

کاربرد طیف‌سنجی رامان در بررسی غیرمخرب پارامترهای کیفی گوجه‌فرنگی

علی محمدنیکبخت¹، تیمور توکلی هاشجین^{2*}، رسول ملک‌فر³، برات قبادیان²

1- دانشجوی دکتری تخصصی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس (هیئت علمی دانشگاه ارومیه)

2- استاد و دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

3- دانشیار گروه فیزیک اتمی-مولکولی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: 87/7/3 تاریخ پذیرش: 87/9/3)

چکیده

روشهای غیر مخرب در کشاورزی از این جهت حایز اهمیت می‌باشد که محصول مورد بررسی به چرخه عرضه و مصرف برگشته و نیز مشکلات نمونه‌گیری روشهای مخرب را ندارند. بنابراین مهمترین مساله در کیفیت سنجی روی خط (on/in line) در مقیاس صنعتی این است که نباید هیچ گونه آسیبی به میوه‌جات و سبزیجات وارد شود. کوچکترین آسیب چه مشهود و چه غیرمشهود، باعث بوجود آمدن مشکلاتی در فرآوری، انبارداری و یا گسترش بیماری خواهد شد. در سالهای اخیر پردازش تصویر، روشهای نوری مانند طیف‌بینی رامان، NMR و NIR، انتشار صوت، روش فراصوت و غیره، در حال گسترش و توسعه می‌باشد که هر کدام برای اندازه‌گیری پارامتر کیفی خاصی کاربرد دارند. برای درجه بندی میوه‌ها روشهای مختلفی بکار برده می‌شود که اغلب آنها مخرب و یا کند می‌باشند ولی اندازه‌گیری سریع، غیر مخرب و دقیق عامل‌های کیفی میوه‌ها از جمله میوه گوجه‌فرنگی نظیر میزان مواد جامد محلول، pH و رنگ از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. برای همین منظور از روش رامان برای اندازه‌گیری غیرمخرب این خصوصیات در گوجه‌فرنگی استفاده شد. قندهای موجود در گوجه‌فرنگی نیز در آزمایش HPLC بررسی شدند و طیف‌گیری از این قندها توسط دستگاه رامان انجام شد. نتایج حاصل حاکی از اینست که طیف‌های بدست آمده از پراکندگی رامان می‌توانند نوارهای بسیار مهمی را بروز دهند. این نوارها را می‌توان به ارتعاش‌های ν_1 ، ν_2 و ν_3 کارتنوئیدهای α -carotene و β -carotene نسبت داد که به دلیل ارتعاشات کششی کربن - کربن ($C=C$ و $C-C$) در زنجیره اصلی بوجود می‌آیند و بیانگر رنگ میوه می‌باشند. همچنین با مقایسه طیف‌های قند خالص و طیف‌های گرفته شده از میوه به صورت غیرمخرب می‌توان اثر انگشت‌های طیفی مربوط به قندها را نیز در محدوده طیفی 3000 cm^{-1} و 2300 cm^{-1} کاوش نمود. بطور کلی می‌توان طیف‌سنجی رامان را به عنوان روشی مطمئن، سریع و کارا در اندازه‌گیری عامل‌های کیفی میوه‌ها اعم از خصوصیات داخلی (قند) و خارجی (رنگ) پیشنهاد نمود.

کلیدواژگان: طیف‌سنجی رامان، گوجه‌فرنگی، ارزیابی غیر مخرب، عامل‌های کیفی

* مسئول مکاتبات: ttavakoli@modares.ac.ir

1- مقدمه

اندازه‌گیری پارامترهای کیفی و کمی در محصولات کشاورزی به صورتی که میوه یا محصول مورد نظر هیچ گونه آسیبی ندیده و دوباره به چرخه مصرف برگردد، را آزمون غیرمخرب گویند [1]. آزمایش‌هایی غیرمخرب محسوب می‌شوند که اثرات مخرب فتوفیزیکی، حرارتی، شیمیایی، مکانیکی و فتوشیمیایی نداشته باشند [2]. روش‌های متعددی تاکنون برای کیفیت سنجی غیر مخرب محصولات کشاورزی ابداع شده‌اند که تنها برخی از آنها توانسته شرایط فوق را برآورده ساخته و از لحاظ فنی و صنعتی توجیه داشته باشند (جدول 1).

جدول 1 روش‌های مختلف اندازه‌گیری غیر مخرب پارامترهای کیفی

محصولات کشاورزی [3]

$$P = a_0 E_0 \cos 2p n_0 t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial a}{\partial q} \right) \left[E_0 [\cos \{2p(n_0 + n_m)t\} + \cos \{2p(n_0 - n_m)t\}] \right] \quad (1)$$

که در آن، P ممان دو قطبی القایی، قطبش‌پذیری مولکول مرتعش نشده، میدان الکتریکی، تغییرات قطبش‌پذیری نسبت به فاصله دو اتم، دامنه ارتعاش، فرکانس نور فرودی، فرکانس مولکول و t زمان است. معادله 1 نشان می‌دهد موقعی که موج نوری با یک مولکول دو اتمی ارتعاش کننده برهم‌کنش می‌کند، ممان دو قطبی القایی (P) دارای سه جزء وابسته به زمان شامل پراکندگی ریلی، رامان استوکس و آنتی استوکس می‌باشد [5]. در این تحقیق از جزء رامان استوکس جهت کاوش خصوصیات مولکولی استفاده شده است.

