

## دور بروتينات الألبان والأجبان في أداء المكونات والمنتجات

كتابة:

هاسموخ باتيل

وصونيا باتيل

جامعة ولاية ساوث داكوتا

تنقيح:

روبرت بوساير

شركة "كاينوترا" محدودة المسؤولية

مراجعة:

شانتانو أغاروال

المجلس الوطني للألبان والأجبان

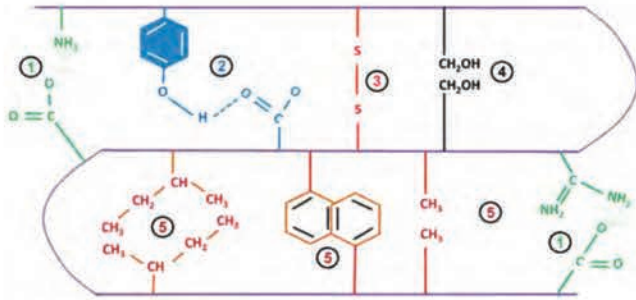


## المقدمة

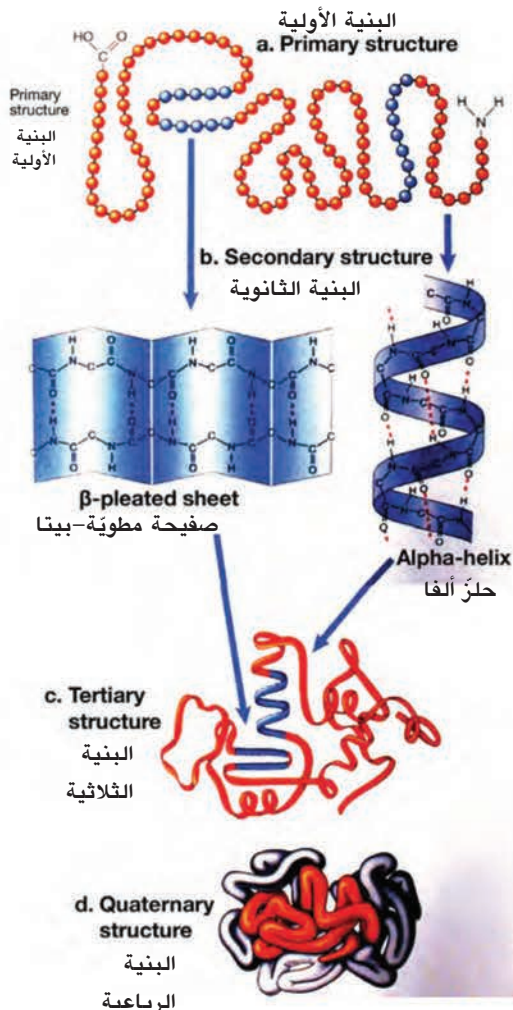
يشكل البروتين مكونًا غذائيًا أساسيًا، ويعد تناول كمية كافية منه مسألة بالغة الأهمية لحماية غذائية صحية ومتوازنة. وأصبح المستهلكون اليوم مدركين أكثر فأكثر لفوائد البروتين في الأنظمة الغذائية، فهم يعرفون أنه يلعب دورًا مهمًا في المساعدة على السيطرة على الجوع والحفاظ على الطاقة وتحسين الأداء إلى أقصى الحدود. وفي المقابل، تشكل الألبان والأجبان مصدرًا مهمًا للبروتين عالي الجودة ومتعدد الاستخدامات والوظائف. ويحاول عدد كبير من مصنعي المأكولات والمشروبات إدخال البروتينات اللبنية في منتجاتهم، لأنه وبالإضافة إلى أنه مصدر غذائي ممتاز، يمكن بروتين اللبن المصنوع من الحصول على بطاقة المعلومات البيانية "النظيفة" التي يرغب فيها المستهلكون، ويوفر مجموعة من الفوائد الوظيفية في المنتجات النهائية، ونذكر منها الحلوية والثبات الحراري والتهلّم والإرغاء والاستحلاب.

اللبن هو نظام معقد ودينامي وغذائي يوفر فوائد تغذوية ووظائفية متعددة. وتؤثر درجة التصنيع على خصائصه وعلى كفاءته عمله في الأنظمة الغذائية. وتعد البروتينات المتوفرة في اللبن معقدة بشكل خاص وسريعة التأثير بظروف المعالجة المستخدمة في صناعة الأغذية والألبان والأجبان، مثال القص والمعالجة الحرارية. وتحدث المعالجة تغييرات في بنية بروتينات اللبن، ما يؤدي إلى زعزعة ثباتها، وإلى تجمعها وتفاعلها. ويختلف نوع تفاعلات البروتين ومداهما بحسب عوامل كثيرة، ومنها ظروف المعالجة (مثال التوفيق بين المدة والحرارة)، وتركيبه المنتج، والرقم الهيدروجيني، وتركيز البروتينات، والشدة الأيونية. وقد تؤثر هذه التغييرات في البروتين على الخصائص الوظيفية لمكونات الألبان والأجبان، مثال الحلوية، والتهلّم، والثبات الحراري، والاستحلاب، الأمر الذي سيؤثر في النهاية على أداء المنتج النهائي. أما التغييرات في وظيفية بروتين اللبن التي تتسبب بها الحرارة، فتساعد على تعزيز الخصائص الحسية لمنتجات الأغذية والألبان والأجبان، مثال اللبن الزبادي، والمخبوزات، والعلويات. لذلك فإن فهم بروتينات الألبان والأجبان ووظيفيتها قد يساعد على مد المكونات اللبنية، والمنتجات الغذائية واللبنية النهائية بخصائص وظيفية مكيّفة بحسب الحاجة.

يمد هذا التقرير التقني مصنعي المأكولات والمشروبات بفهم لطبيعة بروتين اللبن المعقدة ولأنواع البروتين وخصائصها المختلفة، بالإضافة إلى أبحاث حول بروتينات الألبان والأجبان المختلفة. ويدرس هذا التقرير أيضًا تأثير ظروف المعالجة على أداء البروتينات اللبنية، ويقترح طرقًا لتعزيز جودة هذه البروتينات واستخدامها لابتكار منتجات غذائية ومشروبات جديدة. راجع الصفحة ١٦ للاطلاع على فهرست أقسام التقرير.



الرسم رقم ١: رسم تخطيطي يبيّن القوى المثبتة في البروتينات:  
١. التفاعلات الكهروستاتية؛ ٢. الروابط الهيدروجينية؛ ٣. الروابط ثنائية السلفيد؛ ٤. التفاعلات ثنائية القطب-ثنائية القطب؛ ٥. التفاعلات الكارهة للماء.



الرسم رقم ٢: تمثيل تخطيطي لأربعة مستويات مختلفة من بنية البروتين: a. الأولية؛ b. الثانوية؛ c. الثلاثية؛ d. البنية الرباعية.

## بنية البروتين

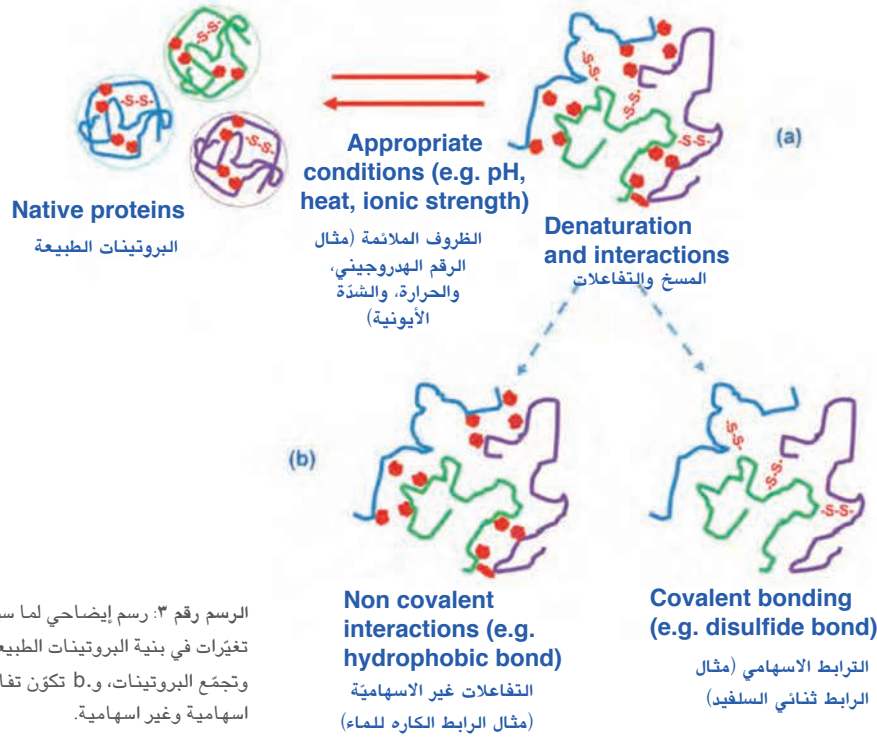
تشكل الأحماض الأمينية أحجار الزاوية للبروتين، ذلك أن التسلسل المعين للأحماض الأمينية في بروتين ما يحدد بنيته، وشكله، وخصائصه. وقد تكون له أشكال مختلفة، بحسب نوع الأحماض الأمينية المتواجدة فيه. وتثبيتها قوى جزيئية متنوّعة. وهذه القوى الجزيئية التي تحدّد شكل البروتين هي تفاعلات كهروستاتية، وروابط هيدروجينية، وروابط ثنائية السلفيد، وتفاعلات ثنائية القطب-ثنائية القطب، وتفاعلات كارهة للماء، بالإضافة إلى قوى فان دير والز (الرسم رقم ١) ٢,٢١.

تنظّم البنى الطبيعية للبروتينات على أربعة مستويات مختلفة: البنية الأولية، والثانوية، والثلاثية، والرباعية (الرسم رقم ٢). والبنية الأولية هي التسلسل المعين للأحماض الأمينية على طول سلسلة عديد الببتيد المترابطة تساهمياً (الرسم رقم ٢ - a). ونتيجةً للقوى الجزيئية التي تولدت بين سلاسل الأحماض الأمينية الجانبيّة، تنطوي البنية الأولى بطريقة منتظمة، فتشكل البنيتين الثانوية والثلاثية اللتين تشكلان بدورهما بنية طبيعية منطوية بشكلٍ فريد تحوي أقلّ قدر ممكن من الطاقة. وتجدر الإشارة هنا إلى أنّ البنى الثانوية العادية الأكثر وفرة المتواجدة في البروتينات هي الحلز ألفا والصفحة المطوية-بيتا. ويظهر الحلز-ألفا من خلال التفاف سلسلة الأحماض الأمينية بشكلٍ لولبي، ويتمّ تثبيته بواسطة الروابط الهيدروجينية بين ذرات روابط الببتيد. أمّا الصفائح المطوية-بيتا فتتشكل من اصطاف خطّي لبعض صفوف سلسلة الأحماض الأمينية (الرسم رقم ٢ - b). كما وتثبت هذه البنية بواسطة الروابط الهيدروجينية بين الخيوط.

والبنية الثلاثية هي التنظيم ثلاثي الأبعاد للصفوف المتعددة المتوقّرة في البروتين. وتتمّ موازنة مساهمات التفاعلات بين الجزيئات وفي داخلها بشكلٍ دقيقٍ للغاية يتأتى عنها تكوّن بنية ثلاثية الأبعاد يتمّ الحفاظ عليها بواسطة الروابط الهيدروجينية، والتفاعلات الكارهة للماء، وقوى فان دير والز، والتفاعلات الكهروستاتية (الرسم رقم ٢ - c). أمّا البنية الرباعية فهي تجمع خارق لجزيئات البروتين الفردية، وتتولّد نتيجةً لتفاعلات بين سلسلتين أو أكثر من عديد الببتيد (الرسم رقم ٢ - d)، التي تتشكل من الترتيب المكاني للتفاعلات اللاإسهامية لتأخذ شكل بروتين متعدّد سلاسل عديد الببتيد. ٢,٥

## مسح البروتين

إنّ مسح البروتينات أو نشرها هو كسر أو تغيير القوى المثبتة في البنية الطبيعية، الأمر الذي يجعل البروتين يتكسر أو يخسر بنيته الطبيعية. ويمكن أن تخسر البروتينات بنيتها الطبيعية بسبب الحرارة أو الضغط أو القص أو تغييرات في ظروف الصياغة (مثال الرقم الهيدروجيني أو الشدّة الأيونية): فتبدأ جزيئة البروتين الطبيعية المترابطة لتتكسر لتشكّل بنية عشوائية غير منتظمة (الرسم رقم ٣). وقد تتكوّن تجمّعات من البروتين متّصلة بواسطة روابط بين الجزيئات وداخلها مثال الروابط الاساهميّة (ومنها الروابط ثنائيّة السلفيد) أو الروابط غير الاساهميّة (مثال تفاعلات فان دير والز والتفاعلات الكهروستاتيّة)، وذلك بحسب ظروف الصياغة أو المعالجة. ولا بدّ أيضًا من الإشارة إلى أنّ المصطلح العام "مسح" قد يشمل عدّة أنواع ممسوخة من البروتين، تتراوح بين التغيرات البسيطة في البنية الثلاثيّة من دون أيّ تغييرات في البنية الثانوية (مثال الشكل غير الطبيعي) والتغيّرات الكبيرة في البنية الثانوية، وبالتالي، في البنية الثلاثيّة<sup>١</sup>.



