

## VISCOELASTICITY OF DATE TISSUE AT BALAH STAGE OF MATURITY

Alhmdan, A. M.

Dept. of Agric. Engineering, College of Agric., King Saud Univ., P.O Box 2460 Riyadh 11451, Saudi Arabia.

### اللزوجة المرنة للرب التمور في مرحلة البلج

عبد الله بن محمد الحمدان

قسم الهندسة الزراعية- كلية علوم الأغذية والزراعة - جامعة الملك سعود ص ب ٢٤٦٠- الرياض ١١٤٥١

e-mail: [alhamdan@ksu.edu.sa](mailto:alhamdan@ksu.edu.sa)

### المخلص

تم دراسة السلوك اللزج المرن للرب ثمانية أصناف من التمور السعودية في مرحلة البلج وهي البرحي والخضري والخلاص والسري والسكري والصفري والصفقي ونبوت سيف بايجاد معاملات تراخي الجهد والتزحف والاسترجاع تجريبيا. وجد من تجارب تراخي الجهد وعند مستوى انفعال ثابت يساوي ٥٠٪ تفاوت الجهد المسلط في الحدود ٥٠٤,٢٩ الى ١٣٨٦,٧٢ (ك باسكال) للرب صنف السري والخضري على التوالي، كما تفاوتت النسبة المئوية للتراخي في الحدود ٧١,٨٪ الى ٨٠,٦٪ للرب صنف السري والخلاص على التوالي. أما في تجارب التزحف والاسترجاع فقد تم تسليط جهد ثابت يساوي ١٠٠٠ جم وقياس التزحف والاسترجاع كأنفعال لمدة دقيقتين لكل الأصناف. وقد تفاوتت قيم الانفعال في نهاية فترة التزحف في الحدود ٠,٣٣١ إلى ٠,٨٥٢ مم/مم للرب صنف الصفقي والسري، على الترتيب، بينما تفاوتت قيمه في نهاية فترة الاسترجاع في الحدود ٠,١٩٦ إلى ٠,٧٤٦ مم/مم للرب صنف الصفقي والسري كذلك، على الترتيب. كما تفاوتت نسب الانفعال المسترجع والذي يعبر عن درجة المرونة في الحدود من ١٢,٤٪ الى ٤٠,٨٪ للرب صنف السري والصفقي، على الترتيب.

تم اختبار ثلاثة نماذج رياضية لايجاد مدى ملائمتها في التنبؤ بالنتائج التجريبية لتراخي الجهد وهي نماذج ماكسويل العام ونوسينوفايتش وبيليج. وقد اثبتت النماذج الثلاثة ملائمتها للنتائج التجريبية بيد أن نموذج ماكسويل العام كان هو الأفضل. كذلك أثبت نموذج بيرجرز ذو العناصر الأربعة ملائمتها في التنبؤ بالنتائج التجريبية للتزحف والاسترجاع.

### شكر وتقدير

يشكر المؤلف مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية على دعمها لهذا الدراسة كجزء من المشروع البحثي رقم أ ت ٤٨-١٨ بعنوان " الخواص الميكانيكية للتمور السعودية".

### المقدمة

تتشوه المنتجات الزراعية والغذائية ومنها التمور عند تعرضها لقوى مسلطة عليها، وتفاوت طبيعة تشوهها بصورة كبيرة لتباين نوعياتها واختلاف مكوناتها وبنائها النسيجي وقوامها. ويعتمد سلوكها الميكانيكي على فترة تعرضها لتلك القوى والذي يجب دراسته من خلال تطبيق قواعد اللزوجة المرنة والتي تتضمن كلا من الخصائص اللزجة والمرنة. ونظراً لأن المكونات الرئيسية لجميع المنتجات الزراعية عبارة عن ماء ومواد صلبة كلية (ذائبة وغير ذائبة) متباينة في عناصرها، فإنها تعكس سلوكاً مركباً جزء منه مشابه لسلوك السوائل (اللزوجة) والجزء الآخر مشابه لسلوك المواد الصلبة (المرونة) والتي تكون فيه علاقات تغير الانفعال مع الجهد أو القوة مع المسافة متغيرة مع الزمن. فكلما ازداد الانفعال أو المسافة، فإن الجهد أو القوة المقاومة تزداد ولكن بصورة غير خطية. كذلك، فعند المحافظة على ثبات مستوى أو قيمة التشوه أو الانفعال أو المسافة، فإن قيم القوة أو الجهد تستمر في الانخفاض مع مرور الزمن. أما عند مستويات القوة أو الجهد الثابتين فإن قيم التشوه أو الانفعال أو المسافة تزداد مع مرور الزمن (Pappas et al., 1988; Li ma et al., 1998).

هناك أسباب مهمة للاهتمام بخواص اللزوجة المرنة للمنتجات الزراعية حيث أن معرفة هذه الخواص مثل معاملي المرونة واللزوجة وأزمان التراخي توفر معلومات هامة تتعلق بالتنبؤ بجودة هذه المواد. كذلك أثناء عمليات التداول والنقل فإن هذه الخواص تشير إلى احتمالات ومدى التلف الميكانيكي الذي يمكن أن يحدث للمنتجات. ومن جانب آخر، فإن إيجاد هذه الخواص موضوعياً من خلال التجارب العملية والنمذجة الرياضية يساهم في التنبؤ بخواص الجودة التي يقدرها المستهلك مباشرة من خلال تحسس قوام المنتج مثل منتجات الخضار والفاكهة. فالتشوه الذي يحدث من خلال ضغط المستهلك للمنتج بأصابعه يمكن تمثيله بقيم خواص ميكانيكية لمدى صلابة أو ليونة أو تقصف المنتج. وهناك العديد من قطاعات الصناعات الغذائية التي تتبنى اختبارات قياسية يمكن ربطها رياضياً وإحصائياً ببعض هذه الخواص. فضلاً عن ذلك فإن هذه الخواص يمكن استخدامها كمعيار لقياس جودة المنتجات ومدى تأثرها بظروف التخزين والتعبئة والتغليف وبالتالي تحديد العمر التسويقي الملائم لها (Storshine and Hamman, 1994; Li ma et al., 1998).

