# اثر تابش‌های ترموگرافیک بر بهبود انتقال آب و مواد در آوندهای چوبی تحت شرایط تنش حرارتی

نامزد پوهنیار صبورخیرمحمدزاده[1*] ، پوهنیار نورمحمد کاکر[2] و پوهنمل مسلم حلیمی[3]
دیپارتمنت آگرانومی[1و2] ، پوهنځی زراعت ، دیپارتمنت کیمیا[3]، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون فراه

**ایمیل**: saboorkmz4@gmail.com

## چکیده

تابش‌های ترموگرافیک(Thermal Infrared Radiation - TIR) به‌عنوان یکی از تکنالوژی‌های جدید در زراعت، اثرات قابل ملاحظه‌ای بر بهبود انتقال آب و مواد معدنی در آوندهای چوبی، به‌خصوص در شرایط تنش حرارتی(گرما) دارد. تنش حرارتی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد نباتات است که می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت جذب و انتقال آب، افزایش تعرق و افزایش تولید نوع فعال اکسیجن( Reactive Oxygen Species-ROS ) شود. این عوامل در نهایت باعث اختلال در میتابولیزم نبات و کاهش عملکرد می‌گردد. تابش‌های ترموگرافیک از طریق کاهش کشش سطحی آب، افزایش تحرک مالیکولی و کاهش مقاومت انتقال در آوندهای چوبی، سبب بهبود جریان آب و جلوگیری از پدیده کویتیشن( شکستگی انساج آوندی به دلیل کاهش شدید فشار یا خشکی زیاد) می‌شوند. علاوه بر این تأثیر این تابش‌ها بر تنظیم باز و بسته شدن منافذ برگ شده که باعث افزایش مؤثریت آب مصرفی نبات و تعامل بهتری بین تعرق و جذب آب ایجاد می‌کند. همچنین، این تابش‌ها قادر اند فعالیت انزایم‌های آنتی اکسیدیشن را افزایش داده و استرس اکسیدتیوو ناشی از تنش گرمی را کاهش دهند. مطالعات تجربی بر روی انواع نباتات مزروعی مانند گندم، برنج و جواری نشان داده است که تابش‌های ترموگرافیک می‌تواند نقش مؤثری در افزایش تحمل نباتات نسبت به تنش گرمی ایفاء کنند. با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه بالای تجهیزات و نیاز به مطالعات بیشتر جهت طرح ریزی این تکنالوژی وجود دارد. این مقاله مروری، یافته‌های علمی جدید را بررسی کرده و اهمیت استفاده از تابش‌های ترموگرافیک را در بهبود تحمل نباتات به تنش‌های حرارتی تبیین می‌کند.

**کلمات کلیدی:** آوندهای چوبی، ترموگرافیک، تابش، تنش گرما، نباتات.

**مقدمه**

با توجه به افزایش روزافزون درجه حرارت جهانی و به وجود آمدن مشکلات شدید اقلیمی، تنش حرارتی(گرمی) به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اساسی در تولید محصولات زراعتی مطرح گردیده است. این تنش، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب اختلالات وسیع در فعالیت‌های فیزیولوژیکی، بیوکیمیاوی و ساختاری نباتات می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش پتانشیل آب در نبات، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش هدایت آوندی اشاره کرد که نهایتاً به خشکی داخلی، کاهش فتوسنتز و افت عملکرد نبات منجر می‌گردد (Hasanuzzaman *et al.*, 2013; (Khan *et al.*, 2025). در راستای مقابله با این مشکل، استفاده از تکنالوژی‌های جدید مانند تابش‌های ترموگرافیک یا فروسرخ حرارتی (Thermal Infrared Radiation - TIR) به‌عنوان روشی غیرتماسی و مؤثر جهت تعدیل اثرات تنش گرمی مورد توجه محققان قرار گرفته است. این تابش‌ها که در محدوده طول موج ۳ تا ۱۴ میکرومتر قرار دارند، قادر اند بدون آسیب‌رسانی به حجرات نباتی، عکس‌العمل‌های فیزیولوژیکی خاصی را فعال سازند (Smigaj *et al.*, 2024).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تابش‌های ترموگرافیک باعث بهبود دینامیک جریان آب در آوندهای چوبی در شرایط تنش گرمی می‌شوند، این بهبود از طریق چند مکانیزم شامل فعال‌سازی پروتئین‌های کانال آب (آکواپورین‌ها)، افزایش سیالیت غشای حجروی، بهبود اسموسس حجروی و کاهش ویسکوزیتی شیره آوندی حاصل می‌گردد. علاوه بر این، تابش‌های حرارتی می‌توانند تنش اکسیداتیو را کاهش داده و فعالیت انزایم‌های آنتی‌اکسیدانی را ارتقا دهند که در حفظ ساختار آوندها در برابر آسیب‌های گرمی نقش مهمی ایفاء می‌کند( Wahid *et al.*, 2007; Kapilan *et al.*, 2018). خصوصیات مهم تابش ترموگرافیک این است که قادر است حرارت سطحی نبات را بدون تأثیر مستقیم بر حرارت محیط اطراف تنظیم

کند. این امر باعث تحریک غیرمستقیم منافذ و ایجاد تغییر در فشار آوندی می‌گردد که نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ جریان شیره خام به‌سوی اندام‌های هوایی دارد (Cohen *et al.*, 2005). بررسی‌های تصویربرداری حرارتی نیز نشان داده‌اند که تابش‌های تنظیم‌شده می‌توانند حرارت برگ را در محدوده مطلوب حفظ کرده و از باز شدن بی‌رویه منفذها که منجر به‌ضایعه شدن آب می‌شود جلوگیری کنند (Pignon *et al.*, 2021).

