بسم الله الرحمن الرحيم

جامعة الملك سعود

كلية علوم الأغذية والزراعة

الهندسة الزراعية

مذكرة

(مقرر ٣٤١ هزر)

الخواص الهندسية للمنتجات الحيوية

أستاذ المادة:

د/ عبد الله بن محمد الحمدان

مشرف العملي

محاضر/ ابراهيم التويجري

الطبعة الرابعة

١٤٢٧-١٤٢٨ هـ

محتويات

مذكرة الخواص الهندسية للمنتجات الحيوية

الموضوع	الصفحة
الفصل الأول	٣
١- مقدمة	٣
١-١ الخواص الهندسية: الطبيعية – الحرارية–الكهربية	٣
١-٢ مبادئ في القياس	١٣
الفصل الثاني	١٥
٢-الخواص الطبيعية وطرق قياسها	١٥
٢-١ الشكل والمقاس	١٨
٢-٢ مساحة السطح	٣٣
٢-٣ الحجم والكثافة	٤١
٢-٤ المسامية	٥١
٢-٥ النشاط المائي ومنحنيات الإمتزاز الرطوبي	٥٤
٢-٦ حصائص العبوات الغذائية ونفاذية العبوات البلاستيكية لبخار الماء	٨٤
٢-٧ الخصائص الميكانيكية للمواد الغذائية	
الفصل الثالث	
٣- االخواص الحرارية وطرق قياسها	
٣-١ مقدمة: طرق انتقال الحرارة	
٣-٢ المحتوى الحراري (الإنثالبي) وخصائص تغير الطور	
٣-٣ الحرارة النوعية	
٣-٤ معامل التوصيل الحراري	
٣-٥ معامل الانتشار الحراري	
٣-٦ معامل انتقال الحرارة السطحي (بالحمل)	
الفصل الرابع	
٤- موضوعات مستجدة	
٤-١ تصميم أجهزة الفرز والتصنيع وعلاقتها بالخواص الهندسية	
٤-٢ مواضيع مختارة..	

الفصل الأول

مقدمة عن الخواص الهندسية للمنتجات الحيوية ومبادئ في القياس

التطور المستمر في أساليب الزراعة الحديثة أدى إلى حتمية استخدام التقنية العالية لتصميم الوسائل والأجهزة الميكانيكية والحرارية والكهربائية وفوق الصوتية لتلائم عمليات تداول ومناولة وفرز وتصنيع المنتجات الزراعية. ونسبة للتزايد المضطرد في استخدام هذه الوسائل والأجهزة الحديثة للتعامل مع المنتجات الزراعية يتعين على المهندسين الزراعيين الإلمام التام بالقواعد الأساسية والطرق الهندسية المستخدمة لمعرفة وقياس وتقدير تلك الخواص للمنتجات الزراعية. والإلمام التام بهذه الخواص يؤهل المهندسين الزراعيين للاختيار الملائم لهذه الوسائل والأجهزة إضافة إلى المقدرة على تعديل تصميمها وتطويرها للاستفادة منها بكفاءة عالية في نواحي تطبيقاتها المختلفة. هذا إضافة إلى إمكانية التحليل الهندسي لأداء هذه الأجهزة ومدى كفاءة عملياتها المناطة بها. كما تساهم هذه المعلومات بصفة أساسية في تطوير منتجات زراعية جديدة إضافة إلى تقييم جودتها. هذه المعلومات الأساسية لها قيمة كبيرة ليس فقط لقطاع المهندسين إنما تشمل قطاع تقنيي الغذاء والعاملين في مجالات التصنيع الزراعي بصفة عامة.

١ -١ الخواص الهندسية

١ -١ -١ الخواص الطبيعية:

يمكن **تعريف** الخواص الطبيعية بأنها **تلك الخواص التي يمكن وصفها و/أو قياسها بطرق فيزيائية (طبيعية).** ويمكن أن **تشمل أيضاً الخصائص التي يمكن حسها أو ملاحظتها مثل الرائحة والطعم والنكهة واللون.**

تتباين قيم الخواص الطبيعية للمنتجات الزراعية وفقا للصنف، طور النضج والمحتوى الرطوبي. بصفة عامة فإن قيم الخواص الطبيعية للمنتجات الزراعية تعتبر غير متجانسة من ثمرة لأخرى حتى على مستوى الصنف الواحد في مرحلة نضج محددة.

توفير مثل هذه البيانات للخواص الهندسية للمنتجات الحيوية يعد هاما لقطاع العاملين في مجال التسويق الزراعي وتقنية صناعة الغذاء والعاملين في مجالات التصنيع الزراعي بصفة عامة.

وبإجمال فهي مهمة لكل من:

أ. **الهيئات التشريعية والتنفيذية اعتبارات الجودة للمستهلك:** وذلك لتقييم صفات المنتج لاختبارات الجودة وصلاحيتها للاستهلاك وتحديد معايير المواصفات والمقاييس.

ب. **قطاع نقل وتخزين وتصنيع وتسويق المنتج لزراعي**: حيث يُعتمد على العديد من الخواص في تصميم أجهزة الفرز والتداول والتخزين وعمليات التصنيع الغذائي المختلفة.

ويمكن عرض **عدة تطبيقات للجودة والعمليات التصنيعية بالاستفادة من الخواص الهندسية** للمنتجات الزراعية كما في التالي:

- **معيار لجودة المادة الغذائية :** فبشكل عام يعتبر **الحجم** الكبير للثمار مرغوباً في الفاكهة بينما الحجم الأصغر مفضلاً للعديد من ثمار الخضار.
- **في عمليات التعبئة:** يلزم المقاس (متضمناً الحجم والشكل) لتحديد **عدد الثمار** بالعبوة.
- **نقل وتخزين الأعلاف:** من المهم قياس *معامل الانضغاط والتمدد* عند كبس وعمل البالات مثلاً.
- **عمليات الفصل، التصنيف، وفرز الشوائب** على أساس: **الحجم**، **اللون**، المقاس، والكثافة.
- **العمليات الحرارية :** جميع المعادلات والحسابات الحرارية تتطلب بيانات خواص المواد الغذائية مثل مساحة وحجم وكثافة المنتج.
- **عمليات حيوية** مثل استثارة البذور **بتقليل صلابة القشرة** عن طريق تسخين بذور البرسيم و القطن وغيرها.
- **عمليات كهربية** : **لفصل البذور** بناء على قاعدة الفصل الكهروستاتيكي.

ومن الخواص الطبيعية الشائعة:

❖ الأبعاد	❖ الشكل	❖ المقاس
❖ الحجم	❖ المساحة	❖ الكتلة
❖ الكثافة	❖ الكثافة النوعية	❖ المسامية
❖ الانضغاطية	❖ الخواص الحسية	❖ ملاسة سطح
❖ اللون	❖ الطعم	❖ الخواص الميكانيكية
❖ التركيب (المكونات)	❖ النشاط المائي	❖ المحتوى الرطوبي

وتتميز **السوائل** بالخواص التالية:

❖ اللزوجة ❖ التوتر السطحي ❖ التركيز

ومن العوامل المؤثرة على الخواص الهندسية للمنتجات الحيوية:

١ - **نوعية المنتج** (تفاح من برتقال)

٢ - الصنف (أصناف التفاح الأحمر، الأصفر)

٣ - **درجة النضج ووقت الحصاد** (مثل تغير الصلابة مع بقاء الثمار على الأشجار).

٤ - **المقاس** (حجم وشكل المنتج عند الحصاد)

٥ - **الظروف المناخية وخدمة النباتات قبل الحصاد** (مثل الظروف الجوية، برامج مكافحة الآفات الري والتسميد: مثلاً النبات المسمد ببوتاسيوم ثمرته ألين من ذلك بدون تسميد، والتلقيح)

٦ - **ظروف التخزين** (تشمل درجة حرارة، رطوبة نسبية، نسب غازات، ضوء،..) بعض الخضار تعادل فترة صلاحيتها عند التخزين ٣٢ °م ساعة واحدة، ١٠ °م لمدة يوم واحد، ٥ °م لمدة أسبوع، تجميد لعدة أشهر. هذا بال هذا بالضافة إلى فترة التخزين.

وترجع **صعوبة قياس الخواص الهندسية** للمنتجات الحيوية إلى عدد من العوامل منها:

١) **الشكل الغير منتظم** (الكمثرى، الجزر، وغيرها).

٢) **عدم تجانس قوام المنتج وكذلك مكوناته** (كربوهيدرات، بروتين، دهون، .. الخ).

٣) **استمرار العمليات الحيوية للمنتجات الزراعية بعد حصادها** باعتبارها مواد حية يؤثر على خواصها مع الفترة الزمنية (تنفس البصل والبلح والبطاطس أثناء التخزين وأثر ذلك على تدهور المنتج وثباتية خواصه).

٤) **مسامية الطبقات والأغلفة الخارجية والنفاذية العالية لبخار الماء** (مثل تخلل الماء للتمور كاملة النضج).

٥) **صغر أحجام بعض الحبيبات** مثل الحبوب والبذور والمساحيق مما يصعب قياس أبعادها وخواصها الطبيعية الأخرى.

طرق تقييم خواص المنتجات الحيوية (الزراعية والغذائية):

أ) التقييم الحسي : وهو التقييم الذي يقوم به الإنسان عن طريق حواسه المختلفة. هذا التقييم نسبي حيث يتأثر بالاختلافات الشخصية بين الأفراد وظروف الشخص نفسه. وقد يكون هناك صعوبة في دقته والحصول على نفس النتيجة عند تكراره.

ب) التقييم الموضوعي : وهو التقييم لصفات المواد الغذائية الذي يتم قياسه عن طريق أجهزة. عادة يكون أكثر دقة ويمكن تكرار نفس النتائج للجهاز المُعاير.

إلا أن التحدي لمهندسي التصنيع الغذائي في تحويل العديد من الخواص الحسية إلى موضوعية يسهل قياسها وربطها بعوامل الجودة. كذلك في الاستفادة من هذه الخواص في تصميم آلات تصنيعية مختلفة مثل الفرز على أساس اللون والحجم وغيرها.

فمثلاً يمكن استخدام بعض الخواص الطبيعية كأساس لعملية الفرز. فجدول (١) يوضح عديد من الخصائص الطبيعية للبطاطس والحجارة والتي استخدمت في تصميم آلية الفصل (Separating Mechanism) بين الثمار والشوائب مثل الطين والقش وغيره.

جدول (١) طرق معملية ممكنة لفصل ثمار البطاطس من العوالق الطينية الصلبة والخواص ذات العلاقة بعمليات الفصل.

طريقة الفصل						
	الكثافة	المقاس	الكتلة	مقاومة الهواء	الشكل	الصلابة
الطفو في محلول ملحي	❖					
الطفو في الرمل	❖					
الفصل بالمناخل	❖	❖	❖			
مناخل مطاطية	❖	❖	❖		❖	
التدحرج خارج برميل خشبي					❖	
سير ناقل بميلان					❖	
قرص دوراني					❖	
استخدام تيار هواء من جانب واحد				❖	❖	
استخدام تيار هواء أفقي				❖	❖	
استخدام تيار هواء عمودي.	❖					

يمكن الحصول على بيانات خواص المواد الغذائية من عدة مصادر:

أ. جداول بيانات، رسومات بيانية، ومعادلات من دراسات بحثية وكتب مرجعية.

ب. برامج حاسب آلي: بحيث تدخل مكونات المادة ونسبها ودرجة الحرارة مثلاً، ومن ثم يعطي البرنامج خواص المنتج الحرارية. يعتمد عمل البرنامج على معادلات تجريبية مسبقة.

ت. طرق معملية مباشرة (إجراء تجارب) كما سيتم التطرق لطرق القياس المختلفة لكل خاصية في الجانب العملي لهذا المقرر.

وتقسّم الخواص أيضاً حسب تأثر الخاصية بكتلة المادة إلى:

خواص داخلية *(Entensive)* (مركزة ، كثيفة): وهي التي لا تعتمد على الكتلة في النظام مثل: درجة الحرارة ، الضغط ، الكثافة. إذا تم استقطاع كتلة جزء من المادة فلا تتأثر خواص المادة.

خواص خارجية *(Extensive)* (واسعة ، شاملة ، شاسعة): وهي التي تعتمد على سعة النظام مثل: الكتلة ، الطول ، الحجم ، الطاقة. إذا تم استقطاع كتلة جزء من المادة فيحدث تغير في خواص المادة.

لكن نسبة خاصيتين خارجيتين قد تعتبر خاصية داخلية، مثل كتلة/حجم = كثافة.

يتم قياس خصائص المواد حسب كمية المادة منفردة أو في مجموعة:

١) **مفردة:** مثل حبة قمح أو ذرة، أو طماطم.

٢) **جُمِّيّة:** لكميات حبوب في أكياس، مخزن، أو صوامع.

١ -١ -٢ الخواص الحرارية والكهربية: (Thermal and electrical Properties)

أ. الخواص الحرارية:

العديد من المنتجات الزراعية ذات الأصل النباتي أو الحيواني يتم تصنيعها والاستفادة منها عبر أنواع متعددة من العمليات الحرارية قبل وصولها إلى المستهلك. هذه العمليات الحرارية تشمل التسخين والتبريد والتجفيف والتجميد. وتؤثر درجات الحرارة بدرجة كبيرة على الخواص الحرارية للمنتج المعني.

فالبذور الصلبة للبرسيم الحجازي(Alfalfa) يمكن تحويلها إلى بذور منفذة (Permeable) بتعريضها لكمية من الحرارة التي يمكن التحكم بها بصورة سليمة. فتسخين هذه الحبوب لمدة أربعة دقائق عند درجة حرارة ١٠٤,٤°م تؤدي إلى تخفيض عدد البذور الصلبة بنسبة ٨٠٪. وتعتبر **الحرارة النوعية** للبذور من الخواص الحرارية الهامة في تطبيقات المعالجة الحرارية والتي قد تؤدي إلى التأثير السلبي على حيوية البذور ومقدرتها الانباتية في حالة زيادة زمن التسخين وتعدي درجة الحرارة الحرجة.

ووجد أن المعالجة الحرارية للقمح والذرة الشامية والبقوليات تعطي تأثيراً إيجابياً في استثارة المقدرة الانباتية. ويمكن تثبيط نشاط الإنزيمات في بذور القطن بالتسخين العازل (Dielectric Heating) وبالتالي حماية البذور من الفساد عند تخزينها. وفي حالة الفطريات (Fungus) التي تؤدي إلى فساد البصل أثناء التخزين يتم إبادتها في حدود درجات الحرارة من ٤٠°م إلى ٦٠°م. والمعالجة الحرارية للخوخ تؤدي إلى تأخير تلفه عند التخزين إضافة إلى تحسين جودته.

وفي حالة الفواكه والخضراوات الطازجة يمكن التحكم في نشاط الإنزيمات والكائنات الحية الدقيقة عن طريق تخفيض درجات الحرارة بالتبريد والتجميد . فبعض الخضراوات والفاكهة الطازجة تتلف في ساعة واحدة عند درجة الحرارة ٣٢°م وفي يوم واحد عند درجة الحرارة ١٠°م وفي حوالي سبعة أيام عند درجة حرارة صفر مئوي ، وإلى عدة أشهر عند التجميد. ولتبريد الفاكهة الطازجة بأسرع طريقة ممكنة تم تصميم حاصدة مبردة ومتنقلة يمكن استخدامها في البساتين.

ويمكن إنجاز عمليات تسخين أو تبريد المنتجات الزراعية بالانتقال الحراري عن طريق الحمل أو التوصيل أو الإشعاع. **ومعرفة الخصائص الحرارية مثل الحرارة النوعية (C_p) ومعامل التوصيل الحراري (k) ومعامل الانتشار الحراري (α) والموصلية السطحية والقدرة الابتعاثية (Emmisivity) إضافة إلى الخواص الطبيعية مثل الكثافة والشكل والمقاس تعتبر ذات أهمية بالغة عند تصميم أجهزة الانتقال الحراري اللازمة.**

وبداهة يتعذر إجراء موازين الحرارة دون معرفة السعة الحرارية (الحرارة النوعية)(Heat Capacity) للمواد المعنية. ولتحديد قيمة درجة الحرارة في موقع معين من المنتج والتي توضح المحتوى الحراري للمادة عند أي زمن خلال عمليات التسخين أو التبريد يتعين معرفة الخواص الحرارية للمادة. ومن الأهمية بمكان في حالات المعالجة الحرارية للمواد الحيوية (مثل المنتجات الزراعية) الاهتمام بعلاقة الزمن ودرجة الحرارة لما لها من تأثير مباشر على مقدرتها الحيوية ومحتوياتها التغذويه ومدى جودتها.

ومن أهم الخواص الحرارية:

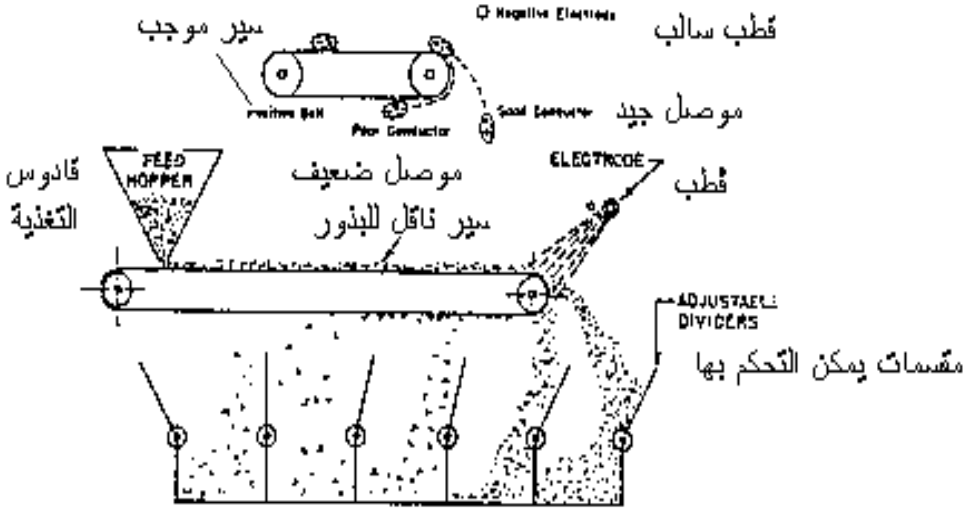
- ❖ الحرارة النوعية
- ❖ معامل الانتشار الحراري
- ❖ معامل انتقال الحرارة السطحي
- ❖ معامل التوصيل الحراري
- ❖ خصائص تغير الطور

ب. الخواص الكهربائية: (Electrical Properties)

بعض الخواص الكهربائية للمواد الزراعية والتي تتسم بالأهمية في عمليات المناولة (Handling) والتصنيع تشمل **الموصلية الكهربائية** (Electrical Conductance) **ومعامل السعة الكهربائية** (Electrical Capacitance) **والخواص العازلة** (Dielectric Properties) ورد الفعل للإشعاع الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Raediation).

الموصلية الكهربائية ومعامل السعة الكهربائية يتم استخدامهما في أجهزة إيجاد المحتوى المائي للمنتجات مثل حبوب الغلال. وطريقة المقاومة الكهربائية تم استخدامها للقياس الدقيق لطول ألياف القطن وتوزيعها.

تمت الاستفادة من الكهرباء الساكنة (الكهروإستاتيكي Electrostatic Seperation) المعروفة منذ قرون مضت في عمليات فصل وتنظيف البذور الزراعية كما هو واضح في الشكل (١).



شكل (١) مقدرة البذور في توصيل شحنة كهربائية يمكن استخدامها في عمليات تنظيف البذور بواسطة الفصل الكهروإستاتيكي.

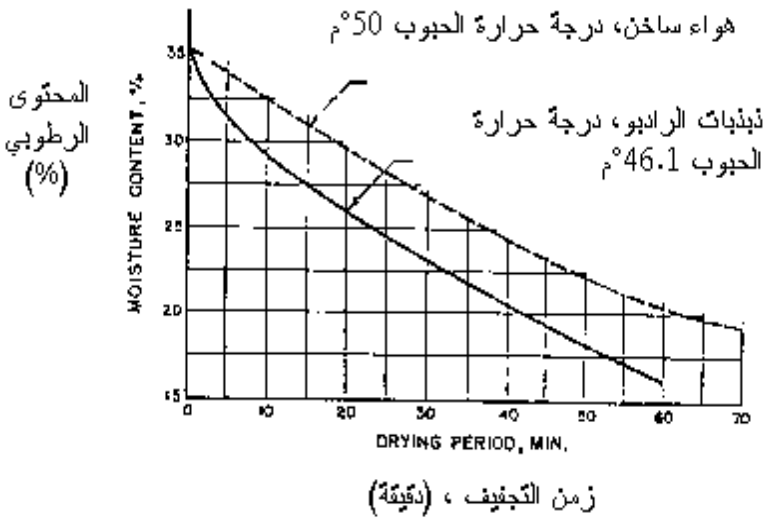
وقد وُجِد أنه بالنسبة للبذور الصغيرة لا يعتمد فصلها الكهروإستاتيكي على المقاس أو الشكل أو الوزن أو النسيج السطحي. وعند فشل الأجهزة التي تعتمد على الخواص الطبيعية في فصل أصناف البذور المتشابهة يمكن استخدام مقدرة البذور على حمل الشحنات الكهروإستاتيكية لإجراء عملية الفصل. وموصلية هذه البذور هي الخاصية الكهربائية التي تحدد مقدرتها في حمل الشحنات السطحية.

وطريقة المعاوقة أو الممانعة (Impedance Technique) يمكن استخدامها لإيجاد مدى التجريح لأنسجة النبات نتيجة للصقيع أو التسمم بمواد الرش أو مسببات التلف الأخرى.

وتعتمد هذه الطريقة على أن الأنسجة الميتة ليس لها معامل سعة كهربائية. وعندما تكون الأنسجة حية فإن لها مقاومة ومعامل سعة حرارية وبالتالي معاوقة. فالنسبة بين المعاوقة ذات الذبذبة المنخفضة والمعاوقة ذات الذبذبة العالية والتي يمكن قياسها بجسر تيار متذبذب ذو مدى عريض (Wide- Range A.C Bridge) هي تعبير عن درجة التجريح لأنسجة النبات.

تسخين العازل (Dielecric Heating) هو عبارة عن تسخين المواد نتيجة للفاقد في العازل عند وضعها في مجال كهرباء متحركة (كهروديناميكي)، وقد تم استخدام هذه الطريقة في عمليات تجفيف البلاستيك والسيراميك وبعض المواد الأخرى ذات التوصيل الضعيف. والفوائد الأساسية للتسخين العازل هي التوزيع المنتظم للحرارة والمعدلات العالية لارتفاع درجة الحرارة والتي بدورها أدت إلى استخدامه في تجفيف المنتجات الزراعية (شكل ٢).

ولقد تمت دراسات بحثية تتعلق بإمكانيات استخدام التسخين العازل لتثبيط نشاط الإنزيمات في بذور القطن والتحكم في الحشرات والفطريات في البذور، وتجفيف الأرز وبعض حبوب الغلال الأخرى. إن استخدام المجال الكهربائي ذو الذبذبات العالية في بذور القطن أوضحت إمكانية القضاء الكامل على الإنزيمات في هذه البذور في زمن قدره ست دقائق، وقد وُجد أنه في أثناء وبعد المعالجة جفت بذور القطن مما أدى إلى تحسين جودة تخزينها. والاستخدام الصحيح لكمية ومدى التعريض للمجال الكهربائي الذي يعمل بذبذبات الراديو يؤدي إلى تحسين المقدرة على الإنبات والنمو المبكر.



شكل (٢) : تجفيف حبوب الغلال بواسطة التسخين بذبذبات الراديو (Radio Frequency R.F) تؤدي إلى تسخين أسرع ومنتظم لحبوب الغلال. والمقارنة مع التجفيف بواسطة الهواء الساخن تتطلب معرفة خواص العزل لحبوب الغلال.

وللإشعاع الكهرومغناطيسي إمكانيات كبيرة في عمليات تصنيع المنتجات الزراعية. وقد وجد العلماء تطبيقات عملية عديدة لمعظم المدى الإشعاعي في الطيف الكهرومغناطيسي (ذبذبات الراديو، الأشعة تحت الحمراء، الأشعة المرئية، الأشعة فوق البنفسجية، أشعة إكس وأشعة جاما وأشعة الميكروويف).

ويمكن تقسيم التأثيرات الأساسية للإشعاع كما يلي:

١ - تأثيرات التسخين (الموجات الطويلة ومدى الطاقة المنخفض).

٢ - التأثيرات الكيميائية (الموجات القصيرة ومدى الطاقة العالي).

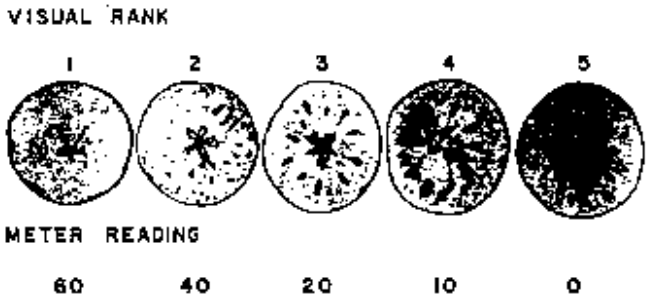
وهذا يؤدي إلى تأين الذرات (Ionization Of Atoms) وبعض الخواص الطبيعية للمنتجات الزراعية قد تكون لها أهمية لإيجاد رد فعلها للإشعاع الكهرومغناطيسي.

١ -١ -٣ خواص إنفاذية الضوء (Optical Properties)

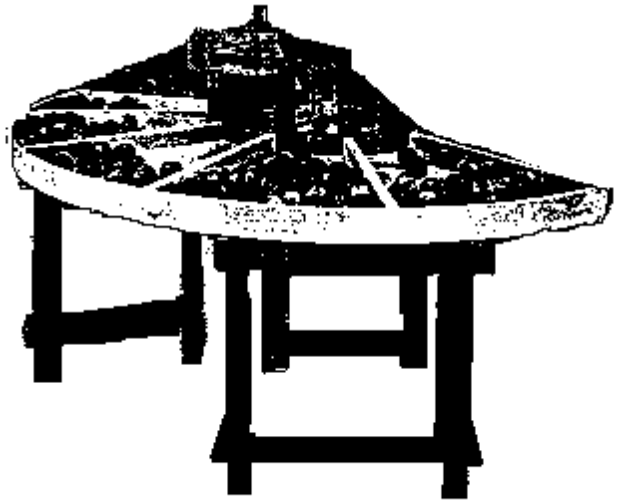
خواص معامل النفاذية للضوء ومعامل الانعكاس للضوء (Light Transmittance and reflectance) بالنسبة للمنتجات الزراعية تم تطبيقها في عمليات: التصنيف والتدريج الإليكتروني ومدى النضج وإيجاد اللون السطحي ودراسة الخصائص الداخلية للفاكهة والخضراوات. ومن وجهة النظر الضوئية نجد أن المنتجات الزراعية المتماسكة تعتبر مواد كثيفة (Dense) في تشتيتها الضوئي ويتطلب ذلك فوتوميتر طيفي (Spectrophotometer) ذو حساسية عالية وتصميم خاص لقياس خصائص النفاذية الطيفية.

ولقد تم تصميم جهاز يسمح بقياس النفاذية الضوئية خلال الأجسام البيولوجية المتماسكة، وتعتمد هذه الطريقة على خصائص نفاذية الضوء والامتصاص الطيفي للمواد والتي تمت الاستفادة منها لإيجاد اللون الداخلي للطماطم ومحتوى السناج (Smut مثل الفحم الرديء) في القمح، ومدى نضج الفاكهة ، ودرجة طحن الأرز، وافتقار اللون الداخلي في البطاطس، ونقاط الدم والعفن الأخضر في البيض، والماء في لب التفاح (شكل ٣)، وغزو الحشرات للقمح، والمحتوى المائي في البذور والتلف في الذرة الشامية الصفراء.

واستخدم عديد من الباحثين خصائص نفاذ الضوء في المنتجات الزراعية لاختيار وتدريج وفصل المنتجات السليمة من الشوائب العالقة بها (شكل ٤). وقد وُجِد -على سبيل المثال - أن خصائص الانعكاس الضوئي للبطاطس تختلف اختلافاً كبيراً عن الكتل الطينية التي تتعلق بها عند الحصاد وعليه يمكن فصلهما إليكترونياً.



شكل (3) وجود الماء في لب التفاح يمكن اكتشافه عن طريق الانعكاس الضوئي دون المساس الضار به.



