Journal of Nondestructive Testing Technology
Online ISSN: 2676-6655
Doi: 10.30494/JNDT.2023.386331.1111

# Exploring the Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Assessing Plant Seed Viability

**Sima Azadmanesh**[1]✉ | **Cobra Moslemkhany**[2]

1. Department of Plant Protection, Faculty of Agricultural Sciences and Food Industries, Science & Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran E-mail: azadmanesh.sima@ut.ac.ir
2. Seed and Plant Certification and Registration Institute (SPCRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

**Article Information:**
**Research Article**
Received 21 January 2023
Revised 14 February 2023
Accepted 20 Feb. 2023
**Keywords:**
imaging and spectroscopic techniques,
Non-destructive Testing,
seed viability.

**ABSTRACT**

During the past decades, imaging and spectroscopic techniques with wide applications have rapidly developed for determining the quality of agricultural products in a non-destructive manner. As a synergy between spectroscopy and imaging technologies, spectral imaging methods have emerged to deal with quality assessment problems along with ideas with effective and practical applications to food and agriculture industries. Agricultural commercialization has prompted the need to determine the quality of agricultural inputs, especially seeds, in order to optimize production and increase economic returns. Seed viability is a critical consideration to ensure high yields. Most of the time, farmers suffer losses after a significant percentage of seeds fail to germinate after planting. Seed viability is very important in the quality characteristics of seeds that reflect the potential of seed germination, and it is necessary to have a quick and effective method to determine the quality and state of germination and seed viability prior to cultivation and sale and during planting. Some research based on spectrum and/or image processing and analysis have been investigated to verify the external and internal quality of seed types. Spectroscopy is used to examine and measure the spectra produced by the interaction of matter with electromagnetic radiation or the radiation emitted from it, and the near-infrared (NIR) technique is one of these techniques for non-destructive tests of samples. Hyperspectral and multispectral imaging is another non-destructive technique that is used to obtain spectral and spatial information about materials, including seeds. The use of Raman spectroscopy is an alternative non-destructive method that is used to check seed viability with non-destructive laser radiation. Thermal imaging is a technique for converting the invisible radiation pattern of an object into visible images and extracting and analyzing the properties of the material without any contact. And finally, the use of electromagnetic waves with different wavelengths from 1 to 100 nm and energy of approximately 0.12 to 12-kilo electron volts. The low power penetration of these waves and their ability to detect internal changes in density makes soft X-rays suitable for use in evaluating agricultural products. This article refers to the comparative introduction and application of emerging techniques in the study of seed viability, including the near-infrared spectroscopy, hyperspectral and multispectral imaging, Raman spectroscopy, infrared thermography, and soft X-ray imaging.

Cite this article: Azadmanesh, S., Moslemkhany, C. (2023). Exploring the Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Assessing Plant Seed Viability. Journal of Nondestructive Testing Technology, 3 (2), 71-83. http//doi.org/10.30494/JNDT.2023.386331.1111

مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب
شاپای الکترونیکی: ۶۶۵۵-۲۶۷۶
Doi: 10.30494/JNDT.2023.386331.1111

# آشنایی با تکنیک‌های نوظهور آزمون‌های غیرمخرب در بررسی زنده‌مانی بذور گیاهی

سیما آزادمنش [1]✉ | کبری مسلم خانی [2]

۱. دانش آموخته دکتری، گروه گیاهپزشکی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران رایانامه: azadmanesh.sima@ut.ac.ir
۲. مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،کرج، ایران.

**اطلاعات مقاله:**
**مقاله پژوهشی**
**تاریخ دریافت:**
۱۴۰۱/۱۱/۰۱
**تاریخ بازنگری:**
۱۴۰۱/۱۱/۲۵
**تاریخ پذیرش:**
۱۴۰۱/۱۲/۰۱
**کلیدواژگان:**
تکنیک‌های تصویربرداری و طیف‌سنجی،
آزمون‌های غیرمخرب،
زنده‌مانی بذر .

## چکیده:

طی دهه‌های گذشته، تکنیک‌های تصویربرداری و طیف‌سنجی با کاربردهای گسترده، به سرعت در تعیین کیفیت به صورت غیرمخرب در محصولات کشاورزی توسعه یافته‌اند. تجاری سازی کشاورزی نیاز به تعیین کیفیت نهاده های کشاورزی به ویژه بذر را به منظور بهینه سازی تولید و بهبود بازده اقتصادی، افزایش داده است. زنده ماندن بذر می‌تواند تاثیر به سزایی در عملکرد بالای محصول داشته باشد. بیشتر اوقات، کشاورزان از اینکه درصد قابل توجهی از بذرها پس از کاشت جوانه نمی زنند، زیان می‌بینند. زنده‌مانی بذر یکی از ویژگی‌های بسیار مهم کیفی بذر است که پتانسیل جوانه‌زنی بذر را نشان می‌دهد. بنا براین وجود روشی سریع و موثر برای تعیین کیفیت و وضعیت جوانه‌زنی و زنده ماندن بذرها قبل از کشت، فروش و در زمان کاشت ضروری است. برخی تحقیقات مبتنی بر پردازش و تجزیه و تحلیل طیف و/ یا تصویر برای بررسی کیفیت بیرونی و درونی انواع بذر مورد بررسی شده است. با توجه به پیشرفت عظیمی که در چند دهه‌ی گذشته در تصویربرداری، الکترونیک و علوم کامپیوتر رخ داده است، شاهد پیشرفت‌های فناورانه و کاربردهای هوشمند متعدد این تکنیک‌ها در آزمون‌های غیرمخرب و نظارت بر کیفیت محصولات مختلف کشاورزی بوده‌ایم. طیف‌سنجی برای بررسی و اندازه‌گیری طیف‌های تولید شده در اثر برهمکنش ماده با تابش الکترومغناطیسی یا تابش ساطع شده از آن استفاده می‌شود که تکنیک مادون قرمز نزدیک (NIR) از جمله این تکنیک‌ها برای بررسی غیرمخرب نمونه است. تصویر برداری فراطیفی و چند طیفی از تکنیک‌های غیرمخرب دیگری است که برای به دست آوردن اطلاعات طیفی و فضایی مواد از جمله بذر کاربرد دارد. استفاده از طیف سنجی رامان روش غیرمخرب دیگری است که با تابش لیزر به مقدار غیرمخرب، در بررسی زنده‌مانی بذر استفاده می‌شود. تصویربرداری حرارتی تکنیکی برای تبدیل الگوی تابش حرارتی یک جسم به تصاویر قابل مشاهده ، قابل استخراج و قابل تحلیل ویژگی‌های ماده، بدون برقراری تماس با آن است. در این روش از امواج الکترومغناطیسی اشعه ایکس نرم با طول موج‌های مختلف ۱ تا ۱۰۰ نانومتر و انرژی تقریبی ۰/۱۲ تا ۱۲ کیلو الکترون ولت که دارای قدرت نفوذ کم و توانایی آشکارسازی تغییرات در چگالی است، برای ارزیابی محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. این مقاله بر معرفی مقایسه‌ای وکاربردی تکنیک‌های نوظهور در بررسی زنده‌مانی‌بذر، از جمله تکنیک‌های ذکر شده طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک، تصویربرداری فراطیفی و چندطیفی، طیف‌سنجی رامان، دمانگاری مادون قرمز و تصویربرداری با اشعه ایکس نرم اشاره دارد.

**استناد:** آزادمنش، سیما؛ مسلم خانی، کبری. (۱۴۰۱). آشنایی با تکنیک‌های نوظهور آزمون‌های غیرمخرب در بررسی زنده‌مانی بذور گیاهی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۲)، ۸۳-۷۱. http//doi.org/ 10.30494/JNDT.2023.386331.1111

## ۱. مقدمه

استقرار گیاه مهم ترین مرحله فنولوژیک در چرخه زندگی گیاهان زراعی است که کیفیت پیش کاشت دانه نقش بسزایی در آن دارد [۱]. همچنین کیفیت بذر تأثیر زیادی بر یکنواختی رشد محصول و توسعه و کیفیت محصول برداشت شده دارد. علاوه بر این، سلامت و کیفیت بذر و محصولات گیاهی مستقیماً بر سلامت انسان تأثیر می‌گذارد [۲،۳]. بنیه بذر نشان دهنده کیفیت بذر است. هر چه بنیه بذر بیشتر باشد بدان معنی است که جوانه‌زنی آن در آزمایشگاه بهتر دارد، قدرت جوانه زنی آن در مزرعه بیشتر است، در برابر تنش‌های زنده و غیر زنده مقاوم است. همچنین بنیه بذر بالاتر گویای این واقعیت است که این بذر را می‌توان در شرایطی که با شرایط استاندارد فاصله دارد نگهداری کرد [۴].