طیف‌سنجی پراکندگی رامان نسبت به طیف‌سنجی رایج IR (که کاربردهای وسیعی در کشاورزی پیدا کرده است) مزایای برجسته‌ای دارد از آن جمله:

- پدیده رامان تکنیکی ایده‌آل برای مطالعات بیولوژیکی است، چراکه آب یک پخش‌کننده رامان ضعیف به شمار می‌رود و در نتیجه تأثیر آن در ایجاد خطا بسیار اندک است. این مسأله به خصوص در مورد محصولات کشاورزی که بخش اعظمی از مواد آنها را آب تشکیل می‌دهد، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند (برای مثال بیش از 90% از جرم گوجه فرنگی را آب تشکیل می‌دهد).

- رامان می‌تواند محدوده وسیعی از نواحی طیفی را (10 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1}) در یک بار ثبت طیفی پوشش دهد. این در حالیست که

مبنای فیزیکی	روش اندازه‌گیری	خصوصیات قابل اندازه‌گیری
نوری	پردازش و تحلیل تصویر	اندازه، شکل، رنگ، عیوب ظاهری
طیف‌سنجی	عبوری، بازتابی و جذبی	رنگ، عیوب داخلی، قند، اسیدیته، SSC، عیوب ظاهری، سفتی
طیف سنجی لیزری		
اشعه X	اشعه X	حفره‌های داخلی، ساختار و درجه رسیدگی
مکانیکی	ارتعاشی	سفتی، رسیدگی، ویسکوالاستیسیته
صوتی و فراصوتی		سفتی، رسیدگی، ویسکوالاستیسیته، حفره‌های داخلی، قند و چگالی
الکترومغناطیس	NMR و MRI	رطوبت، قند، حفره‌های داخلی

روش‌های نوری، مکانیکی، شیمیایی و امواج الکترومغناطیسی و صوتی در توسعه آزمون‌های غیرمخرب نقش اساس داشته‌اند. اما روش‌های به‌کار رفته قادرند پارامترهای محدودی از میوه‌ها را کاوش کنند. بنابراین، لازم است شرایط حاکم در این روش‌ها به دقت بررسی شده و در گزارش یا ثبت نتایج آزمایش لحاظ شوند. استفاده از تابش‌های منعکس شده، عبوری و پراکنده شده به منظور اندازه‌گیری خواص داخلی و خارجی میوه‌جات از دیر باز مطرح بوده است. به تازگی طبقه‌بندی میوه‌ها و برخی سبزیجات بر حسب رنگ آنها رواج پیدا کرده‌است و چون با تغییر رنگ قابلیت بازتابش و عبوردهی نور از یک

فن آوری حتی در سازمان ناسا نیز برای تشخیص مواد در مریخ و ماه استفاده می شود [10]. حتی طیف سنج های دستی رامان به مرحله تولید صنعتی رسیده اند و استفاده می شوند [10].

میوه گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) منبع غنی از آنتی اکسیدان، ویتامین ها و ترکیبات غذایی می باشد [11] و تشخیص و بررسی دقیق میزان این ترکیبات در ارزیابی کیفی محصول عرضه شده به بازار نقش عمده ای دارد [12]. از طرفی ارزیابی معمول این خصوصیات در آزمایشگاه مخرب بوده و میوه مورد آزمایش از بین می رود. همچنین روش های آزمایشگاهی مرسوم بسیار وقت گیر بوده و علاوه بر آن، به واسنجی و اندازه گیری های متعدد نیازمند است. طیف سنجی پراکندگی رامان به عنوان یک تکنیک رو به رشد و قدرتمند می تواند گزینه مناسبی برای آزمون غیر مخرب خصوصیات کیفی محصول از جمله میزان قند، pH و رنگ باشد. میزان قند محلول و اسیدیته مشخصه های مهمی برای ارزیابی رسیدگی و کیفیت میوه ها به شمار می روند. مهمترین ویژگی ظاهری رسیدگی گوجه فرنگی رنگ می باشد که فاکتور مهمی در تصمیم گیری مشتری برای خرید آن است. درجه رسیدگی نیز معمولاً با استفاده از چارت های رنگی تعیین می شود [13]. لازم به ذکر می باشد که تا بحال اندازه گیری بیش از یک عامل کیفی با استفاده از روش های طیف سنجی به دلیل پیچیدگی تفسیر و حجم زیاد متغیرها انجام نشده است. همچنین استفاده از پراکندگی رامان در اندازه گیری خصوصیات کیفی گوجه فرنگی و بخصوص رنگ و قند در منابع گزارش نشده است. هدف از این تحقیق بررسی طیف سنجی رامان در کاوش عامل های کیفی گوجه فرنگی و پتانسیل سنجی کاربرد آن در تشخیص غیر مخرب این عامل ها می باشد.

