

Calcium Physiology and Its Application Management in Citrus Orchards

A. Asadi Kangarshahi *  and N. Akhlaghi Amiri

Associate Prof., Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. kangarshahi@gmail.com

Assistant prof., Agronomy and Horticultural Science Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. neginakhlaghi@yahoo.com

Received: October 2024 and Accepted: February 2025

Abstract

It is the objective of the present study to explore calcium fertilization management in citrus orchards in an attempt to improve fruit quality via the more profound understanding thus gained about plant calcium requirements, proper amount and timing of fertilization, and processes of calcium absorption and transfer to leaves and fruits in the trees. It is well established that calcium concentration in citrus fruits is only second to potassium and nitrogen but that it is the first in terms of quantity in the biomass of citrus trees (compared to potassium and nitrogen). The amount of calcium harvested by fresh citrus fruit is about 550 to 600 gr per ton. The post-setting developing fruits have an immediate and stable need for calcium, which is supplied by the xylem vessels and strongly depends on transpiration from the surface of xylem tissues and organs. It, therefore, follows that unfavorable climatic conditions and management practices leading to such adverse situations as drought stress, flooding stress, heat stress, lack of sunny hours, high relative humidity, or high nitrogen and potassium fertilizer application in the first stage of fruit growth (I) only intensify calcium deficiency in the developing tissues. Study has shown that the most appropriate timing for fertilizer application to increase calcium content in citrus fruits is the first and early second stages of fruit growth, beyond which time calcium efficiency and transfer to fruits undergo drastic drops. On the other hand, calcium enjoys the greatest impacts not only on enhancing fruit tissue firmness but also on preventing their softening, reduced fruit weight, physiological disorders, and fruit rotting percentage during storage. Thus, to achieve these goals of calcium fertilization, previous research in different regions of the world and in Iran recommend that the first stage of fruit growth (from post-setting to June drop) and early to mid-second stage of fruit growth (II) may be the best timing for calcium fertilizer application (foliar application or fertigation) to increase calcium content in citrus fruits. It is further recommended that Ca application during late second stage of fruit growth and pre-harvest period or post-harvest fruit immersion in calcium solutions must be avoided.

Key words: Ca absorption trend, Ca fertilizers, Ca requirement, Fruit growth phenology

* - Corresponding author's email: kangarshahi@gmail.com
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.367308.369>

فیزیولوژی کلسیم و مدیریت مصرف آن در باغ‌های مرکبات

علی اسدی کنگرشاهی*  و نگین اخلاقی امیری

دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری،

ایران. kangarshahi@gmail.com

استادیار بخش علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری،

ایران. neginakhlghi@yahoo.com

دریافت: مهر ۱۴۰۳ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

هدف از این بررسی، ارزیابی مدیریت کوددهی کلسیم برای درختان مرکبات بود. این ارزیابی می‌تواند به شناخت بهتر نیاز به کلسیم، مقدار و زمان مصرف آن، روند جذب و انتقال کلسیم به برگ‌ها و میوه‌ها در این درختان منجر شود که در بهبود کیفیت میوه‌ها بسیار مؤثر است. کلسیم پس از پتاسیم و نیتروژن بیشترین غلظت در میوه مرکبات دارد اما اولین عنصر از نظر مقدار، در بیوماس درختان مرکبات است (بیشتر از پتاسیم و نیتروژن). مقدار کلسیمی که توسط مرکبات برداشت می‌شود حدود ۵۵۰ تا ۶۰۰ گرم به ازای هر تن میوه تازه است. پس از تشکیل میوه، میوه‌چه‌های در حال توسعه، نیاز فوری و پایدار به کلسیم دارند که توسط آوندهای چوبی تأمین می‌شود که شدیداً به تعلق از سطح این بافت‌ها و اندام‌ها وابسته است. بنابراین، شرایط اقلیمی و مدیریتی نامناسب مانند تنش خشکی، تنش مانداب، تنش گرما، کمبود ساعات آفتابی، رطوبت نسبی زیاد، مصرف زیاد کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن و پتاسیم در مرحله اول رشد میوه، احتمال کمبود کلسیم در این بافت‌های در حال توسعه را تشدید می‌کند. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که مناسب‌ترین زمان برای مصرف و افزایش کلسیم میوه‌ها در درختان مرکبات، مرحله اول و اوایل مرحله دوم رشد میوه است و پس از آن راندمان انتقال کلسیم به میوه‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد. از طرفی کلسیم بیشترین تأثیر در سفتی بافت میوه‌ها، کاهش روند نرم شدن و کاهش وزن میوه‌ها در طول دوره ذخیره‌سازی، کاهش ناهنجاری‌های فیزیولوژیک و کاهش درصد پوسیدگی میوه‌ها در دوره انبارمانی دارد. بنابراین هدف از مدیریت کوددهی کلسیم، اطمینان از دریافت بهینه کلسیم توسط میوه‌ها، افزایش کیفیت و بازارپسندی میوه‌ها، پایداری تولید، کاهش ناهنجاری‌های فیزیولوژیک، افزایش زمان انبارمانی و حفظ کیفیت آن‌ها در طی دوره انبارمانی است. لذا توصیه می‌شود که باغ‌داران، مدیریت مصرف کلسیم (محلول‌پاشی یا کودآبیاری) در مرحله اول و اوایل تا اواسط مرحله دوم انجام دهند و از کوددهی در اواخر مرحله دوم رشد میوه، کوددهی قبل از برداشت و غوطه‌وری میوه‌های مرکبات در محلول کلسیم پس از برداشت اجتناب کنند.

واژه‌های کلیدی: روند جذب کلسیم، فنولوژی رشد میوه، کودهای کلسیم، نیاز کلسیم

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: kangarshahi@gmail.com

مقدمه

به‌طور کلی بیش از ۳۰ درصد از خاک‌های سطح زمین، خاک‌های آهکی هستند (FAO, 2016). از طرفی برخی خاک‌ها می‌توانند آهکی شوند اگر برای مدت طولانی با آب دارای کربنات کلسیم بالا آبیاری شوند (Taalab et al., 2019). با افزایش غلظت کربنات کلسیم در محلول خاک، کربنات کلسیم ثانویه ممکن است در منافذ ریز و متوسط خاک در تماس با سطوح ذرات خاک تشکیل شود (FAO, 2016). در ایران اغلب خاک‌های کشاورزی، آهکی هستند به‌طوری‌که بیشتر از ۸۷ درصد آن‌ها کربنات کلسیم بیشتر از پنج درصد دارند و حدود ۵۸ درصد از این خاک‌ها بین ۱۰ تا ۴۰ درصد کربنات کلسیم دارند (Tehrani and Ghaffari Nejad, 2016). کمبود کلسیم در اغلب مرکبات جهان وجود دارد (Srivastava, 2012). در کشور نیز، بصیرت و همکاران (۲۰۱۸) کمبود کلسیم را در اغلب باغ‌های مرکبات جنوب گزارش کردند و علت کمبود آن را غلظت زیاد پتاسیم و شوری بالای منطقه ریشه بیان داشتند (Basirat et al., 2018). در شمال کشور نیز یکی از چالش‌های اصلی باغداران مرکبات، کمبود کلسیم است که موجب کاهش زمان انبارمانی میوه‌ها، افزایش پوسیدگی ریشه و زوال درختان، کاهش تحمل درختان به تنش‌های محیطی و همچنین کاهش راندمان جذب برخی عناصر غذایی شده است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Asadi Kangarshahi, 2021).

بنابراین کمبود کلسیم در اغلب باغ‌های مرکبات جهان به‌ویژه در خاک‌های اسیدی، خاک‌های با بافت سبک، خاک‌های با بافت سنگین و متراکم، خاک‌های دارای تنش مانداب و غرقاب، خاک‌های با بارندگی زیاد یا آبیاری سنگین وجود دارد. عوامل متعددی در توسعه کمبود کلسیم و شدت خسارت این ناهنجاری در درختان میوه تأثیر دارند. یک سری 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، میزان یا غلظت کلسیم در

محلول خاک، تعادل کاتیون‌ها و آنیون‌ها، توسعه و تولید ناکافی ریشه‌های جدید در خاک اشاره کرد. عوامل دیگری که در توسعه و تشدید کمبود کلسیم تأثیر دارند عوامل 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 است. به‌طور کلی کلسیم توسط نوک ریشه جذب می‌گردد و در مسیر تعلق از طریق آوند چوبی به اندام هوایی منتقل می‌شود. این عنصر در آوند آبکش متحرک نبوده و نمی‌تواند از یک شاخساره به سایر اندام‌ها یا نقاط مریستمی منتقل شود. مانداب و غرقاب شدن منطقه ریشه، آبیاری بیش از حد، تنش خشکی، تنش سرما و یخبندان، خسارت‌های فیزیولوژیکی و مکانیکی به ریشه‌ها، فشردگی خاک و بیماری‌های ریشه‌ای موجب کاهش جذب کلسیم توسط ریشه‌ها و انتقال آن به اندام هوایی درختان مرکبات می‌شوند. کمبود کلسیم موجب مرگ سریع مریستم‌ها از جمله مرگ مریستم‌های انتهایی سرشاخه‌ها و مریستم‌های انتهایی ریشه‌ها می‌شود که به نوبه خود شدت کمبود کلسیم در درختان را تشدید می‌کنند. البته برخی بیماری‌ها از جمله بیماری تریستیزا و گرینینگ موجب آسیب به ریشه‌ها می‌شود و این آسیب دیدن ریشه موجب تشدید کمبود کلسیم و در نتیجه مرگ نوک ریشه‌ها و کاهش جذب کلسیم می‌گردد و سبک به این شکل ادامه داشته و در هر مرحله شدت کمبود بیشتر خواهد شد. از طرفی مصرف برگی کلسیم نیز به دلیل عدم توانایی انتقال کلسیم در آوند آبکشی، در افزایش کلسیم ریشه‌ها مؤثر نیست. مدیریت تغذیه کلسیم در درختان مرکبات دارای بیماری‌های از جمله تریستیزا و گرینینگ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Olle and Bender, 2009; Mcainsh and Pettman, 2009).

بنابراین با توجه به وابستگی حرکت کلسیم در آوندهای چوبی به جریان تعلق و عدم تحرک و انتقال مجدد آن در بافت‌های درختان مرکبات (از بافت‌های مسن به بافت‌های در حال توسعه)، کمبود موقت آن سریعاً بر

رشد و توسعه اندام‌های در حال رشد، ریزش میوه‌چه‌ها در اوایل مرحله اول رشد میوه و مقدار کلسیم بافت و کیفیت میوه‌های مرکبات تأثیر دارد. کمبود کلسیم در میوه مرکبات موجب ریزش زیاد میوه‌چه‌ها در اوایل مرحله اول رشد میوه، ترک خوردن میوه‌ها، پفی شدن میوه‌ها، نرم شدن بافت پوست میوه‌ها، پوسیدگی زیاد در انبار، پوسیدگی و کاهش زیاد وزن میوه‌ها در مسیر انتقال و صادرات می‌شود که یک چالش مهم برای بسیاری از تولیدکنندگان و صادرکنندگان این محصول است و در سال‌های اخیر، به علت کشت‌های متراکم و همچنین افزایش عملکرد در واحد سطح، این چالش تشدید نیز شده است. هدف این مقاله، درک بهتر اهمیت کلسیم، شناخت جذب و انتقال کلسیم، مقدار کوددهی، زمان مناسب کوددهی متناسب با فنولوژی رشد و توسعه میوه، روش‌های مناسب کوددهی کلسیم برای درختان مرکبات است که می‌تواند در افزایش کلسیم و سفتی بافت میوه‌ها، افزایش قابلیت انبارمانی، امکان صادرات میوه‌ها با حفظ کیفیت در مسیرهای طولانی‌تر و اقتصاد باغداران بسیار مؤثر باشد.

کلسیم در خاک

کلسیم، پنجمین عنصر از نظر فراوانی در پوسته زمین است. به‌طورکلی کلسیم به شکل کانی، تبادلی و محلول در خاک وجود دارد. کلسیم محلول و قابل تبادل، شکل‌های اصلی کلسیم قابل جذب در خاک هستند. سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، کانی‌های عمده کلسیم در خاک هستند. سولفات کلسیم معمولاً در خاک‌های خشک

(خاک‌هایی با غلظت سولفات بیش از ۰/۰۱ مول در لیتر) و کربنات کلسیم در خاک‌هایی با pH بیشتر از ۷ وجود دارد. اما در pH حدود ۷/۵ تا ۸، سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، هر دو می‌توانند در خاک وجود داشته باشند (Basour and Sayegh, 2007; Yang et al., 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. پژوهش‌های مختلف نشان داده است که برای جذب کافی کلسیم توسط ریشه، باید حدود ۶۰-۸۰ درصد ظرفیت تبادلی خاک را کلسیم اشغال کرده باشد و یا بیش از ۱۵ درصد کلسیم قابل دسترس در محلول خاک وجود داشته باشد. این مسئله در خاک‌های شور که سدیم با کلسیم در اشغال سایت‌های تبادلی و همچنین جذب توسط ریشه رقابت می‌کند از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. همچنین مصرف زیاد پتاسیم نیز به علت رقابت با جذب کلسیم، می‌تواند روند زوال را در درختان دارای ناهنجاری زوال را تشدید نماید. غلظت کلسیم در محلول خاک با pH خاک و ویژگی‌های خاک تغییر می‌کند و معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ میلی‌گرم در لیتر است. ولی در خاک‌های مناطق خشک، حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. نتایج گزارش‌های اسدی کنگرشاهی (۲۰۱۹) نشان داد که خاک‌های با بافت لوم بیشترین غلظت کلسیم در محلول خاک داشتند و در مقابل خاک‌های با بافت سبک و سنگین از کلسیم محلول کمتری برخوردار بودند (جدول ۱).