شكل (٤) جهاز تجريبي لتصنيف الفاكهة باستخدام قواعد انعكاس الضوء.

في عديد من أجهزة التصنيف الحديثة يكون تصميمها معتمداً **على خصائص الانعكاس الضوئي** (Light Reflectance) **للمنتجات الزراعية** والتي تتم على أساسها **عمليات الفصل والتصنيف والتدريج**. وهناك صعوبات تتم مواجهتها خاصة عند تصنيف المنتجات الزراعية ذات الشكل غير المنتظم واللون غير المتجانس وتتطلب في هذه الحالة تقنيات معقدة وأجهزة تصنيف خاصة.

لون المنتجات الزراعية ومظهرها تعتبر من الخصائص الطبيعية القيِّمة، لذلك يتم تصنيف كثير من المنتجات الزراعية في الحقل قبل عمليات مناولتها وتصنيعها وتخزينها أو عمليات تعبئتها كما يحدث عند حصاد الفاكهة والخضراوات. وهناك عدد من الأجهزة لقياس اللون للسطح الخارجي للمنتجات بدلالة عدد من مركبات اتلضوء كما سيتم تفصيله لاحقاً.

١ -٢ مباديء في القياس

١ -٢ -١ معايرة أجهزة القياس:

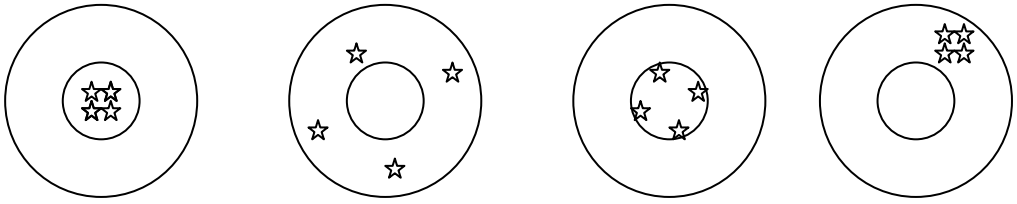
يقصد ***بالمعايرة*** (***Calibration***) هنا التأكد أن نتائج القياس المتحصل عليها من الجهاز صحيحة من حيث **الدقة والضبط**.

القياس الدقيق (Precision): عند تكرار القياس، الجهاز يُنتج نفس القيمة (ولكن ليس بالضرورة أن تكون القيمة الحقيقية).

القياس المضبوط (***Accuracy***):: عند تكرار القياس، الجهاز يُنتج قيماً صحيحة نسبياُ وقد تكون متذبذبة حول القيمة الحقيقية (ولكن ليس بالضرورة أن يُنتج القيمة الحقيقية نفسها، بل (+/ -)). ويعبّر عنه كنسبة، فجهاز ضبطه ١٪ يعني أن مقدار ضبطه +/ - ١٪ ك باسكال من مدى ١٠٠ ك باسكال.

يمكن **تحسين الضبط** بواسطة **المعايرة** الموصى بها من قبل الشركة الصانعة بينما تعتمد **دقة الجهاز** على العديد من العوامل المعقدة والتي تحتاج إلى فنيين متخصصين من قبل الشركة المصنعة أو وكلائها. تتم معايرة الضبط بمقارنة قياس الجهاز بمرجع قياسي أو بمعيار قياسي أو مقارنته بجهاز معلوم ضبطه، أو بقياس الناتج مباشرة (مثل التصرف لمقياس السريان). لذلك دائماً ما ينصح بعمل بفحص ضبط الجهاز ومعايرته حسب تعليمات الجهة المصنعة.

تمرين: يُراد عمل معايرة لجهاز، كانت قيم نتائج القياسات المكررة كالتالي:



ضع علامة صح أو خطأ في التالي:

( ) مضبوط	( ) مضبوط	( ) مضبوط	( ) مضبوط
( ) دقيق	( ) دقيق	( ) دقيق	( ) دقيق

حيث تمثل الدائرة الصغيرة مدى القيم الحقيقية.

١ -٢ -٢ وحدات القياس المعيارية (القياسية):

للعمل على توحيد نتائج القياسات على مستوى العالم، قامت العديد من الهيئات بإيجاد تلك الوحدات المعيارية للطول، الكتلة، الزمن، درجة الحرارة، وغيرها. الهيئة الوطنية للمقاييس تعتبر هي الجهة المخولة بتحديد تلك المقاييس المعيارية. فالمتر مثلاً يعرف بأنه طول سلك من مادة ايريديوم بلاتينيوم (مخزن عند ظروف متحكم بها في فرنسا). إلا أنه أمكن التوصل لتحديد طول المتر بطول موجة الضوء الأحمر -البرتقالي لمصباح مادة الكربتون ٨٦. أيضاً، الكيلو غرام مقاس بكتلة محددة من نفس المادة السابقة وفي ظروف محددة.

ليس هنا تفصيل طرق القياس وأنظمتها ويمكن الاطلاع عليها بالتفصيل في مقرر أو مرجع آخر.

في الفصل التالي سيتم التطرق إلى تفصيل العديد من طرق قياس الخواص الطبيعية للمنتجات الحيوية ودورها في عمليات الفرز وتقييم الجودة والجوانب التصنيعية المختلفة.

الفصل الثاني

٢ -الخصائص الطبيعية للمنتجات الزراعية

Physical Characteristics of Agricultural Products

مقدمة

تم **تعريف** الخواص الطبيعية بأنها **تلك الخواص التي يمكن وصفها و/أو قياسها بطرق فيزيائية (طبيعية).** ويمكن أن **تشمل أيضاً الخصائص التي يمكن حسها أو ملاحظتها مثل الرائحة والطعم والنكهة واللون**. وتعد هذه الخواص أساسية للمنتجات الزراعية والتي تشمل المقاس والشكل والكتلة والحجم ومساحة السطح والكثافة والمسامية والخصائص البعدية الهندسية (الأطوال والأقطار) الطبيعية إضافة إلى المحتوى الرطوبي والنشاط المائي. وتعد المعلومات الخاصة بها أساسية في تصميم وتطوير النظم اللازمة لحصاد ومناولة وتداول وفرز ومعالجة وتصنيع المنتجات الزراعية. إضافة لذلك فإن إيجاد هذه الخواص وتحليلها إحصائياً له تطبيقات عديدة بالنسبة للمهندسين الزراعيين.

يعتبر الشكل (Shape) والمقاس (Size) والحجم (Volume) ومساحة السطح (Surface Area) والكثافة (Density) والمسامية (Porosity) واللون (Color) والمظهر (Appearance) والقوام (Texture)، بعض الخواص الطبيعية الهامة في العديد من المسائل المتعلقة بتصميم الأجهزة أو تحليل سلوك المنتجات في عمليات مناولتها وتداولها.

يعتبر معرفة **الشكل والمقاس** هاماً كذلك في مسائل توزيع الجهد داخل المادة الواقعة تحت حمل ما، وعند الفصل الإليكتروستاتيكي (بشحنات الكهرباء الساكنة) للبذور وحبوب الغلال، وفي حالات انعكاس الضوء وتقييم اللون وعند تطوير أجهزة التصنيف الحجمي - أي التصنيف استنادًا على الحجم والمقاس.

ومعرفة **الكثافة** (Density) للمنتجات الزراعية لها أهمية بالغة عند إجراء حسابات معامل الانتشار الحراري (Thermal Diffusivity) المستخدم في مسائل الانتقال الحراري، وفي فصل المنتجات من الشوائب العالقة أو المواد غير المرغوب فيها إضافة إلى التنبؤ بالتركيب الطبيعي والمكونات الكيميائية.

ويمثل **الشكل** غير المنتظم والطبيعة المسامية لعديد من المنتجات الزراعية عائقًا يشكل صعوبة عند إجراء القياسات لإيجاد الحجم والكثافة على سبيل المثال. وعند استخدام بعض الطرق السهلة لقياس هذه الخواص، مثل استخدام إزاحة الماء لقياس الحجم، يجب إتباع جانب الحذر نسبة لاحتمال نفاذ الماء إلى داخل المادة خاصة في حالة المواد الصغيرة الحجم مثل البذور، وبالتالي الحصول على نسبة خطأ عالية في النتائج.

يعتبر **النشاط المائي** (Water Activity, a_w) أحد أهم الخواص الطبيعية للمنتجات الغذائية ويرتبط ارتباطاً مباشراً بالمحتوى الرطوبي (Moisture Content, M.C). وهو خاصية طبيعية أساسية وهامة وشائعة الاستخدام في مجالات الهندسة الزراعية وهندسة التصنيع الغذائي وعلوم وتقنية

الأغذية حيث يعتبر معياراً لفساد الأغذية. ويعرف النشاط المائي بأنه النسبة بين الضغط الجزئي لبخار الماء في المنتج إلى الضغط الجزئي لبخار الماء في الماء النقي عند نفس درجة الحرارة، أي [$a_w = (P_{v,p,T}/P_{v,w,T})$]. وهو يساوي كذلك الرطوبة النسبية عند التوازن [Equilibrium Relative Humidity, ERH] مقسومة على مائة، أي [$a_w = (ERH/100)$]. وتتراوح قيم النشاط المائي من الصفر إلى الواحد.

عند دراسة الخواص الطبيعية لحبوب الغلال والبذور والفاكهة والخضراوات والأعلاف والألياف إما باعتبار كمياتها الكبيرة (Bulk) - مثل الحبوب - أو على أساس الوحدات الفردية –مثل البطيخ - نجد أنه من الأهمية بمكان الحصول على تقديرات دقيقة للشكل والمقاس والحجم والوزن النوعي والمساحة السطحية والخصائص الطبيعية الأخرى والتي تتم الاستفادة منها كمعامِلات هندسية للمنتج.

وسنهتم في هذا الفصل بدراسة الخصائص الطبيعية التالية:

١. الشكل والمقاس
٢. مساحة السطح.
٣. الشكل والحجم
٤. المسامية
٥. النشاط المائي
٦. خصائص العبوات الغذائية ونفاذية الأغشية البلاستيكية
٧. الخواص الميكانيكية للمنتجات الغذائية والعبوات
٨. اللون

٢ -١ الشكل والمقاس: (Shape And Size)

٢ -١ -١ خلفية علمية:

ما هو الشكل الذي يجب افتراضه لمادة زراعية ما؟ وما هي الأبعاد التي يجب استخدامها في الحسابات؟ هذين السؤالين هما من أول الأسئلة التي يجب الإجابة عليها قبل **تحليل منحنى التبريد** لفاكهة ما - على سبيل المثال - أو قبل استيعاب **كيفية فصل البذور والحبوب الزراعية** من الشوائب العالقة بها باستخدام الدفع بالهواء أو غير ذلك.

هناك العديد من المنحنيات والأشكال الهندسية المتوفرة لحل مسائل الانتقال الحراري غير المستقر في المواد الهندسية، هذه الأشكال والمنحنيات توضح مدى أهمية الحصول على تقديرات دقيقة للشكل وللأبعاد المتعلقة به الخاصة بهذه المواد الهندسية قبل استخدام هذه الخرائط والمنحنيات لحل مسائل الانتقال الحراري في هذه الأجسام. وكما هو معلوم من دراستنا لأساسيات

الانتقال الحراري غير المستقر فقد تم إيجاد الحلول الهندسية بالنسبة للأجسام الهندسية المنتظمة الشكل كالأشكال الكروية أو الأسطوانية أو التي على شكل متوازي مستطيلات وغيرها. وعليه يمكننا افتراض الشكل الكروي لبعض المنتجات الزراعية مثل التفاح والبرتقال أو وضع المنتج الزراعي - مثل الحبوب والأعلاف - في أوعية أسطوانية أو على شكل متوازي مستطيلات قبل إجراء عمليات تسخينها وتبريدها.

وفي **عمليات نقل المواد الصلبة** باستخدام الهواء أو الماء يعتبر افتراض **شكل** المادة الملائم من مُعاملات التصميم الهامة. فالتقدير الدقيق للمساحة المواجهة (Frontal area) والأقطار (Diameters) المتعلقة بها، لها أهمية بالغة عند إيجاد السرعة النهائية (Terminal Velocity) ومعامل الانجرار (Drag Coefficient) ورقم رينولدز (Reynolds Number).

ويعتبر معرفة الشكل والمقاس هاماً كذلك في مسائل **توزيع الجهد داخل المادة الواقعة تحت حمل ما**، وعند الفصل الإليكتروستاتيكي للبذور وحبوب الغلال، وفي حالات انعكاس الضوء وتقييم اللون وعند تطوير أجهزة التصنيف الحجمي - أي التصنيف استنادًا على الحجم والمقاس.

ويمثل **الشكل غير المنتظم والطبيعة المسامية** لعديد من المنتجات الزراعية عائقًا يشكل صعوبة عند إجراء القياسات لإيجاد الحجم والكثافة على سبيل المثال. وعند استخدام بعض الطرق السهلة لقياس هذه الخواص، مثل استخدام إزاحة الماء لقياس الحجم، يجب إتباع جانب الحذر نسبة لاحتمال نفاذ الماء إلى داخل المادة خاصة في حالة المواد الصغيرة الحجم مثل البذور، وبالتالي الحصول على نسبة خطأ عالية في النتائج.

ومن الصعوبة الفصل بين خاصيتي الشكل والمقاس (دالة الأبعاد)، حيث أن لكليهما أهمية عند وصف أي جسم فيزيائي. وعند تعريف الشكل يتعين قياس بعض المعاملات البُعدية للجسم.

٢ -١ -٢ طرق قياس الشكل والمقاس: *Criteria For Describing Shape And Size*

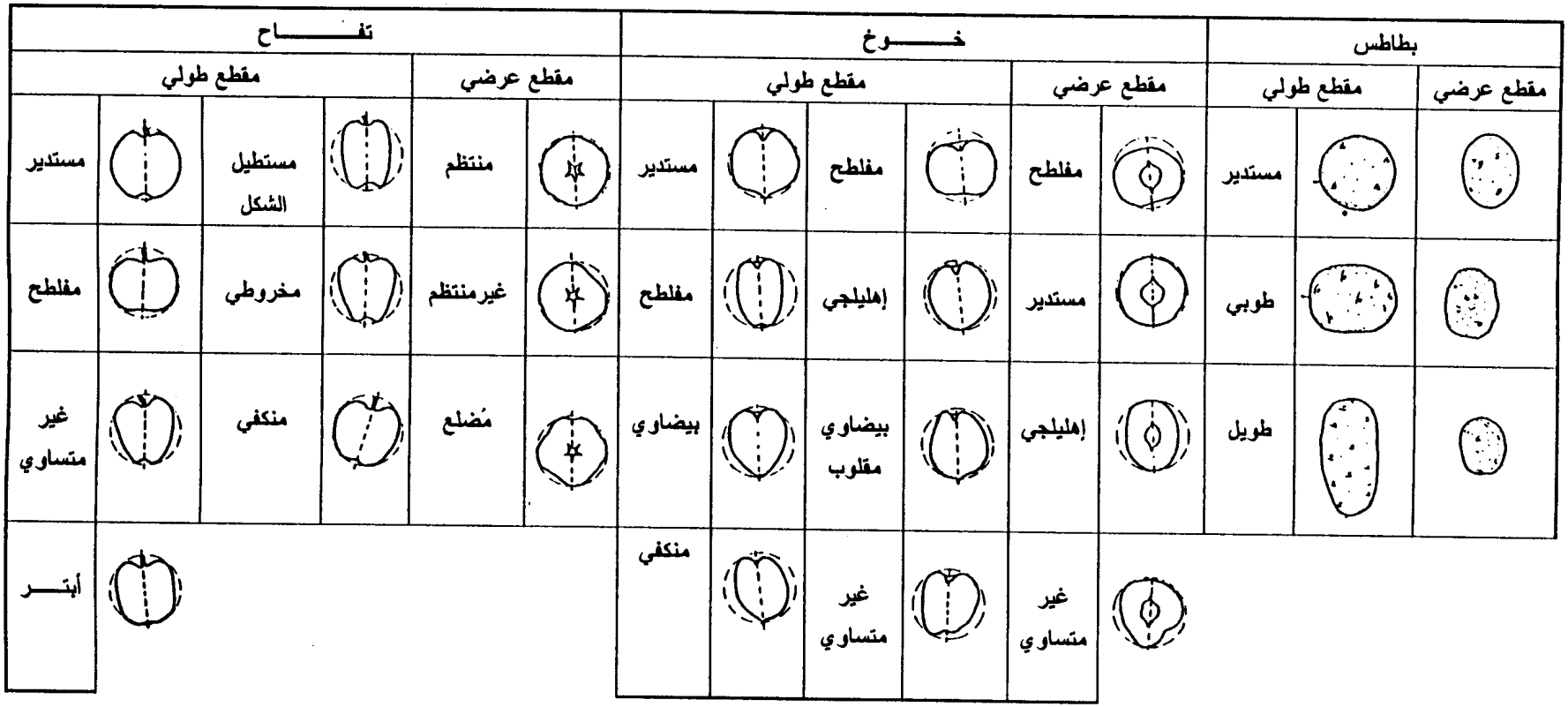
(١) المقارنة بأشكال قياسية (Charted Standards)

في هذه الطريقة يتم مقارنة شكل المنتجات الزراعية (مثلاً باستخدام الرسم الاستشفافي للمقاطع الطولية والجانبية للمنتج) بأشكال قاسية مثل تلك الموضحة في المخطط (شكل ٥) والذي يوضح أمثلة لمواصفات قياسية للتفاح والخوخ والبطاطس. وباستخدامنا لهذه الخرائط القياسية نستطيع تعريف شكل المنتج إما باستخدام رقم من الخريطة أو عن طريق التعبيرات الوصفية مثل التعبيرات التالية والتي تم الاتفاق عليها بين مزارعي وتجار المنتجات الزراعية كالفاكهة والخضراوات كما في جدول (٢).

جدول (٢). بعض الأشكال القياسية (النسبية) للمنتجات الزراعية.

الشكل	الوصف
١ - مستدير (Round)	يقارب الشكل الكروي (Spheiold)
٢ - مفلطح (منبطح عند القطبين) (Oblate)	منبسط عند نهاية الساق وفي قمة الجزء الأعلى.
٣ - مستطيل الشكل (Oblong)	القطر الرأسي أكبر من القطر الأفقي.
٤ - مخروطي الشكل (Conic)	حاد في اتجاه القمة.
٥ - بيضاوي (Ovate)	بيضاوي الشكل وعريض عند نهاية الجذع.
٦ - منكفي (مائل إلى جنب) (Lopsided)	المحاور الموصلة بين الجذع والقمة مائلة.
٧ - بيضاوي مقلوب (Obovate)	بيضاوي مقلوب.
٨ - إهليلجي (ناقص المقطع) (Elliptical)	مقارب للجسم الإهليلجي.
٩ - أقطع (أبتر) (Truncate)	النهايات مربعة الشكل أو مسطحة.
١٠ - غير متساوي (Unequal)	أحد نصفي الجسم أكبر من الآخر.
١١ - مُضلع (Ribbed)	جوانب المقطع مقاربة للاستقامة.
١٢ - منتظم (Regular)	المقطع الأفقي مقارب للشكل الدائري.
١٣ - غير منتظم (Irregular)	المقطع الأفقي غير مقارب للشكل الدائري.

والمقارنة بالنظر لشكل الجسم مع المخططات القياسية تعتبر طريقة سهلة ولكن موضوعيتها تعتمد على الحالة النفسية الطبيعية للمُقارن والتي تختلف من شخص أو مراقب إلى آخر وهذا قد يؤدي إلى نتائج متباينة (تقييم حسي). وإمكانية الحصول على نتائج مقبولة التطابق (Reproducible results) يتطلب أخذ جانب الحذر والاعتماد على مراقبين أو أشخاص متمرسين. ويمكن تطبيق هذه الأشكال القياسية عند الفرز والتدريج وكذلك كأحد معايير الجودة ويتم تزويد عمال الفرز بها للاستدلال على معيار الفرز والتدريج.



شكل (٥) أمثلة للأشكال القياسية المستخدمة لوصف شكل ثمار البطاطس والخوخ والتفاح.

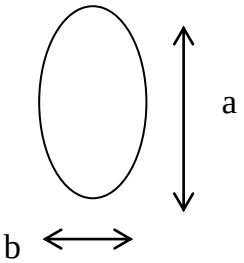
(٢) التشابه مع أجسام هندسية معلومة المساحة والحجم

في بعض الأحيان يمكننا تقريب أشكال بعض المنتجات لأحد الأشكال الهندسية المنتظمة المعروف كيفية حساب المساحة والحجم لعدة أشكال منها الكرة، المكعب، متوازي المستطيلات، الاسطوانة، وغيرها. مثل:

أ - **الشكل الكروي المدبب** (Prolate Spheroid) والذي يتكون عندما يدور الشكل الاهليليجي (Ellipse) حول محوره الأساسي، مثل الليمون (Limon). ويمكن استخدام المعادلات الرياضية التالية لتقدير الحجم (V) ومساحة السطح (S) كما يلي:

$$V = 4/3\,(\pi a b^2);\ S = 2\pi\ b^2 + 2\pi\ \frac{a\,b}{e}\,\mathrm{Sin}^{-1}\,e$$

حيث a و b يمثلان شبه المحاور الأساسي والثانوي على الترتيب، و e ثابت (eccentricity) ويساوي:



$$e = \left[\,1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2\,\right]^{0.5}$$

ب - **الشكل الكروي المفلطح عند القطبين** (Oblate Spheroid) والذي يتكون عندما يدور الشكل الإهليليجي (Ellipse) حول محوره الثانوي (Minor Axis)، مثل الجريب فروت (Grape fruit) والطماطم. ويمكن استخدام المعادلات التالية للحجم V ومساحة السطح S :

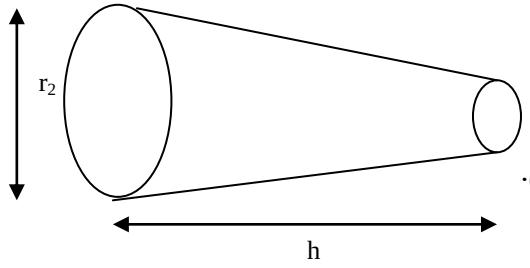
(١)
$$V = \frac{4}{3}\,(\pi\,a^2\ b)$$

$$S = 2\,\pi\,a^2 + \pi\,\frac{b^2}{e}\,\mathrm{Log}\,e\left(\frac{1+e}{1-e}\right)$$

ج - **الشكل المخروطي الدائري المستقيم** (Right Circular Cone) أو الشكل الأسطواني مثل الجزر (Carrots) أو الخيار (Cucumbers). ويمكن استخدام التعبيرات الرياضية التالية:

(٢)
$$V = \frac{\pi}{3}\,h\,(r_1^2 + r_1\,r_2 + r_2^2);\ S = \pi\,(r_1 + r_2)\left[h^2 + (r_1 - r_2)^2\right]^{0.5}$$

حيث:



r_1 = نصف قطر قاعدة المخروط الدائري.

r_2 = نصف قطر قمة (الجزء الأعلى) للمخروط الدائري.

h = ارتفاع (طول) المخروط الدائري.

وبعد حساب الحجم ومساحة السطح من المعادلات السابقة يمكن مقارنة ذلك بإيجاد الحجم الفعلي ومساحة السطح الفعلية للمنتج الزراعي تجريبياً (بإجراء تجارب عملية) وبمقارنتها بالنتائج العملية باستخدام المعادلات والحصول على معامل تصحيح (Correction Factor). ويمكن استناداً عليه استخدام المعادلات الرياضية مع هذا المعامل لإجراء حسابات تقييم الشكل لهذا الصنف المعين من المنتج.

وتجدر الإشارة إلى أن هناك العديد من الأشكال الهندسية المختلفة التي أمكن حساب حجمها ومساحتها مدرجة في عدد من المراجع الهندسية.

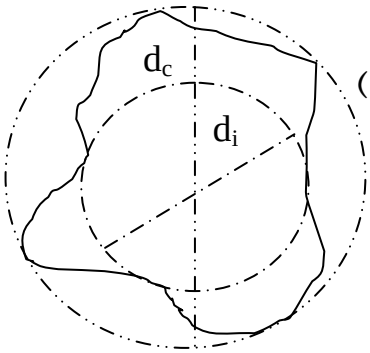
(٣) تقدير كروية (Sphericity) الثمار:

الأساس الهندسي لمفهوم الكروية (أو مدى الكروية) يستند على خاصية التساوي المحيطي للكرة (Isoperimetric Property). هناك عدة طرق لقياس مدى الكروية منها:

(أ) مدى الكروية (بأصغر وأكبر دائرة):

يمكن تعريف مدى الكروية (بدلالة أصغر وأكبر دائرة) بالتعبير التالي:

$$\text{Sphricity (مدى الكروية)} = d_i / d_c \quad (٤)$$



شكل (٦) أبعاد الكروية (طريقة أ)

حيث:

d_i = قطر أكبر دائرة محيطة من الداخل.

d_c = قطر أصغر دائرة محيطة من الخارج.

والأبعاد كما هي في شكل (٦).

ويعتبر هذا التعريف أبسط طرق تقدير الكروية. والجدول (٣) يوضح مدى الكروية بهذه الطريقة لبعض الفواكه.

جدول (٣). مدى الكروية لبعض الفواكه (طريقة أ).

م	المنتج	مدى الكروية (٪)
١	تفاح ماكينتوش	٪٩٠
٢	تفاح مليبا	٪٩٢
٣	تفاح ذهبي	٪٩٢
٤	تفاح أحمر	٪٩٢
٥	تفاح ستايمان	٪٩٠
٦	تفاح روماني	٪٨٩
٧	التوت الأزرق	٪٩٠
٨	الكريز	٪٩٥
٩	الخوخ الأحمر	٪٩٣
١٠	خوخ ألبرتا	٪٩٧
١١	كمثرى ماكسين	٪٨٩

(ب) مدى الكروية (المكافئة): تعبر معادلة مدى الكروية الرياضية التالية عن شكل جسم صلب مقارنة بكرة ذات حجم مساوٍ له.

$$\text{Sphericity (مدى الكروية)} = \mathbf{d_e / d_c} \qquad (٣)$$

حيث:

d_e = قطر كرة ذات حجم مساوٍ لحجم الجسم ($V_e = 4/3\ \pi\ r_e^3$).

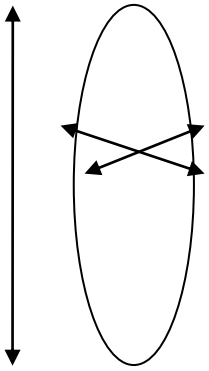
d_c = قطر أصغر كرة تحيط بالجسم أو عادة أكبر قطر للجسم.

(ج) مدى الكروية (لشكل أهليجي): بافتراض أن حجم الجسم الصلب يساوي حجم إهليليجي تقاطعاته (a ، b و c) وأن قطر الكرة المحيط هو خط التقاطع الأكبر (a) للشكل الإهليليجي فإنه كذلك يمكن التعبير عن مدى الكروية بالمعادلة أدناه:

$$\text{مدى الكروية} = \left(\frac{\text{حجم الجسم الصلب}}{\text{حجم الكرة المحيطة بالجسم الصلب}}\right)^{٠,٣٣}$$

$$\text{Spherecity (مدى الكروية)} = \left(\frac{\text{Volume of Solid}}{\text{Volume of Circum criled Sphre}}\right)^{1/3}$$

$$= \left(\frac{(\pi/6\ \ a\ b\ c\ )}{(\pi/6)a^3}\right)^{1/3} \qquad (٥)$$



$$= \left(\frac{b\ c}{a^2}\right)^{1/3}$$

$$= \frac{\text{Geometric mean diametr}}{\text{Major diametr}}$$

القطر الهندسي المتوسط

= ——

القطر الأكبر

$$= \frac{(a\ b\ c)^{1/3}}{a} \qquad (٦)$$

حيث:

a = التقاطع الأكبر (الارتفاع).

b = التقاطع الأكبر المتعامد على a (القطر الأكبر).

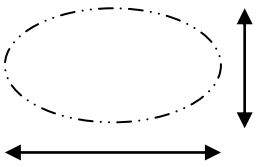
c = التقاطع الأكبر المتعامد على a و b . (القطر الأصغر)

وليس بالضرورة أن تتقاطع التقاطعات مع بعضها في نقطة واحدة.