2- مواد و روشها

دستگاه طیف سنج Thermo Nicolet از نوع پاشنده (dispersive) برای بدست آوردن طیف های رامان مورد استفاده قرار گرفت. لیزر 532 نانومتر با توان حداکثر 100 میلی وات به عنوان منبع نوری بکار گرفته شد اما به دلیل جلوگیری از اثرات فتوشیمیایی و فوتوفیزیکی نور تک فام لیزر، به صورت نرم افزاری از توان منبع نوری کاسته شد و در تمام آزمایش ها از توان 30 میلی وات استفاده شد. وضوح طیف های گرفته شده 2 cm^{-1} بوده که در طیف سنجی یک وضوح ایده آل به شمار می رود، و پهنای نوار علامت های گرفته شده بین عدد موج های cm^{-1}

برای پوشش چنین محدوده ای با تکنیک IR به شبکه های پخش کننده، صافی ها و آشکارسازهای متنوعی نیاز هست و باید برای هر محدوده این تجهیزات را تغییر داد [6].

- قطر اشعه لیزری که به عنوان منبع نوردهی در دستگاه طیف سنج رامان استفاده می شود، در حدود 0/2 تا 2 میلی متر است. به عبارت دیگر می توان با نمونه های بسیار ریز و با حجم کم هم کار کرد و یا مناطق کوچک روی میوه را هم کاوش نمود [7].

علاوه بر آن، حساسیت بالا، زمان کوتاه آزمایش، عدم نیاز به آماده سازی نمونه و غیر مخرب بودن این تکنیک، مزایای دیگری هستند که بر جذابیت استفاده از طیف سنجی پراکندگی رامان افزوده اند [7]. با این توصیف تکنیک رامان، روشی رو به رشد است و هر روز

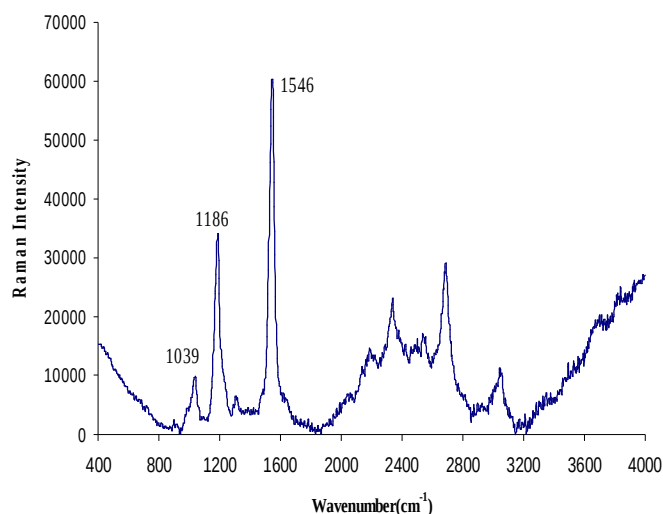
ابعاد جدیدی از کاربردهای آن برای محققان روشن می شود [5]. در حیطه کاربرد طیف سنجی در ارزیابی مواد کشاورزی تحقیقات فراوانی بویژه با تکنیک IR انجام گرفته است، اما کاربرد روش رامان در ارزیابی غیر مخرب محصولات کشاورزی، زمینه نوینی است که همچنان رو به رشد می باشد. با استفاده از تصاویر طیفی (396 تا 736 نانومتر) درجه رسیدگی گوجه فرنگی در مراحل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاکی از آنست که روش مذکور در مقایسه با تصاویر RGB^1 (نوعی از تصویر دیجیتال که در آن مقادیر پیکسل ها شدت های سه رنگ قرمز، سبز و آبی تصویر می باشند) نتیجه مطلوبتری ارائه می دهد [8]. لهدگی میوه سیب با طیف سنجی پراکندگی رامان، در تحقیقی به صورت غیر مخرب اندازه گیری شده است. در این تحقیق سیب ها از ارتفاع معینی سقوط داده شدند تا لهدگی ظاهر شود، سپس با استفاده از دستگاه رامان Thermo Nicolet، طیف های بدست آمده مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بررسی مطلوب گزارش شده است [9]. از طیف های رامان برای تشخیص میزان آفت کش ها بر روی سطح ظاهری میوه ها استفاده شده است. در این کار دو نوع لیزر در طول موج های مختلف بکار برده شد و تأثیر آنها در کاوش میزان آلودگی سطحی میوه بررسی شد. لیزر با طول موج 1064 nm نتیجه قابل قبولی ارائه کرد [7]. استفاده از رامان در پزشکی به مراتب از کشاورزی وسیع تر بوده است بطوریکه موسسات علمی و آزمایشگاه های تشخیص دارویی بسیاری در حال استفاده از فن آوری پدیده رامان در تشخیص لوازم دارویی و بهداشتی می باشند. این

1. Red-Green-Blue

شد. تزریق استاندارد‌ها در غلظت‌های 2000 ppm تا 10000 ppm انجام شد و سطح زیر پیکهای مربوطه به عنوان شاخص اصلی محاسبه گردید. منحنی استاندارد بر اساس این مقدار برای غلظت‌های مختلف رسم شد و در نهایت نمونه‌های تهیه شده در سه تکرار به دستگاه HPLC تزریق شد و با توجه به زمان بازداری، سطح زیر پیک هر قند، نوع و غلظت هر کدام تعیین گردید.