## بروتينات اللبن: التحديد، والبنية، والخصائص الفيزيائية والكيميائية

اللبن هو سائل بيولوجي معقد يحتوي على الماء والمواد الدهنية واللاكتوز والبروتين والمعادن (الجدول رقم ١). يتوفّر الماء في اللبن كمرحلة مستمرة تتحلّل أو تعلق المكونات الأخرى فيها. ويتوفّر اللاكتوز وجزء من الأملاح المعدنية في المحلول، في حين تتواجد البروتينات وباقي المعادن في المعلق الغرواني.

### الجدول رقم ١: التركيبة المتوسطة للبن البقري الخام<sup>١</sup>

النسبة المئوية (وزن/وزن) في اللبن	المكوّن
٨٧,٣٠	ماء
٤,٦٠	لاكتوز
٣,٩٠	مواد دهنية
٣,٣٠	بروتينات
٢,٦٠	بروتينات الكازين
٠,٧٠	بروتينات مصّل (شرش) اللبن
٠,٧٠	المعادن
٠,٢٠	الأحماض العضويّة

## تقرير تقني: دور بروتينات الألبان والأجبان في أداء المكونات والمنتجات

يحتوي اللبن البقري على ٣٠ إلى ٣٥ غرام من البروتين في الكيلوغرام، ويقسم هذا البروتين بصورة عامة إلى فئتين أساسيتين، وهما الكازيين وبروتينات مص (شرش) اللبن. ٦، ٧ ويتوفر الكازيين بالدرجة الأولى في الحالة الغروانية، أما بروتينات مص (شرش) اللبن فتتوفر بشكل حلول. ويوفر الكازيين وبروتينات مص (شرش) اللبن خصائص وظيفية مختلفة وتلعب أدوارًا متنوعة بحسب حالتها وبنيتها في المحلول المائي.

للكازيين وبروتينات مص (شرش) اللبن بنى مختلفة جدًا، وبالتالي خصائص فيزيائية وكيميائية مختلفة أيضًا تشكل الأساس لصناعة عدة منتجات غذائية ولبنية. وتم تلخيص المقارنة بين خصائص الكازيين وبروتينات مص (شرش) اللبن في الجدول رقم ٢. وبالاستناد إلى خصائص الكازيين وبروتينات مص (شرش) اللبن المبينة في الجدول، يبدو واضحًا أن خصائص بروتينات اللبن تؤثر على أدائها ووظيفتها في المنتجات الغذائية، وترسب الكازيين هو مثال شائع. أضف أن تخفيض الرقم الهيدروجيني للبن من خلال التخمر أو التحميض المباشر يؤدي إلى الحصول على منتجات مثل اللبن الزبادي وجبن الكوتاج، في حين أن تخثر الكابا كازيين بواسطة المنفحة يؤدي إلى إنتاج الأجبان.

الكابا كازيين هي واحدة من أنواع جزينات الكازيين الأربعة الأهم، وهي تضم أيضًا الألفا أس-١ والألفا أس-٢ والبيتا كازيين. وتعتبر الألفا والبيتا كازيين بروتينات كارهة للماء تترسب بسهولة بفعل الكالسيوم. أما الكابا كازيين فهي جزيئة مختلفة تمامًا ولا تترسب بفعل الكالسيوم. وعندما تفرز الكازيينات، ترتبط ببعضها البعض لتشكل تجمعات تدعى مذيلات ويتم فيها حفظ الألفا والبيتا كازيين من الترسب وذلك من خلال تفاعلاتها مع الكابا كازيين. في الجوهر، يبقى الكابا كازيين عادةً معظم بروتينات اللبن حلولة ويمنعها من التخثر تلقائيًا.

### الجدول رقم ٢: مقارنة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للكازيين وبروتينات مص (شرش) اللبن<sup>١</sup>

الخصائص	الكازيينات	بروتينات مص (شرش) اللبن
البنية	غياب بنية ثانوية، وثلاثية، ورباعية محدة جيدًا؛ تملك بنية لولبية عشوائية	بنية ثلاثية ورباعية محدة جيدًا
تركيبه الحمض الأميني	قليلة الأحماض الأمينية المحتوية على الكبريت؛ غنية بالبرولين	غنية نسبيًا بالأحماض الأمينية المحتوية على الكبريت؛ قليلة البرولين
الحالة الفيزيائية	تتوفر بشكل تجمعات لولبية كبيرة تدعى مذيلات الكازيين	تتوفر كبروتينات كروية بشكل أحادي - أو ثنائي القسمية، بحسب الرقم الهيدروجيني
الذوبانية في ظل رقم هيدروجيني يبلغ ٤,٦	غير حلولة في ظل رقم هيدروجيني يبلغ ٤,٦	حلولة في ظل رقم هيدروجيني يبلغ ٤,٦
الثبات الحراري	جداً ثابتة حراريًا (يمكنها أن تتحمل معالجات على درجات حرارة مرتفعة مثال التعقيم، والحرارة الفوعالية، أو التقطير والتفكيك)	لا تحتمل الحرارة (يمكن أن تنسخ بالكامل، لا سيما عندما يتم تسخينها على درجة حرارة ٩٠ أو أكثر)
تخثر بواسطة تحلل بروتيني محدود أو إيتانول	يمكن أن تتخثر بتحلل بروتيني معين ومحدود (مثال التخثر بالمنفحة أو الإيتانول)	لا يتخثر بسهولة بالانزيم أو بالتحلل البروتيني أو الإيتانول

## الكازيينات

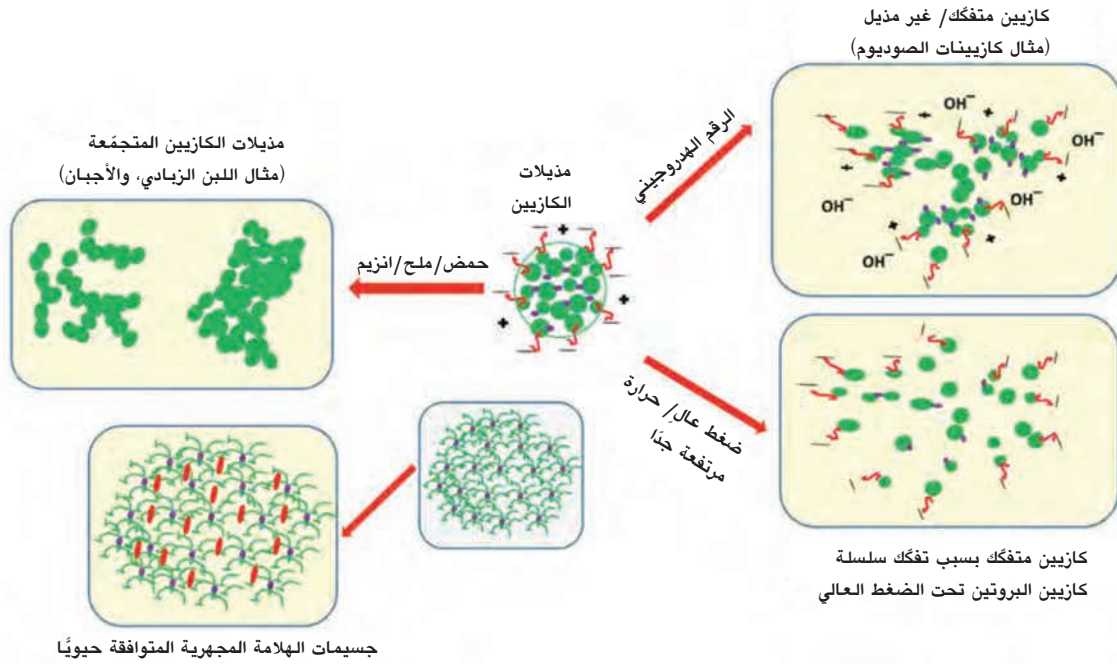
تعتبر الكازيينات البروتينات الأهم في اللبن، حيث تشكل ٨٠ بالمائة من مجموع المواد النيتروجينية في اللبن البقري. وتتواجد في اللبن كمذيلات الكازيين، وقد تم اقتراح نماذج متنوعة لبنية مذيلة الكازيين منذ أن صدرت التقارير الأولى عن هذا الموضوع في العام ١٩٦٩<sup>١</sup>. وبسبب طبيعة الكازيين مذبة الألفة، تتحلل الكازيينات بخصائص استقلاب وفاعلية سطحية ممتازة، ويملك الكازيين شحنة مرتفعة نسبيًا ويحتوي على الكثير من مخلفات البرولين، والقليل من مخلفات السيستين<sup>١٠</sup>. وقد تم نشر لمحة عامة مفصلة عن بنية مذيلات الكازيين وخصائصها<sup>١١</sup>.

تملك الكازيينات بنى ذات مستويات ثلاثية ورباعية متدنية، وهي ميزة تساهم في ثباتها الكبير في الحرارة المرتفعة. غير أنه عندما يتم إخضاع الكازيينات إلى معالجة بالحرارة الشديدة، تطرأ عليها تغيرات مثال نزع الفوسفات وتحلل البروتين. ويمكن أن تحدث بلمرة الكازيينات نتيجة لتفاعلات التكتيف (مثال التفاعلات من نوع ميار) ولتكون مادة الليسينوالانين. أما التغيرات التي تطرأ على مذيلات الكازيين عندما تخضع لمعالجة حرارية، فتشمل زيادة في القطر الهيدرودينامي، وانخفاض في قدرات زيتا والإمالة، وتفكك الكازيينات من المذيلات<sup>١٢، ١٣</sup> التي تمّت مراجعتها بالتفصيل<sup>١٤، ١٥</sup>.



يمكن أن يحدث تجمع وتفكك مذيلات الكازيين بحسب ظروف المعالجة، ودرجة الحموضة والوسط الأيوني. وتعتبر هذه المسألة خاصة مهمة لمذيلات الكازيين، ذلك أنها تشكل الأساس للعديد من المنتجات والمكونات البنائية الوظيفية مثال اللبن الزبادي، والأجبان، وكازيينات الصوديوم (الرسم رقم ٤).

تؤثر أيونات الكالسيوم ( $+Ca$ ) بشكل كبير على عدد كبير من خصائص اللبن المهمة تكنولوجياً مثال الثبات الحراري، وخواص المنفحة، وخصائص القوة والتساحب العائدة إلى هلامة المنفحة. ويتم تثبيت أيونات الكالسيوم ( $+Ca$ ) بالكازيين بشكل رئيس من خلال مخلفات الفوسفوسيريل كما وبواسطة سلاسل حمض الكربوكسيليك الجانبية.



الرسم رقم ٤: مقاربات متنوعة لتعديل وظيفية بروتينات اللبن. ١٥ رسم بياني تخطيطي يظهر التغيرات في مذيلة الكازيين تحت تأثير ظروف المعالجة وصياغة التركيبات.

## بروتينات مصل (شرش) اللبن

إن بروتينات المصل (الشرش) أو بروتينات مصل (شرش) اللبن هي البروتينات التي تبقى حلولة بعد ترسب الكازيين الكهروساوي في درجة حموضة تبلغ ٤,٦ وعلى حرارة ٢٠ درجة مئوية لإنتاج مصل حمضي، أو بعد تخثر الكازيين بواسطة التحلل البروتيني المحدود مع المنفحة لإنتاج المصل الحلو.<sup>١٧,١٦</sup> وتظهر التركيبات المتوسطة لهذين النوعين من المصل في الجدول رقم ٣. تشكل بروتينات مصل (شرش) اللبن حوالي ٢٠ بالمائة (أي ما يعادل ٥ إلى ٧ غرامات لليلتر الواحد) من إجمالي المواد النيتروجينية في اللبن البقري. أما بروتينات مصل (شرش) اللبن الرئيسية فهي بيتا غلوبولين اللبن ( $\beta$ -LG)، وألفا غلوبولين اللبن ( $\alpha$ -LA)، وألبومين المصل البقري (BSA)، والجلوبولين المناعي (Igs) بالترتيب التنازلي لتركيز بروتين مصل (شرش) اللبن. إن بروتينات مصل (شرش) اللبن غالبًا ما تكون كروية الشكل مع توزيع موحّد تقريبًا للأحماض الأمينية الكارهة/الماصة للماء مع سلاسل عديد الببتيد الخاصة بها (بخلاف الكازيين).

