غلظت کلسیم میوه‌چه‌های درختان تامسون ناول در اواخر اردیبهشت ماه در شرق مازندران نشان داد که غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بیرون تاج بیشتر از درون تاج بود. نتایج بررسی روند تغییرات کلسیم در پوست میوه در طی فصل رشد نشان داد که غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بخش بیرونی تاج درختان با گذشت زمان به تدریج افزایش یافت و در تیر ماه به بیشترین رسید و از تیر تا شهریور ماه از نوسان کمتری برخوردار بود، سپس غلظت کلسیم شروع به کاهش کرد و در زمان برداشت به کمترین مقدار کاهش یافت (شکل 9). در میوه‌های درون تاج نیز غلظت کلسیم پوست میوه پس از تشکیل میوه به تدریج افزایش یافت، در تیر ماه به رسید سپس از تیر تا مرداد ماه از نوسان کمتری برخوردار بود و از شهریور ماه دوباره شروع به کاهش کرد و در آبان ماه به کمترین رسید (شکل 10). نتایج پژوهش‌های فراوان نشان داده است که جذب و انتقال کلسیم در آوندهای چوبی و انتقال آن به میوه مرکبات با شدت تعرق اندام هوایی ارتباط دارد و با افزایش میزان تعرق که موجب افزایش جریان و حرکت شیر خام در آوند چوبی می‌شود، انتقال کلسیم به اندام هوایی نیز افزایش می‌یابد. اما شدت ورود کلسیم به میوه به مرحله رشدی آن بستگی دارد در مراحل نخستین رشد میوه (تشکیل میوه تا ریزش فیزیولوژی) به علت وجود تعداد زیاد استومات‌ها و همچنین (موجود نبودن و تشکیل نشدن) کامل واکس سطحی (لایه روغنی) در سطح میوه که شدت جریان تعرق از میوه به نسبت زیاد است انتقال و ورود کلسیم به میوه افزایش می‌یابد. انتقال کلسیم به میوه ممکن است تحت تأثیر پایه، میوه یا میکروکلیمای درخت و همچنین درجه حرارت، رطوبت نسبی و بارندگی منطقه نیز باشد (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1397؛ هوچینگ و همکاران، 2016).

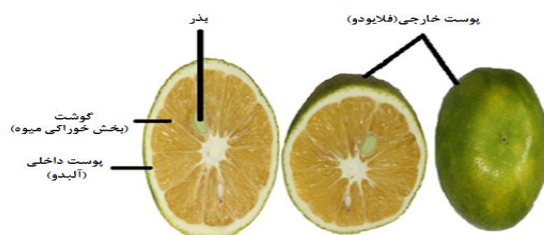


شکل 9- روند تغییرات غلظت کلسیم در پوست میوه پرتقال تامسون ناول (بیرون تاج) در طول فصل رشد

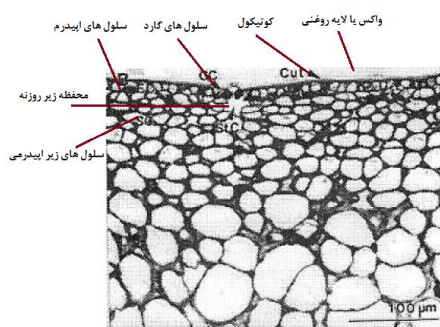


شکل 10- روند تغییرات غلظت کلسیم در پوست میوه پرتقال تامسون ناول (درون تاج) در طول فصل رشد

ساختار میوه و جذب کلسیم: میوه مرکبات شامل سه بخش پوست خارجی (فلایودو)، پوست داخلی (آلبو) و گوشت (بخش خوراکی) است (شکل 11). ساختار پوست خارجی شامل واکس یا لایه روغنی بوده که خارجی ترین لایه پوست خارجی است و پس از آن به ترتیب کوتیکول، سلول های اپیدرمی و زیر اپیدرمی قرار دارند (شکل 12). واکس یا لایه روغنی پس از تشکیل میوه بسیار نازک و به صورت جزیره ای است سپس به تدریج ضخیم تر و پیوسته تر خواهد شد و در فاصله زمانی کوتاهی پس از ریزش تابستانه تقریباً این لایه پیوسته و به بیشترین ضخامت می رسد پس از آن، این واکس سطحی محدود کننده ی تعرق و در نتیجه محدود کننده ی انتقال کلسیم از راه آوندهای چوبی به میوه و همچنین جذب کلسیم از راه محلول پاشی خواهد شد. برش عرضی میوه مرکبات نشان می دهد که دستجات آوندی بیشتر در بخش پوست داخلی قرار دارند و با محدود شدن یا توقف تعرق از سطح میوه، تقریباً انتقال آب و عناصر غذایی از راه آوند چوبی نیز به کمترین می رسد و متابولیت ها و آب مورد نیاز میوه بیشتر از طریق آوندهای آبکشی تأمین خواهد شد. به علت ناتوانی انتقال کلسیم در آوندهای آبکشی، انتقال کلسیم از ریشه و آوندهای چوبی به میوه مرکبات در فاصله کوتاهی پس از ریزش تابستانه میوه چه ها به کمترین رسیده و متوقف می شود. همچنین به علت پیوستگی این لایه واکس و ضخامت آن، نفوذ مستقیم عناصر غذایی از طریق محلول پاشی مستقیم به سطح میوه نیز به کمترین می رسد. از این رو محلول پاشی کلسیم در مرحله اول رشد میوه و در اوایل مرحله دوم رشد میوه می تواند در افزایش کلسیم میوه ها موثر باشد و با فاصله گرفتن از مرحله دوم رشد میوه، به تدریج راندمان جذب کلسیم کم و کمتر می شود و تأثیر چندانی در افزایش کلسیم میوه ها نخواهد داشت (اسدی کنگرگاهی، 1398؛ سربو استوا، 2012).



شکل 11- آناتومی میوه مرکبات (پوست خارجی، داخلی و گوشت میوه)

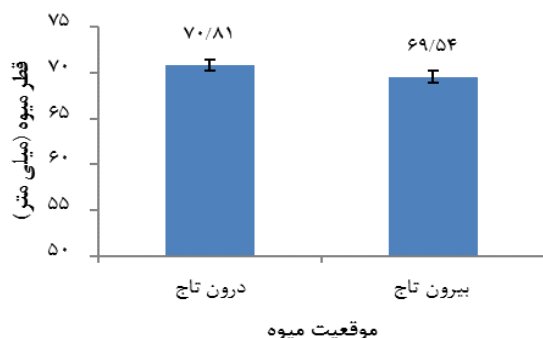


شکل 12- ساختار پوست خارجی (فلایودو) میوه مرکبات

اندازه‌گیری غلظت کلسیم پوست و قطر میوه‌های درون و بیرون تاج درختان مرکبات در پایان فصل رشد نشان داد که غلظت کلسیم پوست در میوه‌های بخش بیرونی تاج درختان بیشتر از میوه‌های درون تاج (شکل‌های 13 و 14) و نیز میانگین قطر میوه‌های درون تاج 1/27 میلی‌متر بیشتر از میوه‌های بخش‌های بیرونی تاج درختان بود (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1397).



شکل 13- میانگین غلظت کلسیم در پوست میوه پرتقال تامسون ناول (درون و بیرون تاج)



شکل 14- میانگین قطر میوه‌های پرتقال تامسون ناول (درون و بیرون تاج)

نتایج محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت سه در هزار در مراحل کلیدی فنولوژی درختان تامسون ناول نشان داد (جدول‌های 3 و 4) که بیشترین عملکرد، قطر و وزن میوه از محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و پیش از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) حاصل شد و محلول‌پاشی در اواخر فاز دوم رشد میوه تأثیر معنی‌داری در عملکرد، قطر و وزن میوه نداشت. اما بیشترین قطر پوست میوه و ویتامین ث به ترتیب از محلول‌پاشی نیترات کلسیم پس از تشکیل میوه و پیش از ریزش فیزیولوژی میوه به‌دست آمد و کمترین قطر پوست و ویتامین ث از محلول‌پاشی نیترات کلسیم در اواخر فاز دوم رشد میوه حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با شاهد (بدون محلول‌پاشی) نداشت. همچنین محلول‌پاشی نیترات کلسیم تأثیری در چگالی عصاره، اسیدیته کل و مواد جامد محلول نداشت. بیشترین pH عصاره میوه از محلول‌پاشی پیش از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) حاصل شد و بین بقیه محلول‌پاشی‌ها تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (اسدی کنگرشاهی، 1398؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1397).

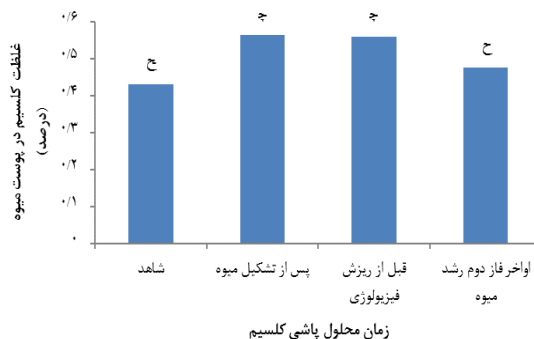
جدول 3- تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی میوه پرتقال
تامسون ناول

تیما	عملکرد (تن در هکتار)	قطر میوه (میلی‌متر)	قطر پوست (میلی‌متر)	وزن میوه (گرم)	چگالی میوه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
شاهد (بدون محلول پاشی)	24/12 b	73/94 b	2/80 c	290/13 b	1/012 a
محلول پاشی پس از تشکیل میوه	25/68 a	78/61 a	3/89 a	308/36 a	1/014 a
محلول پاشی پیش از ریزش فیزیولوژی میوه	25/23 a	78/53 a	3/41 b	308/04 a	1/012 a
محلول پاشی در اواخر فاز دوم رشد میوه	24/32 b	74/44 b	2/82 c	291/93 b	1/013 a

جدول 4- تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم بر برخی ویژگی‌های کیفی عصاره میوه پرتقال
تامسون ناول

تیما	pH	مواد جامد محلول (درصد)	ویتامین ث (mg/100ml)	اسید پته کل (mg/100ml)	چگالی عصاره میوه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
شاهد (بدون محلول پاشی)	3/08 b	9/77 a	67/45 c	1/35 a	0/914 b
محلول پاشی پس از تشکیل میوه	3/08 b	9/34 a	83/92 a	1/34 a	0/915 b
محلول پاشی پیش از ریزش فیزیولوژی میوه	3/25 a	9/33 a	78/89 b	1/33 a	0/921 a
محلول پاشی در اواخر فاز دوم رشد میوه	3/09 b	9/67 a	69/75 c	1/35 a	0/915 b

محلول پاشی نیتрат کلسیم با غلظت سه در هزار در مراحل کلیدی فنولوژی رشد میوه نشان داد که محلول پاشی پس از تشکیل میوه و پیش از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) بیشترین تأثیر را در افزایش کلسیم پوست میوه پرتقال تامسون ناول داشتند، اما تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم در اواخر فاز دوم رشد میوه بر افزایش غلظت کلسیم پوست میوه کمتر از محلول پاشی پس از تشکیل میوه و پیش از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) بود (شکل 15).



