

قياس جودة الفواكه والخضراوات الطازجة: الطرق البصرية المتقدمة Measuring Fresh Fruit and Vegetable Quality: Advances Optical Methods

أر. كوبدو. آى. بغيري. بي. تاروني و آى تريسلي

R. Cubeddu, A. Puffery, P. Taroni and A. Tpricelli, politecnico diMilano

(٨، ١) مقدمة

Introduction

لقد تم دراسة أو بحث قياس المطيافية بمعامل الانعكاس الإحصاري المنحل عبر الوقت [Time-resolved reflectance (TRS) spectroscopy] كتقنية جديدة غير مسبوقه وغير متلفة لتقييم جودة الفواكه، وكما أنها تستخدم على نطاق واسع للاختبارات غير المتلفة للفواكه والمنتجات الزراعية، تنتج الـ TRS عكس الطرق البصرية التقليدية تصنيفاً بصرياً تاماً (complete optical characterization) للعينه المختبره من خلال تقدير أني لمعامل الامتصاص (absorption coefficient) ومعامل (التشتت) الانتقالي للضوء (transport scattering coefficient). ويتم هذا بتحليل الإضعاف والتخفيف (attenuation) والتوسيع (broadening) الذي يحدثه نبض ليزر قصير (short laser pulse) مع نموذج نظري مضبوط (proper theoretical model) ينتقل ويهاجر في وسط انتشاري

(diffusive medium) كما في معظم الفواكه. تمثل الخواص البصرية للفواكه نظاماً معقداً (complex system) ؛ لذا يتأثر الضوء (الإشعاع الكهرومغناطيسي electro magnetic radiation) بعوامل كثيرة عند تفاعله مع نسيج الفواكه. ويعتبر الامتصاص و(التشتت) تأثيرين معقدين (complex effects). وعلى أي حال ، لتقريب أولي ، فإن مؤشر أو عامل الامتصاص (absorption coefficient) يعتمد أساساً على المكونات النسيجية (tissue components) (الماء والكلوروفيل والسكريات) ، بينما يعتمد مؤشر التشتت الانتقالي على التركيب النسيجي المجهرى (tissue microscopic structure) أي الخلايا والألياف (cell & fibers). بالإضافة إلى ذلك ، فإن المميزات المفتاحية (الأساسية) بمعامل للانعكاس المنحل عبر الوقت (TRS) المطبقة على الفواكه والخضراوات تشمل عدم الحساسية (insensitivity) للون القشرة وخواصها واختراق اللب والفواكه إلى عمق يفوق ال ٢ سم.

يقدم القسم (٨ .٢) إلى (٨ .٦) الانتشار الضوئي (light propagation) في وسط انتشاري ، كما يقدم أو يتحدث عن أسس قياس المطيافية للانعكاس الإحصاري المنحل عبر/ خلال الوقت (ال TRS). إن وصف الأجهزة وتحليل البيانات لقياس المطيافية بمعامل الإنعكاس الإحصاري المنحل عبر الوقت (TRS) من الأمور المفيدة لفهم هذه التقنية الجديدة فهماً تاماً وكاملاً. ويعرض القسم (٧ و ٨) التصنيف البصري غير المتلف (non-destructive optical characterization) للفواكه.

تتواجد معلومات حول الطيف الامتصاصي والتشتتي (absorption and scattering spectra) لمختلف الفواكه. تمت دراسة المكونات النسيجية والتركيب النسيجي بتحليل الطيف الامتصاصي والطيف التشتتي بنظرية لامبيرت بيري Lambert-Beer theory وميى (Mie theory) ، على التوالي. يعرض القسم (٨ -٨) التطبيقات الأولية

(preliminary applications) لهذه التقنية الجديدة. إن مراقبة النضج وتحديد/ التعرف على العيوب في الفواكه النامة (Intact fruits) يوضحان مقدرة الانعكاس المنحل عبر الوقت. ويناقد القسم (٩,٨) العلاقة بين الانعكاس المنحل عبر الوقت والاختبارات الآلية- الكيميائية القياسية (standard mechanical- chemical tests) لتقييم جودة الفواكه وإمكانية وضع مؤشر/ معامل للجودة البصرية (optical quality index). أخيراً، يعطي القسم (١٠,٨) مسحاً للأوراق العلمية وإصدارات المؤتمرات conference proceeding ومواقع الشبكة العنكبوتية (الإنترنت web sites) ذات العلاقة والأهمية.

(٨,٢) مميزات الطرق البصرية عبر الوقت

Advantages of Time-Resolved Optical Methods

عادة، تقييم الجودة الداخلية للفواكه والخضراوات باستخدام تقنيات متلفة، اعتماداً على تقييم الخصائص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية (الآلية)، مثل الحموضة أو الجوامد الذائبة (soluble solids) (السكريات) والصلابة (firmness)، على التوالي. وبالضرورة يفرض هذا أن عينات قليلة قد تختبر، ومن ثم يمكن أن تعمم المعلومة المشتقة إلى دفعة الفواكه كلها. يمكن استخدام الطرق غير المخترقة (non-invasive methods) لتقييم الجودة على كل نوع بمفرده، حتى لو كان ذلك تكراراً، إذا اقتضت الضرورة، مع المميزات التجارية الواضحة. وبالتالي يزداد الاهتمام بالتطور واستخدام الطرق غير المتلفة لتقييم الجودة الداخلية وينمو باطراد، ليس فقط على نطاق مستوى البحوث الأساسية، ولكن بين الناس المنشغلين بالتوزيع في السوق، أيضاً.

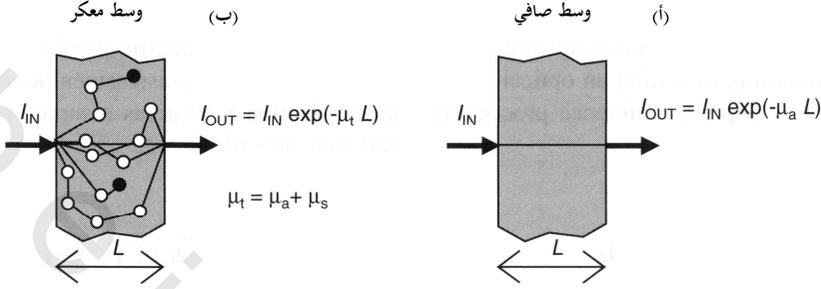
ولقد اقترحت مختلف التقنيات للإشارة إلى مختلف العوامل المرتبطة بالجودة في الفواكه^(١). على سبيل المثال، فقد تم التعرف على الأنتوسيانينات في الفراولة بتقنيات

التصوير الضوئي (photo acoustic techniques)^(٢). ولقد أثبتت الأنف الاصطناعية (artificial nose) مقدرتها على اكتشاف الكميات البسيطة من الكيمائيات المفزة وفائدتها فيما يتعلق بجوانب الجودة المرتبطة بإنتاج الروائح (aroma producing)^(٣) بالرغم من ندرة توافر المعلومات حول التطبيقات حالياً. لا تستطيع الموجات الصوتية أن تتغلغل عميقاً في لب معظم الفواكه، ذلك بسبب طبيعة الأنسجة المنفذة (porous nature of tissue)، ولكن يمكن الحصول على بعض النماذج الواعدة باستخدام الموجات الصوتية منخفضة التردد (low frequency ultrasounds)^(٤). ويبدو أن التصوير المغناطيسي الذري nuclear magnetic resonance واعد فيما يتعلق بالتخصيصية (التحديدية specificity) و spatial resolution^(٥) ولكنه غير مناسب للاستخدام الحقلية (in-the-field) أو الإنتاج الكبير (mass application). لقد صممت تقنيات أخرى تستخدم الأشعة فوق البنفسجية ٤ - ٤٠٠ نانوميتر (uv, 4-400 nm) أو الأشعة المرئية (VIS, 400- 700) والأشعة تحت الحمراء (near-infrared NIR, 700- 2500nm) وهي تقوم على قياس الإشارات المنعكسة من الأشعة المنتشرة كلياً من مختلف الأطوال الموجية (quality diffusely reflected signal at different wave lengths). وعلى سبيل المثال، استخدم uv/ vis لمركبات الكلوروفيل لدراسة نشاط التمثيل الضوئي (photosynthetic activity) إذ إن محتوى الكلوروفيل والقدرة الاصطناعية لعملية التمثيل الضوئي كثيراً ما ترتبط بالنضج أو العيوب. في الموقع المرئي في الطيف (الضوئي) (visible region of the spectrum)، استخدم قياس اللون colorimetry لتقدير لون قشرة الخوخ (peaches)^(٦)، وفي منطقة الأشعة تحت الحمراء، فإن طيف الضوء- المعاد الابتعاث (re-emitted light) قد درس، أساساً، لتقدير المحتوى الكلي للسكر^(٧).

وبالإشارة إلى التقنية الضوئية (optical technique)، فإن المعوق الأساسي هو أن كثافة قوة الضوء المبعث انتشاراً تعتمد بقوة على لون القشرة؛ وبذلك تغطي على

المعلومات عن اللب. وبصفة خاصة ، فإن الكثافة الكلية المعكوسة (total reflected intensity) تقدر بكل من خصائص الامتصاص والتشتت ، وبطريقة أخرى ، فإنه ليس من السهل فصل تأثيرات هذه الخصائص. للامتصاص والتشتت معلومات مميزة في الوسط. يقاس الامتصاص بالصبغات (pigments) ومكونات اللب التي تنتج ظواهر طيفية مميزة في منطقة الطيف المرئية ومنطقة الطيف للأشعة تحت الحمراء ، على عكس ذلك ، فإن الانتشار ناتج أو ينتج من تفاوت موضعي أو محلي للثابت الكهربائي الثنائي (Local variation dielectric constant) داخل الوسط. تحول التغيرات الميكروسكوبية (المجهرية) في مؤشر الانكسار الضوئي (refractive index) الذي تسببه الأغشية والخويصلات الهوائية (air vacuoles) أو الجسيمات (organelles) مسارات الفوتون (photon paths) ، وهي المسئولة في النهاية عن انتشار الضوء.