طبق تعریف انجمن بین المللی آزمایش بذر (ISTA) بنیه بذر مجموع خصوصیاتی است که فعالیت و عملکرد بذرها و جوانه زنی مناسب را در طیف وسیعی از شرایط محیطی تعیین می کند. یک بذر قوی، بذری است که به طور بالقوه تحت شرایط محیطی که برای گونه بهینه نیست، قادر به عملکرد مناسب باشد. بذرهای با بنیه بالا به طور یکنواخت و سریع جوانه می زنند و گیاهچه های مقاوم بیشتری تولید می کنند، در نتیجه عملکرد بهتر در مزرعه و مقدارمحصول بیشتر از این بذور مورد انتظار است [۵].

در حال حاضر، روش های سنتی از جمله آزمایش جوانه‌زنی استاندارد، آزمون هدایت الکتریکی ، آزمایش رشد گیاهچه، آزمایش پیری تسریع شده، آزمایش سرد و تترازولیوم برای ارزیابی بنیه بذر پیشنهاد و انجام می‌شوند. این روش ها معمولا غیر اتوماتیک، زمان بر و مخرب هستند و نیاز به آموزش و تجربه تخصصی دارند و بنابراین برای کاربرد در مقیاس بزرگ مناسب نبوده و برای حفاظت از گونه‌های در حال انقراض سازگاری ندارند. درنتیجه، روش‌های غربالگری غیرتهاجمی با توان بالا برای صنعت بذر ضروری است تا قبل از کاشت، بذرهای با بنیه بالا برای کشاورزان فراهم شود.

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های عظیم در فناوری‌های رایانه، مواد و الکترونیک منجر به بهبود قابل‌توجه سیستم‌های مبتنی بر نور و تصویر جهت بررسی شاخص‌های ارزیابی کیفیت در زمینه های مختلف شده است و استفاده از سیستم‌های تشخیص مبتنی بر نور و تصویر در صنایع غذایی و کشاورزی به منظور تعیین کیفیت همراه با اطمینان و دقت بالا ضروری هستند و باعث رفع بی ثباتی و عدم تکرار پذیری به جهت مداخله انسان می‌شوند [۶،۷].

لازم به ذکر است که امروزه تکنیک های مبتنی بر نور یا تصویر، از جمله پایش کامپیوتری، تصویربرداری طیفی، طیف‌سنجی نزدیک مادون قرمز و سایر تکنیک‌های نسبتاً جدید، به خوبی شناخته شده‌اند و به طور گسترده در مورد میوه‌ها و سبزیجات، در تجهیزات مرتب سازی برای ارزیابی و درجه بندی غیرمخرب کیفیت کاربرد دارند.

اما علی رغم وجود کاربردهای متنوع آزمونهای غیرمخرب در صنعت کشاورزی، در ارتباط با بذر، استفاده محدودی از تکنیک های ذکر شده گزارش شده است.

کاربرد برخی از تکنیک‌های نوظهور با تمرکز بر شاخص‌های تعیین کیفیت بذر مانند طیف‌سنجی رامان، دمانگاری مادون قرمز و تصویربرداری اشعه ایکس امروزه گسترده تر شده است. به عنوان مثال در بررسی کیفیت بعضی محصولات گران قیمت مانند بادام زمینی، استفاده از روشهایی سریع و غیرمخربی مانند استفاده از اشعه ایکس نرم برای بررسی وزن و کیفیت دانه های تولید شده استفاده می‌شود که می‌تولند بدون خراب کردن دلنه ها و باز کردن گلدان های کشت شده، کیفیت دانه ها را بررسی کند [۸].

در واقع بنیه بذر برآیند عملکرد چند ویژگی متفاوت است و عوامل مختلف دخیل در قدرت و بنیه بذر مانند ساختار ژنتیکی، شرایط محیط در طول رشد بذر، و شرایط انبارداری بذر [۳]، مانع از ارائه تعریف دقیقی برای بنیه بذر می‌شوند [۴]. بنابراین، بیشتر محققان با استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب در حال ظهور، مانند طیف‌سنجی نزدیک مادون قرمز (NIR)، تصویربرداری فراطیفی (HSI) یا تصویربرداری چند طیفی (MSI)، طیف‌سنجی رامان (RS)، دمانگاری مادون قرمز (IRT) و تصویربرداری با اشعه ایکس نرم (Soft X-ray)، بر روی بررسی زنده‌مانی بذر تمرکز کرده‌اند. با توجه به اینکه سابقه استفاده از این تکنیکها در بررسی خصوصیات بذر در ایران بسیار اندک است، به منظور آشنایی بیشتر محققان و دست اندرکاران صنعت کشاورزی کشور با این تکنیکها، در این مقاله کاربرد تکنیک‌های

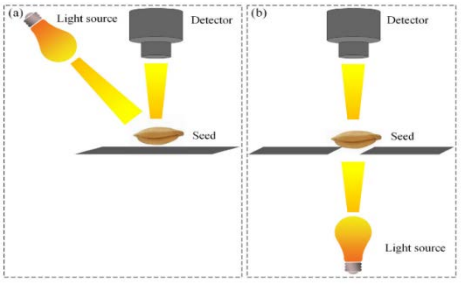
نوظهور در تشخیص زنده‌مانی بذر معرفی و مقایسه شده‌اند.

## ۲. - طیف‌سنجی نزدیک مادون قرمز [1]

طیف‌سنجی نزدیک مادون قرمز (NIR) بر اساس جذب تابش الکترومغناطیسی در طول موج‌های ۷۸۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است. عملکرد آن به این صورت است که ویژگی‌های طیفی اشعه هنگامی که به درون محصولات کشاورزی نفوذ می‌کند، از طریق فرآیندهای پراکندگی و جذب طول موج ناشی از ساختارهای بافتی محصولات تشکیل شده از سلول‌ها و محیط‌های درون/خارج سلولی تغییر می‌کند. جذب عمدتاً توسط پیوندهای C\\H، O\\H و N\\H ترکیبات اصلی ایجاد می‌شود (آب، قندها، کلروفیل ها، کاروتنوئیدها و غیره). طیف NIR شامل نوارهای موج گسترده ناشی از همپوشانی جذب که عمدتاً به رنگ و ترکیبی از این پیوندهای شیمیایی در ارتباط است، ایجاد می‌کند و تشخیص مواد آلی و بیولوژیکی را امکان پذیر می سازد.

تشعشع در تعامل با نمونه ممکن است جذب، منتقل یا منعکس بشود. انعکاس اسپکولار توسط یک سطح صاف ایجاد می‌شود، در حالی که انعکاس پراکنده به دلیل یک سطح ناهموار است. هر دو روش بازتاب، فقط اطلاعات مربوط به سطح نمونه ها را فراهم می‌کند. پراکندگی به اندازه، شکل و اجزاء ذرات بستگی دارد و بر اندازه شدت طیف منعکس شده تأثیر می‌گذارد، در حالی که فرآیند جذب بر شکل طیف بازتابی آن تأثیر می‌گذارد. بنابراین، حالت‌های مختلف اندازه‌گیری طیف‌سنجی NIR برای کاربردهای مختلف وجود دارد [۹].

حالت های متداول، استفاده از بازتاب منتشره و عبوری برای اندازه گیری کیفیت بذر است (شکل ۱).




شکل ۱-طیف بازتاب NIR (a) و طیف عبور (b) [۹].