جدول ۱- کلسیم محلول خاک

Table 1- Calcium in soil solution (Asadi Kangarshahi, 2019)

کلسیم محلول (میلی‌گرم در لیتر) Ca solution (mg/l)	کربن آلی (درصد) O.C. (%)	آهک (درصد) Lime (%)	کلاس بافتی خاک Soil texture class	شماره خاک Soil
174	1.17	2	لوم loam	1
135	0.95	9	لوم رسی sandy clay loam	2
122	1.80	14	لوم loam	3
104	1.60	30	رسی clay	4
54	0.65	40	لوم رسی sandy loam	5
116	1.52	25	لوم رسی clay loam	6
212	1.10	45	لوم loam	7

تحرك، جذب و انتقال کلسیم به اندام هوایی (برگ‌ها و میوه‌ها)

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 شود 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 مؤثر ضروری است. تبخیر و تعرق از برگ‌ها موجب ایجاد کشش و حرکت جریان آب در آوندهای چوبی می‌شود که در نهایت 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، کلسیم محلول در آن نیز به سطح ریشه منتقل می‌شوند. 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 عمدتاً شامل نوک ریشه‌ها و نواحی است که در آن جوانه‌های جانبی شروع به تشکیل می‌کنند (Marschner, 1995; White and Broadley, 2003). به‌طور کلی از علائم شروع فعالیت مجدد درختان مرکبات، رشد سرشاخه‌های سال جاری است که در منطقه شمال کشور رشد مجدد سرشاخه‌ها عمدتاً از اواسط فروردین ماه شروع شده و در اواسط تا اواخر اردیبهشت‌ماه کامل می‌شود. بنابراین در مرکبات شمال شروع جذب عناصر غذایی از اواسط فروردین‌ماه با حداقل 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 مجدد سرشاخه‌ها از اوایل تا اواخر اسفندماه شروع و در اواخر فروردین‌ماه کامل می‌شوند. بنابراین جذب و انتقال عناصر

به سطح ریشه با راندمان حداقلی از اسفندماه شروع و در فروردین و اردیبهشت به حداکثر می‌رسند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2014; Asadi Kangarshahi, 2019).

نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که بافت‌های در حال توسعه، نیاز فوری و مداوم به کلسیم دارند که توسط آوندهای چوبی تأمین می‌شود و شدیداً به تعرق از سطح برگ این بافت‌ها و اندام‌ها 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 این‌رو، کمبود کلسیم به‌طور عمده در بافت‌های در حال توسعه و به‌ویژه در نواحی مرستمی ایجاد می‌شود (Hopkins and Huner, 2004; White and Broadley, 2003). بنابراین کمبود ساعات آفتابی و رطوبت نسبی زیاد در زمان توسعه سرشاخه‌ها، گل‌ها و میوه‌ها، احتمال کمبود کلسیم در بافت‌های در حال توسعه را تشدید می‌کند. از طرفی کلسیم به شکل کاتیون دو ظرفیتی (Ca^{2+}) جذب می‌شود و توسط آوند چوبی به اندام هوایی منتقل می‌شود و در آوندهای آبکش غیر متحرک است. کلسیم در شیره آوند چوبی توسط جریان تعرق به سمت اندام هوایی و برگ‌ها منتقل می‌شود (Hirschi, 2004).

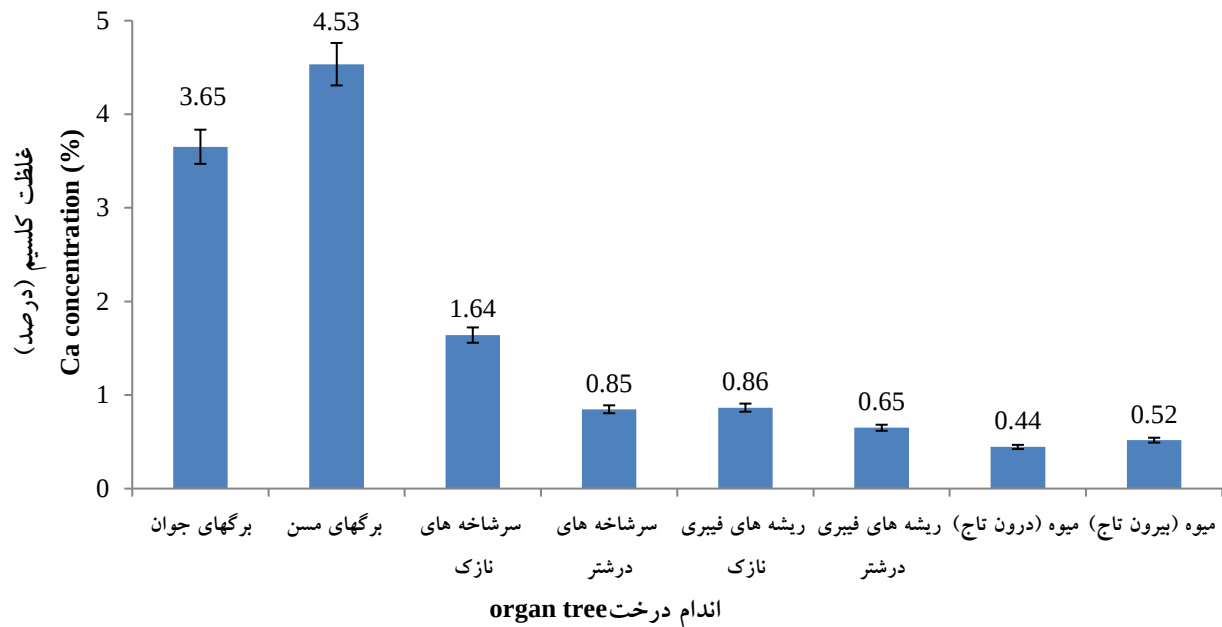
کلسیم نمی‌تواند مجدداً از بافت‌های مسن جابجا و توسط آوند آبکشی توزیع شود بنابراین فراهمی کلسیم در بافت‌های در حال رشد توسط آوند چوبی انجام می‌شود. محلول‌پاشی کلسیم (نیترات کلسیم) عمدتاً برای اجتناب از کمبود کلسیم در میوه‌ها استفاده می‌شود و افزایش کلسیم تأثیر زیادی در بهبود کیفیت میوه مرکبات دارد. کلسیم در میوه‌های تازه اهمیت زیادی دارد و مقدار آن در میوه بسیار کمتر از برگ‌ها است حداکثر جذب کلسیم در میوه مرکبات حدوداً پس از تشکیل میوه تا ۴۵ الی ۵۰ روز پس از گلدهی است و پس از ریزش فیزیولوژی تابستانه میوه‌چه‌ها، جذب به‌سرعت کاهش می‌یابد. در میوه مرکبات، بیشتر کلسیم در فاز اول رشد میوه تا حدود ۱۰۰ روز پس از گلدهی به بافت

آلبدو وارد می‌شود و سپس کلسیم بین آلبیدو و گوشت میوه توزیع می‌شود. پس از ریزش فیزیولوژیکی میوه‌چه‌ها (ریزش خردادماه)، واکس سطح پوست میوه به سرعت توسعه می‌یابد و افزایش واکس موجب کاهش کارایی جذب کلسیم خواهد شد. بنابراین نتایج این تحقیق نشان داد که محلول‌پاشی نیترات کلسیم در مرحله اول رشد میوه (از زمان تشکیل میوه تا زمان ریزش فیزیولوژی یا ریزش تابستانه میوه‌چه‌ها) در افزایش کلسیم پوست میوه بسیار مؤثرتر از محلول‌پاشی در مرحله دوم رشد میوه (به‌ویژه از اواسط تا اواخر مرحله دوم رشد میوه) و همچنین مرحله سوم رشد میوه است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Saure, 2005; Schlegel and Schonherr, 2002).

کلسیم در درختان مرکبات

کلسیم پس از پتاسیم و نیتروژن بیشترین غلظت در میوه مرکبات دارد مقدار کلسیمی که توسط میوه تازه مرکبات برداشت می‌شود حدود ۵۵۰ تا ۶۰۰ گرم به ازای هر تن میوه تازه است. همچنین کلسیم اولین عنصر از نظر مقدار، در بیوماس درختان مرکبات است (بیشتر از پتاسیم و نیتروژن) مقدار کلسیمی که توسط بیوماس درختان بارده مرکبات از خاک خارج می‌شود حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار است. غلظت کلسیم در برگ‌های درختان مرکبات، حدود سه تا پنج درصد وزن خشک برگ است که بیشتر از دیگر عناصر غذایی است. نتایج پژوهشی

نگارندگان نشان داده است غلظت کلسیم در برگ‌ها، با افزایش سن برگ درختان افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که غلظت کلسیم در برگ‌ها در اواسط خردادماه، حدود ۰/۸۸ درصد کمتر از برگ‌ها در مردادماه است. همچنین با افزایش سن و قطر سرشاخه‌ها و خشبی شدن آن‌ها، غلظت کلسیم در آن کاهش می‌یابد به‌طوری‌که غلظت کلسیم در سرشاخه‌های کمتر از یک سانتی‌متر، حدود ۱/۶۴ درصد بر اساس وزن خشک است و در سرشاخه‌های بزرگ‌تر به حدود ۰/۸۵ درصد می‌رسد. در مقابل، 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 ۰/۸۶ درصد و در ریشه‌های فیبری بزرگ‌تر حدود ۰/۶۵ درصد است (شکل ۱). راهنمای حدود مطلوب غلظت کلسیم در برگ ارقام مختلف مرکبات در جدول ۲ آورده شده است. همچنین در جدول ۳، مدیریت برنامه کودی بر اساس نتایج تجزیه برگ نشان داده شده است. اگر غلظت کلسیم در برگ کمتر از حد 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 و ... باشد اما در خاک‌های اسیدی، مقدار کلسیم قابل تبادل خاک باید کنترل شود اما به‌طورکلی عوامل اقلیمی، خاکی و فیزیولوژی ممکن است در کمبود کلسیم مؤثر باشند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018).



شکل ۱- غلظت کلسیم در اندام‌های مختلف درختان پرتقال تامسون ناول

Figure 1- Calcium concentration in different organs of 'Thomson' navel orange trees (asadi Kangarshahi, 2019)

جدول ۲- راهنمای تفسیر نتایج تجزیه کلسیم برگ برای درختان مرکبات

Table 2- Guidelines for interpretation of leaf Ca for citrus trees (asadi Kangarshahi, 2019)

Ca concentration (%) غلظت کلسیم (درصد)					عنصر
Excess خیلی زیاد	High زیاد	optimum مناسب	low کم	Deficient کمبود	element
>7	5.5-7	3-5.5	1.5-3	< 1.5	Ca کلسیم

جدول ۳- تنظیم برنامه کودی مرکبات بر اساس آزمون برگ

Table 3- Adjusting a citrus fertilization program based on leaf analysis

اگر غلظت عنصر غذایی در برگ کمتر از مقدار مطلوب باشد	اگر غلظت عنصر غذایی در برگ بیشتر از مقدار مطلوب باشد
۱. در خاک‌های آهکی، مانداب منطقه ریشه کنترل شود.	✓ هیچ اقدامی لازم نیست.
۱. pH خاک کنترل شود.	
۲. در خاک‌های اسیدی، مقدار کلسیم خاک کنترل شود.	
۳. 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، محلول پاشی کودهای محلول کلسیم (مانند نیترات کلسیم یا کلات‌های آلی کلسیم) انجام شود.	

علائم ظاهری کمبود کلسیم در مرکبات

یکی از مهم‌ترین علائم کمبود کلسیم و بور در درختان مرکبات در اوایل فصل رشد به‌ویژه در مناطقی با کمبود ساعات آفتابی و رطوبت نسبی زیاد، پوسیدگی مریستم‌های نهایی رشد و ریزش شدید میوه‌چه‌های در مرحله اول رشد میوه و ریزش تابستانه است. از دیگر

علائم کمبود کلسیم در درختان مرکبات، کم‌رنگ شدن کلروفیل در طول حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی در زمستان است. کمبود کلسیم سبب کاهش توان درختان، کاهش تولید، تنک شدن برگ‌ها و برگ‌های کوچک ضخیم می‌شود. در درختان با کمبود شدید کلسیم، دای‌بک^۱ شاخه‌های انتهایی و رشد جوانه‌های ثانویه برگ افزایش

۵. افزایش ترک خوردن یا شکاف خوردن میوه.
۶. افزایش چین خوردگی پوست میوه‌ها (کریزینگ)
۷. افزایش درصد پوسیدگی میوه‌ها در انبار (کاهش زمان انبارمانی)
۸. نرم و شل شدن میوه‌ها پس از ذخیره در انبار

کلسیم، سفتی بافت میوه و پایداری دیواره سلولی

سفتی میوه یک پارامتر کیفیت حیاتی در بازاریابی میوه است (Huang et al. 2023). کلسیم با تقویت ساختار دیواره سلولی، تقویت پیوند اتصال سلولی و تشکیل پکتات کلسیم در صورت ترکیب با اسید پکتیک، سفتی بافت میوه را افزایش می‌دهد (ژانگ و وانگ، ۲۰۱۹). علاوه بر این، مصرف کلسیم باعث تجمع هموگالاکتورون‌ها و افزایش تعداد شبکه‌های پکتین می‌شود که در سفتی بافت میوه و افزایش زمان انبارمانی آن تأثیر دارد (Huang et al. 2023). بخش زیادی از کلسیم (بر خلاف دیگر عناصر غذایی پرمصرف) 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 تقریباً غیرقابل تبادل است. در بیشتر دولپه‌ای‌ها از جمله مرکبات، تقریباً ۵۰ درصد از کلسیم به شکل پکتات‌های کلسیم است. تجزیه پکتات‌ها، توسط آنزیم پلی‌گالاکتوروناز انجام می‌شود و غلظت بالای کلسیم در بافت‌ها به شدت از فعالیت این آنزیم جلوگیری می‌کند. در مقابل، در بافت‌های دارای کمبود کلسیم، فعالیت این آنزیم افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار پکتات کلسیم در دیواره‌های سلولی گیاهان و میوه‌ها، در حساسیت این بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی بسیار مؤثر است. با افزایش کلسیم بافت‌ها، حساسیت آن‌ها به آلودگی‌های قارچی و خسارت ناشی از تنش‌های محیطی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که با افزایش غلظت کلسیم در برگ، وزن دیواره سلولی نسبت به وزن برگ افزایش می‌یابد این افزایش نسبی