عند النظر أو إعطاء اعتبار لقياسات المطيافية الامتصاصية التقليدية في الهندسة التسديدية التوازنية (تسديد خط البصر في التلسكوب وجعله موازياً) (collimated geometry) ، فإن النتائج ستواجه بحقيقة استحالة التمييز بين مظاهر الامتصاص والتشتت. إن الكثافة المارة (transmitted intensity) خلال وسط نقي صاف (clear medium) قد تربط بقانون لامبيرت (Lambert law to the absorption coefficient μ_a) حيث إن المسافة التي يقطعها الضوء في الوسط تساوي مسافة المصدر - المسافة المحددة إل (source-detector distance) (انظر الشكل رقم ١، ٨).



الشكل رقم (١، ٨). امتصاص بالمطياف الضوئي في (أ) وسط صافي و (ب) وسط معكر: تشتت مسارات الفوتونات (O) ومراكز امتصاص (●).

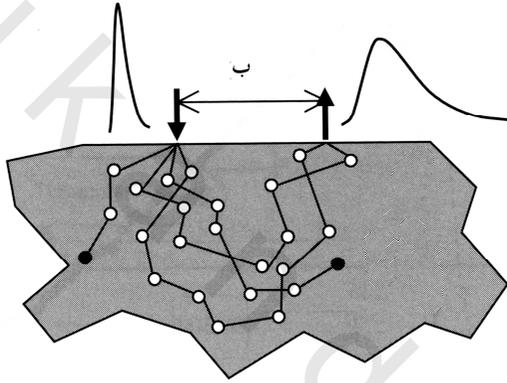
على عكس ذلك ، فإن قياس كثافة في وسط انتشاري يولد معامل إضعاف μ attenuation coefficient المساوي لـ $\mu_a + \mu_s$ الذي يرمز لفقدان الفوتون بسبب الامتصاص والتشتت للفوتونات في اتجاهات تختلف عن الاتجاه الملاحظ. يمكن أخذ تأثيرات التشتت في الاعتبار تماماً بالقياس المباشر لأطوال مسارات الفوتون (photon path length) ، وحيث إن أطوال مسارات الفوتون ترتبط مباشرة بوقت العبور (time-of-flight) في الوسط ، فإن الخيار الطبيعي هو إجراء القياسات البصرية مع الوقت (time-resolved measurements).

(٨، ٣) أساس طريقة الانعكاس الإحصائي عبر الوقت

Principles of Time-Resolved Reflectance

لننظرنا إلى حقن نبض قصير من الضوء أحادي الطول الموجي (monochromatic light) من خلال وسط انتشاري. وباستخدام وصف مبسط ، قد يعتبر الوسط مكوناً من مراكز تشتتية (scattering centers) ومراكز امتصاصية (absorbing

(centers) ويمكن اعتبار النبض الضوئي كحزمة من الجسيمات (stream of particles) المسماة فوتونات والمتدفقة بقوة (ballistically) من خلال الوسط. ومتى ما يقع الفوتون على مركز تشتتي فإنه يتغير في الاتجاه trajectory ويستمر في الانتشار في الوسط، حتى يعاد ابتعاثه (re-emitted) عبر الحدود (boundary)، أو أنه، في نهاية الأمر، يتم حجزه بواسطة مركز امتصاص (انظر الشكل رقم ٨،٢).



الشكل رقم (٨،٢). هجرة الفوتون في وسط عكر: طرق الفوتون، مراكز تشتتية (○) ومراكز امتصاصية (●).

إن القياسات المميزة لانتشار الضوء خلال الوسط الانتشاري هي طول الاستطارة أو التشتت الـ إس (scattering length l_s) وطول الامتصاص (absorption length l_a) (واللذان يتم التعبير عنهما فعلياً أو نموذجياً بوحدات ملم (mm) أو سم (cm)، والتي تمثل متوسط المسار الحر للفوتون بين مرات حدوث تعاقب التشتت والامتصاص، على التوالي (photon mean free path between successive scattering events and absorption events, respectively). ويعادل ذلك، وهو الأكثر استخداماً، يمكن إدخال مؤشر أو معامل الاستطارة أو التشتت (μ_s scattering coefficient) الذي

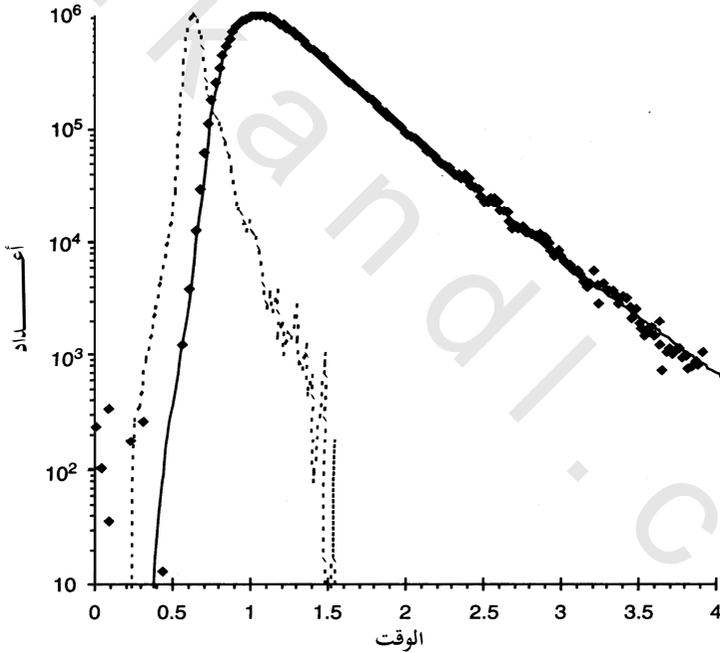
يساوي $1/\mu_s$ (أي $1/\mu_s$) ومعامل الامتصاص الذي يساوي $1/\mu_a$ (أي $1/\mu_a$) absorption coefficient μ_a (أي μ_a) والذي يعبر عنه نموذجياً بوحدات mm^{-1} أو cm^{-1} ليرمز أن أو يشير إلى احتمال التشتت / في وحدة طولية واحتمال الامتصاص في وحدة طولية، على التوالي. ولإعطاء اعتبار لانتشار الفوتون غير-موحد الخواص (non-isotropic propagation of photons)، يستخدم معامل التشتت الفعال μ_s يساوي $(1-g)\mu_s$ بصورة شائعة، حيث تمثل الـ g معامل تباين الخواص anisotropy factor أي متوسط جيب التمام (mean cosine) لزاوية التشتت.

في وسط انتشاري (diffusive medium) يتكون تشتت الضوء في منطقة الطيف المرئي والقريب من الأشعة تحت الحمراء visible and near infrared spectral أقوى طبيعياً من امتصاص الضوء، حتى إذا لم يكن بالإمكان تجاهل الأخير. ويلزم هذا بأن يحدث للضوء تشتت عدة مرات قبل أن يمتص، أو يتم إعادة ابتعائه من الوسط. ولذا، فإن هذه الظاهرة تعرف بتعدد تشتت الضوء (multiple scattering of light). وتعطى هذه الظاهرة في وسط انتشاري عدم التأكد أو الثقة في طول المسار (path length) المهاجر بواسطة الفوتونات في الوسط. لذا يعبر عن انتشار الضوء في الوسط عكراً (turbid medium) بمصطلح هجرة الفوتونات^(٨) (photon migration).

بعد حقن الموجات النبضية الضوئية (injection of light pulse) في وسط عكراً، فإن التوزيع المؤقت (temporal distribution) للفوتونات المعادة الابتعاث على مسافة p (انظر الشكل رقم ٨،٢) من نقطة الحقن سيتأخر، ويتوسع (broadened) ويضعف (attenuated).

ويوضح (الشكل رقم ٨،٣) منحنى نموذجياً لانعكاس إبصاري منحل عبر الوقت typical time-resolved reflectance curve. وللتقريب الأولي (first approximation)،

فإن التأخير يكون نتيجة للوقت المحدد (finite time) الذي يأخذه الضوء ليهاجر (أو يقطع) المسافة بين المصدر والكاشف (distance between-source & detector). ويكون التوسع، أساساً، بسبب المسارات المختلفة التي تتخذها الفوتونات نتيجة للتشتت المتعدد. وأخيراً، يكون الإضعاف؛ لأن الامتصاص يقلل من احتمالية الكشف عن الفوتون، ويقلل الانتشار في اتجاهات أخرى خلال الوسط من عدد الفوتونات المكتشفة في الاتجاه المعني أو تحت الاختيار.



الشكل رقم (٨،٣). منحنى (TRS) التجريبي (المعين)، منحنى IRS (الخط المتقطع) ومنحنى أفضل محاكاة رياضية لنظرية الانتشار (الخط السميك).