در حالت بازتاب، نور منبع و آشکارساز تحت یک زاویه خاص برای جلوگیری از انعکاس چشمی نصب شده‌اند. ساختار این حالت نسبتاً ساده و ایجاد آن آسان است. به طور کلی می‌توان به راحتی اطلاعات طیفی سطحی (حدود ۱-۲ سانتی متر ضخامت) نمونه‌ها را از طریق نورهای بازتابی به دست آورد. در حالت انتقال، منبع نور در مقابل آشکارساز قرار می گیرد. در محدوده طول موج ۱۱۰۰-۲۵۰۰ نانومتر، میزان پراکندگی نور در درون جسم زیاد است و گذر نور در بیشتر نمونه‌ها تا ضخامت حدود ۱ سانتی متر رخ می دهد که ناچیزاست [۱۰]. این حالت به راحتی می تواند اطلاعات طیفی داخلی را با نفوذ نور از داخل نمونه ها فراهم کند ، اما نیاز به حساسیت بالایی در دستگاه های جفت بار (CCD)[2] در طیف‌سنج‌ها دارد و منابع نوری باقدرت بالاتر نیز مورد نیاز است [۱۱].

ارتعاشات پایه‌ای این پیوندها، پیک جذب را در نواحی مرئی و نزدیک مادون قرمز (Vis/NIR) ایجاد می‌کند که گسترده اند و با هم تداخل دارند و لذا تفسیر طیف Vis/NIR در تداخل‌های زیاد را مشکل می‌سازد. علاوه بر این، طیف NIR، ۱۰ تا ۱۰۰ برابر ضعیف‌تر از جذب بنیادی مربوط به بلندهای میانی مادون قرمز است [۱۲]. بنابراین، تحلیل و توضیح اطلاعات موجود در طیف‌های NIR به دلیل ماهیت چند متغیره آن دشوار است و تشخیص تفاوت‌های طیفی بسیار جزئی بین نمونه‌ها غیرممکن است. به منظور استخراج سریع و کارامد اطلاعات مفید از حجم وسیعی از داده‌های طیفی، الگوریتم‌های پیشرفته شیمی‌سنجی مورد نیاز است، که هم پیش پردازش داده‌ها و هم تجزیه و تحلیل کمی یا کیفی موردانتظار را مکان پذیر می‌سازند.

با توجه به توسعه طبقه بندی و شناسایی روش‌های مبتنی بر طیف‌سنجی NIR، داده‌های طیفی بیشتر، توسط بسیاری از روش های کیفی چند متغیره معروف، مانند K-نزدیکترین همسایه (KNN)[3]، تجزیه و تحلیل تشخیص خطی (LDA)[4]، مدلسازی مستقل نرم کلاس آنالوگی (SIMCA)[5]، تجزیه و تحلیل تفکیک حداقل مربعات جزئی

[1] Near infrared spectroscopy
[2] charge coupled devices
[3] K-nearest neighbor
[4] linear discriminant analysis
[5] Soft independent modeling of class analogy

(PLS-DA)[1]، آنالیز اجزای اصلی (PCA)[2] ماشین بردار پشتیبان (SVM)[3] و غیره پردازش می‌شوند. مفهوم کلی مدل PLS-DA مشابه رگرسیون حداقل مربعات جزئی[4] (PLS-R) است در حالی که PLS-DA یک نسخه اصلاح شده PLS-R برای حل مشکلات طبقه بندی رگرسیونPLS-R است و به راحتی در هنگام برخورد با حجم زیادی از داده های طیفی کارایی دارد[13-17] . لازم به ذکر است که این روشها در محاسبات ناشی از سایر روشهای طیف سنجی از جمله طیف سنجی مادون قرمز و تصویر برداری فرا طیفی نیز کاربرد دارد [۱۸]. درمطالعات بررسی زنده‌مانی بذر، مناطق طول موج مهم برای تمایز بین دانه‌های زنده و غیرقابل زنده‌ماندن بوسیله مدل‌های[5](ECVA) ، تجزیه و تحلیل گسترده متغیرهای اولیه ECVA ، نمودارهای وزنی ECVA[6] استفاده می شود که با داده های چند خطی طیف مادون قرمز و ماتریس کوواریانس درون گروهی مفرد سر و کار دارد و میانگین اختلاف طیف برای دانه‌های زنده و غیر زنده شناسایی می‌شوند. منشأ تفاوت‌های طیفی بین دانه‌های غیر زنده و زنده، با تفاوت در ترکیب شیمیایی پوشش بذر و ذخایر ذخیره‌سازی متناسب می‌باشد [۱۹]. برای مثال، در مطالعه‌ای بر روی بررسی زنده‌مانی بذور ۳۰۰ دانه ذرت که ۱۵۰ بذر در ماکروویو تحت حرارت ۱۰۰۰ وات برای ۴۰ ثانیه قرار گرفته بود و ۱۵۰ بذر به عنوان کنترل استفاده گردید، با پیش فرض غیر زنده بودن بذور قرار گرفته در ماکروویو ، از نظر چشمی تفاوتی میان بذور زنده و غیرزنده قابل تفکیک نبود که بعد از استفاده از دستگاه طیف‌سنج FT-NIR[7] و تابش طول موجهای دامنه۱۰۰۰-۲۵۰۰ nm و قرار دادن دانه‌ها در فاصله ۸ سانتی متری یکدیگر، ۳۲ اسکن از هر دانه تهیه شد و بعد از آنالیز تصاویر داده شده با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تجزیه و تحلیل تفکیک حداقل مربعات جزئی (PLS-DA) ملاحظه گردید که این تکنیک در تفکیک بذور زنده از غیر زنده ۱۰۰ درصد دقت داشته است [۲۰].

همچنین، درمطالعه دیگری بر روی بررسی زنده‌مانی بذور اسفناج با استفاده از طیف NIR، که در [illegible] تحقیق بذرها از دو دسته بذر با درصد جوانه زنی ۹۷و ۹۰٪ انتخاب شده بودند و به منظور پیر کردن بذرها جهت بررسی زنده‌مانی، ۳ گرم بذر مخلوط در انکباتور برای ۷۲ ساعت در دمای ۴۱ درجه سانتیگراد قرار گرفته و سپس بذرها خنک شده و با جریان هوا خشک شده بودند، بعد از تابش طیف NIR بر روی این بذرها به صورت تک تک با استفاده از Single seed FT-NIR analyser در شرایط طول موجهای دامنه ۸۳۳-۱۶۶۷ nm و فاصله ۳۲ میلیمتری منبع از نمونه، با ۶۴ اسکن متوالی، بررسی انجام شد. پس از آنالیز تصاویر داده شده با تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) و استفاده از از مدل ECVA، این تکنیک توانست بذرهای زنده را از غیر زنده با درصدی بین ۹۸.۳ تا ۸۹.۵ به درستی تفکیک کند [۲۱].

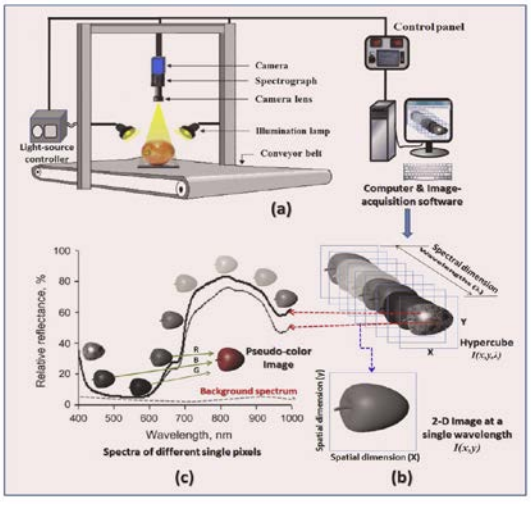
در استفاده از این تکنیک نکته‌ای که باید مدنظر قرار گیرد، اندازه جامعه‌ای است که مطالعه NIR بر روی افراد آن، دقیق‌ترین درصد دسته بندی را نشان می‌دهد. در همین راستا مطالعه‌ای توسط شتی و همکاران بر روی بهینه کردن اندازه جامعه بذور تربچه و کلم در مطالعه زنده‌مانی توسط NIR صورت گرفت [۱۷]. پس از بررسی تابش به بذرهای انتخاب شده از جامعه ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ بذری و بعد از استفاده از مدل تجزیه و تحلیل گسترده متغیرهای اولیه ECVA، ملاحظه شد که در جامعه ای متشکل از ۲۰۰ بذر، بهترین درصد تفکیک پذیری بذور زنده از غیر زنده امکان‌پذیر است.

