



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## کاربرد ترموگرافی در مهندسی کشاورزی

نویسندگان

پدرام شعاع<sup>۱\*</sup>، عباس همت<sup>۲</sup>، رسول امیر فتاحی<sup>۳</sup>

۱-۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه

صنعتی اصفهان، اصفهان ۸۳۱۱۱-۸۵۱۵۶

۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

ایمیل مکاتبه کننده: pedramshoa@gmail.com

### چکیده

ترموگرافی یک روش غیر مخرب و همچنین غیر تماسی در اندازه‌گیری دمای سطح می‌باشد. این روش دارای مزایایی از قبیل ارایه تصویر دمایی بوده که استخراج دمای میانگین قسمت مورد نظر را ممکن می‌سازد. اساس کار این نوع دوربین‌ها بر اندازه‌گیری انرژی فروسرخ گرمایی ساطع شده از اجسام با دمای بالاتر از صفر کلوین می‌باشد. استفاده از ترموگرافی به دو صورت فعال با برهم زدن تعادل دمایی سطح با یک منبع گرمایی تابشی و غیر فعال با اندازه‌گیری دمای سطح در شرایط تعادل صورت می‌پذیرد. از موارد استفاده‌ی ترموگرافی در کشاورزی می‌توان به تخمین تنش آبی گیاه، تشخیص بیماری‌های گیاهی، تخمین عملکرد درخت، شناسایی آسیب‌های داخلی و دیگر موارد اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: ترموگرافی، کشاورزی، غیر تماسی

### مقدمه

ترموگرافی فرو سرخ یک روش تشخیصی دو بعدی، غیر تماسی و غیر مخرب برای اندازه‌گیری دمای سطح اجسام است (گیورلثو و میولا، ۲۰۰۲). استفاده از این روش به پنجاه سال پیش بر می‌گردد که در آن زمان از وسایلی با حساسیت بسیار پایین برای مراقبت و دید در شب، توسط ارتش آمریکا، مورد استفاده قرار می‌گرفت (ان جی، ۲۰۰۹). امروزه با گسترش علم، امکان ارایه تصاویر دیجیتال ترموگرافی با کیفیت بسیار بالا فراهم شده است که استفاده از این روش غیر مخرب را در زمینه‌های مختلف، میسر می‌سازد. از آنجایی که این روش دارای دقت دمایی و مکانی بسیار



بالا (نسبت به دیگر روش‌های نقطه‌ای مانند ترموکوپل و ترمیستور) و همچنین قابلیت جابجایی و عکس‌برداری بلادرنگ در عملیات مختلف می‌باشد، در عرصه‌های فضایی، مهندسی عمران، کشاورزی، پزشکی و دامپزشکی مورد استفاده گسترده‌ای قرار گرفته‌است (گون و همکاران، ۲۰۱۰). از کاربردهای این علم در بخش کشاورزی می‌توان به پیش‌بینی تنش‌های آبی در گیاه (کوهن و همکاران، ۲۰۰۵)، برنامه‌ریزی زمان بندی آبیاری (جونز، ۲۰۰۴)، بررسی بیماری‌های گیاهی (ماهلین و همکاران، ۲۰۱۲)، پیش‌بینی عملکرد و رسیدگی محصول (استانکو و همکاران، ۲۰۰۴)، بررسی صدمات داخلی در میوه‌ها و سبزیجات (واریت و همکاران، ۲۰۰۳) و بررسی اجزای خارجی در مواد غذایی (جینسو و همکاران، ۲۰۰۴) اشاره کرد.

