گیاه و زیست فناوری ایران
Iranian Journal of Plant & Biotechnology (IJPB)
واحد گرمسار

نوع مقاله: مروری

DOI: 10.71829/biology-2024-1155051

اختلالات فیزیولوژیکی در گیاه ترب (*Raphanus sativus* L.) و روش‌های کنترل آن

مانی جباری (نویسنده مسئول)[1*] و میترا جباری[2]

۱*- کارشناس ارشد، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران،
mani.jabbari.mp@gmail.com

۲- کارشناس ارشد، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،
mitrajabbari2014@gmail.com

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: آذر ۱۴۰۳

Physiological Disorders in *Raphanus Sativus* L Radish and its Control Methods

Mani Jabari (Corresponding author)[1*]and Mitra Jabari[2]

1*- M.Sc, Department of Horticultural Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran, mani.jabbari.mp@gmail.com

2- M.Sc, Department of Horticultural Science and Engineering, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, mitrajabbari2014@gmail.com

Received: September 2024 Accepted: November 2024

چکیده

اختلالات فیزیولوژیکی، تغییرات غیرطبیعی غیر آسیب شناختی در بافت‌های گیاهی هستند که در پاسخ به تعامل بین ژنوتیپ و محیط بیان می‌شوند. تنش‌های محیطی می‌تواند تأثیر زیادی بر ایجاد اختلالات فیزیولوژیکی در گیاهان داشته باشد. محیط از تنش‌های غیرزیستی پیچیده تشکیل شده است. ترب، یکی از سبزیجات ریشه‌ای مهم می‌باشد که در سطح وسیعی در جهان کشت می‌شود. با این حال، هنوز هم تولید ریشه ترب با کیفیت خوب به دلیل آسیب‌پذیری آن نسبت به اختلالات فیزیولوژیکی مختلف پیش از برداشت، بسیار دشوار است. اختلالات فیزیولوژیکی مهمی که عملکرد و کیفیت ریشه ترب را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند عبارت از چنگالی شدن، اسفنجی شدن، ترک خوردن/شکاف خوردن، توخالی و قهوه‌ای شدن داخلی می‌باشند. عوامل غیرزیستی مختلف مانند تنش رطوبتی، نوسانات دما، محیط رشد، عدم تعادل عناصر غذایی، تراکم گیاه و زمان برداشت سبب اختلال در فعالیت‌های متابولیکی بافت‌های ریشه می‌شوند. سیستم‌های آنزیمی سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POX) و آسکوربات پراکسیداز (APX) نیز نقش مهمی در تخریب گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) دارند. گیاهان دارای یک سیستم دفاعی پیچیده آنتی‌اکسیدانی شامل اجزای غیرآنزیمی و آنزیمی هستند که مسئول حذف گونه‌های اکسیژن فعال هستند.

کلمات کلیدی: آنزیم، تنش، فیزیولوژیک، کاتالاز

فصلنامه گیاه و زیست فناوری ایران

پاییز ۱۴۰۳، دوره ۱۹، شماره ۳، صص ۶۵-۵۱

Abstract

Physiological disorders are abnormal non-pathological changes in plant tissues that are expressed in response to the interaction between genotype and environment. Environmental stresses can have a great effect on causing physiological disorders in plants. The environment consists of complex abiotic stresses. Horseradish is one of the important root vegetables that is widely cultivated in the world. However, it is still very difficult to produce good quality radish root due to its vulnerability to various physiological disturbances before harvest. Important physiological disorders that significantly reduce the yield and quality of radish are forking, sponginess, cracking/fissuring, hollowness and internal browning of radish roots. Various abiotic factors such as moisture stress, temperature fluctuations, growth environment, imbalance of nutrients, plant density and harvesting time cause disturbances in the metabolic activities of root tissues. Superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POX) and ascorbate peroxidase (APX) enzyme systems also play an important role in the destruction of reactive oxygen species (ROS) and hydrogen peroxide (H_2O2). Plants have a complex antioxidant defense system including non-enzymatic and enzymatic components that are responsible for removing reactive oxygen species.

Keywords: Catalase, Enzyme, Physiological, Stress

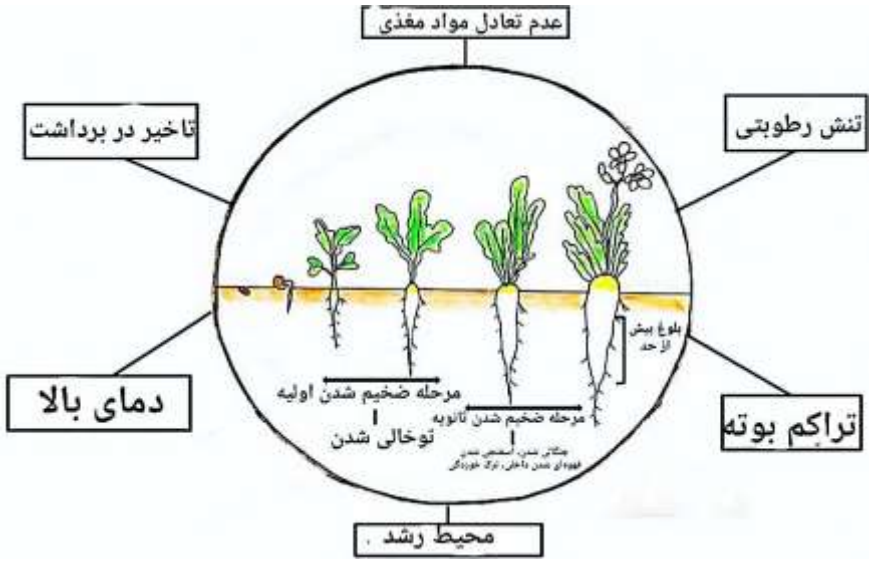
Iranian Journal of Plant & Biotechnology
Autumn 2024, Vol 19, No 3, Pp 51-65

مقدمه و کلیات

ترب (*Raphanus sativus* L.) از خانواده Brassicaceae یکی از سبزیجات سریع رشد در فصل سرد است که هزاران سال، کشت می‌شود. این سبزی منبع غنی از نشاسته، کاروتنوئیدها، گلوکز و سایر مواد مغذی است (Kaymak *et al*., 2010; Song *et al*., 2016). ریشه‌های ترب از دو قسمت تشکیل می‌شوند. قسمت بالایی از هیپوکوتیل متورم تشکیل شده است، در حالی که قسمت پایینی بافت‌های ریشه اولیه و ریشه‌های جانبی بزرگ شده است (Yu *et al*., 2019). این دو قسمت با هم ترکیب می‌شوند و ریشه‌های غده‌ای را تشکیل می‌دهند که به صورت خام به عنوان سالاد با سس‌های جانبی یا پخته شده به‌عنوان سبزی مصرف می‌شود (Lockley *et al*., 2021). ریشه ترب از نظر شکل، اندازه، رنگ و سایر خصوصیات خارجی بسیار متفاوت است. اگرچه این سبزی محصول فصل سرد است، اما می‌توان آن را در دمای بالا نیز کشت کرد. با این حال، بهترین کیفیت تولید ریشه در دمای ۱۰-۱۵/۵ درجه سانتیگراد به‌دست می‌آید (Ghimire *et al*., 2020). علیرغم سازگاری ترب با شرایط مختلف آب و هوایی و انواع خاک، تولید موفقیت آمیز این محصول باغی، با اختلالات فیزیولوژیکی مختلف همراه است که موجب ایجاد ریشه‌های بدشکل و نامناسب می‌شود (Abdel, 2016). ترب با کیفیت، باید عاری از بیماری، آفات و عیوب داخلی بوده و بافت داخلی آن ترد و عاری از پیچ خوردگی باشد (Harris *et al*., 2000).