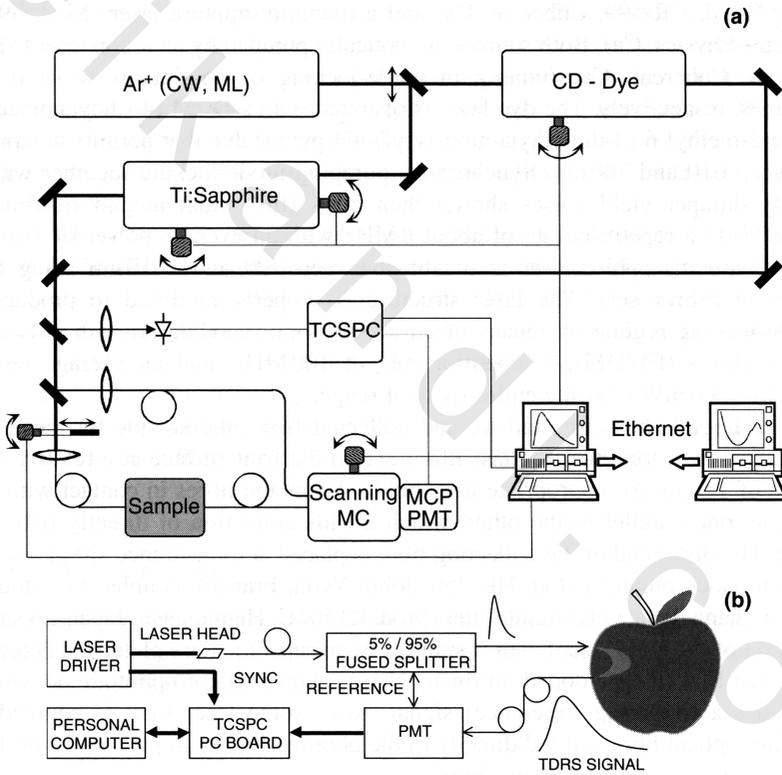
Instrumentation (٨, ٤) الأجهزة واستخداماتها**(٨, ٤, ١) هجرة الفوتونات Photon Migration**

يعتمد قياس هجرة الفوتونات في حقل (حيز) الوقت (time domain) على القدرة على استخلاص المعلومات المرمزة (المشفرة) في التوزيع المؤقت للضوء معاد الابتعاط بعد حقن موجات نبضية أحادية الطول الموجي في وسط انتشاري. تحدد القيم النموذجية للقياسات الضوئية في الجزء الأحمر، والجزء القريب من الأشعة فوق الحمراء للطيف الكهرومغناطيسي، التدرج الزمني timescale لإحداث هجرة الفوتونات في مدى ١ - ١٠ إن إس (ns) وبمعدل ثابت للمكتشف لحقن الطاقة (ratio of detected to injected power) عند حوالي ٨٠ دي ب (٨٠ dB).

إن الأساسيين الرئيسيين في تصميم نظام لقياسات الإبصار المنحل عبر الوقت TRM هما الإظهار (التيان) المؤقت (temporal resolution) والحساسية العالية (high sensitivity). ويتأثر الإظهار المؤقت، أساساً، بعرض موجات الضوء النبضية وباستجابة آلة الكشف (المكتشف) detection apparatus. يتوافر في الوقت الحاضر النبض الليزري (pulsed lasers) الذي ينتج موجات نبضية قصيرة ١٠ - ١٠٠ ب إس (١٠ - ١٠٠ ps) وموجات فائقة القصر (ultra-short) ١٠٠ - ١٠٠٠ ف إس (١٠ - ١٠٠ fs) بتكرار ذبذبات تصل إلى ١٠٠ ميغاهرتز (١٠٠ MHz)، كما تتوافر أنظمة كشف فوتونات ذات إظهار مؤقت في مدى ١٠٠ - ٣٠٠ ب إس (١٠٠ - ٣٠٠ ps). وفيما يتعلق بالحساسية فإنه يجب الاهتمام بثبيت قوة الموجات النبضية الضوئية المحقونة عند قيم مناسبة، وذلك لتفادي الإلتلاف المحتمل للعينة أو إلحاق أضرار بها. وفي حالة الأنسجة البيولوجية (الحيوية)، فإن نظم المأمونية^(٩) safety regulations، تضع (تحدد)

القيمة الأعلى المسموح بها 2mWmm^{-2} لموجات النبض الليزرية في مدى طول موجات $600 - 1000$ نانوميتر (nm).

وفي الشكل رقم (٨،٤) تم توضيح نظامين مختلفين لقياسات معامل الانعكاس الإحصائي المنحل عبر الوقت، وهما يعتمدان على تقنية حساب الفوتون الأحادي، المرتبطة بالوقت^(١٠) [TCSPC (time-correlated single-photon counting):



الشكل رقم (٨،٤). رسومات النظام العملي (a) والنوع النموذجي المصمت (b) لقياسات TRS (بي آر اس).

النظام الأول نظام معلمي laboratory set-up لامتناس نطاقات الذبذبات أو الأطوال الموجبة العريضة broad band absorption ولقياس مطيافية التشتت بمعامل الانعكاس الإبصاري المنحل عبر الوقت (TRS)، والذي يُستخدم، أساساً، للدراسات الأساسية لمكونات وتراكيب الأنسجة (tissue components and structures). والنظام الثاني لعمل جهاز مصمم compact device ليعمل على أطوال موجات مختارة يمكن تحريكها بسهولة؛ ولذا يستخدم في الحقل. وسيتم عرض النتائج من هذين الجهازين لاحقاً.

(٢، ٤، ٨) جهاز المطيف للإبصار الوقي للمطيافية الامتناسية والتشتت في الوسط الانتشاري

Time-Resided Spectrometer for Absorption and Scattering Spectroscopy in Diffusive Media

يمكن تحقيق التبادل الأمثل بين الحساسية والإبصار المؤقت في نظام مطيافية الإبصار عبر الوقت TRS باستخدام نظام ليزري مغلق (mode-locked lasers) كمصدر للضوء وعد الفوتونات المرتبطة بالوقت (TCSPC) للكشف. والمصادر المتوافرة هي ليزر ملون (dye laser) (Mod. CR- 599, Coherent, ca) وليزر تايثانيوم: صفير (titanium: sapphire laser) (Mod. 3900, spectra- physics, ca).

يتم ضخ المصدرين بصرياً (ضوئياً) optically pumped بليزر أرجون argon laser (Mod. Innova, coherent, ca) يجري في موجة متصلة أو متصل [continuous wave (CW)] في

نظام مغلق (mode- locking)، على التوالي. يشغل الليزر الملون بصيغة:

DCM (4-dicyanomethylene)- 2- methyl -6- C4- Dimethyla- minostyryl)- 4H- pyran dye .

والذي يسمح بالإيقاعية (التناغم) Tenability بين موجات ٦١٠ و ٧٠٠ نانوميتر.

ينتج الضخ المتزامن بالنظام المغلق (synchronous pumping mode-locking) مع التفريغ المجوف (cavity dumper) نبضات أقصر من ٢٠ ب إس (20 ps) (عرض كامل عند نصف

الحد الأقصى) [full width] (FWHM) at half maximum عند معدل تكرار (معدل تردد) (repetition rate) يبلغ ٨ ميغا هيرتز (8MHz) مع طاقة متوسطة تبلغ ١٠ مل واط (10mW).
 ليزر اليتانوبوم: الصغير [ياقوت أزرق اللون (titanium: sapphire laser)] متناغم بين ٧٠٠ و١٠١٠ نانوميتر باستخدام منظومتي مرآة مختلفتين (2 Different mirror sets). يُعدل تركيب الليزر تعديلاً سليماً مضبوطاً لإنتاج (نظام) معلق بواسطة معدل (تردد) الموجات الكهربائية بأن يسלט عليها موجات أخرى ذات تردد أكثر بطناً، عادة، ينتقل من نَعْمِيَّة إلى أخرى صوتية بصرية (acousto-optic modulator) ذات نبضات تبلغ حوالي ١٠٠ ب إس (FWHM)، ومعدل تكرار (تردد) يبلغ ١٠٠ ميغا هيرتز (100 MHz)، ومتوسط طاقة تبلغ ١٠٠-١٠٠٠ ملي واط (100- 100 mW) عبر كل مدى الطيف (entire spectral range).

يحقن ضوء الليزر في العينة ويجمع منها بواسطة ألياف بلاستيكية - زجاجية طول متر (Im) ومحيط ١ ملم (1mm) (Imm core Im long plastic-glass fibers) توضع على سطح الفاكهة بمسافة تقريبية تبلغ وسم (1.5cm). ويمكن ماسك الألياف المناسب (fiber holder) من بقاء الألياف في اتصال مع العينة، كل ليفة موازية للأخريات، مما يمنع اجتماع الضوء المعكوس مباشرة. توضع النهاية الخلفية لليف التجميعي Collecting fiber في فتحة مدخل entrance slit اسكانر أحادي طول الموجة موديل (Mod. HR-250, Jobin yron, France) مقترناً مع شاحن ضوئي ذي قناة دقيقة متعددة، (double micro-channel plate photomultiplier) موديل (Mod. R1564U, Hamamatsu, Japan). يتم شق جزء بسيط من شعاع الليزر الرئيس (main laser beam) بواسطة لوح زجاج (glass plate) ويتم تحسسه بواسطة دبوس صمام ثنائي ضوئي (PIN) (النوع P-type doped, intrinsic, N-type doped) والذي يوفر إشارة منبهة (مرجعية reference) (triggering signal).

أيضاً يقرن بعض ضوء الليزر بليف ضوئي آخر (another optical fiber) ويغذى مباشرة إلى شاحن ضوئي (photomultiplier) لتوفير تتبع آني لسلوك النظام (on-line monitoring of the system behavior).

ومن ثم تقوم سلسلة إلكترونية (electronic chain) للعد الأحادي للفوتونات المرتبط بالوقت (TCSPC) بتشغيل كل من إشارة الشاحن الضوئي والإشارة المنبهة. تؤخر الإشارات أولاً بمراحل ومن ثم يسبق تشكيلها (preformed) بتميز جزئي ثابت (constant fraction discriminators) باستخدام موديل (Mod. 2126, Canberra, co). لذا يتم تحويل التأخير النسبي بين الإشارات إلى إشارات فلتية (القوة المحركة الكهربائية) (voltage signal) عبر الوقت إلى محول (amplitude converter) موديل أو نوع (Mod.TC862, oxford, TN) ، والذي يُشغل بمحلل عديد القنوات multichannel analyser موديل أو نوع (Mod. Varro, Silena, Italy). إن العرض المؤقت temporal width لوظيفة التحويل الجهازية (instrumental transfer function) هو أقل من ١٢٠ ب إس (< 120 ps) (FWHM) كما هو مقاس بتوصيل ألياف الحقن والتجميع (injection and collecting fibers).