بر اساس قانون تشعشعات پلانک و قانون جابجایی وینز هر جسمی که در دمایی بالاتر از صفر کلوین باشد از خود تشعشعاتی ساطع می‌کند که شدت و طول موج آن به دمای جسم مربوط می‌شود (فوشز و تانر، ۱۹۹۶). این تشعشعات در طیف طول موج ۰/۷۵ تا ۱۰۰ میکرومتر از طیف کلی امواج الکترومغناطیس قرار داشته و به زیرشاخه‌های: فروسرخ نزدیک (۰/۷۵ تا ۲/۵ میکرومتر)، فروسرخ کوتاه (۱/۴ تا ۳ میکرومتر)، فروسرخ میانه (۳ تا ۸ میکرومتر)، فروسرخ بلند (۸ تا ۱۵ میکرومتر) و فروسرخ دور (۱۵ تا ۱۰۰ میکرومتر) تقسیم بندی می‌شود. عکسبرداری ترموگرافی در طول موج بین فروسرخ کوتاه و بلند انجام می‌گیرد. عکس برداری در ناحیه‌ی فروسرخ نزدیک هم وجود دارد ولی مربوط به امواج انعکاسی و عبوری از جسم می‌باشد و نه امواج ساطع شده به دلیل سطح انرژی گرمایی جسم (گون و همکاران، ۲۰۱۰).

در همه‌ی اکوسیستم‌ها، دانسیته‌ی شار انرژی در طول موجی حدود ۱۰ میکرومتر بیشترین شدت (پیک) را دارد. این طول موج با سنسورهای باند فروسرخ گرمایی که در طیف الکترومغناطیسی ۷ تا ۱۴ میکرومتر حساس هستند، قابل شناسایی می‌باشد (فوشز، ۱۹۹۰).

انرژی ساطع شده (I) توسط قانون توزیع انرژی پلانک در هر طول موج ( $\lambda$  برحسب متر) و دما (T برحسب کلوین) بر حسب ژول بر متر مربع بیان می‌گردد:

$$I(\lambda, T) = \left( \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \right) (e^{hc/k\lambda T} - 1)^{-1} \quad (1)$$

در این معادله h ثابت پلانک بر حسب ژول بر ثانیه، c سرعت نور بر حسب متر بر ثانیه و k ثابت بولتزمن بر حسب ژول بر کلوین می‌باشد.

انرژی ساطع شده از یک جسم در واحد سطح با انتگرال‌گیری از رابطه بالا روی دامنه‌ی طول موج‌های صفر تا بی-نهایت بدست می‌آید:



$$I_T = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda \quad (2)$$

$$I_T = \int_0^{\infty} \left( \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \right) (e^{hc/\lambda T} - 1)^{-1} d\lambda \quad (3)$$

$$L_{emitted} = I_T = \left[ \frac{(2\pi^5 k^4)}{(15c^2 h^3)} \right] J \times T^4 = \sigma T_{bb}^4 \quad (4)$$

با توجه به رابطه بالا، قانون استفان بولتزمن بدست می‌آید. عبارت داخل کروشه، یک مقدار ثابت بوده و به ثابت استفان بولتزمن مشهور است. این رابطه برای جسم سیاه ایده‌آل مناسب است در حالیکه برای جسم واقعی ضریب انتشار نیز باید وارد گردد (راکونن و جوکلا، ۲۰۰۳). بنابراین بر اساس قانون استفان بولتزمن میزان کل دانسیته‌ی شار انرژی تشعشعاتی خروجی از یک سیستم بر حسب وات بر مترمربع تابعی از دمای آن می‌باشد و ادامه رابطه ۴:

$$L_{emitted} = I_T = \sigma T_{bb}^4 = \varepsilon \sigma T_s^4$$

در این معادله،  $L_{emitted}$  میزان انرژی ساطع شده توسط سیستم بر حسب وات بر متر مربع،  $T_{bb}$  دمای جسم سیاه،  $T_s$  دمای سطح سیستم مورد نظر،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن بوده و مقدار آن برابر با  $(5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{k}^{-4})$  و  $\varepsilon$  ضریب گسیلمندی کلی سیستم بوده که بدون واحد است.