اختلالات فیزیولوژیکی در ترب: اختلالات فیزیولوژیکی، عملکرد نادرست یا ناکارآمدی فرآیند فیزیولوژیکی بافت‌ها است (Ladaniya, 2008)، این اختلال می‌تواند ناشی از عوامل غیر بیماری‌زا مانند تنش‌های محیطی (رطوبت، دما، آلاینده‌های هوا)، شرایط نامساعد خاک (زهکشی ضعیف خاک و تغییرات شدید pH خاک)، مواد شیمیایی (آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها)، غلظت ناکافی تنظیم کننده‌های رشد و کمبود یا بیش بود مواد مغذی باشد (Masarirambi *et al*., 2018; Zheng *et al*., 2020). همچنین اختلالات فیزیولوژیکی بدلیل حساسیت ژنتیکی، فعالیت‌های آنزیمی، رسیدگی بیش از حد و پیری رخ می‌دهد (Peet, 2009; Neerja, 2016). به طور معمول، این اختلالات قبل از برداشت شروع می‌شوند، اما پس از برداشت در طول دوره ذخیره‌سازی ظاهر می‌شوند (Yahia *et al*., 2019). معمولاً علائم اختلالات شبیه علائم بیماری است، اما با تغییر شرایط محیطی می‌توان از آنها پیشگیری کرد. با این حال، هنگامی که آنها رخ می‌دهند، برگشت ناپذیر هستند (Masarirambi *et al*., 2018). تقریباً تمام محصولات باغی مانند سبزیجات مستعد ابتلا به اختلالات فیزیولوژیکی مختلف هستند که بر اندام‌های مختلف گیاه تأثیر گذارده و آنها را برای استفاده مشتری و بازار نامناسب می‌کند (Bhat, 2009). به همین ترتیب، در ترب، کودهی نامتعادل، آبیاری نامناسب، نوسانات دما و عملیات‌های مختلف باغی تحت شرایط محیطی مختلف، ریشه‌های مغزدار، توخالی، ترک‌خورده، دوشاخه و بدشکل را در مراحل مختلف رشد موجب شده که باعث زیان قابل توجهی در بازار فروش می‌شود (شکل ۱ و جدول ۱). این اختلالات فقط در

داخل ریشه و پس از برداشت یا برش قابل مشاهده است.



شکل ۱- عوامل غیرزیستی ایجاد کننده اختلال فیزیولوژیکی در ریشه ترب در مراحل مختلف رشد (Manzoor *et al.*, 2021)

Fig 1- Abiotic factors causing physiological disorders in radish roots in different stages of growth

جدول ۱- تأثیر عوامل غیرزیستی مختلف بر بروز اختلالات فیزیولوژیک در ترب و اصلاح آنها

Table 1- The effect of different abiotic factors on the occurrence of physiological disorders in radish and their correction

اختلال فیزیولوژیکی	عوامل غیرزیستی	علائم	روش کنترل	منبع
چنگالی شدن (Forking)	مواد آلی تجزیه نشده در خاک	کشیدگی بیش از حد ریشه	مواد آلی به خوبی تجزیه شده استفاده گردد	Subedi *et al*., 2018
	تراکم بالا بوته	رقابت بین رطوبت، نور و مواد مغذی افزایش می‌یابد	تراکم بهینه گیاه رعایت شود	Lavanya *et al*., 2017
توخالی شدن (Pithiness)	تاخیر در برداشت	توسعه سلول‌های بزرگتر منجر به تنش می‌شود	در زمان مناسب برداشت شود	Dongarwar *et al*., 2017
	فاصله بوته	بزرگ شدن ریشه	فاصله مناسب بین بوته‌ها و ردیف‌ها (۴۵× ۲۵ سانتی‌متر مربع) رعایت شود	Kang *et al*., 2015
	روش کاشت	کشت جوی و پشته منجر به رشد سریع ریشه می‌شود	تربچه روی پشته‌های مسطح کشت گردد	Abdel, 2007

	بستر کاشت	شن و ماسه سرعت رشد را افزایش می دهد	از بستر رشد مناسب استفاده گردد	Sonneveld and Van den Bos, 1995
شکافتن/ترک‌خوردگی (Splitting/cracking)	کود نیتروژن بالا	سلول های پارانشیم با سرعت بیشتری منبسط می‌شوند	استفاده از غلظت بهینه نیتروژن برای جلوگیری از رشد بیش از حد سلول	Kowalski and Kaniszewski, 2017
	رطوبت بالای محیط رشد و بی نظمی آبیاری	بزرگ شدن سریع سلول در طول و ضخیم شدن ثانویه	حفظ سطح بهینه آب در محیط کشت	Lockley, 2016; Monaghan *et al*., 2012; Kaymak and Guvenc, 2010
	سمیت فلزات سنگین در خاک‌های اسیدی	اختلال در آناتومی سلول در نتیجه سمیت با فلزات (آلومینیوم)	بهبود pH خاک	Konarska, 2005
توخالی (Hollowness)	بستر کشت مناسب، بلوغ بیش از حد	افزایش گسترش سلول های پارانشیم	بستر کشت متعادل، زمان مناسب برداشت	Torres *et al*., 2013
	اثر ارقام	توخالی بودن و بزرگ شدن سلول در نتیجه استفاده از ارقام با سرعت رشد بالا	ارقام متحمل به اختلال توخالی	Kaymak and Guvenc, 2010
	عدم تعادل مواد مغذی	نیتروژن بالا	غلظت بهینه نیتروژن	Kaymak *et al*., 2010
	دمای بالای خاک	افزایش چوبی شدن سلول	کاشت در دمای پایین	Kano and Fukuoka, 1995; Kano, 1987
قهوه‌ای شدن داخلی (Internal browning)	دمای بالا هوا و خاک	افزایش فعالیت آنزیمی	دمای کنترل شده	Fukuoka *et al*., 2007
	عدم تعادل مواد مغذی	کمبود بور	کاربرد ریزمغذی‌ها با علظت مناسب	Sotta *et al*., 2019
	اثر ژنتیکی	ارقام مقاوم دارای محتوای پکتین بالایی می‌باشند	ارقام گیاهی مقاوم	Fukuoka and Enomoto, 2014

چنگالی شدن/ انشعاب زدگی (Forking/Branching): چنگالی شدن اختلالی است که در آن ریشه به ساختاری چنگال مانند تبدیل می‌شود (Kathayat and Rawat, 2019). که بطور قابل توجهی کیفیت و ارزش تجاری ریشه ترب را کاهش می‌دهد. این اختلال به عنوان افزایش رشد ثانویه ریشه توصیف می‌شود که ظاهری چنگال مانند به ریشه‌ها می‌دهد (شکل ۲) (Singh *et al*., 2015).