يشغل النظام الكامل للقياسات بالحاسوب الشخصي الذي يتم التحكم به أوتوماتيكياً على إيقاعات تناغم نبضات الليزر laser tuning وإضعاف الضوء light attenuation ومسح (scan) للضوء أحادي الموجة (scanning of the monochromator) وتحويل البيانات من المحلل عديد القنوات ورؤية البيانات (data visualization) وفي نهاية الأمر تخزين البيانات (data storage) ، وذلك للمزيد من المعالجة (للبينات).

(٣، ٤، ٨) النموذج الأصلي المدمج المحكم، الطراز البدئي لقياسات الانعكاس البصري

المتبين عبر الوقت

Compact prototype for Time-Resolved Reflectance Measurements

يستخدم هذا النظام ليزرين نابضين بصمام ثنائي (pulsed diode lasers) الموديل والنوع (Mod. PDL 800, Pico Quant GmbH Germany) عند موجة ٦٧٢ و ٨٠٠ نانوميتر

بفترة نبض تبلغ حوالي ١٠٠ ب إس (100ps) ومعدل تردد يصل إلى ٨٠ ميغا هيرتز (80MHz) ومتوسط طاقة أو طاقة متوسطة تبلغ ١ ملي واط (1mW). يقترن الليزر النابض ثنائي الصمام بليف ذي مؤشر-مدرج عديد التفاعل (multimode graded-index fiber) من النوع (Mod. MMF- IRIVIS- 50/ 125, O2 optics, Canada).

من ثم تشق الإشارة إلى ليفتين بواسطة فالق ضوئي (fiber optic splitter) من النوع (Mod. FUSEDIRVIS 5/ 95, OZ optics, Canada).

يستقبل الليف الأول جزءاً صغيراً (٥٪) من الطاقة يغذى مباشرة إلى الشاحن الضوئي (photomultiplier) لحساب التيارات الوقتية (time reference). توفر النهائية للجهاز مرجعاً وقتياً (time reference). تستقبل الألياف الأخرى معظم الطاقة وتوفر ضوءاً للعينة. يجمع الضوء معاد الابتعاث من العينة بواسطة ألياف بلاستيكية (ملم النوع (Mod. EH4001, ESKA) في شكل هندسي منعكس (reflectance geometry).

يتم اكتشاف منحنيات مطيافية الانعكاس الإبصارية عبر الوقت (TRS) بواسطة قناة معدنية شاحن ضوئي دينودي (الدينود إلكتروني في الصمام الإلكتروني يقوم بإصدار ثانوي للإلكترونات) (Metal- Chanel dynode photomultiplier tube) (النوع (Mod. R55600..., L16, Hamamatsu, Japan) وتقاس هذه المنحنيات بواسطة لوح ب سي PC للعد الأحادي للفوتونات المرتبط بالوقت (TCSPC) من النوع (Mod. SPC300, Becker & Hickl GmbH, Germany) مع التمكين من تردد يبلغ ١ ميغا هيرتز 1MHz وإبصار مؤقت يبلغ ٢٥ ب إس (25ps). تم وضع برامج حاسب آلي (مواد معدة للاستخدام مع الأجهزة السمعية البصرية (software) مكتوبة في منافذ معملية (lab windows) ولغة ANSIC، والتي تضبط الحصول على المعلومات والتحليل.

إن الوظيفة الاستجابية الجهازية النموذجية (typical instrument response function) المتحصل عليها في مقابل الليف الحقني والليف التجميعي FWHM تبلغ حوالي ٢٠٠ ب إس (200ps) للطولين الموجيين (both wave lengths).

(٨،٥) تحليل البيانات

Data Analysis

يتم تحليل الصورة المؤقتة (temporal profile) لمنحنى الانعكاس الإحصاري الوتقي باستخدام حل معادلة النقل الإشعاعي (solution of the radiative transport equation) تحت تقريب الانتشار diffusion approximation لوسط متجانس شبه مطلق^{١٢، ١١} (semi-infinite homogeneous medium).

$$(٨، ١) \quad R(\rho, t) = \frac{1}{2} (4\pi\nu)^{-3/2} t^{-5/2} e^{-\mu_a \nu t} e^{-\frac{\rho^2}{4D\nu t}} \left(z_0 e^{-\frac{z_0^2}{4D\nu t}} - (z_0 + 2z_e) e^{-\frac{(z_0 + 2z_e)^2}{4D\nu t}} \right)$$

حيث إن $R(\rho, t)$ هو عدد الفوتونات / في وحدة وقت t (per unit time) والمنطقة معادة الابتعاث من النسيج على مسافة ρ من نقطة الحقن.

ρ هي مسافة المصدر-الكاشف (source- detector distance) أو المسافة بين الألياف (Inter fiber distance)، و $\nu = c/n$ هي سرعة الضوء في الوسط، و n هي مؤشر انكسار الضوء (refraction index)، و $D = (3\mu_s)^{-1}$ هي مؤشر الانتشار (Diffusion coefficient)، و $Z_0 = (\mu_s)^{-1}$ هي الطول موحد الخواص (Isotropisation length)، و Z_e هي المسافة المقدره استقرائياً (extrapolated distance) التي تعطى اعتباراً لعدم تناغم أو تطابق مؤشر انكسار الضوء عند السطح (mismatch at the surface).

يتم استخدام موديل رياضي للمنحنى التجريبي تستخدم فيه الوظيفة النظرية (convolution of theoretical function) مع الوظيفة الاستجابية الجهازية (IRF). أفضل تطابق أو تكييف رياضي يتم الوصول إليه يعمل على تقليل الـ X^2 بتغيير كل من μ_s و μ_a باستخدام طريقة Levenberg -Marquardt التكرارية (iterative). ونسبة للدقة المتدنية للنماذج في الأوقات المبكرة (النماذج القديمة)، فإن مدى التكييفات يشمل كل النقاط في المنحنى التجريبي (experimental curve) مع عدد من النسب أعلى من ٨٠٪ للقيمة

العليا/ القمة (peak value) الحد/ الخط المرتفع الطابع للمنحنى (rising edge) و ١٪ للقيمة العليا/ القمة الحد/ الخط النازل (falling edge).

يوضح الشكل رقم (٨،٣) أفضل تكييف للمنحنى التجريبي النموذجي، وتم توضيح الوظيفة النقلية للجهاز (Instrumental transfer function) للمقارنة (الخط المتقطع). تمكن طريقة التكييف fitting produce من التحليل الآلي دفعة كاملة من المنحنيات التجريبية باستخدام حاسوب شخصي على الخطوط الإنتاجية من PC قياسي (Atmion AMD, 1GHz) بسرعة ١٠ منحنيات / الثانية.

تمكن مزامنة التحليل مع قياس الـ PC_s (network) من معالجة بيانات التجربة على الحاسب on-line بحيث يتم توضيح معامل الامتصاص ومعامل التشتت على الشاشة (screen) في الوقت الحقيقي الأصلي أثناء الاستمرار في القياس.

(٨، ٦) تأثير الجلد (القشرة) وعمق الاختراق

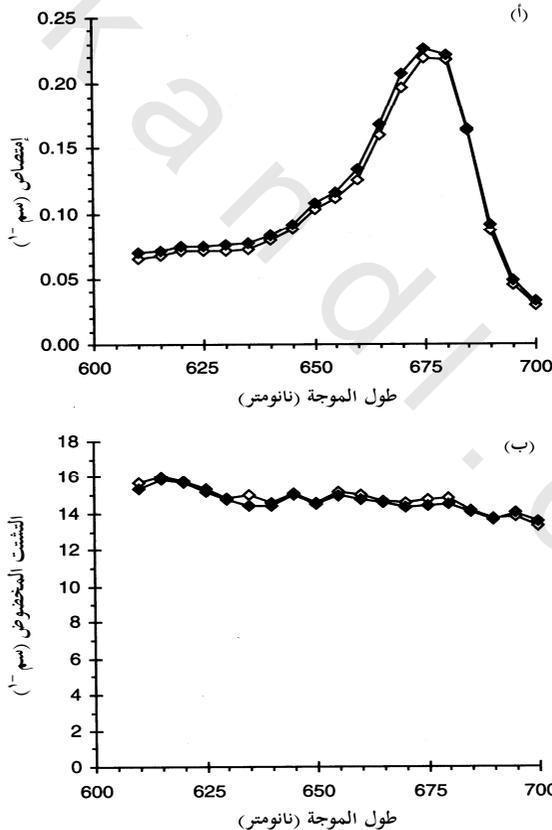
Effect of Skin and Penetration Depth

(٨، ٦، ١) القشرة Skin

أجريت قياسات على التفاح لمن أصناف جولدن دليشص (Golden Delicious) والجراني إسميث (Granny Smith) والستاركنج دليشص (Starking Delicious) وعلى الخوخ (peaches) وعلى النيكتارين صنف الخوخ ناعم القشرة عديم الزغب (nectarine) والكيوي (kiwifruit) والشمام (melons). وقد أثبتت الاختبارات أن مطيافية الانعكاسية الإبصارية المنحلة عبر الوقت (TRS) تمكن من تقييم الخصائص البصرية الداخلية (Internal optical properties) وأن الخصائص البصرية للقشرة لا تمنع تقييم البيانات/ المعلومات في الكتلة الكلية (bulk)، وعلى الأقل للفواكه ذات القشرة الرقيقة.

في التفاح، لم تحصل تغيرات معنوية في الخصائص البصرية المقاسة (في كل من الامتصاص والتشتت) بسبب إزالة القشرة. وقد أثبت ذلك بالنتائج التجريبية، حيث إنه لم

تؤدّ إزالة القشرة في أي من الحالات المعتبرة إلى تغيير معنوي في النتائج، بالرغم من اختلاف الخواص البصرية للقشرة في كل حالة مختلفة ومتميزة، وعلى سبيل المثال، مقارنة التفاح ذي القشرة الصفراء صنف جولدن دليشص [yellow-skinned apple (Golden Delicious)] مع التفاح ذي القشرة الحمراء صنف الستاكنج دليشص [red-skinned (starking Delicious)]، كما هو في الشكل رقم (٨،٥). وقد تم الحصول على نتائج متشابهة من قياس الخوخ والنيكتارين (لم توضح البيانات). لم يغير التقشير النتائج بدرجة ملحوظة، مما يؤكد أن مطيافية الانعكاس الإبصارية TRS هي الطريقة الأكثر حساسية للمظاهر الداخلية.