می‌یابد. به‌طور کلی، 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. کاهش اندازه برگ‌ها، گرد یا قلبی شکل شدن برگ‌ها، افزایش پوسیدگی ریشه‌ها، کاهش عملکرد و کاهش نسبی اندازه میوه‌ها از دیگر علائم ظاهری کمبود کلسیم است. به‌طور معمول برگ‌های دارای کمبود کلسیم، مقدار بیشتری پتاسیم و منیزیم دارند. کمبود کلسیم در برگ پرتقال، با توسعه کم‌رنگ شدن کلروفیل در طول حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی و همچنین لکه‌های نکروتیک کوچک در ناحیه کم‌رنگ شده در سطح برگ مشخص می‌شود. اما در برگ لیمو، این کاهش کلروفیل به‌صورت بلوک‌های بزرگ سوخته شده ظاهر می‌شود. همچنین با کمبود کلسیم، ریزش برگ‌ها قبل از بلوغ رخ می‌دهد که به دنبال آن، برگ‌های جدید تولید می‌شوند که آن‌ها هم قبل از بلوغ ریزش می‌کنند. یکی از مهم‌ترین ناهنجاری‌های 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 ضعیف تر بوده و علائم کمبود منگنز را نشان می‌دهند که به علت کاهش ظرفیت ریشه این درختان برای جذب منگنز است. تحت شرایط کمبود کلسیم، حساسیت درختان مرکبات به تنش مانداب، پوسیدگی ریشه و تهویه نامناسب (کمبود اکسیژن) در منطقه ریشه افزایش می‌یابد. بنابراین پوسیدگی ریشه، رشد ضعیف و زوال تدریجی درختان می‌تواند یکی از علائم و نشانه‌های کمبود کلسیم باشد.

مهم‌ترین علائم ظاهری کمبود کلسیم در درختان مرکبات (Asadi Kangarshahi, 2019; Srivastava, 2013):

۱. مرگ مرستم‌های انتهایی اندام هوایی
۲. پوسیدگی مرستم‌های انتهایی ریشه
۳. زیادی ریزش میوه

دارد (White and Broadley, 2003; Gilliam et al. 2011).

ساختار میوه مرکبات و روند تغییرات کلسیم آن

میوه مرکبات شامل سه بخش پوست خارجی (فلایودو)^۲، پوست داخلی (آلبیدو)^۳ و گوشت (بخش خوراکی)^۴ است. ساختار پوست خارجی شامل واکس یا لایه روغنی است که خارجی‌ترین لایه پوست خارجی است و پس از آن به ترتیب کوتیکول، سلول‌های اپیدرمی و زیر اپیدرمی قرار دارند (شکل ۲). واکس یا لایه روغنی پس از تشکیل میوه بسیار نازک و به‌صورت جزیره‌ای است سپس به‌تدریج ضخیم‌تر و پیوسته‌تر خواهد شد و در فاصله زمانی کوتاهی پس از ریزش تابستانه تقریباً این لایه پیوسته و به حداکثر ضخامت می‌رسد پس‌ازآن، این واکس سطحی محدودکننده تعرق و در نتیجه محدودکننده انتقال کلسیم از طریق آوندهای چوبی به میوه و همچنین جذب کلسیم از طریق محلول‌پاشی خواهد شد. برش عرضی میوه مرکبات نشان می‌دهد که دستجات آوندی بیشتر در بخش پوست داخلی قرار دارند (شکل ۳) و با محدود شدن یا توقف تعرق از سطح میوه، تقریباً انتقال آب و عناصر غذایی از طریق آوند چوبی نیز به حداقل می‌رسد و متابولیت‌ها و آب مورد نیاز میوه بیشتر از طریق آوندهای آبکشی تأمین خواهد شد. به‌طورکلی انتقال کلسیم از ریشه به میوه مرکبات در آوندهای چوبی، تقریباً در فاصله کوتاهی پس از ریزش تابستانه میوه‌چه‌ها به حداقل رسیده یا متوقف می‌شود. همچنین به علت پیوستگی این لایه واکس و ضخامت آن، نفوذ مستقیم عناصر غذایی از طریق محلول‌پاشی مستقیم به سطح میوه نیز به حداقل خواهد رسید. بنابراین محلول‌پاشی کلسیم در مرحله اول رشد میوه و در اوایل مرحله دوم رشد میوه می‌تواند در افزایش کلسیم میوه‌ها مؤثر باشد و با فاصله گرفتن از مرحله دوم رشد میوه، به‌تدریج راندامان جذب کلسیم کم و کمتر می‌شود و تأثیر چندانی در افزایش کلسیم میوه‌ها نخواهد داشت (Storey and Treeby, 2002;)

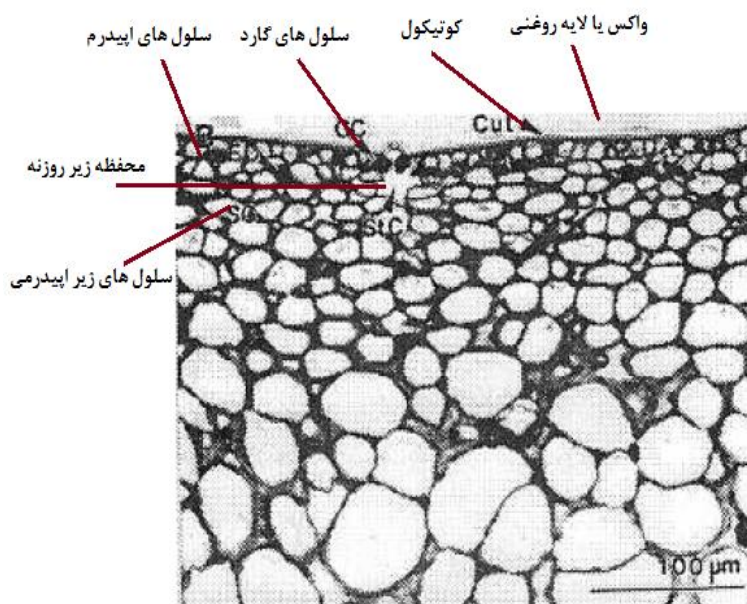
وزن دیواره سلول، استحکام بافت‌ها در مقابل تنش‌های زنده و غیر زنده را افزایش می‌دهد (White and Broadley, 2003; Demarty et al. 1984).

کلسیم و پایداری غشای سلولی

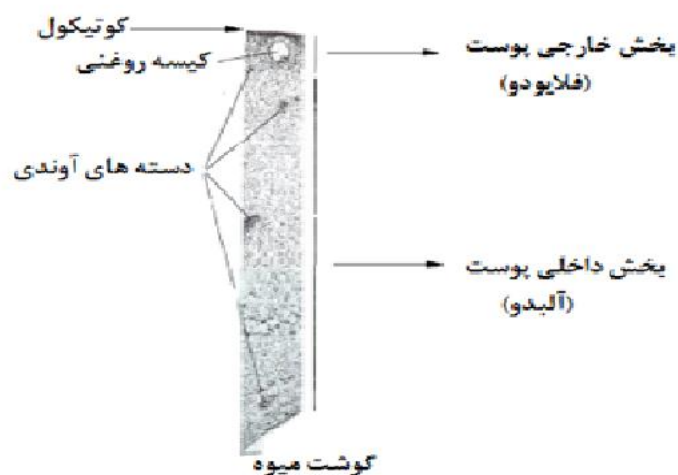
پیوند کلسیم با گروه‌های فسفات و کربوکسیلات فسفولیپیدها و همچنین پروتئین‌ها در سطح غشاهای سلولی موجب افزایش پایداری غشاهای سلولی می‌شود. این کلسیم می‌تواند با دیگر کاتیون‌ها مانند پتاسیم، منیزیم و سدیم جایگزین شود ولی هیچ‌یک از این کاتیون‌ها نمی‌توانند نقش کلسیم را در پایداری غشای سلولی انجام دهند. بنابراین در کمبود شدید کلسیم، ساختمان غشا آسیب‌دیده 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 (Marschner, 1995). کلسیم در زنجیره‌های پکتیکی تیغه میانی موجب سفتی و استحکام دیواره سلولی می‌شود. از طرف دیگر برای رشد سلول، دیواره سلولی باید نرم و شل شود. بنابراین با افزایش تولید هورمون اکسین، آپوپلاسم اسیدی شده و کلسیم با پروتون جایگزین می‌شود و در نتیجه زنجیره‌های پکتیکی روی همدیگر لغزیده و دیواره سلولی شل شده و رشد و بزرگ شدن سلول ایجاد می‌شود. همچنین کلسیم برای ورود مواد به ساختمان دیواره‌های سلولی ضروری است (Bramlage, 1994; Marschner, 1995; Zhang et al., 2019). بخش عمده کلسیم در سلول‌ها (به‌ویژه در سلول‌های برگ) در واکوئل‌ها قرار دارد و به‌عنوان یون همراه، برای آنیون‌های آلی و معدنی عمل می‌کند و

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 شیرخام در آوند چوبی می‌شود، انتقال کلسیم به اندام هوایی نیز افزایش می‌یابد. اما شدت ورود کلسیم به میوه به مرحله رشدی میوه بستگی دارد در مراحل اولیه رشد میوه (تشکیل میوه تا ریزش فیزیولوژی) به علت وجود تعداد زیاد استومات‌ها و همچنین عدم وجود یا عدم تشکیل کامل واکس سطحی (لایه روغنی) در سطح میوه، شدت جریان تعرق از میوه نسبتاً زیاد است که انتقال و ورود کلسیم به میوه را افزایش می‌دهد. اما به‌طور کلی انتقال کلسیم به میوه ممکن است تحت تأثیر پایه، میوه یا میکروکلیمای درخت و همچنین درجه حرارت، رطوبت نسبی و بارندگی منطقه نیز باشد (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Hocking et al., 2016).

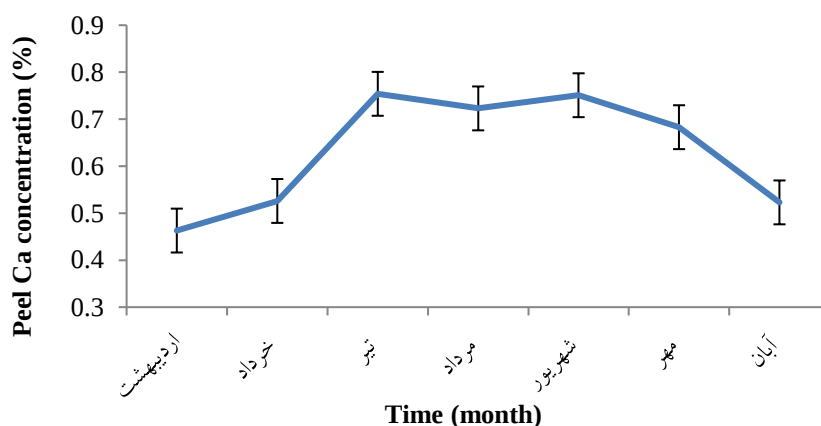
(Asadi Kangarshahi, 2021). نتایج اندازه‌گیری غلظت کلسیم میوه‌چه‌های درختان تامسون ناول در اواخر اردیبهشت‌ماه نشان داد که غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بیرون تاج بیشتر از میوه‌چه‌های درون تاج بود. نتایج بررسی روند تغییرات کلسیم در پوست میوه در طی فصل رشد نشان داد که غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بخش بیرونی تاج درختان با گذشت زمان به تدریج افزایش یافت و در تیرماه به حداکثر رسید و از تیر تا شهریورماه از نوسان کمتری برخوردار بود، سپس غلظت کلسیم شروع به کاهش کرد و در زمان برداشت به حداقل مقدار کاهش یافت (شکل ۴). در میوه‌های درون تاج نیز غلظت کلسیم پوست میوه پس از تشکیل میوه به تدریج افزایش یافت. در تیرماه به حداکثر رسید سپس از تیر تا مردادماه از نوسان کمتری برخوردار بود و از شهریورماه مجدداً شروع به کاهش کرد و در آبان ماه به حداقل رسید (شکل ۵). نتایج پژوهش‌های متعدد نشان داده است که جذب و انتقال کلسیم در آوندهای



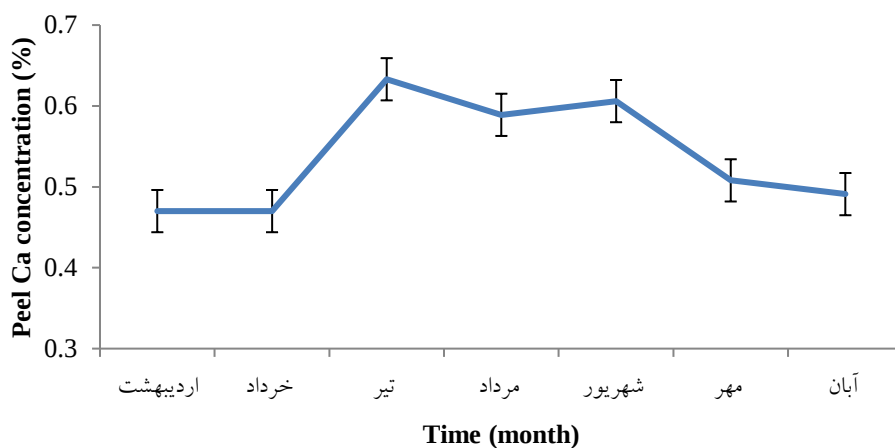
شکل ۲- ساختار پوست خارجی (فلاودو) میوه مرکبات
Figure 2- Peel exocarp (flavedo) stratural of citrus fruit