کارایی تابش‌های TIR بستگی به‌شدت، مدت و الگوی زمانی تابش دارد؛ تابش‌های مداوم با شدت بالا ممکن است منجر به‌تخریب پروتئین‌ها و تخریب ساختار غشای حجروی شود، در حالی‌که تابش‌های متناوب و با شدت ملایم می‌توانند به‌عنوان سیگنال‌های القایی برای فعال‌سازی میکانیزم‌های سازگاری عمل کنند(Barua *et al.*, 2019). همچنین نقش ترکیبی تابش حرارتی با سایر عوامل مدیریتی مانند تغذیه معدنی، به‌خصوص پتاشیم و کلسیم و آبیاری کنترول‌شده می‌تواند اثر هم‌افزایی در افزایش مقاومت آوندی نباتات در برابر تنش حرارتی داشته باشد(Pathak *et al.*, 2020). از منظر کاربردی استفاده از وسایل تولیدکننده تابش‌های ترموگرافیک در گلخانه‌ها و کشت‌های کنترول‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای مدیریت دقیق حرارت برگ و ساقه نباتات به‌کار رود و همچنین در تحقیقات اساسی امکان بررسی مستقیم رابطه بین حرارت موضعی و انتقال آب در نباتات را فراهم کند(Vandegeer *et al.*, 2014).

با توجه به‌اهمیت موضوع تحقیق در زمینه تأثیر تابش‌های ترموگرافیک بر بهبود انتقال آب و مواد معدنی در آوندهای چوبی تحت شرایط تنش حرارت(گرمی) ضروری است. زیرا افزایش حرارت و وقوع تنش‌های گرمی مکرر باعث اختلال در سیستم آوندی نباتات، به‌خصوص آوندهای چوبی که مسئول انتقال آب از ریشه به بخش‌های هوایی می‌باشند، می‌شود و این اختلالات منجر به‌کاهش رشد و عملکرد نبات می‌گردد. تابش‌های ترموگرافیک با بهبود فعالیت

فیزیولوژیکی، افزایش خاصیت کششی دیواره‌های آوندی و ارتقای فعالیت کانال‌های آبی، نقش مهمی در تقویت عملکرد آوندهای چوبی ایفاء می‌کنند. همچنین، تحریک پاسخ‌های سازشی نبات از جمله تولید ترکیبات حفاظتی مانند آنتی‌اکسیدآن‌ها و پرولین می‌تواند مقاومت نباتات را در برابر تنش حرارتی افزایش دهد (Hasanuzzaman *et al.*, 2013; Wahid *et al.*, 2007; Kapilan *et al.*, 2018).

تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که تنش حرارتی و خشکی می‌تواند به‌کاهش قابل توجه انتقال آب در آوندها و کاهش فتوسنتز منجر شود(Zhou *et al.*, 2018). همچنین استفاده از تکنالوژی تصویربرداری حرارتی، به‌عنوان شاخصی برای پیش‌بینی تغییرات منفذها و جریان آب در نباتات، گامی مؤثر در ارزیابی پاسخ نباتات به‌تنش‌ها محسوب می‌شود(Smigaj *et al.*, 2024). یافته‌های تحقیقاتی دیگر تأکید دارند که تابش‌های حرارتی ملایم می‌تواند با فعال‌سازی میکانیزم‌های دفاعی از تخریب ساختار آوندی جلوگیری نماید (Hasanuzzaman *et al.*, 2013; Wahid *et al.*, 2007). تابش‌های ترموگرافیک می‌توانند نفوذپذیری غشای حجروی را افزایش داده و جریان آب را تسهیل کنند(Kapilan *et al.*, 2018). در سطح میدانی نیز، ترموگرافی حرارتی با دقت بالا قادر است نواحی دچار تنش آبی را شناسایی کرده و در مدیریت زراعت هوشمند کاربرد داشته باشد( Cohen et al., 2005). مطالعات گلخانه‌ای نشان داده‌اند که گرمی ملایم ناشی از تابش TIR نه تنها به‌رشد نبات کمک می‌کند بلکه با افزایش کارایی مصرف آب، میزان آب مورد نیاز را کاهش می‌دهد(Barua *et al.*, 2019).

با وجود نتایج امیدوارکننده، همچنان به‌تحقیقات بیشتری در جهت تعیین شدت، مدت و فرکانس مطلوب تابش‌های ترموگرافیک و بررسی تفاوت‌های پاسخ نباتات مختلف نیاز است. همچنین بررسی اثرات ترکیبی این تابش‌ها با مدیریت منابع آب و تغذیه معدنی می‌تواند راه‌حل‌های جدیدی برای مقابله با تنش حرارتی

فراهم آورد. بر همین اساس این تحقیق به دنبال پاسخ به سؤالاتی است که آیا تابش‌های ترموگرافیک می‌توانند کارایی انتقال آب و مواد معدنی در آوندهای چوبی نباتات تحت تنش حرارتی را افزایش دهند؟ میکانیزم‌های فیزیولوژیکی و بیوکیمیاوی مرتبط با این تأثیرات چیست؟ و آیا این تابش‌ها می‌توانند به‌عنوان راهکاری عملی برای کاهش اثرات منفی تنش حرارتی مورد استفاده قرار گیرند؟

فرضیه‌های مطرح در این تحقیق عبارت‌اند از: تابش‌های ترموگرافیک با افزایش حرارت موضعی؛ ویسکوزیتی آب را کاهش داده و حرکت آن را در آوندهای چوبی تسهیل می‌کنند؛ این تابش‌ها بیان جن‌های مرتبط با آکواپورین‌ها را تحت تأثیر قرار داده و نفوذپذیری غشای حجروی را افزایش می‌دهند و استفاده از تابش‌های انفرارد حرارتی موجب افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه مانند فلاونوئیدها و آنتی‌اکسیدآن‌ها شده و در نتیجه استرس اکسیداتیو را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب این تحقیق می‌تواند به‌توسعه روش‌های علمی و کاربردی جهت افزایش مقاومت و پایداری تولیدات زراعتی در برابر تنش‌های حرارتی کمک زیادی نماید.