يعد اختبائي تراخي الجهد (Stress Relaxation) والتزحف والاسترجاع (Creep and Recovery) من أهم الاختبارات الميكانيكية لدراسة المنتجات اللزجة-المرونة. فاختبار تراخي الجهد يعبر عن مقدرة المادة في تخفيف الجهد المسلط عليها تحت ظروف تشوه أو انفعال ثابت. فعند تعرض أي منتج زراعي على سبيل المثال- إلى انفعال مفاجئ أثناء عملية كبس، فإن ظاهرة تراخي الجهد تمكن المنتج من تخفيف بعضاً من الجهد المسلط عليه. ويعتمد مدى ومعدل التراخي على مرونة ولزوجة ومتانة المنتج. ويعتبر تراخي الجهد ظاهرة مرغوبة في المنتجات الزراعية لأنها تؤدي إلى تخفيف الجهد المسلط عليها والذي قد يؤدي إلى تشويه وإتلاف تركيبها النسيجي. يمكن الحصول على خاصيتي المرونة واللزوجة وهي من الخصائص الميكانيكية وذلك عن طريق اختبارات تراخي الجهد إضافة إلى أزمان تراخي الجهد والتي تشير إلى مدى سرعة المادة في التخلص من الجهد الواقع عليها بعد تعرضها لتشوه مفاجئ، والتي تعطي مؤشرات مفيدة يمكن استخدامها في تحديد مراحل النضج للفاكهة والخضار، إضافة إلى توضيح الفروق بين الأصناف المختلفة. كما يمكن استخدامها في برامج التحكم في الجودة (Mohsenin, 1986; Sakurai and Nevins, 1992; Pitt, 1992; Rao et al., 1995; Li Ma et al., 1998).

النموذج الرياضي الأكثر شيوعاً واستخداماً لتمثيل المنتجات الزراعية المعرضة لتراخي الجهد هو نموذج ماكسويل العام (Generalized Maxwell Model) والذي يتكون من عدد لانتهائي من عناصر ماكسويل (وهي عبارة عن زنبرك (spring) ونببطة توهين (dash pot) موصلتين على التوالي) موصلة على التوالي مع بعضها البعض. إضافة إلى نموذج ماكسويل العام، هناك نموذجين رياضيين آخرين تم استخدامهما بنجاح مع المنتجات الزراعية هما نموذجي نوسينوفيتش (Nussinovitch) وبيليج (Peleg)، (Nussinovitch et al., 1989; Peleg and Pollak, 1982; Kojima, et al., 1992; Rao et al., 1995; Li Ma et al., 1998).

وفي اختبار التزحف والاسترجاع يتم تسليط حمل مفاجئ على العينة والمحافظة عليه ثابتاً مع قياس التشوه بدلالة الزمن. أحد الأمثلة التطبيقية التي يمثلها التزحف والاسترجاع هي تخزين التمور السائبة بوضعها على شكل كومة لارتفاع محدد، حيث تتعرض الطبقات الدنيا إلى حمل ميت ناتج من الطبقات التي تستند عليها مما قد يؤثر بدوره على الثمار خاصة في الطبقات المتحملة للحمل. كذلك فعملية كبس التمور التقليدية تتم بوضع أحمال ميتة على التمور لتحسين قوامها وتمثل سلوك التزحف خلال فترة زمنية معينة.

النموذج الانسيابي (الريولوجي) الذي يمثل سلوك التزحف هو نموذج ماكسويل وكيلفن على التوالي والمشهور بمسمى نموذج بيرجر ذي العناصر الأربعة (Four Element Burger Model) كما بينه (Mohsenin, 1986; Cenckowski et al, 1992; Rao et al , 1995; Li LiMa et al, 1998).

قاس (Lewicki and Wolf, 1995) العلاقة بين الكبس والتراخي عند مستويات مختلفة من النشاط المائي للزبيب. وقد وجد أن الزبيب يتبع سلوك الجسم القَصيف (Brittle body) عند قيم النشاط المائي الأدنى من ٠,٢٥، حيث تصبح احتمالات الكسر أثناء الكبس عالية. وقد لاحظ الباحثون تأثير المطاطية (Plasticizing effect) عند قيم نشاط الماء الأعلى من ٠,٣. وقد تغير سلوك التراخي للزبيب المكبوس عند نشاط الماء المساوي ٠,٤. وقد خلصا إلى أن الخواص الريولوجية للزبيب قد تأثرت في حدود النشاط المائي ٠,٣ إلى ٠,٧. استخدم (Saravacos and Kosaropoulos, 1995) جهاز اختبار القوام العالمي (Universal Texture Machine) لإيجاد خواص اللزوجة المرنة للزبيب من صنف سلطانه المجفف شمسياً. وقد وجد أن حبات الزبيب المفردة والجُمية (Single and bulk) تتبع سلوكاً لزجاً مرناً، حيث تمثل لب (أنسجة) الزبيب الجزء اللزج (Viscous) بينما تمثل قشرته الجزء المرن (Elastic). وقد استخدم نموذج ماكسويل ذي العناصر الثلاثة (3-Element Maxwell Model) للتعبير رياضياً عن

النتائج التجريبية التي حصلنا عليها. اختبر (Cenkowski et al., 1992) التشوه المرن واللون لحبوب الكانولا عند مراحل مختلفة من النضج. وقد استخدموا اختبارات التزحف والرجوعية ووجدوا أن القيم الظاهرية لمعامل المرونة قد ازدادت بما يعادل ١,٨ مرات بعد ١٧ يوماً من مرحلة النضج. أوجد (Kojima et al., 1991) صلابة الطماطم وقد وجدوا أن نضج الطماطم مرتبط بانخفاض الزمن الأدنى لتراخي الإجهاد. وقد استخدم (Jachman and Stanley, 1995) نموذج بيرجر لنمذجة نتائج التزحف وإيجاد خضوع التزحف. أوجد (Lima and Singh, 1995) علاقة بين ثوابت اللزوجة المرنة وهشاشة الطبقة الخارجية القصيفة لرقائق البطاطس المقلية. وأظهرت تجارب تراخي الإجهاد التي تم إجراؤها أن القيمة المتوسطة لمعامل المرونة تساوي ٨١٣٠ باسكال وثابت الزمن يساوي ٦٢ ثانية. استخدم (Mittal and Mohsenin, 1987) نظرية الزيادة المتناهية للتزحف والاسترجاع (Incremental creep and recovery theory) لتطوير علاقة ميكانيكية لأنسجة فاكهة التفاح. وقد تم تطبيق دورات التحميل وإزالة التحميل المتوالية ويفترت متزايدة على عينات أسطوانية من الأنسجة. وقد وجدنا علاقة خطية بين عنصر الانفعال المرن والجهد. كذلك وجدنا أن العناصر الدائمة للانفعال للزج المرن تعتمد على الزمن وتكون دالة غير خطية للجهد. طور (Varshney and Siripurapu, 1985) جهازاً لدراسة سلوك التزحف للثمار. وقد تم تعريض التفاح لأحمال ثابتة تساوي ٢ و ٧ كجم للحصول على نتائج خضوع التزحف. كما تم تمثيل النتائج بنموذج يحتوي على أربعة عناصر. وأظهر التحليل وجود انحراف يعادل ٢ % بين القيم التجريبية والقيم التي تنبأ بها النموذج. وقد خلص الباحثون إلى أن فاكهة التفاح تعتبر من الأجسام اللزجة المرنة. ويتسق ذلك مع النتائج التي حصل عليها (Lu et al., 1988) حيث وجدوا أن الخصائص الميكانيكية للتفاح تتبع سلوكاً لزجاً مرناً غير خطي.