(د) مدى الكروية (القطر/الارتفاع) لجسم مدبب

اقترح هذه الطريقة الحمدان وحسن (١٤٢٧هـ) وهي حالة خاصة من التعريف الأول وذلك للمنتجات الشبيهة بالتمور مثل ثمار الأصناف المدببة كالسكري ونبوت السيف.

$$\text{Sphericity (مدى الكروية)} = \mathbf{d/L} \qquad (٧)$$

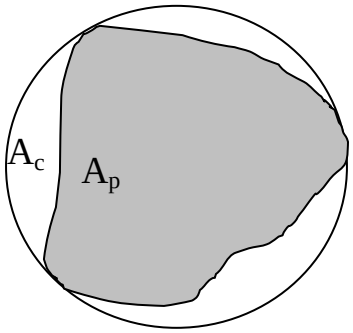


حيث d أكبر قطر في الثمرة و h طول الثمرة.

(٤) حساب استدارة (Roundness) الثمار:

تعتبر الاستدارة مقياساً لمدى حدة زوايا الجسم الصلب ولقد اُقترحت طرق كثيرة لتقديرها، وسنستعرض هنا أكثر هذه الطرق استخداماً فيما يلي.

أ. الطريقة الأولى لتقدير الاستدارة:



شكل (٧) الاستدارة (١) = A_p/A_c

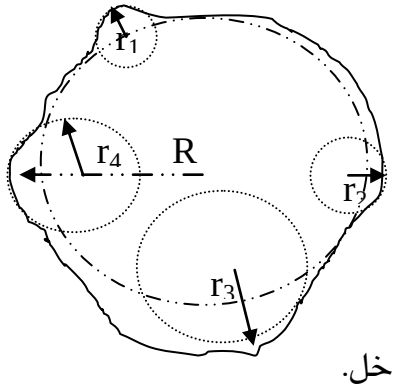
$$\textbf{Roundness} = \mathbf{A_p/A_c}$$

حيث:

A_p = المساحة المتساقطة الكبرى للجسم في حالة سكونه الطبيعية.

A_c= مساحة أصغر دائرة تحيط بالجسم، كما في الشكل (٧).

ب. الطريقة الثانية لتقدير الاستدارة:



شكل (٨) الاستدارة (٢) = $\Sigma r / NR$

$$\text{Roundness (الاستدارة)} = \Sigma r / nR$$

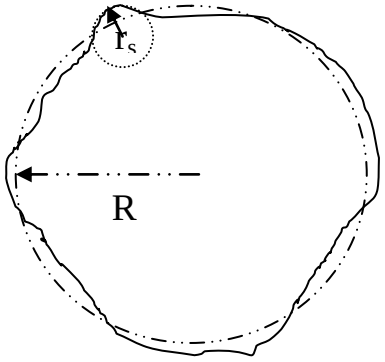
حيث:

r = نصف قطر الانحناء كما هو موضح في الشكل (٨)

R = نصف قطر أكبر دائرة يمكن أن تحيط بالجسم من الدخل.

n = العدد الكلي للزوايا التي تم من خلالها تحديد أنصاف أقطار (r) الانحناءات والتي تم جمعها في البسط (Σ r)

جـ. الطريقة الثالثة لقياس الاستدارة: " نسبة الاستدارة"



شكل (٩) نسبة الاستدارة = r_s/R_{ave}

$$\text{Roundness Ratio (نسبة الاستدارة)} = r_s / R_{ave}$$

حيث:

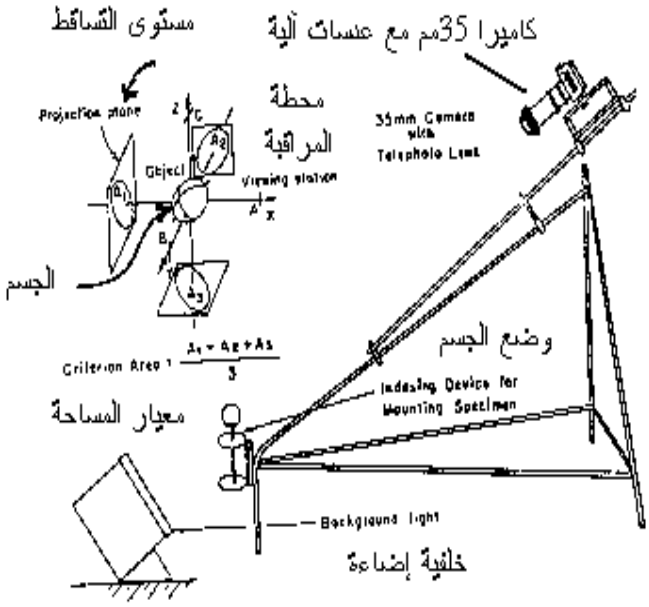
(R_{ave}) في هذه الحالة هو نصف القطر المتوسط للجسم

(r_s) هو نصف قطر الانحناء لأكثر الزوايا حدةً.

حيث أن نصف قطر الانحناء لزاوية منفردة يُمكّن من إيجاد مدى الدائرية (الاستدارة) أو التسطح، كما في شكل (٩).

(٥) المساحة المتساقطة المتوسطة : (Average Projected Area)

عند تصميم جهاز لتدريج الليمون (استناداً على المقاس) اقترح الباحث هوستن (Houston) معياراً للمقاس وعرفه بأنه مسقط المساحات المتساقطة والذي تم أخذها على طول ثلاثة أبعاد محورية متعامدة. هذا المعيار والذي يُرجَع له على أنه معيار المساحة A_c كما في شكل (١٠).



شكل (١٠) وضع نظام التصوير لتسجيل معيار المساحة (الجزء العلوي الأيسر) للفاكهة والخضراوات في عديد من الاتجاهات.

ولاختبار مدى دقة هذا المعيار تم إيجاد علاقة بين متوسط المساحة المتساقطة الحقيقية A (وذلك بأن يؤخذ في الاعتبار كل الاتجاهات الممكنة للتساقط) إضافة إلى حجم الجسم. ومن حجم الجسم الذي يتم حسابه استناداً على A نستطيع مقارنة ذلك مع الحجم الفعلي الذي يتم إيجاده تجريبياً. واستناداً على نظرية الأجسام المقعرة (Convex bodies) يمكن التعبير عنها بالعلاقة الرياضية التالية:

$$\frac{V^2}{S^3} \geq \frac{1}{36\pi}$$

حيث:

V = الحجم و S مساحة السطح للجسم المقعر.

وقد وُجد أن متوسط المساحة المتساقطة A تساوي ربع المساحة السطحية أي أن S = 4 A ، وبالتعويض في المعادلة السابقة نحصل على الآتي:

$$A \le \left(\frac{9\pi}{16}\right)^{0.33} . V^{0.66}$$

أو

$$A \le K\, V^{0.66}$$

حيث K ثابت.

بالنسبة للشكل الكروي المنتظم نجد أن:

$$K = \left(\frac{9\pi}{16}\right)^{0.33} = 1.2$$

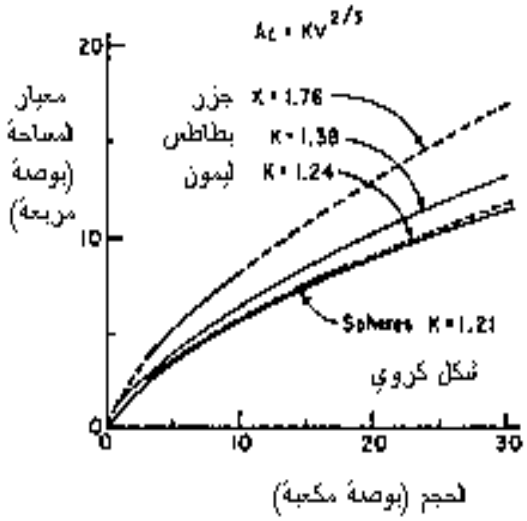
وعند استخدام المعادلة السابقة يجب أن تؤخذ في الاعتبار القيود التالية:

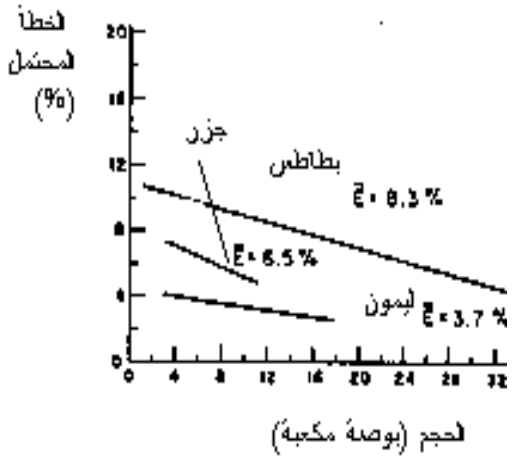
١) رمز التساوي (=) ينطبق فقط في حالة الأشكال الكروية المنتظمة.

٢) الثابت (K) الذي لا وحدات له يتغير مع الأبعاد المُيزة للجسم (Characteristic Dimensions). ولكن للاحتفاظ بقيمة K ثابتة بشكل معقول يتعين تعريف الشكل الملائم لكل منتج بحيث تقع معاملات الشكل (Shape Factors) للعينات داخل حدود معينة.

٣) التغير في A_c كما في شكل (١٠)، بالنسبة للاتجاهات الحرة (Unrestricted Orientation) كبير جداً ولا يبشر بالحصول على مقياس مقبول للحجم، ورغماً عن ذلك يمكن تخفيض مدى هذا التغير لمستوى مقبول بوضع الجسم في حالة ساكنة والحصول على ثلاثة محاور للتساقط من زوايا متساوية مع السطح الأفقي. وتحدث حالة الاتجاه الحر عندما يمر الجسم خلال وحدة القياس في جهاز التدريج وهو في حالة وقوع حر.

ونلاحظ أنها كذلك طريقة أخرى لتقدير مدى الكروية، كما هو في المنحنيات التالية:





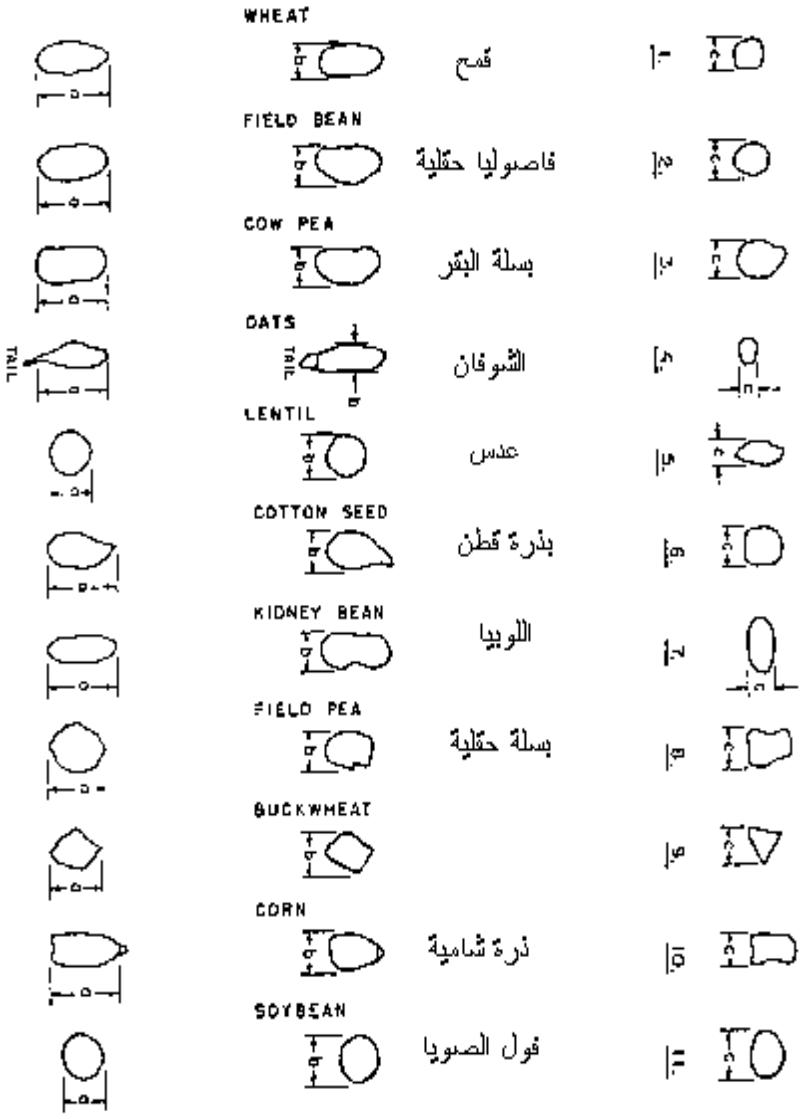
شكل (١١): العلاقة بين معيار المساحة والحجم للجزر والليمون والبطاطس بالمقارنة لمنحنى الشكل الكروي (يسار). (يمين) الخطأ المحتمل (Probable Error) في قياس الحجم استناداً على $A = KV^{0.66}$ والحجم الفعلي.

وقد تم الحصول على قياسات لمنتجات متعددة وتم إيجاد قيم K لليمون والبطاطس والجزر كما في شكل (١١). ومن المنحنيات يتضح أن الليمون يمثل شكلاً أقرب إلى الشكل الكروي بينما يمثل الجزر شكلاً مطاولاً (Elongated). وتقع بين هذين الشكلين منتجات مثل البطاطس والطماطم والتفاح والكمثرى والبرقوق. وبصيغة أخرى فإن المنحنيات التي تم رسمها للجزر والشكل الكروي تحدد المدى الذي تقع فيه الأشكال والتي يتعين على آلة التدريج التعامل معها. ويوضح الشكل (١١) كذلك الخطأ المحتمل في التنبؤ بالحجم مقارنة بالحجم الحقيقي. ويلاحظ من الشكل أن التغير الكبير في الأبعاد المُميِّزة لمنتجات مثل البطاطس تؤدي إلى متوسط كبير للخطأ المحتمل. كذلك يُلاحظ أنه كلما صَغُر مقاس الجسم يزداد متوسط الخطأ المحتمل.

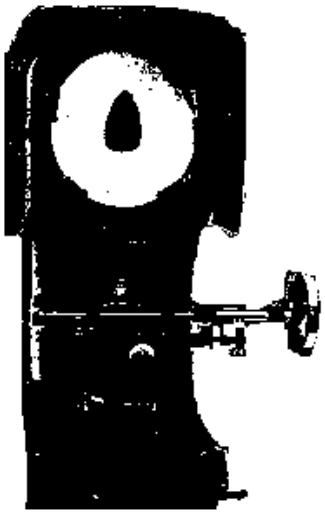
(٦) تكبير الأجسام الصغيرة (مثل الحبوب) لقياس الأبعاد المحورية وإيجاد أحجامها:

بالنسبة للأجسام الصغيرة مثل البذور نجد أنه يمكن تحديد مساقط كل عينة باستشفافها عن طريق استخدام التكبير الفوتوغرافي. توضع الحبة على السطح الذي يوجد عليه الفلم الحساس ويتم تحريك الحبة بحيث يغطي ظلها أكبر مساحة ممكنة. ثم يرُكز المكبر بؤرياً حتى يعطي حدوداً واضحة. وهناك تدريج بالمليميترات يعمل على استشفاف صورة الحبة. ثم تُحرك الحبة لتعطي المساحة المتساقطة الصغرى بحيث يكون بُعدها الأطول مساوياً للبعد الأطول للمساحة المتساقطة الكبرى. وبعد استشفاف المساحات المتساقطة الصغرى والكبرى يتم قياس المحاور a و b و c من الرسومات التي تم الحصول عليها. المحاور a و b يتم قياسها من رسومات المساحة الكبرى. ويمكن استخدام مجموعة مساطر متوازية لرسم مماسات في حدود رسومات الحبة في أضيق مساحات الاستشفاف ورسم خطوط عمودية على هذه المماسات. المحور a هو أطول الواجهات المستطيلة والمحور b هو أقصرها. ويمكن إتباع نفس الطريقة في حدود رسومات الحبة للمساحة المتساقطة الصغرى لإيجاد المحور c . الشكل (١٢) يوضح الشكل والمحاور الثلاثة a و b و c للبذور والحبوب والتي تم إيجادها بالطريقة أعلاه.

وهناك طريقة أسرع وأكثر دقة وتعتمد على استخدام جهاز راسم الظل (Shadowgraph) كما هو واضح في شكل (١٣). وفي هذا الجهاز يتم استخدام عدد اثنين مايكروميتر (Micrometer) للمساعدة في القياس المباشر لأبعاد محورين في الحالة الساكنة أو أي حالة أخرى للبذرة على سبيل المثال. ويمكن الحصول على استشفاف حدود البذرة من ظل البذرة على الزجاج الأرضي للجهاز. كما يمكن أيضاً استخدام جهاز العرض الزجاجي لتكبير الصورة من على الورقة الشفافة على شاشة مقابلة.



شكل (١٢) استشفاف الشكل وتحديد التقاطعات الثلاثة للبذور والحبوب والتي تم إيجادها بالتكبير الفوتوغرافي.



شكل (١٣) راسم الظل نيكون (Nikon Shadowgraph) والذي يستخدم لقياس شكل ومقاس البذور.

(٧) تقدير معاملات الشكل والمقاس معادلات رياضية تجريبية:

في بعض التطبيقات التي يؤثر الشكل والمقاس على عملياتها يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

$$I = f\,(sh, s) \qquad (٩)$$

حيث يتأثر (I) معامل بالشكل (Sh) والمقاس (S). وفي التطبيقات الأخرى قد يتأثر المعامل (I) ليس بالشكل والمقاس وحدهما بل بمعاملات أخرى مثل الاتجاه (Orientation) (O)، ومعامل الحشو (Packing Index) (P)، ومعامل التماسك (Firmness) (F) وغير ذلك كما في الدالة التالية:

$$I = f\,(Sh, S, O, P, F, ...) \qquad (١٠)$$

إيجاد العدد اللازم من فاكهة ما لملء صندوق:

لتقدير عدد الفاكهة في عبوة يمكن تعويض (Y) (بدلاً من (I)، و (x_1) للشكل و (x_2) للمقاس و (x_3) للاتجاه و (x_4) لمعامل الحشو و (x_5) لمعامل التماسك في المعادلة السابقة. وبالتالي يمكن كتابة المعادلة الحدية المتعددة التالية (Multiple Regression):

$$Y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \qquad (١١)$$

ويمكن الحصول على قيم هذه العلاقة بأخذ القياسات اللازمة لمجموعة من أعداد المنتج والحصول على قيم تغير x مع Y لكل معامل وتقديرها باستخدام التحليل التغيري (Analysis of Variance) وعلاقات الارتباط المتعدد (Multiple Correlation) باستخدام برامج إحصائية مثل (SAS) أو برامج جداول الكترونية مثل (Excel).

إيجاد حجم بذور بدلالة الأبعاد:

تعتبر البذور وحبوب الغلال والفاكهة والخضراوات منتجات زراعية غير منتظمة الشكل ولكن يمكن معملياً أخذ قياسات عديدة للمحاور المتعامدة لها. ويزداد عدد هذه القياسات اللازمة بازدياد عدم الانتظام في الشكل. لذلك نجد أنه من الأهمية بمكان معرفة القاعدة التي يجب استخدامها لاتخاذ القرار السليم فيما يختص بالعدد اللازم من القياسات للتعريف الكامل بتكوين الجسم أو المنتج المعني. وأحد هذه القواعد هو إيجاد علاقة بين حجم الجسم المعني ومحاوره الملائمة، وعلى سبيل المثال بالنسبة للأجسام الكروية الشكل نستطيع الحصول على العلاقة التالية:

$$V = (a_1)^{b_1}\,(a_2)^{b_2}\,(a_3)^{b_3}\,.....(a_n)^{b_n} \qquad (١٢)$$

حيث V هو حجم الجسم و $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$ هي أقطار هذا الجسم التي تستخدم كمعيار للمقاس. وبأخذ اللوغاريتم العشري للمعادلة (٢ -٤) نتحصل على المعادلة الخطية التالية:

$$\text{Log } V = b_1 \text{ Log } a_1 + b_2 \text{ Log } a_2 + b_3 \text{ Log } a_3 + \ldots + b_n \text{ Log } a_n \qquad (١٣)$$

وباستخدام طريقة الانحسار الخطي المتعدد (multiple linear regression) - وهي طريقة إحصائية مشهورة - نستطيع إيجاد علاقة كمية بين الحجم V والمحاور المتعامدة a ومدى مشاركتها في قيم الحجم والذي يمكن إيجاده عن طريق استخدام طريقة التحليل التغيري (Analysis Of Variance).

مثال لإيجاد حجم حبوب الذرة بدلالة الأبعاد:

معملياً، أوجد شكل وحجم حبوب الذرة الشامية المجففة بدلالة أبعادها من سنبلة (كوز ذرة) وكذلك من عدة أكواز.

تم أخذ عدد خمسين (٥٠) حبة من حبوب الذرة الشامية ومن ثم قياس محاورها الأساسية والثانوية والمتوسطة إضافة إلى الوزن والوزن النوعي لكل حبة. وقد تم اعتبار حجم الحبة كأحد المعاملات التي تُعرف شكل حبة الذرة وتم اعتبار قياسات المحاور الثلاثة المتعامدة كمعيار لمقاس حبة الذرة. ولقد تم أيضاً الحصول على علاقة بين الشكل (Shape) والمقاس (Size) والوزن (Weight) والوزن النوعي (Specific Gravity) لقطاعات مختلفة في سنبلة الذرة الشامية (كوز الذرة بأكمله) لنفس الصنف ولخليط من أصناف مختلفة كما هو واضح في جدول (٤).

يمكن من الجدول (٣) ملاحظة التغير (Variance) في الأبعاد المحورية للعينات المأخوذة من المقطع الأوسط لعدة أكواز ذرة صفراء (سنابل الذرة الشامية) من نفس الصنف بالمقارنة للعينات المأخوذة من كوز الذرة بأكمله - وليس المقطع الأوسط فقط - لنفس الصنف أو العينات المأخوذة من أكواز الذرة بأكملها لأصناف متعددة. كما يلاحظ أن معامل الارتباط (Correlation Coefficient) بين الحجم والأبعاد المحورية أعلى بالنسبة للصنف الواحد بالمقارنة لخليط من أصناف متعددة.

ويستخلص من هذه التجربة أنه في حالة اعتبار أن تقديرات الحجم تمثل معياراً جيداً فإنه بقياس ثلاثة أبعاد محورية (a, b and c) يمكن الحصول على المعلومات اللازمة لإيجاد الشكل والمقاس للمنتجات الزراعية غير المنتظمة مثل حبات الذرة الشامية الصفراء.

جدول (٤). العلاقة بين الإبعاد المحورية الثلاثة والحجم والكثافة النوعية لعينات تحتوي على ٥٠ حبة ذرة شامية (ذرة صفراء).

العينة والإحصاءات	القطر الأكبر a (mm)	القطر المتوسط b (mm)	القطر الأصغر c (mm)	الوزن W (gm)	الكثافة النوعية SG	الحجم	
						الوزن/ الكثافة	معادلة الارتباط
(١) صنف واحد من منتصف كوز الذرة							
المتوسط	١٠,٧٨	٧,٥٨	٤,٥٧	٠,٢٧	١,٢٢	٠,٢٢٢	٠,٢٢١
التفاوت	٠,٤٧٥	٠,٢١٤	٠,١٥١	٠,٠٠١	٠,٠٠٢	٠,٠٠١	-
الارتباط مع الحجمr	٠,٦٦	٠,٥٩	٠,٢٧	-	-	١,٠٠	-
معادلة الارتباط (١) ln V = -7.14 + 1.18 ln a + 1.04 ln b + 0.48 ln c							
(٢) صنف واحد من كوز الذرة بأكمله.							
المتوسط	١١,١٥	٧,٣٠	٤,٨٦	٠,٢٧	١,٢٤	٠,٢٢٢	٠,٢٢١
التفاوت	١,٠٧١	٠,٦٧٠	٠,٥٨٦	٠,٠٠٣	٠,٠٠١	٠,٠٠٢	-
الارتباط مع الحجمr	٠,٧٥	٠,٧٨	٠,٣٠	-	-	١,٠٠-	-
معادلة الارتباط (٢) ln V = - 6.19 + 0.62 ln a + 1.13 ln b + 0.6 ln c							
(٣) خليط من عدة أصناف							
المتوسط	١٢,٦٦	٨,٥	٥,٢٤	٠,٣٥	١,٢٤	٠,٢٨	٠,٢٩
التفاوت	١,٧٢	٠,٧٧	٠,٥	٠,٠٠٤	٠,٠٠٤	٠,٠٠٢	-
الارتباط مع الحجمr	٠,٣٥	٠,٤١	٠,٣٢	-	-	١,٠٠	-
معادلة الارتباط (٣) ln V = - 6.18 + 0.9 ln a + 0.71 ln b + 0.68 ln c							

(٨) تقدير الشكل والمقاس عن طريق الحاسب الآلي وكاميرا ثلاثية الأبعاد:

في هذه الطريقة يتم تقدير الشكل وحساب المساحة أو الأبعاد باستخدام كاميرا أو ماسحة ضوئية ومن ثم التمييز باختلاف لون العينة عن الخلفية، أو تتم بالقياس المباشر عن طريق العرض على الشاشة وتتبع وقياس الأبعاد المطلوبة.

٢ -٢ تقدير مساحة السطح: (Surface Area)

٢ -٢ -١ خلفية علمية

معرفة مساحة السطح لبعض الأجزاء من النباتات مثل الأوراق ومساحة سطح الفاكهة تعتبر من المعلومات الهامة لعلماء النبات ومهندسي مناولة وتصنيع المنتجات. وتعتبر مساحة سطح الأوراق مؤشراً لعدة تطبيقات، ومنها:

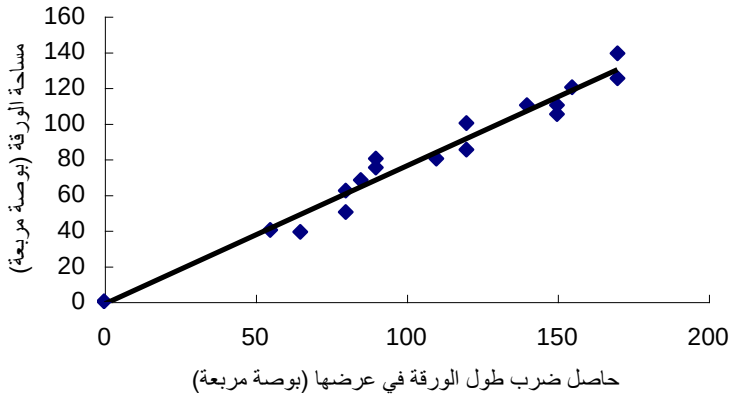
١. سعة التمثيل الضوئي، ومعدل الإنبات للنبات. وقياسه له أهمية في الدراسات المتعلقة بتنافس النباتات للحصول على الضوء والمواد التغذوية وعلاقات النبات والتربة والماء
٢. في مكافحة الآفات للحصول على معدلات رش مبيدات الحشرات والفطريات. وبطبيعة الحال فإن مساحة سطح الفاكهة لها أهمية بالغة في الدراسات المتعلقة بالمساحات اللازم تغطيتها في عمليات الرش وإزالة الرواسب الناتجة عن الرش.
٣. معدلات التنفس والعمليات الحيوية الأخرى. وكذلك خصائص أخرى مثل انعكاس الضوء وتقييم اللون..
٤. الدراسات المتعلقة بانتقال الحرارة خلال عمليات التسخين والتبريد والتجميد.

٢ -٢ -٢ مساحة السطح لسيقان وأوراق النباتات :(Leaf and Stalk Surface Area)

بعض الطرق المستخدمة لقياس مساحة سطح الأوراق والجذوع تعتمد على:

١. **استشفاف المساحة** على ورقة رسم بياني وعَدْ المربعات: وكانت تستخدم في السابق إلا أنها تستهلك الكثير من الوقت والجهد بالإضافة إلى محدودية دقتها.
٢. **الطباعة بالتلامس** (Contact Printing): وذلك بطباعة سطح العينة على ورقة حساسة للضوء ومن ثم قياس المساحة باستخدام البلانيميتر (Planimeter)
٣. **استخدام مُساقِط فوتوغرافي** لأسطح المنتج: وهي طريقة تقريبية مشابه لتلك التي استُخدمت للحبوب والبذور عند تقدير شكلها.
٤. **بقياس طول وعرض الورقة:** وإيجاد علاقة بينها ومساحة الورقة: الشكل (١٤) يوضح العلاقة بين (الطول × العرض) لورقة نبات مع مساحتها السطحية، كما تم إيجاد نفس العلاقة بالنسبة للخس ومنتجات مشابهة أخرى.