3- نتایج و بحث

مطابق تحقیقات قبلی که توسط طیف‌سنجی رزونانسی رامان (RRS^1) بر روی کارتنوئیدهای برخی محصولات کشاورزی انجام شده است، این نوارها را می‌توان به ارتعاش‌های V_1 ، V_2 و V_3 کارتنوئیدهای α -carotene و β -carotene نسبت داد که به دلیل ارتعاشات کششی کربن - کربن ($C=C$ و $C-C$) در زنجیره اصلی بوجود می‌آیند [14]. به طور کلی طیف‌های ارتعاشی کارتنوئیدها سه منطقه مشخصه ارتعاش‌های کششی $C-C$ را دارا هستند. همانطور که در شکل‌های 1 و 2 دیده می‌شود، نوارهای اصلی هر سه منطقه در محدوده عدد موجهای 1030، 1180 و 1540 در تمامی طیف‌ها ظهور کرده است. از طرفی میوه گوجه فرنگی قرمز معمولی حاوی β -lycopene، γ -carotene و α -carotene می‌باشد [15].

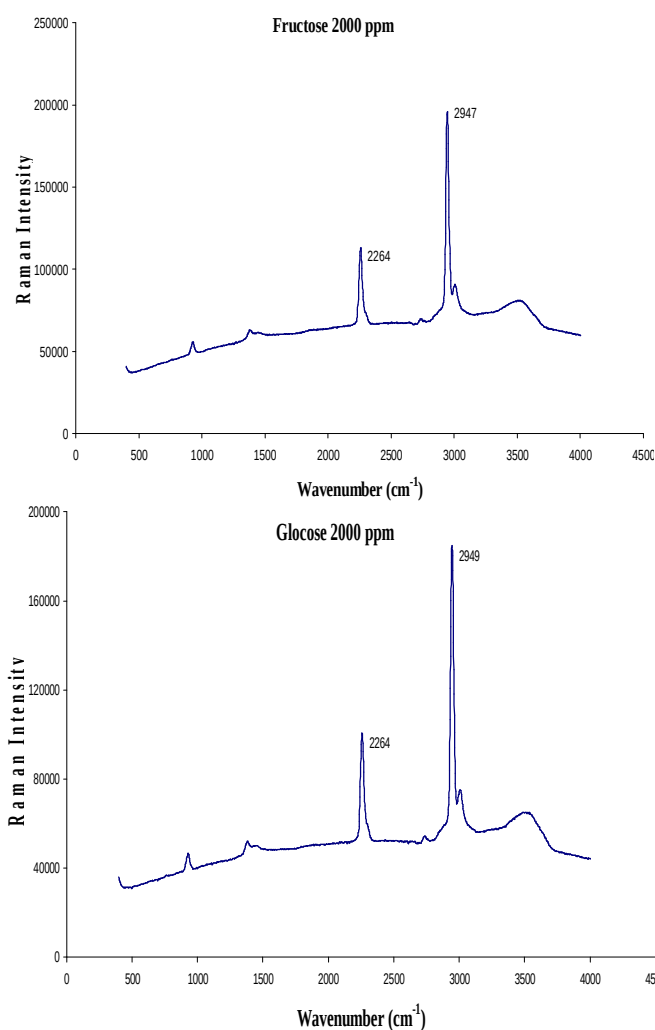


شکل 1 طیف‌های رامان در گوجه‌فرنگی، میوه در مرحله رسیدگی قرمز شدن (صورتی)

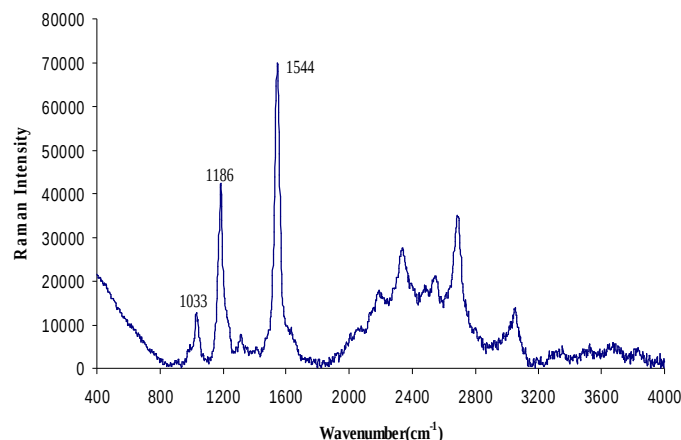
400 و 4000 cm^{-1} انتخاب شد که در محدوده مادون قرمز قرار گرفته و بهترین گستره جهت نمایش ترکیبات مولکولی می‌باشد. آب میوه نمونه‌های مورد آزمایش پس از انجام آزمایش‌های نوری به آزمایشگاه صنایع غذایی منتقل شده و آزمون‌های pH، قند محلول و رنگ بر روی آنها انجام شد. از دستگاه Metrohm (827 pH Lab, UK) برای اندازه‌گیری pH نمونه‌ها و از رفراکتومتر ATAGO مدل DR-A1 (ATAGO, CO. Ltd. Japan) برای اندازه‌گیری میزان مواد جامد محلول به صورت Brix استفاده شد. تجزیه و تحلیل طیف‌های بدست آمده ابتدا در نرم‌افزار OMNIC NICOLET انجام شد که به صورت بسته نرم‌افزاری در کنار دستگاه طیف‌سنج قرار دارد و سپس طیف‌ها به صورت علائم یک‌بعدی وارد محیط Excel و Matlab شده و مورد پردازش قرار گرفتند. بدین ترتیب پیش‌زمینه فلورسانسی که به عنوان مهم‌ترین مشکل پردازشی مطرح می‌باشد، حذف شد. همچنین جهت یافتن نوارهای مهم و تعیین کننده، مشتق‌گیری طیف‌ها انجام شد. در نهایت اشکال بخش نتایج به صورت واضح توانستند نوارهای موثر و مهم تعیین کننده خصوصیات داخلی میوه را بروز دهند.