شکل ۳- ساختار مقطع عرضی پوست میوه مرکبات
Figure 3- Peel cross-section structural of the citrus fruit



شکل ۴- روند تغییرات غلظت کلسیم در پوست میوه پرتقال تامسون ناول (بیرون تاج) در طول فصل رشد
Figure 4-Change trend of Peel Ca concentration in 'Thomson' navel orange (outside the crown) during the growing season



شکل ۵- روند تغییرات غلظت کلسیم در پوست میوه پرتقال تامسون ناول (درون تاج) در طول فصل رشد
Figure 5 -Change trend of Peel Ca concentration in 'Thomson' navel orange (within the crown) during the growing season

پاسخ درختان مرکبات به کوددهی کلسیم

نتایج پژوهش‌های میدانی محلول‌پاشی نیترات کلسیم (پس از تشکیل میوه، قبل از ریزش فیزیولوژیک میوه‌چه‌ها و در اواخر مرحله دوم رشد میوه) نشان داده است که بیشترین عملکرد، قطر و وزن میوه از تیمارهای محلول‌پاشی نیترات کلسیم پس از تشکیل میوه و قبل 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 تیمارهای محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و قبل از ریزش فیزیولوژی میوه به‌دست آمد و کمترین قطر پوست و ویتامین ث از تیمار محلول‌پاشی در اواخر فاز دوم رشد میوه حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت (جدول‌های ۴

و ۵). همچنین نتایج نشان داد که محلول‌پاشی نیترات کلسیم تأثیری در چگالی عصاره، اسیدیته کل و مواد جامد محلول نداشت. بیشترین pH عصاره میوه از تیمار محلول‌پاشی قبل از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) حاصل شد و بین سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (اسدی کنگرشاهی، ۱۳۹۸؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، ۱۳۹۷). نتایج محلول‌پاشی نیترات کلسیم در مراحل کلیدی فنولوژی رشد میوه نشان داد که محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و محلول‌پاشی قبل از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) بیشترین تأثیر را در افزایش کلسیم پوست میوه پرتقال تامسون ناول داشتند. اما تأثیر محلول‌پاشی نیترات کلسیم در اواخر فاز دوم رشد میوه بر افزایش غلظت کلسیم پوست میوه کمتر از محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و قبل از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) بود (شکل ۶).

جدول ۴- تأثیر محلول‌پاشی نیترات کلسیم بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی میوه پرتقال تامسون ناول

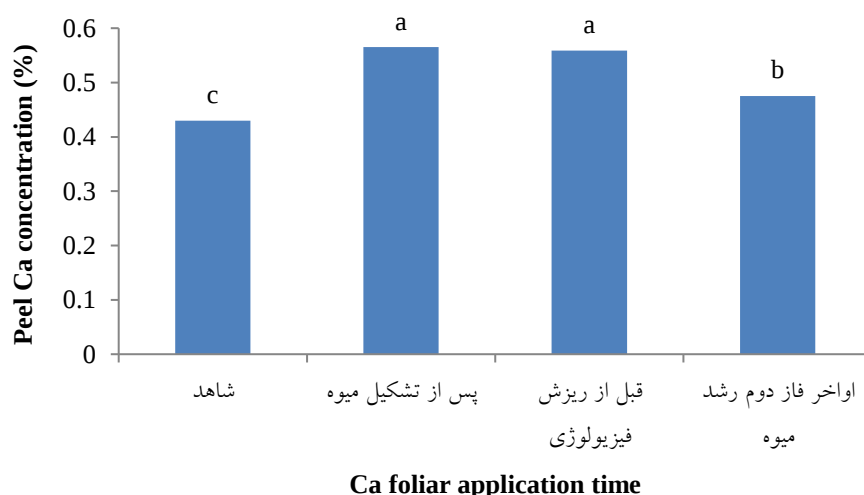
Table 4- Effect of calcium nitrate foliar application on yield and quality of 'Thomson' navel orange

چگالی میوه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Fruit density (g/cm ³)	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	قطر پوست (میلی متر) Diameter peel (mm)	قطر میوه (میلی‌متر) Diameter fruit (mm)	عملکرد (تن در هکتار) Yield (ton/ha)	زمان مصرف کلسیم Ca application time
1.012 a	290.13 b	2.80 c	73.94 b	24.12 b	شاهد control
1.014 a	308.36 a	3.89 a	78.61 a	25.68 a	پس از تشکیل میوه After post setting
1.012 a	308.04 a	3.41b	78.53 a	25.23 a	اواخر مرحله اول رشد میوه Late of the first (I) stage of fruit growth
1.013 a	291.93 b	2.82 c	74.44 b	24.32 b	اواخر فاز دوم رشد میوه Late of the second (II) stage of fruit growth

جدول ۵- تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم بر برخی ویژگی‌های کیفی عصاره میوه پرتقال تامسون ناول

Table 5- Effect of calcium nitrate foliar application on some quality properties of 'Thomson' navel orange

چگالی عصاره میوه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Fruit extract density (g/cm ³)	اسیدیته کل Total acidity (mg/100ml)	ویتامین ث Vitamin C (mg/100ml)	مواد جامد محلول (درصد) TTS (%)	pH	زمان مصرف کلسیم Ca application time
0.914 b	1.35 a	67.45 c	9.77 a	3.08 b	شاهد control
0.915 b	1.34 a	83.92 a	9.34 a	3.08 b	پس از تشکیل میوه After post setting
0.921 a	1.33 a	78.89 b	9.33 a	3.25 a	اواخر مرحله اول رشد میوه Late of the first (I) stage of fruit growth
0.915 b	1.35 a	69.75 c	9.67 a	3.09 b	اواخر فاز دوم رشد میوه Late of the second (II) stage of fruit growth



شکل ۶- تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم در مراحل کلیدی فنولوژی بر غلظت کلسیم پوست میوه
Figure 6- Effect of calcium nitrate foliar application on Ca peel in the main phonological stage

فراهمی کلسیم و فعالیت ریشه‌ها برای جذب آن تعیین می‌شود. بیشترین جذب کلسیم توسط آپوپلاست نوک ریشه‌ها و مناطق رشدی ریشه‌های جانبی (آنجایی که فاقد حلقه کاسپارین هستند یا حلقه کامل نشده) به‌طور غیرفعال 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. اگرچه جذب کلسیم توسط ریشه، ممکن است به مقدار کمی توسط جریان سیمپلاست نیز انجام شود. علاوه بر این، جذب کلسیم در ریشه تحت تأثیر رقابت بین کلسیم و قابلیت

به‌طورکلی حساسیت درختان مرکبات به ناهنجاری کمبود کلسیم تحت تأثیر ژنتیک، عوامل محیطی و توزیع کلسیم سلولی است. در درختان میوه آوندهای چوبی و نسبت آوندهای چوبی به آوندهای آبکشی در انتقال کلسیم به ارگان‌های مصرفی و در نتیجه مقدار و غلظت کلسیم در اندام‌های با تعلق پایین (به‌ویژه میوه‌ها و ...) مؤثر است. نسبت کلسیم به رادیکال‌های آزاد اکسیژن نیز در توسعه و شدت ناهنجاری‌های کلسیم مؤثر است. به‌طورک

(متناسب با رقم و شرایط اقلیمی) جریان آوندهای چوبی به این اندام‌ها حداقل شده و بیشتر آب مورد نیازشان از طریق آوندهای آبکشی تأمین می‌شود لذا مدیریت بهینه کف باغ و مدیریت مصرف کلسیم در مرحله اول و اوایل مرحله دوم رشد میوه در تأمین و افزایش غلظت کلسیم در میوه‌ها بسیار مؤثر است.

مدیریت کوددهی باغ و جذب کلسیم

نیتروژن: مصرف زیاد نیتروژن حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش می‌دهد. مصرف زیاد نیتروژن موجب تشدید رشد رویشی می‌شود. نظر به این‌که کلسیم با آب در جریان تعرق حرکت می‌کند لذا سطح ویژه بیشتر برگ‌ها، موجب حرکت و انتقال بیشتر آب و کلسیم به برگ‌ها نسبت به میوه‌ها می‌شود در نتیجه مقدار کلسیم میوه‌ها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر کوددهی نیتروژن همچنین موجب افزایش اندازه میوه می‌شود که به‌طور غیرمستقیم موجب افزایش توسعه ناهنجاری‌های کمبود کلسیم می‌شود. میوه‌های با غلظت زیاد نیتروژن همچنین 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، به‌احتمال زیاد مکانیسم‌های که موجب ناهنجاری‌های کمبود کلسیم می‌شوند را تشدید می‌کند. علاوه 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 از آنجایی‌که بین آمونیم و کلسیم برهمکنش منفی برای جذب توسط ریشه‌ها وجود دارد بنابراین مصرف زیاد کودهای آمونیومی در منطقه ریشه جذب کلسیم را کاهش می‌دهد. به‌هرحال، آمونیم در لایه‌های سطحی خاک به‌سرعت تبدیل به نترات می‌شود. اما به‌طورکلی نتایج پژوهش‌های متعدد 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 کودهای سولفات آمونیم جذب و انتقال کلسیم به اندام هوایی را کاهش می‌دهند. به‌طورکلی مصرف زیاد کودهای

استفاده دیگر یون‌ها در محلول خاک نیز است. بنابراین قابلیت استفاده دیگر عناصر غذایی در خاک نیز بر جذب کلسیم و در نتیجه حساسیت برگ و میوه به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم تأثیر دارد (Freitas and Mitcham, 2012). 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 مرستمی یا برگ‌های داخلی با تعرق کمتر شوند. علاوه بر این، برگ‌های بالغ آب را به‌طور انحصاری 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 این‌که کلسیم فقط توسط آوندهای چوبی در گیاهان حرکت می‌کند لذا 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 (Wallace and Mueller, 1980; Asadi). چنین رفتاری در دیگر اندام‌ها مانند نواحی مرستمی 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 میوه‌های مرکبات، در بخش خارجی پوست‌شان یک لایه واکس دارند این لایه واکس، پس از تشکیل میوه در اوایل بهار بسیار نازک و به‌صورت قطعات ناپیوسته است که به‌تدریج ضخیم‌

نیتروژنی موجب تحریک رشد رویشی سرشاخه‌ها (به‌ویژه در فاز اول رشد میوه) شده و بیشتر کلسیم انتقالی در شیره خام به این نقاط در حال رشد وارد می‌شود و کمبود کلسیم را در میوه‌چه‌ها تشدید می‌کند (Taylor and Locascio, 2004; Olle and Bender, 2009). به‌طور کلی برای کوددهی نیتروژن توصیه می‌شود که باغداران، مصرف آن را قبل از توسعه برگ‌ها و گلدهی در شروع و اوایل فصل را متوقف کنند یا حداکثر پنج الی ۱۰ درصد نیاز سالانه درختان در مرحله رشد و توسعه سرشاخه‌های بهاره گلدهی شروع نمایند. پس از ریزش گلبرگ‌ها و تشکیل میوه به‌تدریج مقدار مصرف نیتروژن (درصدی از نیاز سالانه) را افزایش داده و در نیمه دوم مرحله اول رشد تا اواسط مرحله دوم رشد میوه (با توجه به رقم) به حداکثر مقدار مصرف ارتقا دهند. سپس به‌تدریج مصرف نیتروژن به حداقل مقدار کاهش دهند یا متوقف کنند و مجدداً پس از برداشت، کوددهی نیتروژن جهت افزایش ذخیره نیتروژن اندام‌های دائمی انجام دهند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2023).

پتاسیم و منیزیم: کوددهی زیاد پتاسیم و منیزیم نیز ممکن است ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را افزایش دهند. معمولاً غلظت پتاسیم، منیزیم و کلسیم در ریشه و برگ‌های مسن بالاست نظر به این‌که پتاسیم به‌آسانی در داخل گیاهان جابجا و توزیع مجدد می‌شود بنابراین میوه‌ها و اندام‌های مریستمی مشکلی از نظر فراهمی پتاسیم ندارند. اما غلظت منیزیم و به‌ویژه کلسیم در بافت‌های مانند میوه‌ها و برگ‌های جوان که از آوند آبکش تغذیه می‌کنند اغلب پایین است. به‌علاوه در شروع توسعه سلولی میوه‌ها، اغلب با اختلال در عمل آوندهای چوبی شروع می‌شود و ممکن است منجر به کاهش جذب کلسیم میوه‌ها شود درحالی‌که عملکرد دستگاه آوند آبکشی نسبت به آوند چوبی تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند که مناسب فراهمی و انتقال پتاسیم به میوه‌ها است. که موجب افزایش غلظت پتاسیم در میوه‌ها می‌شود. معمولاً از نسبت بالای پتاسیم به کلسیم، منیزیم به کلسیم یا پتاسیم و منیزیم به کلسیم در میوه‌ها برای پیش‌بینی

ناهنجاری‌های کمبود کلسیم استفاده می‌شود. پتاسیم و منیزیم با کلسیم برای محل‌های پیوند در سطح غشا پلاسمایی رقابت می‌کنند اما این عناصر 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 کلسیم در غشاها، موجب افزایش نشت-پذیری آن‌ها شده و منجر به نشت مواد متابولیکی و سرانجام پلاسمولیز، شکست غشاها و مرگ سلول‌ها خواهد شد. اثر منیزیم در جذب کلسیم به مقدار نسبی کلسیم و منیزیم در محلول خاک بستگی دارد. اگر مجموع غلظت کلسیم به‌علاوه منیزیم در محلول خاک، کمتر از ۲۰ میلی‌مول در لیتر باشد معمولاً نسبت جذب کلسیم به منیزیم، مشابه نسبت غلظت آن‌ها در محلول خاک خواهد بود و با افزایش تبخیر و 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 (Wallace and Mueller, 1980; Taylor and Locascio, 2004). به‌طور کلی برای افزایش راندمان جذب پتاسیم و منیزیم و کاهش رقابت با کلسیم، توصیه می‌شود که باغداران، کوددهی پتاسیم و منیزیم را متناسب با فنولوژی رشد میوه از اواسط تا اواخر مرحله اول شروع نمایند و در مرحله دوم رشد میوه به حداکثر مقدار مصرف ارتقا داده شود (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2024).