چنگالی شدن در گیاهان ریشه‌ای با مواد آلی تجزیه نشده و وجود رطوبت زیاد و بیش از حد در خاک در طول دوره رشد ریشه همراه است، این اختلال معمولاً در خاک‌های سنگین بدلیل فشردگی خاک رخ می‌دهد (Tyagi and Khire, 2018). خاک‌هایی با خواص فیزیکی ضعیف با داشتن توده‌های بزرگ خاک و سنگ در زیر ریشه و کشت کم عمق، ریشه‌های دوشاخه/چندشاخه ایجاد می‌کنند (Nishio, 2017). علاوه بر این، استفاده از بذرهای ضعیف که دارای قوه نامیه کم هستند نیز باعث ایجاد اختلال در ریشه‌ها می شوند. عوامل دیگری مانند آسیب به مریستم ریشه اصلی، هیپوکوتیل و برداشت دیر هنگام در ایجاد انشعاب و شاخه‌ای شدن نقش دارند (Nishio, 2017; Kumar *et al*., 2020).

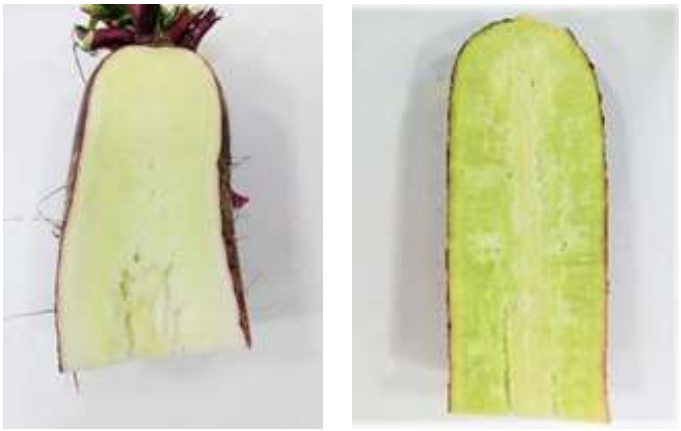
شکل ۲- اختلال فیزیولوژیکی چنگالی شدن (Manzoor *et al*., 2021)

Fig 2- Physiological disorder of forking

به منظور جلوگیری از این امر باید از کودهای دامی پوسیده شده و آبیاری به مقدار مناسب استفاده کرد (Kathayat and Rawat, 2019). واریته‌هایی با شکل ریشه‌های گرد و کوتاه با رشد سریع باید در خاک‌های زراعی کم عمق یا سبک کاشته شوند، در حالی که واریته‌هایی با شکل ریشه بلند و بزرگ باید در خاک‌های عمیق کاشته شوند (Singh *et al*., 2015). علاوه بر این، فاصله نزدیک نیز (۴۵×۱۰ سانتی‌متر) بدلیل افزایش رقابت برای نور، مواد مغذی و آب در بین گیاهان، منجر به افزایش درصد چنگالی شدن می‌شود که بطور قابل توجهی بر رشد، کیفیت و عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Lavanya *et al*., 2014; Lavanya *et al*., 2017).

توخالی شدن: توخالی شدن یکی از اختلالات اصلی محصولات ریشه‌ای است که به آن اسفنجی شدن نیز می‌گویند. زمانی اتفاق می‌افتد که تجمع مواد جذب شده از رشد سریع حجم ریشه بدلیل رشد زیاد (ضخیم شدن) عقب بماند، این ناهماهنگی در رشد منجر به ایجاد منافذ در ریشه می‌شود که می‌توان آن را به عنوان بزرگ شدن سریع سلول‌های ریشه با محتوای انباشته ناکافی سلول‌های پارانشیم توصیف کرد (شکل ۳) (Manzoor *et al*., 2021). کیفیت ریشه ترب به شدت تحت تأثیر اسفنجی شدن یا ایجاد حفره‌های داخلی بدلیل نکروز سلول‌های پارانشیم یا شکستن آوندهای آوندچوبی در نتیجه طویل شدن سریع ریشه قرار می‌گیرد (Akoumianakis *et al*., 2011). شکستن آوندهای چوبی در پاسخ به کشیدگی شدید سلول‌های ریشه به عنوان اولین گام در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، اندازه و فاصله سلول با رشد ریشه افزایش می‌یابد که منجر به کشیدگی بیشتر می‌شود که پس از آن، محتوای آب در سلول‌های ریشه کاهش و باعث می‌شود که ریشه‌ها اسفنج مانند شوند (Nishio,

2017). اسفنجی شدن به عنوان متلاشی شدن قلب ریشه توصیف می‌شود که بدلیل کمبود کلسیم در خاک استحکام ضعیف دیواره سلولی رخ می‌دهد (Abdel, 2007).



شکل ۳- توخالی/اسفنجی شدن ریشه ترب (Manzoor *et al*., 2021)

Fig 3- Hollowing/sponginess of radish root

اسفنجی شدن مهمترین عامل محدود کننده‌ای است که بر عمر پس از برداشت تأثیر می‌گذارد، زیرا در مرحله نهایی ایجاد ریشه توخالی می‌کند که بدلیل تاخیر در برداشت ریشه رخ می‌دهد (Tyagi and Khire, 2018) علاوه بر این، بلوغ بیش از حد (Rubatzky and Yamaguchi, 2012; Abdel, 2016) و افزایش بیش از حد N، P، K باعث ایجاد منافذ در ریشه می‌شود. بنابراین، برای جلوگیری از بروز اسفنجی شدن، باید رطوبت بهینه خاک حفظ و ریشه‌ها در زمان مناسب برداشت و از کوددهی بیش از حد خودداری و از آسیب به ریشه‌ها در طول عملیات داشت و برداشت جلوگیری شود (Kathayat and Rawat, 2019). همچنین فاصله مناسب باعث افزایش رشد می‌شود، زیرا به ریشه‌ها اجازه می‌دهد از منابع بیشتری استفاده کنند که در این صورت رشد بیش از حد و اسفنجی شدن را به دنبال دارد (Sadana *et al*., 2015). دمای پایین و EC بالای خاک، سرعت رشد را کاهش داده و موجب محدودیت در رشد بافت‌های اسفنجی ریشه می‌شود (Manzoor *et al*., 2021).