جسم سیاه یک جسم ایده‌آل در جذب تمام انرژی تابشی ورودی بوده و در ضمن این جسم فرضی دارای بهترین وضعیت گسیل نمودن انرژی تشعشعاتی نیز می‌باشد. دمای جسم سیاه در رابطه (۴)، بیانگر دمای یک جسم سیاه با گسیل دانسیته‌ی شار انرژی تشعشعاتی برابر با سیستم مورد نظر است (نورمن و بکر، ۱۹۹۵). در اصل، هیچ گاه سیستم مورد نظر یک جسم ایده‌آل (جسم سیاه) نیست و ضریب گسیلمندی میزان نزدیکی جسم به یک جسم سیاه را بیان می‌کند و به صورت فیزیکی برابر با نسبت انرژی طول موج بلند ساطع شده از یک جسم در یک دمای مشخص به انرژی ساطع شده از جسم سیاه در همان دما است. ضریب گسیلمندی از صفر تا یک متغیر می‌باشد. در واقع جسم سیاه و سفید یک تقریب فرضی می‌باشد. ضریب انتشار در گیاهان و میوه‌ها بسیار بالا بوده و در حدود ۰/۹۱ تا ۰/۹۷ می‌باشد. برای خاک این مقدار بین ۰/۹۴ و ۰/۹۵ و برای ماسه نیز ۰/۸۹ است (جونز و همکاران، ۲۰۰۳).

در عمل اجسام امواج را بسته به طول موج و زاویه برخوردشان با نمونه، بازتاب، جذب و از خود گذر می‌دهند. این پدیده از قانون پایداری انرژی تبعیت می‌کند و جمع درصد پرتوهای بازتابش شده، جذب شده و عبوری برابر یک است. پس پرتوهایی که به آشکار ساز برخورد می‌کنند ممکن است ترکیبی از پرتوهای بازتابی یا پرتو ساطع شده از جسم باشند. در این میان دمای محیط اطراف و تغییرات در رطوبت محیط، امواج رسیده به آشکارساز را تحت تاثیر قرار می‌دهد (کاستا و همکاران، ۲۰۱۳). اکوسیستم اطراف ما جسم سیاه ایده‌آل نیست و این بدین معناست که



مقداری از انرژی طول موج بلند (فروسرخ حرارتی) ورودی از محیط را بازتاب می‌کند. بنا به قانون تشعشعات گرمایی کیرشهف میزان گسیل نمودن برابر است با میزان جذب در طول موج بلند و به همین دلیل میزان انرژی بازتاب شده برابر است با:

$$L_{reflected} = (1 - \varepsilon)L_{in} = (1 - \varepsilon)\sigma T_{bg}^4 \quad (5)$$

$L_{in}$  برابر با تابش طول موج بلند ورودی به سیستم بوده و  $L_{reflected}$  برابر با انرژی بازتاب شده توسط سیستم است. میزان کل تشعشعات طول موج بلند خروجی از یک سیستم و یا به عبارت دیگر تشعشعاتی که به سنسور فرسرخ حرارتی برخورد می‌کند ( $L_{out}$ ) مخلوطی از انرژی‌های ساطع و بازتاب شده است:

$$L_{out} = L_{emitted} + L_{reflected} = \varepsilon\sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon)L_{in} = \sigma T_{br}^4 \quad (6)$$

با توجه به قانون استفان بولتزمن (رابطه‌ی ۴) می‌توان رابطه‌ی ۶ را بصورت زیر نشان داد:

$$T_{br}^4 = \varepsilon T_s^4 + (1 - \varepsilon)T_{bg}^4 \quad (7)$$

که در آن  $T_{bg}$  دمای پس زمینه و  $T_{br}$  دمای تابشی بوده و کمی با  $T_{bb}$  فرق می‌کند. زیرا دمای جسم سیاهی است که به اندازه‌ی سیستم مورد نظر تشعشع دارد و  $T_{br}$  دمایی است که سنسور فرسرخ حرارتی به ما نشان می‌دهد و برابر تشعشع و همچنین بازتاب سیستم است.  $T_{bb}$  تنها یک کمیت تئوری بوده و هیچگاه نمی‌توان آن را اندازه‌گیری نمود (جونز و همکاران، ۲۰۰۹).