**روش تحقیق**

این تحقیق به‌شکل مروری انجام شده و هدف اصلی آن بررسی اثر تابش‌های ترموگرافیک در بهبود روند انتقال آب و مواد در آوندهای چوبی نباتات در شرایط تنش حرارتی می‌باشد. برای رسیدن به‌این هدف مراحل ذیل دنبال گردید:

۱. **ساخت سؤال تحقیق:** در نخست، سؤال اصلی تحقیق چنین طرح شد: آیا تابش‌های ترموگرافیک می‌توانند کارایی انتقال آب و مواد معدنی در آوندهای چوبی نباتات تحت تنش حرارتی را افزایش دهند؟

۲. **جستجوی سیستمیک منابع علمی:** برای درج معلومات معتبر و مرتبط، از بانک‌های معلوماتی علمی معتبر مانند PubMed ، Scopus و Google Scholar استفاده به‌عمل آمد. در این جستجو، کلمات کلیدی چون

(تابش ترموگرافیک، انتقال آب در آوندهای چوبی و تنش گرمی در نباتات) به‌کار برده شد تا مقالات مرتبط به موضوع شناسایی شوند.

۳. **معیارهای انتخاب و حذف منابع علمی:** مقالاتی که در محدوده زمانی مشخص نشر شده و به‌طور مستقیم به‌موضوع تحقیق ارتباط داشتند، انتخاب شدند. در مقابل منابعی که از نظر کیفیت علمی پایین یا غیر مرتبط بودند، کنار گذاشته شدند.

٤. **بررسی و تحلیل منابع علمی معتبر:** مقالات انتخاب‌شده از لحاظ روش تحقیق، نتایج و محدودیت‌ها به‌دقت مطالعه و تحلیل گردیدند تا درک عمیق‌تری از نتایج علمی موجود به‌دست آید.

۵. **طبقه‌بندی معلومات جمع‌آوری شده:** در آخیر، معلومات جمع آوری شده به‌شکل منظم و موضوع‌محور طبقه‌بندی شدند. این طبقه‌بندی شامل بخش‌هایی چون: اصول تابش‌های ترموگرافیک بر بهبود انتقال آب و مواد در آوندهای چوبی تحت تنش گرمی، میکانیزم تاثیر این تابش‌ها و نقش تابش در بهبود جریان مواد درون نبات و تاثیر آین تابش ها بر کاهش تنش گرمی بود.

## یافته‌های تحقیق

**اصول تابش‌های ترموگرافیک بر بهبود انتقال آب و مواد در آوندهای چوبی تحت تنش گرمی**

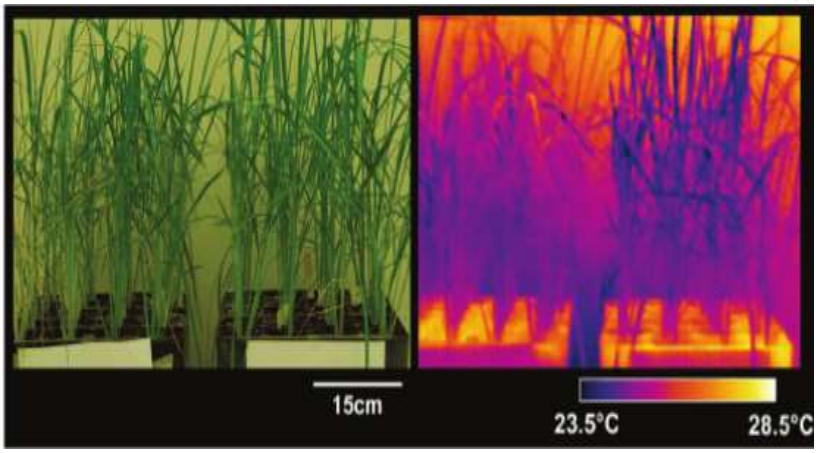
تابش‌های ترموگرافیک یا فروسرخ حرارتی از جمله ابزارهای پیشرفته و مؤثر در مطالعه‌ی عکس العمل‌های فیزیولوژیکی نباتات به‌خصوص در شرایط تنش حرارتی به‌شمار می‌روند. این نوع تابش‌ها توسط کمره‌های ترموگرافی قابل شناسایی بوده و برای تحلیل الگوهای حرارتی سطحی در برگ‌ها و ساقه‌های نباتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از کاربردهای اساسی این تکنالوژی، بررسی نقش آوندهای چوبی در انتقال آب و مواد معدنی در شرایط تنش گرمی می‌باشد (Carins-Murphy *et al.*,

2023). زمانی‌که نباتات در معرض گرمای شدید قرار می‌گیرند، معمولاً باز شدن منافذ کاهش می‌یابد و روند تعرق دچار اختلال می‌گردد، که این وضعیت تأثیر مستقیم بر فعالیت آوندهای چوبی دارد. استفاده از ترموگرافی با ثبت تغییرات حرارت سطح برگ‌ها امکان تحلیل میزان تعرق و به‌تبع آن جریان آب در آوندهای چوبی را فراهم می‌سازد. در چنین شرایطی کاهش تعرق باعث کند شدن جریان آب در آوندها و در نتیجه افزایش حرارت سطح برگ‌ها می‌شود که به‌صورت واضح در تصاویر ترموگرافی قابل مشاهده است (Grant *et al.*, 2006, pp. 45–47).

جدا از نقش تشخیصی تحقیقات جدید نشان داده‌اند که قرار دادن نباتات به‌صورت موقتی و کنترول‌شده در معرض تابش فروسرخ حرارتی، می‌تواند بعضی از پاسخ‌های فیزیولوژیکی نبات را تحریک کند. این پاسخ‌ها شامل افزایش فعالیت جن‌های وابسته به‌تحمل گرمی و بهبود جریان آب در آوندهای چوبی می‌باشد. چنین پاسخ‌هایی سبب افزایش انعطاف‌پذیری هیدرولیکی نبات در شرایط تنش شده و در نهایت به‌حفظ بهتر روند انتقال آب و مواد کمک می‌کنند( Brestic & Zivcak, 2013, p. 66).