برای هر 100 گرم میوه گوجه فرنگی، منابع صنایع غذایی ترکیبات مختلفی را گزارش نموده‌اند که البته تفاوت چندانی با همدیگر نداشته و می‌توان به طور تقریبی از آنها استفاده نمود. بر این اساس، باید در میوه موردنظر و طیف‌های گرفته شده، در جستجوی نوارهای مربوط به کربوهیدرات‌ها (که در گوجه‌فرنگی همان قندها گزارش شده است) نیز بود. از این‌رو در یک آزمایش جداگانه، با استفاده از روش کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) میزان این قندها (فروکتوز، ساکاروز، گلوکز) تعیین شدند. با توجه به حساسیت این روش و به منظور به حداقل رساندن خطا در اندازه‌گیری نمونه‌ها، باید نمونه تا حد ممکن شفاف باشد. به این منظور جهت حذف ذرات معلق، ابتدا آب نمونه تهیه شده با سانتریفوژ یخچال دار مدل SIGMA 4 K 15 کشور آلمان در 1000 rpm سانتریفوژ شد. پس از سانتریفوژ، نمونه‌ها در دو مرحله کاملاً صاف شده و در نهایت 20 میکرولیتر از این نمونه صاف شده به دستگاه HPLC (WATERS 600, E USA) با ستون BondapackTM C18 (250mm×4.6 mm) تزریق شد. حلال استونیتریل/آب (25-75) و سرعت جریان 1 میلی لیتر بر دقیقه به عنوان فاز متحرک استفاده شد. عمل جداسازی در دمای اتاق و با آشکارساز RI (Refractive Index) از شرکت WATERS انجام

نتایج حاصل از آزمایش HPLC نشان داد که عمده ترکیبات قندی در میوه گوجه فرنگی مربوط است به گلوکز و فروکتوز، بطوریکه در هر 100 گرم میوه کامل به طور متوسط 3 تا 4 گرم گلوکز و فروکتوز (به صورت مجموع) وجود دارد. به منظور یافتن اثر انگشت‌های طیفی مربوط به این ترکیبات، استانداردهای تهیه شده با غلظت‌های 2000، 4000، 6000، 8000 و 10000 ppm از هر سه قند مورد آزمایش طیف‌سنجی به صورت خالص قرار گرفتند. در نهایت طیف‌های بدست آمده مطابق شکل 4 (به عنوان نمونه) مورد بررسی قرار گرفتند.

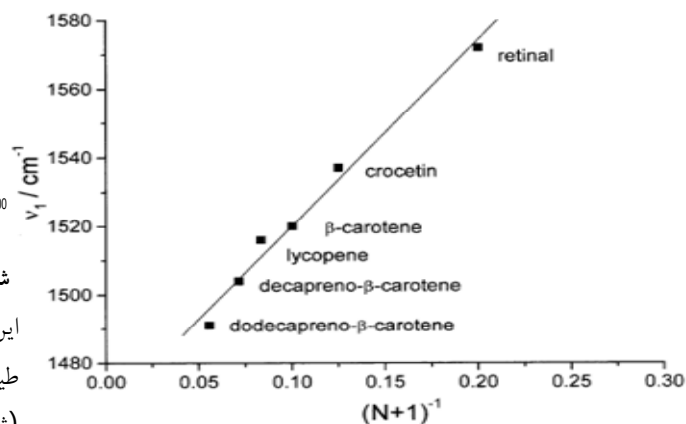


شکل 4 طیف رامان بدست آمده از فروکتوز و گلوکز با غلظت 2000 ppm این طیف‌ها اطلاعات بسیار مفیدی در اختیار گذاشت. با مقایسه این طیف‌ها و طیف‌های گرفته شده از میوه به صورت غیرمخرب (شکل‌های 1 و 2)، می‌توان اثر انگشت‌های طیفی مربوط به قندها را نیز در طیف‌ها پیدا کرد. از جمله در محدوده طیفی 3000 cm^{-1} و 2300 cm^{-1} می‌توان باندهای مربوط به قندها را نیز کاوش نمود. موقعیت