قام (Hassan et al., 2005) بدراسة الخواص اللزجة المرنة لثمانية أصناف من التمر على كامل الثمرة لاستفادة منها في عمليات النقل والتعبئة ولقد تم تمثيل خواصها الانسيابية بنماذج رياضية للسلوك اللزج المرن.

تهدف هذه الدراسة إلى قياس ومقارنة خواص اللزوجة المرنة للثمار ثمانية أصناف من التمر السعودية هي البرحي والخضري والخلاص والسري والسكري والصفري والصفقي ونبوت سيف في مرحلة البلج (الخلال). تشمل الاختبارات خواص تراخي الجهد والتزحف والاسترجاع ومن ثم تقييم النماذج الرياضية المناسبة لتصنيف السلوك الانسيابي للتمر وذلك في ظل غياب أي دراسات منشورة عن اللزوجة المرنة للتمر.

## المواد وطرق البحث

### تحضير العينات وخطوات العمل:

تم التنسيق مع محطة الأبحاث الزراعية بديراب (٦٠ كيلو متراً غرب مدينة الرياض) التابعة للجامعة بتخصيص عدد من النخيل بالأصناف المحددة، ذات المحصول الجيد - بدون معاملة خاصة للمحصول- والتي تم ترقيمها قبل نضج الثمار. ومن ثم الترتيب لحصادها في أوقات معينة حسب الصنف والطور والكمية المطلوبة. بعد ذلك تم إحضارها إلى معامل الكلية في المواعيد المطلوبة لعمل الاختبارات المخطط لها في صناديق مرقمة. ولا يخفى أهمية الحصول على عينات التمر لكل صنف من عدة نخلات وذلك للحصول على عينات تكون أكثر تعبيراً عن الثمار عند عمل الاختبارات المختلفة وللأطوار المحددة.

قبل بدء التجارب البحثية تم عمل الاختبارات المبدئية والتي من خلالها تم تحديد مواصفات التجارب وكذلك الإعدادات المناسبة لكل تجربة. روعي وضع العينات في الثلاجة فور وصولها للمعمل، على أن لا تزيد فترة التخزين للبلج ٢٤ ساعة وذلك عند عدم التمكن من إجراء التجارب مباشرة بعد وصولها للمعمل. تم إجراء التجارب بعد أن تصل العينات لدرجة حرارة الغرفة.

تم استخدام جهاز قياس الخواص الميكانيكية (TA-HDi Texture Analyzer) موديل HD3128 مصنع من قبل شركة (Stable Micro Systems, Surrey, England)، ملحق بالجهاز العديد من المجسات التي تستخدم في كبس أو اختراق أو قص العينة. يمكن التحكم في الجهاز عن طريق برنامج حاسب آلي (Texture Expert Exceed, version 2.05) مزود من قبل نفس الشركة. أيضاً يساعد هذا البرنامج في تحليل البيانات ورسم علاقات القوة بالمسافة أو الزمن واستنباط بعض الخصائص الميكانيكية منها.

تجارب السلوك اللزج- المرن عبارة عن اختبارين هما تراخي الجهد ( Stress Relaxation ) والتزحف- الاسترجاع (Creep- Recovery) على لب الثمرة حيث واستخدمت أداة أخذ العينات بحيث تكون أبعاد العينات هي: 5 مم قطر × 5 مم ارتفاع.

#### (أ) اختبار التراخي:

في جميع اختبارات التراخي كانت سرعة عمود الحركة 1,5 مم/ث أثناء الاختبار. وقد كانت مسافات الكبس (التشوه، الانفعال) التي تم بعدها تسليط قوة ثابتة أو جهد ثابت والزمن الذي تم فيه قياس تراخي هذه القوة أو الجهد للمحافظة على ارتفاع (تشوه أو انفعال) ثابت للعينة وهي دقيقتان حيث روعي عند تحديد عمق الكبس (الانفعال أو التشوه) أن يكون في حدود المنطقة المرنة (Elasticity zone) وقد كانت 2,5 مم وتم إيجادها من التجارب المبدئية. جميع عينات لب مرحلة البلح كانت أسطوانية ارتفاعها وقطرها يساوي 5 (مم).

#### (ب) اختبار التزحف-الاسترجاع:

في جميع اختبارات التراخي والاسترجاع كانت سرعة عمود الحركة تساوي 1,5 مم/ث أثناء الاختبار. وقد تم قياس تغير المسافة (التشوه أو الانفعال) مع الزمن بعد تسليط قوة أو جهد ثابت. القوة الثابتة التي تم تسليطها، وزمن التراخي والاسترجاع كانت تساوي 1000 جم ودقيقتان على التوالي حيث روعي عند تحديد الجهد الثابت أن يكون في حدود المنطقة المرنة.

#### النمذجة الرياضية للخواص اللزجة المرنة:

يستخدم نموذج ماكسويل العام للتعبير الرياضي عن سلوك خصائص المرونة، اللدونة، واللزوجة (Watts and Bilanski, 1991) والمواد الغذائية تمثل سلوك مجاميع من الصفات المرنة واللزجة، ولذلك يطلق على هذه المواد لزجة-مرنة Viscoelastic (Kajuna, et al., 1998) حيث أن علاقة الجهد-التشوه تعتمد على معدل التشوه وعلاقته بالزمن. إذا كانت علاقة الجهد-التشوه دالة في الزمن فقط فإن المادة يطلق عليها مواد لزجة-مرنة خطية. أما إذا كانت علاقة الجهد-التشوه دالة أيضاً في الجهد فإن المادة يطلق عليها مواد لزجة-مرنة غير خطية.