شکافتن/ترکیدگی (Splitting/Cracking): ترک خوردگی/شکافتن ریشه بطور معمول قبل از برداشت یا در طی عملیات پس از برداشت (۱-۲ روز پس از برداشت در انبار) مشاهده می‌شود. بروز آن بعضاً تا ۳۰ درصد می‌رسد و می‌تواند بطور قابل توجهی بازده فروش را کاهش دهد (شکل ٤) (Lockley *et al*., 2015). ترک خوردگی/ شکافتن ریشه در طول رشد باعث کاهش قابل توجه عملکرد می‌شود زیرا بلوغ، شروع گلدهی و تشکیل غلاف را با تولید بذر/ غلاف کمتر به تاخیر می‌اندازد (Yu *et al*., 2019). اختلال شکافتگی زمانی در ریشه‌ها اتفاق می‌افتد که نیروی مکانیکی اعمال شده بیشتر از توانایی بافت‌ها برای مقاومت در برابر آن باشد، زیرا برخی از نواحی بافت نسبت به سایر قسمت‌ها مستعد شکافتن هستند. معمولاً دو نوع تقسیم سلولی وجود دارد، یکی عدم تقسیم سلولی (Cellular debounding) است که در

آن سلول‌ها دست نخورده باقی می‌مانند اما، از یکدیگر دور می‌شوند، در حالی که در نوع دوم، پلاسموپتیزی (Plasmoptysis)، سلول‌ها می‌ترکند/پاره می‌شوند. هر دو نوع تقسیم به قدرت نسبی پیوندهای بین سلولی و یکپارچگی دیواره سلولی بستگی دارد. معمولاً در ترب شکافتن بدلیل پلاسمولیز رخ می‌دهد (Lockley *et al.*, 2016). شکافتن در ترب، بدلیل تفاوت سرعت انبساط بین پریدرم و بافت داخلی است. از آنجایی که بافت‌های داخلی سریع‌تر از پریدرم منبسط می‌شوند، بر این بافت‌های ثانویه فشار وارد می‌شود و باعث شکافتن آنها می‌شود (Wan and Kang, 2006). عواملی مانند فشار خارجی، پارگی سلول بدلیل استحکام کششی بیش از حد در نتیجه فشار داخلی سلول، منجر به شکافتن هیپوکوتیل می‌شود (Lockley *et al.*, 2021).

شکل ٤- اختلال ترک خوردگی/ شکافتن ریشه در ترب و تربچه (Manzoor *et al.*, 2021)

Fig 4- Root cracking/splitting disorder in radish

ترک‌خوردگی ریشه ترب و تربچه، دلایل زیادی دارد که یکی از مهمترین آنها آبیاری ناکافی است که باعث رشد ناهموار بین سلول‌های پارانشیم در آوندهای آوند چوبی و سلول‌های پریدرم و آبکش می‌شود. علاوه بر این، فراوانی و کمیت آبیاری بر محتوای آب هیپوکوتیل تأثیر می‌گذارد که منجر به بروز ترک‌هایی در ریشه در طول رشد ثانویه می‌شود (Lockley *et al.*, 2015). در طول رشد، در دسترس بودن آب و نوسانات پتانسیل آب خاک منجر به اختلال ترک خوردگی/ شکافتن ریشه می‌گردد. ترب و تربچه‌ای که هر سه روز یک‌بار آبیاری می‌شود، در مقایسه با تربچه‌هایی که هر دو، چهار، شش یا هشت روز یک‌بار آبیاری می‌شوند، بروز ترک/شکاف کمتری دارد (Lockley *et al.*, 2016). آبیاری بیش از حد، باعث ایجاد یک منطقه مرطوب در ناحیه ریشه می‌شود که بدلیل انتشار ناکافی اکسیژن در ناحیه ریشه بر رشد ریشه تأثیر و باعث می‌شود سلول‌های پارانشیم به سرعت منبسط شوند، اما سلول‌های پریدرم و آبکش این کار را انجام نمی‌دهند. بر این اساس منبسط نمی‌شود که منجر به ترک‌خوردگی ریشه می‌شود، در حالی که فاصله آبیاری طولانی مدت باعث ایجاد تنش آبی می‌شود که رشد ریشه را محدود می‌کند و باعث

افزایش لیگنینی شدن پریدرم می‌شود (Wan and Kang, 2006). افزایش ترک‌خوردگی ریشه با رشد نامنظم سلولی و سرعت تعرق پایین مرتبط است. از آنجایی که انتقال کلسیم به جریان تعرق مرتبط است، بنابراین کاهش تعرق باعث کمبود کلسیم می‌شود که منجر به ایجاد سلول‌های غیرمتراکم با دیواره‌های سلولی شکننده می‌شود (Abdel, 2016). از آنجایی که محتوای آب محیط رشد بطور قابل توجهی بر شکافتن هیپوکوتیل در هنگام برداشت تأثیر می‌گذارد، بنابراین دوره خشکی (بدون آبیاری) در اواسط رشد منجر به شکاف‌های کمتری روی هیپوکوتیل در مقایسه با زمانی می‌شود که آبیاری در طول دوره رشد فراهم شده است (Lockley *et al*., 2015). علاوه بر این، استفاده از پرلیت به‌عنوان یک محیط رشد، بدلیل دسترسی ناکافی به آب، ریشه‌های ترک خورده ایجاد می‌کند (Sotta *et al*., 2019). همچنین استفاده از کود آلی (۷۰ تن در هکتار) نیز بدلیل غلظت بالای نیتروژن، باعث ایجاد ریشه‌های ترک خورده خواهد شد (Maia *et al*., 2018). مراقبت در دوره رشد ریشه، ٤ هفته پس از کاشت بسیار حیاتی است، زیرا در این دوره ریشه به سرعت در حال گسترش است و هر نوع تنش آبی یا کودی در این دوره منجر به تولید ریشه‌های ترک خورده می‌شود، به همین ترتیب، آبیاری و نوسانات دمایی در طول دوره رشد بعدی منجر به شکافتن هیپوکوتیل می‌گردد (Singh *et al*., 2015)، دمای بالا در حدود ۳۵ درجه سانتیگراد، تولید لیگنین را در اطراف سلول‌ها تسریع می‌کند و منجر به ایجاد ترک در ریشه می‌شود (Cecilio Filho *et al*., 2017). به نظر می‌رسد کمبود بور، یکی از عوامل اصلی در ایجاد شکافتن هیپوکوتیل باشد، زیرا این عنصر برای تشکیل دیواره سلولی و غشاء لازم است، بنابراین کمبود آن منجر به پلاسموپتیزی می‌شود (Lockley *et al*., 2016). علاوه بر این، خاک‌های دارای کمبود کلسیم در ایجاد ترک در ریشه نقش دارند (Cecilio Filho *et al*., 2017). علاوه بر این، شکافتن/ترک خوردن نه تنها بر کیفیت ریشه تأثیر می‌گذارد، بلکه ورود پاتوژن‌های مختلف (باکتری و قارچی) را فراهم می‌کند که بطور قابل توجهی ذخیره‌سازی و ماندگاری پس از برداشت را کاهش می‌دهد (Wang *et al*., 2021).