شکل 15- تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم در مراحل کلیدی فنولوژی بر غلظت کلسیم پوست میوه

نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داد که بافت‌های در حال توسعه، نیاز فوری و پیوسته به کلسیم دارند که توسط آوندهای چوبی تأمین می‌شود و به شدت به تعرق از سطح برگ در اندام هوایی وابسته است. کمبود کلسیم و ناهنجاری‌های ناشی از آن، زمانی ایجاد می‌شود که تعرق پایین و جریان شیره خام نتواند کلسیم کافی برای توسعه بافت‌های در حال توسعه را فراهم نماید. از این رو، کمبود کلسیم بیشتر در بافت‌های در حال توسعه و به ویژه در نواحی مریستمی جایی که تقسیم سلولی در حال انجام و سلول‌های جدید در حال تولید هستند، پیدا می‌شود (هوپکتین و مانر، 2004؛ وایت و برادلی، 2003). در مناطق مختلف شمال کشور به علت کمبود ساعات آفتابی به ویژه در آغاز فصل رشد و همچنین رطوبت نسبی زیاد در زمان توسعه سرشاخه‌ها، گل‌ها و میوه‌ها، احتمال کمبود کلسیم در بافت‌های در حال توسعه در بیشتر سال‌ها وجود دارد (شکل 16)، از سویی کلسیم فراوان‌ترین عنصر در

بیشتر خاک‌ها است و به ندرت کمبود آن در شرایط طبیعی وجود دارد. کلسیم به شکل کاتیون دو ظرفیتی (Ca^{2+}) جذب می‌شود و توسط آوند چوبی به اندام هوایی منتقل می‌شود و در آوندهای آبکش غیرمتحرک است. کلسیم در شیره آوند چوبی توسط جریان تعرق به سمت اندام هوایی و برگ‌ها منتقل می‌شود (هیرسچی، 2004). جذب کلسیم در ریشه درختان مرکبات به مناطقی از ریشه محدود می‌شود که حلقه کاسپارین بین سلول‌های آندودرمی وجود ندارد، یا تخریب شده یا سلول‌های آندودرمی احاطه‌کننده استوانه مرکزی (استیل) چوب بنبه‌ای نشده‌اند. این نواحی بیشتر شامل نوک ریشه‌ها و محل تشکیل جوانه‌های جانبی است، از این‌رو محلولپاشی کلسیم پس از تشکیل میوه می‌تواند در بهبود کیفیت میوه بسیار موثر باشد (مارشور، 1995؛ وایت و برادلی، 2004).

کلسیم نمی‌تواند دوباره از بافت‌های مسن جابجا و توسط آوند آبکشی توزیع شود، از این‌رو فراهمی کلسیم در بافت‌های در حال رشد توسط آوند چوبی انجام می‌شود. محلول‌پاشی کلسیم (نیترات کلسیم) بیشتر برای گریز از کمبود کلسیم در میوه‌ها استفاده می‌شود زیرا کلسیم تأثیر زیادی در بهبود کیفیت میوه مرکبات دارد. مقدار کلسیم در میوه بسیار کمتر از برگ‌ها است بیشترین جذب کلسیم در گیاه مرکبات از تشکیل میوه تا 45 الی 50 روز پس از گلدهی است و پس از ریزش فیزیولوژی تابستانه (June drop) جذب به سرعت کاهش می‌یابد. در میوه مرکبات، بیشتر کلسیم در فاز اول رشد میوه تا حدود 100 روز پس از گلدهی به بافت آلبو وارد و سپس کلسیم به طور مساوی بین آلبو و گوشت میوه (pulp) توزیع می‌شود. پس از ریزش فیزیولوژی واکس سطح پوست میوه به سرعت توسعه می‌یابد و افزایش واکس موجب کاهش کارایی جذب کلسیم خواهد شد.



شکل 16- نشانه‌های کمبود کلسیم و بور در نوک سرشاخه‌ها درختان مرکبات

فصل ششم

مهمترین عوامل موثر در کلسیم میوه

1. رشد و حجم ریشه: رشد و توسعه ریشه برای جذب کلسیم ضروری و یکی از راهکارهای جلوگیری از اشکار شدن نشانه‌های کمبود در درختان است. کلسیم تنها توسط نوک ریشه‌های جوان و در حال توسعه (ریشه‌های فیبری) جذب می‌شود که در آن‌ها دیواره‌های سلولی اپیدرم هنوز چوبی نشده‌اند. این ریشه‌های جوان و در حال توسعه، بیشترین راندمان جذب آب و عناصر غذایی را دارند و هنگامی که ریشه‌ها مسن شدند و یک لایه چوبی شده در این سلول‌های اپیدرمی ایجاد شود جذب آب و عناصر غذایی به ویژه کلسیم کم خواهد شد. چوبی شدن یک ماده واکس یا موم مانند است که آب و عناصر غذایی نمی‌توانند از آن عبور کنند. هر عاملی که رشد ریشه‌ها را کم کند مانند: درجه حرارت کم، تهویه نامناسب، تنش مانداب و غرقاب، تنش خشکی، وضعیت تغذیه‌ای ضعیف و غلظت زیاد یون هیدروژن (H^+) در منطقه ریشه می‌توانند جذب و انتقال کلسیم را کم و یا مختل کنند که بیشتر به علت توقف رشد ریشه‌ها و در نتیجه نبودن سلول‌های جوان در نوک ریشه‌ها است (اولی و بندر، 2009).

2. مدیریت تغذیه: مصرف کافی نیتروژن می‌تواند از کمبود کلسیم جلوگیری کند. مصرف زیاد نیتروژن موجب افزایش رشد، کاهش غلظت کلسیم در بافت‌ها و افزایش احتمالی ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم می‌شود. مصرف زیاد کودهای نیتروژنی موجب تحریک رشد رویشی سرشاخه‌ها (به‌ویژه در فاز اول رشد میوه) شده و بیشتر کلسیم انتقالی در شیر خام به این نقاط رشد وارد می‌شود و کمبود کلسیم را در میوه‌چه‌ها تشدید می‌کند. وجود غلظت زیاد کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، آمونیم، منیزیم و یون هیدروژن در محلول خاک، جذب و توزیع کلسیم را کاهش می‌دهند. غلظت زیاد یون آلومینیم در محلول خاک نیز جذب و توزیع کلسیم را کاهش می‌دهد. بررسی نقش آنیون‌های نترات، کلر، سولفات و بی‌کربنات در ایجاد ناهنجاری‌های کمبود کلسیم نشان داد که یون کلر بیشترین تأثیر را در کمبود و ناهنجاری‌های کمبود کلسیم دارد که به

دلیل کاهش انتقال کلسیم به اندام هوایی (تا غلظت ناکافی کلسیم در محیط ریشه) و بافت‌های در حال توسعه است. زیادی یون‌های محلول در محیط ریشه می‌تواند در جذب کلسیم اختلال ایجاد کنند. مصرف زیاد کودهای سولفات آمونیوم و سولفات منیزیم، جذب و انتقال کلسیم به اندام هوایی را کاهش می‌دهند. اثر منیزیم در جذب کلسیم به مقدار نسبی کلسیم و منیزیم در محلول خاک بستگی دارد. اگر مجموع غلظت کلسیم و منیزیم در محلول خاک، کمتر از 20 میلی‌مول در لیتر باشد معمولاً نسبت جذب کلسیم به منیزیم، مشابه نسبت غلظت آن‌ها در محلول خاک خواهد بود و با افزایش تبخیر - تعرق، نسبت جذب منیزیم به کلسیم افزایش می‌یابد. اما در محلول‌های با غلظت کم (کمتر از یک میلی‌مول در لیتر)، جذب کلسیم بیشتر توسط فعالیت‌های متابولیکی کنترل می‌شود. مصرف زیاد کودهای منیزیمی و آمونیومی و افزایش غلظت پتاسیم و آمونیوم در محلول خاک، جذب کلسیم توسط ریشه‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. در شرایط و غلظت یکسان، اثر آمونیوم در کاهش جذب کلسیم بیشتر از پتاسیم است.

3. شوری: غلظت زیاد نمک‌ها در محلول خاک موجب تشدید کمبود کلسیم در درختان مرکبات می‌شود. محدود شدن جذب آب در شوری‌های زیاد می‌تواند یکی از دلایل کمبود کلسیم باشد و با کاهش جذب آب، جذب و انتقال کلسیم نیز کاهش می‌یابد. همچنین غلظت زیاد سدیم و کلر در محلول خاک به ترتیب در جذب و انتقال کلسیم به اندام هوایی درختان تأثیر دارند و موجب تشدید ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم می‌شوند (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393).

4. رطوبت خاک و مانداب: توسعه خسارت ناشی از کمبود کلسیم بیشتر در خاک‌های با رطوبت زیاد رخ می‌دهد. همچنین دوره‌های بی‌هوازی ناچیز خاک در شرایط آب و هوایی مرطوب می‌تواند موجب کاهش موقتی انتقال کلسیم به سرشاخه‌ها شود. این‌رو رطوبت بهینه خاک (نه خیلی مرطوب و نه خیلی خشک) در حرکت کلسیم کافی از محلول خاک به سطح ریشه و سپس به اندام هوایی کمک می‌کند. مدیریت مناسب آبیاری و دوری از تنش خشکی و تنش ماندابی در منطقه ریشه درختان مرکبات، به‌ویژه در مرحله اول رشد میوه در افزایش کلسیم میوه‌ها بسیار موثر است. تنش مانداب به ویژه در آغاز فصل رشد (فاز اول رشد میوه)، جذب کلسیم توسط ریشه و انتقال آن به اندام

هوایی را به شدت کاهش می‌دهد. تنش مانداب بیشتر ناشی از بارندگی‌های زیاد و پیایی در مازندران و همچنین آبیاری زیاد و نامناسب است که موجب کاهش تهویه خاک منطقه ریشه می‌شود (اسدی کنگرشاهی، 1398؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393).

5. رطوبت نسبی محیط: کلسیم در ریشه و اندام هوایی گیاهان با جریان تعرق به اندام هوایی (میوه و برگ‌ها) حرکت می‌کند، از این‌رو کاهش تعرق در شرایط محیطی با رطوبت نسبی زیاد می‌تواند جذب کلسیم را کم کند. دلایل کاهش انتقال کلسیم در شرایط محیطی با رطوبت نسبی زیاد نخست به علت افزایش سرعت رشد بوده که می‌تواند تقاضای بافت‌های مریستمی را برای کلسیم افزایش دهد و براساس اصل رقت، غلظت کلسیم در بافت‌های در حال توسعه می‌تواند به کمتر از حد بحرانی خسارت برسد. دوم اینکه، رطوبت نسبی زیاد میزان تعرق در میوه‌ها و برگ‌ها را کم می‌کند که موجب کاهش جذب آب و انتقال آن به این اندام‌ها می‌شود و در نتیجه غلظت کلسیم در سرشاخه‌ها و میوه‌ها کاهش می‌یابد (اولی و بندر، 2009).