الشكل رقم (٨،٥). تأثير الجلد (القشرة) على قياس المطياف الضوئي TRS امتصاص (a) وتشتت نقلي (b) طيف لتفاح استاركينج ديليشوس قبل (علامات مغلقة) وبعد (علامات مفتحة) التقشير.

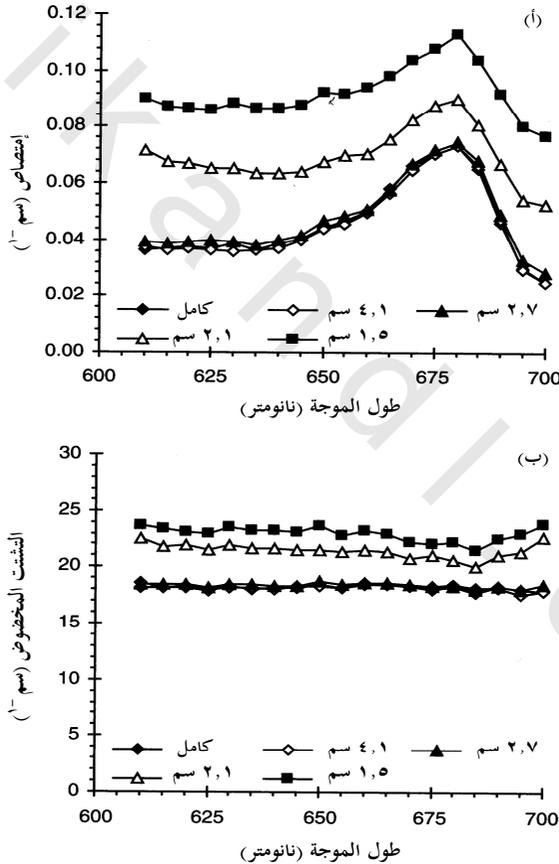
تختلف الحالة في الفواكه ذات القشرة السميكة (thick-skinned). بصفة خاصة، في فاكهة الكيوي، حيث أدى التقشير إلى زيادة في معامل الامتصاص بنسبة ٢٠-٢٥٪. عبر كل مدى الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) المختبرة (٧٢٠-٨٤٠ نانوميتر). وعلى أي حال، فإن هذا التأثير يهم، فقط، التقدير المطلق للخصائص البصرية (estimate of optical properties). إن شكل الخط الطيفي (spectral line shape) لم يتغير بدرجة كبيرة. وبالتالي، وبالرغم من أن القشرة تؤثر على النتائج، إلا أنها لا تجعل بالضرورة قياسات مطيافية الانعكاس الإحصائي TRS غير مناسبة لتقييم الجودة الداخلية للفواكه سميكة القشرة. ففي الشمام (melons, cantaloupe) المقاس في منطقة الحشية (bed region)، أدت إزالة القشرة، إلى تقليل امتصاص الكلوروفيل بدرجة ملحوظة، بينما لم يوجد لها تأثير بالغ على امتصاص الأشعة تحت الحمراء القريبة. وفي كلا الطولين الموجيين، فقد لوحظ انخفاض بنسبة ١٥-٢٥٪ في القيم المقاسة للتشتت.

(٢، ٦، ٨) عمق الاختراق Penetration Depth

في تجربة لاحقة، تم تحديد عمق الاختراق لقياس مطيافية الانعكاس الإحصائي (TRS). ومن المعروف جيداً أن الحجم المسير/ المخترق (probed) بقياس الـ TRS بأخذ منطقة بشكل الموز (banana shape region) تربط نقاط الحقن والتجميع (injection & collection point)⁵. وليس من السهل تحديد حجم القياس، إذ إن مسارات الفوتونات تتكدس بكثافة في منطقة شكل الموز، ولكن بالإمكان توزيعها في كل الوسط. لقد جرت محاولات لتحديد العمق الأقصى في اللب والذي يساهم مساهمة يمكن اكتشافها في منحني الـ TRS. لقد أجريت سلسلة من القياسات على التفاح الستاركنج حيث قطعت شرائح اللب من جوانب متقابلة لموقع القياس. أخذ الطيف (spectra) لكل

التفاحة ومن ثم أخذ ذلك للشرائح للحصول على سمك كلي يبلغ ٤،١ و ٢،٧ و ٢،١ و ١،٥ سم.

يوضح الشكل رقم (٨،٦) الامتصاص المتوائم والمتوافق مع الطيف المشتت. لقياس الامتصاص لم يتغير الـ μ_a مع الانخفاض في السمك حتى وصول سمك الشرائح



الشكل رقم (٨،٦). طيف امتصاص (a) وتشتت (b) تفاح استاركينج ديليشوس. مختلف المنحنيات تقابل قياسات في كل التفاحة وقياسات شرائح من نفس التفاحة تم الحصول عليها بقطع الفاكهة في الجهة المقابلة لمكان في القياس.

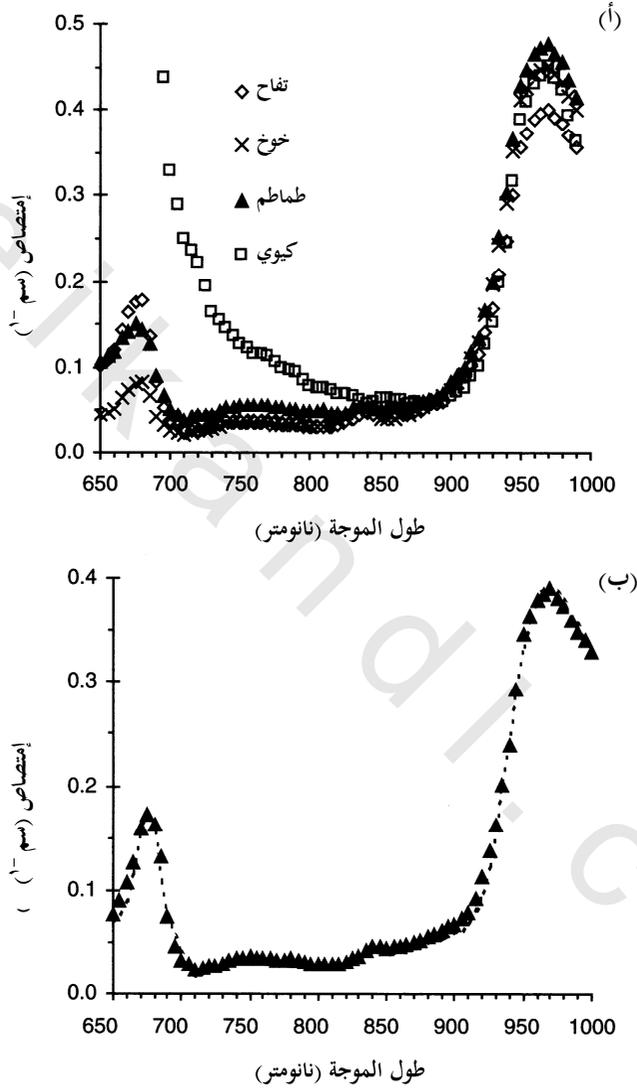
إلى ٢، ٧ سم. وللشرائح سمك ٢، ١ سم، يبدأ الـ μ_a في الانحراف من قياس كل النفاحة مع اختلاف يبلغ ٢٥٪ على موجة ٦٨٠ نانوميتر، بينما لسمك ١، ٥ سم زاد الاختلاف وارتفع إلى ٥٠٪. لوحظت أعلى فروقات في ذيول الطيف، حيث يكون الامتصاص منخفضاً. وتوضح نتائج معامل التشتت سلوكاً مشابهاً، مع عدم وجود تغيرات تقريباً حتى الوصول لسمك ٢، ٧ سم وكانت الاختلافات ١٥٪ و ٢٥٪ لسمك ٢، ١ و ١، ٥ سم، على التوالي. وبصفة عامة، فإن هذه البيانات توضح أن قياس الـ TRS يسير عمقاً حتى يصل إلى ٢ سم على الأقل داخل اللب. وبالطبع، فإن هذا تقدير تقريبي، ولكن بالرغم من ذلك يؤكد أن قياس الـ TRS لا ينحصر في سطح الفاكهة. زد على ذلك، يمكن أن يعتمد عمق الاختراق، نوعاً ما، على الخواص البصرية، والاختراق الأعمق متوقع في الفاكهة الأقل امتصاصاً و/ أو الأقل تشتتاً (للأشعة).

(٨،٧) الخواص البصرية للفواكه والخضراوات

Optical Properties of Fruits and Vegetables

(٨،٧،١) الامتصاص ومكونات النسيج Absorption and Tissue Components

تم توضيح طيف الامتصاص النموذجي لمختلف الفواكه (التفاح صنف الستاركنج والخوخ الأصفر (yellow peach) والطماطم وفاكهة الكيوي) في الشكل رقم (٨،٧). يسود طيف امتصاص التفاح القمة المائية (water peak) التي تتركز حول ٩٧٠ نانوميتر، بقيمة مطلقة حوالي ٤، ٠ سم^{-١}. يتم اكتشاف ظواهر امتصاص بسيطة للماء حول ٧٤٠ و ٨٣٥ نانوميتر، عندما يكون معامل الامتصاص منخفضاً (٥٠ سم^{-١}). وجدت قمة امتصاص معنوية (١٢-٠ و ١٨-٠ سم^{-١}) على ٦٧٥ نانوميتر مقابلة للكوروفيل أ. كل من الشكل الخطي (line shape) والقيمة المطلقة لطيف الامتصاص للخوخ والطماطم.



الشكل رقم (٨,٧). (أ) طيف امتصاص التفاح والخوخ وفاكهة الكيوي. (ب) أفضل ملائمة ومطابقة للكلوروفيل - أ و شكل خط الماء لطيف الامتصاص لتفاح الاستار كينج.