الجدول رقم ٣: تركيبات بروتينات المصل الحلو والمصل الحمضي<sup>١٧,١٩,١٨</sup>

البروتين	النسبة المئوية التقريبية لبروتين مصل (شرش) اللبن الإجمالي المصل الحلو	النسبة المئوية التقريبية لبروتين مصل (شرش) اللبن الإجمالي المصل الحمضي
بيتا غلوبولين اللبن	٥٤	٤٥
ألفا غلوبولين اللبن	٢٣	١٨
ألبومين المصل البقري	٦	٥
الجلوبولين المناعي	٦	٥
الببتيدات المشتقة من الكازيين	٢	٢٠
الانزيمات	٢	٢
مركبات شحم البروتين الفوسفاتي	٥	٥

## تقرير تقني: دور بروتينات الألبان والأجبان في أداء المكونات والمنتجات

تفتقر بروتينات مصّل (شرش) اللبن إلى الطبيعة مذبذبة الألفة التي تتمتع بها وحدات مواحيد الكازيين الفرعية، وهي ميزة تمنحها خصائص وظيفية فريدة متعدّدة. ١٨ أمّا محتوى جزيئات بروتين مصّل (شرش) اللبن من البرولين الأدنى بشكل ملحوظ، يمنحها شكلاً كروياً مع محتوى لولبي كبير، الأمر الذي يفسّر قابليتها العالية للامتساح بفعل الحرارة.<sup>٢٠</sup>

تباع بروتينات مصّل (شرش) اللبن تجارياً كمكونات غذائية وتغذوية، مثال مساحيق مصّل (شرش) اللبن، ومركّزات بروتين مصّل (شرش) اللبن، ومعزولات بروتين مصّل (شرش) اللبن. تشكّل مركّزات ومعزولات بروتين مصّل (شرش) اللبن مكونات قيّمة في صناعة المأكولات، نظراً إلى قيمتها الغذائية الممتازة وخصائصها الوظيفية المهمة مثال الاستحلاب، والحلوية، والقدرة على تشكيل هلامات بفعل الحرارة أو الضغط.<sup>٢١، ٢٢</sup> وتختلف تركيبة مركّزات بروتين مصّل (شرش) اللبن التجارية بشكل كبير،<sup>٢٣، ٢٤</sup> لأنها تتأثر بعوامل متعدّدة مثال التركيز، والتغيّرات الموسمية، ونوع المصل (مصدر المصل)، وطرق المعالجة المستخدمة لصنع مركّز بروتين مصّل (شرش) اللبن (الجدول رقم ٤).

يحدث مسخ بروتين مصّل (شرش) اللبن عندما تتأثر الروابط الهيدروجينية، أو كارهة الماء، أو الاسهامية.<sup>١٨</sup> وغالباً ما يكشف هذا الأمر عن سلاسل الحمض الاميني كارهة الماء الجانبية التي تكون عادةً مخبّأة في بنية طبيعة ثلاثية الأبعاد، فتتسبب بالتالي بارتفاع تفاعلية هذه المجموعات. وبفعل التبادل سلفهيدريل-ثنائي السلفيد والتفاعلات كارهة الماء، قد ترتبط البروتينات الممسوخة بأخرى لتتشكّل تجمّعات (الرسم رقم ٣)، ينتج عنها تجمّع وترابط بين الجزيئات ونهاية ترسّب أو تهلم، بحسب عوامل متعدّدة، بما في ذلك تركيز البروتين، معدّلات التسخين والتبريد، الرقم الهيدروجيني (درجة الحموضة)، الشدّة الأيونية.<sup>٢٥، ٢٦، ٢٧، ٢٨، ٢٩، ٣٠</sup> وتمّ وصف التغيّرات في بروتينات اللبن المحتملة بفعل الحرارة في الجدول رقم ٤.

### الجدول رقم ٤: أوصاف التغيّرات المحتملة في البروتين، احدثه بفعل الحرارة

التهلم هو تجمّع منتظم لبروتينات طبيعة و/أو بروتينات ممسوخة (جزيئياً)، مشكّلاً بذلك بنية شبكية ثلاثية الأبعاد تكون فيها التفاعلات بين بروتين-بروتين وبين بروتين-مذيب متوازنة لتكوّن مصفوفة منظّمة قادرة على حفظ كميات كبيرة من الماء.

التجمّع أو البلمرة: إنّ المصطلحات تجمّع أو بلمرة، وترسّب، وتخثر، والتلبّد، تشير إلى التفاعلات بين بروتين وبروتين ثان غير محدّدة وتؤدي إلى تشكّل مركّبات كبيرة تملك أوزان جزيئية أكبر.

مسخ البروتين هو أي تعديل يطرأ على الشكل الثانوي أو الثلاثي أو الرباعي ولا يترافق وانقطاع روابط الببتيد المعنّية بالبنية الأولية. ويمكن أن يستجيب الشكل النهائي بعد المسخ لبنية عديد الببتيد غير المطوية بشكل كامل (لولب عشوائي) أو جزئي.

### العلاقة بين بنية بروتينات اللبن ووظيفتها

تحدّد العلاقة بين بنية بروتينات اللبن ووظيفتها دورها في المنتجات النهائية، ذلك أنّ اللبن نظام لولبي، والعوامل الضمنية والخارجية تؤثر على التفاعلات في البروتينات وبينها. كما أنّ العوامل الخارجية التي تؤثر على درجات المسخ والتجمّع والتفاعلات بين بروتين وبروتين وعلى المستوى الجزيئي تشمل الحرارة، وتركيز البروتين، والرقم الهيدروجيني، والشدّة الأيونية، ونوع الأيون، وظروف المعالجة، والطاقة الخارجية مثال القصّ، أو الحرارة، أو الضغط العالي، أو التعريض لأموّج فوق سمعية. أمّا العوامل الضمنية فتشمل، كره الماء، والتفاعلات الكهروستاتيّة، والروابط ثنائية السلفيد، والوزن الجزيئي، وتركيبه الأحماض الأمينية (الرسم رقم ٥).<sup>٢٨</sup>

#### العوامل الضمنية

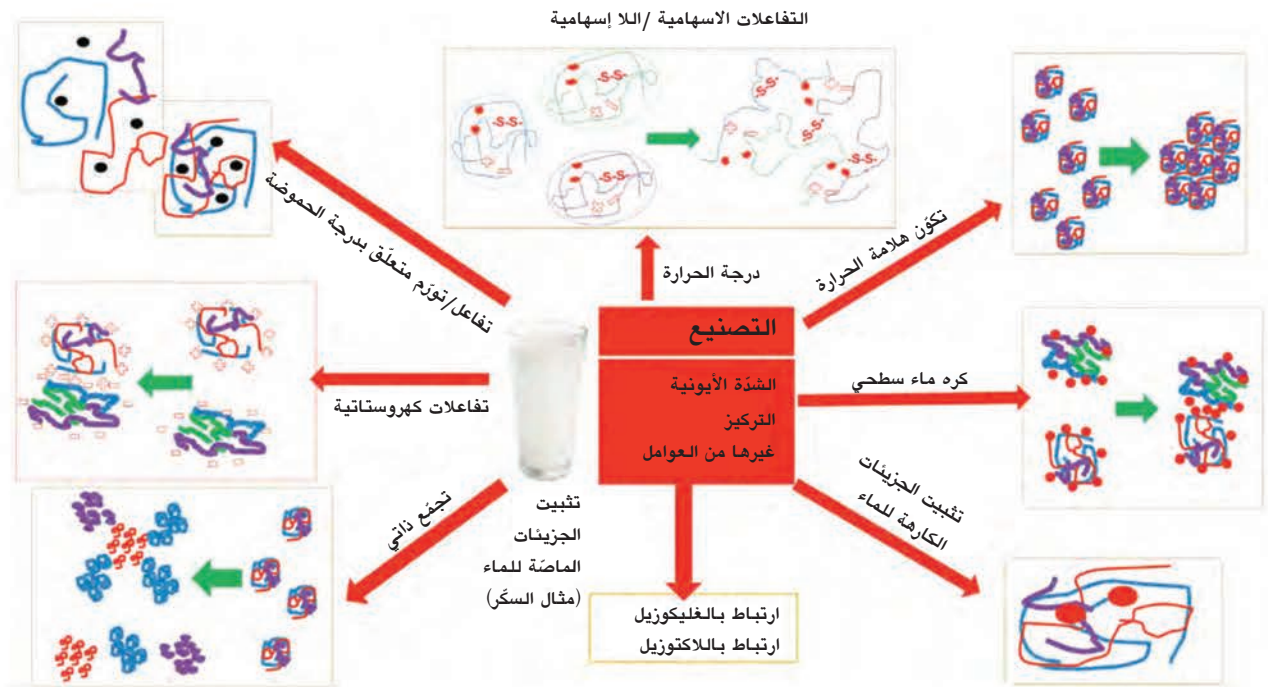
تركيبه الأحماض الأمينية  
الوزن الجزيئي  
كره الماء  
التفاعل الكهروستاتي  
عدد الروابط ثنائية السلفيد والمجموعات الخالية من السلفيرال

#### العوامل الخارجية

الحرارة  
الضغط  
الرقم الهيدروجيني  
تركيز البروتين  
الشدّة الأيونية  
أنواع الأملاح (تساهمية، ثنائية التساهمية)

تحدّد بنية الغذاء مظهر المنتج النهائي، وكتلته، وقوامه، وخصائصه الحسية، وتوفّره الحيوي، والمواد المغذية التي يقدّمها. لذلك يمكن استخدام تركيبات وظروف تصنيع محدّدة لتصميم تفاعلات معيّنة بين بروتين-بروتين، تؤدّي في نهاية المطاف إلى تطوير منتجات غذائية ذات بنى مختلفة. وتعتمد أنواع تفاعلات البروتين المختلفة على البيئة في نظام الغذاء، وقد تمّ تلخيصها في الرسم رقم ٦. فيتّم بالتالي استخدام المعرفة ببنية البروتين وبالتفاعلات بين بروتين-بروتين في تطوير مكوّنات لبنية ذات وظيفيّات محدّدة، كما وفي تطوير المنتجات الغذائية النهائية والمشروبات.

وتكمن الفرصة في دمج المعرفة بعلاقات بين البنية والوظيفة والتفاعلات بين بروتين-بروتين والخصائص الوظيفيّة، لتعديل نتائج التصنيع، مثال مسخ بروتينات اللبن ومسارات تجمّعها. وعلى سبيل المثال، تملك بروتينات اللبن خصائص تثبيت، وحفظ الماء، واستحلاب. ويمكن تحسين هذه الخصائص إلى أقصى الحدود لتطوير منتجات غذائية ذات بطاقات معلومات بيانية "نظيفة" (أي الحدّ من استخدام المثبّطات والمستحلبات). ويتطلّب الحصول على بنى غذائية مصمّمة لتكون موافقة لاحتياجات المستخدم، الجمع بين الإلمام بخصائص البروتينات الفيزيائية والكيميائية، والتفاعلات بين ضوابط التصنيع والصياغة.