6. نور: شدت نور زیاد، رشد میوه‌ها را زیاد و می‌تواند کمبود کلسیم را تشدید کند. شرایط محیطی مناسب برای تعرق بالای برگ‌های بالغ، هدررفت آب گیاه و تنش آبی گیاهان موجب کاهش جریان شیر خام و جذب کلسیم توسط میوه‌ها و در نتیجه افزایش حساسیت میوه‌ها به ناهنجاری کمبود کلسیم می‌شود (هو و وایت، 2005).

7. درجه حرارت محیط: درجه حرارت‌های بسیار کم و زیاد، جذب کلسیم را کم و در نتیجه کمبود کلسیم را تشدید می‌کنند. اختلاف منفی بین درجه حرارت روز و شب می‌تواند اشکار شدن ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم را تشدید کند.

8. تنش خشکی: تنش خشکی، رشد ریشه، جذب کلسیم توسط ریشه و انتقال آن به اندام هوایی را کاهش می‌دهد. تنش آبی موجب کاهش شیب پتانسیل آبی بین میوه و برگ‌های جوان با تعرق کم می‌شود در نتیجه جذب کلسیم را کاهش و حساسیت این بافت‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش می‌دهد.

9. تراکم خاک: نتایج پژوهشی نگارندگان در بیشتر باغ‌های شمال کشور نشان داد که با افزایش تراکم و در نتیجه جرم مخصوص ظاهری خاک زیرین، عملکرد در واحد سطح کاهش می‌یابد. رشد ریشه‌های ریز معمولاً در لایه‌های با 50 درصد یا بیشتر

سنگریزه یا لایه‌های با فشردگی زیاد، محدود می‌شود. معمولاً عمقی از خاک، که در آن لایه‌ای با جرم مخصوص ظاهری بیشتر از حد بحرانی وجود داشته باشد، پتانسیل باروری خاک را تعیین می‌کند. حد بهینه و بحرانی جرم مخصوص ظاهری برای خاک‌های رسوبی، به ترتیب حدود $1/2-3$ و $1/60-1/5$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. برای رسیدن به عملکرد بالا در خاک‌های با بافت ریز و متوسط، جرم مخصوص ظاهری $1/1-1/3$ گرم بر سانتی‌متر مکعب با $40-50$ درصد ذرات جامد درشت و با عمق حداقل $70-80$ سانتی‌متر، نیاز است. خاک‌های با عمق بیشتر از 2 متر، بافت یکنواخت و زهکشی خوب در لایه‌های زیرین، عمق آب زیرزمینی پایین‌تر از 150 سانتی‌متر در تمام طول سال، مناسب‌ترین خاک‌ها برای کشت مرکبات هستند. بیشترین ریشه‌های مرکبات در عمق $80 - 70$ سانتی‌متری تجمع می‌یابند. پژوهش‌های انجام شده در خاک‌های عمیق سنگریزه‌دار نشان داده است که در خاک‌های با بیشتر از 15 درصد سنگریزه، عملکرد مرکبات کمتر از 50 درصد خاک‌های بدون سنگریزه با عمق یکسان است (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1396).

10. بافت خاک: بافت خاک در واقع، مقدار نسبی ذرات شن، سیلت و رس را در خاک‌های معدنی نشان می‌دهد. درختان مرکباتی که در بافت‌های بسیار سبک (شنی، شن لومی) کشت می‌شوند یا دارای مقدار زیادی شن در منطقه ریشه هستند به علت ظرفیت نگهداری کم آب به مدیریت آبیاری فشرده‌تری نیاز دارند. حجم زیاد آب مصرفی در هر آبیاری (در یک زمان) می‌تواند موجب آب‌شویی شدید عناصر غذایی از جمله کلسیم شود. در مقابل، خاک‌های بافت ریز (رسی، رس شنی و رس سیلتی) بیشتر مشکل ساختمانی و زهکشی دارند که موجب کاهش توسعه ریشه، تشدید کمبود کلسیم، تشدید خشکیدگی سرشاخه‌ها و زوال مرکبات می‌شوند. کلاس‌های متوسط و به نسبت درشت (لوم شنی، لوم، لوم سیلتی و سیلتی) مناسب‌ترین کلاس‌های بافت خاک برای کاشت درختان مرکبات هستند. بافت‌های لوم رسی‌سیلتی، لوم رسی، لوم رسی‌شنی به نسبت سنگین هستند و مدیریت مناسب کاشت و داشت از جمله انتخاب پایه مناسب، ایجاد بستر مناسب در زمان احداث باغ و همچنین مدیریت کوددهی در هنگام فصل رشد متناسب با فنولوژی درختان در این خاک‌ها در افزایش عملکرد و کیفیت میوه آن‌ها بسیار موثر است (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1396).

11. هرس: هرس شدید زمستانه موجب تشدید رشد رویشی سرشاخه‌ها و افزایش غیرمعمول اندازه میوه‌ها می‌شود که یکی از دلایل اصلی کمبود کلسیم و پفی شدن میوه‌ها در برخی از ارقام مرکبات است. هرس مناسب شکل‌دهی و مدیریت مناسب هرس درختان بارده موجب بهبود تهویه، کاهش رطوبت نسبی درون تاج درختان و همچنین نفوذ نور بیشتر به داخل تاج درختان و افزایش تعرق میوه‌چه‌ها به ویژه در فاز اول رشد میوه می‌شود که در جذب و انتقال کلسیم به میوه‌چه‌ها و میوه‌های جوان بسیار موثر است. در مقابل هرس نکردن یا مدیریت نامناسب هرس شکل‌دهی و هرس درختان بارده (به ویژه در ژنوتیپ‌های پررشد) و همچنین زیادی مصرف کودهای شیمیایی به ویژه کودهای نیتروژنی موجب افزایش تراکم تاج درختان، کاهش تهویه و کاهش تعرق میوه‌های داخل تاج شده که منجر به کاهش کلسیم میوه‌های درون تاج می‌شود که کیفیت و انبارمانی آن‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این‌رو مدیریت تغذیه درختان پس از هرس در درختان میوه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (نادیس و همکاران، 2001؛ اخلاقی امیری و اسدی کنگرشاهی، 1399).

12. pH محلول خاک: کاهش pH محلول خاک به کمتر از 4/5، قابلیت استفاده و در نتیجه جذب کلسیم توسط ریشه‌ها را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. اما در pH های بیشتر از 5/5 (به علت افزایش غلظت یون کلسیم در محلول خاک نسبت به هیدروژن) تأثیر pH در جذب کلسیم کاهش می‌یابد. پتانسیل آهک که رابطه بین یون هیدروژن و غلظت کلسیم را بیان می‌کند در محاسبه اثر pH در حلالیت ترکیبات کلسیم خاک مانند فسفات‌های کلسیم بسیار مفید است.

13. محلول پاشی کلسیم: محلول پاشی کلسیم در کاهش ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم موثر است. ناهنجاری‌های مربوط به کمبود کلسیم معمولاً با ناتوانی گیاهان برای انتقال کلسیم کافی به اندام میوه‌ها بیشتر مرتبط با میزان ناکافی کلسیم در خاک است. کلسیم یک عنصر نسبت غیر متحرک در گیاهان است از این‌رو محلول پاشی آن می‌تواند کمبود آنرا جبران کند. محلول پاشی تمام اندام‌های رشدی انتهایی جوان، میوه‌ها و در دیگر اندام‌های در حال توسعه در جبران کمبود کلسیم در این اندام‌ها بسیار مهم است و محلول پاشی اندام‌ها و برگ‌های مسن و قدیمی، تأثیری در جبران کمبود کلسیم در این اندام‌ها ندارد.

فصل هفتم

مدیریت تغذیه، آبیاری و کلسیم

نیتروژن: باغداران بیشتر با مصرف زیاد نیتروژن سعی در تحریک رشد رویشی و افزایش عملکرد دارند. مصرف زیاد نیتروژن ممکن است حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش دهد. افزون بر مقدار کل نیتروژن، شکل نیتروژن مصرفی نیز بر کیفیت میوه‌ها تأثیر دارد. کوددهی خاکی با آمونیم بیشتر از نترات بر مقدار کلسیم میوه‌ها تأثیر دارد. بین آمونیم و کلسیم برهمکنش منفی برای جذب توسط ریشه‌ها وجود دارد از این رو مصرف زیاد کودهای آمونیومی در منطقه ریشه جذب کلسیم را کاهش می‌دهد. به هر حال، آمونیم در لایه‌های سطحی خاک به سرعت تبدیل به نترات می‌شود. نتایج نشان داده است که مقدار کل نیتروژن مصرفی در خاک بسیار بیشتر از شکل نیتروژن مصرفی در افزایش ناهنجاری کمبود کلسیم تأثیر دارد. مصرف زیاد نیتروژن موجب تشدید رشد رویشی می‌شود. نظر به این که کلسیم با آب در جریان تعرق حرکت می‌کند از این رو سطح ویژه بیشتر برگ‌ها، موجب حرکت و انتقال بیشتر آب و کلسیم به برگ‌ها نسبت به میوه‌ها می‌شود و در نتیجه مقدار کلسیم میوه‌ها کاهش می‌یابد. از سوی دیگر کوددهی نیتروژن موجب افزایش اندازه میوه و غیرمستقیم افزایش توسعه ناهنجاری‌های کمبود کلسیم می‌شود. میوه‌های با غلظت زیاد نیتروژن، تنفس و میزان تولید اتیلن بیشتری پس از برداشت خواهند داشت که مراحل رسیدن و پیری آن‌ها را تشدید می‌کند و این غلظت زیاد نیتروژن در میوه‌ها، به احتمال زیاد مکانیسم‌هایی که موجب ناهنجاری‌های کمبود کلسیم می‌شوند را تشدید می‌کند (برملاژ و وایزرال 2004؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393).

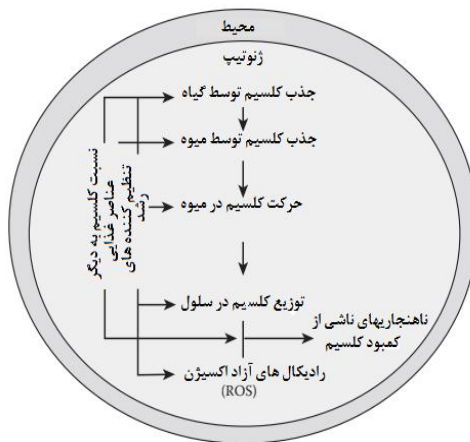
پتاسیم و منیزیم: کوددهی زیاد پتاسیم و منیزیم ممکن است ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را افزایش دهند. معمولاً غلظت پتاسیم، منیزیم و کلسیم در ریشه و برگ‌های مسن زیاد است، اما از آنجا که پتاسیم به آسانی در داخل گیاهان جابجا و توزیع دوباره می‌شود از این رو میوه‌ها و اندام‌های مریستمی مشکلی از نظر فراهمی پتاسیم ندارند.