## ۳. تصویربرداری فراطیفی و چند طیفی[8]

سیستم تصویربرداری فراطیفی (HSI)، هر دو تکنیک طیف‌سنجی و تکنیک‌های تصویربرداری را برای به دست آوردن مجموعه ای از تصاویر تک رنگ در صدها طول موج تقریباً پیوسته، ادغام می‌کند. این سیستم با ترکیب طیف‌سنجی NIR و تصویربرداری دیجیتال، اطلاعاتی را در مورد توزیع فضایی ترکیبات ارائه می‌دهد. بنابراین سیستم HSI مجموعه داده‌های سه بعدیhypercube (3D) ایجاد می‌کند که از دو بعد فضایی و یک بعد طیفی منفرد تشکیل شده است. یک سیستم تصویربرداری فراطیفی شامل منبع

[1] Partial least squares-discriminant analysis
[2] Principal components analysis
[3] Support vector machine
[4] Partial least square regression
[5] Extended canonical variates analysis
[6] ECVA weight plots
[7] Fourier transform near-infrared
[8] Hyperspectral and multispectral imaging

نور، دستگاه‌های پراکندگی طول موج و آشکارسازها است. به عنوان مرکز سیستم تصویربرداری فراطیفی، دستگاه‌های پراکندگی طول موج برای پخش نور با باند پهن به طول موج‌های مختلف استفاده می‌شود. آشکارساز نور را جمع آوری می کند که این پرتوها اطلاعات مفیدی از دستگاه پخش طول موج را ارائه می‌دهند و شدت نور را با تبدیل انرژی تابشی به سیگنال‌های الکتریکی می‌سنجد. با استفاده از تصویربرداری فراطیفی، تجزیه و تحلیل نمونه راحت و نسبتا سریع است زیرا تعداد نمونه‌های زیادی به طور همزمان تجزیه و تحلیل می‌شود، در حالی که روش‌های طیف سنجی تنها یک نمونه را در یک زمان تجزیه و تحلیل می‌کنند (شکل۲). به طور کلی، روشهای اسکن نقطه، اسکن خط و اسکن ناحیه سه رویکرد رایج هستند تا تصویر فراطیفی را به دست آورند [ ۲۳]. به عنوان پرکاربردترین روش، تصویربرداری بازتابی فراطیفی در Vis/NIR(۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر) یا محدوده NIR (۱۰۰۰-۲۵۰۰ نانومتر) انجام می‌شود تا تشخیص عیوب، آلاینده‌ها و ویژگی‌های کیفی میوه‌ها، سبزیجات و دانه‌ها را ردیابی کند [۲۰]. آزمایشات HSI معمولا شامل سه ماژول مختلف است: الف) اکتساب تصویر و پیش پردازش تصویر، ب) استخراج داده‌ها و تیمار داده‌ها، ج) مدل سازی داده و پس پردازش تصویر.




شکل۲- پیکربندی اولیه تصویربرداری فراطیفی جاروب فشاری push broom hyperspectral imaging برای به دست آوردن داده ابرطیفی «Hypercube. «Hypercube می‌تواند به‌عنوان تصویر دو بعدی منفرد I(x,y) در هر طول موج معین (b) یا به صورت طیف I(λ) در هر پیکسل معین در تصویر (c) باشد [۲۱].

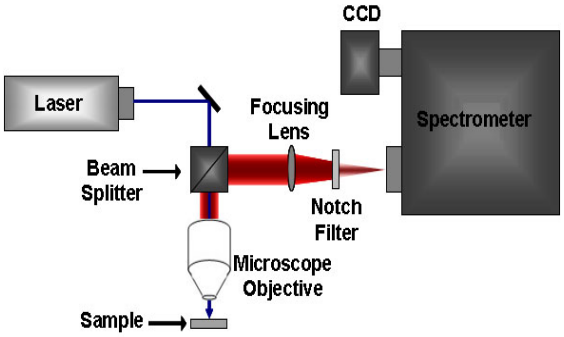
مطالعات زنده‌مانی بذر با استفاده از این تکنیک، به این صورت است که دوربین از روی صفحه نگهدارنده بذر حرکت کرده و منبع نوری نیز برای روشن کردن نمونه‌ها در طی بازتاب، روشن نگه داشته می شود. وضوح تصاویر گرفته شده متفاوت است و این تصاویر فراطیفی خام به دست آمده با حذف هرگونه نویز احتمالی ناشی از بی نظمی‌های سیستماتیکی مانند تغییرات دما و رطوبت، به تصاویر بازتابی فراطیفی تبدیل می شوند. سپس داده های به دست آمده نرمالایز شده و با استفاده از روشهایی همچون تجزیه و تحلیل تفکیک حداقل مربعات جزئی (PLS-DA) آنالیز می‌شوند [۲۰].

## ٤. طیف سنجی رامان [1]

طیف‌سنجی رامان (RS) شکلی از طیف‌سنجی تحلیلی بر مبنای پراکندگی رامان است، که توسط C.V.Raman در سال ۱۹۲۸ کشف شد. با توجه به این اصل که فرکانس‌های ارتعاشی ناشی از پیوندهای شیمیایی مولکول و تقارن‌ها هستند، قله‌های رامان معمولا در بیشتر موارد واضح می‌باشند، که اثر انگشت اختصاصی (شاخص) را برای شناسایی مولکول‌ها فراهم می‌کنند و تجزیه و تحلیل ترکیبات شیمیایی را دقیق‌تر می‌سازند [۲۴]. با این حال، با توجه به این واقعیت که فناوری برای تشخیص اثرات پراکندگی رامان و منابع نور قوی به اندازه کافی گسترش نیافته بود، در ابتدا کاربردهای RS محدود بودند. خوشبختانه RS به طور قابل توجهی با توسعه فناوری‌های مرتبط در دهه اخیر گسترش یافته است. RS می‌تواند به حساسیت تشخیص بسیار بالایی در کاربردهای مختلف، مانند ارزیابی کیفیت گوشت و ماهی [۲۵]، ارزیابی زنده ماندن دانه و غیره دست یابد. مزایای بیشتر تکنیک های RS در مقایسه با روش‌های مرسوم در تشخیص زنده ماندن بذر شامل سرعت، استحکام، دقت بالا و غیر تهاجمی بودن آن است.

طیف سنج رامان از یک لیزر دیود و یک آشکارساز CCD تشکیل شده است (شکل۳) و زنده‌مانی بذور از طریق بررسی تفاوت میانگین طیف رامان در بذور زنده و غیر زنده به دست می‌آید [۲۶].

1 Raman spectroscopy




شکل۳- اجزای طیف سنج رامان [۲۶].

در مطالعه‌ای بر روی بررسی زنده‌مانی بذور ذرت که بر روی ۱۵۰ دانه ذرت حرارت دیده در موج W۱۰۰۰ برای ۴۰ ثانیه و ۱۵۰ دانه تیمار نشده انجام شد، از طیف سنج رامان دارای یک دستگاه آشکارساز (CCD) با اندازه پیکسل ۱۴ × ۹۰۰ نانومتر و یک لیزر ۷۸۵ نانومتر نزدیک مادون قرمزاستفاده گردید. لیزر تحریک استاندارد ۷۸۵ نانومتر برای کاهش پس زمینه و فلورسانس نمونه‌ها انتخاب شد. دانه های تیمار شده و تیمار نشده به صورت جداگانه در محدوده چرخش رامان از ۱۷۰ تا ۳۲۰۰ $cm^{-1}$ در وضوح طیفی $cm^{-1}$ ۴ بررسی شدند. برای هر نمونه، زمان یکپارچه سازی ۸۰۰۰ ms بود و چهار اسکن برای تولید با کیفیت بالای طیف رامان استفاده شد، و فایل طیف میانگین برای تجزیه و تحلیل استفاده گردید. پس از تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) و تجزیه و تحلیل تفکیک حداقل مربعات جزئی (PLS-DA) مشاهده شد که این تکنیک در آنالیز PLS-DA برای طبقه بندی بذر زنده از غیر زنده عملکرد بسیار خوبی دارد اما در آنالیز PCA بین بذرهای تیمار شده (حرارت دیده) و تیمار نشده، تفاوت معنی داری مشاهده نشد [۲۰].