بور: 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 می‌توان

کلسیم را انجام می‌دهند. به‌طور کلی گزارش‌های مختلف نشان داده است که بور همچنین نقش مهمی در پایداری ساختمانی و کارکردی غشا دارد (Xuan et al. 2005; Asadi Kangarshahi, 2021).

به‌طور کلی کاتیون‌ها جذب و توزیع کلسیم را کاهش می‌دهند درحالی‌که آنیون‌ها، توسعه علائم کمبود ناشی از کمبود کلسیم را کاهش می‌دهند. مصرف زیاد نیتروژن موجب افزایش رشد میوه، کاهش غلظت کلسیم در بافت آن و افزایش احتمال ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم می‌شود. همچنین وجود غلظت زیاد کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، آمونیم، منیزیم و یون هیدروژن در محلول خاک، جذب و توزیع کلسیم را کاهش می‌دهند. بررسی تأثیر آنیون‌های نیترات، کلر، سولفات و بی‌کربنات در ایجاد ناهنجاری‌های کمبود کلسیم نشان داد که یون کلر بیشترین تأثیر در افزایش کمبود و ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم را دارد که عمدتاً ناشی از کاهش انتقال کلسیم به اندام هوایی (تا غلظت ناکافی کلسیم در محیط ریشه) و بافت‌های در حال توسعه است بنابراین زیادی یون‌های محلول در محیط ریشه می‌تواند در جذب کلسیم اختلال ایجاد کنند غلظت زیاد منگنز در محلول خاک و سطح ریشه‌ها موجب کاهش جابجایی کلسیم به اندام هوایی و کاهش غلظت کلسیم در برگ‌ها می‌شود. مصرف زیاد کودهای پتاسیم و آمونیوم 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 (Olle and Bender, 2009).

تنظیم‌کننده‌های رشد و جذب کلسیم

برخی تنظیم‌کننده‌ای رشد با ناهنجاری‌های کمبود کلسیم ارتباط دارند که به احتمال زیاد به علت نقش آن‌ها در انتقال و توزیع کلسیم در بافت‌ها و سلول‌ها است. تنظیم‌کننده‌های رشد در رشد ریشه، فعالیت ریشه و جذب کلسیم تأثیر دارند. انتقال اکسین از مناطق انتهایی به سمت ریشه و میزان اکسین ریشه، مسئول افزایش رشد و فعالیت ریشه

است که موجب افزایش فعالیت ریشه و جذب کلسیم می‌شود. سیتوکینین‌ها نیز موجب بهبود تمایز سلول‌ها در ریشه می‌شوند و می‌توانند جذب کلسیم توسط ریشه‌ها را افزایش دهند. جیبرلین‌ها با افزایش ترجمه بازدارنده‌های چرخه سلولی، مانع تقسیم سلولی و رشد می‌شوند لذا موجب کاهش جذب کلسیم توسط ریشه‌ها و کاهش تجمع کلسیم در میوه‌ها، مریستم‌ها و برگ‌ها می‌شوند. بنابراین این تنظیم‌کننده‌های رشد بر جذب کلسیم توسط ریشه، میزان کلسیم گیاه و در نتیجه حساسیت میوه‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم تأثیر دارند. با توجه به این‌که کلسیم عمدتاً در آوندهای چوبی حرکت می‌کند لذا تعداد این آوندها در حرکت و انتقال کلسیم به میوه‌ها مؤثر است و افزایش تعداد این آوندها می‌تواند پتانسیل حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم کاهش دهند. تنظیم‌کننده‌های رشد در کنترل تمایز بافت‌های آوندی نقش دارند به‌طوری که تمایز آوندهای چوبی با انتقال اکسین از مناطق انتهایی به سمت پایه (برگ و میوه) شروع می‌شود و با حضور سیتوکینین افزایش می‌یابد.

برخی مطالعات نیز نشان داده است که تمایز آوند چوبی با نسبت بالای اکسین به جیبرلین شروع می‌شود درحالی‌که نسبت‌های پایین اکسین به جیبرلین موجب پایداری توسعه آوندهای چوبی می‌شوند. جیبرلین‌ها همچنین محرک انقباض سلولی هستند که منجر به انقباض آوندهای چوبی در طول مراحل انقباض سریع

استومات‌ها و در نتیجه کاهش تعرق برگ و کل گیاه شود بدون این‌که بر تعرق میوه تأثیری داشته باشد. بسته شدن روزنه‌های برگ، جریان شیره آوند چوبی و جذب کلسیم به برگ‌های بالغ را کاهش می‌دهد در مقابل جریان شیره خام و جذب کلسیم را به درون میوه‌ها را افزایش می‌دهد که حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را تحت شرایط تنش کلسیم را کاهش می‌دهد. بنابراین شرایط محیطی مناسب برای تعرق زیاد در برگ‌های بالغ، موجب افزایش تلفات آب و تشدید تنش آبی می‌شود که موجب کاهش جریان شیره خام به درون میوه‌ها و جذب کلسیم توسط میوه‌ها و در نتیجه افزایش حساسیت میوه‌ها به ناهنجاری کمبود کلسیم می‌شود. سرعت رشد برگ و میوه توسط فرآیندهای تقسیم سلولی و توسعه سلولی تعیین می‌شود که توسط تنظیم‌کننده‌های رشد در این بافت‌ها کنترل می‌شوند (Lemtiri and Macrobbe, 1994; Lecourieux et al. 2006).

به‌طور کلی بافت‌های که معمولاً بیشترین توسعه و سرعت رشدشان هم‌زمان با جذب کلسیم کمتر باشد به دلیل افزایش رقت کلسیم، این بافت‌ها به ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم حساس‌تر هستند. بنابراین بافت‌های انتهایی در برگ‌ها و میوه‌ها به علت سرعت رشد بیشتر و دریافت کمتر کلسیم (به علت تعرق کمتر) حساسیت بیشتری به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم دارند. جیبرلین‌ها، توسعه سلولی را تسریع می‌کنند بنابراین مصرف خارجی

آن‌ها موجب کاهش جذب کلسیم و رقیق شدن کلسیم در برگ‌ها و میوه‌ها می‌شود و حساسیت این بافت‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را افزایش می‌دهد. اثر اسید آبسزیک در جلوگیری یا کاهش ناهنجاری کمبود کلسیم نیز به اثر تضادی آن در پاسخ‌های اسید جیبرلیک است که جذب کلسیم برگ و میوه را محدود می‌کند. در سطح سلولی، تنظیم‌کننده‌های رشد با تنظیم تقسیم سلولی و احتمالاً تنظیم پاسخ‌های سلولی با توسعه علائم، در حساسیت بافت‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم تأثیر دارند (Freitas et al., 2011 & 2012).

کوددهی خاکی کلسیم

مصرف کلسیم در خاک‌های اسیدی با pH کمتر از ۵/۵ به شکل کربنات کلسیم (آهک) برای افزایش pH به حدود ۶ تا ۶/۵ و حفظ pH خاک در این دامنه توصیه می‌شود. اگر pH خاک در دامنه ۶ تا ۶/۵ باشد نیازی به مصرف خاکی کودهای کلسیمی نیست مگر این‌که نتایج تجزیه خاک نشان دهد که کلسیم قابل استفاده خاک کمتر از مقدار کفایت است در این صورت، مصرف گچ یا کودهای محلول کلسیمی توصیه می‌شود. اگر pH خاک، بیشتر از ۶/۵ باشد معمولاً خاک کلسیم کافی دارد و نیازی به مصرف کودهای کلسیم نیست. در جدول ۶ برخی منابع کلسیم برای مصرف در خاک‌های شور و خاک‌های اسیدی آورده شده است.

جدول ۶- منابع کودی کلسیم برای مصرف خاکی (خاک‌های شور و اسیدی) درختان مرکبات

Table 6- Sources of calcium fertilizers for soil application (saline and acid soils) of citrus trees

(Asadi Kangarshahi, 2018)

کود Fertilize	فرمول شیمیایی Chemical formula	حلالیت در آب (کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر) Solubility in water (kg/1000L)
سولفات کلسیم calcium sulfate	Ca SO	

رس سیلتی، لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی و لوم رسی)، خاک های شور و خاک های در معرض تنش مانداب مصرف نیترات کلسیم به مقدار ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم به ازای هر درخت در دو مرحله به فاصله ۲۰ تا ۳۰ روز در میان در اواسط مرحله اول رشد میوه و اوایل مرحله دوم رشد میوه توصیه می شود (اسیدی کنگرشاهی، ۲۰۱۸).

درختان مرکبات مصرف می شوند (جدول ۷). کودهای تزریق شده به سیستم آبیاری باید کاملاً محلول باشند و هیچ گونه رسوبی ایجاد نکنند. معمولاً برای کودآبیاری از منابع کودی با حلالیت بالا استفاده می شود. برای درختان بارده (به ویژه درختان مسن) در خاک های با بافت سبک (شنی، شن لومی و لوم شنی) و سنگین (رسی، رس شنی،

جدول ۷- منابع کودی کلسیم برای کودآبیاری درختان مرکبات

Table 7- Sources of calcium fertilizers for fertigation of citrus trees (asadi Kangarshahi, 2018)

کود Fertilize	فرمول شیمیایی Chemical formula	وزن مولکولی (گرم بر مول) Molecular weight (g/mol)	حلالیت در آب (کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر) Solubility in water (kg/1000L)
کربوکسیلات کلسیم Calcium carboxylate	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	158.17	347
نیترات کلسیم Calcium nitrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O}$	236.09	1200
کلرید کلسیم Calcium chloride	$\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$	146.86	745
کلات کلسیم Calcium chelate	CaEDTA	374.30	800
گلوکونات کلسیم Calcium gluconate	$\text{Ca}[\text{C}(\text{OH})(\text{CHOH})_5\text{COO}]_2$	490.43	-

محلول پاشی کلسیم

محلول پاشی کلسیم برای همه درختان بارده به ویژه ارقامی که میوه آن ها در انبار ذخیره می شود در اوایل مرحله اول رشد میوه (پس از تشکیل میوه و رسیدن قطر میوه چه ها به حدود ۵ تا ۱۰ میلی متر) و همچنین تکرار آن قبل از شروع ریزش تابستانه و در اوایل مرحله دوم رشد میوه ها با کودهای مناسب کلسیمی مانند نیترات کلسیم یا کودهای کلسیمی با بنیان آلی، برای افزایش اندازه، بهبود کیفی رنگ میوه، افزایش انبارمانی میوه و ... توصیه می شود (جدول ۸). محلول پاشی کلسیم در کاهش ناهنجاری های

ناشی از کمبود کلسیم مؤثر است ناهنجاری های مربوط به کمبود کلسیم معمولاً با عدم توانایی گیاهان برای انتقال کلسیم کافی به اند

جدول ۸- منابع کودی کلسیم برای محلول‌پاشی درختان مرکبات

Table 8- Sources of calcium fertilizers for foliar application of citrus trees (asadi Kangarshahi, 2018)

حلالیت در آب (کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر) Solubility in water (kg/1000L)	وزن مولکولی (گرم بر مول) Molecular weight (g/mol)	فرمول شیمیایی Chemical formula	کود Fertilize
347	158.17	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	کربوکسیلات کلسیم Calcium carboxylate
1200	36.09	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O}$	نیترات کلسیم Calcium nitrat
800	374.30	CaEDTA	کلات کلسیم Calcium chelate
-	490.43	$\text{Ca}[\text{C}(\text{OH})(\text{CHOH})_5\text{COO}]_2$	گلوکونات کلسیم Calcium gluconate

جدول ۹- محلول‌پاشی کلسیم برای درختان بارده مرکبات

Table 9- Calcium foliar application for citrus fruits trees

غلظت و نوع کود Fertilizer concentration and type	مرحله رشدی Growth stage	ردیف line
محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت سه تا پنج در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار	پس از تشکیل میوه post setting	1
محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت پنج تا هفت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار	قبل از ریزش تابستانه Phisological drop (june drop)	2
محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت شش تا هشت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار	اوایل تا اواسط مرحله دوم رشد میوه Early to mid second stage (II) of fruit growth	3

اختلاط کودهای کلسیمی

منابع کودی کلسیم، امکان اختلاط آن با سایر کودهای شیمیایی و همچنین اختلاط‌هایی که موجب کاهش حلالیت و یا رسوب می‌شوند در جدول ۱۰ آورده شده است. باغداران می‌توانند از این جدول‌ها به‌عنوان جدول راهنما برای اختلاط کودهای کلسیمی با سایر کودهای شیمیایی برای کودآبیاری یا محلول‌پاشی استفاده نمایند. باغداران باید مراقب باشند زمانی که کودهای محلول فسفر توسط سامانه‌های آبی

جدول ۱۰- سازگاری و امکان اختلاط کودهای کلسیمی با برخی کودها و ترکیبات شیمیایی معمول برای کود آبیاری و محلول پاشی
 Table 10- Compatibility and the possibility of mixing calcium fertilizers with some fertilizers and common chemical compounds for fertigation and foliar spraying (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2014)

کود Fertilizer	اوره Urea	نیترات آمونیم Ammonium nitrate	سولفات آمونیم Ammonium sulfate	نیترات پتاسیم Potassium nitrate	کلرید پتاسیم Potassium chloride	سولفات پتاسیم Potassium sulfate	فسفات آمونیم Ammonium phosphate	سولفات آهن Iron sulfate	سولفات منگنز Manganese sulfate
نیترات یا کلرید کلسیم Calcium nitrate or chloride	✓	✓	R	✓	✓	X	X	X	X
کود Fertilizer	سولفات روی Zinc sulfate	سولفات مس Copper sulfate	کلات‌های آهن Iron chelates	کلات‌های منگنز Manganese chelates	کلات‌های روی Zinc chelates	کلات‌های مس Copper chelates	سولفات منیزیم magnesium sulfate	اسید فسفریک Phosphoric acid	اسید سولفوریک Sulfuric acid
نیترات یا کلرید کلسیم Calcium nitrate or chloride	X	X	R	R	R	R	X	X	X