## مواد و روش‌ها

وسایلی که دمای سطح را، با روش استفاده از امواج فرسرخ، اندازه‌گیری می‌کنند به دو دسته‌ی تصویر بردار و غیر تصویر بردار تقسیم می‌شوند. آن دسته که قابلیت تصویربرداری را ندارند، به آنها ترمومتر فرسرخ گفته می‌شود و به دو دسته‌ی قابل حمل یا تفنگ دمایی و سنسورهای استوانه‌ای غیر قابل حمل، که دمایی یک قسمت خاص را اندازه‌گیری می‌کند و به یک داده بردار نیز متصل شوند، تقسیم می‌شود. آنها دمایی تابشی یک بخش موجود در میدان دید خود را ارائه می‌دهند. آنها سریع، ارزان و نیازی به منبع توان خروجی ندارند. عیب اساسی این گونه وسایل این است که دمایی تابشی ( $T_{br}$ ) را ارائه می‌دهند که این دمایی تابشی نیز مخلوطی از دمایی تابشی سطح و پس زمینه می‌باشد. این اختلاط، استخراج دمایی سطح مورد نظر را بسیار سخت و خطای تخمین را بالا می‌برد (جکسون و همکاران، ۱۹۸۱؛ موران و همکاران، ۱۹۹۴). به وسایلی که دما را بصورت تصویر ارائه می‌کنند دوربین ترموگرافی گفته می‌شود. آنها از فناوری سنسورهای میکرو بلومتر استفاده می‌کنند. ولی آنها بسیار حساس می‌باشند و اگر چه در سال‌های اخیر با کاهش قیمت روبرو بوده اند ولی هنوز قیمت بالایی داشته و امکان نصب در هر مکانی مانند مزرعه را ندارند. ولی این



دوربین‌ها بسیار دقیق بوده و قابلیت ارائه دمای دقیق سطح ( $T_s$ )، بجای دمای تابشی ( $T_{br}$ )، را دارند. با توجه به رابطه-  
۷ می‌توان دریافت که برای محاسبه‌ی دمای سطح باید دمای پس زمینه و ضریب گسیلمندی را بدست آورد (جونز  
و همکاران، ۲۰۰۳؛ ماییز و استپ، ۲۰۱۲).

یک دوربین ترموگرافی از سامانه‌ی نوری (که شامل لنزهای متمرکز کننده، لنزهای وضوح و فیلترها می‌باشد)، آرایه‌ی  
آشکارسازها و سیستم پردازش سیگنال تشکیل می‌شود. در دوربین ترموگرافی، انرژی ساطع شده توسط آشکارسازها  
به یک سیگنال الکتریکی تبدیل شده و بصورت تصاویر خاکستری (سیاه و سفید) و یا رنگی ساختگی قابل مشاهده  
می‌شود (میولا و کارلوماگنو، ۲۰۰۴).

تصویر برداری گرمایی به دو روش فعال و غیر فعال صورت می‌گیرد. ترموگرافی غیر فعال به بررسی دمای هر سطح  
تحت شرایط محیطی اطلاق می‌شود، ولی در روش فعال از یک سامانه‌ی انتقال انرژی گرمایی برای برهم زدن تعادل  
دمایی استفاده می‌شود. سه روش عمده برای انتقال گرما به نمونه وجود دارد (گوان و همکاران، ۲۰۱۰).

روش اول، روش ترموگرافی حصری یا فازی نامیده می‌شود. در این روش موج گرمایی سینوسی توسط لامپ‌های  
هالوژن به سمت جسم مورد نظر ارسال می‌شود که به آن تحریک نوری گفته می‌شود. این فرآیند بوسیله امواج  
فراصوت نیز امکان پذیر است. عمق فرو رفتن این امواج به فرکانس آنها بستگی دارد. آنالیز فوریه برای بررسی  
اختلاف فاز بین منبع انتقال انرژی و دمای نمونه در حوزه‌ی فرکانس انجام می‌شود از این روش برای بررسی آسیب-  
های داخلی سیب استفاده شده است (بارانوسکی و همکاران، ۲۰۱۲).