المساحة = ٠,٦٤ العرض × الطول
A = 0.64 L * D

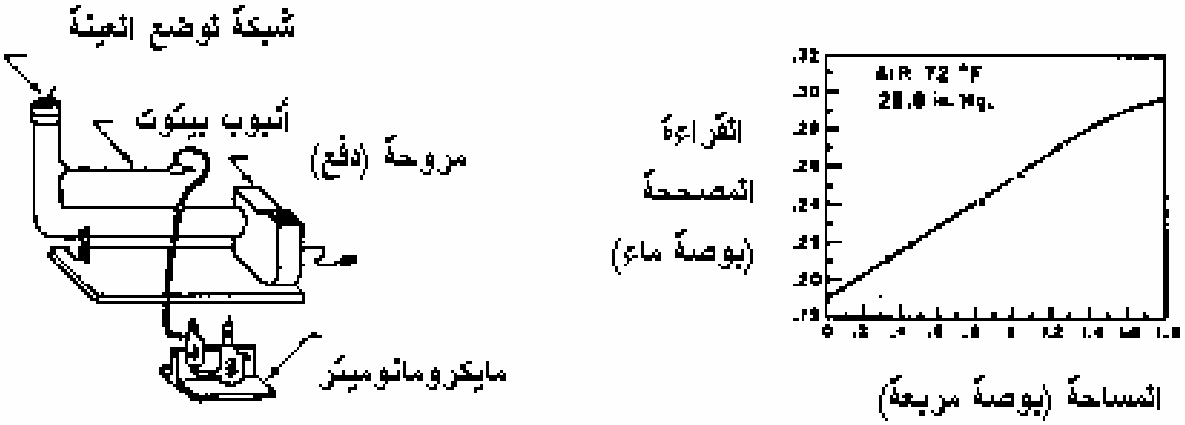


شكل (١٤) التنبؤ بمساحة سطح ورقة نباتية بدلالة طول الورقة في عرضها.

٥. طريقة البلانيميتر الذي يعمل بضغط (تيار) الهواء:

تعتبر طريقة البلانيميتر الذي يعمل بضغط (تيار) الهواء (Air Flow Planimeter) هي الأكثر دقة وسرعة بالمقارنة مع عدد من الطرق التي تم ذكرها لإيجاد مساحة السطح للجذوع والأوراق. وقد استخدم جهاز بلانيميتر التيار الهوائي لقياس مساحة المقطع العرضية لساق الذرة الشامية (Corn Stalks).

ويتكون الجهاز بشكل أساسي من مروحة نفخ وأنبوب بيتوت وأنبوب رأسي وأفقي ومنخل فتحاته (16 mesh) مثبت في حلقة خشبية لتستند عليه العينة ومايكرو مانوميتر لقياس الضغط. الشكل (١٥) يوضح رسماً تخطيطياً لبلانيميتر التيار الهوائي ومنحنى المعايرة للجهاز. والمثال التالي يوضح تطبيقاً على استخدام الجهاز. كما يعطي جدول (٥) مقارنة بين بعض طرق القياس مع هذه الطريقة.



شكل (١٥) جهاز بلانيميتر التيار الهوائي ومنحنى المعايرة للجهاز.

جدول (٥) مقارنة طرق قياس مساحة السطح لعشب نوع (Grass Rye)

	المساحة حسب طريقة القياس		
عدد الأوراق	**(١) الطول × العرض**	**(٢) الطباعة بالتلامس**	**(٣) بلانيميتر تيار الهواء**
٥	٣٥	٣٧	٣٦
٥	٣٤	٣٧	٣٦
١٠	٧٢	٧٢	٧٤
١٠	٦٧	٧١	٧١
١٥	١١٣	١٠٥	١٠٣
١٥	١٢٥	١٢٦	١٢٧
٢٠	١٤٣	١٤١	١٤٢
٢٠	١٥٣	١٤٦	١٤٨
	الزمن المطلوب لوحدة عمل - ثانية لكل ورقة		
	٥٠	٥٠	١٢

مثال:

للتأكد من منحنى معايرة جهاز بلانيميتر التيار الهوائي تم اخذ المتوسط لأربعة قراءات من المايكرومانوميتر كما يلي:

- قراءة الضغط بدون سريان تيار الهواء = **٠,٠٤٩** (بوصة ماء)
- قراءة الضغط بسريان تيار الهواء وقرص دائري مساحته ١,٠٥ (بوصة^٢) = **٠,٣٠٩** (بوصة ماء)
- قراءة الضغط المصححة لمساحة (١,٠٥ بوصة^٢) = ٠,٣٠٩ - ٠,٠٤٩ = **٠,٢٦٠** (بوصة ماء)

وبالرجوع إلى منحنى المعايرة نجد أن المساحة المقدَّرة تساوي ١, ١ (بوصة^٢) وبالمقارنة للمساحة المستخدمة أي ١,٠٥ (بوصة^٢) نجد أن نسبة الخطأ تساوي ٥٪ فقط.

٦. قياس المساحات باستشفاف أوراق النبات

في هذه الطريقة يتم استشفاف مساحة الورقة النباتية على ورقة رسم بياني (معلوم مساحتها ووزنها). بعدها يتم قص مساحة الاستشفاف للورقة البيانية (وليس الورقة النباتية) ووزنها. تعتبر هذه الطريقة سهلة وأكثر سرعة من طريقة بلانيميتر التيار الهوائي.

وكمثال إذا كان وزن ورقة الرسم البياني (المستخدمة للاستشفاف) يساوي ١ (جم) لكل ١٣٥ (سم^٢)، يمكننا إيجاد مساحة السطح لكل ورقة نباتية (سم^٢) بضرب وزن ورقة الرسم البياني المقطوعة في ١٣٥,

٢ -٢ -٣ طرق قياس مساحة السطح للثمار (Fruit Surface Area)

١. إيجاد مساحة السطح الحقيقية:

يتم قياس مساحة فاكهة (مثل التفاح) بالخطوات التالية:

١) تقشير كامل الثمرة على شكل مقاطع طولية ضيقة.

٢) استشفاف هذه المقاطع على ورق رسم بياني.

٣) استخدام البلانيميتر (أو أي طريقة قياس) لقياس مساحاتها.

٤) جمع هذه المساحات والتي تعتبر مساحة السطح الحقيقية للثمرة.

٢. المقارنة بأشكال هندسية معلومة المساحة بدلالة أبعادها: كما سبق التطرق له في طرق قياس الشكل والمقاس مثل الأشكال الكروية والاسطوانية والكروي المدبب والمفلطح والمخروطي وغيرها. وكذلك للشكل الإهليلجي (Elipsoid) بمحاوره a b c

٣. الربط بين مساحة الثمرة ووزنها: .وهي أكثر المعادلات عملية في التنبؤ بمساحة السطح التقريبية للتفاح. وهناك جداول توضح بعض المعادلات التي يمكن استخدامها للتنبؤ بمساحة السطح (S) اعتمادا على كتل (w) أصناف مختلفة من التفاح والكمثرى والبرقوق.

وفي بحث أجرى لتقدير مساحة التفاح بدلالة الوزن تم استخدام ٨٤ تفاحة تم قياس كتلتها ومساحتها معملياً ومن ثم تم رسم العلاقة بين المساحة والكتلة بعدة نماذج رياضية حيث : $S = f(w)$

يوضح شكل (١٦) ثلاث منحنيات لمعادلات التنبؤ لها. ومنها تم التوصية باستخدام منحنى معادلة الارتباط الخطي لتقدير مساحة السطح حيث كان معامل الارتباط (٩٧,٥٪) ومعادلتها:

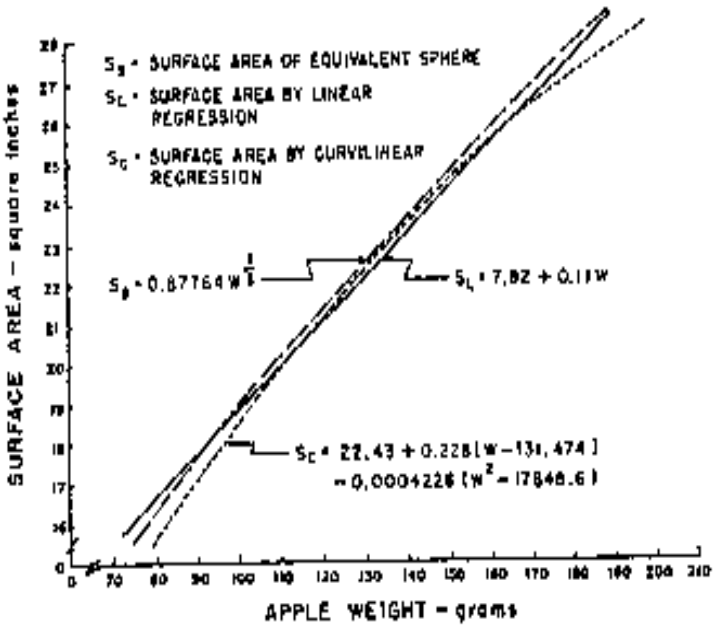
$$S = 7.82 + 0.11\ w$$

حيث:

S_S مساحة السطح المقدرة بطريقة الكرة المكافئة.

S_L مساحة السطح المقدرة بمعادلة الارتباط الخطي.

S_C مساحة السطح المقدرة بمعادلة الارتباط غير الخطي.



شكل (١٦). استخدام عدة معادلات للتعبير عن مساحة سطح التفاح بدلالة الوزن.

٤. طرق أخرى **تعتمد على استخدام المقاطع والأقطار: تتم عبر تحديد** المساحات السطحية للمقاطع العرضية المتعاكسة، للمقاطع الطولية أو المحورية، واستخدام الأقطار المتعاكسة والمحورية أو الطولية. ولقد وُجِدَ أن الخطأ القياسي الناتج عن التنبؤ بمساحات السطح من مساحات المقاطع العرضية المتعاكسة والأقطار المتعاكسة ووزن الفاكهة ، أصغر من طرق القياسات الأخرى التي تمت محاولتها.

٢ -٢ -٤ طرق قياس مساحة سطح البيض (Egg Surface Area)

مما سبق يمكن قياس مساحة سطح البيض بعدة طرق، ومنها:

١) التشابه مع أشكال هندسية (الكروي المدبب): كما سبق التطرق له.

٢) الشريط اللاصق (المساحة الحقيقية): حيث بدلاً من التقشير يتم بحرص إحاطة كامل مساحة البيضة بشريط لاصق، ومن ثم حساب مساحة هذا الشريط.

٣) الربط بين المساحة والوزن: تم اقتراح المعادلة شبه النظرية الخاصة للبيض الطازج التالية:

$$S = k\,W^{m} \qquad (١٤)$$

حيث: S = مساحة السطح (سم^{٢}) W = الكتلة (جم)

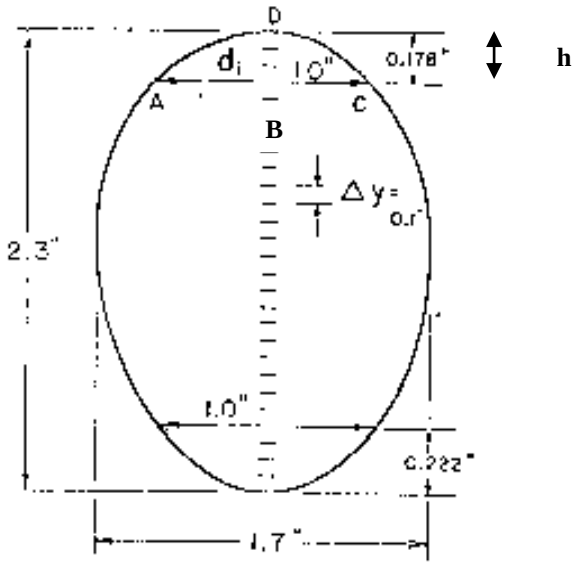
k = ثابت بقيمة تتراوح بين ٤,٥٦ و ٥,٠٧ حسب الشكل

m. = ثابت ويساوي ٠,٦٦.

٤) تقسيم الجسم إلى عدة أشكال هندسية ومن ثم حساب وتجميع مساحاتها

وذلك بإيجاد مساحة السطح لجسم مقعر بانتظام (مثل البيض) بطريقة التساقط (Projection) ومن ثم تقسيم وتجميع المساحات باستخدام راسم الظل (Shadow graph) أو المكبر الفوتوغرافي (Photographic Enlarger) أو جهاز عرض الشفافيات. وبعد الحصول على القطاع الجانبي يتم تقسيمه تقسيماً متساوياً ويلي ذلك رسم خطوط موازية أو عمودية من محور التساوي إلى نقطة التقاطع مع حدود القطاع الجانبي. وباستخدام الحسابات العادية أو عن طريق إجراء عملية التكامل أو باستخدام الحاسب الآلي يمكن حساب مساحة السطح (S) بجمع مساحات الدوران لكل المقاطع التي تم تقسيمها.

مثال: أوجد مساحة السطح لبيضة طازجة تزن ٦٠ جرام الموضح أبعادها في شكل ١٧.



شكل (١٧) أبعاد شكل البيضة.لتحديد مساحة سطحها

الحل:

١ - عن طريق جمع مساحات الأسطح المختلفة.

في البداية، تم استشفاف مقطعها المتساقط (المواجه) باستخدام المكبر الفوتوغرافي (أو أي جهاز آخر). بعد ذلك تم تقسيم المقطع إلى قطعة دائرية عليا وقطعة دائرية سفلى وبينهما المقاطع الوسطى التي يساوي سمك كل منها (Δy) كما هو واضح في شكل (١٧).

يمكننا افتراض أن القطعتين الدائريتين العليا والسفلى هي قطع دائرية من أشكال كروية. كما يمكننا افتراض أن المقاطع الوسطى بين القطعتين الدائرتين العليا والسفلى هي عبارة عن

أسطوانات ارتفاعها (Δy) وقطر كل منها (d_i). وبافتراض أن هذه القطاعات عبارة عن أشكال ناقصة لمخاريط دائرية مستقيمة والذي لا يغير كثيراً من مساحة السطح لهذا المقطع.

مساحة السطح لقطعة الكرة تساوي $A= 2\ \pi\ r_e\ h$. حيث (r_e) هو نصف قطر الكرة المكافئ ويمكن إيجاده من المعادلة أدناه:

$$r_e = \frac{(AC)^2}{8BD} + \left(\frac{BD}{2}\right) = \frac{(AC)^2}{8h} + \frac{h}{2}$$

نصف قطر القطعة العليا:

$$\text{Upper radius} = \frac{(1)^2}{8 \times 0.178} + \frac{0.178}{2} = 0.791\,(\text{inch})$$

نصف قطر القطعة السفلى:

$$\text{Lower radius} = \frac{(1)^2}{8 \times 0.222} + \frac{0.222}{2} = 0.647\,(\text{inch})$$

مساحة سطح القطعة العليا:

$$A_1 = 2\,\pi\,(0.791)\,(0.178) = \mathbf{0.885\ (in^2)}$$

مساحة سطح القطعة السفلى:

$$A_2 = 2\,\pi\,(0.674)\,(0.222) = \mathbf{0.904\ (in^2)}$$

مساحة مجموع أسطح الأسطوانات بين القطعتين العليا والسفلى:A_3

$$A_3 = \sum_{i=1}^{n} \pi\ di\ \Delta y = \pi \Delta y \sum_{i=1}^{n} di$$

وبقياس القطر المتوسط ($d_i=(d_{i1}+d_{i2})/2$) على أبعاد (Δy) وجمع هذه الأقطار ($\sum_{i=1}^{n} di$) كما هو واضح في العلاقة أعلاه نستطيع حساب قيمة (A_3):

$$A_3 = \mathbf{8.95\ (in^2)}$$

إذن، المساحة الكلية (A_T) وهي مجموع مساحة القطعة الدائرية العليا والسفلى والاسطوانات هي:

$$\text{Total Area } (A_T) = A_1 + A_2 + A_3$$

$$= 0.885 + 0.904 + 8.95 = \mathbf{10.24\ in^2}$$

٢ - عن طريق التشابه مع الشكل الكروي المدبب:(Prolate Spheroid)

من المقطع الجانبي للبيضة يمكننا إيجاد القطرين الأساسي والثانوي، وكما هو واضح في شكل (١٧) فهما يساويان ٢,٣ (بوصة) و ١,٧ (بوصة) على الترتيب.

وباستخدام معادلة اللاتمركزية (Eccentricity eq.)

$$e = \left[1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right]^{0.5} = \left[1 - \left(\frac{0.85}{1.15}\right)^2 \right]^{0.5} = 0.674$$

يمكننا حساب مساحة السطح من المعادلة :

$$S = 2\pi b^2 + 2\pi \frac{a\,b}{e} \mathrm{Sin}^{-1} e = 2\pi (0.85)^2 + 2\pi \frac{(0.85)(1.15)}{0.674} \mathrm{Sin}^{-1} \frac{0.674\,\pi}{180}$$

$$= \mathbf{11.29\ (in^2)}$$

٣ - عن طريق القياس المباشر للمساحة الحقيقية:

يمكننا وضع شرائح من شريط لاصق حتى نغطي مساحة سطح البيضة تغطية كاملة، ثم نزيل هذه الشرائح ونستشفها ومن ثم يتم إيجاد مساحاتها باستخدام البلانيميتر.

ولقد تم إيجاد **المساحة الفعلية** بهذه الطريقة وكانت تساوي **١١,٣** (بوصة ^{2}).

واستناداً إلى النتائج بالطرق الثلاث أعلاه فإن تقدير مساحة سطح البيضة باستخدام طريقة التشابه مع الشكل الكروي المدبب، تعتبر طريقة سهلة ومباشرة وتعطي تقديراً دقيقاً ومقبولاً.

٤ - علاقة الوزن و المساحة

ولإيجاد قيمة الثوابت k و m في المعادلة:

$$S = k\,W^m$$

يمكننا تعويض قيمة المساحة الحقيقية:

$$S = 11.3\ (in^2) = 70.5\ (cm^2) \qquad \text{وتعويض} \quad m = 0.66$$

ومن ثم:

$$k = \frac{S}{W^m} = \frac{70.5}{(60)^{0.66}} = 4.8$$

والتي تقع في الحدود المحصورة بين ٤,٥٦ و ٥,٠٧

وبمعرفة هذه الثوابت، يمكن التعبير عن مساحة البيضة بدلالة الكتلة بالمعادلة التالية:

$$S = 4.8\ w^{0.66}$$

٢ -٣ تقدير الحجم والكثافة (Density and Volume)

٢ -٣ -١ خلفية علمية:

الكثافة (Density) للمواد الغذائية والمنتجات الزراعية تلعب دوراً هاماً في كثير من التطبيقات الحيوية. أمثلة لبعض هذه التطبيقات تشمل:

- التدريج والفرز وفصل الشوائب وإيجاد مدى نقاء البذور
- عمليات تجفيف وكبس وتخزين الأعلاف.
- تصميم صوامع الغلال والأحمال على جدرانها.
- تقييم درجة النضج وجودة المنتجات الزراعية مثل البسلة والذرة الشامية الحلوة، والفاصوليا والبطاطس والتي تزداد كثافتها كلما اقتربت من النضج.
- تقييم قوام ومدى ليونة الفواكه وتقدير المسامات في أنسجة النبات
- تستخدم في حسابات الانتقال الحراري وخاصة خرائط توزيع درجة الحرارة داخل الثمار المبردة أو المعالجة.

وتعرف الكثافة بأنها كتلة المنتج لوحدة الحجم، $\rho = \frac{m}{V}$

بينما الكثافة النوعية هي نسبة كثافة المنتج لكثافة الماء، أي $\rho_{SG} = \frac{\rho_p}{\rho_w}$

وهناك عدة تقسيمات للكثافة منها:

أ. كثافة الحبة: ويكون الحجم للحبة الواحدة (مثل التفاح أو البطيخ)

ب. الكثافة الظاهرية: ويكون الحجم لمجموعة من الحبوب مملوءة في وعاء ذو حجم محدد.

ت. الكثافة الحقيقية: ويكون الحجم للحبوب بعد طحنها بحيث لا تكون هناك مسام (نسبياً) بينية بين أو داخل الثمار أو الحبوب.

والأكثر شيوعاً استخدام كثافة الحبة للثمار الكبيرة (مثل الفواكه) والكثافة الظاهرية للثمار الصغيرة (الحبوب والمكسرات). وعلى كل حال فلابد من تحديد وتوضيح الكثافة المقصودة في المراجع العلمية والتجارية. ويتضح أيضاً أن تحديد الحجم هو الأكثر صعوبة حيث من السهولة قياس الكتلة للمنتجات.

القيم التالية للكثافة النوعية لعدد من المواد:

م	ρ	م	ρ	م	ρ	م	ρ
رصاص	١١,٣٣	منتجات غذائية	١,٤ -١,٦	سكر	١,٥٦	ماء(٠°م)	١,٠٠
تنغستون	١٩,٣٥	= = بمسام	٠,٣ -٠,٨	دهن	٠,٩٢	ماء (٩٧°م)	٠,٩٦٠
حديد	٨					ثلج	٠,٩١٦

٢ -٣ -٢ طرق قياس الحجم والكثافة:

يسبب عدم الانتظام في شكل المنتجات الغذائية والحيوية عن تلك الأشكال المنتظمة فيتم إيجاد أحجامها غالباً بطرق تجريبية كما في التالي.

يمكن تقسيم طرق قياس الحجم والكثافة إلى عدة مجاميع وهي:

(١) التشابه مع أشكال هندسية: حيث يمكن حساب حجم المنتج ذو الشكل المنتظم مباشرة بدلالة أبعاده.

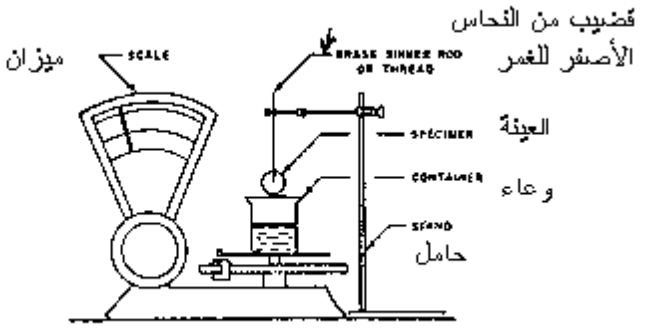
(٢) طريقة الإزاحة الحجمية التقليدية: حيث يُسقط الجسم في إناء مدرج ويتم قراءة حجم الماء المزاح. وهذه الطريقة بالطبع غير دقيقة بسبب التوتر السطحي للسائل وكذلك دقة القراءة.

(٣) معادلات حسابية: بدلالة المحتوى الرطوبي ومكونات المنتج الأخرى ودرجة الحرارة. وهي طريقة تقديرية وغير دقيقية وتعتمد على طبيعة المنتج وقد تقبل في حال أن تكون لمنتج واحد مثل محلول ذو تراكيز مختلفة مثل الحليب والمركزات أو لمجموعة متجانسة من المواد.

(٤) طرق الإزاحة العلمية: وهي الطرق العلمية المتبعة في حساب الكثافة. في التالي سيتم التطرق إلى أربع تجارب معملية –علمية -لتقدير وحساب كثافة الفاكهة أو مجموعة من الحبوب، وهي:

١. طريقة ميزان المنصة: (Platform Scale)

هذه الطريقة سهلة وتنطبق على الأجسام الكبيرة مثل الفواكه والخضراوات كما هو موضح في الشكل (١٨).



شكل (١٨) ميزان المنصة لقياس الحجم والكثافة للأجسام الكبيرة.

حيث يتم في البداية قياس كتلة الماء والوعاء. ثم يتم غمر الفاكهة في الماء (بواسطة خيط أو قضيب غامر في حال أخف من السائل) وأخذ قراءة الميزان والفاكهة معلقة في الماء.

ومنه يمكن حساب كتلة الماء المزاحة بسبب الغمر والتي تساوي كتلة (الوعاء والماء والجسم مغموراً) ناقصاً كتلة (الوعاء والماء) والتي سيتم استخدامها في التعبير التالي لحساب الحجم:

وحسب قاعدة أرخميدس للأجسام المغمورة فإن:

كتلة الماء المزاح = كتلة الوعاء والماء والجسم مغمور - كتلة الوعاء والماء (جم)

$$\text{حجم التفاحة} = \text{حجم الماء المزاح (سم}^3\text{)} = \frac{\text{كتلة الماء المزاح (جم)}}{\text{كثافة الماء (جم/سم}^3\text{)}} \quad \text{(سم}^3\text{)} \qquad (١٥)$$

$$\text{Volume}(cm^3) = \frac{m\,(gm)}{\rho\,(gm/cm^3)}$$

ومن ثم توزن الفاكهة بالميزان (في الهواء) وتؤخذ قرائتها. وبمعرفة كتلة الفاكهة على الهواء وحجمها من المعادلة (١٥) نستطيع حساب كثافة الفاكهة:

$$\text{كثافة التفاحة} = \frac{\text{كتلة التفاحة في الهواء (جم)}}{\text{حجم التفاحة (سم}^3\text{)}} \quad \text{(جم/سم}^3\text{)} \qquad (١٥)$$

ويمكن حساب الكثافة النوعية مباشرة كما يلي:

$$\text{الكثافة النوعية} = \frac{\text{الكتلة في الهواء} \times \text{الكثافة النوعية للماء}}{\text{كتلة الماء المزاح}}$$

أو الكثافة النوعية للمادة = كثافة المادة /كثافة الماء

مثال:

أوجد الحجم والكثافة النوعية لتفاحة باستخدام ميزان المنصة، البيانات المتحصلة كالتالي:

كتلة التفاحة في الهواء = ١٢٩,٧٨ جم.

كتلة الوعاء + الماء = ١٠٠٠ جم

كتلة الوعاء + الماء + التفاحة المغمورة = ١١٦٠ جم

بافتراض أن الكثافة النوعية للماء تساوي ١ وأن كثافته تساوي ١ (جم/سم^{٣}) = كتلة/حجم

الحل:

كتلة الماء المزاح = ١١٦٠ - ١٠٠٠ = ١٦٠ جم

حجم التفاحة = حجم الماء المزاح = ١٦٠ (جم) / ١ (جم/سم^{٣}) = ١٦٠ سم^{٣}

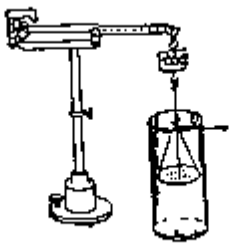
كثافة التفاحة = كتلة التفاحة في الهواء / حجم التفاحة = ١٢٩,٧٨/١٦٠ = ٠,٨١١ جم/سم^{٣}

و

$$\text{الكثافة النوعية للتفاحة} = \frac{١ \times ١٢٩,٧٨}{١٦٠} = ٠,٨١١$$

٢. طريقة ميزان الكثافة النوعية: (Specific Gravity Balance)

بالنسبة للأجسام الصغيرة مثل الفواكه صغيرة الحجم والحبوب مثل البسلة والفول والذرة الشامية يمكن استخدام ميزان الكثافة النوعية كما هو موضح في الشكل (١٩) أدناه لإيجاد الحجم والكثافة والكثافة النوعية.



شكل (١٩) ميزان الكثافة النوعية لقياس الحجم والكثافة للأجسام الصغيرة.

فعندما تغمر مادة في ماء، فإن وزنها يقل مقارنة بالهواء، وتكون (الكتلة في الهواء – الكتلة في الماء) تساوي قوة الطفو (قوة الدفع) والتي تساوي وزن الماء المزاح.

ويمكن استخدام التعبيرات الرياضية التالية:

أ. في الحالة التي يكون فيها الجسم أثقل من الماء:

$$\text{حجم الماء المزاح} = \frac{\text{الكتلة في الهواء} - \text{الكتلة في الماء}}{\text{كثافة الماء}} \qquad (١٦)$$

$$\text{الكثافة النوعية} = \frac{\text{الكتلة في الهواء}}{\text{الكتلة في الهواء} - \text{الكتلة في الماء}} \times \text{الكثافة النوعية للماء}$$

(ب) في الحالة التي يكون فيها الجسم أخف من الماء:

يوضع جسم آخر أثقل من الماء معه ليساعد على عملية الغمر في الماء ويمكن إيجاد الكثافة النوعية من المعادلة التالية:

$$SpecificGravity = \left[\frac{(W_a)_{object}}{(W_a - W_w)_{both} - (W_a - W_w)_{\text{sinker}}}\right]\left[(SG)_L\right]$$

حيث:

$(W_a)_{object}$ = كتلة المادة الغذائية أو (الجسم الخفيف) في الهواء.