از بعد عملی ترموگرافی تنها یک ابزار تشخیص آسیب‌های آوندی نیست بلکه به‌عنوان وسیله‌ی مؤثر برای نظارت بر عکس‌العمل‌های سازگاری نباتات نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطور مثال نباتاتی که تحت تأثیر گرمی شدید قرار گرفته و با تابش حرارتی تطابق یافته‌اند، در مقایسه با نباتات حساس، حرارت سطحی پایین‌تری را در تصاویر ترموگرافی نشان می‌دهند. این اختلاف حرارتی می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای شناسایی و انتخاب جینوتایپ‌های مقاوم‌تر نسبت به تنش گرمی استفاده شود(Merlot *et al.*, 2002, pp. 172–174).




*https://www.researchgate.net/profile/Olga-Grant/publication/236228364/figure/fig4/AS:324967523733513@1454489703934/Spring-barley-crops-subjected-to-a-high-nitrogen-fertilizer-input-165kg-N-ha-1-left_Q640.jpg* [1]

**تصویر (۱) تصویربرداری ترموگرافیک از نبات برنج**

**در سمت چپ** :تصویر معمولی در نور مرئی نشان‌دهنده‌ی رشد و تراکم بوته‌ها است. نباتات در گلدان‌های ردیفی کاشته شده‌اند و ارتفاع آن‌ها حدود ۱۵ سانتی‌متر مشخص شده است.

**در سمت راست**: تصویر حرارتی (ترموگرافی) همان بوته‌ها را نشان می‌دهد. در این نما، حرارت با طیف رنگی از آبی تا زرد نمایش داده شده‌اند؛ رنگ‌های آبی و بنفش نشان‌دهنده‌ی نواحی سردتر (حدود ۲۳,۵ درجه سانتی‌گراد) و رنگ‌های زرد و نارنجی نشان‌دهنده‌ی نواحی گرم‌تر (حدود ۲۸,۵ درجه سانتی‌گراد) می‌باشند. این تصویر مقایسه‌ای، برای بررسی پراکندگی حرارتی در سطح نباتات و تأثیر شرایط محیطی یا تنش گرمی بر حرارت برگ‌ها به کار می‌رود. بخش‌های بالایی نباتات (که معمولاً در تبخیر و تعرق فعال‌ترند) نسبت به بخش‌های پایین‌تر سردتر دیده می‌شوند. بنابراین این تصویر نشان دهنده تحلیل تعرق، وضعیت آبی و پاسخ حرارتی نباتات تحت تابش یا تنش حرارتی می‌باشد.

## مکانیزم تاثیر تابش فروسرخ بر آوندهای چوبی

تعریق روندی است که طی آن آب از طریق منافذی برگ تبخیر می‌شود و این تبخیر سبب ایجاد کشش در ستون آب داخل آوندهای چوبی می‌گردد(Pathak *et al.*, 2020). این کشش تعرقی، نیروی محرکه اصلی برای بالا کشیدن آب از ریشه به اندام‌های هوایی نبات می‌باشد. بنابراین هر عاملی که تعرق را افزایش دهد مستقیماً بر عملکرد آوندهای چوبی تأثیر می‌گذارد.

تابش فروسرخ حرارتی با بالا بردن حرارت سطح برگ اختلاف فشار بخار میان داخل برگ و هوای اطراف آن را افزایش می‌دهد که این اختلاف تحت عنوان (کسری فشار بخار) یاVPD (Vapor Pressure Deficit) شناخته می‌شود. هرچه

این عدد بیشتر باشد، تبخیر آب از منافذ سریع‌تر و شدیدتر صورت می‌گیرد و در نتیجه تعرق افزایش می‌یابد نبات برای جبران آب از دست رفته، مقدار بیشتری آب را از طریق آوندهای چوبی جذب می‌کند(Mertens *et al.*, 2023).

افزایش تعرق که به‌دنبال افزایش حرارت ناشی از تابش حرارتی اتفاق می‌افتد تأثیرات چندگانه‌ای بر سیستم هدایت آب در نبات دارد. اولاً با افزایش تبخیر، نیاز آبی برگ‌ها افزایش می‌یابد و نبات برای حفظ تعادل آبی خود جریان آب در آوندهای چوبی را تقویت می‌کند. این روند باعث تسریع حرکت شیره خام (آب و مواد معدنی محلول) در طول آوندها می‌شود. از طرف دیگر افزایش جریان آب فشار منفی بیشتری در ستون آب داخل آوندها ایجاد می‌کند که تنش آوندی را افزایش می‌دهد. این فشار منفی که مستقیم از افزایش VPD و تعرق زیاد ناشی می‌شود در شرایط خشکی یا حرارت زیاد ممکن است باعث بروز پدیده‌ای به‌نام کاویتیشن شود؛ یعنی شکست ستون آب داخل آوندها که در نهایت توانایی نبات در انتقال آب از ریشه به‌برگ را کاهش می‌دهد. بنابراین گرچه افزایش تعرق در کوتاه‌مدت باعث بهبود انتقال آب می‌شود، اما در بلندمدت و شرایط تنش ممکن است به‌ساختار آوندهای چوبی آسیب جدی برساند(Pathak *et al.*, 2020). (Nobel, 2009, p. 95).

علاوه بر این افزایش حرارت موجب کاهش ویسکوزیتی یا گرانروی آب می‌گردد که این موضوع نیز بر عملکرد آوندهای چوبی اثرگذار است. هنگامی که ویسکوزیتی آب کاهش می‌یابد آب راحت‌تر و سریع‌تر در لوله‌های آوندی جریان می‌یابد و مقاومت هایدرولیکی مسیر انتقال کاهش می‌یابد. بنابراین حتی با افزایش نیاز آبی ناشی از تعرق، نبات می‌تواند حجم بیشتری آب را با صرف انرژی کمتر منتقل کند. این تغییر فزیکی آب در پاسخ به‌حرارت مکملی برای پاسخ فیزیولوژیکی نبات به‌تابش فروسرخ به‌شمار می‌رود( Monteith & Unsworth, 2013, p. 141).