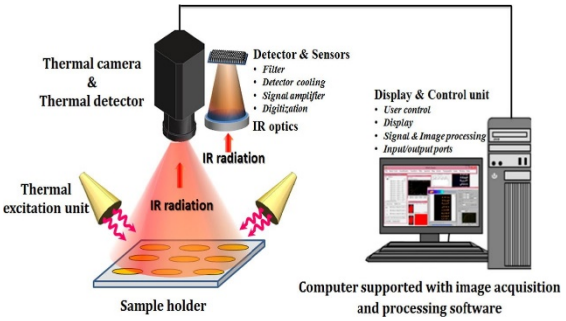
## ۵. دمانگاری مادون قرمز [1]

دمانگاری مادون قرمز (IRT) یک رشته نسبتاً جوان است و لی منشاء آن به قرن هفدهم، زمانی که دماسنج‌ها ساخته شدند، برمی‌گردد [۲۷]. کشف اشعه مادون قرمز توسط سر ویلیام هرشل در سال ۱۸۰۰ با ضبط اولین تصویرحرارتی توسط پسرش جان هرشل دنبال شد [۲۸]. در سال ۱۹۳۴، هاردی اهمیت تشخیصی اندازه‌گیری دما توسط مادون قرمز را بنا نهاد، که به کاربرد IRT در علوم پزشکی کمک کرد [۲۹]. با این حال، به علت در دسترس نبودن تجهیزات با کیفیت و دانش فنی بالا، اولین استفاده در سال ۱۹۶۰ گزارش گردید [۲۷]. تصویربرداری حرارتی یک روش تصویربرداری غیر تماسی بالقوه برای تعیین صفات مختلف کیفی بر اساس تابش مادون قرمز ساطع شده از محصول مورد نظر ارائه می‌دهد. این تکنیک از یک روش اکتشافی در مهندسی و نجوم به ابزاری مؤثر در بسیاری از زمینه‌ها برای تشکیل تصاویر بدون ابهام به نام ترموگرام ناشی از دما و خواص حرارتی اجسام هدف تبدیل شده است [۳۰]. اخیرا IRT به عنوان یکی از روش‌های تشخیص سریع، غیر تماسی و غیرمخرب در زمینه‌های مختلف از جمله آزمایش‌های پزشکی، تشخیص عیوب، سنجش از راه دور، تشخیص بیماری‌های گیاهی و حشرات آفات، بررسی کیفیت میوه، ارزیابی زنده ماندن بذر، و غیره استفاده شده است [۳۱-۳۴]. در مقایسه با تصویربرداری فراطیفی و روش‌های Fourier transform near-infrared ، IRT مزایایی مانند هزینه کم و توان عملیاتی ارزیابی بالا را دارد. IRT همچنین تصاویر حرارتی دو بعدی (2D) را ارائه می‌دهد که مقایسه بین مناطق هدف را ممکن می‌سازد [۳۵].

تابش مادون قرمز انرژی تابش شده از سطح جسمی است که دمای آن بالای صفر مطلق است .کسری از کل انرژی تابشی که با هر یک از حالت های اتلاف انرژی مرتبط است به عنوان قابلیت جذب، انتقال و بازتاب اجسام نامیده می‌شود [۳۶]. برای توصیف این پدیده ها از سه پارامتر استفاده می شود: جذب طیفی $\alpha\lambda$، که نسبت توان تابشی طیفی جذب شده توسط جسم است، بازتاب طیفی $\rho\lambda$، که نسبت توان تابشی طیفی منعکس شده توسط جسم است، و گذر طیفی $\tau\lambda$، که نسبت توان تابشی طیفی است که توسط جسم منتقل می‌شود. این سه پارامتر وابسته به طول موج هستند [۳۵].

تصاویر حرارتی حاصل، پروفایل‌های حرارتی بذور را با تغییرات نشان‌داده شده در توزیع دما ارائه می‌کنند که به شدت با زنده‌مانی بذر در ارتباط است، و بر اساس تفاوت میان منحنی‌های حرارتی، می‌توان بذور زنده را از بذور غیرزنده تفکیک کرد. اجزای دستگاه دمانگاری مادون قرمز در شکل۴ نشان داده شده است [۳۷].

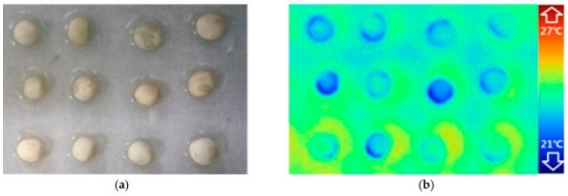
[1] Infrared thermography




شکل ۴- اجزای معمول یک سیستم تصویربرداری حرارتی مورد استفاده در ارزیابی کیفیت بذر. واحد تحریک حرارتی در مورد سیستم تصویربرداری حرارتی فعال نشان داده شده است [۳۷].

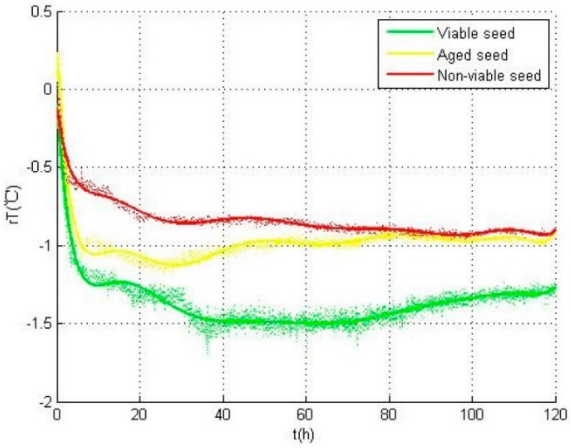
در همین راستا، در مطالعه‌ای بر روی تفکیک بذور نخودفرنگی با استفاده از دمانگاری مادون قرمز، مشاهده شد که میزان دقت این تکنیک در تفکیک بذرهای زنده از غیرزنده و بذرهای مسن، ۹۵ درصد است [۳۸].

در این مطالعه ابتدا بذرها در دو کلاس A و B دسته‌بندی شدند و بذرهای کلاس A در ۵ درجه سانتیگراد برای ۳ روز قرارگرفتند و بذرهای کلاسB نیز در ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای ۳ روز قرار داده شدند. سپس این بذرها در پتری‌های پلی کربناتی جهت جوانه زدن قرار گرفتند و طی ۵ روز جوانه زنی، با استفاده از سیستم دمانگاری مادون‌قرمز متصل به دوربین CCD ودوربین عکاسی معمولی هر ۵ دقیقه از این بذرها، عکسبرداری حرارتی و معمولی انجام شد (شکل۵).




شکل۵- (a) تصویر معمولی و (b) تصویر حرارتی از بذرهای نخود فرنگی [۳۸].

بعد از گذشت ۵ روز طول ریشه جوانه زده از هر بذر به عنوان معیاری از زنده‌مانی بذر اندازگیری شد. هر ناحیه بذر در تصاویر معمولی با روش تشخیص لبه (edge detection) تقسیم شد و میانگین دمای ناحیه مربوطه در تصاویر مادون قرمز به عنوان دمای تعیین شده برای هر بذر در زمان عکس برداری محاسبه شد. با استفاده از این دماها منحنی دمای هر بذر در طول جوانه زنی رسم گردید (شکل۶) و از این منحنی‌های دما، سیزده پارامتر مشخص، استخراج و برای نشان دادن تفاوت نوسانات دما بین نمونه‌های بذر با قابلیت زنده‌مانی متفاوت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با استفاده از آنالیز ماشین بردار پشتیبان (SVM) بر روی پارامترهای استخراج شده، بذرها به ۳ دسته زنده، غیر زنده و مسن تقسیم بندی شدند.

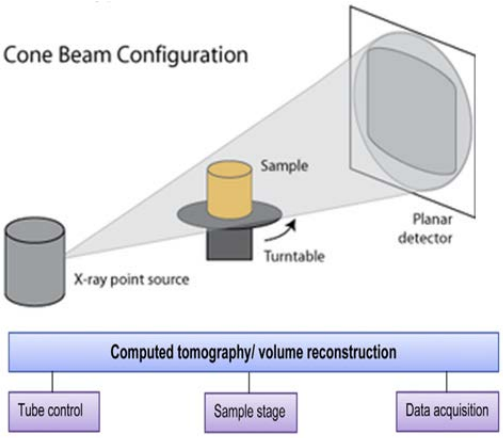



شکل ۶- تفاوت منحنی دمایی بین بذور زنده، غیر زنده و مسن نخود فرنگی در طی زمان [۳۸].