$(W_a - W_w)_{sinker}$ = كتلة الجسم الغامر في الهواء – وزن الجسم الغامر في الماء.

$(W_a - W_w)_{both}$ = (كتلة الجسم الخفيف + الجسم الغامر) في الهواء – (كتلة الجسم الخفيف + الجسم الغامر) في الماء.

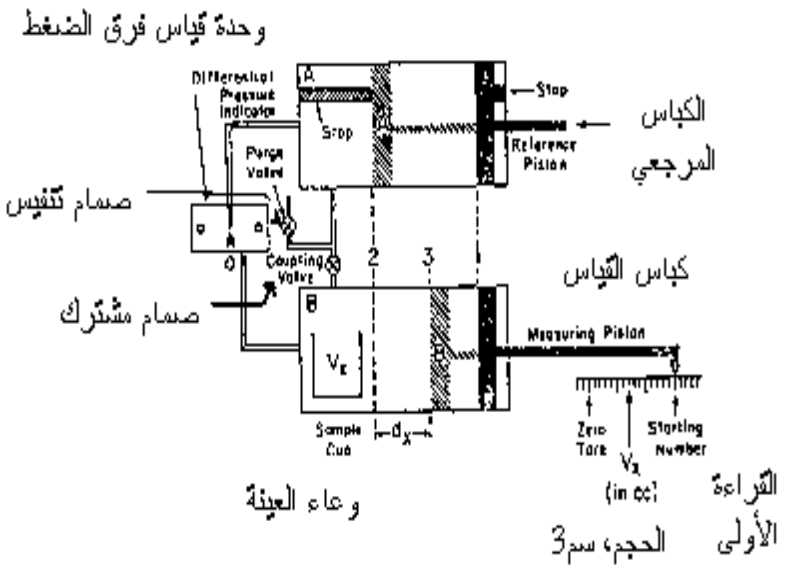
حيث الرموز السفلية a للكتلة في الهواء (in air) بينما w للكتلة في الماء (in water)

وعند إضافة ٣ سم^{٣} من وسط تبليل (Wetting agent) إلى ٥٠٠ سم^{٣} من الماء المقطر يؤدي إلى تقليل الخطأ الذي يمكن أن يحدث نتيجة لعملية الشد السطحي (Surface Tension) ونتيجة للغمر في الماء. أو يمكن حل مشكلة طفو المنتج باستخدام سائل أقل كثافة من المنتج الزراعي.

٣. طريقة المقارنة الهوائية: (Air Comparison Pycnometer بيكنوميتر)

يستخدم هذا الجهاز لقياس حجم الحبوب وقامت بتصنيعه شركة Beckman Instrument, Inc. ويتكون الجهاز من حيزين يحتوي كل منهما على كباس (Piston) ويوجد به صمام في الأنبوب الموصل بين الحيزين كما يحتوي الجهاز على وحدة لقياس فرق الضغط تمت معايرته لإعطاء القراءات (سم^3) كما هو واضح في الشكل (٢٠) أدناه:

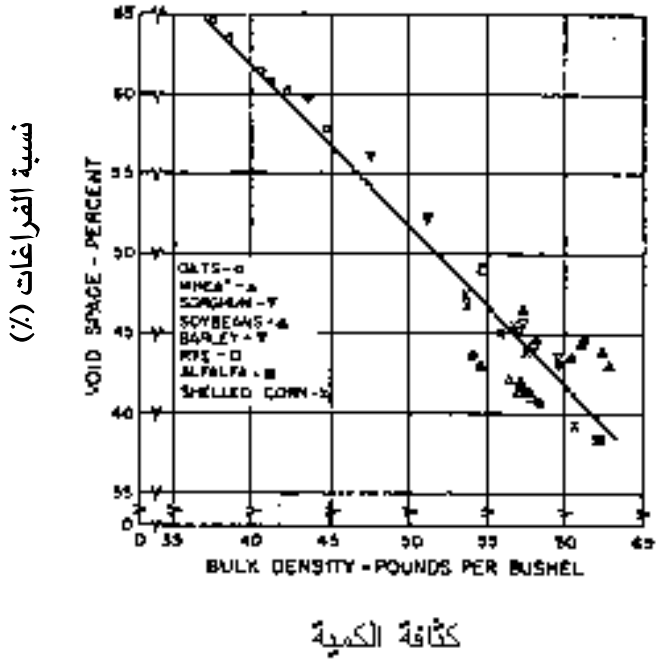
١) عند فتح صمام التوصيل المشترك بين الحيزين، فإن أي تغيير في وضع واحد من الكباسين يؤدي إلى تغيير في الحجم مشابه تماماً للكباس الآخر حتى يتم الحصول على نفس الضغط في جانبي الحيزين وتكون القراءة على مقياس فرق الضغط صفراً.



شكل (٢٠) بيكنوميتر المقارنة الهوائية.

٢) في حالة قفل صمام التوصيل المشترك وتحريك الكباسين مسافة متساوية، فإن وضع عينة في حيز قياس الحجم سيؤدي إلى فرق ضغط،

٣) يمكن إرجاع فرق الضغط الناتج إلى صفر بجذب الكباس الموجود في حيز قياس الحجم للخلف لمسافة معينة، dx مثلاً كما هو واضح في شكل (٢٠). وتحت هذه الظروف فإن المسافة dx تتناسب طردياً مع الحجم الذي يراد قياسه. .هذا الجهاز يقيس حجم الحبيبات للعينة، وعند الحاجة لقياس الحجم الظاهري (Apparent Volume) أي حجم العينة المحاط بسطوحها الخارجية زائداً حجم الفتحات المسامية فإن الشركة المصنِّعة تنصح بملء الفتحات أو الفراغات المسامية عن طريق غمر العينة في حمام شمع سائح (Molten wax bath). وبمعرفتنا للحجم الظاهري والحجم الحقيقي للعينة نستطيع حساب حجم الفراغات أو الفتحات المسامية والتعبير عنها كمعامل للمسامية (Porosity) والشكل (٢١) يوضح نتائج استخدام جهاز البيكنوميتر الهوائي لإيجاد الكثافة الكمية (Bulk density) للحبوب.



شكل (٢١) الارتباط بين الفراغات (الفتحات المسامية) وكثافة الكمية لأنواع مختلفة من الحبوب والتي تم إيجادها باستخدام بيكنوميتر المقارنة الهوائية.

(٤) طريقة قنينة الكثافة والتولوين (البيكنوميتر Pycnometer Method)

تعتبر طريقة قنينة الكثافة النوعية (البيكنوميتر) والتولوين ($C_6H_5CH_3$ Toluene) من الطرق المباشرة التي تم استخدامها للبذور والحبوب لسنوات عديدة. وتتم هذه الطريقة بوضع الحبوب في القنينة (وعاء) ثم تتم تعبئة المسام بين الحبيبات بمادة ذات مواصفات خاصة. حجم هذه المادة التي تم إضافتها يمثل حجم المسام بين الحبيبات. ويكون:

حجم البذور = حجم القنينية – حجم التولوين المضاف.

ولسائل التولوين الذي تم اختياره فوائد عدة يمكن تلخيصها فيما يلي:

١ - لا يتسرب داخل الحبوب والبذور لتبليلها إلا بقدر بسيط جداً.

٢ - التوتر السطحي له (Surface Tension) منخفض وهذا يؤدي إلى سريانه سرياناً ناعماً (Smooth Flow) فوق سطح الحبة.

٣ - خاصيته التذويبية منخفضة خاصة للدهون والزيوت المتواجدة في الحبة.

٤ - نقطة غليانه عالية بصورة معقولة.

٥ - لا تتغير كثافته النوعية ولزوجته عند تعرضه للجو العادي.

٦ - كثافته النوعية منخفضة.

ويمكن تفصيل خطوات تجربة قنينة الكثافة للبذور لقياس الكثافة فيما يلي:

١ - إيجاد حجم قنينة البيكنوميتر بوزنه فارغاً وبوزنه بعد ملئه بماء مقطر عند درجة ٢٠°م.

٢ - إيجاد الكثافة النوعية للتولوين الذي يراد استخدامه عن طريق وزن التولوين الذي يملأ البيكنوميتر ومقارنته بوزن الماء المقطر الذي يملأ البيكنوميتر عند نفس درجة الحرارة.

$$\text{الكثافة النوعية للتولوين} = \frac{\text{كتلة التولوين}}{\text{كتلة الماء}}$$

٣ - اوزن عشرة جرامات -مثلاً- من الحبوب أو البذور التي يراد إيجاد الكثافة النوعية لها وضَعْها في البيكنومتر ثم اسكب عليها كمية مناسبة من التولوين حتى تتغطى به الحبوب أو البذور.

٤ - اسحب الهواء تدريجياً من البيكنوميتر باستخدام مضخة تفريغ.

٥ - عند اختفاء فقاعات الهواء وبعد عدة دورات من التفريغ وسحب التفريغ مع إعادة ملء البيكنوميتر بالتولوين وانتظر حتى تصل درجة الحرارة إلى ٢٠°م.

٦ - اوزن البيكنوميتر واحسب الكثافة النوعية للحبوب أو البذور كما يلي:

$$\text{الكثافة النوعية للحبوب أو البذور} = \frac{\text{الكثافة النوعية للتولوين} \times \text{كتلة الحبوب أو البذور}}{\text{كتلة التولوين المزاح عن طريق الحبوب أو البذور}}$$

كتلة التولوين المزاح عن طريق الحبوب أو البذور يمكن إيجاده بطرح الفرق في أوزان البيكنوميتر عند ملئه بالتولوين وعند احتوائه على الحبوب أو البذور من كتلة عينة الحبوب أو البذور (١٠ جرامات في هذه الحالة):

كتلة التولوين المزاح=كتلة العينة-[(كتلة الوعاء + التولوين + العينة) - (كتلة الوعاء + التولوين)]

مثال:

اوجد حجم ١٦ حبة من الذرة الشامية إذا تم تزويدك بالمعلومات التالية:

كتلة العينة (١٦ حبة ذرة شامية) = ٤,٤٥٩٨ جم

كتلة الوعاء = ٥٥,٦٤٦٨ جم

كتلة الوعاء + التولوين = ٧٨,٢٣٩٩ جم

كتلة الوعاء + التولوين + العينة = ٧٩,٦٢٢٦ جم

كتلة الوعاء + الماء = ٨١,٧٧٠٩ جم

الحل:

$$\text{الكثافة النوعية للتولوين} = \frac{٧٨,٢٣٩٩ - ٥٥,٦٤٦٨}{٨١,٧٧٠٩ - ٥٥,٦٤٦٨} = ٠,٨٦٤٨$$

$$\text{الكثافة النوعية للذرة الشامية} = \frac{٠,٨٦٤٨ \times ٤,٤٥٩٨}{[٤,٤٥٩٨ - (٧٩,٦٢٢٦ - ٧٨,٢٣٩٩)]} = ١,٢٥٦$$

$$\text{حجم العينة} = \frac{\text{كتلة العينة}}{\text{كثافة العينة}} = \frac{٤,٤٥٩٨}{١,٢٥٦} = ٣,٥٥٨ \text{ سم}^٣$$

وعند إجراء التجربة لنفس العينة باستخدام بيكنوميتر المقارنة الهوائية (Air Comparsion Pycnometer) والذي تم شرح طريقة عمله مسبقاً وُجِد أن حجم العينة كان مساوياً ٣,٤٩ سم^٣ أو ما يعادل ٢٪ أقل من نتيجة استخدام طريقة قنينة الكثافة والتولوين (Pycnometer Method).

(٤) تقدير الكثافة بمعادلات الارتباط مع مكونات المادة الغذائية ودرجة الحرارة:

تحسب الكثافة (كجم\متر^3) لأي منتج حيوي بحساب كمية وكثافة كل عنصر من المنتج مثل الماء النقي (ρ_w) ، الثلج (ρ_{ic}) ، البروتين (ρ_p) ، الكربوهيدرات (ρ_c) ، الألياف (ρ_{fi}) ، والرماد (ρ_a) كدالة لدرجة الحرارة (°م) من المعادلات التالية:

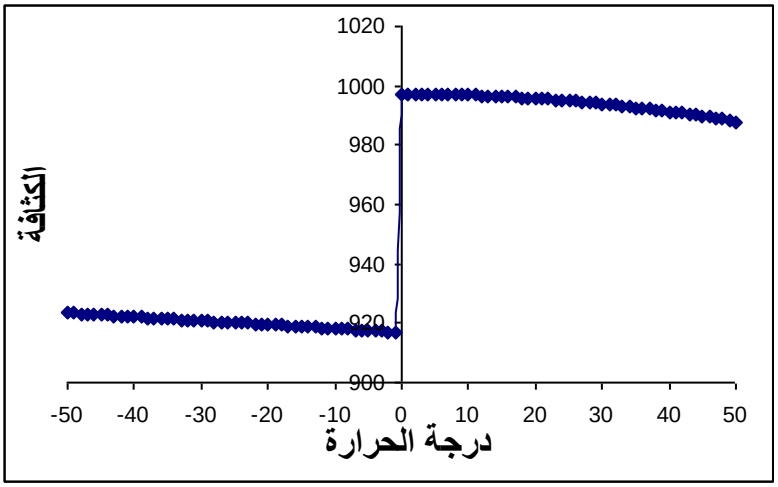
$$\rho_w = 997.18 + 0.0031439\ T - 0.0037574\ T2$$
$$\rho_{ic} = 916.89 - 0.13071\ T$$
$$\rho_p = 1329.9 - 0.51814\ T$$
$$\rho_f = 925.59 - 0.41757\ T$$
$$\rho_c = 1599.1 - 0.31046\ T$$
$$\rho_{fi} = 1311.5 - 0.36589\ T$$
$$\rho_a = 2423.8 - 0.28063\ T$$

وتحسب الكثافة الكلية للمادة الغذائية (ρ) بمعرفة النسبة الكتلية X_i لكل عنصر ρ_i كالتالي:

$$\rho = 1 / \sum [X_i / \rho_i]$$

وهذه الطريقة قد تناسب مجموعة من المنتجات الزراعية ذات الخواص المتشابهة. إلا أنه وبشكل عام لا ينصح بها خاصة للمنتجات ذات الطبيعة الغير متجانسة. فمثلاً كثافة الكربوهيدرات تختلف حسب نوعها (بين السكر والنشا مثلاً) مما يقلل من دقة هذه المعادلات المقترحة.

في الشكل التالي يتبين تأثير تغير الطور ودرجة الحرارة على كثافة الماء. حيث أن الخاصية الفريدة للماء بانخفاض كثافته عند التجمد (الثلج) –بعكس السوائل الأخرى -يحمي بإذن الله الكائنات الحية في قعر البحار في القطب الشمالي والجنوبي من ترسب الثلج وقتل تلك الكائنات.



تأثير درجة الحرارة على كثافة الماء السائل والثلج.

٢ -٤ قياس المسامية: (Porosity)

النسبة المئوية للفراغات الموجودة بين حبيبات المواد مثل العلف والقش والحبوب والمنتجات المسامية الأخرى يتم الاحتياج إليها في أغلب الأحوال في الدراسات الخاصة بسريان الهواء وسريان الحرارة إضافة إلى عديد من التطبيقات الأخرى.

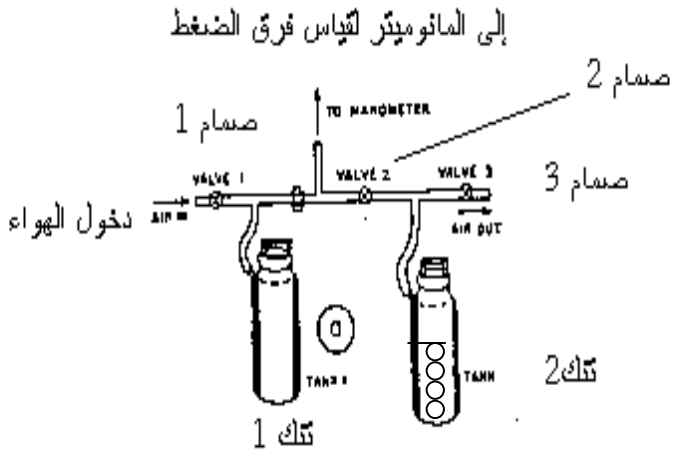
يطلق على المسامية (Porosity) في بعض الأحيان اسم معامل الحشو (Packing Factor) (PF) والتي يمكن حسابها من العلاقة التالية:

$$\text{المسامية (أو معامل الحشو (PF))} = \frac{\text{الكثافة الصلبة} - \text{الكثافة الظاهرية}}{\text{الكثافة الصلبة}}$$

ويمكن إيجاد كثافة المادة الصلبة باستخدام إحدى الطرق المعروفة لقياس الكثافة، وكثافة الحشو يمكن إيجادها بوزن حجم معين من الجسيمات المعبأة أو المحشوة (Packed Particle). هنا أحد الطرق الشائع استخدامها لقياس المسامية.

قياس المسامية بطريقة فرق الضغط:

الرسم (٢٢) أدناه يوضح أحد الأجهزة المستخدمة لقياس المسامية.



شكل (٢٢) جهاز قياس المسامية بطريقة فرق الضغط

يوضع المنتج في تنك (٢) ثم يتم قفل صمام (٢) ويُفتح صمام (١) لدفع الهواء لتنك (١). وعند الحصول على قراءة ملائمة لفرق الضغط من المانوميتر يتم قفل صمام (١) وبعد وصول المانوميتر إلى مرحلة التوازن يتم قراءة الضغط (P_1). وتحت هذه الظروف يمكننا تطبيق قانون الغاز المثالي كما يلي:

$$P_1 V_1 = M R_1 T_1$$

حيث P_1 الضغط المطلق، V_1 الحجم في تنك (١)، M كتلة الهواء، R_1 ثابت الغاز العام. و T_1 درجة الحرارة المطلقة.

وفي الخطوة التالية يتم قفل صمام (٣) وفتح صمام (٢) ثم يتلو ذلك قراءة الضغط (P_3). وتحت هذه الظروف حيث يكون الصمام (١) والصمام (٣) مُقفلين، تنقسم كتلة الهواء الكلية M إلى كتلة M_1 لملء تنك (١) وكتلة M_2 لملء الفراغات التي يساوي حجمها V_2 في تنك (٢).

وبافتراض أن : $R_1 T_1 = R_2 T_2 = R T$ ، نستطيع استخلاص العلاقات التالية:

$$M = M_1 + M_2$$

$$\frac{P_1 V_1}{R T} = \frac{P_3 V_1}{R T} + \frac{P_3 V_2}{R T}$$

ومنها يمكن حساب النسبة المئوية لحجم الفراغات من المعادلة أدناه:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1 - P_3}{P_3} \qquad (١٧)$$

مثال:

اوجد المسامية لحبوب الذرة الشامية الجافة عند ملء تنك (٢) (كما هو واضح في شكل ٢٢) بعينة من المنتج، وكانت كثافته الكمية ٤٧ رطل/قدم^٣. وكانت قراءات الضغط كما يلي:

$P_1 = 15.2$ (in Hg) ، $P_3 = 10.4$ (in Hg)

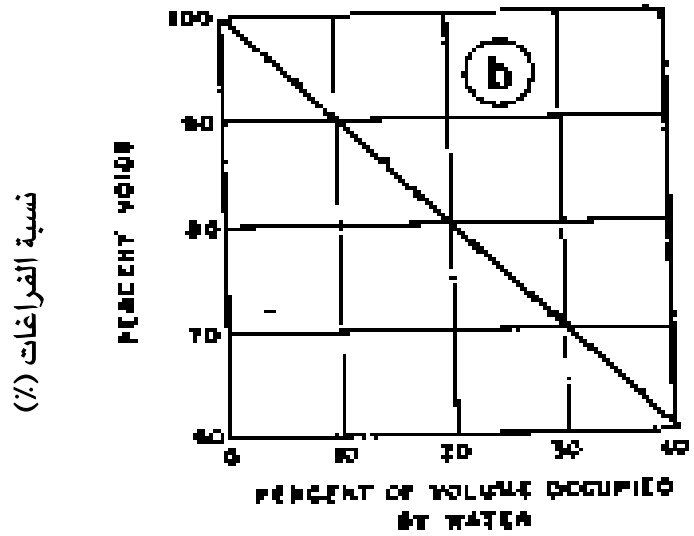
الحل:

باستخدام معادلة (١٧) يمكن إيجاد مسامية حبوب الذرة الشامية كما يلي:

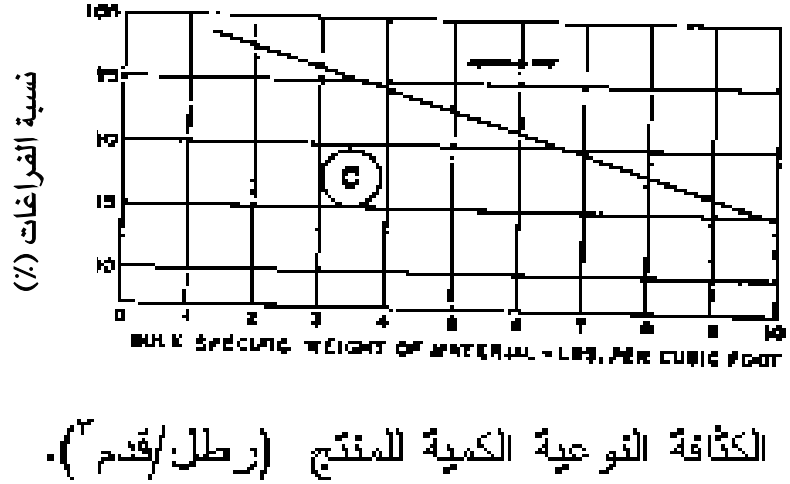
المسامية = (حجم الفراغات ÷ الحجم الكلي)

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{15.2 - 10.4}{10.4} = 0.46$$

وقد تم معايرة الجهاز باستخدام الماء في تنك (٢) والنسبة المئوية للفراغات في علف البرسيم المقطع كما في الشكلين (٢٣) و (٢٤) على الترتيب.



شكل (٢٣) معايرة جهاز إيجاد المسامية باستخدام الماء في تنك (٢).



شكل (٢٤) النسبة المئوية للفراغات في علف البرسيم المقطع.

٢ -٦ النشاط المائي للمنتجات الحيوية

Water Activity of Biological Materials

٢ -٦ -١ خلفية علمية

من المعروف أن المحتوى الرطوبي للمواد الغذائية والحيوية له علاقة كبيرة بالفساد. إذ أنه وبشكل عام كلما زاد المحتوى الرطوبي للمنتج كلما زادت قابلية نمو مسببات التدهور والفساد من أحياء دقيقة وأنشطة كيميائية وإنزيمية وغيرها. إلا أنه في العقود الماضية تم اقتراح مدلول آخر يعبر عن مدى فساد الأغذية بصورة أدق وهو ما يطلق عليه النشاط المائي. ويعود ذلك إلى أنه ليس كل المحتوى الرطوبي في المنتج يكون متاحاً لتلك الأنشطة فالنشاط المائي يعبر عن كمية الماء المتاحة لتلك الأنشطة وذلك بسبب ارتباط جزء من الماء في الأغذية بحبيبات المنتج الغذائي. وهذا المفهوم يشابه كثيراً مقدرة جذور النبات على امتصاص الماء الموجود في التربة، فهناك الماء الشعري والمقيد والحر وتأثيرها على السعة الحقلية أي كمية الماء المتاحة للجذور لامتصاص الماء في الترب مثل الطينية والرملية وغيرها.

النشاط المائي في المواد الغذائية من العوامل الهامة المؤثرة على قابلية المادة الغذائية للفساد وبالتالي على جودتها. ويرتبط النشاط المائي بشكل كبير بالمحتوى الرطوبي للمنتج وكذلك بالروابط الفيزيائية والكيميائية لجزيئات الماء مع جزيئات المواد الغذائية. فيؤثر النشاط المائي بشكل كبير على أنشطة الأحياء الدقيقة مثل النشاط البكتيري ، العفن ، التخمر ، والتفاعلات الكيميائية والحيوية وقوام المادة الغذائية.

ويعتبر النشاط المائي من المعايير المهمة جداً في مجال تصنيع وحفظ الأغذية، فعن طريق خفض النشاط المائي يمكن تقليل أو وقف النشاط الميكروبي في المادة الغذائية. كما أن هناك علاقة كبيرة وواضحة بين النشاط المائي و كلاً من التزنخ الاوكسيدي والنشاط الإنزيمي والتفاعلات اللونية غير الإنزيمية وكذلك القوام. فعند خفض المحتوى الرطوبي - وبالتالي النشاط المائي - للمواد الغذائية فإن ذلك يعتبر مثبط للنشاطات الميكروبية والحيوية والتفاعلات الغير مرغوبة. إلا أن الجفاف النسبي لتلك المواد الغذائية قد يؤثر على قبول المستهلك للمنتج أو مصانع المعجنات لتشكيل المعمول مثلاً. من ناحية أخرى فإن زيادة المحتوى الرطوبي في المواد الغذائية - وبالتالي النشاط المائي - مرغوب فيه بشكل عام من قبل المستهلكين لسهولة مضغ المادة الغذائية. إلى أنه في المقابل يعتبر بيئة مناسبة لنمو الميكروبات والأنشطة الحيوية والكيميائية التي تؤثر على جودة الغذاء. لذلك فمن الأهمية بمكان الموائمة بين رغبة المستهلك من جهة وتثبيط الأنشطة المؤثرة على جودة الغذاء من جهة أخرى. وهذا يتأتى أولاً من دراسة الخواص النشاط المائي تحت ظروف

بيئية مختلفة، ومن ثم عمل الدراسات المكثفة للمنتجات الزراعية والغذائية لتحقيق رغبات المستهلك مع توفير الشروط الصحية أثناء التصنيع والتخزين للمنتج المستهدف.

٢ -٦ -٢ تعريف النشاط المائي وتطبيقاته

يعرَّف نشاط الماء بأنه النسبة بين ضغط بخار الماء في الغذاء (P) إلى ضغط بخار الماء النقي (P°) عند نفس درجة الحرارة. ويساوي النشاط المائي أيضاً الرطوبة النسبية عند التوازن (Equilibrium relative humidity, ERH) مقسومة على ١٠٠، وعند هذه الرطوبة النسبية المتزنة لا يكتسب أو يفقد أي رطوبة.

وعليه، يمكن التعبير رياضياً عن نشاط الماء (a_w) كما يلي:

$$a_w = \frac{\%\,ERH}{100} = \frac{P}{P^{\circ}}$$

ويعتبر النشاط المائي معياراً مباشراً لفساد الغذاء بصورة أدق من تلك للمحتوى الرطوبي. ويعبر a_w عن حالة الماء في المنتج الغذائي، بينما يعبر المحتوى الرطوبي عن كمية الماء في المنتج. بما أن قيمة النشاط المائي للماء النقي تساوي (١,٠) فإن نشاط الماء لأي مادة غذائية في الحدود (صفر إلى الواحد). فعلى سبيل المثال فإن نشاط الماء للأغذية عالية المحتوى المائي (High Moisture Food) مثل الفواكه والخضر واللحوم أكبر من ٠,٩٧، للأغذية متوسطة المحتوى المائي (Intermediate Moisture Food) تقع في الحدود ٠,٦ إلى ٠,٩ ،وللأغذية الجافة مثل البسكويت ومسحوق الحليب الجاف منزوع الدسم ورقائق البطاطس الجافة (الشيبس Chips) تكون أقل من ٠,٦. ومن المعروف أن الحدود الدنيا للنشاط المائي لأغلب المواد الغذائية والذي يمكن لمعظم الأعفان والخمائر والبكتريا المسببة للفساد أن تنمو فيه هو ٠,٨٠ - ٠,٨٧ -٠,٩١ على التوالي.

معرفة سلوك الإمتزاز (أي علاقة النشاط المائي بالمحتوى الرطوبي ومسببات تدهور الغذاء) للمواد الغذائية والزراعية له فوائد جمة في تصميم عمليات التصنيع وتطوير المنتجات. فهو يحدد مدى صعوبة أو سهولة إزالة الماء والذي بدوره يعتمد على الضغط الجزئي للماء في المادة الغذائية أو الزراعية وطاقة ارتباط الماء بها. إضافة لذلك فإن نشاط الماء يؤثر على مدى ثبات المواد الغذائية وبالتالي يجب تخفيضه إلى مستوى ملائم في نهاية عمليات التجفيف – على سبيل المثال – والمحافظة على هذا المستوى بقدر الإمكان أثناء فترة تخزين المنتج.