با این حال این مزیت فقط در محدوده کاهش حرارتی مفید است؛ زیرا در حرارت‌های بسیار بالا اثرات منفی چون بسته شدن منافذ، افزایش تولید انواع فعال اکسیجن و اختلال در تنظیم اسموسس حجرات بروز می‌کند که همه این موارد می‌توانند عملکرد آوندهای چوبی را تضعیف کنند. به‌عبارت دیگر، پاسخ نبات به افزایش حرارت ناشی از تابش فروسرخ بستگی به‌شدت و مدت زمان تابش و وضعیت آبی نبات دارد که تعیین می‌کند اثرات مثبت یا منفی بر جای بگذارد (Mertens *et al.*, 2023).

از منظر تنظیم هورمونی تابش حرارتی می‌تواند نقش غیرمستقیمی در تنظیم تعرق و فعالیت آوندهای چوبی داشته باشد. در پاسخ به‌افزایش حرارت، هورمون‌هایی مانند اسید آبسزیک (ABA) تولید می‌شوند که نقش کلیدی در تنظیم بسته شدن منافذ برگ دارند. تولید این هورمون معمولاً در شرایط تنش گرمی و خشکی افزایش یافته و باعث بسته شدن منافذ برای جلوگیری از اتلاف آب بیشتر می‌شود. بسته شدن منافذ باعث کاهش تعرق می‌گردد اما در عین‌حال میزان جذب آب و انتقال مواد معدنی توسط آوندهای چوبی نیز کاهش می‌یابد. بنابراین نبات در شرایط افزایش حرارت برگ به‌واسطه تابش مادون قرمز؛ ناچار است بین حفظ آب و تأمین مواد معدنی تعادل برقرار کند (Pathak *et al.*, 2020).

از این دیدگاه پاسخ نبات به‌تابش فروسرخ حرارتی یک روند پیچیده و چند مرحله‌ای است که هم تحریک فیزیکی تعرق را شامل می‌شود و هم فعال‌سازی مسیرهای بیوکیمیاوی هورمونی را در پی دارد که در نهایت عملکرد آوندهای چوبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Nobel, 2009, pp. 98-99).

**اثر تابش‌های ترموگرافیک در افزایش سرعت و نرخ خشک شدن**

یکی از جنبه‌های یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های فیزیولوژیکی که تحت تأثیر تابش‌های حرارتی و شرایط تنش گرمی قرار می‌گیرد، سرعت و نرخ خشک شدن در نباتات است. این پدیده به‌طور مستقیم با تعرق، باز و بسته شدن منافذ و انتقال

آب در آوندهای چوبی ارتباط دارد. هنگام مواجه شدن نبات با تنش گرمی، افزایش حرارت محیط و به‌خصوص حرارت سطح برگ‌ها موجب افزایش تبخیر و تعرق می‌شود. اگر نبات نتواند به‌میزان کافی از طریق ریشه‌ها آب جذب کند این وضعیت به‌خشکی و کاهش وزن نبات منجر خواهد شد.

تابش فروسرخ حرارتی (TIR) در این میان نقشی دوگانه ایفاء می‌کند. از یک سو افزایش ملایم حرارت به‌واسطه تابش فروسرخ می‌تواند باعث باز شدن بیشتر منافذ و در نتیجه افزایش سرعت تعرق شود که این امر سبب خشک شدن سریع‌تر اندام‌های نباتی می‌گردد (Smigaj *et al.*, 2024) . اما از سوی دیگر اگر این تابش به‌صورت کنترول‌شده و هدفمند به‌کار رود، می‌تواند تعادل میان جذب و دفع آب را برقرار ساخته و از خشکی بیش از حد جلوگیری کند.

مطالعه‌ای که توسط Grant و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده نشان داد که سرعت خشک شدن برگ‌های گندم تحت تأثیر تنش حرارتی به‌شدت تابش فروسرخ وابسته است. آن‌ها دریافتند که در حرارت‌های بالا نرخ خشک شدن به‌دلیل تسریع تعرق افزایش می‌یابد، اما در حضور تابش کنترول‌شده این افزایش به‌شکل تعدیل شده ادامه می‌یابد(Grant *et al.*, 2006, pp. 46–48).

از نظر ساختاری کاهش رطوبت حجروی برگ‌ها به‌واسطه تعرق زیاد فشار تورژسانس را کاهش داده و در نهایت قابلیت ارتجاعی بافت‌های نباتی را از بین می‌برد. این روند باعث بروز خشکی فیزیولوژیکی می‌شود. بنابراین سرعت خشک شدن تحت تأثیر تابش حرارتی نه‌تنها به‌میزان حرارت بلکه به‌وضعیت آبی خاک، کارایی آوندهای چوبی و عملکرد منافذ نیز وابسته است(Pathak *et al.*, 2020).

در تحقیق دیگر کوهن و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از تکنالوژی ترموگرافی نشان دادند که حرارت سطحی برگ می‌تواند به‌عنوان شاخصی قابل اعتماد برای تعیین نرخ تعرق و در نتیجه سرعت خشک شدن نباتات به‌کار رود. بر این اساس

امکان پیش‌بینی خشک شدن سریع نباتات تحت شرایط تنش گرمی با استفاده از تابش‌های فروسرخ فراهم آمده است(Cohen *et al.*, 2005, p. 112).

**اثر تابش‌های ترموگرافیک بر حفظ فعالیت حجرات آوندهای چوبی در شرایط تنش حرارتی**

تابش‌های ترموگرافیک می‌توانند نقش بسیار مهمی در حفظ فعالیت حجرات آوندهای چوبی در شرایط تنش حرارتی ایفاء کنند. در زمانی که نباتات در معرض گرمی زیاد قرار می‌گیرند تعادل آبی آن‌ها به‌هم می‌خورد و حجرات آوندی در معرض آسیب و از بین رفتن ساختار و عملکرد خود قرار می‌گیرند (Pathak *et al.*, 2020).

حرارت هدفمند و تنظیم‌شده که از طریق تابش‌های ترموگرافیک ایجاد می‌شود قادر است با تحریک مسیرهای فیزیولوژیکی خاص از جمله افزایش فعالیت کانال‌های آبی، انتقال آب در آوندها را بهبود بخشیده و از پدیده کاویتیشن جلوگیری کند (Maurel *et al.*, 2008, p. 478).