الجدول رقم (٨،١). الكلوروفيل أ ومحتوى مختلف الفواكه من الماء.

الماء (%)	الكلوروفيل-أ (μ^m)	الفاكهة
٨٢.٦	٠.٩٦	تفاح ستاركنج دليش
٩٣.٨	٠.٤٩	خوخ
٩٥.٠	٠.٥٢	طماطم
٩٨.٨	٦.٩١	فاكهة الكيوي

متشابه بدرجة كبيرة لما هو موجود في التفاح من هذه الصفات. وعلى أية حال، للكيوي، كما هو متوقع من المظهر البصري للب هذه الفاكهة، امتصاص كلوروفيل-أ معتبر، بقيمة قصوى تصل إلى ٢ أو ٣ أضعاف أقصى امتصاص للماء (water maximum) في الأشعة تحت الحمراء.

يمكن الحصول على المعلومات حول محتوى الماء بالنظر إلى القيم المطلقة للامتصاص عند ٩٧٠ نانوميتر، واتفاقاً مع اختلاف نسبة الماء/ الألياف في الأصناف المميزة، فقد تم اكتشاف امتصاص أعلى في الطماطم (حوالي ٥، ٠ سم^{-١}) مقارنة مع ما في الخوخ والكيوي (حوالي ٤٥، ٠ سم^{-١})، وفي التفاح (حوالي ٤، ٠ سم^{-١}). يوفر الامتصاص عند موجة ٦٧٥ نانوميتر معلومات عن محتوى الكلوروفيل-أ وتفيد البيانات الأولية المتحصل عليها من التفاح بأن ذلك قد يكون مقياساً مفيداً لاختبار مرحلة النضج. وأوضحت سلسلة قياسات أجريت على نفس الفواكه انخفاضاً مضطرباً في الامتصاص الأحمر (red absorption) مما يتفق مع الانخفاض التدريجي في محتوى الكلوروفيل مع مرحلة نضج ما بعد الحصاد^(١٤).

ومن أجل تحديد الحجم النسبي المتوي للماء ومحتوى الكلوروفيل - أ كميًا في كتلة الفاكهة (الكاملة)، فقد تم إجراء أفضل مواءمة لطيف الامتصاص مع الشكل الخطي للماء^(١٥) والشكل الخطي للكلوروفيل-أ^(١٦). ولإعطاء اعتبار أو حساب لوجود

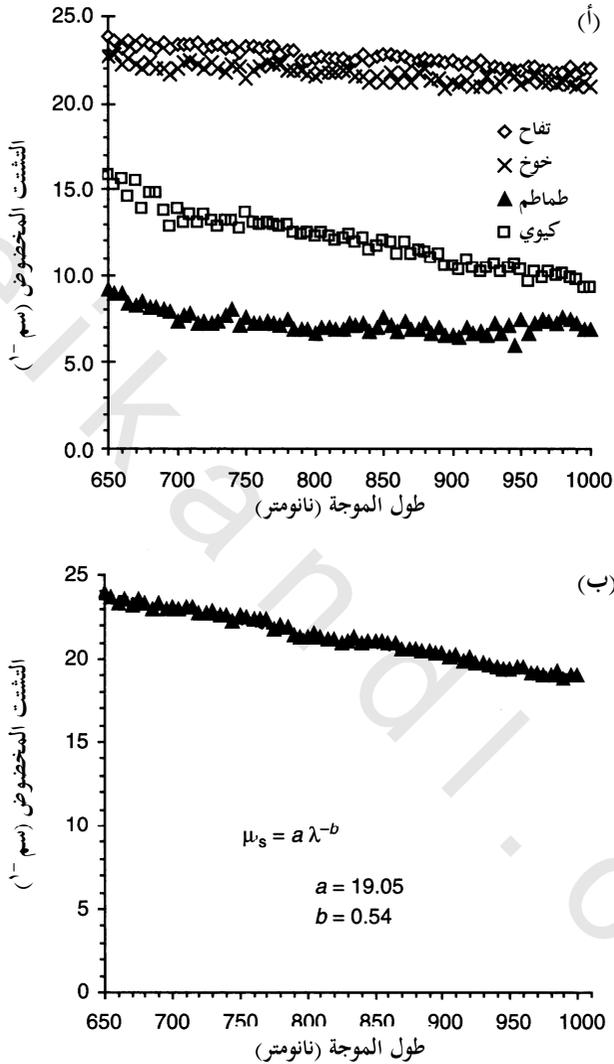
حاملات أصباغ chromophores أخرى في الفواكه، مثل الكاروتينويدات والإنثوسيانينات، والتي تظهر قمماً مميزة عند أطوال موجبة أقصر من ٦٥٠ نانومتر، تم استخدام طيف خلفي مستوٍ (flat back-ground spectrum) لـ arbitrary amplitude كقياس حر في المواءمة.

يوضح الشكل رقم (٨،٧ ب) مثلاً نموذجياً لمواءمة طيف الامتصاص للتفاح صنف ستاركنج للشكل الخطي للماء والكلوروفيل-أ. ويورد الجدول رقم (٨،١) محتوى الكلوروفيل-أ والماء في مختلف الفواكه. في كل الحالات أضيفت مساهمة تبلغ ٠.٠٢ - ٠.٠٣ سم^{-١} بالطيف الخلفي المستوي.

(٨،٧،٢) التشتت وتركيب النسيج Scattering and Tissue Structure

لم توضح خواص التشتت لكل الأنواع المعتبرة المذكورة (هنا) ظواهر طيفية خاصة. خفضت قيمة معامل التشتت المنتقل (transport scattering coefficient) باضطراد مع زيادة الطول الموجي. وتوضح الأمثلة النموذجية في الشكل رقم (٨،١ أ) للتفاح صنف ستاركنج والخوخ والطماطم والكيوي. طيف التش، تت الثقلي للكيوي أكثر ضجّة (noisier) من طيف الفواكه الأخرى، وبصّة خاصة في منطقة الموجة ٦٧٥ نانومتر، حيث يقلل الامتصاص العالي للكلوروفيل دقة تقييم التشتت الثقلي بقياس مطيافية الانعكاس الإبصاري (TRS).

وبالرغم من ملاحظة اختلافات ظاهرة في القيم المطلقة، اعتماداً على الأنواع والنضج، فقد تميزت الكيوي والطماطم بتشتت منخفض، أقل مما في الأنواع الأخرى.



الشكل رقم (٨,٨). (أ) طيف التشتت للتفاح والخوخ والطماطم وفاكهة الكيوي (ب) أفضل ملاءمة ومطابقة لنظرية ميلي لطيف التشتت لتفاح الاستاركيهج.

الجدول رقم (٨، ٢). القياسان أ وب لمختلف الفواكه.

الفاكهة	أ (سم ^{-١})	ب (سم ^{-١})	آر (ميكرومول)
تفاح ستاركنج دليش	١٧.٤	٠.١٢	٠.٧٥٩
خوخ	١٤.٤	٠.٢٠	٠.٧٤٠
طماطم	٠٢.٩	٠.٤٨	٠.٥٩١
كيوي	٠٤.٥	٠.٩٥	٠.٢٦٦

يمكن الحصول على مزيد من المعلومات بتفسير طيف التشتت النقلي بنظرية ميه (Mie theory). ولكرة متجانسة لقطر آر (homogeneous sphere of radius r)، فإن نظرية ميه تتنبأ باعتمادية الطول الموجي للتشتت والعلاقة بين التشتت وحجم الكرة. ووفقاً للنظرية فإن مراكز التشتت هي كرات متجانسة سلوكها فردي، وأن العلاقة بين μ_s وطول الموجة (λ) يمكن وصفها تجريبياً كالتالي:

(٨، ٢)

$$\mu'_s = ax^b$$

حيث إن مقياس الحجم X يعرف / يحدد $x = 2\pi r m \lambda^{-1}$ مع معامل انكسار ضوئي لوسط n_m اختير ليكون ١.٣٥ و a و b قياسات حرة. وبصفة خاصة، a متناسبة مع كثافة مراكز التشتت وتعتمد b على حجمها (حجم المراكز). زد على ذلك، يمكن أن يعبر عن b تجريبياً كعامل متعدد الحدود (polynomial function) (آر) (r) لذا فإن تقدير b قد ينتج قطر الكرة آر (r) ^(١٨).

يوضح الشكل رقم (٨، ٨) ب) طيف تشتت نقلي نموذجي للتفاح ستاركنج دليش والموائم أفضل مواءمة لنظرية ميه.

إن الحجم المتوسط المقدر لمراكز التشتت في مختلف الفواكه موضح في الجدول رقم (٨، ٢). وقد لوحظ بأن a و b قد اختلفتا في مدى ٢.٩-١٧.٤ سم^{-١} و ٠.١٢-٠.٩٥ سم^{-١}، على التوالي. ويفيد هذا بأن لمختلف الفواكه كثافات مختلفة وأبعاداً

متوسطة لمراكز التشتت (مدى آر = ٠.١٥ - ٠.٧٨ ميكرومول). وجدير بالذكر، وحيث إن الأنسجة لها توزيع معقد للخلايا والألياف، فإن هذه القياسات لا تقيم الحجم الحقيقي لمراكز التشتت في النسيج، بل إنها، عوضاً عن ذلك، قياسات متوسطة مكافئة، يمكن في النهاية أن ترتبط بالخواص الكيميائية أو الفيزيائية للفاكهة، مثل الصلابة (firmness) أو محتوى السكر.