وهناك العديد من الأمثلة التطبيقية لأهمية دراسة النشاط المائي ومنها:

١ - عمليات تجفيف المواد الغذائية والزراعية وكذلك تركيز السوائل الغذائية.

٢ - انتقال الماء بين المكونات الغذائية في عمليات تصنيع الأغذية متوسطة المحتوى الرطوبي.

٣ - انتقال بخار الماء من المنتج عند التخزين في أجواء رطوبة نسبية محددة.

٤ - إنفاذية بخار الماء وتوازنه خلال سمك الرقائق البلاستيكية المغلفة للغذاء أثناء التخزين.

٥ - السيطرة على التفاعلات الكيميائية مثل تدهور الفيتامينات وتحولات الإسمرار غير الإنزيمية وأكسدة الدهون وتفاعلات التدهور الأخرى.

٦ - دالة على عدد من خصائص وجودة المادة الغذائية مثل القوام، الحالة الزجاجية، وفترة الصلاحية.

٢ -٦ -٣ علاقة النشاط المائي بعوامل تدهور المنتج الغذائي :

يلعب النشاط المائي دوراً هاماً في حفظ المواد الغذائية من خلال تأثيره على النشاط الميكروبي، الكيميائي ، الإنزيمي، والحيوي للمادة الغذائية. من ناحية أخرى تأثيره على قوام المادة الغذائية وخصائص منحنيات الامتزاز الرطوبي للمواد الغذائية المراد تجفيفها كما في الجوانب التالية:.

(١) النشاط المائي والفساد الميكروبي للمنتجات الغذائية:

١. نشاط الماء – وليس المحتوى الرطوبي بالضرورة – هو الذي يحدد المستوى الأدنى لتوافر الماء اللازم لنمو الميكروبات. فمعظم أنواع البكتيريا لا تنمو عند قيم النشاط المائي الأقل من ٠,٩١ ومعظم العفن (molds) لا ينمو عند نشاطات مائية أقل من ٠,٨. بعض أنواع الفطر المحبة للجفاف (Fungi Xerophilic) تنمو عند نشاط مائي في حدود ٠,٦٥ ولكن في الغالب تكون حدود نشاط الماء ٠,٧ إلى ٠,٧٥ هي مستويات حدودها الدنيا. قيم النشاط المائي لبعض مجموعات المنتجات الغذائية مع النشاط الميكروبي موضحة في الشكل (٢٥) بينما تبين المنحنيات في شكل (٢٦) علاقة عوامل التدهور المختلفة بالنشاط المائي.

٢. عوامل البيئة المحيطة تؤثر على مستوى نشاط الماء المطلوب لنمو الميكروبات. فالقاعدة العامة التي تنطبق دائما هي أنه كلما انخفض نمو الميكروبات نتيجة لعوامل البيئة

الأخرى (مثل تركيز الأس الهيدروجيني، pH ، والأكسجين والضغط ودرجة الحرارة) كلما ارتفع الحد الأدنى لنشاط الماء اللازم لنمو الميكروبات.

٣. تحدث بعض التهيئة للنشاطات المنخفضة خاصة عند تخفيض نشاط الماء بإضافة بعض المواد التي تذوب في الماء (وهي القاعدة الأساسية التي يتم الاعتماد عليها في إنتاج المواد الغذائية متوسطة المحتوى الرطوبي) بدلاً من بلورة الماء (الأغذية المجمدة) أو إزالة الماء (الأغذية المجففة).

٤. عند تخفيض نشاط الماء بواسطة المذابات (Solutes) فإن المذابات نفسها قد يكون لها تأثيرات تؤدي إلى تعقيد فعل نشاط الماء. فعلى سبيل المثال عند نشاط مائي معيّن نجد أن نمو الميكروبات يكون تخفيضه أقل فاعلية عند استخدام الجليسرول مقارنة بكلوريد الصوديوم.

٥. نشاط الماء يعدل حساسية الكائنات المجهرية للحرارة والضوء والمواد الكيميائية. وبصفة عامة فإن الكائنات المجهرية تتعاظم حساسيتها عند نشاطات مائية عالية (أي في المحاليل الخفيفة) والحد الأدنى لحساسيتها يحدث عند الحدود المتوسطة للمحتوى المائي. التمثيل البياني لتأثير نشاط الماء على حساسية الميكروبات لعملية التعقيم موضح في الشكل (٢٧).

٦. نشاطات الماء الدنيا لإنتاج السموم (Toxins) غالباً أعلى من تلك اللازمة لنمو الميكروبات والتي تشكل عاملاً هاماً للسلامة المطلوبة في حالات توزيع الأغذية الجافة ومتوسطة المحتوى المائي.

(٢) علاقة التدهور الكيميائي بالنشاط المائي للمواد الغذائية:

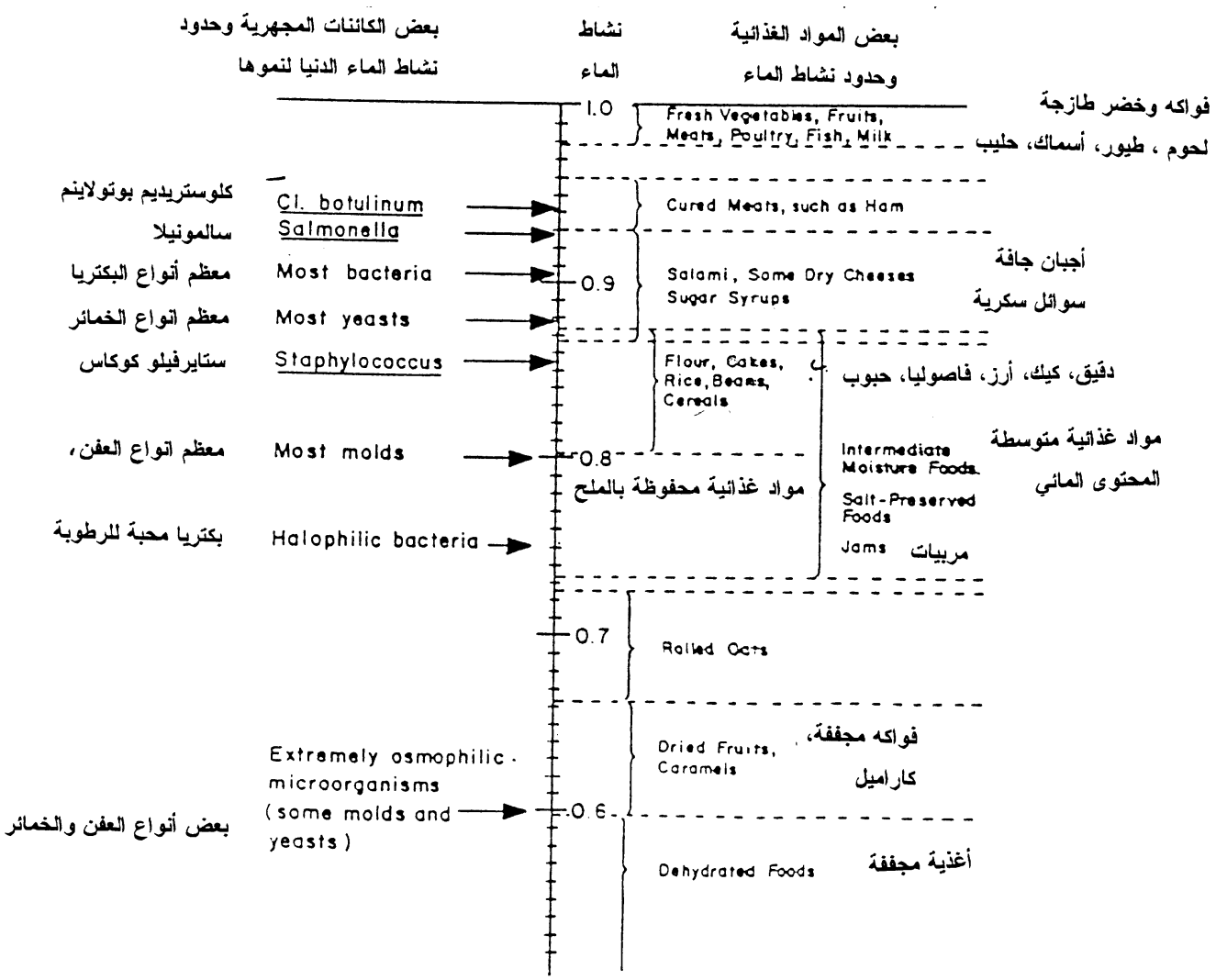
تأثيرات الماء على التفاعلات الكيميائية في الأغذية أكثر تعقيداً من تأثيراتها على النمو الميكروبي. فنشاط الماء ليس هو العامل الوحيد الذي يُعرّف الحدود الدنيا للنشاط الكيميائي. والماء يمكنه أن يؤدي دوراً واحداً أو أكثر من الأدوار التالية:

١ - كمذيب (Solvent) للمتفاعلات ونواتج التفاعل.

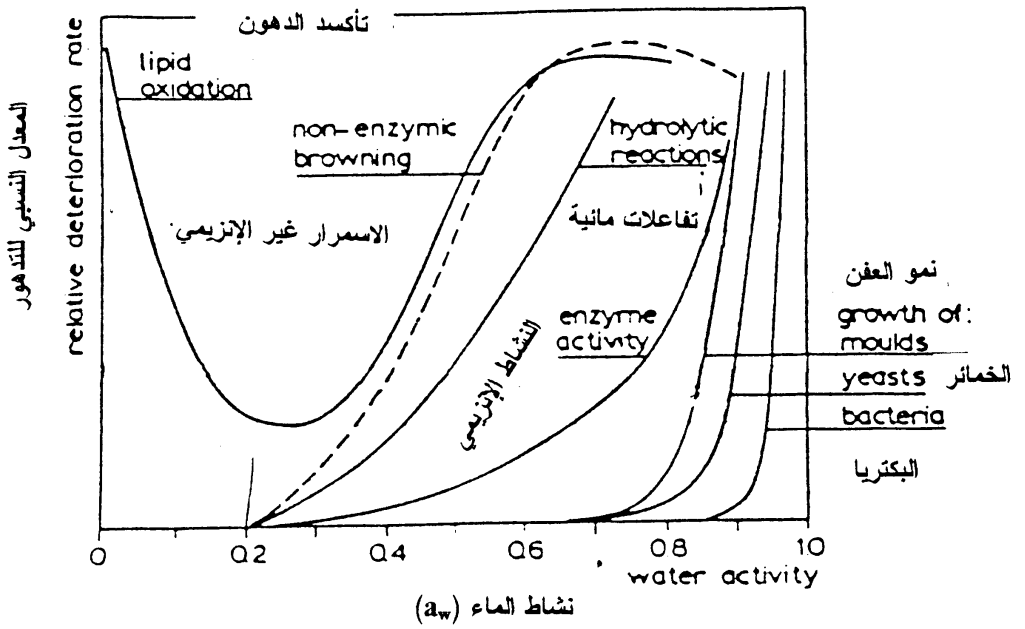
٢ - كمتفاعل (على سبيل المثال تفاعلات التميؤ Hydrolysis reactions)

٣ - كناتج للتفاعلات (على سبيل المثال تفاعلات التكثيف Condensation reactions) كالتفاعلات التي تحدث في عمليات الاسمرار الغير إنزيمية).

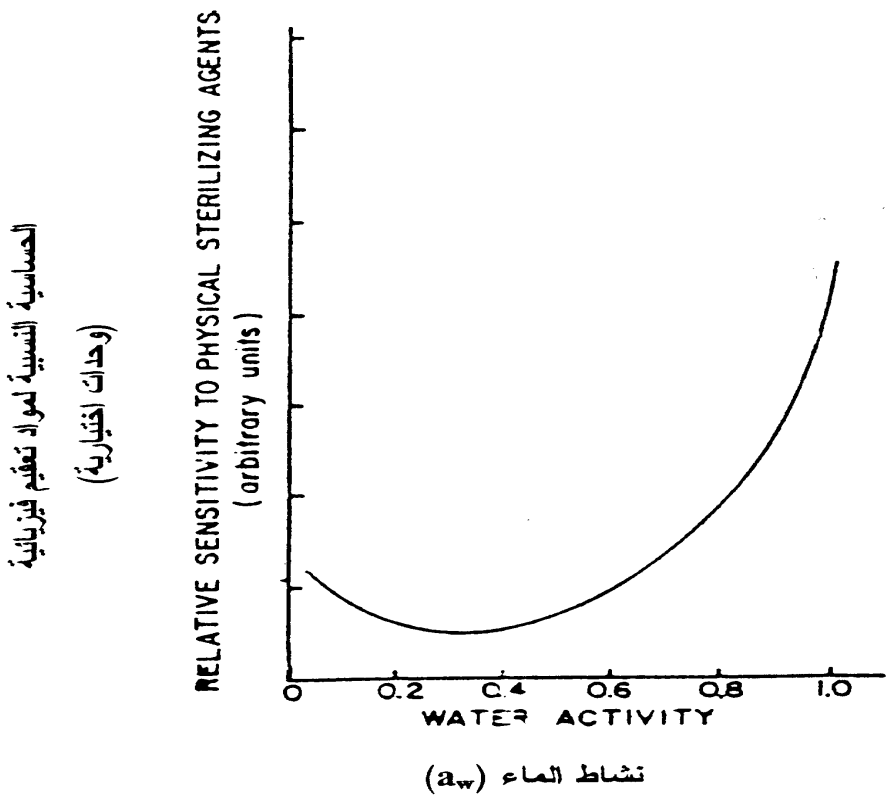
٤ - كمعدِّل لنشاطات التحفيز (Catalytic) أو المنع (Inhibitory) للعناصر الأخرى (على سبيل المثال يثبط الماء نشاط المحفزات المعدنية لتأكسد الدهون).



شكل (٢٥) رسم تخطيطي للحدود الدنيا لنشاط الماء اللازم لنمو الكائنات المجهرية وما يقابله للنشاط المائي لبعض المواد الغذائية.



شكل (٢٦) تأثير النشاط المائي على عوامل التدهور وفساد الأغذية.



شكل (٢٧) تأثير نشاط الماء على حساسية الكائنات الدقيقة للتعقيم.

(٣) التفاعلات الإنزيمية:

حدوث التفاعلات الإنزيمية في الأغذية عند محتويات مائية منخفضة أخذت حيزاً هاماً في النشاطات البحثية. ففي منطقة إمتزاز الماء عند مواقع محددة في المواد الزراعية والغذائية (أي عند الطبقة الأحادية)، تحدث التفاعلات الإنزيمية بشكل بطئ أو ربما لا تحدث مطلقاً. ويبدو أن انعدام النشاط ناتج عن عدم حرية حركة المغذيات (Substrate) للانتشار إلى المناطق التي تتميز بنشاط الإنزيمات. والأهمية البالغة للماء في تسهيل حرية حركة المغذيات أدت إلى أن يطلق عليه مسمى محفز حرية الحركة (Mobility Catalizer).

ومن الجدير بالذكر أنه حتى في حالة إنزيمات التميؤ (Hydrolazer) والتي تتطلب وجود الماء كمتفاعل فإن نشاط الماء لتسهيل حرية الحركة وليست مدى توافره كمتفاعل هو العامل الحرج في مدى تحديد فعل الإنزيم. وفي حالة إنزيمات الدهون (اللايبيز Lipases) عند محتويات مائية منخفضة فإن أهمية حرية الحركة تتضح من حالة الجليسريدات الثلاثية (Triglycerides) الصلبة التي تتعرض للتميؤ الإنزيمي بمعدل بطيء مقارنة بالجليسريدات الثلاثية السائلة حرة الحركة.

(٤) تحولات الاسمرار غير الإنزيمية:

معظم المواد الغذائية متوسطة المحتوى الرطوبي معرضة لتحولات الاسمرار الغير إنزيمية. هذا التفاعل يعتمد على وجود الماء ويكون عند معدله الأقصى في المحتويات المائية المتوسطة. هذه التأثيرات تنتج من الدور المزدوج للماء كمذيب وكناتج للتفاعل وبالتالي كعامل مثبط. عند النشاط المائي المنخفض يكون العامل المحدد هو عدم توافر حرية الحركة الملائمة وبالتالي فإن إضافة الماء يؤدي إلى تسريع التفاعل.

مدى تحول الاسمرار يعتمد على نوعية المادة الغذائية، ولكن بصفة عامة فإن السوائل المركزة (مثل مركزات الفواكة الغير مجمدة) إضافة إلى الأغذية متوسطة المحتوى المائي (مثل حشوات المعجنات وما يسمى بالفواكة المبخرة مثل البرقوق المجفف) تقع في حدود المحتويات المائية القابلة لتحولات الاسمرار.

٢ -٦ -٤ طبيعة ارتباط الماء بحبيبات الأغذية Forms of Water Retention

الماء هو أحد أهم المكونات التي تؤثر على جميع الخواص الطبيعية للمواد الغذائية. والطريقة التي يؤثر بها الماء على الطبيعة الفيزيائية والخواص للمواد الغذائية تعتبر معقدة نتيجة للتداخل الإرتباطي بين الماء والوسط والذي بدوره يتضمن التركيب النسيجي إضافة إلى المكونات الكيميائية مثل عديد من المذابات التي تشمل البوليمرات والجزيئات المنتشرة غراوياً (Colloidally dispersed particles).

أسلوب آخر لوصف ارتباط الماء بالغذاء هي آليات الإمتزاز الجزيئي (Mechanisms of molecular adsorption) للماء المقيد وإمتزاز الأنبوب الشعري للماء الحر (Free water). يحدث الإمتزاز الجزيئي عند التصاق جزيئات الماء بنقاط محددة في التركيب النسيجي للمادة. وعندما تصبح المسافة بين جزيئات الماء وسطح الخلية صغيرة جداً (في حدود ١٠ $^{-٧}$ سم) فإن قوة الجذب تصبح كبيرة بحيث تؤدي إلى سحب الماء إلى داخل الشبكة الجزيئية الغروية (Micellar network) لسطح الخلية. قوة الجذب عند المحتويات المائية المنخفضة كبيرة بحيث تؤدي إلى حصول إنضغاط إمتزازي (Adsorption compression) يؤدي بدوره إلى تخفيض حجم كتل الخليط المتجمع للمواد الصلبة والماء (Solid – water aggregates). وعند ازدياد المحتوى الرطوبي يصبح الانجذاب الجزيئي صغيراً ويزداد الحجم الذي سيصبح بالتقريب مساوياً لحجم الماء المضاف ونتيجة للإنضغاط الإمتزازي فإن الحجم للكتل المتجمعة يظل أصغر من حجم المكونات.

يبدو أن مدى وطبيعة السطح الذي يتم فيه الإنضغاط الإمتزازي هو العامل الأساسي الذي يؤدي للإمتزاز الجزيئي. فقد يكون التجاذب الجزيئي نتيجة للإلكترونات أو تجاذب فاندروال

(Vander Wall's attraction). ولكنه في الغالب يحدث نتيجة لترابط الهيدروجين (Hydrogen bonding). وعليه، فكلما ازداد عدد الأيونات أو الجزيئات القطبية كلما ازداد استبقاء الماء في الغذاء على هذه الشاكلة. ويعتبر الإمتزاز الجزيئي سبباً رئيسياً لانتفاخ المواد الغذائية المسترطبة (الممتصة للرطوبة من الهواء Hygroscopic). فالنشا في بذرة الذرة الشامية – على سبيل المثال – يحتوي على أقطاب لجذب جزيئات الماء بصورة أكبر من تلك التي يحتويها السليولوز. ويؤدي ذلك بطبيعة الحال إلى إمتزاز كميات أكبر من بخار الماء بواسطة المواد النشوية مقارنة بالمواد السليولوزية.

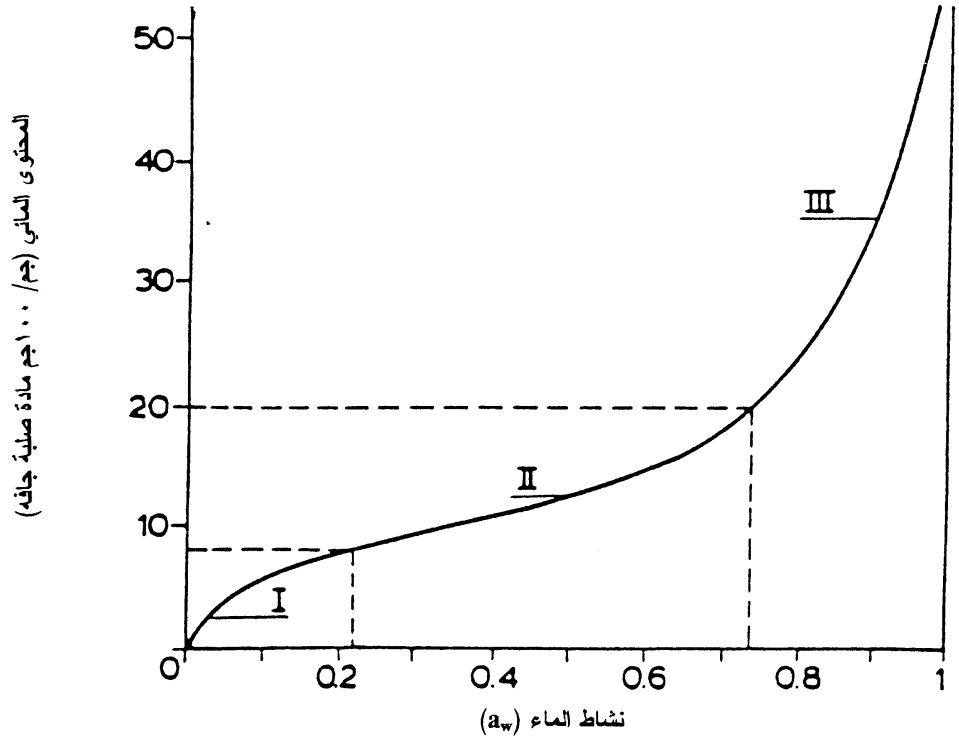
وعند محتويات مائية اكبر – بحيث لا يكون ضغط البخار قد وصل إلى نقطة التشبع بعد – نجد أن معظم نقاط التجاذب المتوافرة قد امتلأت بالماء وبالتالي فإن حمل أي كمية إضافية من جزيئات الماء تكون ممكنة فقط من خلال تشكيل سلاسل لجزيئات الماء أو (جسور ماء) ممتدة بين هذه الجزيئات التي تم إمتزازها مباشرة.

٢ -٦ -٥ مناطق منحنيات التحارر (الإمتزاز) الرطوبي: Regions of Isotherms

عادة يتم التعبير عن علاقة النشاط المائي بالمحتوى الرطوبي من خلال تجارب الإمتزاز الرطوبي ومن ثم رسم منحنياتها وذلك لكل منتج غذائي أو مجموعة متجانسة من الأغذية. شكل (٢٨) يمثل علاقة نموذجية بين المحتوى الرطوبي بالنشاط المائي لمعظم الحبوب. وكما هو موضح في شكل (٢٨) فيمكن تقسيم منحنى الامتزاز لعلاقة المحتوى الرطوبي بالنشاط المائي إلى ثلاثة مناطق وهي:

I - الماء المقيد (Bound Water) أو منطقة الطبقة الأحادية (Monolayer region) المناظرة للامتصاص حتى مستوى الطبقة الجزيئية الأحادية للماء. اكتمال هذه المنطقة يحدث قريباً جداً من نقطة الانقلاب (Inflection point) للمنحنى. عندما لا يمكن للماء أن يتجمد أو يعمل كمذيب (Solvent) أو متفاعل (Reactant)، في هذه الحالة يطلق على الماء المتواجد في المادة الغذائية مسمى الماء المقيد.

II - الماء المتوسط أو منطقة الطبقات العديدة(Multilayer region) المناظرة لامتصاص طبقات إضافية من الماء فوق مستوى الطبقة الأحادية. عندما يتم تخفيض نسبة الماء في المادة الغذائية فإن ذلك سيقود للوصول إلى نقطة يصبح عندها الماء أقل نشاطاً لعدم تمكنه من التأثير فيزيائياً وكيميائياً كما هو الحال للماء النقي.



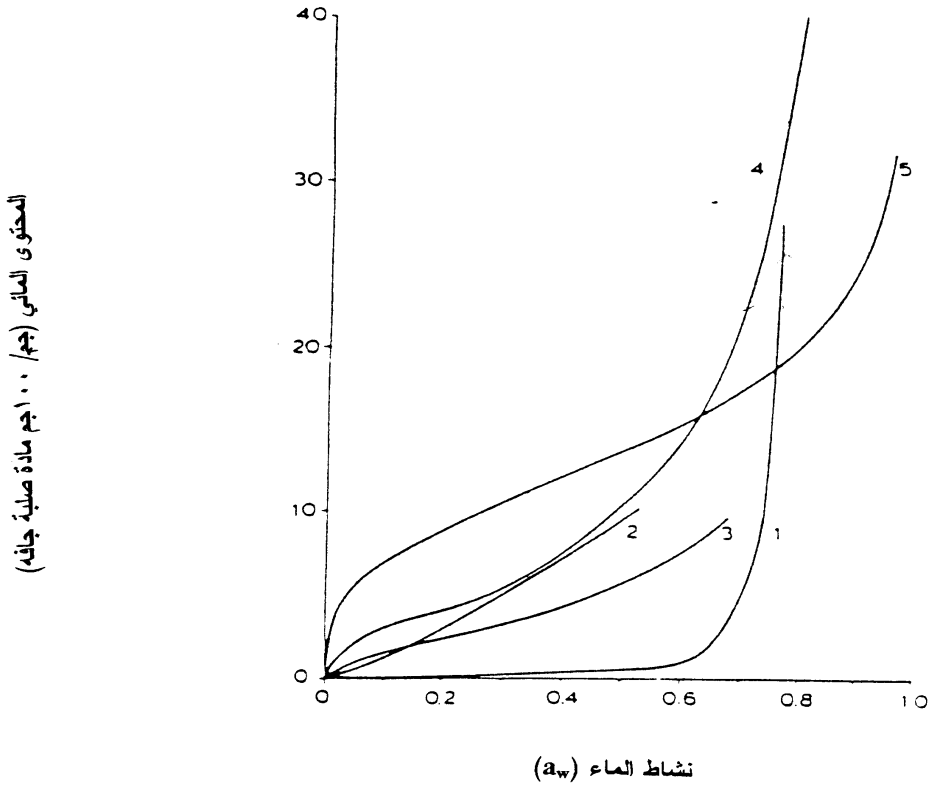
شكل (٢٨) مناطق منحنى الامتزاز الرطوبي للحبوب (Hygroscopic materials)

III - الماء الحر أو منطقة الأنبوبة الشعرية (Capillary absorption) والتي تشير إلى الماء المتواجد في مسامات (pores) المادة. يطلق على هذا الماء مسمى الماء الحر (Free water) وحتى يتم تخفيضه بصورة كبيرة إلى أقل من ٥٠٪ محتوى رطوبي على أساس رطب (M.C $_{w.b}$). ويسلك الماء الحر سلوكاً طبيعياً مشابهاً للماء النقي وتكون خواصه – مثل الضغط الجزئي – مساوية لتلك التي للماء النقي أو نسبة ١٠٠٪ للرطوبة النسبية للجو المحيط عند التوازن.