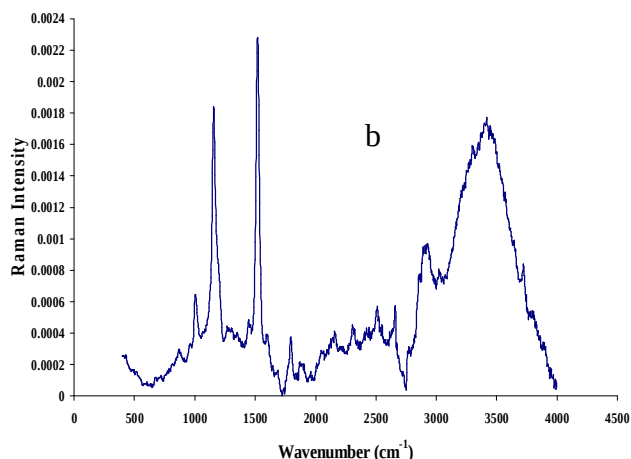
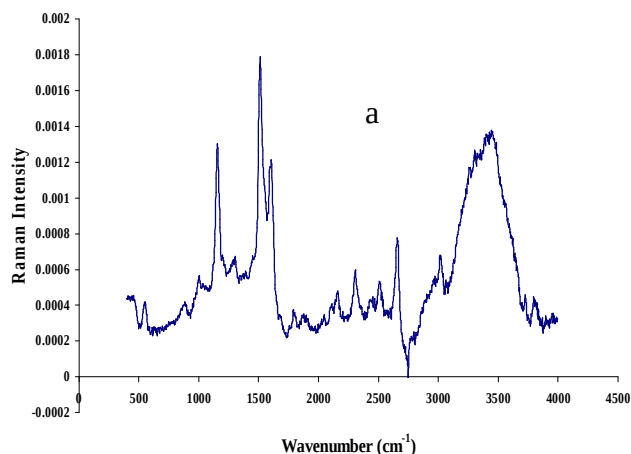


شکل 2 میوه کاملاً رسیده، ارتفاع پیک‌های مربوط به کارتنوئیدها قابل توجه است

در شکل 3 مشاهده می‌شود که عدد موج ν_1 در کارتنوئیدها با افزایش تعداد پیوندهای دوگانه $\text{C}=\text{C}$ در زنجیره اصلی این ترکیبات (N) کاهش می‌یابد که این کاهش سیر نسبتاً خطی نیز دارد [14]. این راهنمای خوبی است برای کاوش موقعیت باندهای مربوط به کارتنوئیدها در این تحقیق. چراکه مطابق رسم تحقیقات طیف‌سنجی یا باید از آزمایش استانداردهای موجود با استفاده از روشهای تجزیه دستگاهی و سپس بررسی طیفی این استانداردها به موقعیت باندهای پی برد، و یا اینکه از روش‌های دیگر از جمله پایگاه طیفی بهره جست. از طرفی می‌دانیم که لیکوپن در زنجیره اصلی خود حاوی تعداد بیشتری پیوندهای دوگانه کربن می‌باشد تا کاروتن‌ها. بنابراین بررسی دقیق‌تر نوار ν_1 در 1540 cm^{-1} حضور کاروتن‌ها را بیشتر توجه می‌کند تا لیکوپن، در حالیکه ν_2 در 1180 cm^{-1} ($\text{C}-\text{C}$) بیانگر حضور لیکوپن می‌باشد. باند سوم نیز که ضعیفتر از بقیه عمل می‌کند به ارتعاش‌های کششی $\text{C}-\text{CH}_3$ نسبت داده شده است [3].



شکل 3 رابطه بین موقعیت عدد موج و تعداد پیوندهای دوگانه $\text{C}=\text{C}$ در زنجیره اصلی کارتنوئیدها

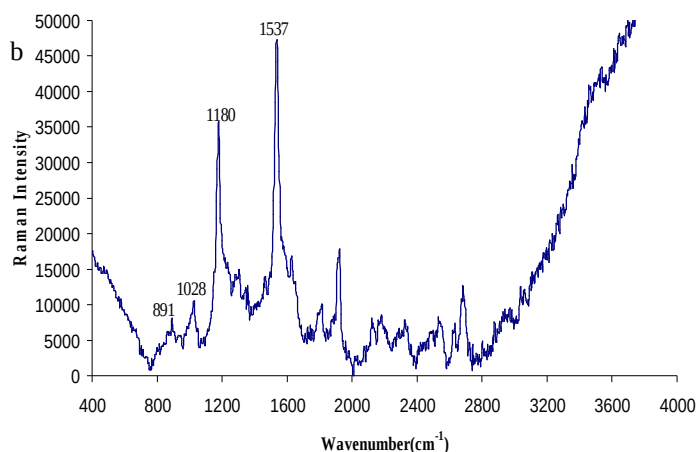


شکل 6 مقایسه کمی دو میوه نیمه رسیده (a) و بیش رسیده (b). اختلاف

شدت باندها بعد از نرمالیزاسیون داده‌ها کاملاً مشهود است به طور مثال شدت باند اول در میوه نیمه رسیده 0/00178 و در میوه بیش رسیده 0/00226 می باشد (اعداد نشان داده شده بعد از اعمال نرمالیزاسیون بوده و بنابراین مقدارشان کاهش یافته است). با جمع‌بندی دلایل فوق، طیف‌سنجی رامان روش مناسبی است برای اندازه‌گیری کمی و کیفی رنگ موادی که حاوی رنگدانه‌های از جنس کارتنوئیدها می‌باشند. بنابراین به طور قطع می‌توان از این روش جدید در حوزه تشخیص رنگ مواد به صورت غیرمخرب بهره برد. اساساً به همین جهت است که روش طیف‌سنجی رامان در بسیاری از تحقیقات مربوط به رنگدانه‌ها حتی در مباحث غیر کشاورزی مانند نقاشی‌های هنری و پزشکی گزارش شده است [16]. نکته قابل توجه دیگر این است که طیف‌های گرفته شده روی گوجه فرنگی و متعاقباً باندهای مربوط به کارتنوئیدها که نمایانگر رنگ در محصول می‌باشند، در توان‌های بالای

باند اول و دوم تفاوت معنی‌داری در طیف‌های بدست آمده از دو نوع قند نشان ندادند.