پوک و توخالی شدن (Hollowness): این اختلال به عنوان یک حفره توخالی طولی در مرکز ریشه تعریف می‌شود و معمولاً در تابستان ظاهر می‌شود (شکل ۵) و زمانی رخ می‌دهد که فضاهای هوای بین سلولی در مرکز ریشه در نزدیکی مغز در نیمه اول دوره رشد با هم ترکیب شوند. معمولاً، این فضای بین سلولی با سلول‌های پارانشیم کروی بزرگ پر می‌شوند (Kaymak *et al*., 2010). دمای بالای خاک، منجر به لیگنین شدن سلول‌های رو به فضاهای بین سلولی در مرکز ریشه می‌شود و از نفوذ سلول به این فضاها جلوگیری می‌کند و در نتیجه باعث می‌شود که سلول‌ها به هم متصل شوند و حفره توخالی ایجاد کنند. مشاهده شده است که ممانعت از نفوذ سلول‌ها توسط لیگنیکاسیون علت اصلی توخالی شدن در ریشه است (Manzoor *et al*., 2021). بیست و یک روز پس از کاشت، فضاهای بین سلولی ماکروسکوپیک می‌شوند و درصد فضاهای توخالی از روز ۲۸ تا زمان برداشت بدلیل رشد سریع ریشه و ضخیم شدن سلول افزایش

می‌یابد (Manzoor *et al.*, 2021). این اختلال در ریشه‌هایی که ناحیه مرکزی آن قابلیت انبساط دارد شدید است، بطورکلی، شروع توخالی شدن در ناحیه مرکزی تحت تأثیر انسداد تشکیل سلول در داخل فضاهای بین سلولی در طول رشد اولیه و توسعه سریع لیگنینی شدن در طول بلوغ ریشه است. شرایط مساعد برای رشد ریشه مانند زمان کاشت در تابستان، مصرف زیاد کود و تراکم کم بوته در ایجاد پوکی‌شدن مهم می‌باشد. هرچه ریشه‌ها سریعتر رشد کنند، احتمال توخالی شدن بیشتر است. همچنین تنظیم‌کننده‌های رشد در ایجاد توخالی شدن در ریشه‌ها نقش دارند، مانند سیتوکینین در ریشه‌ها فعالیت بالاتری دارد، در حالی که در ریشه‌های دارای حفره توخالی (Hollow Cavity)، فعالیت سیتوکینین کمتری تشخیص داده می‌شود. سیتوکینین در تقویت تقسیم سلولی و مهار تشکیل لیگنین نقش دارد (Fukuoka, 2007). در حالی که، تجمع اکسین در بافت‌های گیاهی، تقسیم سلولی را مهار می‌کند و لیگنینی شدن را در سلول‌های پارانشیم تسریع می‌کند (Manzoor *et al.*, 2021). بنابراین، بروز توخالی شدن تحت تأثیر فعالیت‌های هورمونی درون‌زا قرار می‌گیرد که بر تقسیم سلولی تأثیر می‌گذارد. توخالی شدن در ریشه‌ها را می‌توان با کاربرد خارجی اکسین و سیتوکینین کنترل کرد (Fukuoka, 2007).

شکل ۵- تشکیل فضای توخالی در ریشه‌های ترب (Manzoor *et al.*, 2021)

Fig 5- Hollow space formation in radish roots

بطورکلی، عوامل مختلفی مانند کاهش بیوسنتز سیتوکینین، دمای بالای خاک و از بین رفتن سلول‌های پارانشیم آوند چوبی در مراحل اولیه تا اواسط رشد، با تجزیه سلول‌ها و تشکیل فضاهای بین سلولی لیزوژن در ریشه و تجمع لیگنین، منجر به ایجاد حفره توخالی می‌شود. علاوه بر این، هنگامی که ریشه‌ها بزرگ می‌شوند، فضاهای خالی باقی می‌مانند زیرا نمی‌توانند با سلول‌های پارانشیم پر شوند (Nishio, 2017). علاوه

بر این، مصرف زیاد نیتروژن (۳۰۰-٤٥٠ میلی‌گرم در لیتر) باعث پوک شدن ریشه‌ها می‌شود (Akoumianakis *et al*., 2011). با مصرف غلظت‌های بالای نفتالین استیک اسید (NAA)، که شدت رشد ریشه را کاهش می‌دهد، می‌توان از اختلال توخالی شدن در ریشه‌ها جلوگیری کرد (Kaymak *et al*., 2010).

قهوه‌ای شدن داخلی/قلب قهوه‌ای (Internal Browning/Brown Heart): قلب قهوه‌ای یا قهوه‌ای شدن داخلی در ناحیه مرکزی ریشه تعریف می‌شود که بدلیل ظاهر ناخوشایند و طعم تلخ، ارزش تجاری محصول را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و در محصولات فصل تابستان بیشتر دیده می‌شود (شکل ٦) (Fukuoka *et al*., 2010; Sotta *et al*., 2019). ریشه‌های آسیب دیده، کوچک و ظاهری مایل به خاکستری دارند و بدلیل کاهش رشد، کوتاه می‌مانند و ریشه‌ها قرمز ارغوانی و زرد همراه با رنگ قهوه‌ای در هنگام برش دارند و همچنین پریدرم آن‌ها ضخیم است (Dhaliwal, 2007; Barker and Bryson, 2016).

