

نمذجة إنتاج الفواكه والخضراوات :

الطماطم كمثال

Modelling fruit and vegetable production: the case of tomatoes

سي. جاري و إم تكاميتشيان، المعهد الوطني دي لا ريشايرشاي اجرونوميكوى (آي إن آر أ) افيجانون.

C. Gary and M. Tchamitchian, Institut National de la recherche agronomique (INRA), Avignon

(١, ٥) مقدمة: أهمية النمذجة من أجل الجودة

Introduction: the Importance of Modeling in Quality

الطماطم محصول شعبي ويمكن استهلاك الطماطم طازجة أو كمكون رئيس في مدى واسع من المنتجات المصنعة. ويولد هذان المكونان الرئيسان للإمداد منظومات مختلفة لمتطلبات الجودة (quality requirements). واختصاراً، يتطلب أو يهتم سوق الطماطم الطازجة بالمظهر البصري (visual appearance) وفترة الصلاحية (فترة بقاء الطماطم صالحة للاستهلاك (shelf-life duration)، بينما تعطي الصناعة وعملياتها أهمية وقيمة أكبر لتركيب وتركيز المادة الجافة (dry matter concentration). وفي الحالتين على المنتجين السيطرة على عمليات التصنيع والتحكم فيها لتحقيق المواصفات والمقاييس التي يحددها المستهلكون.

في هذا الاستعراض المرجعي، اختير تعريف واسع الشمول وبدرجة معقولة، لجودة إنتاج الطماطم، ويتضمن هذا التعريف الخصائص الحسية للفاكهة (المظهر

والمذاق (appearance & taste)) والقيمة التغذوية والصحية لها (وجود عناصر تغذوية قيمة والخلو من الكيماويات والسموم) والتأثيرات البيئية لأنظمة الزراعة. وقد تم تشكيل كثير من العمليات الفيزيائية والحيوية المتضمنة في إنتاج الطماطم، بطرق رسمية، وذلك من أجل تحقيق تماثل (محاكاة) (carry out simulations)) واقتراح توقعات (تنبؤات) أو ضبط الإدارة المثلى (optimize management) (3)، ولكن مازال هناك الكثير الذي ينتظر (الإنجاز) فيما يتعلق بالتماثل وإدارة الجودة.

في الحقيقة، كانت مجهودات النمذجة متناسبة مع القدرة على السيطرة على أنظمة الزراعة، أي أنها كانت مجهودات أكبر في إنتاج البيوت المحمية (green house) مقارنة بما في الإنتاج الحقل (field production). في إنتاج البيوت المحمية، تركزت النمذجة على توقعات (تنبؤات) الناتج من المحصول (9) وضبط المناخ (optimization of climate) والتسميد من خلال نظام الري وضبط وتقييم إستراتيجيات إدارة المحصول. أما في الإنتاج الحقل، فقد تم الاهتمام أكثر بتوقعات مواعيد الحصاد (تواريخ الحصاد) (prediction of harvest dates)) وتقدير متطلبات الماء والعناصر الغذائية.

في هذا الفصل، ستتم مراجعة واستعراض عمليات إنتاج الطماطم (processes of tomato production) وأماكن تطبيق النماذج المختلفة (areas of application of models) والاتجاهات المستقبلية لنمذجة إنتاج الطماطم وجودتها.

(٥, ٢) أنواع إنتاج الطماطم

Types of Tomato Production

قاد الاستخدام المزدوج للطماطم إلى نظامين أساسيين لزراعتها، أحدهما تحت غطاء (under cover) والآخر في الحقل. الزراعة المحمية (protected cultivation) مخصصة للإنتاج للسوق الطازج (fresh market). إن الأساس المنطقي ومعقولية ذلك هو زيادة الإنتاج (rational of tomato is gain in productivity) ويمكن تحقيق هذا الهدف من خلال