غلظت منیزیم و به ویژه کلسیم در بافت‌هایی مانند میوه‌ها و برگ‌های جوان که از آوند آبکش تغذیه می‌کنند اغلب کم است. افزون بر آن در شروع توسعه سلولی میوه‌ها، اغلب اختلال در عمل آوندهای چوبی شروع و ممکن است منجر به کاهش جذب کلسیم میوه‌ها شود در حالی که عملکرد دستگاه آوند آبکشی نسبت به آوند چوبی تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند که برای فراهمی و انتقال پتاسیم به میوه‌ها مناسب است و موجب افزایش غلظت پتاسیم در میوه‌ها می‌شود. نسبت زیاد پتاسیم به کلسیم (K^+/Ca^{2+})، منیزیم به کلسیم (Mg^{2+}/Ca^{2+}) یا پتاسیم و منیزیم به کلسیم (K^++Mg^{2+}/Ca^{2+}) در میوه‌ها برای پیش‌بینی ناهنجاری‌های کمبود کلسیم استفاده می‌شوند. پتاسیم و منیزیم با کلسیم برای محل‌های پیوند در سطح غشا پلاسمایی رقابت می‌کنند اما نمی‌توانند نقش کلسیم را در ساختمان و پایداری غشا داشته باشند، در نتیجه کلسیم کمتری برای پیوند به غشای پلاسمایی وجود خواهد داشت و کمبود آن در غشاها، موجب افزایش نشت‌پذیری آن‌ها و مواد متابولیکی و سرانجام پلاسمولیز، شکست غشاها و مرگ سلول‌ها خواهد شد (کارلی و وایت، 2009؛ فریلاز و همکاران، 2010 و 2013).

بور: نقشی کلیدی در فرآیندهای زایشی مانند تولید دانه‌گرده و رشد لوله‌گرده دارد. مصرف بور در درختان دارای کمبود بور، تشکیل میوه و عملکرد را افزایش می‌دهد. بور اثر هم‌افزایی با کلسیم دارد و موجب افزایش غلظت کلسیم در میوه‌ها می‌شود و ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را کاهش می‌دهد. بور همچنین ممکن است فعالیت آنزیم ایندول استیک اسید اکسیداز را متوقف یا کاهش دهد که موجب افزایش ایندول استیک اسید و در نتیجه بهبود و آسانی حرکت کلسیم در آوندهای چوبی و همچنین تحریک تمایز آوندهای چوبی در دم میوه می‌شود. همچنین کوددهی خاکی بور، وزن خشک ریشه‌های فیبری و ریز که بیشترین جذب کلسیم را انجام می‌دهند را افزایش می‌دهد. گزارش‌های مختلف نشان داده است که بور نقش مهمی در پایداری ساختمانی و کارکردی غشا دارد. از این‌رو مصرف بهینه آن، ناهنجاری‌های قهوه‌ای شدن بافت‌های داخلی میوه را به ویژه در گلابی، به شدت کاهش می‌دهد (وجیک و تریدر، 2006؛ وجیک و همکاران، 2008).

مدیریت آبیاری: به طور کلی حساسیت درختان مرکبات به ناهنجاری کمبود کلسیم تحت تأثیر ژنتیک، عوامل محیطی و توزیع کلسیم سلولی (شکل 17) است. انتخاب

ژنوتیپ‌های با رسوب کلسیم کمتر در اندام‌های ذخیره یا پیوند کمتر به دیواره سلولی در کاهش حساسیت میوه‌ها به ناهنجاری‌های این عنصر موثر است. بیشتر مطالعات نشان داده است که آوند چوبی و نسبت آوند چوبی به آوند آبکشی در انتقال کلسیم به اندام‌های مصرفی و در نتیجه مقدار و غلظت کلسیم در اندام‌های با تعرق پایین (به ویژه میوه‌ها) موثر است. اما اطلاعات بیشتری برای شناخت سازوکار تنظیم حرکت کلسیم در درختان نیاز است. همچنین نسبت کلسیم به رادیکال‌های آزاد اکسیژن ($\text{Ca}^{2+}/\text{ROS}$) نیز در توسعه و شدت ناهنجاری‌های کلسیم موثر است. به نظر می‌رسد شناخت تنظیم توزیع کلسیم سلولی، مرحله نهایی در کنترل حساسیت بافت‌ها به کمبود کلسیم باشد و شناخت بیشتر سازوکار تنظیم توزیع کلسیم سلولی می‌تواند، روش مناسب‌تری برای کنترل حساسیت بافت‌های گیاهی به کمبود کلسیم نشان دهد. از این‌رو ساز و کار ناهنجاری کلسیم بسیار پیچیده و به تحقیقات و مطالعات بسیار بیشتری نیاز دارد.



شکل 17- تأثیر ژنتیک، عوامل محیطی و توزیع کلسیم سلولی بر حساسیت به ناهنجاری کمبود کلسیم

تجمع کلسیم در بافت‌های برگ و میوه به نوع گیاه و همچنین ویژگی‌های این اندام‌ها بستگی دارد. درباره نوع گیاه، انتقال کلسیم به برگ یا میوه توسط قابلیت استفاده کلسیم و فعالیت ریشه‌ها برای جذب کلسیم تعیین می‌شود. بیشترین جذب کلسیم توسط آپوپلاست نوک ریشه‌ها و مناطق رشدی ریشه‌های جانبی (آنجایی که فاقد حلقه

کاسپارین هستند یا حلقه هنوز کامل نشده است) به طور غیر فعال انجام می‌شود. در این حالت، رشد ریشه با افزایش تعداد نوک ریشه‌ها و همچنین ریشه‌های جانبی، موجب حرکت آپوپلاسمی بیشتر کلسیم به درون سیستم ریشه شده و در نتیجه جذب کلسیم را افزایش می‌دهند. جذب کلسیم توسط ریشه، ممکن است به مقدار کمی توسط جریان سیمپلاست نیز انجام شود. افزون بر این، جذب کلسیم ریشه در رقابت بین کلسیم و قابلیت استفاده دیگر یون‌ها در محلول خاک قرار دارد. از این‌رو قابلیت استفاده دیگر عناصر غذایی در خاک نیز بر جذب کلسیم و در نتیجه حساسیت برگ و میوه به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم تأثیر دارد.

کلسیم پس از جذب توسط ریشه‌ها، توسط جریان توده‌ای در پاسخ به شیب پتانسیل آبی ناشی از تعرق میوه‌ها، برگ‌ها و همچنین رشد آن‌ها، در آوندهای چوبی به طرف برگ‌ها و میوه‌ها حرکت می‌کند. برگ‌های بالغ تعرق بیشتری از برگ‌های جوان و میوه‌ها دارند که موجب تجمع بیشتر کلسیم در آن بافت‌ها می‌شود. بر این اساس، رطوبت نسبی بالای محیط، ممکن است موجب جذب و انتقال بیشتر کلسیم به میوه‌ها و اندام‌های مریستمی یا برگ‌های داخلی با تعرق کمتر شوند. افزون بر این، برگ‌های بالغ آب را فقط از آوندهای چوبی دریافت می‌کنند اما برگ‌های جوان و میوه‌ها آب را هم از آوندهای چوبی و هم از آوندهای آبکشی دریافت می‌کنند. با توجه به این که کلسیم تنها توسط آوندهای چوبی در گیاهان حرکت می‌کند از این‌رو جذب آب از آوند آبکشی، ظرفیت جذب کلسیم توسط شیره آوند چوبی به برگ‌های جوان و میوه‌ها را بیشتر (در مقایسه با برگ‌های بالغ) کاهش می‌دهد. چنین رفتاری در دیگر اندام‌ها مانند نواحی مریستمی نیز وجود دارد که تعرق کمتری دارند و آب مورد نیازشان از هر دو آوند چوبی و آبکشی دریافت می‌کنند که موجب می‌شود این اندام‌ها، حساسیت زیادی به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم داشته باشند. البته میوه‌هایی مانند مرکبات و سیب در بخش خارجی پوست‌شان یک لایه واکس دارند. این لایه واکس، پس از تشکیل میوه در اوایل بهار بسیار نازک و به صورت قطعات ناپیوسته است که به تدریج ضخیم‌تر و پیوسته‌تر می‌شود و در فاصله زمانی نزدیک به 45 تا 50 روز پس از تشکیل میوه، میوه‌چه‌ها حداکثر را تعرق دارند در نتیجه بیشتر آب مورد نیازشان از طریق آوندهای چوبی به این اندام‌ها منتقل می‌شود ولی پس از گذشت حدود 100 روز (متناسب با رقم و شرایط اقلیمی) جریان آوندهای چوبی به این اندام‌ها کمترین

شده و بیشتر آب مورد نیازشان از راه آوندهای آبکشی تأمین می‌شود از این‌رو مدیریت بهینه کف باغ و همچنین محلول‌پاشی کلسیم در فاز اول رشد میوه در تأمین و افزایش غلظت کلسیم در میوه‌ها بسیار مهم است (اسدی کنگرشاهی، 1397؛ ذکری و ایزربای، 2015).

بیشتر مطالعات نشان داده است که افزایش تعرق در میوه‌ها بدون تغییر در تعرق کل گیاه، در افزایش میزان کلسیم این اندام‌ها بیشتر از افزایش قابلیت استفاده کلسیم خاک موثر است. افزون‌بر این، کاهش در تعرق کل گیاه توسط کاهش کمبود فشار بخار آب می‌تواند حرکت شیره آوند چوبی (شیره خام) به طرف برگ‌های بالغ را کاهش داده و در مقابل حرکت آن را به طرف میوه‌ها (با تعرق کم) افزایش دهد که می‌تواند موجب افزایش تجمع کلسیم و کاهش حساسیت آن‌ها به ناهنجاری‌های ناشی از کمبود این عنصر شود. تنش آبی نیز موجب افزایش توسعه ناهنجاری‌های کمبود کلسیم در میوه‌ها و برگ‌های جوان با تعرق کم شود. تنش آبی که توسط کمبود آب یا شوری بالا ایجاد می‌شود موجب کاهش شیب پتانسیل آبی بین میوه و برگ‌های جوان با تعرق کم می‌شود در نتیجه جذب کلسیم را کاهش و حساسیت این بافت‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به این که کلسیم تجمع یافته در برگ‌های مسن قابلیت جابجایی یا توزیع دوباره و انتقال به بافت‌های دارای کمبود کلسیم و با تعرق کم را ندارد (به عبارتی در آوندهای آبکشی غیرمتحرک است)، تنش آبی این ناهنجاری را تشدید می‌کند. اگرچه تعرق و رشد از عوامل مهم تعیین کننده جریان شیره خام و جذب کلسیم هستند تعداد آوندهای چوبی و شیب هیدروستاتیک (پایدار آبی) مورد نیاز برای حرکت شیره خام می‌تواند در مقدار کلسیم میوه‌ها موثر باشد. مطالعات نشان داد است که تعداد آوندهای چوبی کارا (فعال) و تجمع کلسیم در میوه‌ها همزمان با رشد و توسعه میوه کاهش می‌یابد. از این‌رو تعداد آوندهای چوبی فعال و شیب هیدروستاتیک در این آوندها در افزایش تجمع کلسیم میوه و حساسیت آن‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم بسیار موثر است (ولانس و مولر، 1980؛ وایت، 2001).