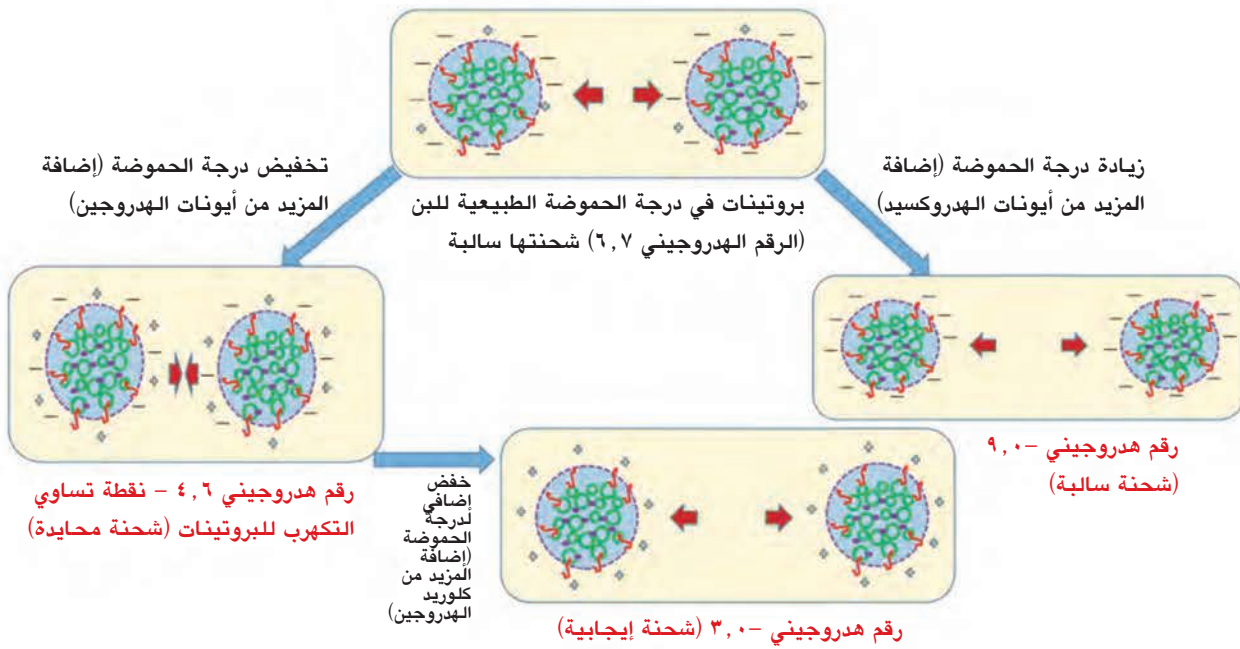


الرسم رقم ٦: رسم بياني تخطيطي يظهر إمكانية التحكّم بتفاعلات البروتين إذ أنّها تتأثّر بظروف الصياغة وضوابط التصنيع المختلفة.<sup>٣٩</sup>

إنّ التغيرات في بنية البروتين والتفاعلات بين بروتين-بروتين كما وتفاعلات البروتين مع مكونات أخرى في نظام الأغذية، تؤثر كلّها على خصائص المنتج النهائي التركيبية والوظيفية (مثال التهلّم واللزوجة). ويمكن للبروتينات أن تتفاعل مع بروتينات أخرى أو مع مكونات أخرى متوفّرة في الأنظمة الغذائية، مثال الكربوهيدرات، والدهون والمعادن. ويعقدّ هذا الموضوع النظام أكثر إلاّ أنّه يوفّر فرصاً لتطوير منتجات ذات قوام مبتكر. ونذكر على سبيل المثال، أنّ هلامات البروتين، وبوجود كريات الدهون الصغيرة التي تحتوي على شحوم وذات توزيع جسيمي ضيق، تملك قوام ناعم وقوة تهلم أعلى.<sup>٣٠</sup> وهذا ما يشير إلى إمكانية التحكّم بقوام المنتج النهائي ونعومته، من خلال التحكّم بالتفاعلات بين البروتينات والشحوم في الأنظمة الغذائية.

تعتبر شحنة جزيئة البروتين في ظلّ درجة حموضة معيّنة مهمّة لأنها تؤثر بتنافر وتفاعل البروتين الكهروستاتي (الرسم رقم ٧).<sup>٣١، ٣٢</sup> ويمكن تعديل القوى المنفّرة من خلال تغيير درجة الحموضة لمحلول البروتين أو من خلال إضافة أيونات أو ملح إليه، الأمر الذي يسمح بتكييف التفاعلات بين بروتين-بروتين بحسب الاحتياجات.

وهذا سبب من أسباب تراجع القوى المنفّرة الكهروستاتيّة نتيجةً للزيادة في الشدّة الأيونية.<sup>٣٣</sup> كما ويؤثّر نوع الملح (مثال الأملاح أحادية الاسهام مقابل الأملاح ثنائية الإسهام) أيضاً في التفاعلات بين بروتين-بروتين وفي نوع الهلامة التي تتشكّل. أمّا تركيز الملح المطلوب لتغيير بنية الهلامة المجرّية فيعتمد على موقع الملح في سلسلة هوفمايستر.<sup>٣٤</sup>



الرسم رقم ٧: شحنة سالبة صافية: رسم بياني تخطيطي يبيّن تأثير درجة الحموضة (الرقم الهيدروجيني) على شحنات جزيئات البروتين وعلى تفاعلات البروتين.<sup>٣٥</sup>

## وظيفة بروتين اللبن

بالإضافة إلى أنها مصدر ممتاز للمواد المغذية، تلعب بروتينات اللبن دورًا مهمًا في مَدّ المنتجات النهائية بخصائص وظيفية مرغوبة. وتستخدم المكونات اللبنية كمكوّنات وظيفية لمروحة من الاستخدامات في الصناعات الغذائية (الجدول رقم ٥)، حيث يتم استخدام مكونات مثل مسحوق اللبن كامل الدسم، ومسحوق اللبن منزوع الدسم، ومركّز بروتينات اللبن، ومركّزات ومعدّلات بروتينات مصّل (شرش) اللبن، في تركيبات منتجات الألبان معاد تكوينها أو مشروبات غذائية وبديلة للوجبات الغذائية.

وتكثر الحالات التي تخضع فيها هذه المأكولات والمشروبات إلى معالجات حرارية شديدة مثل العلاج بالحرارة الفوقالية (UHT)، أو التقطير بالمعوجة لإطالة مدة الصلاحية والتأكد من سلامة الغذاء وملاءمته للاستهلاك البشري. لذلك فإنّ المكونات المعدة للاستخدام في المأكولات والمشروبات التي تتطلّب أن يحافظ نظام البروتين على حلوليته، مثال المشروبات الجاهزة للشرب، يجب أن تكون ثابتة حراريًا وقادرة على تحملّ المعالجات الحرارية الشديدة التي تستخدم في العادة.

الثبات الحراري هو كناية عن قدرة البروتينات على الصمود بعد خضوعها لمعالجة حرارية، من دون تغييرات ضارة، مثال العكارة الزائدة، أو اللزوجة الزائدة، أو فصل الأطوار، أو الترسيب، أو التهلّم، في خلال المعالجة أو بعدها بقليل.<sup>٤١</sup> ويتوقّف ثبات اللبن الحراري على ثبات بروتيناته.<sup>٤٢</sup> استخدام الحرارة يؤدي إلى مستويات من المسخ والتجمّع، ونتيجة لذلك يمكن أن يصبح قوام المزيج غليظًا أو هلاميًّا.<sup>٤٣</sup> وقد يكون مسخ وتجمّع بروتينات مصّل (شرش) اللبن ضارًا في الحالات التي يراد فيها تحقيق ثبات حراري. نذكر أمثلة عن نتائج الثبات الحراري الضعيف في خلال التصنيع، وهي على الشكل التالي:

- قيود على تركيز المواد الصلبة (المواد الصلبة الإجمالية) التي يمكن تصنيعها
- تدني فعالية العملية
- تراجع القدرة على تحملّ الوقت والحرارة في خلال التصنيع

لذلك يعتبر الثبات الحراري واحد من أهم الاعتبارات المتعلقة بالتصنيع عندما يتمّ انتقاء المكونات التي تستخدم في المأكولات والمشروبات.

ويمكن أن تحدث بروتينات مصّل (شرش) اللبن بشكل خاص المسخ والتجمّع والتهلّم الناتجة عن المعالجة الحرارية (الرسم رقم ٨). وتجدر الإشارة هنا إلى أنّ القدرة على تكوين الهلامة بفعل الحرارة لتحقيق الخصائص الحسية والتركيبية المرغوبة في الأغذية، هي خاصية وظيفية مهمة تملكها بروتينات مصّل (شرش) اللبن. ويمكن تصنيف هذه الهلامات إلى "دقيقة" أو "جسيمانية" (وفقًا للمظهر، أو البنية المجهرية، أو الخصائص التمييعية). وسيساهم نوع البنية في تعزيز خصائص المنتجات النهائية التركيبية المختلفة. ويمكن تشكيل تجمّعات بروتينية لا تساهم في كارهة للماء في الغالب) ومرتبطة بثنائي السلفيد في خلال تهلّم وتجمّع بروتين مصّل (شرش) اللبن.<sup>٤٤,٤٥,٤٦</sup>

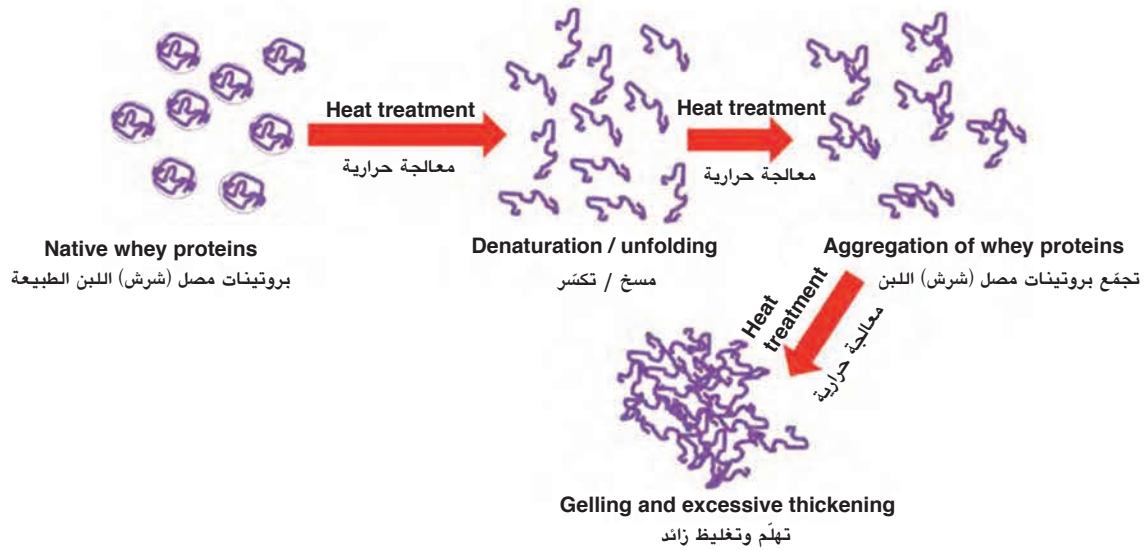


الجدول رقم ٥: خصائص وظيفية مختارة للمكونات اللبنية واستخداماتها في المنتجات النهائية ٣٦، ٣٧، ٣٨، ٣٩، ٤٠

الرقم	الخاصية	الوصف	أمثلة عن تطبيق مخار
١	تثبيت الماء	تتفاعل مع مكونات المنتج لتأمين قدرة عالية على حفظ الماء	منتجات اللحوم المخبوزات الحلويات شبيهات الأجبان التحليات المجمدة المأكولات الجاهزة
٢	للزوجة	التفاعلات مع مكونات المنتج الأخرى، والتركيز، وبنية البروتين، والمعالجات الحرارية، كلها تؤثر على مستوى اللزوجة	الشوربات والصلصات أنواع اللبن الزبادي الحلوى المطبوخة المشروبات
٣	الاستحلاب	القدرة على الحفاظ على سائلين لا يمتزجان (مثال الماء والزيت) في مستحلب ثابت	مبيض القهوة المتلوجات صلصات السلطات النقانق (مستحلبات اللحوم) الشوربات، والصلصات، والغموس المايونيز الجبن المطبوخ
٤	الإرغاء	القدرة على تشكل هلامات ثابتة في بيئة هواء/ماء، ما يؤمن قدرة خفقان ممتازة (أي القدرة على امتصاص الهواء وحفظه في المنتج)	المتلوجات التحليات المجمدة القشدة المخفوقة والطبقات العلوية من الحلويات الحلويات المهوأة (مثال النوعة وحلوى الختمي) الكعكات والموسية المرنغ
٥	التهلّم	تؤمن للمنتجات الغذائية بنية مادية من خلال ربط البروتين بشكل تصالبي: تحسن التحسس الفموي في بعض التطبيقات	أنواع اللبن الزبادي المخبوزات أنواع الكسترد الحلويات منتجات اللحوم المأكولات الجاهزة
٦	الحلويّة / الثبات الحراري	القدرة على البقاء في المحلول في مختلف ظروف التصنيع والتركيزات، بالإضافة إلى الظروف المتغيرة مثال تغير الرقم الهيدروجيني، ومستويات المعادن، والمعالجة الحرارية	اللبن المعاد تكوينه، والمعالج على حرارة فوعالية، والمعقم الشوربات والصلصات تغذية الرضع ومنتجات التغذية الخاصة مبيض القهوة مشروبات الرياضيين مشروبات العصائر المدعّمة بالبروتين
٧	العتامة / الصفاء	خصائص بصرية من عتامة في المشروبات إلى صفاء في مشروبات الرياضيين مرتفعة الحموضة	مشروبات لبنية مدعّمة مشروبات بروتينية للرياضيين الشوكولاته الحلويات / حلوى الكراميل الصلصات صلصات السلطات
٨	تعزيز النكهة/ اللون	ترتبط عادة بتفاعل مبيار، فتؤمن الخصائص المرغوب فيها مثال اللون الأسمر الموحد والنكهات المكرمة	الحلويات، وحلوى الكراميل الحلوى اللينة وطبقات تغطية الحلويات المخبوزات (العجين، الكعك، المافن، البسكويت الهش) الصلصات/الشوربات

## تقرير تقني: دور بروتينات الألبان والأجبان في أداء المكونات والمنتجات

كان تهلم البروتين يتحقق تقليدياً من خلال التسخين، لكن يمكن استخدام عمليات فيزيائية وكيميائية أخرى أيضاً.<sup>٤٧</sup> ويشكل الضغط وسيلة فيزيائية أخرى، كما وتشمل الوسائل الكيميائية التخمير، والترابط الانزيمي المتبادل، واستخدام الأملاح. وتسبب هذه الوسائل تغيرات في بنية البروتين وفي التفاعلات بين بروتين-بروتين وتفاعلات البروتين مع مكونات أخرى في المحاليل. وتختلف خصائص كل هلامة بحسب عوامل مثال تركيز البروتين، و/أو درجة المسخ الذي سببه مستوى الحموضة و/أو الحرارة، و/أو الشدة الأيونية و/أو الضغط.<sup>٤٨</sup> وأفيد أيضاً أن التفاعلات بين بروتين-بروتين وبين بروتين-مذيب تتأثر بعوامل لها تأثير على تهلم البروتين وعلى نوع الهلامات وخصائصها.<sup>٣١،٤٩</sup>



الرسم رقم ٨: رسم بياني يظهر تأثيرات المعالجات الحرارية الشديدة، مثال المعالجة بالحرارة الفوعالية (UHT) أو التقطير بالمعوجة، على محاليل بروتين مصّل (شرش) اللبن. ويمكن أن تؤدي المعالجة الحرارية الشديدة لمحاليل بروتين مصّل (شرش) اللبن إلى مسخ بروتينات مصّل (شرش) اللبن، أو تجمّعها، أو تهلمها، أو تغليظ قوامها بشكل زائد.