تطبيق الأغشية الشفافة (transparent cover) التي تقلل من فواقد الحرارة عن طريق الحمل والإشعاع (convective and radiative heat losses) ^(٤) وترفع درجة حرارة المحصول (crop temperature). يمكن زيادة الإنتاج بتمديد فترته وبتقليل العوامل المعوقة، وذلك من خلال السيطرة الجيدة على البيئة الفيزيائية والحيوية للمحاصيل. وقد يحتوي البيت المحمي على مختلف أنواع المعدات التي تضبط البيئة داخله ^(٥). ويمكن رفع درجة الحرارة بالتسخين، على سبيل المثال، بإشعال الغاز الطبيعي (burning of natural gas) أو إشعال الزيت أو الفحم (coal) أو باستخدام الستائر الحرارية (thermal screens) أثناء الليل. ويمكن خفض درجة الحرارة بالتهوية الطبيعية (vents) أو التهوية بالمرآح القوية (forced (fans) ventilation) أو بامتصاص الحرارة (absorbing heat) عن طريق تبخر الماء (evaporation of water) الذي يطبق بأنظمة الامتصاص، أي اللباد التبريدي (cooling pads) أو أنظمة الضباب (fog systems) أو بتبريد مادة الغطاء (cover material) باستخدام الرشاشات المائية (water sprinklers). ويمكن ضبط مستوى الإضاءة بالستائر المظللة (shading screen)، وبتبييض الغطاء (whitening the cover)، وباستخدام مواد كاسية للسقف (roof materials) ذات نفاذية كبيرة للضوء (greater light transmission)، وباستخدام إضاءة تكميلية (supplementary lighting). يفرز تنفس المحصول (الطماطم) (crop transpiration) بخار ماء (water vapour). ويمكن تخفيض رطوبة الهواء (air humidity) بالتهوية، وأحياناً باستخدام التسخين مع التهوية معاً. ويمكن رفع درجة الرطوبة بتبخير الماء باستخدام أنظمة الضباب، مثلاً. ويمكن رفع تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الهواء (أو حفظها في مستويات طبيعية عندما تغلق البيوت المحمية ويكون التمثيل الضوئي للمحصول نشطاً) بحقن ثاني أكسيد الكربون الصناعي (industrial CO₂) أو غازات سائلة (flue gases) من غلاية (boiler) ^(٦). بعض هذه التقنيات (مثل الإضاءة

التكميلية وأنظمة الضباب وحقن ثاني أكسيد الكربون الصناعي وما إلى ذلك) مكلف ونادراً ما تستخدم للطماطم. ويجب التذكر أو العلم أن عملية نتح المحصول نفسه، تخفض درجة حرارة الهواء كما ترفع رطوبة الهواء، بفعالية. وفي هذا المنحى، فإن الإدارة المضبوطة والسليمة لتطور القبة (canopy) هي المساهم الأساسي في ضبط مناخ البيت المحمي.

في المزارع الخالية من التربة (soiless culture)، تتم مراقبة وضبط البيئة المحيطة بالجذور (root environment) باستمرار (تركيزات الأيونات (ion concentration) والأس الهيدروجيني (pH) وعدم وجود أمراض تربة). قد تنمو الجذور إما في مادة تفاعل معدنية (أملاح (minerals) وصوف صخري (rock wool)) أو في مادة تفاعل عضوية (coco peat) أو تنمو مباشرة في محلول العناصر المغذية (nutrient solution) (تقنية فيلم العناصر الغذائية (nutrient film technique)). وبما أنه يمكن تغيير أو استبدال مادة التفاعل، فلا حاجة إلى تعقيم التربة (soil disinfection). ومن أجل الحد من التلوث البيئي (environmental pollution)، يتم تشجيع المزارعين الآن، على قفل أنظمة التسميد عن طريق الري؛ يتم إعادة ضخ محلول العناصر التغذوية الذي تم تصريفه (drained nutrient solution)، بعد تعقيمه ويرجع إلى نقطة الضبط الابتدائية (set point)، وذلك باستكمال ملئه بالماء والعناصر التغذوية.

في نهاية الأمر، تدعم الزراعة المحمية السيطرة على الآفات (pests) والأمراض. ويمكن تقليل استخدام مبيدات الآفات (pesticides) والحد منها، وذلك بالاعتماد على المقاومة الحيوية (biological control). ولمحصولات الطماطم من البيوت المحمية، فقد تم تحديد الأعداد الطبيعية لأكثر الآفات إتلافاً. ويمكن تفادي تطور بعض الأمراض مثل