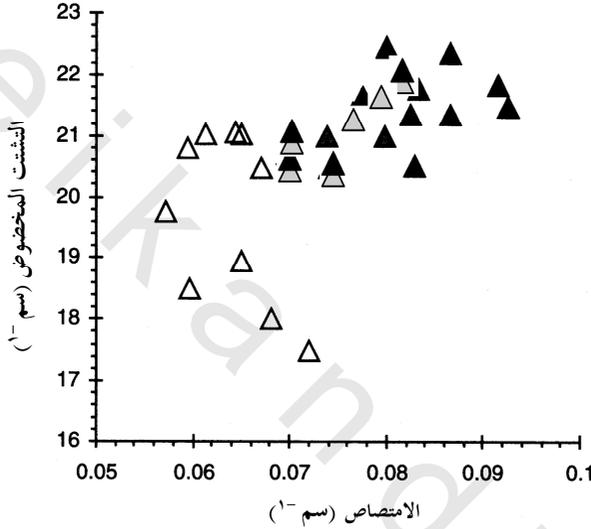
(٨,٨) التطبيقات: تحليل نضج الفاكهة وعيوب الجودة

Applications: Analyzing Fruit Maturity and Quality Defects

(٨,٨,١) تجربة موعد القطف Picking date experiment

للبرهان على صلاحية التقنية للتطبيق في التطبيقات الحياتية الحقيقية، فإن النموذج الأصلي لقياس مطيافية الانعكاس الإبصاري قد أرسل لمراكز أبحاث البساتين العالمية (Horticulture Research Intern) وهناك تم اختباره في تجربة موعد القطف وفحص تتبع مراحل النضج في التفاح^(١٤). ثم حصاد تفاح صنف الجالا Gala من نفس البساتين في ثلاثة مواعيد للقطف (القطف الأول = ١٥ سبتمبر، القطف الثاني = ٢٥ سبتمبر، القطف الثالث = ٩ أكتوبر) وخزنت تحت مناخ متحكم فيه على ١.٥ م° لمدة ٧ شهور، ومن ثم قيست كلها باستخدام النموذج المرسل. لكل فاكهة، قيست أربعة مواقع متساوية التباعد في دائرة استوائية (equatorial plane) ثم أخذ المتوسط. يوضح الشكل رقم (٨,٩) النتائج حيث رُمز لكل فاكهة بـ μ_a و μ_s الخاصة بها عند ٦٧٢ نانوميتر. انخفضت إلى μ_a المقاسة من القطف الأول (المثلث الأسود) إلى القطف الثاني (المثلث الرمادي) والقطف الثالث (المثلث الأبيض)، مما يشير إلى انخفاض في محتوى الكلوروفيل (GHL). وأيضاً ارتبط معادل التشتت، نوعاً ما، بتاريخ القطف مع انخفاض عام في آخر حصاد.

وجدت نتائج مشابهة للوخوخ. هذه التقنية ليست فقط قادرة على التفريق بين الدفعات المختلفة للفاكهة، بل يمكن أن تستخدم لمراقبة الاختلافات (التغيرات) البسيطة الناتجة عن فترة صلاحية التخزين (shelf-life storage).



الشكل رقم (٨،٩). منحنى قياسات الامتصاص والتشتت لـ ٣٠ تفاحة أخذت من صنف الجالا في تواريخ حصاد متتالية: قطعة ١ (المثلث المظلم)، قطعة ٢ (المثلث الرمادي) وقطعة ٣ (المثلث الأبيض) وقد قيست كلها مع بعض بالجهاز النموذجي بعد ٧ شهور من التخزين تحت مناخ متحكم فيه.

(٨،٨،٢) اكتشاف العيوب Detection of Defects

تم الحصول على نتائج مشجعة باستخدام الـ TRS في عيوب الفواكه غير (مهاجمة الميكروبات) الاختراقية (non-invasive detection defects of fruits). أو وضحت القياسات المبدئية بأن الـ TRS يمكنها فرز التجب (mealiness)^{١٩} واللب المائي (water core) والكدمات والرض (bruise) في التفاح والقلب البني في الكمثرى (pears).

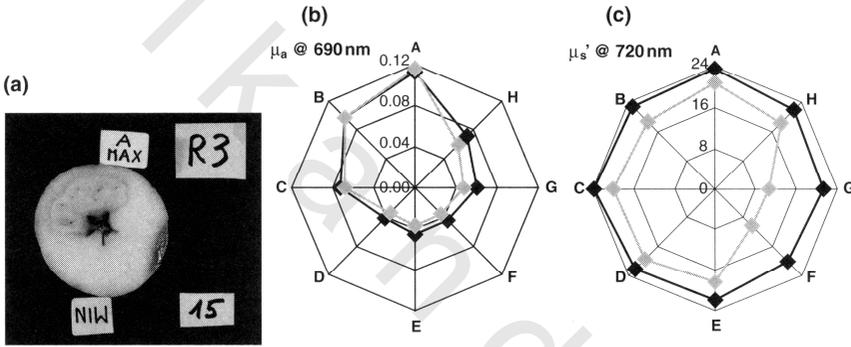
تلون القلب البني (الأسمر) [brown heart (BH)] اعتلال داخلي يظهر، في بعض الأحيان، في الكمثرى أثناء التخزين في جو متحكم فيه (CA storage). ولا يمكن بأي طريقة إدراك الأعراض من المظهر الخارجي للفاكهة، وتكون واضحة فقط بعد القطع. وهدف هذا العمل هو اختبار طريقة الـ TRS لتحليل الكمثرى المعرضة لمخاطر الإصابة بالقلب البني (الأسمر) (BH)، وذلك من أجل إمكانية كشف الاسمرار الداخلي في الفاكهة (بدون فتحها أو قطعها) بوسائل غير متلفة أو محطمة.

قيست فاكهة الكمثرى صنف المؤتمر ('conference' pear fruits) المعرضة لمخاطر اسمرار القلب (BH) بدرجة بسيطة (low risk) [حصاد مبكر وانخفاض ثاني أكسيد الكربون وتخزين في جو متحكم فيه CA storage] والمعرضة لمخاطر الـ BH بدرجة عالية (حصاد متأخر وارتفاع ثاني أكسيد الكربون مع تخزين في جو متحكم فيه) والـ TRS عند موجة ٦٩٠ نانوميتر وموجة ٧٢٠ نانوميتر في ثماني نقاط حول خط الاستواء/ الاعتدال (equator) للفاكهة. تم اكتشاف اسمرار القلب BH في الكمثرى بزيادة ملحوظة وكبيرة لمعامل الامتصاص μ_a عند موجة ٧٢٠ نانوميتر. استجابة معامل الامتصاص μ_a عند طول موجة ٦٩٠ نانوميتر لكل من الزيادة في حدوث اسمرار القلب في الفاكهة المتأثرة والانخفاض فيه مع نضج الفاكهة السليمة (sound fruit)، تفيد بأنه لا يمكن إيجاد تفسير متفرد له.

يُمكن أن يعزى انخفاض معامل الامتصاص μ_a عند موجة ٦٩٠ نانوميتر في الفاكهة السليمة لهدم الكلوروفيل، الذي له قمة امتصاص عند طول موجة ٦٧٥ نانوميتر. تأثر معامل التشتت μ_s عند موجة ٧٢٠ نانوميتر بشفافية (translucency) الأنسجة التي تبدو منقوعة (soaked looking)، كما في الفاكهة ذات النضج الزائد (overripe) وفي مناطق الرض (الكدمات). تمكن هذه التقنية من وصف المظهر الفعلي للنسيج الداخلي في الفاكهة

المعتمدة (السليمة) وبعمق ٢ سم ووصف العيوب الموجودة وموقعها داخل الفاكهة، كما في حالة تأكيدها بصرياً فقط بعد قطعها.

ويتضح المثال في الشكل رقم (٨، ١٠) حيث يقارن الرسم البياني (plot) معامل الامتصاص عند ٦٧٢ نانومتر ومعامل التشتت عند ٧٢٠ نانومتر مع صورة فوتوغرافية (photograph) لكمثرى مصابة باسمرار القلب (BH) جزئياً.



الشكل رقم (٨، ١٠). معامل الامتصاص عند ٦٩٠ نانومتر (b) ومعامل التشتت النقلي عند ٧٢٠ نانومتر (c) كدالة للموقع حول خط استواء كمثرى BH مقطوفة جزئياً في آخر الحصاد. تمت القياسات المذكورة في نهاية التخزين (المعين الأسود) وفي نهاية فترة الصلاحية (المعين الرمادي) و (a) صورة فوتوغرافية للمقطع الاستوائي للفاكهة، وحدات الامتصاص والتشتت بالسـ^١.

(٨، ٩) الاتجاهات المستقبلية

Future Trends

ما زالت هناك حاجة للبحث في استخدام الخصائص البصرية للبق الفواكه والخضراوات لتقييم جودتها الداخلية. وهناك حاجة لمزيد من الدراسات لمقارنة وربط الخصائص البصرية المقاسة مع القياسات الكيميائية أو الفيزيائية الأخرى للفواكه، مثل المواد الصلبة الذائبة (السكر) أو الحموضة أو الصلابة (firmness)، وحيث إن قياس الـ

TRS يسمح بقياس طيف امتصاص اللب مستقلاً عن خواص التشتت، فمن الممكن اكتشاف المواد الممتصة، مثل الكلوروفيلات والإثوسيانينات، في الطيف المرئي، أو السكر والماء في طيف الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR region). قد تكون هذه التقنية مناسبة لتتبع عملية النضج قبل الحصاد، أو لمراقبة تغيرات الفاكهة أثناء التخزين لفترات طويلة.

السبب الرئيس للتشتت داخل الفاكهة هو عدم تطابق معامل الانكسار (refractive index mismatches) بين السوائل والأغشية. وعليه، فإن متوسط معامل التشتت قد يوفر معلومات حول التركيب الداخلي كما تفيد دراسة على الكيوي. اتضح من عملنا، ارتباط التغيرات في معامل التشتت بمرحلة النضج وبعملية النضج، وقد يساهم ذلك في تتبعهما.

ومن الواضح، أن كثيراً من الجوانب التقنية تحتاج إلى حلول قبل أن يتم التطبيق الصناعي. والأهم من كل شيء، يجب مقارنة تصنيف الفاكهة فيما يتعلق بالخصائص البصرية لللب مع تقديرات جودة الفاكهة الحالية المقبولة، أي محتوى السكر والحموضة والصلابة.