شکل ٦- قهوه‌ای شدن داخلی ریشه ترب (Manzoor *et al*., 2021)

Fig 6- Internal browning of radish

بروز این اختلال بدلیل غلظت کم بور در خاک ظاهر می‌شود. نیاز ترب به بور بیش از هر محصول دیگری است و کمبود آن بدلیل شرایط خشکسالی یا دمای بالا می‌تواند باعث قهوه‌ای شدن داخلی شود (Nishio, 2017). در گیاهان، بور نقش مهمی در عملکرد مناسب دیواره سلولی دارد، زیرا به تشکیل استرهای اسید بوریک بین زنجیره‌های پکتین موجود در دیواره سلولی کمک می‌کند. بنابراین، تغییرات در غلظت پکتین با بهبود یکپارچگی دیواره سلولی در ایجاد مقاومت در برابر قهوه‌ای شدن داخلی نقش دارد (Sotta *et al*., 2019). معمولاً دمای بالای ۲۱ درجه سانتیگراد، باعث کاهش ظرفیت چرخه آسکوربات-گلوتاتیون برای تجزیه گونه‌های فعال اکسیژن بین سلولی (تولید شده در اثر تنش گرمایی) و افزایش فعالیت پلی فنل اکسیداز شده که منجر به قهوه‌ای شدن داخلی می‌شود (Fukuoka and Enomoto, 2014; Fukuoka and Hamada, 2020). مدت زمانی که در طی آن ریشه‌ها در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند، در بروز قهوه‌ای شدن داخلی مهم می‌باشد، زیرا دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای حداکثر دمای هوا و ۲۹ درجه سانتی‌گراد برای حداکثر دمای خاک در ایجاد اختلال قهوه‌ای شدن داخلی مهم است (Fukuoka *et al*.,

2007). بطور معمول، پلی فنل اکسیداز در پلاستید به صورت غیرفعال قرار می‌گیرد که در آن به غشاهای تیلاکوئید متصل می‌شود و فنل‌هایی که به عنوان بستر برای قهوه‌ای شدن آنزیمی عمل می‌کنند در داخل واکوئل‌ها وجود دارند. بنابراین، واکنش آنزیمی که منجر به قهوه‌ای شدن بافت می‌شود، به هیچ وجه در سلول رخ نمی‌دهد. با این حال، هنگامی که لیپیدهای غشای اطراف توسط گونه‌های فعال اکسیژن بین سلولی آسیب می‌بینند، فعالیت آنها در پاسخ به اختلال، در یکپارچگی سلولی آغاز می‌شود، پلی فنل اکسیداز و فنل‌ها از هر اندام سلولی به سیتوپلاسم نشت می‌کنند و واکنش آنزیمی فعال می‌شود که منجر به قهوه‌ای شدن می‌شود (Fukuoka *et al*., 2019; Fukuoka and Hamada, 2020). ارقام حساس به قهوه‌ای شدن داخلی، می‌توانند فعالیت بالایی از پلی فنل اکسیداز و فنیل آلانین آمونیالیاز (PAL) با کاهش فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز (GSHR) و دهیدروآسکوربات ردوکتاز (DHAR) نشان دهند (Fukuoka *et al*., 2019). ارقام نسبتاً حساس و حساس نسبت به ارقام مقاوم دارای فعالیت پلی فنل اکسیداز ۱/۲ تا ۳/۸ برابر بیشتر دارند (Fukuoka and Enomoto, 2014). کاربرد گوگرد در خاک (۳۰ گرم در متر مربع) می‌تواند فعالیت‌های آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز و دهیدروآسکوربات ردوکتاز را افزایش دهد که فعالیت آنزیم‌های دخیل در بیوسنتز پلی‌فنل را مهار می‌کند و بنابراین ظرفیت تجزیه چرخه آسکوربات-گلوتاتیون را برای حذف H_2O_2 افزایش می‌دهد (Fukuoka and Enomoto, 2007). بروز قهوه‌ای شدن داخلی نیز با آناتومی ریشه مرتبط است زیرا ریشه‌ها کوچک هستند و سلول‌های پارانشیم، شانس کمی برای اختلال قهوه‌ای شدن داخلی دارند (Fukuoka *et al*., 2010). سلول‌های ریشه کوچک، حاوی مقدار زیادی پلی ساکارید پکتین هستند که به عنوان سدی در برابر آسیب گونه‌های فعال اکسیژن عمل می‌کنند و بزرگ شدن سلولی، باعث کاهش محتوای پلی ساکارید پکتین می‌شود که باعث آسیب غشاء توسط H_2O_2 و منجر به قهوه‌ای شدن داخلی می‌شود (Fukuoka *et al*., 2010). زیرا شدت این اختلال در ارقام مختلف تا حد زیادی به پروتوپکتین و میزان بزرگ شدن سلول بستگی دارد. که در ارقام یا واریته‌هایی با اندازه سلول کوچک (<۱۳۵ میکرومتر) حاوی محتوای بالایی از پروتوپکتین در ریشه هستند و در برابر قهوه‌ای شدن داخلی مقاوم هستند، زیرا غلظت‌های بالای پروتوپکتین از غشای سلولی در برابر تخریب محافظت می‌کند (Fukuoka *et al*., 2010). علاوه بر این، کاربرد خارجی جیبرلیک اسید در طول دوره رشد نیز باعث رشد سلول‌های کوچک می‌شود که قهوه‌ای شدن داخلی ریشه‌ها را کنترل می‌کند (Fukuoka *et al*., 2010). علاوه بر این، مهار سیستم بازسازی اسید اسکوربیک (AsA) باعث اختلال در سیستم گلوتاتیون آسکوربات برای سم‌زدایی H_2O_2 می‌شود، در ارقام مقاوم به قهوه‌ای شدن داخلی، سطح اسید اسکوربیک ۱۷-۲۵ میلی‌گرم است در حالی که در ارقام حساس، این سطح ۱۲ میلی‌گرم برآورد شد (Fukuoka and Enomoto, 2007). از آنجایی که ارقام حساس دارای سلول‌های پارانشیمی بزرگ می‌باشند، سرعت تنفس بالاتری دارند، یعنی ساکارز برای حفظ فعالیت‌های سلولی به گلوکز و فروکتوز تجزیه

می‌شود. بنابراین، بالا بودن سطح قندهای کاهنده در سلول‌های ریشه ارقام حساس نیز منجر به واکنش میلارد (Maillard) (واکنشی بین قندهای کاهنده و اسیدهای آمینه) در سلول‌ها در پاسخ به دمای بالا و تنش اکسیداتیو می‌شود. واکنش میلارد، مطابق با فعالیت‌های آنزیمی پلی فنل اکسیداز منجر به قهوه‌ای شدن داخلی در ریشه می‌شود (Fukuoka and Hamada, 2020). مطالعات مختلف نشان داد که بروز این اختلال فیزیولوژیکی نه تنها بدلیل تنش‌های مختلف محیطی و غیره رخ می‌دهد، بلکه تحت تأثیر ارقام مختلف قرار می‌گیرد (Fukuoka and Enomoto, 2001; Fukuoka and Enomoto, 2014).