فصل هشتم

منابع کودی کلسیم (مصرف خاکی، کودآبیاری و محلول پاشی و امکان اختلاط آنها در تانک کود)

کود آبیاری، مصرف کودهای محلول با آب آبیاری است که به‌طور معمول توسط سیستم‌های تحت فشار مانند آبیاری قطره‌ای انجام می‌شود. کودهای کلرید کلسیم، کربوکسیلات کلسیم و نیترات کلسیم، از معمول‌ترین کودهای کلسیمی محلول در آب هستند که می‌توانند توسط سیستم آبیاری برای درختان مرکبات مصرف شوند. کودهای تزریق شده به سیستم آبیاری باید کامل محلول باشند و هیچ‌گونه رسوبی ایجاد نکنند. برای کودآبیاری از منابع کودی با حلالیت بالا استفاده می‌شود. برخی منابع کودی کلسیم مناسب برای محلول پاشی یا کودآبیاری با فرمول شیمیایی و حلالیت آن‌ها در آب (کیلوگرم در مترمکعب) در جدول 5 آورده شده است. باغ‌داران باید مراقب باشند زمانی که کودهای محلول فسفر توسط سیستم‌های آبیاری تحت فشار (مانند سیستم آبیاری قطره‌ای) مصرف می‌کنند اگر pH مخلوط آب و کود، اسیدی نباشد فسفر می‌تواند با کلسیم محلول در آب آبیاری ترکیب و تشکیل یک ترکیب نامحلول بدهد که موجب بسته شدن درپرها شود. به‌طور مشابه، زمانی که یک منبع کود با یون اصلی کلسیم مانند نیترات کلسیم در محلول مصرف شود، استفاده از هر شکلی از فسفات یا سولفات در آن محلول، اجتناب شود و از شکل‌های کلات شده، کمپلکس شده یا شکل نیترات عناصر غذایی کم مصرف آهن، منگنز، روی و مس به جای شکل سولفات آن‌ها استفاده شود. از این‌رو در هنگام اختلاط کودها برای کودآبیاری یا در تانک محلول پاشی باید دقت شود که از کودهایی استفاده کرد که امکان اختلاط و به اصطلاح، با هم سازگاری داشته باشند. در جدول‌های 6 و 7، منابع کودی که امکان اختلاط دارند و همچنین اختلاط‌هایی که موجب کاهش حلالیت و یا رسوب می‌شوند نشان داده شده است. باغ‌داران می‌توانند از این جدول‌ها به عنوان راهنما برای اختلاط کودهای کلسیمی با دیگر کودهای شیمیایی برای کودآبیاری یا محلول پاشی استفاده کنند (اسدی کنگرشاهی، 1398).

جدول 5- منابع کودی کلسیم برای محلول پاشی و کود آبیاری (اسدی کنگرشاهی، 1398)

وزن مولکولی (گرم بر مول)	فرمول شیمیایی	کود
158/17	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	کربوکسیلات کلسیم
164/09	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O}$	نیتрат کلسیم
182/90	$\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$	کلرید کلسیم
374/30	CaEDTA	کلات کلسیم
490/43	$\text{Ca}[\text{C}(\text{OH})(\text{CHOH})_5\text{COO}]_2$	گلوکونات کلسیم

جدول 6- کودهایی که اختلاط آن‌ها با نیترات یا کلرید کلسیم موجب رسوب یا کاهش حلالیت آن‌ها در آب (برای کود آبیاری یا محلول پاشی) می‌شود (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393)

اختلاط کودها	رسوب (ناسازگار) یا کاهش حلالیت در آب
نیترات یا کلرید کلسیم با سولفات آمونیوم	کاهش حلالیت
نیترات یا کلرید کلسیم با سولفات پتاسیم	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با سولوپتاس	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با فسفات آمونیوم	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با سولفات آهن	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با سولفات منگنز	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با سولفات روی	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با سولفات مس	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با سولفات منیزیم	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با اسید فسفریک	رسوب (ناسازگار)
نیترات یا کلرید کلسیم با اسید سولفوریک	رسوب (ناسازگار)

جدول 7- سازگاری و امکان اختلاط کودهای کلسیمی با برخی کودها و ترکیبات شیمیایی معمول برای کود آبیاری و محلول پاشی

(اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393)

کود	اوره	نیتрат آمونیوم	سولفات آمونیوم	نیترات پتاسیم	کلرید پتاسیم	سولو پتاس	فسفات آمونیوم	سولفات آهن	سولفات منگنز	سولفات پتاسیم
نیترات یا کلرید کلسیم	✓	✓	R	✓	✓	X	X	X	X	X
کود	سولفات روی	سولفات مس	کلات های آهن	کلات های منگنز	کلات های روی	کلات های مس	سولفات منیزیم	اسید فسفریک	اسید سولفوریک	اسید نیتریک
نیترات یا کلرید کلسیم	X	X	R	R	R	R	X	X	X	✓

✓- سازگار (قابل اختلاط)، R- کاهش حلالیت، X- ناسازگار (غیر قابل اختلاط)

فصل نهم

راهکارهای عملی رفع کمبود کلسیم در مرکبات (اسدی کنگر شاهی و اخلاقی امیری، 1393؛ 1397)

- پرهیز از مصرف زیاد کودهای سولفات آمونیوم و به ویژه سولفات پتاسیم و سولفات منیزیم در آغاز فصل رشد (مرحله اول رشد میوه).
- زهکشی مناسب کف باغ و خروج آب‌های اضافی از منطقه ریشه (بیشترین تأثیر را در سلامت باغ و میوه دارد).
- مصرف بهینه آب آبیاری در طول فصل رشد و اجتناب از تنش خشکی (به‌ویژه از زمان گل‌دهی و تشکیل میوه تا پایان ریزش تابستانه).
- پرهیز از هرس شدید زمستانه درختان مرکبات (در یک سال) و انجام هرس مناسب و تدریجی، در سال‌های متوالی، از هرس شدید و یک‌باره درختان خودداری شود.
- مصرف کودهای نیتروژنی، متناسب با پیش‌بینی عملکرد میوه و نیاز مراحل فنولوژی و فیزیولوژی رشد میوه انجام شود.
- محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت 3 تا 6 در هزار افزون‌بر اوره (با بیورت پایین) با غلظت 2 تا 3 در هزار و یک مویان مناسب با غلظت مناسب (0/3 تا 0/5 در هزار)، پس از تشکیل میوه تا زمان بلوغ فیزیولوژیکی میوه و به فاصله زمانی 15 الی 30 روز در میان توصیه می‌شود. محلول‌پاشی کلسیم در فاز نخست رشد میوه، تأثیر بیشتری در بهبود کیفیت، افزایش اندازه میوه و افزایش غلظت کلسیم میوه‌ها دارد. مصرف خاکی کودهای کلسیمی در خاک‌های آهکی تأثیر چندانی در جبران کمبود کلسیم، بهبود کیفیت و اندازه میوه‌ها ندارد. از این‌رو به باغداران توصیه می‌شود از مصرف خاکی کودهای کلسیم، به روش پخش مستقیم و کودآبیاری در این خاک‌ها اجتناب کنند.
- به طور کلی حساسیت به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم به ژنتیک (رقم) و عوامل محیطی (موثر بر میزان کلسیم بافت و توزیع کلسیم سلولی) بستگی دارد. از

این‌رو حساسیت ارقام و عوامل محیطی که محدود کننده جذب کلسیم هستند بر میزان کلسیم بافت و توزیع کلسیم سلولی نقش دارند. پس مدیریت احداث باغ (رقم و پایه مناسب) و همچنین مدیریت عوامل محیطی در کنترل و مدیریت این ناهنجاری‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. به طوری که روش‌های مناسب برای کنترل ناهنجاری‌های کمبود کلسیم در هر منطقه می‌تواند متفاوت و خاص آن منطقه باشد.

- قابلیت استفاده مطلوب کلسیم در خاک و جذب بهینه کلسیم توسط ریشه‌ها، معمولاً از مهمترین عوامل موثر برای اطمینان از تجمع کلسیم در بافت برگ و میوه هستند. انتخاب ژنوتیپ‌ها و پایه‌های با توانایی جذب کلسیم بیشتر می‌تواند حساسیت درختان به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را کاهش دهد.
- مصرف بهینه دیگر عناصر غذایی نیز می‌تواند رقابت با کلسیم را برای جذب کاهش دهد و یا رشد رویشی زیاد درختان را مانع شود. رشد رویشی زیاد موجب حرکت بیشتر کلسیم به سمت برگ‌های مسن می‌شود و در مقابل انتقال کلسیم را به برگ‌های جوان و میوه‌ها (که تعلق کمتری دارند) را کاهش دهد.
- جذب کلسیم و حرکت آن به سمت میوه‌ها و برگ‌های جوان با تعلق پایین با تنش آبی گیاه همبستگی منفی دارد. از این‌رو مصرف بهینه آب می‌تواند جذب کلسیم توسط ریشه و انتقال آن به برگ‌های جوان و میوه‌های با تعلق پایین تسهیل کند.
- گرچه کلسیم بیشتر توسط آوندهای چوب منتقل می‌شود اما توسعه فناوری‌هایی که حرکت کلسیم را در آوندهای آبکشی امکان‌پذیر کند، می‌تواند حرکت کلسیم را از برگ‌های مسن به میوه‌ها و برگ‌های جوان با تعلق کم که بیشترین مقدار آب مورد نیازشان را از آوند آبکشی تأمین می‌کنند، آسان کند. یک نمونه از این فناوری برای بور توسعه یافته است. بور در آوندهای آبکشی غیرمتحرک بوده یا فقط تحرک بسیار محدودی در آوندهای آبکشی گیاهان عالی دارد. اما مطالعات نشان داده است که بور، اگر کمپلکس پایداری با سوربیتول تشکیل دهد می‌تواند در آوند آبکشی برخی گیاهان منتقل شود. برخی گیاهان اصلاح شده قابلیت تحرک دوباره بور از برگ‌های مسن به اندام‌های در حال توسعه را دارند در حالی

که تیپ وحشی آنها این توانایی را ندارد. تحرک کلسیم در آوند آبکشی، حساسیت و ارگان‌های مریستمی و میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم کاهش می‌دهد.

■ افزون‌بر تعداد بیشتر آوندهای چوبی کارا و فعال، یک شیب هیدروستاتیک مناسب برای حرکت شیرخام و کلسیم به میوه نیاز است. برای افزایش و ایجاد شیب هیدروستاتیک مناسب، رویکردهایی که تعرق میوه‌ها را افزایش می‌دهند مانند کاهش واکس سطح میوه و هرس بهینه سرشاخه‌ها و برگ‌های مسن توصیه می‌شود.