## ۶. تصویربرداری با اشعه ایکس[1]

توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس (CT)، تابش الکترومغناطیسی با محدوده طول موج ۱۰-۰.۰۱ nm و انرژی فوتون پرتو ایکس در محدوده ۱۲۰-۰.۱ keV است، که منجر به نفوذپذیری قوی می‌شود. اشعه ایکس، مشابه سایر امواج الکترومغناطیسی، می‌تواند پدیده‌های انعکاس، شکست، پراکندگی، تداخل، پراش، قطبش و جذب را نشان دهد. سی تی سی تی با اشعه ایکس ساختار داخلی نمونه را با استفاده از یک منبع اشعه ایکس و یک آشکارساز ارزیابی می کند تا اطلاعات یک پرتو تابیده شده را به دست آورد (شکل۷). سیستم بازرسی تصویربرداری اشعه ایکس، عمدتاً شامل یک ژنراتور اشعه ایکس با کنترل کامپیوتر (یعنی لوله منبع اشعه ایکس)، یک سنسور اسکن خطی برای تشخیص اشعه ایکس (یعنی یک دوربین CCD با اشعه ایکس است که در آن رادیوگراف بزرگ شده (پروجکشن) می‌تواند تولید شود)، تسمه نقاله، موتور پله‌ای، کارت تصویر برداری و کامپیوتر است [۳۹].

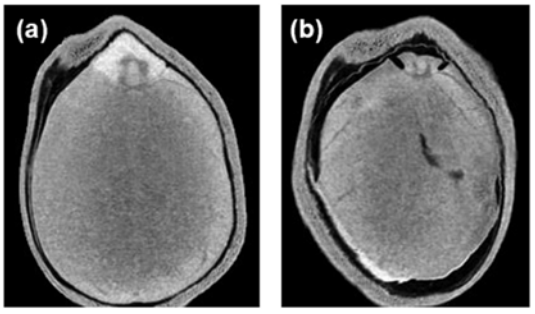
[1] X-ray imaging




شکل۷ - تصویر شماتیک از نحوه اندازه گیری سی تی اشعه ایکس [۳۹].

تصویربرداری CT یک ابزار بالقوه برای طبقه بندی دانه‌ها بر اساس خصوصیات مورفولوژیکی داخلی آنهاست. زمانی که جزئیات آناتومیک داخلی بذرهای مورد بررسی برای تخمین بلوغ بذر، ظرفیت جوانه زنی، خواب، زنده ماندن، بنیه وضعیت هجوم حشرات و آسیب‌های داخلی در جنین و آندوسپرم مورد نیاز است، این تکنیک کارایی بالایی دارد [۳۸].

در این تکنیک، بذر در معرض اشعه ایکس هماهنگ شده قرار می‌گیرد که توسط لوله اشعه ایکس تولید می‌شود و آشکارساز اشعه ایکس را به رادیوگرافی دیجیتال تبدیل می‌کند. در اسکن پرتو مخروطی، آرایه خطی با یک آشکارساز مسطح جایگزین می‌شود و پرتو دیگر همسو نمی‌شود. داده‌های کل بذر یا ضخامت قابل توجهی از آن را می‌توان در یک چرخش به دست آورد. داده‌ها با استفاده از الگوریتم پرتو مخروطی به تصاویر بازسازی می شوند و از بررسی تصاویر گرفته شده از داخل بذور با استفاده از این دستگاه، می‌توان به زنده بودن یا نبودن بذر پی برد(شکل۸).




شکل ۸- تفاوت مورفولوژی بین بذر زنده (a)و غیر زنده(b) گرفته شده با استفاده از دستگاه CT [۴۰].

به عبارت دیگر، ارزیابی ساختار داخلی بذر با استفاده از اشعه ایکس که تابش‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های بسیار کوتاه هستند و قدرت نفوذ بالای دارند، امکان‌پذیر است [۳]. در همین راستا، احمد و همکاران در مطالعه‌ای به منظور بررسی قدرت جوانه زنی بذرهای خربزه تیل (muskmelone) به بررسی ساختار درونی بذر با استفاده از X-ray micro CT scanner پرداختند. در این تحقیق عکس‌های CT از بذرها گرفته شد و پس از پردازش تصاویر، ۱۵ تصویر از هربذر انتخاب شد و ویژگیهایی همچون خصوصیات بافت و شکل لبه ها مورد بررسی قرار گرفت. بعد از اینکه این بذرها مورد آزمایش جوانه زنی قرار گرفتند و نتایج حاصل از بررسی عکس‌های گرفته شده با نتایج آزمایش جوانه زنی مقایسه شد، ملاحظه گردید که تصویربرداری CT بر اساس تجزیه و تحلیل مورفولوژیکی خصوصیات داخلی بذر، توانایی طبقه بندی بذرهای زنده و غیر زنده را دارد [۴۰].

## ۷. بحث

به عنوان یک فناوری نسبتاً شناخته شده، ابزارهای طیف‌سنجی NIR متعددی به صورت تجاری برای تحقیقات آزمایشگاهی و اهداف صنعتی در دسترس هستند. این تکنیک از مزایای قابل توجهی از نظر هزینه استفاده نسبت به سایر تکنیک‌های سنجش نوری برخوردار است. با توسعه ابزار کمک چرخش، که امکان تحرک بیشتری را ایجاد می‌کند، اسکن بذور با دقت بالاتری امکان پذیر شده است [۴۱].

اطلاعات ترکیب شیمیایی بذر مانند لیپیدها، پروتئین‌ها، و کربوهیدرات‌ها را می توان با NIR دریافت کرد، اما ممکن است به راحتی تحت تاثیر یکنواختی، با توزیع مختلف نمونه به دلیل اینکه تنها یک نقطه از نمونه اسکن می‌شود، قرار گیرد و اطلاعات درستی حاصل نشود [۴۲].

نتایج تحقیقات نشان داده است که HSI یک ابزار موثر برای تشخیص زنده ماندن بذر است و امکان تجزیه و تحلیل سریع و با قابلیت بالا را برای یک بذر ارائه می‌دهد. یکی از مزیت‌های اصلی این است که HSI هم اطلاعات فضایی و هم اطلاعات طیفی را ارائه می‌دهد و برای طبقه بندی کیفیت خارجی و پیش بینی ترکیب شیمیایی داخلی بذور مناسب است. با این حال، یک نقطه ضعف طیف‌سنجی NIR و

HSI/MSI این است که یک کالیبراسیون جدید برای هر گونه و رقم بذر موردنیاز است و مدل‌های کالیبراسیون باید بر اساس مجموعه داده‌های بزرگی که از باغ‌ها، سیستم‌های کشت و در فصول مختلف، به دست می‌آید، کالیبره شوند. علاوه بر این، دقت پیش بینی نیز بستگی به عواملی خارجی همچون دما، طیف‌سنج، نویز و برخی موارد دیگر دارد که کنترل آنها توسط اپراتورها با توجه به هدف مدنظر دشوار است و بهینه سازی و اختصاصی سازی اجزای نوری و سیستم‌های نمونه‌برداری برای اطمینان از موفقیت یک برنامه کاربردی مورد نیاز می‌باشد. با توجه به علاقه روزافزون دانشگاه و صنعت، فناوری طیف سنجی رامان در دهه‌های گذشته به سرعت تکامل یافته است، اگرچه چالش‌هایی هنوز برای کاربردهای تکنیک‌های RSبرای ارزیابی زنده ماندن بذر، مانند تداخل فلورسانس بالا از مواد گیاهی، تکرارپذیری ضعیف تکنیک های SERS و غیره وجود دارد [۴۳].

اشعه ایکس برای بررسی جمعیت بزرگ، مقیاس پذیر (Scale up) و مناسب سازی نشده است و تنها می تواند یکپارچگی ساختاری دانه ها را نشان دهد. با استفاده از اشعه ایکس به سختی می‌توان به طور مستقیم تشخیص داد که آیا دانه‌ها زنده هستند یا خیر [۴۴].

کاربرد تصویربرداری حرارتی و تصویربرداری با اشعه ایکس نرم در ارزیابی کیفیت بذر به دلیل بالا بودن هزینه‌های این تکنیکها، بسیار محدود است. علاوه بر این، برای بررسی کامل‌تر بذر، کارایی تشخیصی این ابزارها محدود می‌شود. ترکیب خروجی‌های تکنیک‌های مختلف برای ارتقای قابلیت اطمینان، طبقه‌بندی یا پیش‌بینی مشخصات مواد غذایی، به جای استفاده از خروجی یک تکنیک به طور مجزا مورد نیاز است [۴۵]. در جدول ۱ به مقایسه تکنیک‌های معرفی شده پرداخته شده است.