#### السلوك اللزج المرن وخواص التزحف وتراخي الجهد مع الزمن:

#### تراخي الجهد (Stress Relaxation):

تعرف خاصية تراخي الجهد بأنها النقص في الجهد مع الزمن عندما يعمل تشوه ثابت على جسم، بالتالي في اختبار تراخي الجهد يتم تعريض العينة بصورة مفاجئة لتشوه محدد ثم يتم قياس الجهد اللازم بدلالة الزمن للحفاظ على هذا التشوه ثابتاً. ويعتبر نموذج ماكسويل العام أحد أفضل النماذج الرياضية للتعبير عن جهد التراخي للمنتجات الزراعية. (Kajuna, et al., 1998)

من منحنيات جهد التراخي يعتمد معدل التراخي والجهد المتبقي عند أي زمن على القوة الابتدائية والتشوه الحاصل والمعدل الذي بدأت به المادة بالتشوه. كلما زاد التشوه الابتدائي والقوة المستخدمة كلما زاد الجهد المتبقي وسرعة معدل التراخي. بينما ببطء معدل التشوه الابتدائي (أو القوة المستخدمة) يبطئ التراخي للمادة (Kajuna et al., 1998).

وهذا يرجع إلى حقيقة أن المادة قد بدأت بالتراخي خلال مرحلة تطبيق القوة الابتدائية. لهذا السبب، ينصح بأن يطبق الحمل الابتدائي بأسرع ما يمكن، مع الاحتياط لتجنب الأخطاء التي قد تنتج من سرعة الكبس. يعتبر قياس الزمن اللازم للقوة للتراخي عند نسبة معينة من القيمة الابتدائية طريقة عملية للتعبير عن تراخي الجهد (Kajuna, 1995). ويوجد طريقة أخرى مفضلة ولكن تستلزم وقت أطول هي إتباع معادلة الجسم المرن-اللزج:

$$\sigma(t) = \tau_i e^{-t/\alpha}$$

حيث  $\sigma(t)$  الجهد عند زمن  $t$  و  $\alpha$  هي " زمن التراخي " الذي يصف استجابة المادة. تحدد هذه الكمية برسم  $\tau(t)$  حيث  $\tau_{initial} =$  مقابل الزمن  $t$ . ميل الجزء الخطي هو  $-t/\alpha$ .  
التعبير الرياضي لنموذج ماكسويل العام يمكن كتابته كما يلي:

$$(1) \quad \sigma(t) = \sum_{i=1}^n C_i \left( e^{-t/\tau_i} \right) + \sigma_e$$

حيث:

□ الجهد عند أي زمن  $(t)$ ، [ك باسكال]  $\sigma_e$  □ الجهد عند الاتزان، [ك باسكال]،  $C_i$  ثوابت تراخي الجهد [ك باسكال]، وتساوي  $E_{di}$  □، حيث □ □ الانفعال الابتدائي أو اللحظي [مم/مم] و  $E_{di}$  معاملات

الاضمحلال (Decay Moduli) بوحدات [ك باسكال]،  $t_i$  زمن التراخي [ث]، ويعرف بالعلاقة  $t_i = (\sigma_i / E_i)$ ،  $\sigma_i$  لزوجة العنصر رقم  $i$ ، [ك باسكال.ث]،  $E_i$  معامل المرونة للعنصر رقم  $i$ ، [ك باسكال]، الزمن [ث]

النموذجان الآخران اللذان اثبتنا نجاحا في تمثيل السلوك اللزج المرين للمنتجات الزراعية هما نموذجي نوسينوفيتش (Nussinovitch) وبيليج (Peleg). في نموذج نوسينوفيتش تصبح ثوابت أزمان التراخي  $t_i$  ثابتة عند القيم 10 و 100 و 1000 على التوالي، ويمكن التعبير عن نموذج نوسينوفيتش كما يلي (Nussinovitch et al., 1989):

$$(2) \quad \frac{F(t)}{F_0} = A_1 + A_2 e^{(-t/10)} + A_3 e^{(-t/100)} + A_4 e^{(-t/1000)}$$

حيث:

$F(t)$  القوة المسلطة عند أي زمن  $t$ ، [نيوتن]،  $F_0$  القوة الابتدائية أو اللحظية عند الزمن  $t=0$ ، [نيوتن]،  $A_1, A_2, A_3, A_4$  ثوابت [لا وحدات لها]،  $t$  الزمن، [ث]. وبما أن الجهد  $\sigma$  يساوي حاصل قسمة القوة على مساحة التلامس ( $\sigma = F/A$ ) فيمكننا كتابة المعادلة (2) بدلالة الجهد كما يلي:

$$(3) \quad \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = A_1 + A_2 e^{(-t/10)} + A_3 e^{(-t/100)} + A_4 e^{(-t/1000)}$$

أي:

$$(4) \quad \sigma(t) = \sigma_0 \left( A_1 + A_2 e^{(-t/10)} + A_3 e^{(-t/100)} + A_4 e^{(-t/1000)} \right)$$

معادلة بيليج تجعل النتائج المتحصل عليها من تجارب تراخي الجهد عيارية (Normalized). وفي هذا النموذج يتم حساب معامل الاضمحلال ( $Y(t)$ )، ويمكن التعبير عنه كما يلي (Peleg and Pollak, 1982):

$$(5) \quad Y(t) = \frac{F_0 - F(t)}{F_0} = \frac{abt}{1+bt}$$

حيث:

$Y(t)$  معامل الاضمحلال، [لا وحدات له]،  $a$  ثابت، [لا وحدات لها]،  $b$  ثابت، [نيوتن/ث]. كذلك يمكننا كتابة المعادلة (5) بدلالة الجهد كما يلي:

$$(6) \quad Y(t) = \frac{\sigma_0 - \sigma(t)}{\sigma_0} = \frac{abt}{1+bt}$$

أي:

$$(7) \quad \sigma(t) = \sigma_0 - \sigma_0 \left( \frac{abt}{1+bt} \right)$$

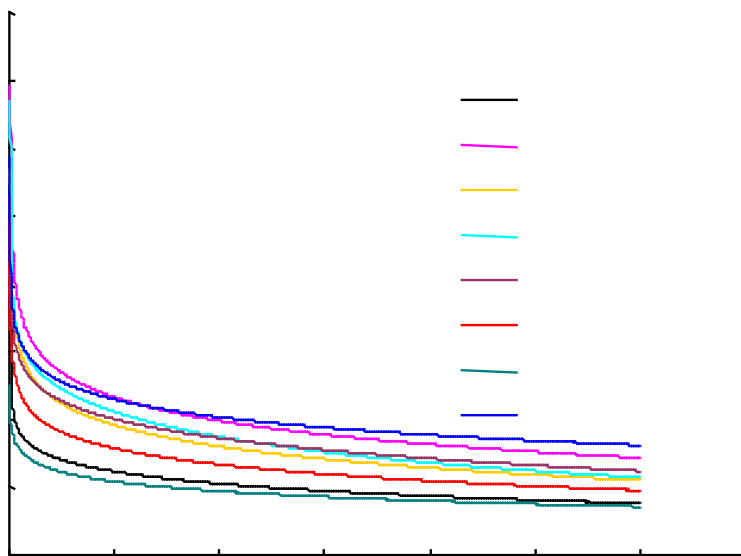
الثابت ( $a$ ) يمثل المستوى الذي يبدأ فيه الجهد في الاضمحلال أثناء التراخي. فعند ( $a=0$ ) فإن الجهد لا يتراخي بتاتا (على سبيل المثال في المواد الصلبة مثل المطاط). أما عند ( $a=1$ ) فإن الجهد يتراخي للقيمة صفر بعد مرور زمن لانتهائي، على سبيل المثال في السوائل. أما الثابت ( $b$ ) فإنه يمثل معدل تراخي الجهد (معدل الاضمحلال)، ومقلوبه ( $1/b$ ) يمثل الزمن اللازم للوصول إلى مستوى ( $a/2$ ). في الحالة التي يصبح فيها ( $b=0$ ) فإن الجهد لا يتراخي بتاتا. وبالنسبة للمواد اللزجة المرنة، فإنه عند قيم ( $b$ ) الصغيرة يتباطأ التراخي، بينما يتسارع التراخي في حال قيم ( $b$ ) الكبيرة (Peleg and Pollak, 1982; Kajuna, 1995).

#### التزحف والاسترجاع (Creep and Recovery)

يُعرّف التزحف Creep بأنه الزيادة في التشوه مع الزمن عندما يعمل جهد ثابت على جسم. نسبة التشوه عند أي زمن ( $t$ ) للجهد الثابت تدعى "استجابة التزحف". بعكس اختبار جهد التراخي والذي يمكن أداءه بسهولة



للبرحي. كذلك تفاوتت النسبة المئوية للتراخي (1- الجهد عند الاتزان/ الجهد الابتدائي المسط)  $\times 100\%$  في الحدود من ٨٠,٦٪ ل صنف الخلاص إلى ٧١,٨٪ ل صنف السري.



شكل (١). تراخي الجهد للبلح لثمانية أصناف من التمور.

نتائج التحليل الإحصائي غير الخطي لاختبار مدى ملائمة ثلاثة نماذج رياضية في التعبير عن النتائج التجريبية لتراخي الجهد المسط على العينات الأسطوانية للبلح لثمانية أصناف التمور الثمانية موضحة في جدول (١).

ثابت تراخي الجهد (C1, C2, C3) في نموذج ماكسويل العام لم تتبع نمطا منتظما للبلح لثمانية أصناف التمور الثمانية، بيد أن قيم ثابت تراخي الجهد C1 كانت متناسقة مع قيم جهد الاتزان  $\sigma_e$  لأصناف التمور الثمانية. أما بالنسبة لآزمان التراخي ( $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ ) فقد كان زمن التراخي لعنصر ماكسويل الأول ( $\sigma_1$ ) هو الأعلى وبصورة واضحة لأصناف التمور البرحي (٦٦,١٧ ث) والخضري (٥٧,٣٥ ث) والسري (٥٥,٨٢ ث) والصفري (٥٠,٨٦ ث) والصفقي (٦٠,٠٨ ث) ونبوت سيف (٦٢,١٤ ث). بينما كان منخفضا لصنف الخلاص (٥,٩٣ ث)، والأقل لصنف السكري (٠,٢٩ ث). علماً بأن زمن التراخي لعنصر ماكسويل الثالث لصنف الخلاص كان مساويا (٥٩,٩٩ ث) ولعنصر ماكسويل الثاني لصنف السكري كان مساويا (٥٥,١٢ ث).

جدول (١): ثوابت نماذج ماكسويل العام ونوسينوفيتش وبيليج لارتخاء الجهد لعينات أسطوانية من لب مرحلة البلح لثمانية أصناف من التمور

جدول (١-١): نموذج ماكسويل

R <sup>2</sup>	$\tau_3$	$\tau_2$	$\tau_1$	C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	$\sigma_e$	الصنف
	ث	ث	ث	ك. باسكال	ك. باسكال	ك. باسكال	ك. باسكال	
٠,٩٩٦	٠,٤٦١	٧,١٩٧	٦٦,١٦٧	٤٣٥,١٢٣	٩٦,٤٧٩	١٤٨,٩٧١	١٢٩,٢١٢	برحي
٠,٩٩٧	٠,٤٧٩	٥,٥٥٨	٥٧,٣٥١	٦٨٦,٣١١	٢٤٦,٧٦٩	٢٨٧,٨٠٦	٢٥٣,٦٠٨	لخضري

٠,٩٩٧	٥٩,٩٩٨	٠,٥٤٣	٥,٩٢٩	٢٦١,٤٠٩	٥٥٥,٥٩٨	٢٠٢,١٩٧	١٨٦,٩٤٥	خلاص
٠,٩٩٩	٤,٦٣٧	٠,٢٦٨	٥٥,٨٢٤	٩٩,٦٤٤	١٤٩,٨٢٨	١٢١,٣٥٢	١٢٩,٩٦٥	سري
٠,٩٩٨	٤,٨٨٥	٥٥,١٢١	٠,٢٨٧	١٧٤,٩٥٠	٢٢١,١١٠	٥٠٤,٠٤٥	٣٠٠,٩٦٢	سكري
٠,٩٩٩	٣,٧٦١	٠,٢٢٦	٥٠,٨٦٣	١٨٧,٣١٦	٤١١,٣٨١	٢٠٧,٠٢٦	١٧٤,٢٧٧	صفري
٠,٩٩٩	٤,٤١٥	٠,٢٥٦	٦٠,٠٧٩	١٨١,١٣١	٤١٥,٥١٢	٢٥٤,١٣١	٢١٥,٨٩٥	صقعي
٠,٩٩٦	٦,٨٠٤	٠,٤٥٣	٦٢,١٤٤	١٦٦,٦٣٤	٧٥٦,٤١٧	٣١٢,٧٩٢	١٨٤,٩٣٥	نبوت سيف