فصل دهم

کلسیم، ناهنجاری‌های فیزیولوژی، تنش‌ها و انبارمانی

کلسیم و شکاف خوردن میوه: شکاف خوردن میوه مرکبات با دیگر میوه‌ها متفاوت است. این تفاوت به علت مرفولوژی خاص میوه مرکبات است که شامل گوشت و پوست است افزون‌براین پوست از یک لایه اسفنجی سفید داخلی به نام پوست داخلی¹ یا آلبدو² و یک لایه خارجی پوست خارجی³ یا فلاودو⁴ تشکیل شده است. در طول مرحله نخست توسعه میوه (مرحله تقسیم سلولی)، بیشتر سلول‌های فلاودو تشکیل و پس از آن تقسیم سلولی فلاودو کاهش می‌یابد و در مقابل سلول‌های گوشت در مرحله دوم رشد میوه، شروع به توسعه می‌کنند. فشار ایجاد شده ناشی از توسعه سریع گوشت میوه موجب ایجاد ترک‌های ریز و شروع شکاف خوردن در خامه یا ناف انتهایی میوه در محلی می‌شود که پوست در آن نازکتر و استحکام ساختمانی آن نیز نسبت به بخش‌های دیگر پوست کمتر است. برخی عوامل محیطی می‌تواند موجب توسعه ضعیف‌تر پوست شوند و پوست را به شکاف خوردن مستعدتر نمایند (شکل 18). این عوامل شامل عدم تعادل عناصر غذایی به ویژه پتاسیم و فسفر، شرایط اقلیمی گرم و مرطوب، آبیاری نامنظم و محصول زیاد هستند. به نظر می‌رسد تنش در مرحله نخست توسعه میوه (II)، که بیشتر سلول‌های فلاودو تشکیل و پیوستگی ساختمانی آن‌ها تعیین می‌شود، مهمترین عامل تعیین کننده حساسیت میوه‌ها به شکاف خوردن میوه است. محصول زیاد (تعداد زیاد میوه)، آبیاری نامناسب و همچنین کوددهی نامناسب و ناکافی در طول این دوره بحرانی، پتانسیل شکاف خوردن میوه را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1390؛ برگمن، 1992).

کلسیم و شکستگی پوست داخلی یا کریزینگ: کلسیم متصل به پکتات در لایه میانی برای استحکام و سفتی دیواره سلولی (ناشی از پیوندهای متقابل زنجیره‌های پکتیک

¹ mesocarp

² albedo

³ exocarp

⁴ flavedo

لاملای میانی) و همچنین ویژگی‌های ژلاتینی پکتیک ضروری است. همچنین کلسیم به عنوان کوفاکتور در تغییر و تبدیل‌های آنزیمی، تنظیم کننده اسمزی و پیغام‌بر ثانویه در واکنش‌های آنزیمی عمل می‌کند. در بافت‌های با کمبود کلسیم، فعالیت پلی‌گالاکتوروناز افزایش می‌یابد که این پدیده موجب تجزیه دیواره‌های سلولی و تخریب بافت‌های تحت تأثیر می‌شود. شکستگی بافت پوست داخلی میوه مرکبات در شکل‌های 19 و 20 نشان داده است (گریسون، 1981؛ استوری و همکاران، 2002؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1390).



شکل 18- شکاف خوردن در پرتقال والنسیا



شکل 19- کریزینگ در واشنگتن ناول



شکل 20- کریزینگ در نارنگی کلمانترین

کلسیم و تنش سرما و یخبندان: کمبود کلسیم، حساسیت درختان را به تنش سرما و یخبندان افزایش می‌دهد. معمولاً ژنوتیپ‌هایی که تحمل بیشتری به تنش سرما دارند، توانایی نگهداری و ثبات پتانسیل آب برگ‌هایشان با بستن روزنه‌ها و جلوگیری از هدر رفت آب را دارند. کلسیم، یک عنصر ضروری برای بسته شدن روزنه‌ها در اثر وقوع تنش سرما و یخبندان در ژنوتیپ‌های متحمل به این تنش است. افزایش مصرف کلسیم، بسته شدن سریعتر روزنه‌ها را امکان‌پذیر می‌کند و این اثر، در درختانی که در معرض تنش‌های سرما و یخبندان قرار می‌گیرند بسیار مشخص است. همچنین بسته شدن روزنه‌ها ناشی از اسید آسبیزیک (ABA) تا حدودی به وسیله کلسیم رها شده از ذخایر سلول‌های نگهبان روزنه یا آپوپلاست، واسطه می‌شود و این عمل سبب شده است که از کلسیم به‌عنوان یکی از مهمترین عناصر در تحمل درختان به سرمازدگی و محافظت برگ‌ها از دهیدراسیون نام برده شود. در هنگام رخداد تنش سرما و یخبندان، کلسیم درون سیتوپلاسم سلول افزایش می‌یابد و این افزایش از کلسیم فضای بیرون سلولی تأمین می‌شود. افزایش مقدار کلسیم در هنگام رخداد تنش سرما و یخبندان برای پاسخ به تنش سرما و یخبندان ضروری است. کلسیم از راه پروتئین‌های تنظیم‌کننده کلسیم یا پروتئین‌های دارای اثر متقابل با کلسیم عمل می‌کند. بیشتر پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کالمدولین‌ها در القاء ژن‌های متحمل به تنش سرما موثر هستند. به طور خلاصه، یکی از مهمترین پاسخ‌های گیاهان به تنش سرما و یخبندان، افزایش مقدار کلسیم سیتوزول است. در صورتی که درختان کمبود کلسیم داشته باشند القاء ژن‌ها برای سازگاری به سرما و یخبندان انجام نخواهد شد. مطالعات میدانی هم نشان داده است که خسارت درختان مرکبات دارای کمبود کلسیم، در هنگام رخداد تنش سرما و یخبندان بسیار بیشتر از درختانی است که کلسیم بهینه در برگ دارند (لیکوپز و همکاران، 2006؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393).

بررسی‌های نگارندگان نشان داده که تنش‌های غیرزنده (مانند تنش مانداب، نوسان سطح ایستابی، تنش سرما و گرما) مهمترین عوامل محدود کننده رشد و عملکرد مرکبات در کشور هستند. البته تنش‌های زنده (مانند برخی بیماری‌های ویروسی و ویروئیدی) نیز از اهمیت زیادی برخوردار هستند، اما نقش آن‌ها بسیار کمتر از تنش‌های غیرزنده بوده و سهم تنش‌های غیرزنده به‌شکل فزاینده‌ای در حال افزایش است. درختانی که دچار این

تنش‌های غیرزنده (مثل تنش مانداب، درجه حرارت‌های بالا و پایین و خشکی) می‌شوند، معمولاً دریافت نورشان بسیار بیشتر از آن مقداری است که می‌تواند در فرایند انتقال الکترون فتوسنتزی و تثبیت دی‌اکسیدکربن مصرف شود. این دریافت نور بیشتر، موجب می‌شود که زیادی انرژی نورانی جذب شده و احیا کننده‌های نوری در کلروپلاست تجمع یابند و سبب فعال شدن اکسیژن مولکولی و تبدیل آن به گونه‌های فعال اکسیژن شوند. اگر این گونه‌های فعال اکسیژن به‌طور کافی زودده نشوند، خسارت‌های اکسیداسیون نوری در کلروپلاست‌ها رخ خواهد داد که موجب خسارت به کلروفیل، اکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه، مرگ سلول‌ها می‌شوند. با افزایش محدودیت مصرف انرژی نورانی جذب شده در فتوسنتز، خسارت اکسیداسیون نوری در کلروپلاست‌ها با تنش‌های غیرزنده افزایش خواهد یافت. با توجه به این که عناصر غذایی برای پایداری زنجیره انتقال الکترون فتوسنتزی و متابولیسم کربن ضروری هستند، از این‌رو اختلال در وضعیت تغذیه‌ای درختان میوه و نبودن مدیریت مناسب آن‌ها در زمان بحرانی، می‌تواند خسارت اکسیداسیون نوری را تشدید کند و عملکرد درختان را کاهش دهد. مطالعات بسیار نشان داده که درختان دچار تنش‌های محیطی نیاز بیشتری به عناصر غذایی معدنی، به ویژه نیتروژن، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و روی، برای به حداقل رساندن خسارت تنش‌های محیطی دارند (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393 و 1395).

کلسیم و بیماری‌های قارچی: کلسیم مقاومت بافت‌های گیاه را در مقابل آلودگی قارچ‌های پیتیوم¹، اسکروتینا²، بوتیریس³، فوزاریم⁴ افزایش می‌دهد. همچنین فراهمی کلسیم به طور قوی در کاهش تلقیح قارچ‌های زنگ⁵ موثر بوده که نشان می‌دهد تغذیه بهینه کلسیم در سلامت درختان موثر است. بیماری HLD که به بیماری گرینینگ⁶ مرکبات معروف است در بسیاری از مناطق مرکبات کاری جهان از جمله مناطق جنوبی کشور وجود دارد. این بیماری توسط باکتری‌های محدود یا مسدود کننده آوند آبکشی

¹ Pythium

² Sclerotinia

³ Botrytis

⁴ Fusarium

⁵ Rust fungus

⁶ Huanglongbing

وجود می‌آید که توسط حشراتی به نام پسیل مرکبات¹ منتقل می‌شود. این حشرات بیشتر از برگ‌های نرم تغذیه می‌کنند. نشانه‌های گرینینگ در درختان آلوده شامل کلروز یا لکه‌های زرد برگ‌ها، سرشاخه‌های زرد، چوب پنبه‌ای شدن رگبرگ‌ها، توقف رشد، توقف رشد جدید ریشه و عملکرد پایین و همچنین میوه‌های کوچکتر، سبز، بدشکل با بذریه‌های سقط شده که برخی از این نشانه‌ها همانند نشانه‌های کمبود کلسیم است. غلظت کلسیم، منیزیم و بور در برگ‌های گیاهان آلوده به HLB کمتر از گیاهان سالم است. با توجه به تأثیر تغذیه کلسیم در پایداری دیواره سلولی، تغذیه کلسیم موجب تشکیل برگ‌های با استحکام بیشتر می‌شود که مقاومت آن‌ها را در مقابل هجوم و حمله پسیل افزایش می‌دهد. افزون‌بر این، کلسیم ممکن است اثرات منفی HLB در رشد ریشه درختان آلوده را خنثی کند. نشانه‌هایی وجود دارد که تغذیه بهینه می‌تواند نشانه‌های HLB را کاهش و بهره‌وری و عمر اقتصادی درختان را افزایش دهد و به نظر می‌رسد مدیریت تغذیه کلسیم در افزایش بهره‌وری و افزایش عمر اقتصادی درختان موثر است (گوتالد و همکاران، 2007؛ راهام و پونجا، 2002).