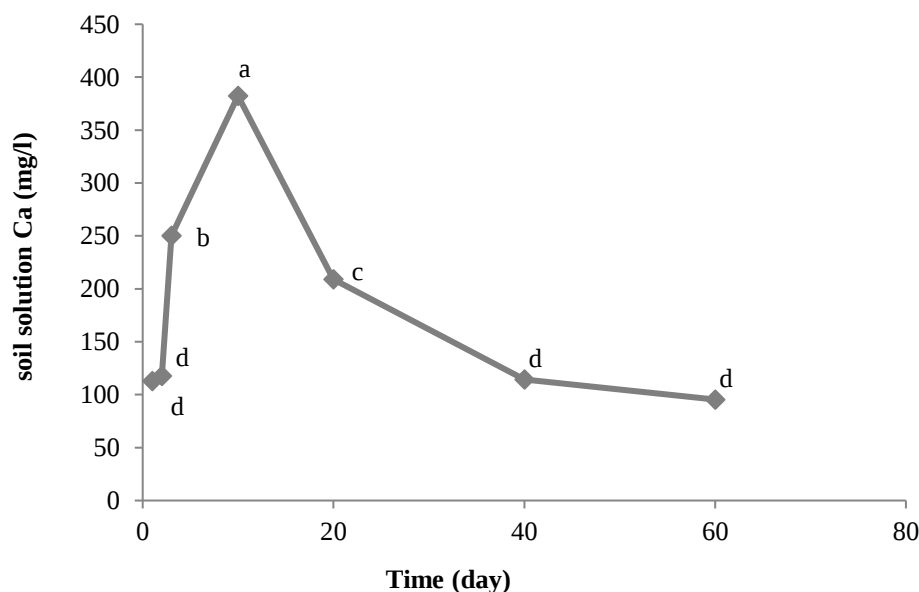
✓- سازگار (قابل اختلاط)، R- کاهش حلالیت، X- ناسازگار (غیرقابل اختلاط)
 ✓-compatible, R- reducing solubility, X- incompatible

کلسیم و تنش خشکی

تنش خشکی موجب کاهش رشد ریشه، کاهش جذب کلسیم و کاهش انتقال آن به اندام هوایی می‌شود. تنش آبی موجب کاهش شیب پتانسیل آبی بین ریشه‌ها با میوه‌ها و برگ‌های جوان در حال توسعه با تعرق کم می‌شود لذا انتقال کلسیم توسط آوندهای چوبی به این بافت‌ها را کاهش و حساسیت آن‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش می‌دهد. نقش سیگنالی کلسیم در کنترل حرکت روزنه‌ها نشان می‌دهد که برای باز بودن پایدار استومات‌ها، کلسیم باید از سیتوپلاسم سلول‌های نگهبان خارج شود در مقابل بسته شدن استومات‌ها با کلسیم زیاد در سیتوپلاسم تحریک می‌شود. باز بودن استومات‌ها برای جذب دی-اکسیدکربن و فتوسنتز ضروری است. به هر حال، جذب دی اکسیدکربن همراه با تلفات مقدار زیادی آب از گیاهان است بنابراین، باز و بسته شدن استومات‌ها در گیاهان طوری تنظیم شده است که برای جلوگیری از تلفات آب

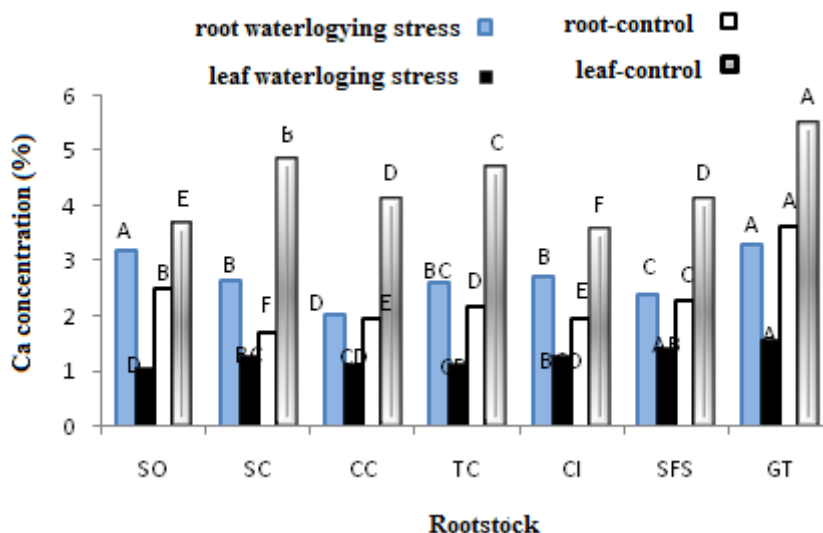
هوایی مرطوب می‌تواند موجب کاهش موقتی انتقال کلسیم به سرشاخه‌ها شود. بنابراین مدیریت رطوبت بهینه خاک (نه خیلی مرطوب و نه خیلی خشک) در حرکت کلسیم کافی از محلول خاک به سطح ریشه و سپس به اندام هوایی کمک می‌کند. مدیریت بهینه آبیاری و اجتناب از تنش خشکی و تنش ماندابی در منطقه ریشه درختان مرکبات، به‌ویژه در مرحله اول رشد میوه در افزایش کلسیم میوه‌ها بسیار مؤثر است. تنش مانداب به‌ویژه در اوایل فصل رشد (فاز اول رشد میوه)، جذب کلسیم توسط ریشه و انتقال آن به اندام هوایی را به شدت کاهش می‌دهد. این تنش مانداب می‌تواند ناشی از بارندگی‌های زیاد و متوالی و همچنین آبیاری زیاد و نامناسب باشد که موجب کاهش تهویه خاک منطقه ریشه می‌شود. میانگین غلظت کلسیم در محلول خاک آهکی (هفت خاک با آهک کل از ۲ تا ۴۵ درصد) در حدود ۱۱۳ میلی‌گرم در لیتر بود و تنش مانداب موجب افزایش میانگین غلظت کلسیم در محلول این خاک‌ها شد (Asadi Kangarshahi, 2021). تغییرات زمانی غلظت کلسیم محلول خاک‌های مختلف در شرایط ماندابی نشان داد که غلظت کلسیم در این خاک‌ها پس از ۱۰ روز به حداکثر رسید سپس کاهش یافت و روند تغییرات تقریباً یکسان بود (شکل ۱۳). دیگر پژوهشگران نیز نشان دادند که

غلظت کلسیم در محلول خاک تحت شرایط مانداب و غرقاب افزایش می‌یابد (Larson et al., 1991; Narteh and Sahrawat, 1999). افزایش غلظت کلسیم در محلول خاک ناشی از حل شدن کربنات‌ها و بی‌کربنات‌های نامحلول خاک در خاک‌های آهکی تحت شرایط ماندابی، حلالیت فسفات‌های کلسیم، کاهش سایت‌های تبادلی به دلیل حلالیت کربن آلی (تخریب ساختمان خاک و خاکدانه‌ها با ماندابی شدن موجب حل شدن برخی عوامل سیمانی از جمله مواد آلی با وزن سبک به محلول خاک می‌شود که می‌توانند به‌صورت پوششی در روی برخی محل‌های تبادلی قرار گیرند) و اکسیدهای هیدروکسی آهن و منگنز و همچنین جایگزینی کلسیم در سایت‌های تبادلی خاک با سدیم، آهن و منگنز است که به دلیل افزایش قدرت یونی محلول و همچنین افزایش غلظت آهن، منگنز و سدیم در محلول خاک است (لارسون و همکاران، ۱۹۹۱). بنابراین میانگین غلظت کلسیم در محلول خاک‌های تحت شرایط مانداب ابتدا افزایش یافت و حدوداً پس از ۱۰ روز به حداکثر رسید، سپس دوباره با شیب کمتری کاهش یافت و به مقدار اولیه در شروع تنش مانداب و غرقاب رسید، غلظت کلسیم حدود ۱۰ روز پس از مانداب به حداکثر رسید (شکل ۷).



همچنین غلظت کلسیم در برگ درختان مرکبات نیز به شدت تحت تأثیر شرایط تنش مانداب قرار می‌گیرد و مقدار کلسیم در برگ بسیار بیشتر از کلسیم ریشه تحت تأثیر شرایط تنش قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌های میدانی نشان داده است که میانگین غلظت کلسیم در برگ درختان مرکبات بدون تنش مانداب از $3/5$ تا $5/3$ درصد و درختان در معرض تنش مانداب از $1/26$ تا $3/8$ درصد است (Asadi Kangarshahi, 2021). از آنجایی که کلسیم به صورت غیرفعال توسط منطقه نوک ریشه‌های در حال رشد جذب می‌شود، بنابراین پایه‌هایی که رشد ریشه‌های آن‌ها، بیشتر تحت تأثیر تنش مانداب قرار می‌گیرد جذب کلسیم آن‌ها نیز بیشتر تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. کلسیم به چندین شکل از جمله یونی در خاک وجود دارد که روی سطح ذرات خاک یا در محلول خاک وجود دارد. معمولاً بیش از ۸۰ درصد مکان‌های تبادل‌ی خاک را یون کلسیم اشغال می‌کند که با یون‌های موجود در محلول خاک در تعادل هستند. کلسیم تبدلی، در پایداری ساختمان خاک نقش اساسی دارد و سبب افزایش تجمع ذرات خاک به شکل خاکدانه می‌شود. با مانداب و غرقاب شدن خاک، مقدار زیادی از کلسیم تبدلی وارد محلول خاک شده و تخریب خاکدانه‌ها تسریع می‌شود. از طرفی، کلسیم به شکل غیرفعال توسط ریشه‌های در حال رشد جذب می‌شود بنابراین نیاز به مصرف انرژی ندارد. اما در مقابل، فقط نواحی انتهایی اطراف نوک ریشه‌های در حال رشد قادر به جذب کلسیم (بر خلاف فسفر و پتاسیم) می‌باشند. بنابراین

هر عاملی که رشد ریشه را محدود کند (مانند تنش مانداب و غرقاب) جذب کلسیم را نیز کاهش می‌دهند. کلسیم همچنین به شکل خاصی در آوندهای چوبی حرکت می‌کند و غلظت آن در آوندهای آبکشی نیز بسیار کم است، بنابراین به آسانی نمی‌تواند از برگ‌ها خارج و به سایر اندام‌ها انتقال یابد. کلسیم در بسیاری از فرآیندهای گیاه مانند تقسیم سلولی، طویل شدن سلول‌ها، ثبات نفوذپذیری غشای سلولی و استحکام سلولی نقش دارد و کمبود آن موجب می‌شود غشای سلول‌ها تراوا و نشت‌پذیر شود و کنترل ورود و خروج سلول‌ها کاهش یابد. نظر به این که کلسیم به صورت جریان توده‌ای به سطح ریشه‌ها حرکت می‌کند و به شکل غیرفعال جذب و توسط آوندهای چوبی به اندام هوایی انتقال می‌یابد و از طرفی تنش مانداب، میانگین هدایت هیدرولیکی ریشه را به شدت کاهش می‌دهد، بنابراین با کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه‌ها، جریان توده‌ای آب به سطح ریشه و به واسطه آن حرکت کلسیم به سطح ریشه و همچنین انتقال آن در آوندهای چوبی از ریشه به اندام هوایی کاهش می‌یابد که موجب کاهش شدید غلظت کلسیم در برگ‌ها می‌شود. نتایج پژوهش‌های میدانی نشان داده است که درختان مرکبات با پایه ترورسیترنج و سی-۳۵ به ترتیب بیشترین و کمترین تغییرات غلظت کلسیم در برگ در پاسخ به تنش مانداب دارند و به طور کلی میانگین تغییرات غلظت کلسیم در ریشه کمتر از تغییرات غلظت کلسیم در برگ در شرایط تنش مانداب است (شکل ۸).



شکل ۸- تأثیر مانداب طولانی مدت بر تغییرات غلظت کلسیم در برگ و ریشه درختان مرکبات با پایه‌های مختلف
 Figure 8- The effect of long-term waterlogging stress on changes in Ca concentration in leaves and roots of citrus trees with different rootstocks

(SO: نارنج؛ SC: سوینگل سیتروملو؛ CC: کاریزوسیترنج؛ TC: ترویرسیترنج؛ CI: سی ۳۵؛ SFS: اسموت فلت سویل؛ GT: گوتو)

سدیم در مکان‌های تبادلی می‌شود و این کاتیون‌های رها شده با یون سولفات در محلول خاک ترکیب و ترکیبات محلول این کاتیون‌ها حاصل خواهد شد که به آسانی قابل شستشو و انتقال به لایه‌های پایینی پوفیل خاک هستند بنابراین تأثیری در pH خاک نخواهد داشت. لذا گچ بیشتر به عنوان یک منبع کلسیم استفاده می‌شود زیرا بسیار محلول-تر از آهک به‌ویژه در خاک‌های قلیایی است (اما در کل حلالیت گچ نیز پایین است). گچ همچنین می‌تواند به عنوان منبع سولفور در خاک‌های با کمبود سولفور مصرف شود.

کلسیم و تنش سرما و یخبندان

</

گیرند بسیار مشخص است. همچنین بسته شدن روزنه‌ها ناشی از اسید آسبیزیک 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 به عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر در تحمل درختان به سرمازدگی و محافظت برگ‌ها از دهیدراسیون نام برده شود. به طور کلی در هنگام رخداد تنش سرما و یخبندان، کلسیم درون سیتوپلاسم سلول افزایش می‌یابد و این افزایش، از کلسیم فضای بیرون سلولی تأمین می‌شود. به طور کلی کلسیم از طریق 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 مؤثر هستند. در صورتی که درختان کمبود کلسیم داشته باشند القاء ژن‌ها برای سازگاری به سرما و یخبندان انجام نخواهد شد. مطالعات میدانی نگارندگان نشان داده است که درختان مرکبات دارای کمبود کلسیم نسبت به درختان دارای کلسیم مطلوب حساس‌تر به تنش سرما و یخبندان هستند.