جدول (٢-١): نموذج نوسينو فيتس

R <sup>2</sup>	A <sub>4</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	الصف
٠,٨٨٧	١,٨٢١	٠,١٦٦-	٠,٢٨٤	١,٣٧٢-	برحي
٠,٩١٥	٢,٠٣٤	٠,٢٠٥-	٠,٣٣١	١,٥٤٤-	خضري
٠,٩٢٥	٢,٠٦٨	٠,١٨٧-	٠,٣٤٢	١,٥٩٣-	خلاص
٠,٩٦٩	٠,٧٤٩	٠,٠٠٩-	٠,١٦٥	٠,٤٩٥-	سري
٠,٩٢٧	١,٣١٩	٠,٠٨١-	٠,٢٤٥	٠,٨٧٥-	سكري
٠,٩٣٦	١,٤٦٨	٠,٠٩٤-	٠,٢٦٩	١,٠٨٦-	صفري
٠,٩٥٢	١,٤١٠	٠,٠٤٣-	٠,٢٥٢	١,٠١١-	صقعي
٠,٩٠٩	١,٥٧٣	٠,٠٨١-	٠,٢٨١	١,٢٠٨-	نبوت سيف

جدول (١-١): نموذج بيليج

R <sup>2</sup>	b	a	الصف
٠,٩٥٢	٠,٣٣٩	٠,٧٩٠	برحي
٠,٨٣٣	٠,٤١١	٠,٧٣٤	خضري
٠,٨٥٣	٠,١٧٣	٠,٧٧٤	خلاص
٠,٨٩٩	٠,٣١٧	٠,٨٠٩	سري
٠,٨٦٠	٠,٢٤١	٠,٧٠٤	سكري
٠,٧٥٩	٠,٦٣٨	٠,٧٣٦٤	صفري
٠,٩٢٩	٠,١٧٦	٠,٧٠٦	صقعي
٠,٨١٥	٠,٥٤٧	٠,٧٩٩	نبوت سيف

في نموذج نوسينو فيتس فقد كانت قيم الثوابت A<sub>3</sub> و A<sub>1</sub> سالبة لجميع الأصناف وقد أشار Bellido and Hatcher (2009) إلى أن ثوابت المعادلة لا تتبع سلوكا معينا وفي حالة إتباع تلك الثوابت سلوكا معينا يدل على مدى طراوة "softness" العينة.

أما في نموذج بيليج فقد كانت قيم الثابت a عالية لجميع الأصناف حيث تفاوتت في الحدود من ٠,٨٠٩ إلى ٠,٧٠٤ لصف السري إلى ٠,٧٠٤ لصف السكري مما يشير إلى قابلية لب ثمار مرحلة البلج لتراخي الجهد المسلط عليها بصورة كبيرة. كذلك فإن معدلات تراخي الجهد الممثل بالثابت b كانت أعلى للنباتات الأصناف وقد تفاوتت في الحدود من ٠,٦٣٨ (ب-١) لصف الصفري إلى ٠,١٧٢ (ب-١) لصف الخلاص مما يؤكد قابليتها الأعلى لتراخي الجهد المسلط عليها.

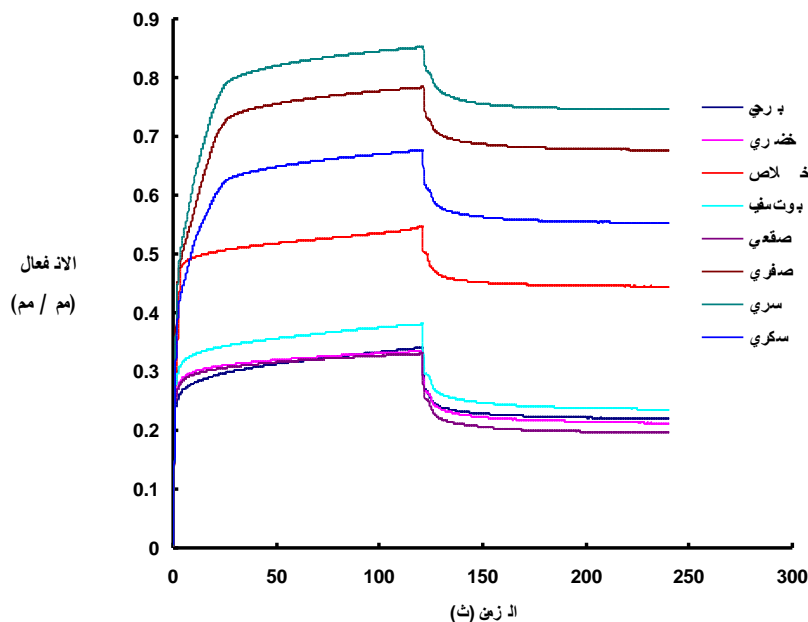
بمقارنة نتائج تراخي الجهد مع النتائج المتحصل عليها لنفس الأصناف ونفس مرحلة النضج في دراسة Hassan et al. (2005) يتبين أن الجهد الابتدائي (عند الزمن صفر) يتفاوت بصورة كبيرة بين الأصناف الثمانية سواء في كامل البلج أو في نسيج البلج. لكن ذلك التغير يختلف حسب الصف فكان الترتيب التنازلي لكامل الثمرة التالي: البرحي، الصقعي، نبوت سيف، سري، خضري، خلاص الصفري ثم السكري. بينما كان ذلك في لب البلج: الخضري، السري. نبوت سيف، خلاص، سكري، صقعي، صفري ثم البرحي. أما النسبة المئوية للتراخي فقد كانت عالية للنباتات الأصناف (حدود ٨٠,٦٪ إلى ٧١,٨٪)، وكانت في حدود ١٧,٢٥٪ إلى ١٣,٤٩٪ لكامل الثمرة. ويدل ذلك على تماسك الثمار الكاملة وممانتها ومرونتها مقارنة بلبها، خاصة وأن الطبقة الخارجية للثمار الكاملة في مرحلة البلج تعمل كغلاف خارجي رابط للثمرة بأكملها والتي تقال من قوى التراخي لها.