العفن الرمادي (grey mould)، بالسيطرة السليمة المضبوطة على الرطوبة ودرجة الحرارة (*Botrytis cinerea*)، وبالتالي الحد من التكاثر على أوراق النبات (foliage). وعكس أنظمة الزراعة في البيوت المحمية، يسمح نظام الزراعة الحقلية (field cultivation system) بسيطرة بسيطة على البيئة الفيزيائية والحيوية. ويمكن توقيت العمليات (operations) ليسهل نمو المحصول تحت أفضل الأحوال المناخية وأكثرها مواءمة وإيجابية. ويمكن توفير العناصر الغذائية إما في عملية واحدة قبل عملية البذر (plantation) أو في عدة مرات أثناء نمو المحصول. وإذا دعت الضرورة توفر المياه (وإذا أمكن توفر العناصر الغذائية معها) عن طريق الري. تمكن أنظمة الزراعة البلاستيكية (plasticulture) المجهزة بالري التنقيطي (drip irrigation) من السيطرة التامة على توافر الماء والعناصر الغذائية. يتم نشر غطاء بلاستيكي (plastic cover) على التربة لمنع المطر الساقط (keeps rainfall off) ويحد من التبخر من التربة (soil evaporation). وبالطبع، هناك عدد كبير من أنظمة الزراعة الوسيطة (intermediate cultivation systems) بين أكثر البيوت المحمية تطوراً (most sophisticated greenhouse) وأكثر أنظمة الزراعة الحقلية تقليدية. وعلى سبيل المثال، تتم زراعة مساحات معتبرة وكبيرة من التربة بمحصول الطماطم تحت الأغشية البلاستيكية. وفي هذه الحالة المحددة، لا يزال للمزارعين قدرة ما على السيطرة على الظروف المناخية، ولكن تظل أحوال توافر الماء والعناصر الغذائية قريبة من التي توجد في الحقل.

تستخدم مختلف الأصناف (cultivars) في نظامي الزراعة الحقلية والبيوت المحمية لإنتاج الموسم الطويل (long-season production) (ما يصل إلى سنة) تستخدم الأصناف العنقودية (بشكل كرمه العنب (indeterminate vine shape)) وتتم تنمية الأصناف مع إزالة كل البراعم الجانبية (side shoots). يظهر إزهار جديد بشكل مستمر

(new inflorescences continually appear). وكتبعة/نتيجة لذلك وبصرف النظر عن الموسم ، يمكن جني (حصاد) الثمار الناضجة (mature fruits) مرتين إلى ثلاث مرات في الأسبوع وإرسالها إلى سوق الطازج (سوق الطماطم الطازجة). تفضل الأصناف المحددة (بشكل شجيري كثيف with a bushy shape) في الحقل عندما يكون موسم النمو قصيراً وعندما تكون ضغوط الآفات كبيرة. لهذه النباتات أزهار وإثمار جمعي (grouped flowering and fruiting) وتجعل هذه الخاصية أن تكون هذه المحاصيل مناسبة للحصاد الآلي (mechanical harvesting).

(٥,٣) أنواع النمذجة

Types of Modelling

لحظة كتابة هذا الكتاب اعتمدت نماذج المحصول المتوافرة على مدخلين مختلفين : من جهة تبدو النماذج الجديدة كصيغ رياضية (mathematical formulation) للعمليات الملاحظة (observed processes) مع زيادة المعارف المتوافرة. وتعرف مثل هذه النماذج بالنماذج البحثية (research models). في المقابل ، يمكن تصميم النماذج لتكون جزءاً من الإجراءات المتخذة والهادفة لحل المشكلات العملية ؛ وتعرف هذه بالنماذج الهندسية (engineering models)^(٧). تقيم النماذج البحثية على أساس قيمتها العلمية (scientific value الواقعية (realism). وهي نماذج توضيحية (explanatory) أو أنها مصممة للعمليات (process oriented models) كسلوك لنظام مشابه محالٍ عند مستوى هرمي محدد (particular hierarchical level) ، ونتيجة لعمليات موصوفة عند مستويات هرمية دنيا. تُقِيم النماذج الهندسية على أساس قيمتها التشغيلية (فعالية effectiveness) وقد تكون أكثر توصيفاً (more descriptive) إذ إنها بنيت من علاقات إحصائية (statistical relationships) (نماذج

الصندوق الأسود ("المتوافرة" (black-box" models) أو اعتماداً على المعرفة (knowledge based) (نماذج مساعدة على الكشف (heuristic models)).

(٥, ٤) توازنات الكتلة والطاقة لمخاصيل الطماطم

Mass and Energy Balances of Tomato Crops

Carbon (٥, ٤, ١) الكربون

يعتمد الإنتاج الكتلي الحيوي (biomass) للقبعة (البيت المحمي canopy) بصفة أساسية، على التمثيل الغذائي الصافي (net assimilation) لثاني أكسيد كربون الجو، أي التوازن بين التمثيل الضوئي الكلي (gross photosynthesis) والتنفس. ويعتمد ذلك على كمية الطاقة المتوافرة (الضوء) والكربون كمادة تفاعل، وعلى مقدرة القبعة على استقطاب الضوء وحصره (intercept light) وتمثيل ثاني أكسيد الكربون (assimilate CO₂) في البيوت المحمية لا يكون تمثيل ثاني أكسيد الكربون (CO₂) مهماً لنمو المحصول فقط، بل إنه يتفاعل ويعمل بقوة مع محتوى الجو (composition of the atmosphere). قد يبلغ الاستهلاك اليومي من الكربون لقبعة طماطم (tomato canopy) عشرة أضعاف الكربون المتوافر في بيئة البيت المحمي^(١). لا بد من التوازن (بين استهلاك وتوافر الكربون) إما بالتهوية (ventilation) وإما بالإغناء (توفير الـ CO₂ (CO₂ enrichment)).