روش دوم انتقال گرما، ترموگرافی پالسی نامیده می‌شود. در این روش از لامپ‌های فلاشر و لیزر برای شکستن تعادل  
حرارتی استفاده می‌شود. در این بین عکس‌برداری سریالی جهت تفسیر خصوصیات نمونه انجام می‌گیرد (گوان و  
همکاران، ۲۰۱۰).

روش سوم که تلفیقی از روش اول و دوم است روش ترموگرافی پالسی فازی نام دارد. این بدین منظور است که امواج  
سینوسی بصورت پالسی به نمونه برخورد می‌کند و مانند روش دوم از عکس‌برداری سریالی و تبدیل فوریه برای  
تحلیل شرایط نمونه استفاده می‌شود (مالداگو و همکاران، ۲۰۰۲).

روش چهارم که به روش ویبرو ترموگرافی معروف است، از امواج آکوستیکی برای تولید گرما در نمونه استفاده می-  
شود. از این روش غیر مخرب در صنعت برای پیدا کردن ترک‌های قطعات فولادی استفاده می‌شود. مزیت این روش  
در گرم نشدن کل نمونه است که این امر باعث بوجود آمدن تضاد دمایی بیشتری میان قسمت آسیب دیده و قسمت  
سالم نمونه خواهد شد (مونتانی و فرانی، ۲۰۱۳).



تصاویر گرمایی استفاده‌های زیادی در کشاورزی دارد. ارزیابی قدرت جوانه زنی، تخمین تنش آبی گیاه و مدیریت آبیاری، تشخیص بیماری‌های گیاهی، تخمین میزان محصول درختان میوه، درجه‌ی رسیدگی و آسیب‌های داخلی محصولات، بررسی عملکرد خشک‌کن‌ها و تشخیص موارد ناخواسته در خط تولید صنایع غذایی از استفاده‌های این روش در کشاورزی بوده که تا کنون شناخته شده است. در ذیل برخی از این موارد مورد بررسی قرار می‌گیرد (لی و همکاران، ۲۰۱۰).

### تخمین تنش آبی گیاه

روش‌هایی از جمله پتانسیل آب در برگ یا خاک، محتوای نسبی آب برگ، هدایت روزنه‌ای و غیره، شاخص‌هایی از تنش هستند که از میان آن‌ها دقیق‌ترین شاخص، هدایت روزنه‌ای می‌باشد. از مشکلات این روش‌ها می‌توان به عدم امکان نمونه‌گیری کافی برای دستیابی به وضعیت کلی گیاه به دلیل زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، نیاز به تعدادی نیروی کارگری تعلیم داده شده، دستگاه برای اندازه‌گیری در سطح مزرعه و همچنین ایجاد خطا با دخالت در فعالیت برگ هنگام آزمایش (از قبیل بریدن یا نگهداری برگ میان دو گیره) نام برد (جونز، ۲۰۰۴).

با کمبود آب در منطقه ریشه، گیاه برای از دست ندادن رطوبت خود از طریق تعرق، اقدام به بستن روزنه‌های برگ‌های خود نموده که این امر موجب جلوگیری از اتلاف انرژی ورودی به برگ از طریق تابش خورشیدی می‌شود. عدم اتلاف انرژی از طریق تعرق موجب افزایش دمای برگ خواهد شد. بنابراین دمای برگ یا کانوپی شاخصی از هدایت روزنه‌ای و یا وضعیت آبی گیاه می‌باشد. با گسترش روز به روز فناوری و امکان استخراج دما به روش‌های غیر تماسی (عدم دخالت در فعالیت برگ) و همچنین امکان استحصال تصاویر دمایی (ترموگرافی) از کانوپی که بدست آوردن دمای تک تک نقاط کانوپی را امکان‌پذیر می‌سازد (شکل ۱)، و به دنبال آن استفاده از تحلیل خودکار کامپیوتری، ایده پایش وضعیت آبی گیاه، با استفاده از سنجش از دور (زمین مینا، هواپیما یا ماهواره مینا) دمای کانوپی گیاه، روشی بسیار کارآمد جلوه می‌کند (جکسون و همکاران، ۱۹۸۱؛ جونز و همکاران، ۲۰۰۹).