٢ -٦ -٦ منحنيات التحارر للإمتزاز والمج وظاهرة التخلف : Sorption – Desorption Isotherms

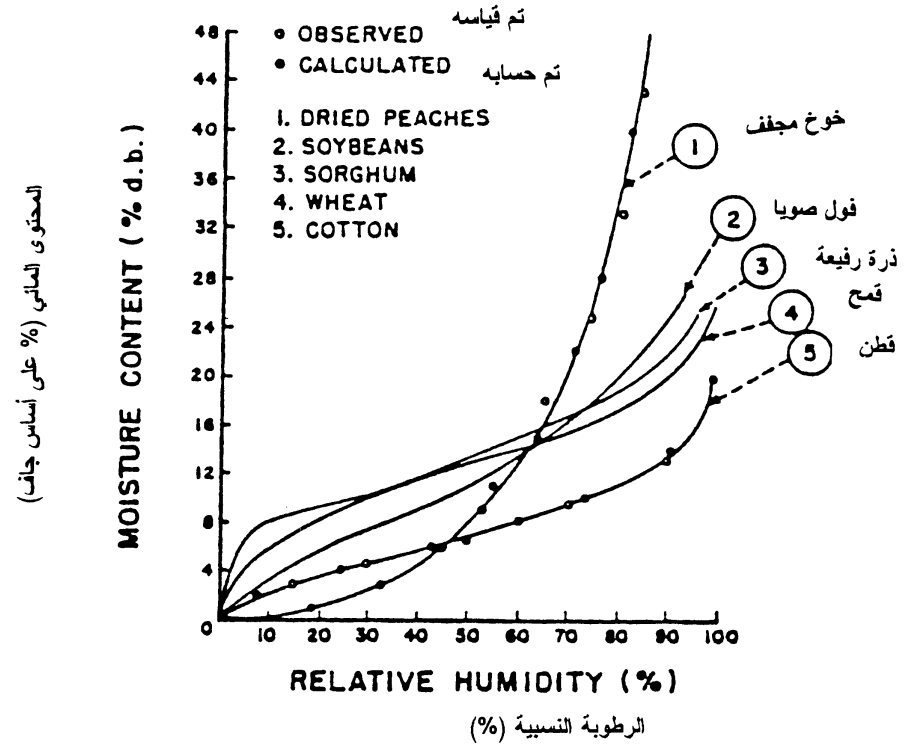
تسمى المنحنيات الناتجة عن رسم المحتوى الرطوبي عند التوازن (Equilibrium Moisture Content, EMC) لمادة ما كمتغير مع الرطوبة النسبية عند التوازن (ERH) (أي النشاط المائي) عند درجة حرارة ثابتة بمنحنيات الإمتزاز الرطوبي. الأشكال (٢٩) و (٣٠) توضح منحنيات التحارر للإمتزاز للعديد من المنتجات الزراعية ويلاحظ تباين منحنياتها. هذه المنحنيات يتم قياسها ورسمها والتعبير عنها بمعادلات كما سيأتي تفصيله. تتفاوت أشكال منحنيات الامتزاز الرطوبي للمنتجات

الغذائية وذلك حسب عدد من العوامل أهمها مكونات المنتج ونسبها ودرجة الحرارة وتركيبها البنائي.



شكل (٢٩): منحنيات التحارر لإعادة الامتصاص (Resorption Isotherms) لـ:

١.حلوى. ٢. مسحوق مستخلص خضر. ٣. قهوة محمصة. ٤. مسحوق حيواني. ٥. نشا الأرز.

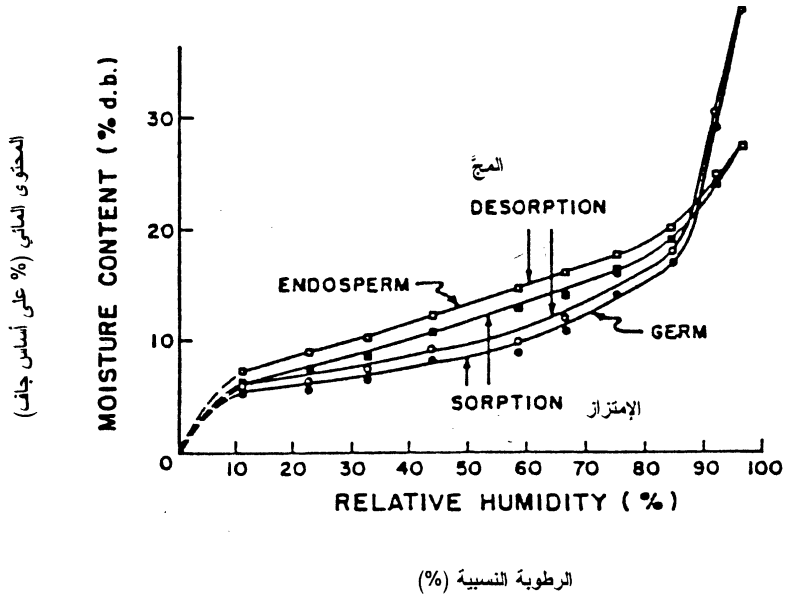


شكل (٣٠): منحنيات المحتوى الرطوبي عند التوازن لعدد من المنتجات الزراعية.

ظاهرة التخلف: (Hysteresis)

تتمثل ظاهرة التخلف في عدم تطابق منحنيى التجفيف (المج) مع منحنى الترطيب (الامتزاز) لمنتج غذائي. فمن الأسس التي تم إرساؤها وتوطيدها أن المواد الماصة للرطوبة (Hygroscopic materials) ينتج عنها منحنيات تحارر للإمتزاز أو المجّ لها شكل الحرف (S) (Segmoidal) وتظهر تخلفاً للإمتزاز (Sorption) أو المجّ (Desorption) اعتماداً على ما إذا كانت المادة قد تم ترطيبها (Wetted) أو تجفيفها (Dried) كما لبذرة الذرة الشامية في الشكل (٣١) عند ٧٤ °ف. في هذه المنحنيات وعند أي رطوبة نسبية محددة فإن المحتوى المائي الذي يتم الوصول إليه من حالة أكثر جفافاً تكون أقل من الحالة الأكثر رطوبة. أو بصيغة أخرى فإن كمية الماء الذي تحتفظ به هذه المواد لا يعتمد فقط على ضغط بخار الماء النسبي عند التوازن ولكنه كذلك يعتمد على الاتجاه الذي يتم منه الاقتراب للتوازن.

هناك عديد من التفسيرات المقترحة لظاهرة التخلف (hysteresis). ومن أكثرها قبولاً تلك التي تتعلق ببناء المواد السليولوزية. ويعتمد هذا التفسير على نظرية التغير في تواجد مواقع الأقطاب النشطة لارتباط جزيئات الماء. واستنادًا على هذه النظرية فإن المواقع القطبية في النسيج الجزيئي للمادة تصبح مكتفية بالماء الممتص. وعند التجفيف وبالتالي انكماش الأنسجة (Shrinkage) فإن الجزيئات ومواقعها الحاملة للماء تتقارب بصورة كبيرة إلى بعضها البعض للوصول لحالة الاكتفاء لكل منها. هذه الظاهرة تؤدي إلى تخفيض سعة المادة للامتصاص و نتيجة إلى عدم إمكانية إعادة الترطيب إلى مستوى الترطيب الأساسي عند أي ضغط نسبي للبخار فإن المادة توضح أن المحتوى الرطوبي للمادة على طول منحنى المج (desorption) (أي التجفيف) يكون اكبر مقارنة بذلك للامتزاز (adsorption) (أي الترطيب).



شكل (٣١): منحنيات الإمتزاز (الترطيب) والمجّ (التجفيف) للذرة الشامية

٢ -٦ -٧ طرق قياس النشاط المائي في المواد الغذائية:

١ - **طريقة كمية الماء غير المجمد:** (Unfreezable water). أثبتت البحوث التجريبية أن هناك دائماً كمية محددة من الماء المتواجد في الغذاء غير قابلة للتجمد فإذا تم تجميد عينات من المواد الغذائية ذات محتويات مائية مختلفة إلى درجات تقل كثيراً عن نقطة تجمد الماء (-٥٠°م وأقل) ثم تم تسخينها في جهاز تحليل حراري تفاضلي (Differential Thermal Analyzer [DTA]) فإن عدم وجود نقاط الذروة (Peaks) على مسجل قراءات جهاز التحليل الحراري التفاضلي يشير إلى وجود الماء الغير قابل للتجمد فقط. وعند التسخين فإن الحرارة الكامنة للانصهار تؤدي إلى ظهور نقاط للذروة والتي تدل بدورها على أن المحتوى المائي اكبر من مستوى الماء الغير قابل للتجمد. وبالتالي فإن استخدام عدد كافي من العينات وبمحتويات مائية مختلفة ستؤدي وبصورة دقيقة إلى إيجاد النقطة التي يكون فيها جميع الماء المتبقي غير مجمداً.

٢ - **قياس الرنين المغناطيسي النووي**([Nuclear magnetic resonance [NMR]).: تستخدم طريقة الرنين المغناطيسي النووي (NMR) بشكل روتيني لإيجاد حالة الماء في المواد الغذائية. قواعد هذه الطريقة يمكن تلخيصها في أن بروتونات الجزيئات في الحالة السائلة الناتجة عن الحركة العشوائية لهذه الجزيئات تتعرض لمحصلة حقل مغناطيسي نتيجة لوضعها على مغناطيس وبالتالي ستعطي إشارات كبيرة وحادة تمثل رنينها المغناطيسي النووي (NMR) نتيجة لامتصاصها طاقة إشعاعية على نفس مستوى التردد. أما بالنسبة للمواد الصلبة فإن تفاعلها التبادلي مع الذرات المجاورة تؤدي إلى تغير استجابة البروتونات وبالتالي فإن الامتصاصية لعديد من البروتونات تتشتت على نطاق ترددي واسع. وعليه فإن إشارات الرنين المغناطيسي النووي تصبح عريضة وضحلة وقد تكون مهملة مقارنة بتلك التي للسوائل.

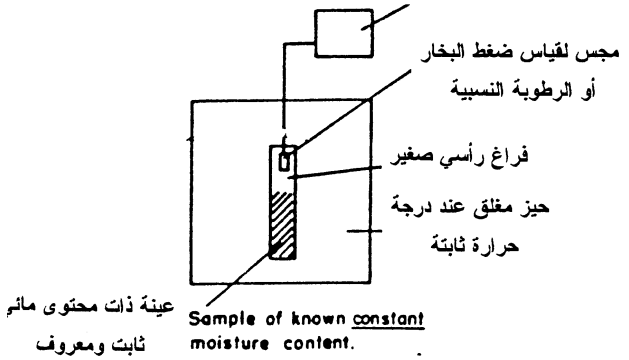
٣ - **قياس خواص العزل الكهربائي**(Dielectric properties): جزء من الماء الكلي في المواد الغذائية يعطي إشارات وسطية في خصائصها بين ماء السوائل وماء المواد الصلبة، وإذا كانت الكمية الكلية معلومة فإنه يمكن استخدام الرنين المغناطيسي النووي لتقدير كمية الماء المقيد. وتقدر كمية الماء المقيد في مكونات المواد الغذائية الماصة للماء (Hydrophilic food components) بحوالي ٠,١ إلى ٠,٣ جم ماء/ جم مادة صلبة. وبالإمكان أيضاً إيجاد كمية الماء المقيد في البروتينات والبوليمرات والمواد الغذائية بقياس خاصية العزل الكهربائي. وتعتمد خصائص العزل الكهربائي لجزيئات الماء على مدى حرية

حركة هذه الجزيئات نتيجة لاستجابتها للتغيرات في الحقل الكهربائي المسلط عليها. وينتج عن الماء المقيد خصائص متوسطة بين أقطاب الثلج الثائية المرتبطة بصلابة وجزيئات الماء السائل الأكثر حرية في حركتها. وتجدر الإشارة إلى صعوبة إيجاد كمية الماء المقيد بهذه الطريقة. ومن القيم التي نشرها بعض الباحثين كانت كمية الماء المقيد في البروتينات في الحدود ٠,٠٥ إلى ٠,١ جم ماء/ جم مواد صلبة وفي النشا في الحدود ٠,٣ إلى ٠,٤ جم ماء/ جم مواد صلبة.

٤ - **قياس الرطوبة النسبية للجو المحيط بالمواد الغذائية:** وهي من أكثر الطرق نجاحاً في دراسة النشاط المائي والتي تتضمن إيجاد منحنيات التحارر للإمتزاز (Sorption Isotherms)، والتي توضح العلاقة بين الضغط الجزئي للماء (الرطوبة النسيبة عند التوازن:٪) في الغذاء وبين المحتوى الرطوبي للغذاء عند درجة حرارة ثابتة. وكل هذه الطرق تعتمد على إيجاد النشاط المائي من قياس الرطوبة النسبية المتوازنة حول الغذاء. وهناك العديد من الطرق لقياس ضغط بخار الماء فيما يلي أهمها.

أ. **الخريطة السيكروميترية:** وذلك بقياس أي خاصيتين للهواء (مثل درجة الحرارة الجافة والرطبة) فيمكن من الخريطة تحديد الرطوبة النسبية للجو المحدد.

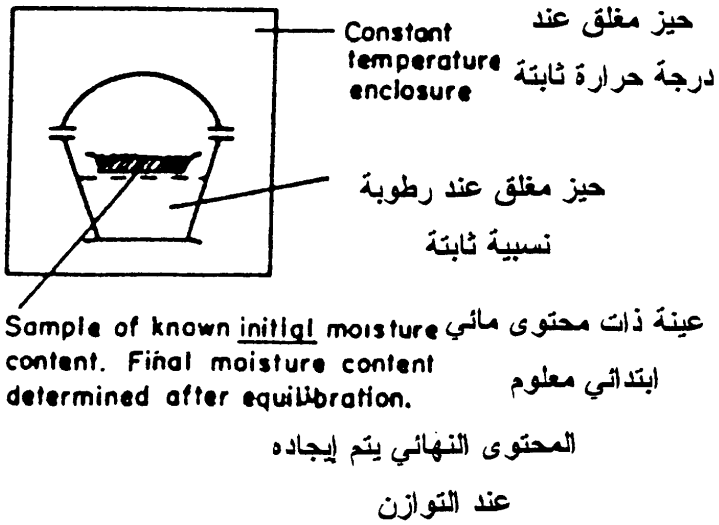
ب. **المرطاب** :في هذه الطريقة (شكل ٣٢) يسمح لمادة غذائية ذات محتوى مائي معلوم للوصول إلى التوازن مع فراغ رأس صغير (Head Space) في حيز مغلق بإحكام ومن



ثم قياس الرطوبة النسبية لها بواسطة حساس للرطوبة النسبية. وهناك عدة أنواع من مجسات الرطوبة النسبية منها المرطاب الكهربائي Electric Hygrometer وخلايا نقطة الندى Dew Point Cells والسيكروميترات الشعيرية Hair Psychrometers وخلافها. ولبعض الأنواع يمكن للجهاز تخزين البيانات ومن ثم تفريغها للحاسب الآلي فيما بعد.

ت. **جهاز تسريع التوازن**: هذا الجهاز المسمى (أكوا لاب Aqualab) يتم وضع العينة داخل حيز صغير (حجيرة) داخل الجهاز، حيث يعمل تدوير للهواء داخل الفجوات بين الغذاء حتى يتم التوصول إلى التوازن، أي ثبات قيمة الرطوبة النسبية. ومن ثم تسجيل هذه الرطوبة النسبية عند درجة الحرارة المحددة. ويمكن إجراء هذه التجربة عند درجات حرارة مختلفة وذلك باستخدام حمام مائي خارجي يتم إمرار الماء حول حجيرة الجهاز.

ث. **طريقة المحاليل الملحية لإيجاد منحنيات الامتزاز: وهي** الطريقة الأكثر شيوعاً للحصول على منحنيات الامتزاز الرطوبي. وتتم بتعريض عينة صغيرة من الغذاء لعدة أجواء ذات رطوبة نسبية ثابتة في أواني محكمة الغلق كما في شكل (٣٢)..



شكل (٣٢). رسم تخطيطي لتجهيزات طريقة المحاليل الملحية.

وتتكون تجهيزات هذه الطريقة من عينات الغذاء، أملاح مختارة، أوعية زجاجية ذات أغطية كبيرة محكمة الغلق وذات أطباق (صحون) مثقبة داخلها، أطباق بتري، ميزان دقيق.

وتتم طريقة الأملاح كالتالي:

١) تحضير أجواء الرطوبة النسبية المطلوبة (عادة من ٧ إلى ٩٧٪) وذلك بتحضير محاليل ملحية مناسبة تبعاً لذلك. وهناك عدد من المحاليل الملحية المشبعة متوافرة لهذا الغرض وجزء منها موضح في جدول (٤). المحاليل الملحية المشبعة لها فائدة الإبقاء على رطوبة نسبية ثابتة طالما كانت كمية الملح الموجودة فوق مستوى التشبع.

٢) تذويب كمية محسوبة من الأملاح في كمية محددة من الماء كما يوصى به في جدول (٦).

جدول (٦). ذوبانية بعض المحاليل الملحية لتوفير رطوبة نسبية ثابتة.

الملح	الذائبية التقريبية في الماء الساخن (جم/١٠٠مل)	الرطوبة النسبية الثابتة عند درجة حرارة الغرفة (٪)
بروميد الليثيوم	٢٤٠	٧
كلوريد الليثيوم	١٠٠	١١
أستيات البوتاسيوم	٥٠٠	٢٢
كلوريد الماغنسيوم	٣٠٠	٣٢
كربونات البوتاسيوم	١٥٠	٤٣
بروميد الصوديوم	١٢٠	٥٨
نترات الصوديوم	١٥٠	٦٥
كلوريد الصوديوم	٤٠	٧٥
كلوريد البوتاسيوم	٥٠	٨٥
كلوريد الباريوم	٥٠	٩٠
كبريتات البوتاسيوم	٢٠	٩٧

٣) صب هذه المحاليل الملحية في الأوعية الزجاجية وغلقها حتى الاتزان.

٤) وضع عينة الغذاء في طبق بتري ثم داخل الوعاء على الصحن المثقب.

٥) غلق الأوعية الزجاجية والانتظار عدة أيام حتى الوصول للاتزان.

٦) يتم تحديد ما إذا تم الوصول لمرحلة الاتزان بوزن عينات الغذاء دورياً حتى يتم ثبات وزنها.

٧) بعد الاتزان، يتم الانتهاء من التجربة بقياس كتل العينات الغذائية والمحتوى الرطوبي لها المقابل للرطوبة النسبية لكل محلول ملحي (أي النشاط المائي عند التوازن).

٨) بعد تسجيل هذه البيانات (الرطوبة النسبية المتوازنة ومقدار الفقد/الاكتساب الرطوبي من للعينة، يتم رسمها في منحنيات الإمتزاز (Isotherms) للغذاء عند درجة حرارة ثابتة.

منحنيات الامتزاز الرطوبي يمكن رسمها من بيانات المحتوى الرطوبي مع النشاط المائي (أو الرطوبة النسبية لهذه المحاليل عند التشبع). كما يمكن رسم هذه المنحنيات بطرق أخرى مثل استخدام جهاز (Aqualab) ولكن بإضافة كمية محسوبة من الماء أو التجفيف الجزئي للعينات وذلك للحصول على مدى واسع من النشاط المائي للعينة.

ج. **جهاز آلي لرسم منحنيات الامتزاز الرطوبي**. وهو جهاز حديث يتم توفير داخله أجواء مختلفة من الرطوبة النسبية ويتم قياس وزن العينة آلياً حتى الوصول لمرحلة الاتزان. ومن ثم قياس المحتوى الرطزبي ثم تسجيل هذه البيانات في الحاسب الآلي عبر برنامج خاص بالجهاز، وفي النهاية يقوم البرنامج بحساب ورسم منحنيات الامتزاز الرطوبي. وعادة يمكن الانتهاء من هذه التجربة في ساعات معدودة وعند درجات حرارة يمكن التحكم فيها أيضاً. إ

لا أن الجهاز مكلف مادياً (٢٠٠ إلى ٣٠٠ ألف ريال) ويسمى جهاز امتزاز البخار الديناميكي (الحركي) Dynamic Vapor Sorption وتنتجه الشركة الصانعة (Surface Measurement Systems, LTD, UK).

٢ -٦ -٨ المعادلات التي تعبر عن منحنيات الإمتزاز الرطوبي:

في الطرق السابقة تم قياس النشاط المائي (عن طريق قياس الرطوبة النسبية عند التوازن) عند محتويات رطوبية مختلفة. الخطوة التي تليها هي رسم منحنيات الامتزاز الرطوبي. وفي النهاية هناك حاجة للتعبير عن منحنيات الامتزاز الرطوبي على صيغة معادلات أو نماذج رياضية تجريبية للنشاط المائي بدلالة المحتوى الرطوبي وربما المكونات الأخرى ودرجة الحرارة. وهناك العشرات من المعادلات التي تحاول التعبير عن هذه المنحنيات والتي سيتم التطرق إلى أبرزها. ولكن في البداية سيتم التطرق أولاً إلى الأساس النظري للنشاط المائي للمحاليل المثالية والحقيقية.

(أ) النشاط المائي للمحاليل:

في المحاليل المثالية النشاط المائي يساوي الكسر المولي للماء أي

$$\mathbf{a_w} = \boldsymbol{x_w}$$

ويُعرّف قانون راوتز الكسر المولي ($\boldsymbol{x_w}$) بأنه:

$$x_w = \frac{moles\ \text{water}}{moles\ \text{water} + \text{Moles solute}} = \frac{x'_w/18}{x'_w/18 + x'_s/M_s}$$

وعند تحليل سلوك الإمتزاز لمخاليط الأغذية مثل بعض الحساء، مخاليط الكيك، وجبات الاستخدامات العسكرية متعددة المكونات يكون من المرغوب حساب منحنيات الإمتزاز للخليط لمكوناته المختلفة. وفي حالة العناصر عالية الجفاف مثل المواد الغذائية والزراعية المجففة، نجد أن حالة انخفاض نشاط الماء لا يسببها فقط تخفيض المذاب للضغط الجزئي وبالتالي المعادلات المعتمدة على هذا الافتراض مثل قانون راؤول (Raoult's Law). ولذلك وللمحاليل السكرية والجليسرول والسوربيتول لا يوصى باستخدام طريقة المخاليط المثالية حيث ينتج عنها انحراف للسلوك الإمتزازي. وحيث أن هذه المحاليل غير مثالية بسبب الترابط الفيزيائي وربما الكيميائي بين الماء والمذاب فإنه يمكن التعبير عن المحاليل الغير مثالية بالتالي:

$$\mathbf{a_w} = \gamma \quad x_w$$

حيث (γ) معامل النشاط.

للمحاليل السكرية اقترحت معادلة نوريش (Norrisg's Equation) عن تلك العلاقة كالتالي:

$$\log a_w/x_w = -k\,(1-x_w)^2$$

حيث k ثابت قيمه كالتالي:

سكروز	٢,٧	جلوكوز	٠,٧
فركتوز	٠,٧	سكر متحول	٠,٧
سوربيتول	٠,٨٥	جليسرول	٠,٣٨
ملح الطعام	بين ٧,٩ و ١٥,٨	حمض الستريك	٦,١٧
حمض اللاكتيك	١,٥٩-	حمض الماليك	١,٨٢

نموذج سالوين وسلاوسون (Salwin & Slawson)

استخدم الباحثين طريقة بيانية تقريبية لتقريب أجزاء من منحنيات التحارر للإمتزاز للمكونات كخطوط مستقيمة كما هو موضح في شكل (٣٣) وبالتالي تم تقدير نشاط الماء للخليط باستخدام المعادلة أدناه:

$$a_w = \frac{a_1 s_1 w_1 + a_2 s_2 w_2 + \ldots\ldots + a_n s_n w_n}{s_1 w_1 + s_2 w_2 + \ldots\ldots + s_n w_n}$$

حيث:

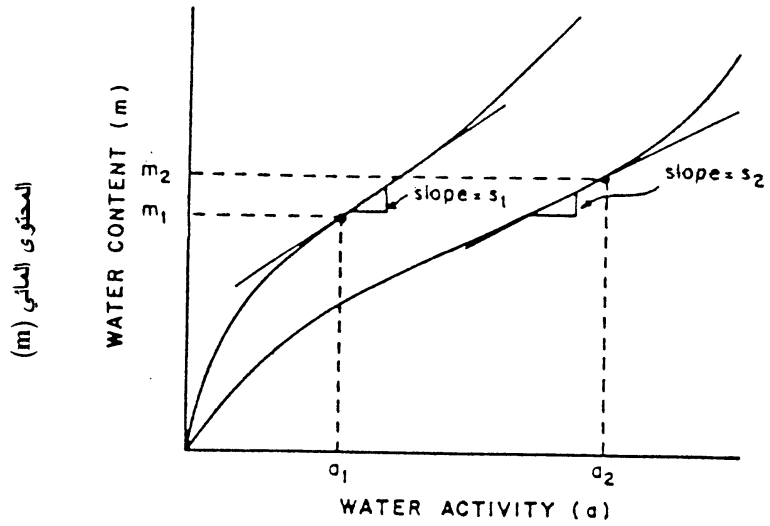
$a_1 \ldots a_n$ قيم نشاط الماء للمكونات في الخليط.

$s_1 \ldots s_n$ قيم الميل للمكونات من منحنيات التحارر للإمتزاز

$w1 \ldots wn$ أوزان المواد الصلبة للمكونات.

a_w القيمة التقريبية لنشاط الماء للخليط في حالة التوازن.

وفي حالة الرغبة في الحصول على قيم اكثر دقة يتعين تقريب منحنيات التحارر للإمتزاز بمعادلات غير خطية.



شكل (٣٣). علاقات الامتزاز الرطوبي لعدد من المكونات المستخدمة في حساب النشاط المائي للمخاليط.

(ب) النشاط المائي للأغذية والمنتجات ذات المحتوى الرطوبي المنخفض:

وهي معادلات تجريبية تم تطويرها من قبل عدد من الباحثين لتلائم بعض المنتجات الغذائية وعند ظروف محددة من درجة حرارة وغيرها. فقد أدت الجهود العديدة للتعبير عن عملية الإمتزاز

رياضياً إلى عدد من المعادلات التجريبية (Empirical equations) والمعادلات المشتقة (Derived equations)، ومنها:

(١) معادلة هندرسون وبيري (Henderson & Perry)

أحد المعادلات التقليدية المستخدمة لتقدير النشاط المائي بدلالة المحتوى الرطوبي ودرجة الحرارة ونوع المنتج، والتي تم اشتقاقها بواسطة هندرسون وبيري عام ١٩٦٦م:

$$a_w = 1 - e^{(-k\,T\,M_e^n)}$$

حيث:

a_w = النشاط المائي.

T = درجة الحرارة المطلقة، °R

M_e = المحتوى الرطوبي عند التوازن على أساس جاف $(M.C.)_{d.b}$ %

n , k = ثوابت معطاة في الجدول التالي:

المادة	K	n
ذرة شامية	١,١٠ × ١٠ $^{-٥}$	١,٩٠
ذرة رفيعة	٣,٤٠ × ١٠ $^{-٦}$	٢,٣١
فول صويا	٣,٢٠ × ١٠ $^{-٥}$	١,٥٢
قمح	٥,٥٩ × ١٠ $^{-٧}$	٣,٠٣

مثال: صندوق محكم القفل مليء بفول صويا (Soybeans) محتواه الرطوبي ٢٠٪ على أساس رطب. قدر النشاط المائي (والذي يمثله الرطوبة النسبية للهواء المتواجد في الفراغات بين حبوب فول الصويا) إذا كانت درجة حرارة فول الصويا في الصندوق تساوي ٩٠°ف.

الحل:

من الجدول أعلاه ولفول الصويا:

$k = 3.2 \times 10^{-5}$, $n = 1.52$ $T = 60 + 460 = 520$ °R

$M.C._{wbe} = 20\%$

$= m_w/(m_w + m_d) = 0.20$

$MC_{dbe} = m_w/m_d$

$= 25\%$

وبالتعويض في معادلة هندرسون وبيري:

$$a_w = 1 - e^{-3.2 \times 10^{-5} \times (520) \times (25)^{1.5}}$$

$$a_w = 0.89$$

(٢) معادلة B.E.T.

وهي معادلة تم تطويرها من قبل الباحثين برونر وإميت وتيلر (Brunaur, Emmet, and Teller) والمشهورة بمعادلة B.E.T لعدد (n) من الطبقات الجزيئية للماء الممتز ويمكن أن تعبر عن الطبقة الجافة من المنتج الغذائي. الصيغة الشائعة للتعبير عن معادلة B.E.T لإمتزاز الطبقة الجزيئية الأحادية بدلالة نشاط الماء (a_w) هي كما يلي:

$$\frac{a_w}{M(1-a_w)} = \frac{1}{M_o C} + \frac{(C-1)a_w}{M_o C}$$

حيث:

M = المحتوى الرطوبي عند نشاط مائي معطى (a_w).

M_o = قيمة المحتوى الرطوبي في الطبقة الإحادية.

C = ثابت يعتمد على درجة الحرارة وطاقة الإمتزاز وثوابت أخرى.

فمن شكل (٣٤) وعند رسم المقدار $\frac{a_w}{M(1-a_w)}$ كمتغير مقابل النشاط المائي a_w وعند الحصول على خط مستقيم، فإن قيمة المحتوى الرطوبي للطبقة الأحادية (M_o) يتم الحصول عليها من ميل الخط (Slope) والقاطع (الجزء المحصور Intertcept)، وقيمة (M_o) هي في العادة المحتوى الرطوبي الذي يكون فيه الماء مقيداً بشدة بحيث يتعذر عليه المشاركة كمذيب. وبالتالي فإن (m_o) هي المحتوى الرطوبي لأقصى ثبات في الأغذية المجففة.