با توجه به اینکه روش‌های غیرمخرب بیشتری با موفقیت در تشخیص زنده‌مانی بذر به کار گرفته شده‌اند، تشخیص زنده‌مانی بذر با ادغام این فناوری‌های مختلف، شامل تلفیق داده‌ها بر مبنای استراتژی ادغام اطلاعات، نتایج مناسب‌تری را حاصل خواهد نمود. با توسعه سخت افزارهای کامپیوتری با هزینه کم و سرعت بالا و با استفاده از هوش مصنوعی برخی از تکنیک‌های در حال ظهور نام برده شده، ارزان‌تر و جذاب‌تر خواهند بود و کاربردهای امیدوارکننده ای در کنترل کیفیت و تشخیص اتوماتیک بذرها خواهند داشت. یکی از پیشنهادات برای آینده استفاده از این تکنیکها نیز ترکیب دو یا چند تکنیک با یکدیگر برای عملکرد بهتر، برای مثال استفاده از تکنیک رامان فراطیفی است.

همچنین با استفاده از روش‌های جدید آنالیز مبتنی بر یادگیری ماشین[1] از جمله شبکه های عصبی کانولوشنی بر مبنای یادگیری عمیق[2] می‌توان به دسته بندی های دقیق‌تری دست یافت [۴۶].

[1] Machine learning methods

[2] CNN-based deep learning

جدول۱- مقایسه آزمون‌های غیرمخرب در زنده‌مانی بذر

| روش / ویژگی | طیف‌سنجی نزدیک مادون قرمز | تصویربرداری فراطیفی و چند طیفی | طیف سنجی رامان | دمانگاری مادون قرمز | تصویربرداری با اشعه ایکس |
|---|---|---|---|---|---|
| **اساس عملکرد** | -بررسی نتایج ناشی از تابش ناحیه مادون قرمز نزدیک طیف الکترومغناطیسی (از ۷۸۰ نانومتر تا ۲۵۰۰ نانومتر) | -اختصاص طیف گسترده‌ای از نور به هر پیکسل | -بررسی حالتهای ارتعاشی مولکولها با استفاده از طیف سنجی | -کسب و تجزیه و تحلیل اطلاعات حرارتی | -بررسی تصویر ناشی از تابش الکترومغناطیس با انرژی بالا |
| **محدودیت تکنیک** | -نیاز به کالیبراسیون متوالی<br>-تکنیکی گران<br>-نداخل امواج فروسرخ و مرئی<br>-تابش فقط بر روی یک نقطه از نمونه<br>--نیاز به مجموعه عظیم داده مربوط به بذرهای مختلف جهت کالیبراسیون | -نیاز به کالیبراسیون متوالی<br>-نیاز به مجموعه عظیم داده مربوط به بذرهای مختلف جهت کالیبراسیون | -نیاز به کالیبراسیون متوالی<br>-تداخل امواج<br>-تکرارپذیری کم | -تکنیکی گران<br>-متاثر از شرایط محیط<br>-دقت دوربین حرارتی ۱۰۰ درصد نیست.<br>-نیاز به مجموعه عظیم داده مربوط به بذرهای مختلف جهت کالیبراسیون | -عدم امکان استفاده در جمعیت‌های بزرگ<br>-تکنیکی گران<br>-متاثر از شرایط محیط<br>- فقط تشخیص تمامیت ساختار فیزیکی را دارد و برای ساختار شیمیایی قابل استفاده نیست. |
| **فدرت تفکیک بذور زنده از عیر زنده** | -دقت تفکیک پذیری بسیار بالایی | -بهتر از طیف سنجی رامان<br>-بهتر از تصویر برداری اشعه X | -تفکیک پذیری مناسبی ندارد | -بهتر از تصویر برداری فراطیفی و چند طیفی | - تفکیک پذیری مناسبی ندارد |
| **مزایای تکنیک** | -سرعت بالا<br>-غیرمخرب<br>-غیرتماسی | -امکان تفکیک بر اساس خصوصیات ظاهری و ترکیبات شیمیایی داخلی<br>-غیرمخرب<br>-غیرتماسی | - قابلیت تشخیص مواد عمقی تر از سطح بیرونی<br>-غیرمخرب<br>-غیرتماسی | -امکان تفکیک بذور زنده از غیر زنده در ۳ ساعت ابتدایی آزمون جوانه زنی و امکان انبارداری مجدد بذور زنده<br>-سرعت بالا<br>-غیرمخرب<br>-غیرتماسی | -امکان استفاده بر خط<br>-غیرمخرب<br>-غیرتماسی |

## ۸. نتیجه گیری

سیستم‌های ارزیابی غیرمخرب مبتنی بر نور و/ یا مبتنی بر تصویر به تدریج در سال‌های اخیر در بازرسی کیفی خارجی و داخلی بذرها مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند. این بررسی به طور خلاصه فناوری‌های نوظهور وکاربردهای اصلی آنها در تشخیص زنده ملندن بذر را معرفی کرده و مقایسه‌ای اجمالی بر این تکنیکها داشته است. پتانسیل تکنیک‌های تصویربرداری طیفی در ارائه اطلاعات غنی و ارزشمند در مورد صفات کیفیت بذر و پارامترهای فنوتیپی از ادغام میان ابزارهای تصویربرداری فضایی، طیف‌سنجی و کمومتری حاصل می‌شود که این تکنیک‌ها را به ابزاری ایده‌آل در مطالعه ویژگی‌های مختلف مورفولوژیکی، فیزیکوشیمیایی و فیزیولوژیکی بذر تبدیل می‌کند. اگرچه برای گسترش استفاده از این تکنیک‌ها باید به حل مشکل گران بودن این روش‌ها با استفاده از الگوریتم‌های قابل بررسی با کامپیوتر که هزینه کمتری دارد، بیشتر اندیشید. همچنین کاربرد این روش‌ها را به جهت تهیه بلنک اطلاعاتی گسترده و جامع، در بررسی بذور مختلف می‌بایست ترویج داد. ضمنا همان طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، یکی از مشکلات استفاده از این آزمونها، تاثیر محیط بر روی نتیجه بررسی‌ها با استفاده از این تکنیک هاست، به همین جهت، توسعه روش‌هایی جهت به حداقل رساندن تغییرات محیط در هنگام اجرای این تکنیکها، یا ارائه روش‌های آنالیزی که بتواند نقش تغییرات محیطی را به حداقل برساند، ضروری است. نهایتا اینکه زنده‌مانی بذر در خصوصیات کیفی بذر که بازتاب جولنه زنی بالقوه آن است از اهمیت زیادی برخوردار است و تکنیک‌های غیرتهاجمی، ابزارهای سریع، دقیق، قابل اعتماد و ساده برای ارزیابی زنده‌مانی بذرها هستند.

## ۹. منابع

[1] Talha Javed, T. Javed, Irfan Afzal, I. Afzal, Rubab Shabbir, R. Shabbir, Kamran Ikram, K. Ikram, Muhammad Saqlain Zaheer, M. Saqlain Zaheer, Muhammad Faheem, M. Faheem, Hafiz Haider Ali, H.