### المعالجة الحرارية وبروتينات اللبن: التأثير على الوظيفية

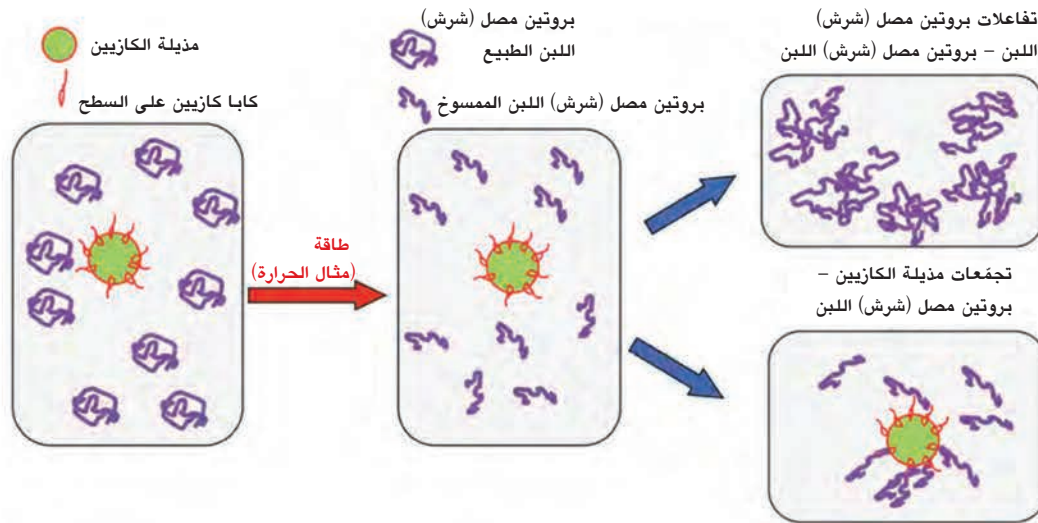
تعتبر المعالجة الحرارية عملية أساسية تستخدم في صناعة الألبان والأجبان لتأمين سلامة المنتجات الميكروبيولوجية، وإطالة مدة الصلاحية، وتعديل الخصائص الوظيفية لمنتجات اللبن.<sup>٥٠،٥١،٤٤،١٤،١٧</sup> ويعطي الجدول رقم ٦ أمثلة عن المعالجات الحرارية الأكثر شيوعاً المستخدمة في تصنيع الألبان والأجبان.<sup>١٤،١٧</sup>

الجدول رقم ٦: أمثلة عن المعالجات الحرارية الأكثر شيوعاً المستخدمة في تصنيع الألبان والأجبان.<sup>١٤،١٧</sup>

ظروف الحرارة / الوقت	المعالجة الحرارية
٦٥ درجة مئوية لمدة ٣٠ ثانية	تعقيم اللبن
٧٢ درجة مئوية لمدة ١٥ ثانية	البسترة
٨٠ إلى ١٢٠ درجة مئوية لمدة ٢ إلى ١٠ دقائق	معالجة التسخين المسبق لمسحوق اللبن
٩٠ درجة مئوية لمدة ٥ إلى ١٠ دقائق	معالجة التسخين المسبق لصناعة اللبن الزبادي
١٤٠ درجة مئوية لمدة ٣ إلى ٢٠ ثانية	التعقيم على درجة فوعالية
١١٠ إلى ١٢٠ درجة مئوية لمدة ٥ إلى ٢٠ دقيقة	التعقيم/التقطير بالمعوجة

وتؤدي المعالجات الحرارية هذه كلها إلى درجات مختلفة من المسخ والتجمّع والتفاعلات البروتينية.<sup>٥٣،٥٢،٥٠</sup> وتجدر الإشارة هنا إلى أن الغلوبولين المناعي، واللاكتوفيرين، وألبومين المصل البقري حساسة تجاه المعالجة الحرارية، وأن المسخ الجزئي لهذه البروتينات يطرأ في خلال البسترة التجارية. ويتعرض بيتا غلوبولين اللبن وألفا ألبومين اللبن إلى المسخ بشكل مكثف في خلال معالجات التسخين المسبق المستخدمة لصناعة مسحوق اللبن، وفي خلال المعالجة الحرارية الفوعالية. وتشكل هذه البروتينات، بحسب شدة المعالجة الحرارية، نسب متفاوتة من التجمّعات ذات وزن جزيئي مرتفع موصولة من خلال الروابط ثنائية السلفيد أو التجمّعات المترابطة الكارهة للماء. وبالإضافة إلى تشكل تجمّعات حلولة مثال مثنويات ومثاليث بيتا غلوبولين اللبن وألفا ألبومين اللبن وألبومين المصل البقري، تتشكل مركبات موصولة بروابط ثنائية السلفيد بين الكازينين (كابا كازينين وألفا ٥٢ كازينين) وبروتينات مصّل (شرش) اللبن.<sup>٥٠، ٥٤، ٥٢</sup> ويمكن أن توصل تفاعلات مماثلة نتيجة للعملية، بخصائص وظيفية معينة.

عندما يتم تسخين اللبن الذي تتوفر فيه الكازيين وبروتينات مصل (شرش) اللبن، تتفاعل بروتينات مصل (شرش) اللبن مع مذيلات الكازيين لتشكّل مركّبات من كازيين-بروتين مصل (شرش) اللبن (الرسم رقم ٩).<sup>٥٣،٥٢،٥٦،٥٥</sup> تستنتج معظم الدراسات في هذا الخصوص أنّ التفاعلات التبادلية بين الثيول وثنائي السلفيد، والتي تؤدي إلى تشكّل روابط بين جزيئات ثنائي السلفيد، وتلعب دورًا مهمًا في تجمّع بيتا غلوبولين اللبن بفعل الحرارة، وفي تفاعله مع بروتينات أخرى مثال الكازيين. كما وتفيد الدراسات أيضًا أنّه بالإضافة إلى تجمّع الروابط الاسهاميّة (ثنائية السلفيد) بين الجزيئات، تلعب التفاعلات اللا إسهاميّة (ومنها التفاعلات الكارهة للماء والأيونية) دورًا أيضًا في تفاعلات بروتينات اللبن التي تحدثها الحرارة. ولطالما تمّ اعتبار التفاعلات بين بيتا غلوبولين اللبن والكابا كازيين مهمّة جدًا لوظيفية عدد كبير من منتجات الألبان والأجبان. كما ويقوم جسران ثنائيًا البروتين ومجموعة حرّة من السلفهيدريل متواجدة في البنية الطبيعية لبيتا غلوبولين اللبن يلعب دور مهمّ في تفاعلاته مع الكابا كازيين التي تحدث من جراء الحرارة (الرسم رقم ٩).<sup>٥٢،٥٩،٥٨،١٤،٥٧</sup>



الرسم رقم ٩: رسم بياني تخطيطي يظهر تفاعلات البروتين الممكنة في نظام اللبن المعالج حراريًا.

تتوفّر أمثلة معروفة جدًا عن التأثيرات المفيدة لوظيفية بروتينات اللبن الناجمة عن الحرارة، وتشمل تهلم بروتينات مصل (شرش) اللبن الناجمة عن الحرارة،<sup>٢</sup> ومعالجات التسخين المسبق لتعزيز الثبات الحراري لمسحوق اللبن، ومنتجات اللبن المبخرّة والمعمّمة،<sup>٦١،٦٠</sup> وخصائص وظيفية محسّنة لمسحوق اللبن،<sup>٦٢</sup> وقوام محسّن اللبن الزبادي.<sup>٦٣</sup> وقد تمّت دراسة هذا الموضوع بشكل مفصّل.<sup>٥٢</sup>

### المعالجة الحرارية وبروتينات مصل (شرش) اللبن: التأثيرات على الوظيفية

يمكن لبروتينات مصل (شرش) اللبن في خلال التسخين أن تدمج وأن تشكّل تجمّعات حلولة أو تجمّعات غير حلولة (هلامات) من خلال التفاعل مع بروتينات مصل (شرش) اللبن الأخرى (راجع الجدول رقم ٥ لوصف المصطلحات) في النظام.<sup>٦٤،٦٦،٦٧،٦٨،٦٩،٧٠،٧١،٧٢،٧٣</sup> ولا بدّ من الإشارة بشكل خاص إلى أنّ لبروتينات مصل (شرش) اللبن المختلفة استجابات مختلفة للمعالجات الحرارية في ما يتعلّق بالتغيّرات في التكوين الجزيئي، وتغيّر أنماط الترابط، وتكوّن تجمّعات بين البروتينات بواسطة تبادل روابط ثنائي السلفيد والترابطات كارهة الماء المعدلة. وتختلف سلوكيات المسخ بشكل واضح في بروتينات مصل (شرش) اللبن الفردية لأنّ درجة حرارة التحول تختلف باختلاف بروتينات مصل (شرش) اللبن (الجدول رقم ٧). ويعكس التجمّع والمسخ الحراريان لبروتينات مصل (شرش) اللبن الإجمالية الاستجابة الجماعية للبروتينات المركّبة<sup>٧٤</sup>، وذلك لأنّ نظام بروتين مصل (شرش) اللبن متغاير، ولأنّ البروتينات الفردية تستجيب للحرارة بشكل مختلف.

الجدول رقم ٧: درجات حرارة المسخ الحراري والمحتويات الحرارية لبروتينات مصل (شرش) اللبن<sup>٢٥،٧٥،١٧</sup>

بروتين مصل (شرش) اللبن	حرارة المسخ الأولية (درجة مئوية)	درجة الحرارة على الحد الأقصى لذروة قياس الكالوري التقريبي التفريقي (درجة مئوية)	المحتوى الحراري للمسوخ (كيلوجول/الجزيئة)
بيتا غلوبولين اللبن	٧٨	٨٣	٣١١
ألفا ألبومين اللبن	٦٢	٦٨	٢٥٣
ألبومين المصل البقري	٦٤	٧٠	٨٠٣
الغلوبولين المتاعي	٧٢	٨٩	٥٠٠

## بعض الاستخدامات التجارية للمعالجات الحرارية من أجل وظيفية البروتين

### ١. اللبن الزبادي

إنّ معالجات التسخين المسبق (أي على ٩٠ درجة مئوية لمدة ١٠ دقائق) تستخدم بشكلٍ شائعٍ اللبن المستعمل في صناعة اللبن الزبادي، وتفيد التقارير في هذا الخصوص إلى أنّها تعزّز خصائص اللبن الزبادي التركيبية والتميعية والبنوية المجرية.<sup>٧٧،٧٦</sup> ويُعتقَد أنّ التفاعلات التي تحدث بفعل الحرارة بين بيتا غلوبولين اللبن والكابا كازيين من خلال التبادل سلفهريد-ثنائي السلفيد، أساسيةٌ لتحسين قوام اللبن الزبادي.<sup>٥٢،٨٤</sup> كما أنّ أنواع اللبن الزبادي المصنوعة من ألبان مسبقة التسخين تتمتع بمستوى أعلى من الحموضة في مرحلة التهلّم وأنها تنتج هلامات متماسكة أكثر من تلك التي ينتجها الزبادي المصنوع من ألبان غير مسخنة.<sup>٧٨،٥٦،٦٣،٧٦</sup>

### ٢. مساحيق اللبن

في خلال تصنيع مساحيق اللبن، يخضع اللبن إلى مجموعة من معالجات التسخين المسبق بهدف إنتاج مساحيق لبن ذات خصائص وظيفية محدّدة. وتصنّف مساحيق اللبن منزوع الدسم بشكلٍ عام كمساحيق منخفضة الحرارة، ومتوسّطة الحرارة، ومرتفعة الحرارة. ويستند هذا التصنيف عادةً إلى مؤسّر نتروجين بروتين مصّل (شرش) اللبن (WPN)، وهو كمية بروتين مصّل (شرش) اللبن غير الممسوخ المتوفّر في المسحوق. وهو مرتبط بمسح بروتينات مصّل (شرش) اللبن نتيجةً لمعالجة حرارية معيّنة تمّ استخدامها في صناعة مساحيق اللبن، وبشكلٍ خاص في أثناء معالجة التسخين المسبق، والتبخّر، والتجفيف.<sup>١</sup> ولا بدّ من الإشارة إلى أنّ التفاعلات التي تحدث بين بروتينات مصّل (شرش) اللبن الممسوخة ومذيّلات الكازيين تؤثر في نهاية المطاف على وظيفية مساحيق اللبن. وتؤثر هذه التفاعلات البروتينية أيضًا على سلوك مذيّلات الكازيين في خلال المعالجات الإضافية مثال التبخّر والتجفيف.<sup>٧٩</sup> ويكبر حجم مذيّلة الكازيين في أثناء عملية التبخّر نظرًا لتجمّع المذيّلات أو ترابط بروتينات مصّل (شرش) اللبن والمذيّلات.