اهمیت کلسیم در مکانیسم دفاعی سلول‌ها بیشتر ناشی از نقش عمومی تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی کلسیم است. کلسیم با بهبود قدرت مکانیکی سلول، استحکام غشای سلولی و همچنین استحکام دیواره سلولی به طور مستقیم در مقاومت برگ‌ها، میوه‌ها، ریشه‌ها و دیگر بافت‌های گیاهی در مقاومت و کاهش نفوذ پاتوژن به این بافت‌ها موثر است. بخش زیادی از کلسیم (برخلاف دیگر عناصر غذایی پر مصرف) در دیواره سلولی بافت‌های گیاهی قرار دارد که به علت وجود جایگاه‌های زیاد برای قرار گرفتن آن در دیواره‌های سلولی و همچنین انتقال بسیار کم کلسیم از غشای سیتوپلاسم و ورود آن به سیتوپلاسم سلول است. در تیغه میانی دیواره سلولی، کلسیم به شدت به گروه‌های کربوکسیل اسید گالاکتورونیک (پکتین‌ها) می‌چسبد و غیرقابل تبادل می‌شود. در بیشتر دولپه‌ای‌ها از جمله مرکبات، 50 درصد از کلسیم به شکل پکتات‌های کلسیم است. تجزیه پکتات‌ها، توسط آنزیم پلی‌گالاکتوروناز انجام می‌شود و غلظت زیاد کلسیم در بافت‌ها به شدت از فعالیت این آنزیم جلوگیری می‌کند. در مقابل، در بافت‌های دارای کمبود کلسیم، فعالیت

¹ Citrus psyllid

این آنزیم افزایش می‌یابد، از این‌رو مقدار پکتات کلسیم در دیواره‌های سلولی گیاهان و میوه‌ها، در حساسیت این بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی بسیار موثر است. به طوری که هر چه مقدار کلسیم بیشتر باشد حساسیت بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی کاهش می‌یابد (تایلور و لوکاسیو، 2004؛ گرافتون، 2016).

کلسیم و تنش خشکی: نقش کلسیم بر افزایش حساسیت به تنش خشکی به دلیل اثر سیگنالی کلسیم در کنترل حرکت روزه‌ها به خوبی مستند شده است. برای باز بودن پایدار روزه‌ها، کلسیم باید از سیتوپلاسم سلول‌های نگهبان خارج شوند اما بسته شدن روزه‌ها با کلسیم زیاد در سیتوپلاسم تحریک می‌شود. باز بودن روزه‌ها برای گرفتن دی‌اکسیدکربن از اتمسفر برای فتوسنتز ضروری است. به هرحال، جذب دی‌اکسیدکربن همراه با هدر رفت مقدار زیادی آب از گیاهان است از این‌رو، باز و بسته شدن روزه‌ها به شکل بسیار ظریفی در گیاهان زمینی تنظیم می‌شود. برای جلوگیری از تلفات آب، روزه‌ها معمولاً در شرایط تاریکی، زمانی که فتوسنتز انجام نمی‌شود، بسته هستند. خروج کلسیم از سلول‌های نگهبان موجب توقف بسته شدن سلول‌های روزه‌ها می‌شود. این ممکن است موجب هدررفت آب غیرمولد و در نتیجه راندمان پایین آب مصرفی در محصولات خسارت دیده از کمبود کلسیم شود. اثر کلسیم در راندمان آب مصرفی، تنها محدود به تنظیم فعالیت روزه‌ها نیست بلکه کلسیم همچنین برای توسعه ریشه‌های سالم ضروری است. رشد ریشه در شرایط کمبود کلسیم به شدت کاهش می‌یابد و توقف رشد نوک ریشه در شرایط کمبود شدید کلسیم ایجاد می‌شود که منجر به تشکیل سیستم ریشه‌ای ضعیف می‌شود. ریشه‌های ضعیف و کم عمق نمی‌توانند به شکل موثر آب را از خاک جذب کنند که منجر به هدر رفت زیاد آب به شکل زهکشی و کاهش راندمان آب مصرفی می‌شوند. افزون‌بر جذب آب، ریشه‌ها مسئول جذب عناصر غذایی هم هستند فراهمی کلسیم جذب عناصر کم مصرف به ویژه منگنز را افزایش می‌دهد. جذب عناصر غذایی تحت تأثیر حجم توده ریشه و فعالیت ریشه است و هر دوی این‌ها متأثر از فراهمی کلسیم هستند. کلسیم قدرت رویشی ریشه را تحریک می‌کند که به نوبه خود سطح ویژه بیشتری را برای جذب عناصر غذایی ایجاد می‌کند (اتیچا و همکاران، 2017؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393).

کلسیم و انبارمانی: به طور کلی کمبود کلسیم موجب کاهش زمان انبارمانی میوه‌ها می‌شود که ناشی از افزایش میزان تنفس سلول‌ها و همچنین افزایش احتمال آلودگی‌های قارچی است. افزایش تنفس سلول‌ها به علت تجمع قندهای محلول و تجمع ترکیبات نیتروژنی محلول با وزن مولکولی کم در سلول‌ها است که سوبستراهای مناسبی برای آنزیم‌های تنفسی هستند. بیشتر کلسیم بافت‌های گیاهی در دیواره سلولی قرار دارد که پایداری ساختمانی سلول را ایجاد می‌کند. در مقابل، کمبود کلسیم سبب تجزیه دیواره سلولی و فروپاشی بافت‌ها مانند برگ‌ها، نوک سرشاخه‌ها و میوه‌ها می‌شود. از این‌رو، در کمبود کلسیم و فراهمی پایین کلسیم، درصد زیادی از میوه‌های مرکبات ریزش خواهند کرد. در کل همبستگی زیادی بین میزان کلسیم برگ و وزن خشک دیواره سلولی برگ‌های مرکبات وجود دارد. بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی نشان داده که در برگ‌های مرکبات دارای کلسیم کافی، ضخامت دیواره سلولی بیشتر است و به طور کلی کلسیم نقش حیاتی در استحکام دیواره سلولی و پایداری بافت دارد. کلسیم همچنین نقش معنی‌داری در مقاومت به بیماری‌های گیاهی (دفاع خود گیاه) دارد. پاتوژن‌های گیاهی نخست موجب تخریب دیواره سلولی، پیش از ورود به سلول می‌شوند. تخریب دیواره سلولی توسط آنزیم پلی‌گالاکتوروناز انجام می‌شود. پلی‌گالاکتوروناز آنزیمی است که توسط پاتوژن‌ها تولید و موجب هضم پکتین دیواره سلولی می‌شود. کلسیم مانع فعالیت این آنزیم می‌شود و موجب افزایش مقاومت به بیماری‌های گیاهی می‌شود (اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، 1393؛ تور، 2019).

نتیجه گیری و توصیه ترویجی

1. کلسیم در افزایش رشد ریشه و سرشاخه‌ها، جذب عناصر غذایی، پایداری دیواره سلولی و افزایش تولید نقش مهمی دارد، از این رو تغذیه بهینه کلسیم برای سلامتی درختان و بهره‌وری بیشتر باغ‌های مرکبات حیاتی است. نیاز کلسیم درختان مرکبات در مقایسه با دیگر درختان میوه به نسبت زیاد است. یک باغ مرکبات با توده زنده حدود 28 تن (وزن خشک) در هکتار حدود 600 کیلوگرم کلسیم در هکتار نیاز دارد. نزدیک به 60 تا 65 درصد از این کلسیم جذب شده توسط درختان مرکبات، در برگ‌ها وجود دارد. برای رشد بهینه و تولید میوه مطلوب برگ‌های بالغ درختان مرکبات باید بین 3 تا 4/9 درصد کلسیم (براساس وزن خشک) داشته باشند. جذب کلسیم ارتباط تنگاتنگی با تعرق دارد از این رو روشن است که اندام‌های دارای تعرق زیاد به ویژه برگ‌ها در مقایسه با اندام‌های با تعرق کم مانند میوه‌ها، کلسیم بسیار بیشتری داشته باشند. کلسیم در ساختمان بافت گیاهان و همچنین فرآیندهای فیزیولوژیکی نقش دارد در نتیجه بسیاری از ناهنجاری‌های رشد می‌تواند ناشی از کمبود کلسیم باشد. برگ‌های مرکبات دارای کمبود کلسیم، دارای کلروفیل کمتری هستند به طوری که ارتباط خطی بین کلسیم با کلروز در برگ‌های دارای کمبود کلسیم وجود دارد. افزون‌براین کلسیم برای عمل بهینه آنزیم فتوسنتزی روبیسکو¹ نیاز است. روبیسکو مخفف آنزیم ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز² که در نخستین مرحله فرایند تثبیت کربن نقش دارد و فرآیندی که در آن دی اکسید کربن فتوسنتزی توسط اندام‌های فتوسنتزی به مولکول‌های سرشار از انرژی مانند گلوکز تبدیل می‌شود، نقش دارد. در واقع آنزیم ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز، کربوکسیلاسیون ریبولوز بیس فسفات را تسریع می‌کنند. کلسیم مانع تجزیه روبیسکو در هنگام تنش می‌شود. کمبود کلسیم در برگ‌های مرکبات موجب کاهش میزان روبیسکو و دیگر آنزیم‌های مربوط به آن در برگ‌های مرکبات می‌شود. از این رو ظرفیت فتوسنتزی پایین

¹ Rubisco

² Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase

در برگ‌های درختان مرکبات با کمبود کلسیم، نتیجه غیرعادی بودن دستگاه فتوسنتزی برگ است. افزون‌براین کلسیم همچنین فعالیت کانال‌های یونی که مسئول جذب و انتقال عناصر غذایی در سلول هستند را کنترل می‌کند. از این‌رو تأثیر مثبت کلسیم در جذب عناصر کم مصرف می‌تواند به علت افزایش توده‌ی ریشه و یا بهبود فعالیت کانال‌های یونی است که یون‌های عناصر غذایی را به دورن سلول انتقال می‌دهد.

2. جذب کلسیم از ریشه در درختان مرکبات به مناطقی از ریشه محدود می‌شود که حلقه کاسپارین بین سلول‌های آندودرمی وجود ندارد، یا تخریب شده یا سلول‌های آندودرمی احاطه کننده استوانه مرکزی (استیل) چوب بنه‌ای نشده‌اند. این مناطق بیشتر شامل نوک ریشه‌ها و همچنین بخش‌های از ریشه است که در آن جوانه‌های جانبی شروع به تشکیل می‌کنند. از سوی دیگر بین شروع رشد ریشه و رشد اندام هوایی اختلاف فازی وجود دارد و رشد جهش‌های رشدی ریشه حدود 15 تا 20 روز پس از جهش‌های رشدی اندام هوایی شروع می‌شود از این‌رو در سال‌های که رشد و توسعه سرشاخه‌ها، گل‌ها و میوه‌چه‌ها با بارندگی‌های پیاپی و طولانی و همچنین ابری بودن طولانی مدت همراه است به ویژه در مناطقی با با رطوبت نسبی زیاد مانند سواحل خلیج فارس و دریای مازندران، احتمال اختلال در جذب و انتقال و کمبود کلسیم در بافت‌های در حال توسعه به ویژه میوه‌چه‌ها وجود دارد.