#### التزحف والاسترجاع (Creep and Recovery)

منحنيات التزحف والاسترجاع للنباتات الأصناف (نسيج) مرحلة البلج الثمانية أصناف من التمر موضحة في شكل (٢). وقد كانت نسب الانفعال المسترجع للنباتات الأصناف الثمانية حسب ترتيبها التنازلي ٤٠,٨٪ و ٣٨,١٪ و ٣٦,٤٪ و ٣٥,٥٪ و ١٨,٦٪ و ١٨,٢٪ و ١٣,٦٪ و ١٢,٤٪ لأصناف التمر الصقعي ونبوت سيف والخضري



والبرحي والخلاص والسكري والصفري والسري على الترتيب. وقد كان لب صنف السري أعلاها انفعالا في مرحلة التزحف وقلها استرجاعا لانفعاله في مرحلة استرجاع التزحف بينما كان لب صنف الصقعي أقلها انفعالا في مرحلة التزحف وأعلاها استرجاعا لانفعاله في مرحلة استرجاع التزحف.



شكل (٢). التزحف والاسترجاع للبلح ثمانية أصناف من التمور.

نتائج نمذجة اختبارات التزحف للبلح ثمانية أصناف التمور الثمانية والممثلة في ثوابت نموذج بيرجرز ذي العناصر الأربعة موضحة في جدول (٢). وقد كانت قيم المطاوعة اللحظية ( $J_0$ ) لعنصر الزنبرك ( $E_0$ ) عالية نسبيا لأصناف الصفري [ $10 \times 2,9$  (ك باسكال)  $^{-1}$ ] والسري [ $10 \times 49,2$  (ك باسكال)  $^{-1}$ ] والسكري [ $10 \times 44,1$  (ك باسكال)  $^{-1}$ ] ومنخفضة نسبيا لبقية الأصناف. أما قيم المطاوعة المعاقمة ( $J_1$ ) فقد كانت متقاربة إلى حد ما وتفاوتت في الحدود من  $10 \times 10,95$  -  $4$  (ك باسكال) -  $1$  لـ صنف السري إلى  $10 \times 5,38$  -  $4$  (ك باسكال) -  $1$  لـ صنف البرحي. كذلك كانت قيم اللزوجة النيوتونية لنبيطة التوهين والتي تمثل مدى المقاومة للسريان متقاربة للأصناف الثمانية وتفاوتت في الحدود من  $10 \times 15,77$  -  $5$  (ك باسكال.ث) لـ صنف الخضري إلى  $10 \times 9,41$  -  $5$  (ك باسكال.ث) لـ صنف السري. أما قيم زمن التعويق  $t_{ret}$  فقد كانت عالية نسبيا لأصناف الصفري ( $8,48$  ث) والسري ( $8,02$  ث) والسكري ( $6,9$  ث) ومنخفضة لبقية الأصناف. وتشير قيم معامل التقدير ( $R^2$ ) في جدول (٢) إلى ملائمة نموذج بيرجرز في التعبير عن النتائج التجريبية لاختبارات التزحف للبلح ثمانية أصناف التمور الثمانية.

جدول (٢): ثوابت نموذج بيرجرز ذي العناصر الأربعة لاختبارات التزحف للبلح (نسيج) مرحلة البلح ثمانية أصناف من التمور.

ثوابت معادلة بيرجرز					
$R^2$	$J_0$	$J_1$	$J_1$	$J_0$	الصف
	[ك باسكال.ث]	[ث]	[ك باسكال] $^{-1}$	[ك باسكال] $^{-1}$	
٠,٩٦٩	$10 \times 9,41$	٠,٧٨	$10 \times 5,38$	$10 \times 2,60$	برحي
٠,٩٧٥	$10 \times 15,77$	٠,٧٤	$10 \times 6,05$	$10 \times 0,21$	خضري
٠,٩٩٥	$10 \times 12,44$	١,٥٢	$10 \times 9,89$	$10 \times 0,49$	خلاص
٠,٩٦٨	$10 \times 9,41$	٨,٠٢	$10 \times 10,95$	$10 \times 49,2$	سري
٠,٩٥٧	$10 \times 9,٥٨$	٦,٩٠	$10 \times 7,98$	$10 \times 44,1$	سكري

٠,٩٥٣	٠١٠ x ١١,١٢	٨,٤٨	٤-١٠x٩,٣٩	٠-١٠x٥٢,٩	صفري
٠,٩٧٢	٠١٠ x ١٥,٧١	٠,٧٤	٤-١٠x٥,٩١	٠-١٠x٠,٣٤	صقعي
٠,٩٧٧	٠١٠ x ١٠,٦٩	٠,٧٨	٤-١٠x٦,٥٧	٠-١٠x٠,٢٧	نبوت سيف

### الخاتمة

تم دراسة السلوك اللزج المرن للرب ثمانية أصناف من التمور السعودية في مرحلة البلح وهي البرحي والخضري والخلاص والسري والسكري والصفري والصقعي ونبوت سيف بإيجاد معاملات تراخي الجهد والتزحف والاسترجاع تجريبياً. في تجارب تراخي الجهد وعند مستوى انفعال ثابت يساوي ٥٠٪ تفاوت الجهد المسلط في الحدود ٥٠٤,٢٩ إلى ١٣٨٦,٧٢ (ك باسكال) للرب صنف السري والخضري على التوالي، كما تفاوتت النسبة المئوية للتراخي في الحدود ٧١,٨٪ إلى ٨٠,٦٪ للرب صنف السري والخلاص على التوالي. أما في تجارب التزحف والاسترجاع فقد تم تسليط جهد ثابت يساوي ١٠٠٠ جم وقياس التزحف والاسترجاع كأنفعال لمدة دقيقتين لكل. وقد تفاوتت قيم الانفعال في نهاية فترة التزحف في الحدود ٠,٣٣١ إلى ٠,٨٥٢ م/م للرب صنف الصقعي والسري، على الترتيب، بينما تفاوتت قيمه في نهاية فترة الاسترجاع في الحدود ٠,١٩٦ إلى ٠,٧٤٦ م/م للرب صنف الصقعي والسري كذلك، على الترتيب. كما تفاوتت نسب الانفعال المسترجع والذي يعبر عن درجة المرونة في الحدود من ١٢,٤٪ إلى ٤٠,٨٪ للرب صنف السري والصقعي، على الترتيب.

تم اختبار ثلاثة نماذج رياضية لإيجاد مدى ملائمتها في التنبؤ بالنتائج التجريبية لتراخي الجهد وهي نماذج ماكسويل العام ونوسينوفايتش وبيليج. وقد أثبتت النماذج الثلاثة ملائمتها بيد أن نموذج ماكسويل العام كان هو الأفضل. كذلك أثبت نموذج بيرجرز ذو العناصر الأربعة ملائمتها في التنبؤ بالنتائج التجريبية للتزحف والاسترجاع.