spectroscopy and linear discriminant analysis,Food Research International,Volume 51, Issue 2, 2013,924-928.
[14] GuoJun Shi, XiaoWen Zhang, Ge Qu, and ZhengGuang Chen . Classification of Rice Varieties Using SIMCA Applied to NIR Spectroscopic Data. ACS Omega 2022 *7* (50), 46623-46628
DOI: 10.1021/acsomega.2c05561
[15] Daneshvar, A., Tigabu, M., Karimidoost, A., et al., 2015. Single seed near infrared spectroscopy discriminates viable and non-viable seeds of Juniperus polycarpos. Silva Fennica 49 (5).
[16] Dumont, J., Hirvonen, T., Heikkinen, V., et al., 2015. Thermal and hyperspectral imaging for Norway spruce (Picea abies) seeds screening. Comput. Electron. Agric. 116, 118–124.
[17] Shetty, N., Min, T.G., Gislum, R., et al., 2011. Optimal sample size for predicting viability of cabbage and radish seeds based on near infrared spectra of single seeds. J. Near Infrared Spectrosc. 19 (6), 451–461.
[18] Zhou Y, Chen Z, Liu T, Mao J. Extended Canonical Variates Analysis for Wine Origin Discrimination by Using Infrared Spectroscopy. Chemistry Letters [Internet]. 2016 May 5 [cited 2016 Nov 5];45(5):564-566.
[19] Nicolaï, B.M., Defraeye, T., Ketelaere, B.D., et al., 2014. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. Annu. Rev. Food Sci. Technol. 5 (1), 285–312.
[20]. Ambrose, A., Lohumi, S., Lee, W.H., et al., 2016b. Comparative nondestructive measurement of corn seed viability using Fourier transform near-infrared (FT-NIR) and Raman spectroscopy. Sens. Actuator B-Chem. 224, 500–506.
[21] Olesen MH, Shetty N, Gislum R, Boelt B. Classification of Viable and Non-Viable Spinach (Spinacia Oleracea L.) Seeds by Single Seed near Infrared Spectroscopy and Extended Canonical Variates Analysis. Journal of Near Infrared Spectroscopy. 2011;19(3):171-180.
[22] ElMasry, M.G., Nakauchi, S., 2016. Image analysis operations applied to hyperspectral images for non-invasive sensing of food quality – a comprehensive review. Biosys. Eng. 142, 53–82.
[23] Yang, G.Y., Wang, Q.Y., Liu, C., et al., 2018. Rapid and visual detection of the main chemical compositions in maize seeds based on Raman hyperspectral imaging. Spectroc. Acta Pt. A-Molec. Biomolec. Spectr. 200, 186–194.
[24] Li-Chan, E., Nakai, S., Hirotsuka, M., 1994. Raman
Haider Ali, & Javaid Iqbal, J. Iqbal. (2022). Seed coating technology: An innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences.*
doi: 10.1016/j.jssas.2022.03.003
[2] Huang, M., Wang, Q.G., Zhu, Q.B., et al., 2015. Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. Seed Sci. Technol. 43 (3), 337–366
[3] Rahman, A., Cho, B.K., 2016. Assessment of seed quality using non-destructive measurement techniques: a review. Seed Sci. Res. 26 (04), 285–305
[4] Sun, Q., Wang, J.H., Sun, B.Q., 2007. Advances on seed vigor physiological and genetic mechanisms. Agric. Sci. China 6 (9), 1060–1066.
[5] Marcos Filho, J., 2015. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. Sci. Agric. 72 (4), 363–374.
[6] Du, C.J., Sun, D.W., 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. Trends Food Sci. Technol. 15 (5), 230–249
[7] Elmasry, G., Kamruzzaman, M., Sun, D.W., 2012. Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: a review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 52 (11), 999–1023.
[8] Qiu, G.; Liu, Y.; Wang, N.; Bennett, R.S.; Weckler, P.R. Non-Destructive Method for Estimating Seed Weights from Intact Peanut Pods Using Soft X-ray Imaging. Agronomy 2023, *13*, 1127. https://doi.org/10.3390/agronomy13041127
[9] Huang, H., Yu, H., Xu, H., et al., 2008. Near infrared spectroscopy for on/in-line monitoring of quality in foods and beverages: a review. J. Food Eng. 87 (3), 303–313.
[10] Xia, Y., Huang, W., Fan, S., et al., 2018. Effect of fruit moving speed on online prediction of soluble solids content of apple using Vis/NIR diffuse transmission. J. Food Process Eng. 41 (8), e12915.
[11] Fu, X., Ying, Y., 2016. Food safety evaluation based on near infrared spectroscopy and imaging: a review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 56 (11), 1913–1924
[12] Ye N, Zhong S, Fang Z, Gao H, Du Z, Chen H, Yuan L, Pan T. Performance Improvement of NIR Spectral Pattern Recognition from Three Compensation Models' Voting and Multi-Modal Fusion. *Molecules*. 2022; 27(14):4485.
[13] Bizerra Brito.A.L., Rodrigues Brito. L., Honorato.F.A., Coelho Pontes.MJ., Lira Pontes L.F.B., Classification of cereal bars using near infrared

[37] Chen, Q., Zhang, C., Zhao, J., et al., 2013. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety. TrAC Trends Anal. Chem. 52, 261–274.
[38] Men S, Yan L, Liu J, Qian H, Luo Q. A, Classification Method for Seed Viability Assessment with Infrared Thermography. Sensors (Basel). 2017 Apr 12;17(4):845.
doi: 10.3390/s17040845. PMID: 28417907; PMCID: PMC5424722.
[39] Schoeman, L., Williams, P., du Plessis, A., et al., 2016. X-ray micro-computed tomography (μCT) for non-destructive characterisation of food microstructure. Trends Food Sci.Technol. 47, 10–24.
[40]. Ahmed, M.R., Yasmin, J., Collins, W., et al., 2018. X-ray CT image analysis for morphology of muskmelon seed in relation to germination. Biosyst. Eng. 175, 183–193.
[41] Agelet, L.E., Hurburgh, C.R., 2014. Limitations and current applications of near infrared spectroscopy for single seed analysis. Talanta 121, 288–299
[42] Ji, G., Huang, G., Yang, Z., et al., 2015. Using consensus interval partial least square in near infrared spectra analysis. Chemometr. Intell. Lab. 144, 56–62.
[43] Qin, J., Kim, M.S., Chao, K., et al., 2019. Advances in Raman spectroscopy and imaging techniques for quality and safety inspection of horticultural products. Postharvest Biol. Technol. 149, 101–117.
[44] Chelladurai, V., Karuppiah, K., Jayas, D.S., et al., 2014. Detection of Callosobruchus maculatus (F.) infestation in soybean using soft X-ray and NIR hyperspectral imaging techniques. J. Stored Prod. Res. 57, 43–48.
[45] Borràs, E., Ferré, J., Boqué, R., et al., 2015. Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment – a review. Anal. Chim. Acta 891, 1–14
[46] Hong,S. J., Seongmin Park,S., Lee,A., Kim,S. Y., Kim. E, Lee. C.H., Kim, G.,2023. Nondestructive prediction of pepper seed viability using single and fusion information of hyperspectral and X-ray images, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 350. 114151.
Spectroscopy as a Probe of Protein Structure in Food Systems.
[25] Herrero, A.M., 2008. Raman spectroscopy a promising technique for quality assessment of meat and fish: a review. Food Chem. 107 (4), 1642–1651.
[26] Seo, Y.W., Ahn, C.K., Lee, H., et al., 2016. Non-destructive sorting techniques for viable pepper (Capsicum annuum L.) seeds using Fourier transform near-infrared and Raman spectroscopy. J. Biosyst. Eng. 41 (1), 51–59.
[27] Ring, F., 2010. Thermal imaging today and its relevance to diabetes. J. Diabetes Sci. Technol. 4 (4), 857.
[28] Ring, E.F.J., 2007. The historical development of temperature measurement in medicine. Infrared Phys. Technol. 49 (3), 297–301.
[29] Hardy, J.D., 1934. The radiation of heat from the human body. 2. A comparison of some methods of measurement. J. Clin. Invest. 13 (4), 605–614.
[30] ElMasry, G., Elgamal, R., Mandour, N., Gou, P., Al-Rejaie, S., Belin, E., Rousseau, D. (2020). Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications. Food Research International, 131, 109025.
[31] Fernández-Cuevas, I., Bouzas Marins, J.C., Arnáiz Lastras, J., et al., 2015. Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: a review. Infrared,Phys. Technol. 71, 28–55.
[32] Picazo-Ródenas, M.J., Royo, R., Antonino-Daviu, J., et al., 2013. Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: application to fault diagnosis. Eng. Failure Anal. 35, 178–192.
[33] Usha, K., Singh, B., 2013. Potential applications of remote sensing in horticulture – a review. Sci. Hortic. 153, 71–83.
[34] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., et al., 2014. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. Sensors 14 (7), 12305–12348.
[35]. Meola, C., 2012. Origin and Theory of Infrared Thermography.
[35] Howell, J., Siegel, R., Mengüç, M.P., 2010. Thermal Radiation Heat Transfer.
[36] Gamal ElMasry, Ramadan ElGamal, Nasser Mandour, Pere Gou, Salim Al-Rejaie, Etienne Belin, David Rousseau,Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications,Food Research International,Volume 131,2020.