کلسیم و حساسیت به بیماری‌ها

به طور کلی اهمیت کلسیم در مکانیسم دفاعی سلول‌ها عمدتاً 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 مؤثر است. بخش زیادی از کلسیم (برخلاف دیگر عناصر غذایی پرمصرف) 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 تقریباً غیرقابل تبادل می‌شود. در بیشتر دولپه‌ای‌ها از جمله مرکبات، تقریباً ۵۰ درصد از کلسیم به شکل پکتات‌های کلسیم است. تجزیه پکتات‌ها، توسط آنزیم پلی گالاکتوروناز انجام می‌شود و غلظت بالای کلسیم در بافت‌ها به شدت از فعالیت این آنزیم جلوگیری می‌کند. در مقابل، در بافت‌های دارای کمبود کلسیم، فعالیت این آنزیم افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار پکتات کلسیم در دیواره‌های سلولی گیاهان و میوه‌ها، در حساسیت این بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی بسیار مؤثر است (Rudd et al., 1999; Rahman and Punja, 2002). به طوری که هر چه مقدار کلسیم بیشتر باشد حساسیت با

بیشتر می‌شود که مقاومت آن‌ها را در مقابل هجوم و حمله پسیل افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کلسیم ممکن است اثرات منفی HLB در رشد ریشه درختان آلوده را خنثی کند در کل شواهدی وجود دارد که تغذیه بهینه می‌تواند علائم HLB را کاهش دهد و بهره‌وری و عمر اقتصادی درختان را افزایش دهد و به نظر می‌رسد مدیریت تغذیه کلسیم در افزایش بهره‌وری و افزایش عمر اقتصادی درختان مؤثر است (Grierson, 1981; Gottwald et al., 2007).

کلسیم، درجه حرارت و رطوبت نسبی محیط

کلسیم با جریان تعرق به اندام هوایی (میوه و برگ‌ها) حرکت می‌کند بنابراین کاهش تعرق در شرایط محیطی با رطوبت نسبی زیاد می‌تواند جذب کلسیم را محدود کند دلایل کاهش انتقال کلسیم در شرایط محیطی با رطوبت نسبی زیاد این است که اولاً در شرایط رطوبت نسبی زیاد، سرعت رشد افزایش می‌یابد که می‌تواند تقاضای بافت‌های مرستمی را برای کلسیم افزایش دهد و بر اساس اصل رقت، غلظت کلسیم در بافت‌های در حال توسعه می‌تواند به زیر حد بحرانی خسارت برسد. دلیل 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. رخداد درجه حرارت‌های بسیار پایین و بالا، جذب کلسیم را کاهش می‌دهند و در نتیجه کمبود کلسیم را تشدید می‌کنند. اختلاف منفی بین درجه حرارت روز و شب (درجه حرارت شب بیشتر از روز) می‌تواند بروز ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم را تشدید کند. شدت نور بالا، به مقداری که رشد میوه‌ها را تشدید کند می‌تواند کمبود کلسیم را تشدید کند به‌طور کلی شرایط محیطی مناسب برای تعرق بالا در برگ‌های بالغ، افزایش تلفات آب و همچنین تنش آبی موجب کاهش جریان شیره خام به درون میوه‌ها و جذب کلسیم توسط میوه‌ها خواهد شد و در نتیجه حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری کمبود کلسیم افزایش می‌دهد (Tadesse et al., 2001; Taylor and Locascio, 2004).

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 مؤثر است. علاوه بر این، کاهش در تعرق کل گیاه یا توسط کاهش کمبود فشار بخار آب یا محلول‌پاشی گیاهان با اسید آسزیک 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 کلسیم شود. تنش آبی نیز موجب تشدید توسعه ناهنجاری‌های کمبود کلسیم در میوه‌ها و برگ‌های جوان با

مقدار زیادی شن در منطقه ریشه هستند به علت ظرفیت نگهداری پایین به مدیریت آبیاری فشرده تری نیاز دارند حجم زیاد آب مصرفی در هر آبیاری (در یک زمان) می تواند موجب آبشویی شدید عناصر غذایی از جمله کلسیم شود. در مقابل، خاک های بافت ریز (رسی، رس شنی و رس سیلتی) نیز اغلب مشکل ساختمانی و زهکشی دارند که موجب کاهش توسعه ریشه، تشدید کمبود کلسیم، تشدید خشکیدگی سرشاخه ها و زوال مرکبات می شوند. به طور کلی کلاس های متوسط و نسبتاً درشت (لوم شنی، لوم، لوم سیلتی و سیلتی) مناسب ترین کلاس های بافت خاک برای کاشت درختان مرکبات هستند. بافت های لوم رسی سیلتی، لوم رسی، لوم رسی شنی نسبتاً 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 طی فصل رشد متناسب با فنولوژی درختان در این خاک ها در افزایش عملکرد و کیفیت میوه آن ها بسیار مؤثر است. نتایج پژوهشی نگارندگان نشان داده است که در بیشتر باغ ها، با افزایش وزن مخصوص ظاهری در خاک تحتانی، عملکرد در واحد سطح کاهش می یابد. رشد ریشه های ریز معمولاً در لایه های با ۵۰ درصد یا بیشتر سنگریزه یا لایه های با فشردگی زیاد، محدود می شود. جرم مخصوص ظاهری، یکی از پارامترهای فیزیکی خاک است که کمترین ضریب تغییرات را در مقایسه با دیگر خصوصیات فیزیکی دارد. معمولاً عمقی از خاک، که در آن لایه یا لایه های با جرم مخصوص ظاهری بیشتر از حد بحرانی وجود داشته باشد، پتانسیل باروری خاک را تعیین می کند. حد بهینه و بحرانی جرم مخصوص ظاهری برای خاک های رسوبی، به ترتیب حدود ۱/۳-۱/۲ و ۱/۶۰-۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. برای رسیدن به عملکرد بالا در خاک های با بافت ریز و متوسط، جرم مخصوص ظاهری ۱/۱-۱/۳ گرم بر سانتی متر مکعب با ۴۰-۵۰ درصد ذرات جامد درشت و با عمق حداقل ۸۰-۷۰ سانتی متر، نیاز است. خاک های با عمق حداقل ۲ متر، بافت یکنواخت و زهکشی خوب در لایه های تحتانی، عمق آب زیرزمینی پایین تر از

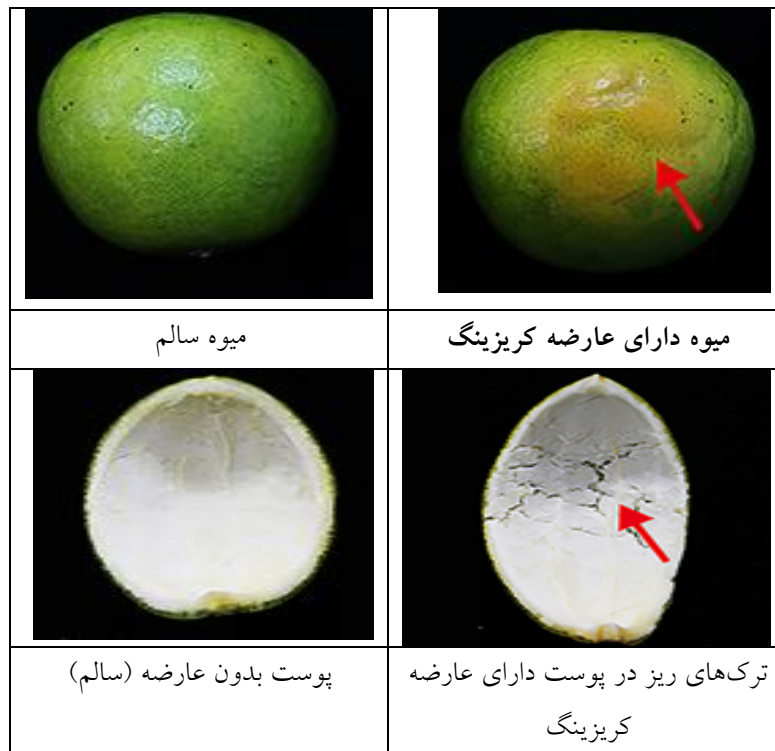
۱۵۰ سانتی متر در تمام طول سال، مناسب ترین خاک ها برای کشت مرکبات هستند. بیشترین ریشه های مرکبات در عمق ۷۰ - ۴۰ سانتی متری تجمع می یابند. پژوهش های انجام شده در خاک های عمیق سنگریزه دار نشان داده است که در خاک های با بیشتر از ۱۵ درصد سنگریزه، عملکرد مرکبات کمتر از ۵۰ درصد خاک های بدون سنگریزه با عمق یکسان است. کاهش pH محلول خاک به کمتر از ۴/۵، قابلیت استفاده و در نتیجه جذب کلسیم توسط ریشه ها را به مقدار زیادی کاهش می دهد. اما در pH های بیشتر از ۵/۵ (به علت افزایش غلظت یون کلسیم در محلول خاک نسبت به هیدروژن) تأثیر pH در جذب کلسیم کاهش می یابد. پ

زیادی برخوردار است. علاوه بر تعداد بیشتر آوندهای چوبی کارا و فعال، یک شیب هیدروستاتیک مناسب برای حرکت شیره خام و کلسیم به میوه مورد نیاز است. برای افزایش و ایجاد شیب هیدروستاتیک مناسب، معمولاً روش‌های که تعرق میوه‌ها را افزایش دهند مانند کاهش واکس سطح میوه، هرس بهینه سرشاخه‌ها و کاهش تراکم تاج درختان توصیه می‌شود.

کلسیم، کریزینگ (شکستگی بافت آلبیدو) (پوست داخلی) و پفی شدن میوه

ناهنجاری‌های کمبود کلسیم زمانی روی می‌دهد که کلسیم کافی برای توسعه بافت‌های در حال توسعه در دسترس نباشد. از این رو، کمبود کلسیم به‌طور عمده در بافت‌هایی ایجاد می‌شود که در آن‌ها تقسیم سلولی در حال انجام است و سلول‌های جدید در حال تولید هستند (Hopkins and Huner, 2004; Storey and Treeby, 2002). نتایج میدانی غلظت کلسیم در بافت پوست میوه درختان مرکبات بدون عارضه و دارای عارضه کریزینگ نشان داد که میانگین غلظت کلسیم در بافت پوست میوه‌های درختان دارای عارضه حدود ۷ تا ۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک بافت آلبیدو بود که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از غلظت کلسیم در بافت آلبیدو میوه‌های درختان بدون عارضه کریزینگ (حدود ۱۲ تا ۱۴ میلی‌گرم در گرم وزن خشک بافت آلبیدو) بود اما تفاوت معنی‌داری در میانگین غلظت کلسیم برگ درختان دو منطقه وجود نداشت. علاوه بر کلسیم، غلظت منیزیم نیز در بافت پوست میوه‌های دارای عارضه کمتر از میوه‌ها سالم و بدون عارضه بود، اما نسبت‌های پتاسیم به کلسیم^{۱۱} و منیزیم به کلسیم^{۱۲} تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. نتایج میدانی نشان داد که در بافت

پوست میوه‌های دارای عارضه، غلظت کلسیم، منیزیم و پتاسیم کمتر از میوه‌های بدون عارضه بود اما نسبت پتاسیم به کلسیم و منیزیم به کلسیم در آن‌ها بیشتر از میوه‌های بدون عارضه بود (شکل ۹). در مورد عارضه پفی شدن میوه‌ها، تجزیه سلول‌های بافت پوست داخلی (آلبیدو) می‌تواند عامل انبساط میوه پس از بارندگی و پفی شدن میوه‌ها باشد به‌طوری‌که در طی این فرآیند ساختمان آلبیدو اسفنجی شده و فضای بین سلولی آن‌ها بزرگ می‌شود (Asadi, 2023; Jaime et al., 2024). گزارش‌های دیگر کاهش سفتی پوست میوه مرکبات و پفی شدن را به فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی نسبت داده‌اند به‌طورکلی، در میوه مرکبات فعالیت برخی آنزیم‌ها در طی رسیدن افزایش می‌یابد. این آنزیم‌ها می‌توانند تغییرات ساختاری در اپیدرم تحتانی سل



شکل ۹- کریزینگ در میوه پرتقال والنسیا
Figure 9- Creasing in fruit of Valencia orange



شکل ۱۰- میوه پفی شدن میوه نارنگی انشو
Figure 10- Puffing in satuma mandarin fruit

کلسیم و انبارمانی میوه

کمبود کلسیم موجب کاهش زمان ماندگاری میوه در روی درختان و همچنین 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 سوسترهای مناسبی برای آنزیم‌های تنفسی هستند. عمده کلسیم با

درصد زیادی از میوه‌های مرکبات ریزش خواهند کرد. کلسیم همچنین نقش معنی‌داری در مقاومت به بیماری‌های گیاهی (دفاع خود گیاه) دارد. پاتوژن‌های گیاهی ابتدا موجب تخریب دیواره سلولی، قبل از ورود به سلول می‌شوند. تخریب دیواره سلولی توسط آنزیم پلی‌گالاکتوروناز انجام می‌شود پلی‌گالاکتوروناز آنزیمی است که توسط پاتوژن‌ها تولید می‌شود که موجب هضم پکتین دیواره سلولی می‌شود. کلسیم قویاً مانع فعالیت این آنزیم می‌شود و موجب افزایش مقاومت به بیماری‌های گیاهی می‌شود. سفتی بافت میوه یکی از شاخص‌های حیاتی کیفیت میوه پس از برداشت است و اغلب با میزان کلسیم میوه ارتباط مثبتی دارند (شکل ۱۱). مصرف کودهای کلسیم در زمان مناسب باعث افزایش محتوای کلسیم میوه‌ها در هنگام برداشت می‌شود که موجب افزایش سفتی میوه می‌شود که نشان‌دهنده بهبود عملکرد ذخیره‌سازی نیز است. به‌طورکلی کلسیم در حفظ یا تقویت یکپارچگی غشای سلولی و دیواره سلولی، مهار تخریب اجزای دیواره سلولی، کاهش

تنفس میوه، سنتز اتیلن، تنظیم فعالیت‌های آنزیمی و متابولیسم مرتبط با پیری نقش دارد. علاوه بر این، کلسیم کاهش هدایت هیدرولیکی میوه را تسهیل می‌کند و کاهش وزن میوه‌ها را در زمان انبارمانی را به حداقل می‌رساند و قهوه‌ای شدن آنزیمی پوست میوه، نرم شدن میوه‌ها و توسعه بیماری را به تأخیر می‌اندازد. همچنین کلسیم به‌طور مؤثری باعث افزایش روشنایی پوست، شاخص‌های اشباع رنگ و کیفیت رنگ پوست در طول ذخیره‌سازی می‌شود. به‌طورکلی درصد پوسیدگی و کاهش وزن میوه از مهم‌ترین شاخص‌های مهم کیفیت ذخیره‌سازی میوه‌های مرکبات هستند. مصرف بهینه کلسیم محتوای اسید پکتیک آزاد را کاهش و محتوای پکتین کلسیم میوه‌ها را افزایش داده و تغییرات در نفوذپذیری غشای میوه را کاهش و مقاومت آن‌ها را در برابر پوسیدگی و ذخیره‌سازی افزایش می‌دهد که در نهایت باعث طولانی شدن زمان امکان ذخیره‌سازی و ماندگاری میوه‌ها و افزایش کیفیت میوه در طول دوره انبارمانی می‌شود.