راجع أو استعرض لونغوينيسي وآخرون^(٨) (Longuenesse et al.) وجايجزين^(٩) (Gijzen) وبكثافة، نماذج التمثيل الضوئي للأنواع البستانية (horticultural species) عند مستوى الأوراق أو القبعة (leaf and canopy level). يستجيب التمثيل الضوئي الكلي للأوراق، للضوء بمنحنى من النوع المشبع (saturation-type curve). وقد تم اقتراح واختبار عدة معادلات رياضية (mathematical formulations) على بيانات الطماطم، على سبيل المثال، الهايبربولا، القطع الزائد المتعامد (rectangular hyperbole)^(١٠) والقطع

الزائد غير المتعامد^(١١) والأس السالب (the negative exponential)^(١٢). وبالرغم من الفروقات البسيطة في الشكل، فإن كل هذه الدوال تشمل قياسين مهمين: أقصى معدل تمثيل ضوئي للأوراق (P_{max}) (maximum rate of leaf photosynthesis) وكفاءة فعالية الاستخدام الضوئي الأساسي (α) (light use efficiency) (أقرب إلى الظلام (close to darkness)). يرتفع أقصى معدل تمثيل ضوئي للأوراق (P_{max}) مع تركيزات ثاني أكسيد الكربون ومع النقل التوصيلي له (ثاني أكسيد الكربون) (conductance of CO_2 transfer) من الجو إلى الكلوروبلاست (بلاستيدة خضراء جبيلات اليخضور، chloroplast). ويكون الـ P_{max} محدوداً عند انخفاض وارتفاع الحرارة (انظر أمثلة مقدار متغير القيمة (parameterization) للطماطم في بيرتين وهيوفيلينك (Bertin and Heuvelink)^(١٣). وتتأثر كفاءة الاستخدام الضوئي الأساسي (ألفا) تأثيراً إيجابياً بتركيزات ثاني أكسيد الكربون وتتأثر سلبياً بدرجة الحرارة. ويقل نقل ثاني أكسيد الكربون التوصيلي عند انخفاض كثافة الضوء (low light intensity) وارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون ونقص ضغط البخار العالي (VPD) (high vapour pressure deficit) وتحت الضغط المائي^(١٤) (water stress). لقد تم إدخال التمثيل الضوئي الإجمالي (gross photosynthesis) بمستوى القبة بطرق مختلفة. إن أبسط مدخل (أو معالجة) هو ضرب نشاط الوحدة للورقة (unit leaf activity) بمؤشر مساحة الأوراق (leaf area index) أو بمساحة الأوراق المتوقعة (projected leaf area) مدخل الأوراق الكبيرة ("big leaf" approach). وتأخذ نماذج أخرى التحويل والنقل الضوئي (light transmission) في الكانوني في الاعتبار، وذلك باستخدام القانون الأسي للأقول (exponential law of extinction)^(١٥). عندما يكون منحنى استجابة الأوراق الضوئية متعامد القطع الزائد، فإن التكامل التحليلي (analytical integration) عند مستوى القبة يصبح ممكناً (على

سبيل المثال في جونس وآخرين^(١٦) لمحصولات الطماطم (Jones et al. for tomato crops). وتعتمد النماذج الأكثر تطوراً (more sophisticated) على وصف تفصيلي لتوزيع الضوء وامتصاصه في القباب (انظر لاحقاً).