3. با توجه به نقش تعرق و جریان شیر خام در آوندهای چوبی در انتقال کلسیم به میوه‌چه‌ها در مرحله اول رشد میوه، غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بیرون تاج بسیار بیشتر از میوه‌چه‌های درون تاج است. از این‌رو برای افزایش تعرق و بهبود انتقال جریان شیر خام در آوندهای چوبی و افزایش غلظت کلسیم در میوه‌های درون تاج درختان مرکبات، انجام هرس فرم (سرزنی نهال‌ها بلافاصله پس از انتقال به زمین اصلی و احداث باغ و همچنین انجام بهینه هرس سالیانه تا شروع مرحله باردهی) و هرس باردهی (انجام هرس سالیانه پیش از شروع رشد و توسعه دوباره درختان در درختان بارده) توصیه می‌شود.

محلول‌پاشی کلسیم پس از تشکیل میوه تا حدود 20 تا 30 روز پس از پایان ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) توصیه می‌شود و پس از آن به علت تشکیل لایه واکس در سطح میوه و افزایش تدریجی آن راندمان جذب کلسیم به شدت کاهش می‌یابد. از این‌رو به طور کلی محلول‌پاشی نیترات کلسیم یا کربوکسیلات کلسیم در مراحل کلیدی فنولوژی

رشد میوه (محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و پیش از ریزش فیزیولوژی میوه‌چه‌ها یا ریزش تابستانه) را برای افزایش کلسیم پوست میوه و بهبود کیفیت میوه مرکبات به باغداران مرکبات توصیه می‌شود

کلسیم یکی از مهمترین ترکیبات ساختمانی غشاء و دیواره سلولی است و نقش مهمی در فرآیند تقسیم سلولی و رشد دارد. انتقال کلسیم از خاک به میوه‌های در حال توسعه یک فرآیند غیرفعال است و به شدت جریان تعلق بستگی دارد. کلسیم به‌شکل ضعیف از برگ‌های قدیمی یا دیگر اندام‌های گیاهی به برگ‌ها، میوه‌ها و اندام‌های مریستمی جدید در حال توسعه منتقل می‌شود. از این‌رو کمبود کلسیم در خاک یا هر عاملی که در انتقال آن اختلال ایجاد کند (مانند تنش خشکی و تنش مانداب) به ویژه در طول دوره تقسیم سلولی و رشد بحرانی، موجب کمبود کلسیم در میوه‌ها خواهد شد. این کمبود کلسیم یا عدم تعادل عناصر غذایی می‌تواند موجب ناهنجاری‌های فیزیولوژی در پوست مانند شکستن پوست نارنگی‌های کلمانتین یا شکاف خوردن میوه در برخی دیگر از ارقام نارنگی و پرتقال (حساس به شکاف خوردن) می‌شود. غلظت بهینه کلسیم در برگ مرکبات از 2/5 تا 5/5 درصد است. محلول‌پاشی کلسیم به شکل نترات کلسیم یا کربوکسیلات کلسیم پس از ریزش گلبرگ‌ها و تشکیل میوه می‌تواند شکاف خوردن میوه‌ها را نیز کاهش دهد. محلول‌پاشی نترات کلسیم با غلظت 3 تا 5 در هزار همراه با اوره با غلظت 2 تا 3 در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار پس از تشکیل میوه زمانی که قطر میوه‌چه‌ها حدود نیم تا یک سانتی‌متر است، و تکرار آن یک تا دو بار دیگر (پیش از شروع ریزش تابستانه و اوایل تا اواسط فاز دوم رشد میوه) پس از آبیاری باغ و رعایت استانداردهای محلول‌پاشی توصیه می‌شود.

منابع

- اخلاقی امیری، ن. و اسدی کنگرشاهی، ع. 1399. هرس درختان مرکبات. انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع. 1398. مدیریت کوددهی درختان بارده مرکبات. انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. صفحه 198.
- اسدی کنگرشاهی، ع. و اخلاقی امیری، ن. 1397. مدیریت احداث باغ پایدار مرکبات (با تاکید بر مطالعات خاکشناسی، تناسب اراضی، طراحی باغ و سیستم آبیاری، انتخاب پایه، کوددهی، آبیاری و ...). انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع. و اخلاقی امیری، ن. 1397. روند تغییرات غلظت کلسیم در پوست میوه و تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم بر عملکرد و کیفیت پرتقال تامسون ناول. نشریه پژوهش‌های خاک، جلد 31، شماره 2، موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع.، اخلاقی امیری، ن. و فلاح، ع.ر. 1398. راهنمای نمونه برداری و تفسیر نتایج تجزیه خاک و برگ برای درختان مرکبات. نشریه فنی شماره 561. موسسه تحقیقات خاک و آب. کرج، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع. و همکاران. 1396. دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه درختان مرکبات در شمال و جنوب کشور. انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع. و اخلاقی امیری، ن. 1395. سرمازدگی درختان میوه (مبانی، اصول و راهکارهای عملی کاهش خسارت). جلد اول. انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع. و اخلاقی امیری، ن. 1395. تغذیه پیشرفته و کاربردی مرکبات، جلد اول. انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع. و اخلاقی امیری، ن. 1393. تغذیه پیشرفته و کاربردی مرکبات، جلد دوم. انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- اسدی کنگرشاهی، ع. و اخلاقی امیری، ن. 1390. شناخت برخی آسیب‌های محیطی و

ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی مرکبات. نشریه فنی شماره 501، موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

اسدی کنگرشاهی، ع. و اخلاقی امیری، ن. 1392. خشکیدگی سرشاخه‌ها، زوال مرکبات و برخی آسیب‌های محیطی مرکبات شرق مازندران. نشریه فنی ترویجی، سازمان جهاد کشاورزی مازندران. شماره 92/217/01.

- Bashour, I. and Sayegh, A.A. 2007. Methods of Analysis for Soils of Arid and Semi-Arid Regions. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. P. 49-53.
- Bergmann, W. 1992. Nutritional disorders of plants. Jena: Gustav Fischer Verlag. 353 p.
- Bramlage, W.J. 1994. Physiological role of calcium in fruit. P. 101-107. In: A.B. Petersen, R.G. Stevens (eds) Tree fruit nutrition, Good fruit grower, Yakima, WA.
- Demidchik, V., Shabala, S., Isayenkov, S., Cuin, T.A. and Pottosin, I. 2018. Calcium transport across plant membranes: Mechanisms and functions. New Phytologist. 220: 49-69.
- Demarty, M., Morvan, C. and Thellier, M. 1984. Calcium and the cell wall. Plant, Cell and Environment. 7: 441-448.
- Eticha, D., Kwast, A., Chiachia, T.R.S., Horowitz, N. and Stiltzd, H. 2017. Calcium nutrition of orange and its impact on growth, nutrient uptake and leaf cell wall. Citrus Research and Technology. 38: 62-70.
- Gilliham, M., Dayod, M., Hocking, B.J., Xu, B., Conn, S.J., Kaiser, B.N., Leigh, R.A. and Tyerman, S.D. 2011. Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow. Journal of Experimental Botany 62: 2233-2250.
- Gottwald, T.R., Graça, J.V. and Bassanezi, R.B. 2007. Citrus Huanglongbing: the pathogen and its impact. Plant Health Progress. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1094/PHP-2007-0906-01-RV>>. Accessed: 15 Feb. 2017.
- Grierson, W. 1981. Physiological disorders of citrus fruits. Proc. Int. Soc. Citriculture. 3: 764-767.
- Hocking, B., Tyerman, S.D., Burton, R.A. and Gilliham, M. 2016. Fruit calcium: Transport and physiology. Frontiers in Plant Science. 7: 569-576.
- Hopkins, W.G. and Huner, N.P.A. 2004. Plant and Inorganic Nutrient. P. 241-257. Introduction to plant physiology. 3rd ed. John Wiley and Sons. Inc. Publishers.
- Hirschi, K.D. 2004. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. Plant Physiol. 136: 2438-2442.

- Ho, L.C. and White, P.J. 2005. A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Annals of Botany*. 95: 571–581.
- Jaiswal, J.K. 2001. Calcium—How and why? *Journal of Biosciences*. 26: 357–363.
- Karley, A.J. and White, P.J. 2009. Moving cationic minerals to edible tissues: Potassium, magnesium, calcium. *Current Opinion in Plant Biology*. 12: 291–298.
- Kirkby, E.A. 1979. Maximizing calcium uptake by plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 10: 89–113.
- Lecourieux, D., Ranjeva, R. and Pugin, A. 2006. Calcium in plant defence-signalling pathways. *New Phytologist*, 171: 249–269.
- Marschner, H. and Richter, C. 1974. Calcium-transport in roots of maize and bean seedlings. *Plant and Soil*. 40: 193–210.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press, London.
- Olle, M. and Bender, I. 2009. Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: A review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 84: 577–584.
- Rahman, M. and Punja, Z.K. 2002. Calcium and plant disease. In: Datnoff L.E. et al. (eds). *Mineral nutrition and plant disease*. The American Phytopathological Society, St. Paul.
- Saure, C.M. 2004. Calcium translocation to fleshy fruit: its mechanism and endogenous control. *Scientia Hort*. 105: 65–89.
- Srivastava, A.K. and Singh, S. 2003. *Citrus Nutrition*. International Book Distributing Co. INDA.
- Storey, R., Treeby, M.T. and Milne, D.J. 2002. Crease: another Ca deficiency-related fruit disorder. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 77: 565–571.
- Tadesse, T., Nichols, M.A., Hewett, E.W. and Fisher, K.J. 2001. Relative humidity around the fruit influences the mineral composition and incidence of blossom-end rot in sweet pepper. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 76: 9–16.
- Taylor, M.D. and Locascio, S.J. 2004. Blossom-end rot: A calcium deficiency. *Journal of Plant Nutrition*. 27: 123–139.
- Thor, K. 2019. Calcium - Nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*. 10: 440–453.
- Wallace, A. and Mueller, T. 1980. Calcium uptake and distribution in plants. *Journal of Plant Nutrition*. 162: 247–256.
- White, P.J. and Broadley, M.R. 2003. Calcium in plants. *Annals of Botany*. 92: 487–511.

- White, P.J. 2001. The pathways of calcium movement to the xylem. *Journal of Experimental Botany*. 52: 891–899.
- Wojcik, P. and Treder, W. 2006. Effect of drip boron fertigation on yield and fruit quality in a high-density apple orchard. *Journal of Plant Nutrition*. 29: 2199–2213.
- Wojcik, P. and Wojcik, M. 2003. Effects of boron fertilization on ‘Conference’ pear tree vigor, nutrition, and fruit yield and storability. *Plant and Soil*. 256: 413–421.
- Yang, L., Li, G., Lin, Q. and Zhao, X. 2010. Active carbonate of chestnut soils in different lands. *Journal of Ecology and Environmental Sciences*. 19: 428 – 432.
- Zekri, M. and Obreza, T.A. 2015. *Macronutrient deficiencies in Citrus: calcium, magnesium, and sulfur*. Gainesville: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.