علاوه بر این این تابش‌ها با القای پاسخ‌های حفاظتی مانند افزایش سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و تنظیم بیان جن‌های مرتبط با بقاء به‌حفظ پایداری غشای حجروی و دیوار آوندی کمک می‌کنند(Mittler, 2002, p. 653). همچنین افزایش کنترول‌شده حرارت سطحی موجب بهبود جریان شیره خام و کاهش انسداد در آوندها می‌شود که در نتیجه فعالیت حجرات انتقالی حتی در شرایط گرمی شدید حفظ می‌گردد(Hsiao & Xu, 2000, pp. 365–366).

**اثر تابش‌های ترموگرافیک در بهبود مکانیزم دفاعی نبات**

تابش‌های ترموگرافیک (Thermographic Radiation) که عمدتاً به‌صورت انرژی فروسرخ حرارتی منتشر می‌شوند، نقش مهمی در تقویت میکانیزم‌های دفاعی نباتات ایفاء می‌کنند. این تابش‌ها با افزایش حرارت موضعی در بافت‌های نباتی، مسیرهای دفاعی فیزیولوژیکی و بیوکیمیاوی را فعال می‌سازند.

یکی از عکس‌العمل‌های اصلی نباتات در برابر تابش‌های ترموگرافیک افزایش تولید ترکیبات فینولی، فلاونوئیدها و انزایم‌های انتی‌اکسیدان مانند کتلاز و

پراکسیداز است که به‌مهار رادیکال‌های آزاد و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و کمک می‌کند (Kumar *et al.*, 2021, p. 114).

از طرفی این تابش‌ها قادر اند بیان جن‌های مرتبط با مقاومت نبات از جمله جن‌های مرتبط با مرض(PR: Pathogenesis-related) ، را تحریک کنند و بدین ترتیب نباتات را در برابر تنش‌های محیطی و غیرمحیطی مقاوم‌تر سازند( Li *et al.*, 2020, p. 89).

علاوه بر این شواهدی وجود دارد که تابش‌های ترموگرافیک می‌توانند تعادل اسمسزی حجرات را حفظ کرده و ساختار غشای حجروی را تقویت نمایند که این امر به‌خصوص در شرایط تنش‌هایی مانند خشکی یا شوری اهمیت فراوان (Ahmed *et al.*, 2022, p. 57).

**اثر تابش گرمی بر آوندهای چوبی**

تابش حرارتی تأثیرات قابل توجه و مهمی بر ساختار و عملکرد آوندهای چوبی (زایلم) در نباتات دارد. آوندهای چوبی مسئول انتقال آب و مواد معدنی از ریشه به سایر قسمت‌های هوایی نبات هستند و در برابر شرایط تنش حرارتی عکس‌العمل‌های فیزیولوژیکی و ساختاری متفاوتی نشان می‌دهند (Pathak *et al.*, 2020). وقتی حرارت بیش از حد افزایش یابد تعرق نبات بیشتر شده و فشار آب در آن کاهش می‌یابد. این وضعیت باعث افزایش کشش در آوندهای چوبی شده و خطر ایجاد کاویتیشن یعنی تشکیل حباب‌های هوا در ستون آب را افزایش می‌دهد که می‌تواند انتقال آب را مختل سازد. ( Choat *et al.*, 2012,p.1696) از طرفی تابش حرارتی در بعضی شرایط می‌تواند فعالیت لیگنین‌سازی در دیوار حجروی آوندها را تحریک کند و موجب افزایش استحکام ساختاری آن‌ها شود. این مکانیسم به خصوص در شرایط تنش حرارتی بلندمدت برای حفظ پایداری و کارایی سیستم انتقال آب بسیار حیاتی است. (Searson *et al.*, 2004,p.109) همچنین شواهد نشان داده‌اند که قرارگرفتن کنترول‌شده آوندهای چوبی در معرض

تابش حرارتی، می‌تواند بیان جن‌های مرتبط با سنتز دیوار حجروی و تنظیم آب نبات را تحریک کرده و به بهبود عملکرد آن‌ها کمک کند (Zhou *et al.*, 2019,p.245). خلاصه تابش حرارتی می‌تواند اثرات مثبت و منفی بر آوندهای چوبی داشته باشد؛ این اثرات بستگی مستقیم به شدت تابش، مدت زمان تابش و توانایی سازگاری نبات دارد.

**اثر تابش‌های ترموگرافیک در کاهش اثرات تنش گرما**

تابش‌های ترموگرافیک توانایی کاهش تأثیرات منفی تنش حرارتی بر نباتات را دارند. تنش گرما باعث اختلال در فعالیت‌های فیزیولوژیکی حیاتی مانند فتوسنتز، تنفس و تنظیم آب نبات می‌شود و در صورت شدت بالا منجر به تخریب پروتئین‌ها، افزایش تولید رادیکل‌های آزاد و آسیب به ساختارهای حجروی می‌گردد (Wahid *et al.*, 2007, P. 214).

تابش‌های ترموگرافیک با تولید حرارت کنترول‌شده و موضعی سیستم‌های دفاعی نبات را فعال ساخته و تحمل حرارتی انساج نباتی را افزایش می‌دهند. این تابش‌ها باعث افزایش بیان جن‌های و تولید پروتئین مربوط به‌شوک حرارتی (HSPs-Heat Shock Proteins) و انزایم‌های انتی‌اکسیدان مانند سوپراکساید دیسموتاز و کتلاز می‌شوند که نقش مهمی در خنثی‌سازی نوع فعال اکسیژن ایفاء می‌کنند (Mittler *et al.*, 2012, P. 569).

علاوه بر این شواهد نشان می‌دهد که استفاده به‌موقع و کنترول‌شده از تابش‌های ترموگرافیک می‌تواند ساختار غشای حجروی را تثبیت نموده و مکانیسم‌های تنظیم اسمسزی را بهبود بخشد که این عوامل در کاهش شدت آسیب‌های ناشی از تنش گرمی بسیار حیاتی هستند (Hasanuzzaman *et al.*, 2013, P. 287).

## نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه می‌توان گفت که تنش حرارتی در تولیدات زراعتی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب اختلالات فزیولوژیکی و کاهش عملکرد نباتات می‌شود. تابش‌های ترموگرافیک (TIR) به‌عنوان روشی مؤثر برای تعدیل اثرات این تنش، می‌توانند جریان آوندهای چوبی را بهبود بخشند و استرس اکسیداتیوو را کاهش دهند. تابش‌های ملایم می‌توانند سیگنال‌های القایی برای سازگاری فراهم کنند و ترکیب آن با تغذیه مناسب می‌تواند مقاومت نباتات را افزایش دهد. این تابش‌ها همچنین عملکرد آوندها را با کاهش فشار تنش اسمسزی و تحریک تولید ترکیبات حفاظتی نظیر آنتی‌اکسیدآن‌ها بهبود می‌بخشند و در شرایط حرارتی بالا، تنش آوندی را کاهش می‌دهند. تنظیم اسمسزی عملکرد آوندها را تضعیف کرده و سرعت خشک شدن نباتات تحت تاثیر تابش TIR قرار دارد. افزایش حرارت محیط باعث تبخیر و کاهش وزن می‌شود؛ اما مدیریت هوشمند TIR می‌تواند تعادل آب و نرخ خشک شدن را تنظیم کند.

بر علاوه تابش‌های فروسرخ حرارتی با طول موج ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، به عنوان حامل گرما، حرارت سطح اجسام را بدون تماس مستقیم افزایش می‌دهند. در مواجهه با این تابش‌ها، حرارت انساج سطحی نبات افزایش یافته و عکس‌العمل‌های ترمودینامیکی و فزیولوژیکی مختلفی آغاز می‌شود. این تغییرات بر انرژی جنبشی مالیکول‌ها، نرخ تعرق، فشار بخار و پاسخ‌های هورمونی تاثیر می‌گذارند. همچنین، افزایش حرارت برگ، سرعت تبخیر را افزایش داده و انتقال انرژی حرارتی را تقویت می‌کند. این تغییرات می‌توانند به‌اختلال در تعادل ترمودینامیکی عکس‌العمل‌های فتوسنتزی و کاهش تولیدات فوتوسنتزی منتهی شوند. محدودیت در تأمین آب از ریشه، تعرق را به سمت تنش آبی سوق می‌دهد و بسته شدن منافذ و کاهش فتوسنتز را به دنبال دارد. کاهش ویسکوزیتی آب در حرارت‌های بالا، جریان آب را تسهیل می‌کند. پاسخ نبات به تابش فروسرخ شامل تنظیم هورمون‌ها و تغییرات در ساختار

پروتئین‌ها است. بناً تابش‌های ترموگرافیک تاثیر مثبتی بر حفظ فعالیت حجرات آوندهای چوبی در تنش حرارتی دارند. با تنظیم حرارت، عملکرد کانال‌های آبی افزایش یافته و کاویتیشن کاهش می‌یابد. همچنین، این تابش‌ها موجب سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و حفظ غشای حجروی می‌شوند و جریان شیره خام را بهبود می‌بخشند، که در نهایت به بقا و رشد نباتات در شرایط گرما کمک می‌کند. تابش حرارتی، به‌خصوص انرژی انفرارد، تاثیرات قابل‌توجهی بر آوندهای چوبی (زایلم) در نباتات دارد. شرایط تنش حرارتی می‌تواند منجر به افزایش تعرق و کاهش فشار آب شده و خطر کاویتیشن را بالا ببرد. همچنین، تابش حرارتی ممکن است لیگنین‌سازی را تحریک کرده و استحکام ساختاری آوندها را افزایش دهد. مدیریت دقیق تابش‌ها می‌تواند مقاومت آوندها را در برابر تنش‌های محیطی تقویت کند. بر علاوه تابش‌های ترموگرافیک تاثیرات تنش گرمای بر نباتات را کاهش داده و موجب فعال‌سازی سیستم‌های دفاعی و افزایش تحمل حرارتی در انساج می‌شوند. این تابش‌ها بیان جن‌های شوک حرارتی و انزایم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش و ساختار غشای حجروی را تثبیت می‌کنند. خلاصه کلام تابش‌های ترموگرافیک) مادون قرمز (با تاثیرگذاری بر خصوصیات فیزیکی آب، تنظیم مکانیسم‌های روزنه‌ای و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌توانند در بهبود انتقال آب و مواد مغذی در آوندهای چوبی نبات تحت تنش گرمای نقش مهمی ایفاء کنند.

## منابع


Ahmed, M., Rehmani, M. I. A., Raza, A., Rehman, A., Shakeel, M., & Qayoom, A. (2022). Thermographic applications in crop stress management. *Agricultural Research Updates, 18*(1), 77–89.

Barua, D., Downs, C. A., Heckathorn, S. A. (2019). Effects of heat stress on plant respiration. *Plant Physiology and Biochemistry*, 140, 227–234.

Brestic, M., & Zivcak, M. (2013). PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in crop plants: protocols and applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(16), 5031–5040.

Choat, B., et al. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491(7426), 752–755.

Cohen, Y., Alchanatis, V., Cohen, Y., Levi, A., Dar, Z., Brikman, R. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56(417), 1843–1852.

Grant, O. M., Chaves, M. M., Jones, H. G. (2006). Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. *Physiologia Plantarum*, 127(3), 507–518.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R., & Fujita, M. (2013). Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 9643-9684.

Hsiao, T. C., & Xu, L. K. (2000). Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: Biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany, 51*(350), 1595–1616. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1595

Hsiao, T.C. and Xu, L.K. (2000) Sensitivity of Growth of Roots versus Leaves to Water Stress: Biophysical Analysis and Relation to Water Transport. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1595-1616. http://dx.doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1595

Jagadish, S. V. K., Murty, M. V. R., & Quick, W. P. (2015). Rice responses to rising temperatures – challenges, perspectives and future directions. *Plant, Cell & Environment*, 38(9), 1686-1698.