وفي خلال تصنيع المساحيق عالية البروتين، يمكن لتركيز اللبن بالترشيح الفائق، وبشكلٍ خاص الترشيح الدقيق قبل التجفيف، أن يسبّب تفكك فوسفات الكالسيوم الغرواني، الأمر الذي يؤدي إلى قلقله بنية مذيّلة الكازيين وإلى احتمال توزم مذيّلات الكازيين. كما وتسبّب زيادة درجة التركيز تفكك بنية المذيّلة تدريجيًا التي تتحوّل من مذيّلة سليمة إلى مذيّلة متورّمة منتشرة، ونهايةً إلى بنية مذيّلة صغرى مجرّأة. وتهيئ تغييرات مماثلة في مذيّلة الكازيين، نظام اللبن إلى المزيد من التفاعلات بين بروتين-بروتين في أثناء التجفيف الردي، وتؤثر بالتالي على وظيفية المكونات.<sup>٨١،٨٠،٧٩</sup>

## التغيرات غير المنسوبة إلى الحرارة في الخصائص الوظيفية لبروتينات اللبن

يمكن تعديل ثبات بروتينات اللبن وخصائصها الوظيفية، ومنها اللزوجة، والتهلّم، والاستحلاب، وذلك من خلال إجراء تعديلات فيزيائية وكيميائية على بروتينات اللبن (أي باستخدام الحرارة والقصّ والمعالجة بضغط مرتفع، والمعالجة بالموجات فوق الصوتية، والرقم الهدروجيني، التحكم بالشدّة الأيونية وبالشحن)؛ ومن خلال التعديلات الانزيمية (مثال ترابط البروتينات التبادلي بناقلة الغلوتامين)؛ أو من خلال التعديلات الكيميائية (مثال الارتباط بالسكسينيل، والارتباط باللاكتوزيل، والارتباط اللجيني). ويمكن استخدام مقاربات مماثلة لتكييف الخصائص الوظيفية لبروتينات اللبن لتتماشى وتوفّعات العمل.

وأفادت بعض التقارير أنّ الترابط التبادلي والتعديلات الانزيمية لبروتينات اللبن من خلال ناقله الغلوتامين، تحسّن خصائص بروتينات اللبن الوظيفية،<sup>٨٢</sup> بما في ذلك تماسك الهلامة، والقدرة على حفظ الماء،<sup>٨٢</sup> ولزوجة الهلامات الحمضية.<sup>٨٤،٨٥،٨٦</sup> ويتيح هذا الأمر إمكانية إنتاج لبن زبادي قليل الدهن من دون إضافة صمغ،<sup>٨٦</sup> كما ويمكن أن يساعد على منع فصل المصل (الشرش) أو التساحب اللذين تسببهما التغيرات الحرارية أو الآثار المادية. ويمكن لمعالجة بروتين اللبن بناقله الغلوتامين أن تحسّن أيضًا الثبات الحراري لبروتينات اللبن.<sup>٨٧،٨٨،٨٩</sup> وقد تساعد التعديلات الانزيمية أيضًا في تحسين النشاط السطحي وخصائص الاستحلاب الخاصة ببروتينات اللبن.<sup>٩٠</sup>

كما وتتيح التعديلات الكيميائية، مثال ارتباط بروتينات اللبن بالسكسينيل،<sup>٩١</sup> تطوير منتجات جديدة من خلال تكوين مركبات كهروستاتيّة ثابتة بين البروتينات الأنيونية الطبيعية ومشتقات البروتين من خلال شحنة إيجابية صافية. أضف أنّ ترتيب طبقات مذيّلات كازيينات الصوديوم الفرعية من أجل تنضيد الطبقة الغشائية الرقيقة عبر الانتقال التدريجي، قد يلعب دورًا مهمًا في ثبات مستحلبات الأغذية.<sup>٩٠،٩٢</sup>

وتمّ مؤخرًا استخدام معالجة بروتينات اللبن بثنائي أكسيد الكربون لتحسين نسبة الكازيين المذيل إلى الكازيين غير المذيل في اللبن المعدّ لصناعة أنواع اللبن الزبادي بشكلٍ وقوام ونكهة مكيّفة بحسب الطلب. كما وتمّ استخدامها أيضًا لتحسين الخصائص الوظيفية (الحلولية، والاستحلاب، والثبات الحراري) لمركّزات بروتين اللبن ولمركّزات مذيّلات الكازيين.<sup>٩٣</sup>

وتقوم مقاربة أخرى على تنفيذ معالجة بالضغط العالي (HPP) لحفظ وتعديل جوانب مختلفة من المأكولات، بما فيها تعديل خصائصها الوظيفية.<sup>٩٤،٩٥،٩٦،٩٧،٩٨</sup> وأفيد أنّ هذه المقاربة هي أداة مادية لتعديل البروتين، وأنها بالتالي قادرة على إنتاج منتجات لبنية جديدة بقوام وخصائص وظيفية معدّلة.



وتحظى المعالجة بالضغط العالي (HPP) بقبول متزايد في مجال معالجة الأغذية وحفظها، وذلك بسبب طلب المستهلكين المتزايد على المنتجات الغذائية السليمة والمغذية والبطاقات البيانية النظيفة و"شبه الطازجة" ذات مدة صلاحية مقبولة.<sup>٩٦،٩٥،٩٤،٩٩</sup> وتؤدي المعالجة بالضغط العالي إلى مسخ البروتين، وتجمعه، وتهلمه، من خلال زعزعة التوازن الدقيق بين الروابط التي تثبت البنية الطبيعية للبروتينات.<sup>١٠٠،١٠١،١٠٢،١٠٣،١٠٤</sup> يختلف الأثر عن الحرارة ويتوقف على نوع البروتين، والرقم الهيدروجيني، والشدة الأيونية، والضغط المستخدم، وحرارة الضغط، ومدة المعالجة بالضغط.<sup>١٠٥،١٠٦،١٠٧</sup> يمكن لزعزعة الثبات أن تؤثر على سلوك التجمع، والوظيفية الناتجة عن الضغط مثال تكوّن الهلامية، وخصائص بروتينات مصل (شرش) اللبن المائية والتميعية والتكيبية المجهرية.<sup>١٠٨،١٠٩،١١٠،١١١</sup> ويمكن مراجعة فصول شاملة عن تأثيرات المعالجة بالضغط العالي على بروتينات اللبن.<sup>١١٣،٥١،١١٢،٥٣</sup>

وتبرز المعالجة بالموجات فوق الصوتية بتكنولوجيا صاعدة في تطبيقات الأغذية والألبان والأجبان. ويشير المصطلح "فوق الصوتية" إلى موجات صوتية أعلى من تردد السمع البشري (معادل أو أعلى من ١٨ كيلوهيرتز). عندما تمر الموجات فوق السمعية عبر سائل، تكبر نوى الفقائيع السائلة المتواجدة في السائل من خلال تكثف الفقائيع والانتشار المقوم. وعندما يصبح حجم الفقائيع حرجاً تنهار بفعل ظروف شبه مكظومة الحرارة (من دون تبادل للحرارة)، فينتج عن ذلك ظروف بالغة الصعوبة تضم في السائل المحيط قوى قص بالغة الحدة، واضطرابات، وتدفق صغير. ويعرف هذا الأمر بالتجويف السمعي،<sup>١١٤</sup> تستخدم هذه الآثار السمعية في تصنيع المواد الغذائية. وتكثر استخدامات الآثار المادية المحدثة بفعل الموجات فوق الصوتية في تصنيع الألبان والأجبان، في تطبيقات، مثال تحسين الترشيح الدقيق للمصل (الشرش)،<sup>١١٥</sup> وتخفيف لزوجة المنتج،<sup>١١٦</sup> وتجانس كريات اللبن الدهنية، وتغيير خصائص التخمر،<sup>١١٧</sup> وتبلر اللاكتوز السمعي<sup>١١٨</sup>، وتقطيع كتل الجبن.<sup>١١٩</sup>

إنّ تزايد توفر دفق فعال واسع النطاق ومستمر من خلال أنظمة الموجات فوق السمعية سمح لهذه الإجراءات الانتقال من المختبر إلى العمليات التجارية في كل أنحاء أوروبا والولايات المتحدة.<sup>١٢٠</sup> وقد برهنت المعالجة بالموجات فوق السمعية أنها تكنولوجيا تصنيع غذائي مهمة وأنها تملك قدرة قوية على تعديل التطبيق الوظيفي لبروتينات الألبان والأجبان، أي الكزيين ومصل (شرش) اللبن. كما وأنها قادرة على تحقيق مبيعات تدريجية في سوق متصاعدة الأسعار وعائدات جيدة على استثمار رأس المال.<sup>١٢٠</sup>

## الخلاصة

يعتبر اللبن، وبروتينات اللبن بشكل خاص، أنظمة رائعة ومعقدة من تصميم الطبيعة. ويمكن تصنيعها لإنتاج مجموعة كبيرة جداً من المشروبات والمنتجات الغذائية المغذية والشهية. وفي ظل تطور تكنولوجيا وعلم الأغذية، نتعلم باستمرار كيف نستغل قدرات بروتينات اللبن لتأمين فوائد غذائية ووظيفية متزايدة لتطوير المنتجات الغذائية وتسويقها. وقد ازداد حالياً إدراك المستهلكين وهم يطالبون بمنتجات جديدة كما وينكهات وقوام محسنة، وبطاقات معلومات بيانية سهلة وواضحة. وتتحدى الألبان، ومكونات اللبن تحدياً، بموقع فريد يمكنها من تأمين فرصة متنامية لعلماء الأغذية لتلبية توقعات المستهلك.

لمزيد من المعلومات عن الأبحاث حول المكونات اللبنية، زوروا [ThinkUSAdairy.org](http://ThinkUSAdairy.org) أو [USADairy.com](http://USADairy.com) ولطلب المساعدة في منتجات جديدة محسنة باستخدام المكونات اللبنية، اتصلوا بمركز الدعم التقني للمنتجات اللبنية على العنوان [techsupport@ThinkUSAdairy.org](mailto:techsupport@ThinkUSAdairy.org).