باند 891 cm^{-1} که در شکل 5 ظاهر شده است، را می‌توان به ارتعاش CH نسبت داد که مبین کربوهیدرات‌های موجود در میوه می‌باشد [4]. همانطور که ملاحظه شد، این باند ضعیف بوده و در شکل 1 به طور واضح قابل تشخیص نمی‌باشد (هرچند در تحلیل سیگنالی طیف با استفاده از مشتق‌گیری ظاهر می‌شود) و دلیل آن هم وجود باند قویتر در محدوده کارتنوئیدهاست (1030 cm^{-1}) که باندهای مجاور را پوشش می‌دهد. اما احتمالاً می‌توان از همین طیف ضعیف نیز برای اندازه‌گیری مواد کربوهیدراتی بهره جست.



شکل 5 طیف رامان در گوجه‌فرنگی کاملاً رسیده. در این طیف علاوه بر طیف‌های قوی مربوط به رنگدانه‌های لیکوپن و کاروتن، پیک متوسطی از کربوهیدرات‌ها هم قابل مشاهده می‌باشد

1-3- قابلیت تحلیل کمی

نکته دیگر در مورد طیف‌ها اختلاف قابل توجه در شدت باندهاست که عمدتاً مربوط به میزان رسیدگی میوه و در نتیجه مقدار کمی رنگدانه هاست. البته این مقایسه کمی بعد از تغییرات گوناگون و پردازش سیگنال‌های طیفی صورت گرفته است. نرمالیزاسیون طیفی با استفاده از روش تقسیم شدت باندها به 1-norm انجام گرفت تا اثرات مختلف آزمایش و دستگاه که عمدتاً در شدت پیک‌ها ظاهر می‌شود، از بین رفته و بتوان تحلیل کمی نیز انجام داد (شکل 6). بدیهی است که غلظت کارتنوئیدها می‌بایست در شدت پراکندگی رامان اثرگذار باشد، این نکته را به وضوح می‌توان در شکل 5 مشاهده نمود.

به طور کلی محصولات کشاورزی و در نهایت سود اقتصادی بیشتر می‌باشد.

6- منابع

- [1]Tavakoli Hashtjin, T. (1382). Mechanics of Agricultural Products. Translation. Khadamate Farhangie Salekan. Tehran, Iran. Pp: 528.
- [2]Schrader, B., Klumpb, H.H., Schenzelc, K. and Schulz, H. (1999a). Non-destructive NIR FT Raman analysis of plants. Journal of Molecular Structure, 509: 201–212.
- [3]Schulz, H. and Baranska, M. (2007). Identification and quantification of valuable plant substances by IR and Raman spectroscopy. Vibrational Spectroscopy, 43: 13-25.
- [4]Edwards, H.G.M., Munshi, T. and Anstis, M. (2005). Raman spectroscopic characterisations and analytical discrimination between caffeine and demethylated analogues of pharmaceutical relevance. Spectrochimica Acta, Part A, 61: 1453–1459.
- [5]Lewis, I.R. and Edwards, H.G.M. (2001). Handbook of raman spectroscopy, from the research laboratory to the process line. Marcel Dekker, Inc. USA.
- [6]Ghiamati Yazdi, E. (1379). Biochemical Applications of Raman and Resonance Raman Spectroscopies. Translation. Mashhad, Iran. Pp: 251.
- [7]Zhang, P.X., Zhou, X., Cheng, A.Y.S. and Fang, Y. (2006). Raman spectra from pesticides on the surface of fruits. Journal of Physics: Conference Series, 28: 7-11.
- [8]Polder, G., VanDerHeijden, G.W.A.M and Young, I.T. (2002). Spectral image analysis for measuring ripeness of tomatoes. Transactions of the ASAE, 45(4): 1155-1161.
- [9]Gao, X., Heinemann, P.H. and Irudayaraj, J. (2003). Non-destructive apple bruise on-line test and classification with raman spectroscopy. American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASAE Annual Meeting, St. Joseph, Michigan. Paper No: 033025.
- [10]Anonymous. (2006). Raman spectroscopy: a complex technology moving from lab to the clinic ? and before too long, the marketplace. Available on-line at: <http://www.opticsreport.com/content/>

لیزر تغییر قابل توجهی نکرده و بنابراین انتخاب پایین ترین توان لیزر مطلوب به نظر می‌رسید.

لازم به توضیح است که واسنجی و اعمال روش‌های مدرن شیمی سنجی (chemometrics) بر روی طیف‌های بدست آمده و در نتیجه اندازه‌گیری کمی و مدل‌سازی داده‌ها مورد تحقیق بوده و نتایج آن در آینده نزدیک ارائه می‌گردد. بدیهی است که با اعمال چنین روش‌هایی می‌توان با در دست داشتن باندهای ارتعاشی حتی ضعیف‌تر از باندهای مذکور به مقایسه کمی و کیفی میوه‌ها و به طور کلی محصولات کشاورزی اقدام نموده و در نهایت با روشی غیر مخرب، سریع و مطمئن میوه‌ها را درجه‌بندی نمود.