Kapilan, R., Vaziri, M., Zwiazek, J. J. (2018). Regulation of aquaporins in plants under stress. *Biological Research*, 51(1), 4.

Kumar, V., Thakur, J. K., & Prasad, M. (2021). Histone acetylation dynamics regulating plant development and stress responses. *Cellular and molecular life sciences : CMLS*, *78*(10), 4467–4486. https://doi.org/10.1007/s00018-021-03794-x

Li, X., et al. (2020). Thermo-induced expression of PR genes and enhanced plant defense. *Plant Molecular Biology Reporter*, 38(4), 456-468.

Maurel, C., Verdoucq, L., Luu, D. T., & Santoni, V. (2008). Plant aquaporins: Membrane channels with multiple integrated functions. *Annual Review of Plant Biology, 59*(1), 595–624. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092734

Merlot, S., Mustilli, A. C., Genty, B., North, H., Lefebvre, V., Sotta, B.,.. .. & Giraudat, J. (2002). Use of infrared thermal imaging to isolate Arabidopsis mutants defective in stomatal regulation. *The Plant Journal*, 30(5), 601-609.

Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Van Breusegem, F. (2012). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science, 9*(10), 490–498. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.08.009

Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). Principles of Environmental Physics: Plants, *Animals, and the Atmosphere* (4th ed.). Academic Press.

Nobel, P. S. (2009). Physicochemical and Environmental Plant Physiology (4th ed.). Academic Press.

Carins-Murphy, M. R., Cochard, H., Deans, R. M., Gracie, A. J., & Brodribb, T. J. (2023). Combined heat and water stress leads to local xylem failure and tissue damage in pyrethrum flowers. *Plant Physiology*, *193*(1), 356-370. https://doi.org/10.1093/plphys/kiad349

Khan, A. A., Wang, Y.-F., Akbar, R., & Alhoqail, W. A. (2025). Mechanistic insights and future perspectives of drought stress management in staple crops. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1-20. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1547452

Mertens, S., Verbraeken, L., Sprenger, H., De Meyer, S., Demuynck, K., Cannoot, B., Merchie, J., De Block, J., Vogel, J. T., Bruce, W., Nelissen, H., Maere, S., Inzé, D., & Wuyts, N. (2023).

Monitoring of drought stress and transpiration rate using proximal thermal and hyperspectral imaging in an indoor automated plant phenotyping platform. *Plant Methods*, *19*(1), 132. https://doi.org/10.1186/s13007-023-01102-1

Pathak, J., Ahmed, H., Kumari, N., Pandey, A., Rajneesh, & Sinha, R. P. (2020). Role of Calcium and Potassium in Amelioration of Environmental Stress in Plants. In *Protective Chemical Agents in the Amelioration of Plant Abiotic Stress* (pp. 535-562). https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119552154.ch27

Pignon, C. P., Fernandes, S. B., Valluru, R., Bandillo, N., Lozano, R., Buckler, E., Gore, M. A., Long, S. P., Brown, P. J., & Leakey, A. D. B. (2021). Phenotyping stomatal closure by thermal imaging for GWAS and TWAS of water use efficiency-related genes. *Plant Physiol*, *187*(4), 2544-2562. https://doi.org/10.1093/plphys/kiab395

Smigaj, M., Agarwal, A., Bartholomeus, H., Decuyper, M., Elsherif, A., de Jonge, A., & Kooistra, L. (2024). Thermal Infrared Remote Sensing of Stress Responses in Forest Environments: a Review of Developments, Challenges, and Opportunities. *Current Forestry Reports*, *10*(1), 56-76. https://doi.org/10.1007/s40725-023-00207-z

Searson, M. J.,(2004). The influence of heat on lignin biosynthesis. *Tree Physiology*, 24(12), 1235–1242.

Vandegeer, R. K., Miller, R. E., Bain, M., Gleadow, R. M. (2014). Drought reduces the transfer of recently fixed plant carbon to soil microbes. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 76–84.

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199-223.

Zhou, J., Wang, X., He, Y., Sang, T., Wang, P., Dai, S., Zhang, S. (2018). Combined drought and heat stress in rice: physiological and transcriptomic analyses. *Plant Physiology*, 178(2), 749–764.

Zhou, Y (2019). Heat-induced transcriptional changes in xylem cell wall biosynthesis. *Plant Molecular Biology*, 101(3), 231–245.

# The Effect of Thermal Infrared Radiation (TIR) on the Enhancement of Water and Solute Transport in Xylem Vessels under Heat Stress Conditions

**Saboor KhairMohammadzada[1]*, Noor Mohammad Kakar[2], Muslim Halimi[3]**

[1],[2]Department of Agronomy, Faculty of Agriculture,
[3]Department of Chemistry, Faculty of Education, Farah University

**Email**: Saboorkmz4@gmail.com

## Abstract

Heat stress is one of the most critical limiting factors for plant growth, leading to reduced water uptake and transport capacity, increased transpiration, and enhanced production of reactive oxygen species (ROS). These factors collectively disrupt plant metabolism and ultimately reduce yield performance. TIR contributes to alleviating these challenges by reducing water surface tension, increasing molecular mobility, and decreasing hydraulic resistance in the xylem, thereby enhancing water flow and preventing cavitation. Furthermore, TIR influences stomatal regulation by facilitating the opening and closing of stomata, which results in improved water use efficiency and a better balance between transpiration and water uptake. Additionally, TIR has been found to enhance the activity of antioxidant enzymes, thus reducing oxidative stress induced by high temperature. Empirical studies on various crops such as wheat, rice, and maize have demonstrated that TIR can play a vital role in enhancing plant tolerance to heat stress. However, there remain challenges such as the high cost of equipment and the need for further research to optimize the implementation of this technology. This review article explores the latest scientific findings and highlights the importance of TIR in improving plant resilience to thermal stress.

**Keywords:** Xylem vessels, thermographic radiation, thermal infrared radiation (TIR), heat stress, plants