- ١ بريغالفول بل، جيل س. ج. Stability of protein structure and hydrophobic interactions. مجلة Adv Protein Chem. ١٩٨٨؛ ٣٩: ٢٣٤-٢٤٤.
- ٢ بولسون م. Thermal denaturation and gelation of whey proteins and their adsorption at the air/water interface. مجلة Food Hydrocolloids. ١٩٩٠؛ ٥: ١١٩-١٢٤.
- ٣ سينغ ه.، هافيا ب. مقالة. Thermal Denaturation, Aggregation and Gelation of Whey Proteins. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ف. ه. الطبعة الثالثة، نيويورك، دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشن: ٢٠٠٣: ١٢٥٧-١٢٨٣.
- ٤ نيشورا ج. المحاضرة الثانية: Structures and Properties of Biological Molecules: Proteins. مستخرج من فصل بيولوجيا ٤ في جامعة بروكلين: [http://academic.brooklyn.cuny.edu/biology/bio\\_d\\_prot.htm](http://academic.brooklyn.cuny.edu/biology/bio_d_prot.htm).
- ٥ كونسيدين ت.، باتيل ه.أ.، أنيما س. ج. سينغ ه.، كريمر ل.ك. A Review. Interactions of milk proteins during heat and high hydrostatic pressure treatments — Innov Food Technol. ٢٠٠٧؛ ٨ (١): ٢٣١-٢٣٦.
- ٦ والسترا ب.، جينيس ر. Dairy Chemistry and Physics. دار نشر جون وايلي وأبناؤه، نيويورك: ١٩٨٤.
- ٧ فوكس ب.ف. مقالة. Milk Proteins: General and Historical Aspects. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ف. ه. الطبعة الثالثة، نيويورك، دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشن: ٢٠٠٣: ٤٨-١٠٣.
- ٨ أوماهوني ج.أ.، فوكس ب.ف. مقالة. Milk Proteins: Introduction and Historical Aspects. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ف. ه. الطبعة الرابعة، نيويورك: سيرينغر ساينس + بيزنس ميديا: ٢٠١٣: ٤٣-٨٥.
- ٩ هويبرتز ت. مقالة: Chemistry of caseins. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ف. ه. الطبعة الرابعة، نيويورك: سيرينغر ساينس + بيزنس ميديا: ٢٠١٣: ١٣٥-١٦٠.
- ١٠ سوايزغود ه.إ. مقالة: Chemistry of caseins. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ف. ه. الطبعة الثالثة، نيويورك، دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشن: ٢٠٠٣: ١٣٩-٢٠١.
- ١١ دو كروف ك.ج.، هولت ك. مقالة: Casein Micelle Structure, Functions and Interactions. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ف. ه. الطبعة الثالثة، نيويورك، دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشن: ٢٠٠٣: ٢٢٣-٢٧٦.
- ١٢ فوكس ب.ف. مقالة: Heat-induced coagulation of milk. Volume ١٠ Proteins, Developments in Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، لندن، إنكلترا: منشورات Applied Science Publishers: ١٩٨٢: ١٨٩-٢٢٨.
- ١٣ سينغ ه.، كريمر ل.ك. مقالة: Heat stability of milk. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، لندن، إنكلترا: منشورات Elsevier Applied Science Publishers: ١٩٩٢: ٦٢١-٦٥٦.
- ١٤ سينغ ه. مقالة: Heat-induced changes in casein, including interactions with whey proteins. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، بروكسل، بلجيكا: الاتحاد الدولي للألبان والأجبان: ١٩٩٥: ٨٦-١٠٤.
- ١٥ هويبرتز ت.، سميد م.أ.، دو كروف ك.ج. Biocompatible Micro-Gel Particles from Cross-Linked Casein Micelles. مجلة Biomacromolecules. ٢٠٠٧؛ ٨ (٤): ١٣٠٠-١٣٠٥.
- ١٦ دونوفان م.، مولفهييل د.م. مقالة: Thermal Denaturation and Aggregation of Whey Proteins. Volume ١١ J Food Sci Tech. ١٩٨٧؛ ١١ (١): ٨٧-١٠٠.
- ١٧ جيلين ب.، راتراي و. مقالة: Thermal denaturation of whey proteins. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، بروكسل، بلجيكا: الاتحاد الدولي للألبان والأجبان: ١٩٩٥: ٦٦-٨٥.
- ١٨ مولفهييل د.م.، دونوفان م. مقالة: Whey Proteins and Their Thermal Denaturation - A Review. Volume ١١ J Food Sci Technol. ١٩٨٧؛ ١١ (٤): ٤٣-٤٧.
- ١٩ بيرس ر.ج. مقالة: Thermal denaturation of whey protein. Volume ١٠ Int Dairy Fed Bull. ١٩٨٩؛ ٢٣٨: ١٧-٢٣.
- ٢٠ صويرل. مقالة: β-Lactoglobulin. Volume ١٠ Advanced Dairy Chemistry, Volume ١٠، فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ف. ه. الطبعة الثالثة، نيويورك، دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشن: ٢٠٠٣: ٣١٩-٣٨٦.
- ٢١ دو ويت ج.ن. مقالة: Thermal Stability and Functionality of Whey Proteins. Volume ١٢ J Dairy Sci. ١٩٩٠؛ ٧٣ (١٢): ٣٦٠٢-٣٦١٢.
- ٢٢ مولفهييل د.م. مقالة: Production, functional properties and utilization of milk protein products. Volume ١٠ Proteins, Advanced Dairy Chemistry - Volume ١٠، فوكس ب.ف.، لندن، إنكلترا: منشورات Elsevier Applied Science Publishers: ١٩٩٢: ٣٦٩-٤٠٤.
- ٢٣ مور ك.ف.، فوغدينغ إ.أ. تقرير: Composition and functionality of commercial whey and milk protein concentrates and isolates: a status report. Food Technol. ١٩٩٠؛ ١١٢-١٠٠ (٨): ٤٤-١١٢.
- ٢٤ هوفمان ل.م. مقالة: Processing of whey for use as a food ingredient. Volume ١٠ Food Technol. ١٩٩٦؛ ٥٠ (٢): ٤٩-٥٢.
- ٢٥ دو ويت ج.ن. مقالة: Functional properties of whey proteins in food systems. Volume ١٠ J Dairy Sci. ١٩٨٤؛ ٦٧ (٣): ٧١-٨٩.
- ٢٦ دو ويت ج.ن. مقالة: A review. The use of whey protein products. London: مركز أبحاث نيزو: ١٩٨٩.
- ٢٧ ميسيس و.، فان كامب ج.، هويغبيارت أ. مقالة: The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. Volume ١٠ Trends Food Sci Technol. ١٩٩٧؛ ٨ (٤): ١٠٧-١١٢.
- ٢٨ فيليبس ل.ج.، وايتهد د.م.، كينيسلا ج. مقالة: Protein Gelation. Structure-Function Properties of Food Proteins. Volume ١٠، سان دييغو، كاليفورنيا- دار نشر أكاديميك بريس، إنك: ١٩٩٤: ١٧٩-٢٠٤.
- ٢٩ ليفني ي.د. مقالة: Milk proteins as vehicles for bioactives. Volume ١٠ Curr Op Colloid Interface Sci. ٢٠١٠؛ ١٥ (١٠٢): ٧٣-٨٣.
- ٣٠ سيكورسكي ز.إ. مقالة: Chemical and functional properties of whey components. Volume ١٠ Dairy Chemistry and Food Science: A Practical Approach. London: Taylor & Francis: ١٩٩٧: ١١٩-١٦٠.
- ٣١ كينيسلا ج.أ.، ريكوتور د.ج.، فيليبس ل.ج. مقالة: Physicochemical properties of proteins: Texturization via gelation, glass and film formation. Volume ١٠ Protein: Structure-Function Relationship in Foods. Berlin: Springer: ١٩٩٧: ٣١٠-٣٦٥.
- ٣٢ زاياس ج.ف. مقالة: Functionality of Proteins in Foods. Volume ١٠، برلين: سيرينغر- فلاغ: ١٩٩٧: ٣١٠-٣٦٥.
- ٣٣ فوغدينغ إ.أ.، بولاند إل.، هاردينغ ك.ك. مقالة: Microstructure and microstructure of globular protein gels. Volume ١٠ Food Hydrocolloids. ١٩٩٥؛ ٩ (٤): ٢٣٧-٢٤٩.
- ٣٤ بايلوند ج. Dairy processing handbook. London: السويدي، تتراباك: ١٩٩٥.
- ٣٥ مولفهييل د.م.، كينيسلا ج.أ. مقالة: Effects of Sodium Chloride and Calcium Chloride on the Rheological and Structural Properties of Gels. Volume ١٠ Food Sci. ١٩٨٨؛ ١١ (١): ٢٣١-٢٣٦.
- ٣٦ هويبرتز ت.، باتيل ه. مقالة: Advances in Milk Protein Ingredients. Volume ١٠، Innovation in Healthy and Functional Foods. داس د.، داس س.، ديباسيس ب.، سمات ر.ب.، لندن، إنكلترا: منشورات سي آر سي بريس: ٢٠١٢: ٣٦٢-٣٨٦.
- ٣٧ مور ك.ف. مقالة: Functional properties of milk proteins and their use as food ingredients. Volume ١٠ Applied Science Publishers: ٢٧٥-٣٧٩.
- ٣٨ الموقع الإلكتروني «دايري غود». Dairygood.org تاريخ الولوج: ٢٤ يونيو، ٢٠١٥.
- ٣٩ الموقع الإلكتروني للجنة الألبان والأجبان الكندية. <http://www.milkingredients.ca/> تاريخ الولوج: ٢٤ يونيو، ٢٠١٥.
- ٤٠ باتيل ه. مقالة: Reference Manual for U.S. Milk Powders. Volume ١٠، Prepared Food Application of Milk Powders and Dairy Ingredients. Volume ١٠، أرلنغتون، فرجينيا، مجلس صادرات الألبان والأجبان الأمريكية: ٢٠١٥.
- ٤١ بورينغتون ك.ج.، أغراوال س. تقرير تقني: ثبات تركيبة بروتين شرش اللبن إزاء تعرضه للحرارة. أرلنغتون، فرجينيا، مجلس صادرات الألبان والأجبان الأمريكية: ٢٠١٢.
- ٤٢ سينغ ه. مقالة: Heat stability of milk. Volume ١٠ Int J Dairy Technol. ٢٠٠٤؛ ٥٧ (٣-٢): ١١١-١١٩.
- ٤٣ سينغ ه.، فوكس ب.ف. مقالة: Heat stability of milk: pH-dependent dissociation of micellar K casein on heating milk at ultra high temperatures. Volume ١٠ J Dairy Res. ١٩٨٥؛ ٥٢ (٤): ٥٢٩-٥٣٨.
- ٤٤ باتيل ه.أ.، سينغ ه.، أنيما س. ج.، كريمر ل.ك. مقالة: Effects of Heat and High Hydrostatic Pressure Treatments on Disulfide Bonding Interchanges among the Proteins in Skim Milk. Volume ١٠ Agric Food Chem. ٢٠٠٦؛ ٥٤ (٩): ٣٤٢٠-٣٤٢٥.
- ٤٥ هافيا ب.، سينغ ه.، كريمر ل.ك.، كامبانيلو أ. ه. مقالة: Electrophoretic characterization of the protein products formed during heat treatment of whey protein concentrate solutions. Volume ١٠ J Dairy Res. ١٩٩٨؛ ٦٥ (١): ٩١-٩٦.
- ٤٦ هافيا ب.، سينغ ه.، كريمر ل.ك. مقالة: Heat-induced aggregation of whey proteins: comparison of cheese WPC with acid WPC and relevance of mineral composition. Volume ١٠ Agric Food Chem. ٢٠٠٢؛ ٥٠ (١٦): ٤٦٧٤-٤٦٨١.
- ٤٧ أغيليرا ج.م. مقالة: Gelation of whey proteins. Volume ١٠ Food Technol. ١٩٩٥؛ ٤٩ (١٠): ٨٣-٨٩.
- ٤٨ توتوساوس أ.، مونتاخينو ج. ج.، سالازار ج. أ.، غيريرو إ. أ. مقالة: A review of physical and chemical protein-gel induction. Volume ١٠ Int J Food Sci Tech. ٢٠٠٢؛ ٣٧ (٦): ٥٨٩-٦٠١.
- ٤٩ هيرمانسون أم. مقالة: Aggregation and denaturation involved in gel formation. Volume ١٠، واشنطن العاصمة: الجمعية الكيميائية الأمريكية: ١٩٧٩: ٨١-١٠٣....