هناك نقد محتمل لفائدة الـ TRS التطبيقية في الزراعة، ويتعلق هذا النقد بالتكلفة وتعقيدات الأجهزة (المستخدمة)، خاصة عندما تكون هناك حاجة لأكثر من طول موجي واحد. وعلى أي حال، فإن التطور السريع في الإلكترونيات الضوئية (optoelectronics) خاصة في الاتصالات الهاتفية (telecommunications) قد أدى إلى نمو كبير في استخدام الأجهزة في القياسات عبر الوقت (time-resolved measurements)، بحيث أصبح تطور أو إنتاج جهاز قياس عبر الوقت وقليل التكلفة (low-cost time-resolved instrument) أمراً ذا جدوى اقتصادية (feasible). إن أول نموذج أصلي يعمل بليزر شبه

موصول (semiconductor lasers) وهو متعدد ضوئي (photomultiplier) وجهاز ضوئي كامل الألياف (all-filore optics) يمكن استخدامه كجهاز محمول وحيد (في الساحة) (stand alone portable instrument)، قد تم تركيبه في مختبرنا. يتميز النموذج الأصلي بسهولة الاستخدام وسهولة النقل portability ورخص ثمنه نسبياً (يكلف حوالي ٢٠.٠٠٠ يورو قبل التركيب).

يستخدم في اختبار الفواكه بعد الحصاد على المستوى الصناعي ماكينات آلية (automated machine) للتدرج وتصنيف الفواكه، اعتماداً على القياسات الخارجية (اللون والحجم) والوزن. السرعة النموذجية أو الفعلية للتحليل على الخط الإنتاجي (in-line analysis) ٥ حبات فاكهة في الثانية. وقد يكون وقت حيازة إنجاز قياس (acquisition time) الـ TRS منخفضاً بدرجة ٥٠٠ إم إس (ms) لكل نقطة عند طول موجة ٧٠٠-٨٠٠ نانومتر لمعظم الفواكه. وفي هذا السياق فإن قياسات الـ TRS ليست بعيدة عن التطبيق للتحليل على الخطوط الإنتاجية على الإنترنت.

وعلى أي حال، وعلى ضوء التطبيق الممكن لتقنية الـ TRS على المستوى الصناعي، فمن المهم دراسة كثير من العوامل، مثل وقت الإنجاز، وعدد نقاط القياس، واستخدام حيازة متعددة القنوات (multichannel acquisition) والتلامس بين الفاكهة والمسبار الضوئي (optic probe). إن اكتشاف اعتلال داخلي قد يتطلب في الحقيقة رسم خريطة للفاكهة لتحديد موقع / مكان العيب (localize the defect). زد على ذلك، فإن إجراء قياس بدون تلامس (non-contact measurement) يؤدي إلى تسريع وقت القياس، ولا بد من العناية بالإلغاء الضوء الخلفي (back ground light) وكذلك تخفيف الإشارة (signal). وفي المقابل، قد تكون تقنية الـ TRS مفيدة في الحقول (البساتين)، وفي

أماكن التعبئة (packing house) أو في سلسلة التسويق (marketing chain) كوسيلة مكتملة للتصنيف غير المتلف / المحطم للفواكه.

(٨، ١٠) مصادر معلومات إضافية ونصائح

Sources of Further Information and Advise

تعد دراسة انتشار / تشتت الضوء (light propagation) في وسط انتشاري (diffusive media) أو هجرة الفوتونات من الحقول الحديثة والمفتوحة في الفيزياء وعلوم الضوء (optics). وقد تناولت أعداد محدودة من الكتب هذا الموضوع، ويمكن إيجاد مواد داعمة في الاستعراضات الأدبية العلمية، أي في المجلات ونتائج مستخلصات المؤتمرات (conference proceedings). وتقع معظم الاستخدامات لهذه التقنية داخل التطبيقات البيولوجية (الحيوية) والطبية (medical) والإكلينيكية (السريرية clinical) لليزر والضوئيات؛ لذا يجب أن تكون المجموعات البحثية والمهتمة بهذه التقنية من داخل هذه التجمعات.

(٨، ١٠، ١) قائمة الكتب List of Book

8.10 Sources of further information and advice

The study of light propagation in diffusive media, or photon migration, is a recent and open field of physics and optics. A limited number of books deal with this issue and most of the support material should be found in the scientific literature, that is in journal and conference proceedings. Most applications fall within the biological, medical and clinical application of lasers and optics, therefore research and interest groups are to be found in these communities.

8.10.1 List of books

Chance B (ed) (1989), *Photon Migration in Tissues*, New York, Plenum Press. van de Hulst H C (1980), *Multiple Light Scattering*, Volumes 1 & 2, Academic Press, New York. Ishimaru A (1978), *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, Vol. 1 *Single Scattering and Transport Theory*, New York, Academic Press. Welch A J, Matin J C and Van Gernert M J C (eds) (1995), *Optical-thermal Response of Laser-irradiated Tissue (Lasers, Photonics and Electro-Optics)*, New York, Plenum Press.

8.10.2 List of journals

Optical Society of America (OSA): *Applied Optics - OT & BO division, Optics Letters, Optics Express, Journal of the Optical Society of America A* (<http://www.opticsinfobase.org/>)
 The International Society for Optical Engineering (SPIE): *Journal of Biomedical Optics* (<http://ojps.aip.org/journals/doc/JBOPFO-home/>)
 Institute of Physics (IOP): *Physics in Medicine and Biology* (<http://www.iop.org/Journals/pb>).

8.10.3 List of Conference Proceedings

Trend in Optics and Photonics OSA (<http://www.osa.org/pubs/tops/>) *Proceedings of the SPIE* (<http://bookstore.spie.org/publications>).

8.10.4 List of web sites

www.osa.org
www.spie.org

المراجع (٨, ١١)**References**

- (1) ABBOT J A, 'Quality measurement of fruits and vegetables', *Postharvest Biol Technol*, 1999 **15207-25**.
- (2) BERGEVIN M, N'SOUKPOEKOSI C N, LEBLANC R M and WILLEMOT c, 'Assessment of strawberry maturity by photoacoustic spectroscopy', *Appl Spectrosc*, **199549397-9**.
- (3) BENADY M, SIMON J E, CHARLES D J and MILES G E, 'Fruit ripeness determination by electronic sensing of aromatic volatiles', *Trans ASAE*, **199538** (1) 251-5.
- (4) MIZRACH A, 'Nondestructive ultrasonic technique for fruit quality determination', *Acta Horticulturae*, 2001 **553** (2) 465-70.
- (5) CHEN P, MCCARTHY M J, KAUTEN R and SARIG Y, 'Maturity evaluation of avocados by NMR methods', *J Agric Eng Res*, 199355 (3) 177-85.
- (6) DELWICHE M J, TANG S and RUMSEY J W, 'Color and optical properties of clingstone peaches related to maturity', *Trans ASAE*, 198730 (6) 1873-9.
- (7) GUNASEKARAN S and IRUDAYARAJ J, 'Optical methods: visible, NIR, and FTIR spectroscopy', *Food Sci Technol*, 2001105 1-38.
- (8) YODH A and CHANCE B, 'Spectroscopy and imaging with diffusing light', *Phys Today*, 1995 48 34-40, and references therein.
- (9) *Compliance Guide for Laser Products*, HHS Publication FDA86-8260, US Department of Health and Human Services, FDA, MD, 1995.
- (10) O'CONNOR D V and PHILIP D, *Time-correlated Single Photon Counting*, London, Academic Press, 1984.
- (11) PATTERSON M S, CHANCE B and WILSON B C, 'Time-resolved reflectance and transmittance for the noninvasive measurement of tissue optical properties', *Appl Optics*, 1989 282331-6.

- (12) HASKELL R C, SVAASAND L O, TSAY T T, FENG T C, MCADAMS M S and TROMBERG B J, 'Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer', *J Optical Soc Am A*, 1994 11 2727-41.
- (13) FENG S, ZENG F A and CHANCE B, 'Photon migration in the presence of a single defect: a perturbation analysis', *Appl Optics*, 1995 34 3826-37.
- (14) CUBEDDU R, D'ANDREA C, PIFFERI A, TARONI P, TORRICELLI A, VALENTINI G, RUIZALTISENT M, VALERO C, ORTIZ C, DOVER C and JOHNSON D, 'Time-resolved reflectance spectroscopy applied to the non-destructive monitoring of the internal optical properties in apples', *Appl Spectrosc*, 2001 55 (10) 1368-74.
- (15) HALE G M and QUERRY M R, 'Optical constants of water in the 200 nm to 200 mm wavelength region', *Appl Optics*, 1973 12 555-63.
- (16) SHIPMAN L L, COTTON T M, NORRIS J R and KATZ J J, 'An analysis of the visible absorption spectrum of chlorophyll a monomer, dimer and oligomer in solution', *J Am Chem Soc*, 1979 98 (25) 8222-30.
- (17) MOURANT J R, FUSELIER T, BOYER J, JOHNSON T M and BIGIO I J, 'Predictions and measurements of scattering and absorption over broad wavelength ranges in tissue phantoms', *Appl Optics*, 1997 36 949-57.
- (18) NILSSON M K, STURESSON C, LIU D L and ANDERSSON-ENGELS S, 'Changes in spectral shape of tissue optical properties in conjunction with laser-induced thermotherapy', *Appl Optics*, 1998 37 1256-67.
- (19) VALERO C, BARREIRO P, ORTIZ C, RUIZ-ALTISENT M, CUBEDDU R, PIFFERI A, TARONI P, TORRICELLI A, VALENTINI G and JOHNSON D, 'Optical detection of meakiness in apples by laser TDRS', *Acta Horticulturae*, 2001 553 (2) 513-18.
- (20) ZERBINI P, GRASSI M, CUBEDDU R, PIFFERI A and TORRICELLI A, 'Nondestructive detection of brown heart in pears by time-resolved reflectance spectroscopy', *Postharvest Biol Technol*, 2002 25 87-97.'