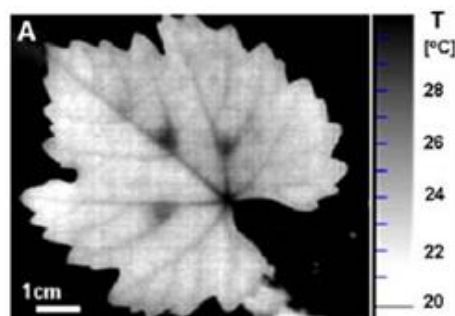
شکل ۱: استخراج دمای برگ از تصاویر ترموگرافی (پو و همکاران، ۲۰۱۴)



بسیاری از فرآیندهای تغییر شکل جرم و انرژی در طبیعت باعث تغییر در دمای سطح اعضای درگیر در این فرآیند می‌شود. مثال بارز آن در کشاورزی، ارتباط بین خاک، گیاه و اتمسفر است. با حرکت آب از خاک به داخل بافت‌های گیاه و سپس به اتمسفر و حتی حرکات چرخشی هوا در این سامانه باعث تغییر در دمای سطح خاک و گیاه می‌شود. بررسی این موارد به فهم میزان تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه کمک می‌کند (فدوروف و همکاران، ۲۰۱۰).

### تشخیص بیماری‌های گیاهی

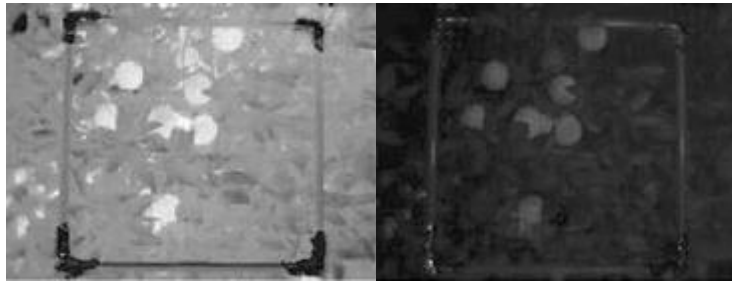
بیماری با حمله به سطح برگ، قصد داخل شدن به اندام‌های داخلی برگ، از طریق عبور از روزنه‌ها دارد. در این هنگام برگ نیز برای مقابله با این خطر روزنه‌های خود را بسته و اجازه‌ی ورود به بیماری را نمی‌دهد. در نتیجه هدایت روزنه‌ای و تعرق برگ کاهش یافته و دمای برگ افزایش می‌یابد. طبق گزارشات در شرایط بدون تنش آبی، برگ‌های آلوده شده انگور، دمای بالاتری را نسبت به برگ‌های سالم داشتند (شکل ۲) (استول و همکاران، ۲۰۰۸). برخی دیگر از بیماری‌ها با شکافتن دیواره‌ی سلول از خارج برگ و مرطوب شدن سطح برگ دمای قسمت‌های جزیی از برگ را کاهش می‌دهد. البته پس از خشک شدن این قسمت‌ها، بدلیل عدم تعرق دمای بالاتری را نشان می‌دهند (اورک و همکاران، ۲۰۰۶).



شکل ۲: تشخیص بیماری در برگ انگور با استفاده از تصویر ترموگرافی خاکستری، نقاط تیره روی برگ مناطق آلودگی دستی می‌باشند، با توجه با مقیاس سمت راست تصویر نقاط خاکستری دمای بیشتری را نسبت به کل برگ دارند (استول و همکاران، ۲۰۰۸)

### تخمین میزان عملکرد درختان

اساس تخمین عملکرد درخت با استفاده از پردازش تصویر، استخراج میوه‌ها از تصویر شامل کانوپی می‌باشد. پژوهشگران دریافته‌اند که دمای مرکبات در یک کانوپی در طول شب ۱/۶ درجه سانتیگراد و در طول روز ۰/۶ درجه گرمتر از برگ‌های اطراف آن خواهد بود (شکل ۳) (بولانون و همکاران، ۲۰۰۸).