مثال ١:

الشكل التالي يوضح رسم B.E.T لبلورات برتقال مجففة عند درجة حرارة ٢٥°م. اوجد قيمة الطبقة الأحادية لهذا المنتج الغذائي.

الحل:

من الشكل، تقاطع المنحنى مع المحور الصادي $1/M_0C$ والميل $(C-1)/M_oC$:

$$M_o\, C = \frac{1}{0.022} = 45.45$$

ومن الميل:

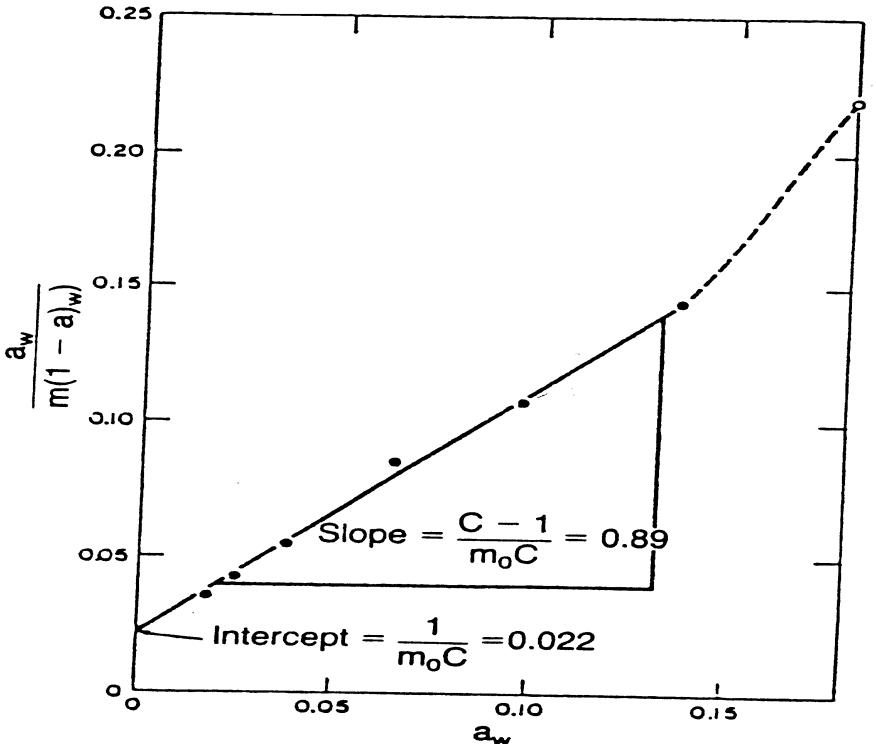
$$C - 1 = 0.89\, M_o\, C$$

وبحل المعادلتين السابقتين نحصل على:

$$C = 41.45$$

وبالتالي:

$$M_o = \frac{45.45}{41.45} = 1.1 (g\, H_2\, O/g\, solid)$$



شكل (٣٤). رسم B.E.T لبلورات برتقال مجففة عند ٢٥ °م.

مثال ٢:

تمت تجربة لقياس النشاط المائي عند محتويات رطوبية مختلفة، وكانت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها للحم بقر مجفد مفروم ومسبق الطبخ عند درجة حرارة ١٠°م في الجدول التالي. أوجد قيمة المحتوى المائي للطبقة الأحادية M_o والثابت C باستخدام معادلة B.E.T.

$\frac{a_w}{m(1-a_w)}$	a_w	m (d.b)
	0.0	0.0
	0.01	0.011
	0.02	0.019
	0.03	0.027
	0.04	0.041
	0.10	0.077
	0.15	0.093
	0.20	0.106
	0.30	0.121
	0.40	0.137

الحل:

بما أن معادلة B.E.T تمثل معادلة خط مستقيم فإن حساب $\frac{a_w}{M(1-a_w)}$ في العمود الثالث للجدول السابق و رسمه ضد a_w (مشابه للرسم في المثال السابق) نتج عنها بالتقريب خطاً مستقيماً ميله وتقاطعه (الشكل غير مرسوم هنا) كما يلي:

(الميل) $$\text{Slope} = \frac{(C-1)}{M_o\, C} = 8.7$$

(التقاطع) $$\text{Intercept} = \frac{1}{M_o\, C} = 0.7$$

ومن العلاقات أعلاه (معادلتين ومجهولين) نحصل على:

$$C = 13.4 \text{ , } Mo = 0.1066 \text{ g H2 O/g solid}$$

** يلاحظ أن معادلة B.E.T السابقة تم اشتقاقها من ما يلي:

$$V = \frac{V_m\, C\left(\frac{P}{P^o}\right) - (n+1)\left(\frac{P}{P^o}\right)^n + \left(\frac{P}{P^o}\right)^{n+1}}{1 - \left(\frac{P}{P^o}\right) + (C-1)\left(\frac{P}{P^o}\right) - C\left(\frac{P}{P^o}\right)^{n+1}}$$

حيث:

V = حجم الغاز أو البخار الممتز عند ضغط بخار يساوي P لكل وحدة وزن للمادة التي تمتز بخار الماء عندما يكون ضغط التشبع مساوياً P^o

V_m = ثابت يمثل الحجم الذي تم إمتزازه عند بداية تكون الطبقة الجزيئية الأحادية

C = ثابت يعتمد على حرارة الإمتزاز (Heat of adsorption)، E_a وحرارة التكثيف (Heat of condensation) E_c، ودرجة الحرارة المطلقة T وثابت الغاز العام R بحيث تكون العلاقة:

$$C = e^{\left(-\frac{(E_a - E_c)}{RT}\right)}$$

في حالة استبدال الحجم (V) بوزن بخار الماء الذي تم إمتزازه (adsorpate) (W) لكل وحدة وزن من المادة الممتزة لبخار الماء، واستخدامها في المعادلة، فإن الحجم (V_m) تم استبداله كذلك بالوزن (W_m) لكل وحدة وزن من المادة الممتزة لبخار الماء. وفي حالة منحنيات التحارر للإمتزاز ذات النوع (S) (Sigmoidal type) فإن الحجم (V_m) أو الوزن (W_m) سيشير إلى اكتمال الطبقة الجزيئية الأحادية والتي تحدث قريبة جداً من نقطة الانقلاب في منحنى الإمتزاز. وعندما تكون (n = 1) فإن معادلة B.E.T ؛ التعبير الرياضي لحالة إمتزاز الطبقة الجزيئية الأحادية. وعندما تكون ($n = \infty$) فإن المعادلة تمثل حالة الإمتزاز للطبقة عديدة الجزيئات (Multimolecular layer adsorption). وفي النهاية نحصل على المعادلة العامة التي سبق التطرق لها والتي يمكن استخدامها فقط للطبقة الأحادية وجزء من المتعدد الطبقات.

(٤) معادلة G.A.B.

تم تطوير هذه المعادلة من قبل الباحثين Guggenhamhein-Anderson-de-Boer والمعروفة بمعادلة G.A.B. وتتميز عن معادلة B.E.T. بأنه يمكن تطبيقها على مدى واسع من المحتوى الرطوبي، وهي من أشهر المعادلات التي تنطبق على العديد من المنتجات الحيوية، وصيغتها:

$$M = \frac{M_0 C k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)}$$

حيث تزيد الثوابت عن معادلة BET بالثابت الثالث (k) والذي يزيد من مدى المحتوى الرطوبي للمنتج. ومن الصعوبة إيجاد الثوابت الثلاثة في المعادلة بطريقة تقليدية كما في BET. ولذلك يتم استخدام برامج احترافية غير خطية لحل المعادلة مثل برنامج Matlab و غيره.

(٥) معادلات أخرى:

هناك العديد من النماذج الأخرى للتعبير عن النشاط المائي للمنتجات الحيوية. الجدول أدناه يحوي بعض المعادلات الرياضية التي تستخدم للتعبير عن منحنيات التحارر للإمتزاز للمواد الغذائية والزراعية.

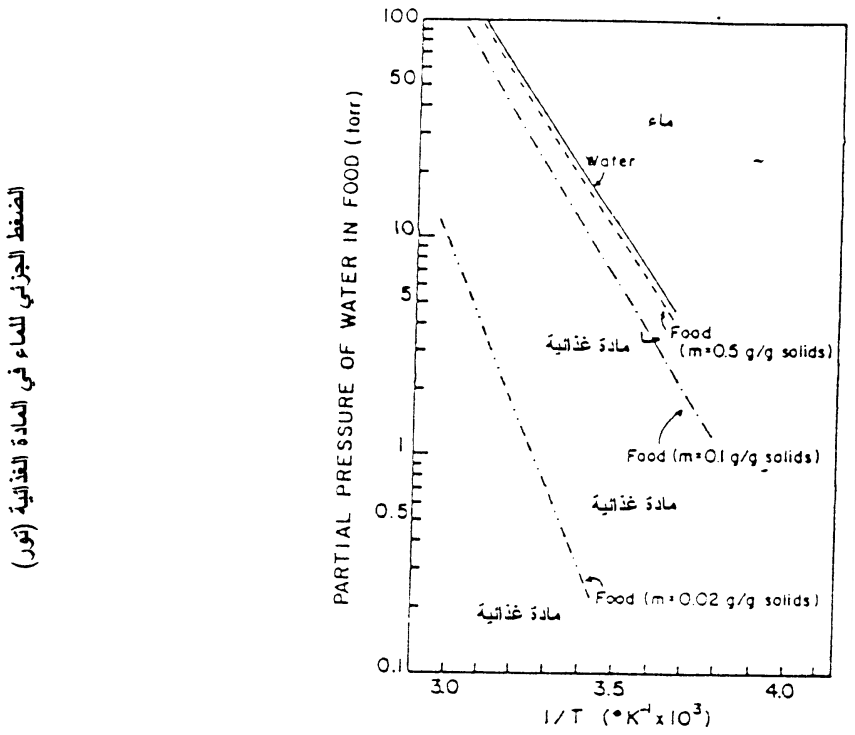
م	اسم المعادلة	صيغتها
١	هندرسون Henderson	$(1-a)=e^{-cm^n}$
٢	فوجاسي Fugassi	$m=\frac{c\,a}{(ca)\,(1-a)+ca}$
٣	كوهن Kuhn	$m=\frac{c_1}{(\ln a)^n}+C_2$
٤	أوسوين Oswin	$m=C\left(\frac{a_a}{1-a_a}\right)^n$
٥	ميزراهي Mizrahi	$a_a=\frac{C_1+m}{C_2+m}$
٦	تمازز خطي Linear Isotherm	$m=C_1\,a_a+C_2$

a_a = Water Activity; m = Water content; C = constant; n = exponent. b

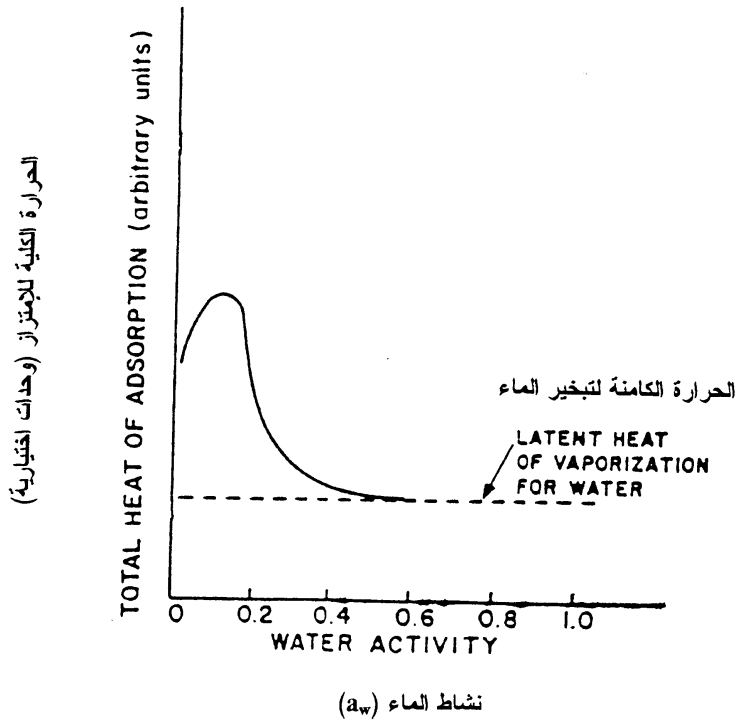
٢ -٦ -٩ طاقة الارتباط للماء وتأثير درجة الحرارة Energy of Binding of Water

بإيجاد منحنيات التحارر للإمتزاز عند درجات حرارة مختلفة يمكننا إيجاد المنحنيات التي توضح العلاقة بين درجة الحرارة والضغط الجزئي للماء أو نشاط الماء عند مستويات مائية ثابتة (isosteres). وعند رسم اللوغاريتم العشري لنشاط الماء عند محتوى مائي محدد ضد مقلوب درجة الحرارة المطلقة فإن ميل الخط المستقيم الناتج يساوي ($\Delta H_A/R$)، حيث ΔH_A هي حرارة الإمتزاز (heat of adsorption) فوق وبعد الحرارة الكامنة للتبخير (Latent heat of vaporization) للماء العادي الغير ممتز و R هي ثابت الغاز العام. وفي الجانب الآخر إذا تم رسم اللوغاريتم العشري للضغط الجزئي للماء على المحور العمودي ومقلوب درجة الحرارة المطلقة على المحور الأفقي فإن ميل الخط المستقيم الناتج يساوي $\Delta H/R$، حيث ΔH هي مجموع الحرارة الكامنة للتبخير وحرارة الإمتزاز.

الشكل (٣٥) التالي يوضح رسماً نموذجياً للعلاقة الشبه لوغاريتمية للضغط الجزئي للماء ومقلوب درجة الحرارة المطلقة، ومنه يمكن حساب قيمة ΔH. أما الشكل (٣٦) فإنه يوضح اعتماد ΔH على نشاط الماء. وفي الغالب تحدث طاقة الارتباط عند قيمة المحتوى المائي للطبقة الأحادية (B.E.T).



شكل (٣٥) رسم للضغط الجزئي للماء ضد مقلوب الحرارة المطلقة.



شكل (٣٦) الاعتماد النموذجي للحرارة الكلية للإمتزاز على نشاط الماء

الجدول التالي يوضح قيم المحتوى المائي للطبقة الأحادية (B.E.T) وقيم الحرارة الكلية للإمتزاز (ΔH) لمواد ومكونات غذائية مختارة.

المادة	قيمة الطبقة الأحادية (B.E.T) بالتقريب	الحرارة الكلية للإمتزاز ΔH (Kcal/mole)
نشا	٠,١١	١٤
حمض البولي فلاكتورونيك	٠,٠٤	٢٠
جيلاتين	٠,١١	١٢
لاكتوز، مسامي	٠,٠٦	١١,٦
ديكستران	٠,٠٩	١٢
رقائق بطاطس	٠,٠٥	
مسحوق حليب كامل الدسم	٠,٠٣	
لحم بقر مجفد	٠,٠٤	١٢

تأثير درجة الحرارة على نشاط الماء

عند تغير درجة الحرارة تتغير إثارة الجزيئات وبالتالي مدى شدة الجذب بينها. ولقد استخدم كثير من الباحثين الصيغة التكاملية لمعادلة كلوسياس وكلابيرون (Clausius – Clapeyron) لتوضيح تأثير درجة الحرارة على نشاط الماء كما هو مبين أدناه:

$$\ln\left(\frac{a_{w1}}{a_{w2}}\right)=\frac{\Delta H_B}{R}\left[\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right]$$

حيث:

a_{w1} = نشاط الماء عند درجة الحرارة المطلقة T_1

a_{w2} = نشاط الماء عند درجة الحرارة المطلقة T_2

ΔH_B= طاقة الارتباط للإمتزاز (kJ/kg mole.°k)

R = ثابت الغاز العام (8.314 kJ/kg.mole °k).

ولقد وجد أنه لعديد من المواد يزداد نشاط الماء بازدياد درجة الحرارة. وفي حدود درجات حرارة الجو وجد أن التغير في نشاط الماء لكل درجة مئوية للمحاليل السكرية العادية يكون بالتقريب في حدود ٠,٠٠٠١ ولبعض حبوب الغلال حوالي ٠,٠٠٢٣ .

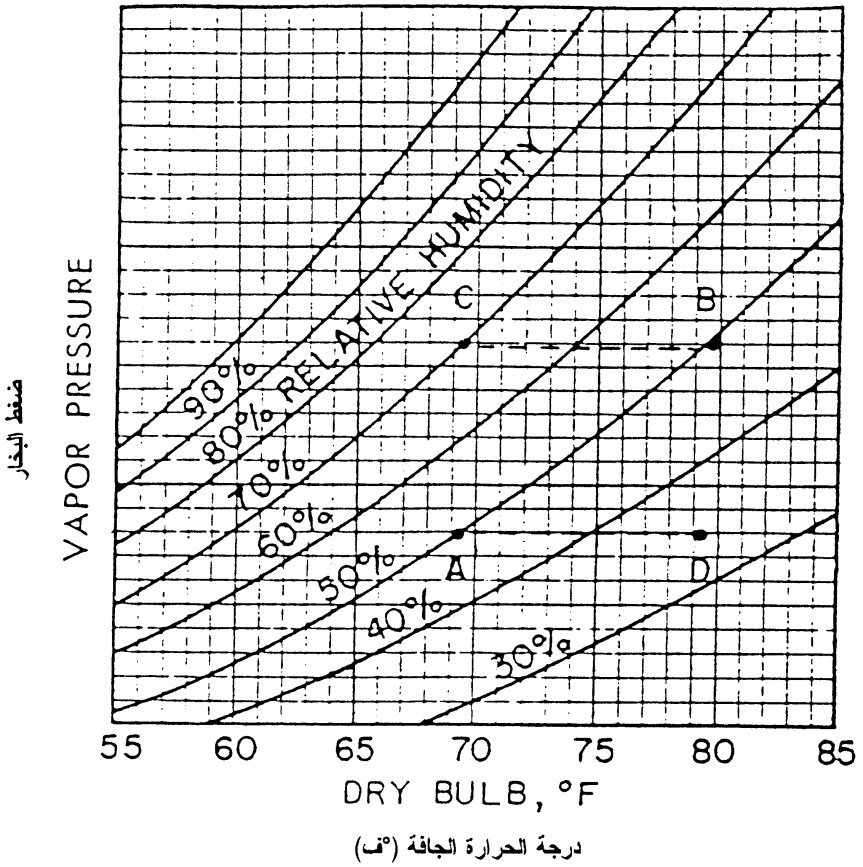
نشاط الماء عند درجات الحرارة التي تقع تحت مستوى التجمد يعطى كنسبة لضغط بخار الثلج إلى ضغط بخار الماء فائق التبريد (Super cooled, P_{ws}) عند درجة حرارة النظام:

$$a_w = \frac{P_{ice}}{P_{ws}}$$

فعلى سبيل المثال عند درجة الحرارة (-١٨°م) وجد أن نشاط الماء لنظام مائي يساوي ٠,٨٣.

٢ -٦ -١٠ التحكم في المحتوى المائي للمواد الزراعية والغذائية (اعتبارات سيكروميترية):

إذا تم التعامل مع مادة رطوبتها النسبية عند التوازن (ERH) ٥٠٪ عند درجة حرارة ٧٠°ف ممثلة بالنقطة A في شكل (٣٧) أدناه:



شكل (٣٧) العلاقة بين ضغط البخار، ودرجة الحرارة الجافة والرطوبة النسبية عند التوازن.

وبافتراض أن درجة حرارة الهواء والمادة يظلان عند ٨٠°ف و ٧٠°ف على الترتيب. فإن المادة تحت ظروف درجة الحرارة ٨٠°ف سيكون لها ضغط جزئي أعلى وبالتالي يجب أن يحدث انتقال لبعض البخار. وإذا كانت كتلة الهواء كبيرة جداً مقارنة بالمادة فإن الهواء لن يتغير بينما ستصل المادة إلى توازن عند ضغط بخار أعلى مماثل لضغط بخار الهواء وينتج عن ذلك رطوبة نسبية تساوي ٧٠٪ بالتقريب ودرجة حرارة تساوي ٧٠°ف ممثلتين بالنقطةC في شكل(٣٨).

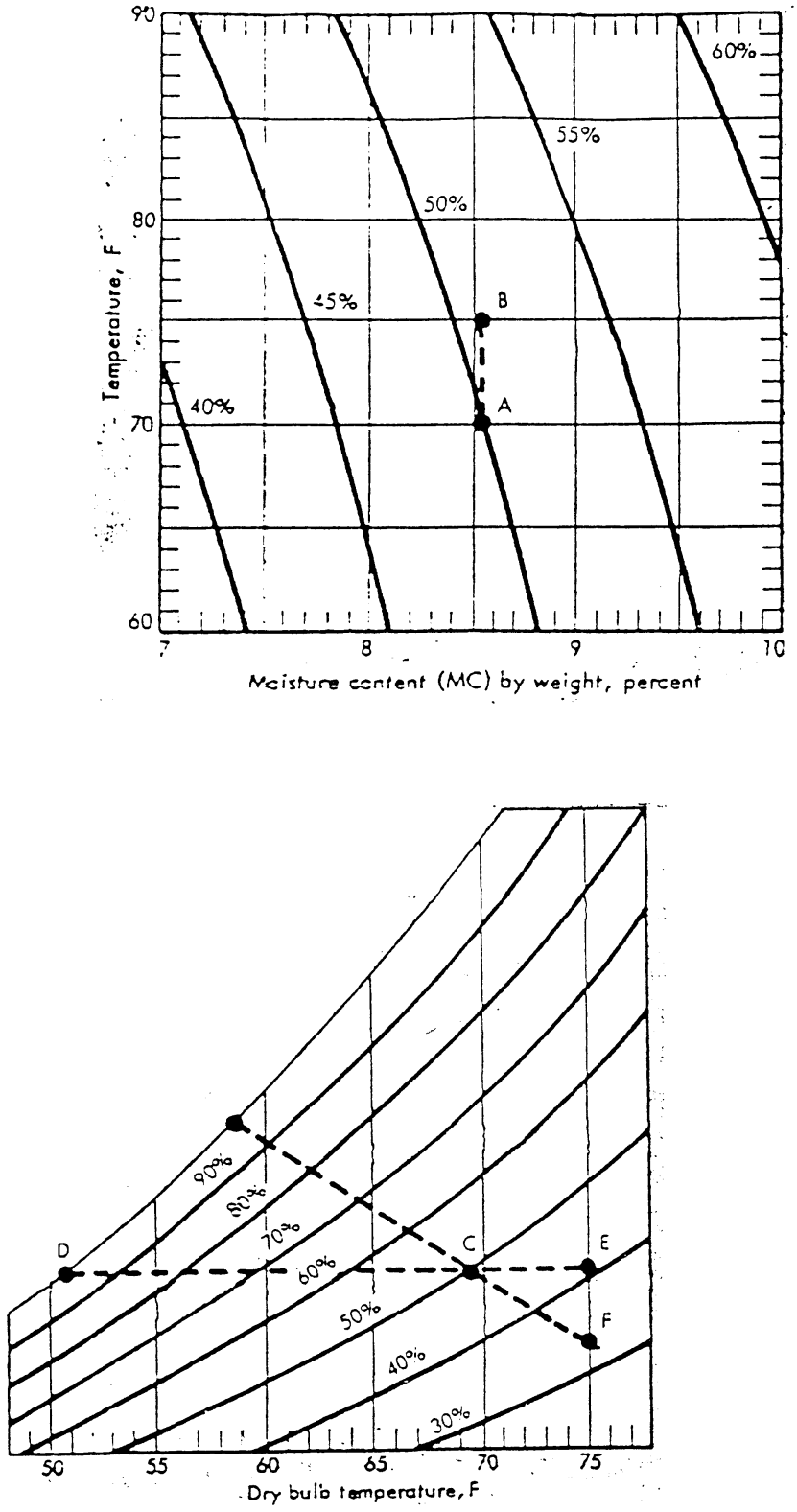
وفي الحالة التي تكون فيها المادة هي ذات الكتلة الكبر فإن الهواء قد يفقد بخار ماء ليوازن الضغط الجزئي الأقل للمادة وبالتالي نتحصل على ظروف تكون فيها الرطوبة النسبية مساوية ٣٦٪ بالتقريب عند درجة حرارة هواء تساوي ٨٠°ف كما هو ممثل بالنقطة D في شكل (٣٨). الرطوبة النسبية ستصبح ٣٥٪ وسينتج عن ذلك محتوى مائي للمادة يساوي بالتقريب ٦,٣٪ ، أي فقد يعادل ٢,٢٪ من ٨,٥٪.

أما إذا تم الحفاظ على ثبات الرطوبة النسبية فإن تسخين المادة إلى النقطة B سيؤدي للحصول على محتوى مائي يساوي تقريباً ٨,٣٪ أي فقد يعادل ٠,٢٪ فقط من المحتوى المائي المطلوب. وهكذا يتضح مدى مساعدة الاعتبارات السيكروميترية في التنبؤ بالطريقة الأكثر تأثيراً في استخدامها لإنجاز التحكم.

وفي مثال آخر لنعتبر النقطة A عند درجة حرارة ٧٠°ف ومحتوى رطوبي ٨,٥٪ ومحتوى رطوبي عند التوازن (ERH) يساوي ٥٠٪ كما هو موضح في الشكل (٣٨).

إذا تم تسخين المنتج والفراغ إلى درجة حرارة ٧٥°ف دون اكتساب أو فقد للماء بواسطة المنتج (النقطة B)، فإن ظروف التوازن ستصبح مساوية ٥١٪ رطوبة نسبية عند التوازن. وإذا تم رسم هذه الظروف في الخريطة السيكروميترية كما هو موضح في الشكل (٣٨) فإنه في حالة تسخين الهواء إلى درجة حرارة ٧٥°ف دون اكتساب أو فقد للماء (ليس هناك تغير في نقطة الندى) فإن الرطوبة النسبية الناتجة ستساوي حوالي ٤٢٪ ممثلة بالنقطةE بدلاً عن الرطوبة النسبية المطلوبة أي ٥١٪. وينتج عن ذلك منتج محتواه المائي يساوي ٧,٣٪ أو ١,٢٪ أقل من ٨,٥٪. وفي حالة تثبيت درجة الحرارة الرطبة عند ارتفاع درجة الحرارة إلى ٧٥°ف (النقطة E).

وللتنبؤ بالظروف النهائية للمادة يصبح ضرورياً توطيد العلاقة بين درجة الحرارة والرطوبة النسبية عند التوازن (a_w) لكل مادة على حدة.



شكل (٣٨) [أعلى] المحتوى المائي ضد درجة الحرارة والرطوبة النسبية لمادة ماصة.
[أسفل] ظروف أعلى مرسومة على خريطة سيكروميترية.

مثال:

مطحن للأرز في منطقة ساحل الخليج الرطب حيث درجة الحرارة تساوي ٨٠°ف والرطوبة النسبية تساوي ٦٠٪ يسعى للحصول على أسواق للتوزيع في مناخ أريزونا الجاف عند درجة حرارة ٩٠°ف ورطوبة نسبية تعادل ٣٥٪. يتم تعبئة الأرز في عبوات باستخدام خط التعبئة والتغليف في المطحنة. المحتوى المائي للأرز المعبأ يساوي ١٢,٦٥٪ (على أساس رطب). ما هي النسبة المئوية للزيادة اللازمة في ملء العبوة بغرض المحافظة على وزن ٥٠٠ جرام من الأرز في كل عبوة في أريزونا. افترض أن المحتوى الرطوبي عند التوازن للأرز في أريزونا تساوي ٩,١٪ (على أساس رطب).

الحل:

افرض X تساوي مجموع المواد الصلبة الكلية والمحتوى المائي للأرز في المطحنة، وافرض أن DM تساوي المواد الصلبة الكلية.

في المطحنة:

$$X = DM + 0.1265$$

في أريزونا:

$$500 = DM + 0.091 \times 500$$
$$Dm = 454.5 \text{ (gm)}$$

في المطحنة:

$$X = 454.5 + 0.1265\ X$$
$$X = 520.32 \text{ (gm)}$$

النسبة المئوية للزيادة اللازمة عند ملء العبوة تساوي

$$\frac{(520.32 - 500)}{500} \times 100\,\% = 4\,\%$$

((هنا انتهى –بحمد الله -الجزء الأول من مذكرة ٣٤١ هزر، ، في ١٤٢٨/٤/٧هـ))