نتیجه‌گیری کلی

اختلالات فیزیولوژیکی در ترب و تربچه پیش از برداشت، یک نوع ناهنجاری ریشه هم از نظر بیرونی و هم درونی است. این اختلال نه توسط بیماری، بلکه یک عامل مکانیکی رخ می‌دهد که به عنوان واکنش گیاه به شرایط مختلف رشد نامطلوب تعریف می‌شود. در بین عوامل غیرزیستی مختلف، دمای بالا، عامل اصلی ایجاد اختلالات مختلف در ریشه است. بنابراین، شناسایی این اختلالات و تغییر شرایط مختلف رشد مانند زمان و تراکم کاشت، دفعات آبیاری، بستر رشد، میزان کود و انتخاب مناسب ارقام برای شرایط مختلف و غیره برای پرورش دهندگان جهت کاهش این اختلالات مهم است.

منابع

1) Abdel, C.G. 2007. Production of well irrigated radishes (*Raphanus sativus* L.): 5– The influence of gibberellic acid (GA_3) on growth and yield of local black radish cultivars grown under plot and furrow cultivations methods. *Journal of Duhok University*, 10: 40–49.
2) Abdel, C.G. 2016. Physiological disorders of four radish (*Raphanus sativus* L. var. sativus) cultivars storage roots grown in controlled cabinets under varying temperatures and irrigation levels. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 5: 185–198.
3) Akoumianakis, K.A., Karapanos, I.C., Giakoumaki, M., Alexopoulos, A.A. and H.C, Passam. 2011. Nitrogen, season and cultivar affect radish growth, yield, sponginess and hollowness. *International Journal of Plant Production*, 5: 111–120.
4) Barker, A.V. and G.M, Bryson. 2016. Nitrogen. In Handbook of Plant Nutrition, 2nd ed.; Barker, A.V., Pilbeam, D.J., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 37–66.
5) Bhat, K.L. 2009. Physiological disorders of vegetable crops; Daya Publishing House: Delhi, India, pp. 73–116.
6) Cecilio Filho, A.B., Dutra, A.F. and G.S.D, Silva. 2017. Phosphate and potassium fertilization for radish grown in a latosol with a high content of these nutrients. *Revista Caatinga*, 30: 412–419.
7) Dhaliwal, M.S. 2007. Handbook of Vegetable Crops; Kalyani Publishers: New Delhi, India, pp. 120–199.
8) Dongarwar, L.N., Kashiwar, S.R., Ghawade, S.M. and U.R, Dongarwar. 2017. Performance of different radish (*Raphanus sativus* L.) varieties in black soils of Vidharbha-Maharashtra. *International Journal of Plant & Soil Science*, 20: 1–9.
9) Fukuoka, N. 2007. Effect of cytokinin and auxin application on vessel differentiation and development of hollow cavity in the roots of Japanese radish (*Raphanus sativus* L.). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 76: 310–315.
10) Fukuoka, N. and T, Enomoto. 2001. The occurrence of internal browning induced by high soil temperature treatment and its physiological function in Raphanus root. *Plant Science*, 161: 117–124.
11) Fukuoka, N. and T, Enomoto. 2002. Enzyme activity changes in relation to

internal browning of Raphanus roots sown early and late. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77: 456–460.

12) Fukuoka, N. and T, Enomoto. 2007. Effects of sulfur application on enzyme activities in relation to the ascorbate-glutathione cycle and the occurrence of internal browning in Raphanus roots. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 76: 305–309.

13) Fukuoka, N. and T, Enomoto. 2007. Intervarietal differences in the occurrence of internal browning and the role of ascorbic acid in Raphanus roots. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 76: 144–148.

14) Fukuoka, N. and T, Enomoto. 2014. Relationship between the concentration of pectin-like substances and the severity of internal browning in radish (*Raphanus sativus* L.) roots induced by high soil temperature. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 89: 625–630.

15) Fukuoka, N. and T, Hamada. 2020. Effects of heat stress on the biological maillard reaction, oxidative stress, and occurrence of internal browning in Japanese radish (*Raphanus sativus* L.). *Journal of Plant Physiology*, 256: 153326.

16) Fukuoka, N. and Y, Kano. 1997. Relationship between the development of hollowing and the separation of vessel sectors in the central region of the root of Japanese radish (*Raphanus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 68: 59–72.

17) Fukuoka, N., Ikeshita, Y. and T, Enomoto. 2010. Relationship between the occurrence of internal browning and size of xylem parenchymatous cells in roots of Japanese radish. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 79: 27–33.

18) Fukuoka, N., Kudou, T., Sajiki, T., Masuda, D., Kanamori, Y. and T, Enomoto. 2007. Statistical analysis of the development of internal browning in Japanese radish (*Raphanus sativus*) in relation to thermal condition using logit model. *Horticulture Research*, 6: 559–564.

19) Fukuoka, N., Miyata, M., Hamada, T. and E, Takeshita. 2019. Occurrence of internal browning in tuberous roots of sweet potato and its related starch biosynthesis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135: 233–241.

20) Ghimire, S., Adhikari, B., Pandey, S., Belbase, K., Lamichhane, S. and R, Pathak. 2020. Effect of different organic manure on growth and yield of radish in Deukhuri, Dang, Nepal. *Acta Scientific Agriculture*, 4: 1–5.

21) Harris, D.R., Nguyen, V.Q., Seberry, J.A., Haigh, A.M. and W.B, McGlasson. 2000. Growth and postharvest performance of white radish (*Raphanus sativus* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40: 879–888.

22) Kang, E.S., Ha, S.M., Cheong, S.R., Seo, M.W., Kwack, Y.B., Choi, K.J. and W.B, Chae. 2015. Optimum double-row spacing in the autumn cultivation of radish (*Raphanus sativus* L.). *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 34: 204–209

23) Kathayat, K. and M, Rawat. 2019. Physiological disorders in vegetable crops. In advances in horticultural crop management and value Addition; Singh, S.K., Kaur, S., Eds.; Laxmi Publications: New Delhi, India, pp. 313–314.

24) Kaymak, H.C. and I, Guvenc. 2010. Evaluation of radish cultivars in terms of some physiological disorders. *TÜBAV Journal of Science*, 3: 23–29.

25) Kaymak, H.C., Guvenc, I. and A, Gurol. 2010. Correlation between endogenous elements and development of hollowing in the root of radish (*Raphanus sativus* L.) cultivars. *Zemdirbyste*, 97: 97–104.

26) Konarska, A. 2005. Changes in development and structure of *Raphanus sativus* L. var. radicula Pers. root under aluminum stress condition. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 4: 85–97.

27) Kowalski, A. and S, Kaniszewski. 2017. Effect of organic fertilization on the quality and yield of two radish cultivars in greenhouse organic cultivation. *Acta Horticulturae*, 1164: 189–194.