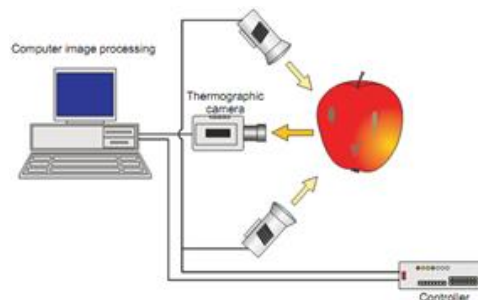


شکل ۳: استخراج میوه از کانوپی، تفاوت دمای میوه و برگ‌ها در دو زمان متفاوت آشکار است، تصویر راست: ساعت ۱۸

تصویر چپ: ساعت ۲۰ (بولانون و همکاران، ۲۰۰۸)

### آسیب‌های داخلی محصولات کشاورزی

محصولات با آسیب‌های داخلی به دلیل تاثیر روی انبار مانی محصولات سالم و همچنین کاهش بازارپسندی می‌بایست شناسایی و از بار جدا گردند. محققین با استفاده از روش ترموگرافی پالسی فازی آسیب‌های داخلی سیب را تشخیص دادند (شکل ۴). آن‌ها نقاط آسیب دیده را حدود ۱ درجه سردتر از بقیه قسمت‌ها گزارش نمودند (بارانوسکی و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۴: استفاده از روش ترموگرافی پالسی فازی برای تشخیص آسیب داخلی در سیب (بارانوسکی و همکاران، ۲۰۰۹)

### نتیجه‌گیری

غیر تماسی و غیر مخرب بودن ترموگرافی، مزایایی بوده که استفاده از این روش را در بررسی وضعیت گیاه و یا محصولات کشاورزی کارآمد ساخته است. بطور کلی، دما بیانگر وضعیت انرژی درونی هر جسم بوده که اندازه‌گیری آن در حالت تعادلی جسم و یا در حالت گذار بیانگر خصوصیات جسم خواهد بود. بعلاوه اندازه‌گیری دما به روش تابشی خصوصیات طیفی، از قبیل گسیلمندی را نیز آشکار می‌سازد. از این روش میتوان در کنترل کیفیت محصولات و همچنین کنترل وضعیت گیاهان در حال رشد نیز استفاده نمود.

### منابع و مأخذ

1. Baranowski, P., W. Mazurek, B. W. Walczak, & C. Sławiński. 2009. Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography. *Postharvest Biology and Technology*. Vol 53(3), 91–100.