4- نتیجه‌گیری

جدول 1 نشانگر جایگاه هرکدام از روش‌های مورد بحث و پارامترهای کیفی قابل اندازه‌گیری توسط هرکدام از آنها را نمایش می‌دهد. طیف‌سنجی رامان به عنوان روشی کارا و سریع و با ملاحظه برتریهای آن نسبت به روش‌های دیگر غیر مخرب می‌تواند ابزاری سودمند در اندازه‌گیری غیرمخرب پارامترهای کیفی محصولات کشاورزی محسوب شود. تجزیه و تحلیل طیف‌های بدست آمده در این تحقیق و مقایسه با تحقیقات پیشین، نشان داد که طیف‌سنجی رامان می‌تواند به خوبی جهت بررسی کیفی پارامترهای میوه گوجه‌فرنگی استفاده شود. هر سه منطقه مشخصه کارنوئیدها به عنوان شاخصه‌های رنگی در میوه‌جات در طیف‌های بدست آمده به طور واضح نشان داده شد و همچنین آزمایشات انجام شده توانست ثابت کند که میزان مواد جامد محلول و کربوهیدرات‌های موجود را نیز می‌توان اندازه‌گیری نمود.

5- پیشنهادها

نتایج حاصله در این تحقیق به خوبی نشان داد که با اعمال روش‌های پردازشی علائم طیفی و نیز اعمال شیمی سنجی به طور یقین قادر خواهیم بود اندازه‌گیری‌های کیفی و کمی ترکیبات داخلی محصولات کشاورزی را در سریعترین زمان و بدون تخریب میوه انجام داد. این روند در ادامه تحقیق مورد بحث بوده و امید است نتایج آن در آینده نزدیک ارائه گردد. بدیهی است که توسعه چنین روشی به ویژه در حوزه سخت‌افزاری گام بزرگی در جهت بهینه کردن کیفی میوه‌جات و

- Raman spectra of carotenoids in natural products. *Spectrochimica Acta, Part A*, 59: 2207_ 2212.
- [15]Schulz, H., Schutze, W. and Baranska, M. (2006). Fast determination of cartenoids in tomatoes and tomato products by raman spectroscopy. *ISHS Acta Horticulture*, 712. IV International Conference on managing Quality in Chains.
- [16]Petrich, W. (2001). Mid-infrared and raman spectroscopy for medical diagnostics. *Applied Spectroscopy Review*, 36 (2-3): 181-237.
- [11]Anonymous (1999). Tomatoes: *Lycopersicon esculentum*. USDA nutrient database for standard reference, release 13.
- [12]Lai, A., Santangelo, E., Soressi, G.P. and Fantoni, R. (2007). Analysis of the main secondary metabolites produced in tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill) epicarp tissue during fruit ripening using flourescence techniques. *Postharvest Biology and Technology*, 43: 335-342.
- [13]Camelo, A.F.L. and Gomez, P.A. (2004). Comparison of color indexes for tomato ripening. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 22 (3): 534-537.
- [14]Withnall, R., Chowdhry, B.Z., Silver, J., Edwards, H.G.M. and de Oliveira, L.F.C. (2003).

Application of Raman Spectroscopy for Non-Destructive Determination of Qualitative Parameters of Tomato

Nikbakht, A.M.¹, Tavakoli Hashjin, T.^{2*}, Malekfar, R.³, Ghobadian, B.⁴

1- PhD student, Department of Farm Machinery Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (Staff Member of Urmia University)

2- Professor, Department of Farm Machinery Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Atomic and Molecular Physics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

4- Associate Professor, Department of Farm Machinery Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Received: 87/7/3 Accepted: 87/9/3)

Non-destructive methods yield a great deal of importance in agriculture since the tested product can return to the market process, together with simplicity compared to destructive ones. Therefore, the major challenge in industrial on/in line quality evaluation is to eliminate damages in fruits and vegetables. Every visible or invisible damage can be followed by problems in storage, processing and diseases. During recent years, machine vision, optical techniques such as Raman, NIR, NMR spectroscopies, acoustics and ultrasonic techniques are the main methods which have gained worldwide attention. In order to sort and grade fruits, several methods are implemented which are mostly slow, time consuming, and destructive. Yet, a rapid, non-destructive and precise measurement of qualitative factors including pH, SSC and color in tomato fruit yields a great deal of importance. For such a purpose, Raman spectroscopy is implemented to measure qualitative parameters in tomato non-destructively. Sugar components in tomato were investigated with HPLC test and spectroscopy was conducted on pure sugars. Results showed that Raman spectra highlight the major bands related to the fruit components. Lycopene and Carotene as the major carotenoids in tomato fruit were detected explicitly through the spectra, in the way that all the three characteristic regions indexing such pigments (C-C and C=C stretching vibrations) are peaked as strong bands. Also carbohydrates could be shown by a medium band assigned to C-H vibration together with strong bands in $2300\text{ cm}^{-1} - 3000\text{ cm}^{-1}$ range. Thus it can be concluded that the technique is capable enough to be used in recognizing non-destructively both the external factors (e.g. color) and internal parameters (e.g. SSC) in tomato fruit.

Keywords: Raman Spectroscopy, Tomato Fruit, Non-Destructive Tests, Qualitative Parameters

* Corresponding Author E-Mail address: ttavakoli@modares.ac.ir