28) Kumar, P., Kumar, P., Singh, M.K. and R, Kumar. 2020. Treasure of Vegetable Crops,

1st ed.; Sankalp Publication: Chhattisgarh, India, pp. 181–183.
29) Ladaniya, M.S. 2008. Physiological disorders and their management. InCitrus Fruit: Biology, Technology and evaluation; Ladaniya, M.S., Ed.; Elsevier Publishing Services: Chennai, India, pp. 451–454.
30) Lavanya, A.V.N., Vani, V.S., Reddy, P.S.S. and P, Shashikala. 2017. Root yield of radish as affected by sowing dates and spacing. *International journal of pure and applied bioscience*, 5: 1780–1784.
31) Lavanya, A.V.N., Vani, V.S., Reddy, P.S.S. and K, Chaitanya. 2014. Effect of sowing dates and spacing on growth and root yield of radish cv. Pusa chetki. *Plant Arch*, 14: 615–618.
32) Lockley, R.A. 2016. Minimising post-harvest losses in radishes through an understanding of pre/post-harvest factors that influence root splitting. Ph.D. Thesis, Harper Adams University, Newport, UK.
33) Lockley, R.A., Beacham, A.M., Grove, I.G. and J.M, Monaghan. 2021. Postharvest temperature and water status influence postharvest splitting susceptibility in summer radish (*Raphanus sativus* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101: 536–541.
34) Lockley, R.A., Grove, I.G. and J.M, Monaghan. 2015. Splitting in radish does preharvest environment influence the response to postharvest handling? *Acta Horticulturae*, 1091: 231–237.
35) Lockley, R.A., Grove, I.G. and J.M, Monaghan. 2016. Minimising losses in radish (*Raphanus sativus*) at harvest due to splitting by manipulation of water availability during growth. *Acta Horticulturae*, 1118: 157–162.
36) Maia, A.H., de Souza, M.E., da Silva, F.C., Rebelatto, B.F., Silva, T.O., Souza, V.S. and L, dos Santos Ferreira. 2018. Productivity of radish fertilized with different doses of bovine manure. *African Journal of Agricultural Research*, 13: 963–968.
37) Manzoor, A., Bashir, M.A., Naveed, M.S., Cheema, K.L. and M, Cardarelli. 2021. Role of Different Abiotic Factors in Inducing Pre-Harvest Physiological Disorders in Radish (*Raphanus sativus*). *Plants*, 10: 2003.
38) Masarirambi, M.T., Nxumalo, K.A., Musi, P.J. and L.M, Rugube. 2018. Common physiological disorders of lettuce (*Lactuca sativa*) found in Swaziland: A review. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 18: 50–56.
39) Monaghan, J.M., Chiramba, T. and L.M, Mogren. 2012. Effect of pre and postharvest factors on splitting in radish (*Raphanus sativus*). *Acta Horticulturae*. 934: 1347–1351.
40) Neerja, S. 2016. Physiological disorders in solanaceous and bulb crops: A review. *International Journal of Agricultural Science*, 8: 2566–2568.
41) Nishio, T. 2017. Economic and Academic Importance of Radish. In the Radish Genome; Nishio, T., Kitashiba, H., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 1–10.
42) Peet, M.M. 2009. Physiological disorders in tomato fruit development. *Acta Horticulturae*, 821: 151–160.
43) Rubatzky, V.E. and M. Yamaguchi. 2012. World vegetables: principles, production and nutritive values; springer science & business media: cham, Switzerland, pp. 411–412.
44) Sadana, A., Raju, S.S., Kumar, P.V. and C, Sunitha. 2015. Effect of spacing and seed soaking with GA3 on growth, yield and quality of radish (*Raphanus sativus* L.). *Andhra Pradesh journal of agricultural sciences*, 1: 80–84.
45) Singh, N., Roy, S., Karmakar, P., Chaurasia, S.N.S., Gupta, S. and B, Singh. 2015. Improved production technologies in vegetable crops; IIVR Training Manual No. 59; ICAR-Indian Institute of Vegetable Research: Varanasi, India; pp. 268–269.
46) Song, D., Song, L., Sun, Y., Hu, P., Tu, K., Pan, L., Yang, H. and M, Huang. 2016. Black heart detection in white radish by hyperspectral transmittance imaging combined with chemometric analysis and a successive projections algorithm. *Applied Sciences*, 6: 249.

47) Sonneveld, C. and A.L, Van den Bos. 1995. Effects of nutrient levels on growth and quality of radish (*Raphanus sativus* L.) grown on different substrates. *Journal of Plant Nutrition*, 18: 501–513.
48) Sotta, N., Bian, B., Peng, D., Hongkham, P., Kamiya, T., Niikura, S. and T, Fujiwara. 2019. Local boron concentrations in tuberous roots of Japanese radish (*Raphanus sativus* L.) negatively correlate with distribution of brown heart. *Plant Physiology and Biochemistry*, 136: 58–66.
49) Subedi, S., Srivastava, A., Sharma, M.D. and S.C, Shah. 2018. Effect of organic and inorganic nutrient sources on growth, yield and quality of radish (*Raphanus sativus* L.) varieties in Chitwan, Nepal. *SAARC Journal of Agriculture*, 16: 61–69.
50) Torres, J.F., Siurana, D., Bono, M.S., Laza, P., Pascual-Seva, N., San Bautista, A., Pascual, B., Alagarda, J., López-Galarza, S. and J.V, Maroto. 2013. Influence of growing media on physiological disorders incidence in oriental radishes. *Acta Horticulturae*, 1013: 521–528.
51) Tyagi, S.K. and A.R, Khire. 2018. Physiological and Nutritional Disorders in Vegetable Crops. In Vegetable Crops at a Glance; Tyagi, S.K., Khire, A.R., Eds.; Scientific Publishers: Jodhpur, India, pp. 432–435.
52) Wan, S. and Y, Kang. 2006. Effect of drip irrigation frequency on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use. *Irrigation Science*, 24: 161–174.
53) Wang, Y., Guo, L., Zhao, X., Zhao, Y., Hao, Z., Luo, H. and Z, Yuan, 2021. Advances in mechanisms and omics pertaining to fruit cracking in horticultural plants. *Agronomy*, 11: 1045.
54) Yahia, E.M., Carrillo-Lopez, A. and A, Sanudo. 2019. Physiological disorders and their control. In postharvest technology of perishable horticultural commodities; Yahia, E.M., Ed.; Elsevier Publishers: Oxford, UK, pp. 499–500.
55) Yu, X., Choi, S.R., Chhapekar, S.S., Lu, L., Ma, Y., Lee, J.Y., Hong, S., Kim, Y.Y., Oh, S.H. and Y.P, Lim. 2019. Genetic and physiological analyses of root cracking in radish (*Raphanus sativus* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 132: 3425–3437
56) Zheng, Y., Ma, Y.Y., Liu, W. and F, Qiu. 2020. Plant nutrition and physiological disorders in fruit crops. In fruit crops: diagnosis and management of nutrient constraints; Srivastava, A.K., Hu, C., Eds.; Elsevier Publishers: Amsterdam, The Netherlands, pp. 47–50.