2. Baranowski, p., W. Mazurek, J. Wozniak & U. Majewska. 2012. Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging. *Journal of Food Engineering*. Vol (110), 345–355.
3. Bulanon, D. M., Burks, T. F., & Alchanatis, V. 2008. Study on temporal variation in citrus canopy using thermal imaging for citrus fruit detection. *Biosystems Engineering*. Vol 101(2), 161–171.
4. Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., & Tsipris, J. 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*. Vol 56, 1843–1852.
5. Costa, J. M., O. M. Grant, M. M. Chaves. 2013. Thermography to explore plant–environment interactions. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 64 (13), 3937–3949.
6. Fedoroff, N., D. Battisti, R. Beachy. 2010. Radically rethinking agriculture for the 21st century. *Science*. Vol 327 (5967), 833–834.
7. Fuchs, M. 1990. Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water-stress. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol 42, 253–261.
8. Fuchs, M. Tanner, C.B. 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy Journal*. Vol 58, 597–601.
9. Ginesu, G., Giusto, D., Ma " rgner, V., & Meinschmidt, P. 2004. Detection of foreign bodies in food by thermal image processing *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol 51, 480–490.
10. Giorleo, G., & Meola, C. 2002. Comparison between pulsed and modulated thermography in glass epoxy laminates. *NDT & E International*. Vol 35(5), 287–292.
11. Gowen, A. A., B. K. Tiwari., P. J. Cullen, K. Mcdonell & C. P., Odonnell. 2010. Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment. *Trends in Food Science and Technology*. Vol 21, 190–200.
12. Jackson, R.D. Idso, S.B. Reginato, R.J. & Pinter, P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resources Research*. Vol 17, 1133–1138.
13. Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*. Vol 55, 2427–2436.
14. Jones, H.G. Archer, N. Rotenberg, E. Casa, R. 2003. Radiation measurement for plant eco-physiology. *Journal of Experimental Botany*. Vol 54, 879–889.
15. Jones, H.G. Serraj, R. Loveys, B.R. Xiong, L.Z. Wheaton, A. Price, AH. 2009. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*. Vol 36, 978–989.
16. Lee, W., V. Alchanatis., C. Yang, M. Hirafuji, D. Moshou, L. Li. 2010. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol 74, 2–33.
17. Maes, W. H. and K. Steppe. 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*. Vol 63, 4671–4712.
18. Mahlein, A. K., oerke, E. C. steiner, U. dehne, H. W. 2012. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*. Vol 133, 197–209.
19. Maldague, X., Galmiche, F., & Ziadi, A. 2002. Advances in pulsed phase thermography. *Infrared Physics & Technology*, Vol 43(35), 175–181.
20. Meola, C., & Carlomagno, G. M. 2004. Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*. Vol 15(9), 27–58.



21. Montanini, R. & frani, F. 2013. Correlation between vibrational mode shapes and viscoelastic heat generation in vibrothermography. *NDT&E International*. Vol 58, 43–48.
22. Moran, M.S. Clarke, T.R. Inoue, Y. Vidal, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. Vol 49, 246–263.
23. Ng, E. Y.-K. 2009. A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. *International Journal of Thermal Science*. Vol 48. 849-859.
24. Norman, J.M. Becker, F. 1995. Terminology in thermal infrared remote-sensing of natural surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol 77, 153–166.
25. Oerke, E.C. Steiner, U. Dehne, H.W. & Lindenthal, M. 2006. Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *Journal of Experimental Botany*. Vol 57, 2121–2132.
26. Pou, A., M.P. Diago, H. Medrano, J. Baluja and J. Tardaguila. 2014. Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agricultural water management*. Vol 134, 60-72.
27. Rahkonen, J., & Jokela, H. 2003. Infrared radiometry for measuring plant leaf temperature during thermal weed control treatment. *Biosystems Engineering*. Vol 86(3), 257-266.
28. Stajnko, D., Lakota, M., & Hocevar, M. 2004. Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol 42(1), 31-42.
29. Stoll, M., Schultz, H. R., & Loehnertz, B. B. 2008. Exploring the sensitivity of thermal imaging for *Plasmopara viticola* pathogen detection in grapevines under different water status. *Functional Plant Biology*, Vol 35(4), 281–288.
30. Varith, J., Hyde, G.M., Baritelle, A.L., Fellman, J.K., & Sattabongkot, T. 2003. Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Vol 4(2), 211–218.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## Applications of thermography in agricultural engineering

### Abstract

Thermography is a non-contact and nondestructive approach toward surface temperature measurement. Thermal images could provide the ability of extracting average temperature of the region of interest. This approach is based on the measurement of thermal infrared energy flux, emitted by an object with a temperature higher than kelvins zero point. Active thermography is a method measuring surface temperature while an energy source disturbing surface energy equilibrium, but passive thermography is measuring surface temperature with its own environmental conditions. Thermography could be applicable in agricultural sectors such as crop water stress estimation, plant disease detection, orchard yield estimation, and bruise detection.

**Keywords:** Thermography, Agriculture, Non-contact.