### المراجع

- Bellido, G. G. and D. W. Hatcher (2009). Asian noodles: Revisiting Peleg's analysis for presenting stress relaxation data in soft solid foods. *Journal of Food Engineering* 92 (2009) 29-36.
- Cenkowski, S.; Zhang, Q.; Bielewicz, J.; and Britton, M.G. 1992. Effect of maturity stage on mechanical properties of canola seeds. *Trans A S A E. St. Joseph, Mich. : American Society of Agricultural Engineers*. 35 (4):1243-1248.
- Hassan, B. H.; A. M. Alhmadan; and A. M. Elansari (2005). Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *Journal of Food Engineering* 66(2005) 439-445.
- Jackman, R. L; and Stanley, D. W. 1995. Creep behaviour of tomato pericarp tissue as influenced by ambient temperature ripening and chilled storage. *Journal of Texture Studies*; 26 (5):537-552.
- Kajuna, S. T. (1995). Viscoelastic and physicommechanical properties of banana and plantain by quasi static and dynamic methods. Unpublished Ph.D Dissertation, The University of Guelph, Canada.
- Kajuna, S. T., W. K. Bilanski and G. S. Mittal 1998. Effect of ripening on the parameters of three stress relaxation models for banana plantain. *Applied Engineering in Agriculture* Vol. 14(1):55-61
- Kojima, K.; Sakurai, N.; Kuraishi, S.; Yamamoto, R.; and Nevins, DJ. 1991. Novel technique for measuring tissue firmness within tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. *Plant Physiology*. 96(2):545-550.
- Kojima, K.; Sakurai, N.; Kuraishi, S.; Yamamoto, R; and Inaba, A. 1992. Physical measurement of firmness of banana fruit pulp: determination of optimum conditions for measurement. *Post harvest Biology and Technology*. 2(1):41-49.

- Lewicki, P., & Wolf, W.(1995). Rheological properties of Raisins: Part II: Effect of water activity. *Journal of Food Engineering*. 26, 29-43.
- Li Ma.; Davis, D.C.; Obaldo, I.G. and Barabosa canovas, G.V. 1998. Engineering properties of foods and other biological materials: a laboratory manual. American Society of Agricultural Engineers
- Lima, M. I. and Singh, R. P. 1995. Measurement of textural properties of French fries. Poster # 49 4 presented at 1995 IFT annual Meeting, Anaheim, CA.
- Lu, R.; Puri, V.M.; and Morrow, C.T. 1988. Nonlinear viscoelastic properties of apple flesh under creep. Paper presented at the 1988. Winter Meeting.
- Mittal, JP.; and Mohsenin,, NN. 1987. Rheological characterization of apple cortex. *Journal of Texture Studies*, 18(1):65-93.
- Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. 2<sup>nd</sup> ed., New York, Gordon and Breach Science Publisher.
- Nesli Sozer (2009). Rheological properties of rice pasta dough supplemented with proteins and gums. *Food hydrocolloids* 24 (2009) 849-855.
- Nussinovitch, A.; Peleg, M. and Normand, M. D. (1989). A modified Maxwell and a non-exponential model for characterization of the stress relaxation of agar and alginate gels. *Journal of Food Science*, 54:1013-1016.
- Pappas, G; Skinner, G.E. and Rao, V.N.M. (1988).Effect of imposed strain and moisture content on some viscoelastic characteristics of coepeas (*Vigna unguiculata*).*Journal of Agricultural Engineering Research*, 39:209 219.
- Peleg, M. and Plollak, K. (1982).The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analyses of solid foods. *Journal of Texture Studies*, 13:1-11.
- Pitt, R. E. (1992). Viscoelastic properties of fruits and vegetables. In: *Viscoelastic Properties of Foods* (Rao M.A. and J.F.Steffe, eds). Elsevier applied science, New York.
- Rao, V. N., Delany, R. A.M and Skinner, G. E. (1995). Rheological properties of solid foods. *Engineering Properties of Foods*, 2<sup>nd</sup> Rev. Ed., 55-97.
- Sakurai, N and Nevins, D. J. (1992). Evaluation of stress relaxation in fruit tissues. *Horticultural Technology*.
- Saravacos, G. D. and Kostaropoulos, A. E. (1995). Engineering properties in processing equipment for fruits and vegetables. Poster # 23-9 presented at 1995 IFT annual Meeting, Anaheim, CA.
- Storshine, R. and Hamann D. (1994). Physical properties of agricultural materials and food products. Richard Storshine.
- Varshney, AC.; and Siripurapu, SCB. (1985). Viscoelastic characteristics of apple fruit flesh. *Journal of Food Science and Technology, India.*, 22(4): 235-238.
- Watts, K. C. and W. K. Bilanski. (1991). Stress relaxation of alfalfa under constant displacement. *Transactions of the ASAE* 34:2491-2498

## **VISCOELASTICITY OF DATE TISSUE AT BALAH STAGE OF MATURITY**

**Alhmadan, A. M.**

**Dept. of Agric. Engineering, College of Agric., King Saud Univ., P.O Box 2460 Riyadh 11451, Saudi Arabia.**

## ABSTRACT

Viscoelasticity of the tissues of eight Saudi date cultivars at balah stage of maturity, namely, Barhi, Khudari, Khlass, Serri, Sukkari, Suffri, Sakkie, and Nubot Saif were experimentally determined in terms of stress relaxation and creep-recovery parameters. In the stress relaxation experiments and at a constant strain level of 50%, imposed stress varied in the range 504.29 to 1386.72 (kPa) for Serri and Khudari tissues, respectively. Relaxation percentage also varied in the range 71.8% to 80.6% for Serri and Khlass tissues, respectively. In the creep-recovery experiments a constant stress equivalent to 1000g was imposed, and creep-recovery was measured as a strain within a period of two minutes for each cycle. Strain values at the end of the creep period varied in the range 0.331 to 0.852 mm/mm for Sakkie and Serri tissues, respectively, while at the end of recovery period it varied in the range 0.196 to 0.746 mm/mm for Sakkie and Serri tissues also, respectively. The percentage of recovered strain which is a measure of elasticity varied in the range 12.4% to 40.8% for Serri and Sakkie tissues, respectively.

Three mathematical models, namely, Generalized Maxwell, Nussinovitch, and Peleg were tested for suitability of predicting experimental results. All three models fitted experimental data well. However, the Generalized Maxwell model was the best. For creep-recovery the Burgers four element model was adequate when fitted with experimental data.

### **Acknowledgment**

The authors would like to acknowledge King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST) for its support and fund of the study under project number AR-18-48 entitled "Mechanical Properties of Saudi Dates".