شکل ۱۱- تأثیر کمبود کلسیم بر شل شدن بافت پوست میوه نارنگی انشو

Figure 11- The effect of Ca deficiency on the peel tissue softening of Satsuma mandarin fruit

برخی از مهم

۲. مصرف بهینه آب (مدیریت آبیاری متناسب با فنولوژی رشد) در طول فصل رشد و اجتناب از تنش خشکی (به‌ویژه از زمان گل‌دهی و تشکیل میوه تا پایان ریزش تابستانه) جذب کلسیم و انتقال آن به سمت میوه‌ها و برگ‌های جوان را افزایش می‌دهد. همچنین آبیاری زیاد و مانداب منطقه ریشه نیز جذب کلسیم توسط ریشه و انتقال آن به برگ‌های جوان و میوه‌ها را کاهش می‌دهد. به‌طور کلی در باغ‌های دارای شرایط خاکی رخداد تنش مانداب، زهکشی مناسب کف باغ و خروج آب‌های اضافی از منطقه ریشه بیشترین تأثیر را در سلامت باغ و بهبود کیفیت میوه دارد.

۳. اجتناب از هرس شدید درختان، هرس شدید درختان و مدیریت نامناسب تغذیه پس از هرس موجب رشد شدید سرشاخه‌ها و افزایش اندازه میوه‌ها در سال زراعی پس از هرس خواهد شد که موجب کاهش غلظت کلسیم و کاهش کیفیت انبارمانی میوه‌ها می‌شود لذا توصیه می‌شود هرس به‌تدریج و در طی سال‌های متوالی انجام شود و از هرس شدید و یک‌باره درختان خودداری گردد.

۴. حساسیت به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم به ژنتیک (رقم) و شرایط محیطی بستگی دارد بنابراین ارقام و شرایط محیطی می‌توانند در میزان کلسیم میوه‌ها بسیار مؤثر باشند پس مدیریت احداث باغ (رقم و پایه مناسب) و همچنین مدیریت عوامل محیطی در میزان کلسیم میوه‌ها، کنترل و مدیریت ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم از اهمیت زیادی برخوردار است

۵. برای درختان بارده (به‌ویژه درختان مسن) در خاک‌های با بافت سبک (شنی، شن لومی و لوم شنی) و سنگین (رسی، رس شنی، رس سیلتی، لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی و لوم رسی)، خاک‌های شور و خاک‌های در معرض تنش مانداب مصرف نیترات کلسیم به مقدار ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم به ازای هر درخت در دو مرحله به فاصله ۲۰ تا ۳۰ روز در میان در اواسط مرحله اول رشد میوه و اوایل مرحله دوم رشد میوه توصیه می‌شود.

۶. محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت سه تا پنج در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول پاشی با غلظت نیم در هزار پس از تشکیل میوه، محلول پاشی نیترات کلسیم با غلظت پنج تا هفت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار قبل از ریزش تابستانه و محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت شش تا هشت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غ

می‌شود. بنابراین ظرفیت فتوسنتزی پایین در برگ‌های درختان مرکبات با کمبود کلسیم، نتیجه غیرعادی بودن دستگاه فتوسنتزی برگ است. کلسیم همچنین فعالیت کانال‌های یونی که مسئول جذب و انتقال عناصر غذایی در سلول هستند را کنترل می‌کند. بنابراین تأثیر مثبت کلسیم در جذب عناصر کم‌مصرف می‌تواند به علت افزایش بیوماس ریشه و یا بهبود فعالیت کانال‌های یونی است که یون‌های عناصر غذایی را به درون سلول انتقال می‌دهد.

به‌طور کلی جذب کلسیم از ریشه در درختان مرکبات به مناطقی از ریشه محدود می‌شود که حلقه کاسپارین بین سلول‌های آندودرمی وجود ندارد؛ یا تخریب‌شده؛ و یا سلول‌های آندودرمی احاطه‌کننده استوانه مرکزی (استیل) چوب پنبه‌ای نشده‌اند. این مناطق عمدتاً شامل نوک ریشه‌ها و همچنین بخش‌های از ریشه است که در آن جوانه‌های جانبی در حال تشکیل هستند. از طرف دیگر بین شروع رشد ریشه و رشد اندام هوایی اختلاف‌فاز زمانی وجود دارد و رشد جهش‌های رشدی ریشه حدود ۱۵ تا ۲۰ روز پس از جهش‌های رشدی اندام هوایی شروع می‌شود. بنابراین در سال‌هایی که رشد و توسعه سرشاخه‌ها، گل‌ها و میوه-چه‌ها با بارندگی‌های مداوم و طولانی و همچنین ابری بودن طولانی مدت همراه است، به‌ویژه در مناطقی با رطوبت نسبی زیاد مانند سواحل خلیج فارس و دریای مازندران، احتمال اختلال در جذب، انتقال و کمبود کلسیم در بافت‌های در حال توسعه به‌ویژه میوه‌چه‌ها وجود دارد. با توجه به نقش تعرق و جریان شیره 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. بنابراین برای افزایش تعرق و بهبود انتقال جریان شیره خام در آوندهای چوبی و افزایش غلظت کلسیم در میوه‌های درون تاج درختان مرکبات، انجام هرس فرم‌دهی (سرزنی نهال‌ها بلافاصله پس از انتقال به زمین اصلی در زمان احداث باغ و همچنین هرس مناسب سالیانه تا شروع مرحله باردهی) و هرس باردهی (انجام هرس سالیانه قبل از شروع رشد و توسعه مجدد در درختان بارده)

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 درحال توسعه یک فرآیند غیرفعال است و به‌شدت جریان تعرق بستگی دارد. کلسیم به‌طور ضعیف از برگ‌های قدیمی یا دیگر اندام‌های گیاهی به برگ‌ها، میوه‌ها و اندام‌های مریستمی جدید درحال توسعه منتقل می‌شود. بنابراین کمبود کلسیم در خاک یا هر عاملی که در انتقال آن اختلال ایجاد

References

1. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2024. Potassium fertilization in citrus orchards. *Journal of Land Management*, 12(1), pp. 57-80. (In Persian) **10.22092/LMJ.2024.363801.345**
2. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2023. Management of nitrogen fertilizer application in citrus orchards. *Journal of Land Management*, 11(2), pp. 209-228. (In Persian) **10.22092/LMJ.2023.362505.333**
3. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2023. The Effect of Calcium in the Fruit Puffiness Reduction of Satsuma Mandarin (*Citrus unshiu* 'Sugiyama'). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 54 (1), pp.157-173. (In Persian) **DOI: <http://doi.org/10.22059/IJHS.2023.339145.2003>**
4. Asadi Kangarshahi, A., 2021. The effect of waterlogging conditions on some chemical and electrochemical changes in soil solution of calcareous soils. *Soil Research*, 35(2), pp. 171-188. (In Persian) **DOI: 10.22092/IJSR.2021.354452.607**
5. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2018. Trend of Ca changes in fruit peel and effect of calcium nitrate spray on citrus yield and quality. *Soil Research*, 32(1), pp. 56-72. (In Persian) **DOI: 10.22092/IJSR.2018.116560**
6. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2016. Frost in fruit trees (Foundations, Principles and practical strategies to reduce damage). Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
7. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2014a. Advanced and Applied Citrus Nutrition. Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
8. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2014b. Advanced and Applied Citrus Nutrition. Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
9. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2011. Recognition of some environmental damage and physiological disorders of citrus fruits. Technical Journal No. 501, Soil and Water Research Institute. Karaj, Iran. (In Persian)
10. Asadi Kangarshahi, A., 2021. Calcium in fruit Trees (1th ed.). Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
11. Asadi Kangarshahi, A., 2019. Nutrition Management of Citrus Trees (1th ed.). Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
12. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2012. Die-back, citrus decline and some environmental damages of citrus fruits in East Mazandaran. Extension Technical Publication, Mazandaran Agricultural Jihad Organization. (In Persian)
13. Asadi Kangarshahi, A., Akh

21. Freitas, S.T., and Mitcham, E. J., 2012. Factors involved in fruit calcium deficiency disorders. *Horticultural Reviews*, 40, pp. 107–146.
22. Freitas, S.T., Jiang, C.Z., and Mitcham, E.J., 2012. Mechanisms involved in calcium deficiency development in tomato fruit in response to gibberellins. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31, pp. 221–234.
23. Freitas, S.T., Shackel, K.A., and Mitcham, E.J., 2011. Absciscic acid triggers whole-plant and fruit-specific mechanisms to increase fruit calcium uptake and prevent blossom end rot development in tomato fruit. *Journal of Experimental Botany*, 62, pp. 2645–2656.
24. 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, pp. 2233–2250.
25. 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](http://dx.doi.org/10.1094/PHP-2007-0906-01-RV)>. Accessed: 15 Feb. 2017.
26. Grierson, W. 1981. Physiological disorders of citrus fruits. *Proc. Int. Soc. Citriculture*. 3: 764–767.
27. Hirschi, K.D., 2004. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiol*, 136, pp. 2438–2442.
28. Hocking, B., Tyerman, S.D., Burton, R.A. and Gilliham, M., 2016. Fruit calcium: Transport and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 7, pp. 569–576.
29. Huang, W., Shi, Y., Yan, H., Wang, H., Wu, D., Grierson, D., & Chen, K., 2023. The calcium-mediated homogalacturonan pectin complexation in cell walls contributes the firmness increase in loquat fruit during postharvest storage. *Journal of Advanced Research*, 49, pp. 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.09.009>
30. Hopkins, W.G. and Huner, N.P.A., 2004. Plant and Inorganic Nutrient. In *Introduction to Plant Physiology*. 3rd ed. John Wiley and Sons. Inc. Publishers, pp. 241–257.
31. Jaime, M, Álvarez-Herr

44. Srivastava, A.K., 2013. Nutrition deficiency symptomology in citrus: An effective diagnostic tool or iust an aid for post-mortem analysis. *Agricultural Advances*, 2, pp. 177-194.
45. Storey, R. and Treeby, M.T., 2002. Nutrient uptake into navel oranges during fruit development. *J. Hort. Sci. Biotech*, 77, pp. 91-99.
46. Storey, R., Treeby, M.T., and Milne, D.J., 2002. Crease: another Ca deficiency-related fruit disorder. *J. Hort. Sci. Biotech*, 77, pp. 565-571.
47. Taalab, A.A., Ageeb, G. W., Siam, H.S., and Mhmoud, S.A., 2019. Some characteristics of calcareous soils. A review. *Middle East Journal of Agriculture*, 8, pp. 96-105.
48. 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, pp. 9–16.
49. Taylor, M.D., and Locascio, S.J., 2004. Blossom-end rot: A calcium deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 27, pp. 123–139.
50. Tehrani, M. M., and Ghaffari Nejad, S. A. 2016. Formulation for investigation and monitoring of soil fertility and nutrition condition of agron, mic and horticultural crops. Report 50731. Karaj, Iran: Ministry of Jihad Agriculture. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute. (In Persian)
51. Wallace, A. and Mueller, T., 1980. Calcium uptake and distribution in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 162, pp. 247–256.
52. White, P. J. and Broadley, M. R., 2003. Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92, pp. 487–511.
53. White, P.J., 2001. The pathways of calcium movement to the xylem. *Journal of Experimental Botan*, 52, pp. 891–899.
54. Xuan, H., Streif, J., Saquet, A., Römheld, V., and Bangerth, F., 2005. Application of boron with calcium affects respiration and ATP/ADP ratio in ‘Conference’ pears during controlled atmosphere storage. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80, pp. 633–637.
55. Yang, L., Li, G., Lin, Q. and Zhao, X., 2010. Active carbonate of chestnut soils in different lands. *Ecol. Environ. Sci.*, 19, pp. 428 – 432.
56. Zhang, L., Wang, P., Chen, F., Lai, S., Yu, H., & Yang, H., 2019. Effects of calcium and pectin methylesterase on quality attributes and pectin morphology of jujube fruit under vacuum impregnation during storage. *Food Chemistry*, 289, pp. 40–48.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.008>