- 50 باتيل ه.أ. أنيما س.ج.، هولرويد س.ا.، سينغ ه.، كريمير ل.ك. Methods to determine denaturation and aggregation of proteins in low-, medium- and high-heat skim milk. *Lait*. 2007؛ 87(5-6): 268-281.
- 51 باتيل ه.أ.، كارول ت.، كيلي آل. مقالة: Nonthermal Preservation Technologies for Dairy Applications. نشرت في: Dairy Processing & Quality Assurance شاندران رك.، كيلارا أ.، شاه ن.ب.، آيمس، أويوا. دار نشر: وايلي-بلاكويل؛ 2008؛ 465-482.
- 52 أنيما س.ج. مقالة: Milk Proteins: From Expression to Food. *Expression to Food*. ثوميسون أبولاند م.، هارجيندر س. الطبعة الأولى. أمستردام، هولندا. دار نشر: السفير إنك؛ 2009؛ 239-281.
- 53 باتيل ه.أ.، كريمير ل.ك. مقالة: Milk Proteins: From Expression to Food. *Milk Proteins: From Expression to Food*. ثوميسون أبولاند م.، سينغ ه. الطبعة الأولى. علوم وتكنولوجيا الأغذية: السلسلة الدولية. نيويورك، دار نشر السفير إنك؛ 2009؛ 205-227.
- 54 كونسيدرين ت.، باتيل ه.أ.، سينغ ه.، كريمير ل.ك. مقالة: High pressure-induced interactions involving whey proteins. نشرت في: *High pressure-induced interactions involving whey proteins*. 2007؛ 102(4): 1270-1280.
- 55 أنيما س.ج.، لي ي. *Lebensm Wiss* مجلة: Further Studies on the Heat-induced, pH-dependent Dissociation of Casein from the Micelles in Reconstituted Skim Milk. 2000؛ 33(5): 343-344.
- 56 أنيما س.ج.، لي ي. *J Dairy* مجلة: Association of denatured whey proteins with casein micelles in heated reconstituted skim milk and its effect on casein micelle size. 2003؛ 73(1): 83-84.
- 57 جانغ ه.د.، ساويزغود ه.ا. *Arch Biochem* مجلة: Characteristics of the interaction of calcium with casein submicelles as determined by analytical affinity chromatography. 1990؛ 283(2): 325-326.
- 58 كورديج م.، دالغلي ه.ج. *Biophys* مجلة: The mechanisms of the heat-induced interaction of whey proteins with casein micelles in milk – effect of protein concentration at pH. 1999؛ 233(3): 236-237.
- 59 and 80.0 *Int Dairy J* مجلة: Heat-induced interactions of  $\beta$ -lactoglobulin A and  $\kappa$  casein B in a model system. نشرت في: *Heat-induced interactions of  $\beta$ -lactoglobulin A and  $\kappa$  casein B in a model system*. 2003؛ 17(1): 31-37.
- 60 *Proteins* مجلة: Proteins. 1 *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1*. فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ل. الطبعة الثالثة. نيويورك: دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشرن؛ 2003؛ 879-945.
- 61 *Proteins* مجلة: Protein Stability in Sterilised Milk and Milk Products. نشرت في: *Protein Stability in Sterilised Milk and Milk Products*. فان بويكل م.أ.ج.س. مقالة: 2003؛ 947-974.
- 62 *Proteins* مجلة: Manufacture and Properties of Milk Powders. نشرت في: *Manufacture and Properties of Milk Powders*. فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ل. الطبعة الثالثة. نيويورك: دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشرن؛ 2003؛ 1017-1061.
- 63 *Proteins* مجلة: Acid Coagulation of Milk. نشرت في: *Acid Coagulation of Milk*. فوكس ب.ف.، ماكسوني ب.ل. الطبعة الثالثة. نيويورك: دار نشر نيويورك: كلوير أكاديميك/بليوم بايليشرن؛ 2003؛ 1001-1026.
- 64 *Food Hydrocolloids* مجلة: Thermal aggregation and gelation of bovine  $\beta$  lactoglobulin. نشرت في: *Thermal aggregation and gelation of bovine  $\beta$  lactoglobulin*. 1994؛ 8(5): 441-453.
- 65 *J Dairy Res* مجلة: Thermal gelation and denaturation of bovine  $\beta$ -lactoglobulins A and B. نشرت في: *Thermal gelation and denaturation of bovine  $\beta$ -lactoglobulins A and B*. 1994؛ 61(2): 221-232.
- 66 *J Agric Food Chem* مجلة: Heat-induced Interactions and Gelation of Mixtures of  $\beta$ -Lactoglobulin and  $\alpha$ -Lactalbumin. نشرت في: *Heat-induced Interactions and Gelation of Mixtures of  $\beta$ -Lactoglobulin and  $\alpha$ -Lactalbumin*. 1997؛ 45(4): 1136-1137.
- 67 *J Dairy Res* مجلة: Thermal Unfolding of  $\beta$ -lactoglobulin: Characterization of Initial Unfolding Events Responsible for Heat-Induced Aggregation. نشرت في: *Thermal Unfolding of  $\beta$ -lactoglobulin: Characterization of Initial Unfolding Events Responsible for Heat-Induced Aggregation*. داموداران س.، براياكاران س. 1997؛ 64(1): 45-53.
- 68 *J Agric Food Chem* مجلة: Effect of Heat Treatment on the Conformation and Aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin A, B, and C. نشرت في: *Effect of Heat Treatment on the Conformation and Aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin A, B, and C*. ماندرسون ج.أ.، هاردمان م.ج.، كريمير ل.ك. 1998؛ 46(12): 5061-5069.
- 69 *J Agric Food Chem* مجلة: Effect of heat treatment on the circular dichroism spectra of bovine  $\beta$ -lactoglobulin A, B, and C. نشرت في: *Effect of heat treatment on the circular dichroism spectra of bovine  $\beta$ -lactoglobulin A, B, and C*. ماندرسون ج.أ.، كريمير ل.ك.، هاردمان م.ج. 1999؛ 47(11): 4572-4576.
- 70 *J Dairy Res* مجلة: Characterization of heat-induced aggregates of  $\beta$  lactoglobulin,  $\alpha$ -lactalbumin and bovine serum albumin in a whey protein concentrate environment. نشرت في: *Characterization of heat-induced aggregates of  $\beta$  lactoglobulin,  $\alpha$ -lactalbumin and bovine serum albumin in a whey protein concentrate environment*. سينغ ه.، كريمير ل.ك. 2001؛ 68(3): 483-497.
- 71 *Int Dairy J* مجلة: Characterization of intermediates formed during heat-induced aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin AB at neutral pH. نشرت في: *Characterization of intermediates formed during heat-induced aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin AB at neutral pH*. بيندر دن.، نوريس ج.، كريمير ل.ك. 1999؛ 16(11): 791-800.
- 72 *Int Dairy J* مجلة: Heat-induced aggregation of  $\beta$  lactoglobulin A and B with  $\alpha$ -lactalbumin. نشرت في: *Heat-induced aggregation of  $\beta$  lactoglobulin A and B with  $\alpha$ -lactalbumin*. كريمير ل.ك. 2000؛ 10(12): 843-853.
- 73 *Int Dairy J* مجلة: Changed protein structures of bovine  $\beta$  lactoglobulin B and  $\alpha$ -lactalbumin as a consequence of heat treatment. نشرت في: *Changed protein structures of bovine  $\beta$  lactoglobulin B and  $\alpha$ -lactalbumin as a consequence of heat treatment*. هونغ ي.ه.، كريمير ل.ك. 2002؛ 12(4): 345-359.
- 74 *J Dairy Sci* مجلة: Effects of Various Heat Treatments on Structure and Solubility of Whey Proteins. نشرت في: *Effects of Various Heat Treatments on Structure and Solubility of Whey Proteins*. كلارنيك ج.، دو ويت ج.ن. 2001؛ 84(11): 2701-2710.
- 75 *Adv Food Nutr Res* مجلة: Proteins in Whey: Chemical, and Functional Properties. نشرت في: *Proteins in Whey: Chemical, and Functional Properties*. وايتيد دم.، كينيسلا ج.ا. 2003؛ 52(3): 343-348.
- 76 *Food Res Int* مجلة: Formation and physical properties of acid gels: a review. نشرت في: *Formation and physical properties of acid gels: a review*. سينغ ه.، لوسي ج.أ. 2009؛ 42(7): 529-542.
- 77 *Yoghurt: Science and Technology*. الطبعة الثانية. بوكا راتون، فلوريدا. دور نشر: وودهد بايليشينغ ليمنت وسي آر سي بريس محدودة المسؤولية؛ 1999.
- 78 *J Agric Food Chem* مجلة: Effect of pH on the Association of Denatured Whey Proteins with Casein Micelles in Heated Reconstituted Skim Milk. نشرت في: *Effect of pH on the Association of Denatured Whey Proteins with Casein Micelles in Heated Reconstituted Skim Milk*. أنيما س.ج.، لي ي. 2003؛ 51(6): 1640-1646.
- 79 *Lait* مجلة: Interactions of milk proteins during the manufacture of milk powders. نشرت في: *Interactions of milk proteins during the manufacture of milk powders*. سينغ ه. 2007؛ 87(5-6): 423-424.
- 80 *Milk Proteins: From Expression to Food*. مقالة: Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins. نشرت في: *Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins*. باتيل ه.، هويرتز ت. مقالة: 2004؛ 243-267.
- 81 *Technical Report: Milk Protein Concentrates: Manufacturing and Applications*. نشرت في: *Technical Report: Milk Protein Concentrates: Manufacturing and Applications*. باتيل ه.، باتيل س. الثانية أمستردام، هولندا: دار نشر السفير إنك؛ 2004؛ 243-267.
- 82 *J Dairy Res* مجلة: Independent Transglutaminase Derived from Microorganisms. +Polymerization of Several Proteins by Ca. نشرت في: *Independent Transglutaminase Derived from Microorganisms. +Polymerization of Several Proteins by Ca*. أوكياما أ. وآخرون. 1998؛ 65(10): 2623-2624.
- 83 *Food Rev Int* مجلة: Transglutaminase: Its utilization in the food industry. نشرت في: *Transglutaminase: Its utilization in the food industry*. كورايشي ك.، يامازاكي ك.، سوسا ي. 2001؛ 17(2): 221-246.
- 84 *Milchwissenschaft* مجلة: Transglutaminase: effect on instrumental and sensory texture of set style yoghurt. نشرت في: *Transglutaminase: effect on instrumental and sensory texture of set style yoghurt*. فارغيمان م.، سورنسن م.ف.، يورغنسن أ.، بودوفلغن غ.، كفيست ك.ب. 2000؛ 53(5): 563-566.
- 85 *Int Dairy J* مجلة: Transglutaminase cross-linking of milk proteins and impact on yoghurt gel properties. نشرت في: *Transglutaminase cross-linking of milk proteins and impact on yoghurt gel properties*. بونيش م.ب.، هوس م.، فاي ت.ك.، كولوزيك أ. 2007؛ 17(11): 1360-1371.
- 86 *Int J Dairy Technol* مجلة: The influence of transglutaminase treatment on functional properties of set yoghurt. نشرت في: *The influence of transglutaminase treatment on functional properties of set yoghurt*. وكسل ز.، إردم ي.ك. 2001؛ 63(1): 86-97.
- 87 *J Dairy Sci* مجلة: Effect of Transglutaminase on the Heat Stability of Milk: A Possible Mechanism. نشرت في: *Effect of Transglutaminase on the Heat Stability of Milk: A Possible Mechanism*. كيلي آل.، فوكس ب.ف. 2002؛ 85(1): 7-10.
- 88 *J Dairy Res* مجلة: Influence of transglutaminase treatment on some physico-chemical properties of milk. نشرت في: *Influence of transglutaminase treatment on some physico-chemical properties of milk*. فوكس ب.ف.، كيلي آل.، فوكس ب.ف. 2002؛ 69(3): 432-442.
- 89 *Lait* مجلة: Influence of transglutaminase treatment on properties of micellar casein and products made therefrom. نشرت في: *Influence of transglutaminase treatment on properties of micellar casein and products made therefrom*. مونسي ج.س.، أوكيندي بي.ت.، كيلي ب.م. 2005؛ 85(4): 408-410.
- 90 *J Dispers Sci Technol* مجلة: Surfactants Used in Food Industry: A Review. نشرت في: *Surfactants Used in Food Industry: A Review*. سيولوم ي.، كراولوف إ.، سيولوم ي. 2009؛ 30(9): 1323-1324.
- 91 *Eur J Biochem* مجلة: Protein-decorated micelle structure of sodium-dodecyl-sulfate—protein complexes as determined by neutron scattering. نشرت في: *Protein-decorated micelle structure of sodium-dodecyl-sulfate—protein complexes as determined by neutron scattering*. ماشر إ.، لوندال ب. 1990؛ 190(2): 311-318.
- 92 *J Colloid Interface Sci* مجلة: Creaming and Flocculation of Oil-in-Water Emulsions Containing Sodium Caseinate. نشرت في: *Creaming and Flocculation of Oil-in-Water Emulsions Containing Sodium Caseinate*. ديكنسون إ.، غولدينغ م.، بوفيه م. 1997؛ 185(2): 510-529.
- 93 *J Dairy Sci* مجلة: Manufacture of modified milk protein concentrate utilizing injection of carbon dioxide. نشرت في: *Manufacture of modified milk protein concentrate utilizing injection of carbon dioxide*. ماريا ل.ك.، سالونكي ب.، بيسواس أ.ك.، كومينيني أ.، متزغر ل.إ. 2004؛ 87(4): 3577-3589.
- 94 *J Dairy Technol* مجلة: High pressure processing of milk and dairy products. نشرت في: *High pressure processing of milk and dairy products*. داتا ن.، ديث ه.ك. 1999؛ 16(1): 41-48.
- 95 *Encyclopedia of Dairy Sciences*. مقالة: High pressure processing. نشرت في: *Encyclopedia of Dairy Sciences*. (موسوعة العلوم اللبنية). روجنسي ه.، فوكا ج.و.، فوكس ب.ف. لندن، انكلترا: دار النشر الأكاديمية؛ 2003؛ 1227-1233.
- 96 *Int Dairy J* مجلة: Effects of high pressure on constituents and properties of milk. نشرت في: *Effects of high pressure on constituents and properties of milk*. هويرتز ت.، كيلي آل.، فوكس ب.ف. 2003؛ 12(7): 561-572.
- 97 *Technol* مجلة: Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products: a review. نشرت في: *Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products: a review*. غاميس ب.، غريفارو ج.، سالو ج.، كايلاس م.ج.، كايلاس م.ج.، سالو ج.، غريفارو ج.، غاميس ب. 2002؛ 3(4): 295-307.