إن التدفق التنفسي لثاني أكسيد الكربون (respiratory afflux of CO₂) مهم: وعلى أساس يومي، فقد يمثل ربع إلى نصف التمثيل الضوئي الإجمالي لمحصول الطماطم النامي في بيت محمي^(٩،٦) ووظيفياً قسم تنفس النباتات في مكونين: تنفس محافظة (maintenance respiration) وتنفس نمو (growth respiration). يتوافق أو يتطابق تنفس المحافظة مع الطاقة المطلوبة للمحافظة على الانحدار الأيوني (ionic gradient) عبر الأغشية الحيوية ومخزون الجزيئات الكبيرة (pools of macromolecules) مثل البروتينات بينما يتطابق تنفس النمو مع الطاقة المتضمنة في تخليق الكتلة الحيوية الجديدة من المواد التمثيلية (المغذية) (assimilates) والعناصر المعدنية (minerals). يتم حساب تنفس المحافظة كمنتج للنبات أو الوزن الجاف للعضو (organ dry weight) مضروباً في معامل المحافظة (maintenance coefficient)، وبحسب تنفس النمو كمنتج للنبات أو معدل نمو العضو (organ growth rate) مضروباً في معامل إنتاج ثاني أكسيد الكربون (CO₂ production factor). في نماذج المحاصيل يتم جمع تنفس الصيانة وتنفس النمو لتقدير التنفس الكلي، وعادة على أساس يومي. يرتفع معدل التنفس أسياً مع ارتفاع درجة الحرارة. وللطماطم أخرج Heuvelink^(١٧) نظرية تفيد بأن معامل الصيانة ينخفض مع تقدم عمر الأعضاء (ageing of organs). يتناسب عامل إنتاج الـ CO₂ مع تكلفة الطاقة (energy cost) لتخليق الكتلة الحيوية؛ ويختلف بين الأعضاء ومع تقدم العمر انظر جاري وآخرين للطماطم (Gary et al. for tomato)^(١٨).

يشتمل توازن كربون المحصول (crop carbon balance) على تبادل الكربون (carbon exchanges) بين المناخ (الجو) والقبعة (التمثيل الضوئي الصافي (net photosynthesis)، وتوزع الكربون في النبات بين مخزون واحد أو عدة مخزونات

للممثلات الضوئية (photoassimilates) والأعضاء النامية. وضع جينت (Gent) وأينوك (Enoch)^(١٩) معادلات بسيطة للتمثيل الضوئي الإجمالي والتنفس، مع بعضها البعض، كما وصفا علاقة بين توافر للممثلات الضوئية والنمو. بهذه المعادلات البسيطة، يمكن محاكاة ديناميكيات تبادل ثاني أكسيد الكربون ليوم كامل (٢٤ ساعة) وديناميكيات الاختلافات في مخزون الممثلات الغذائية لنباتات الطماطم الصغيرة.^(٢٠، ٢١) ومثل هذا النموذج البسيط لتوازن الكربون قد أعيد تشكيله لأغراض الضبط، بواسطة سيجينر وآخرين^(٢٢) (Seginer et al.).

Water (٥, ٤, ٢) الماء

توازن الماء (water balance) في المحصول من الخواص المهمة من نواح كثيرة. تساهم واردات الماء (water import) في نمو النبات، إذ تؤثر حالة الماء على تمديد الخلايا (call extension) في الأعضاء النامية، كما أن الماء الجاري يحمل وينقل المغذيات للأعضاء النامية والتخزينية (growing or storage organs). وأيضاً جزئياً، تضبط وتسيطر حالة الماء على التوصيل الثغيري [التوصيل من خلال فتحات صغيرة (stomatal conductance)]، وبذلك فقد تؤثر حالة الماء على التمثيل الضوئي. وأخيراً أيضاً، يرتبط تبخر الماء أثناء التعرق والذي يعرف بالتتح في النباتات (transpiration)، بامتصاص الحرارة الكامنة (latent heat): ويحدد هذا التبخر، وبقوة، درجة حرارة القبة، وبذلك، يؤثر على درجة حرارة الهواء داخل البيت المحمي ويحددها^(٣).

إن نمذجة العلاقات المائية للمحاصيل البستانية قد تم استعراضها ومراجعتها من قبل جونس وتارديو (Jones & Tardieu)^(٢٣) وفان دي ساندين (van de Sanden)^(٢٤) وجواليت (Jolliet)^(٢٥).

لقد تم تحفيز وتنشيط الأبحاث في هذا الحقل (domain) بسبب اهتمامين: ١ - محاكاة حالة الماء وعلاقتها بالوظائف الفسيولوجية المختلفة (تمديد الأعضاء والفتحة

التغيرية (stomatal opening) وتدفق الماء (water flux) وما إلى ذلك). ٢- محاكاة تدفق الماء خلال الكانوبي، القبة لتقدير متطلبات المحاصيل من الماء. إن الإطار الأساسي (basic frame work) المتخذ، بصفة عامة، هو نظير لقانون أوم (analogue of Ohms law) والذي يقول: إن حجم تدفق الماء (water volume flux) في طريق (مسار) محدد يتناسب مع انحدار جهد الماء (gradient of water potential) ومع معاكسة (مقاومة) السريان (inverse of a flow resistance). للطماطم، صمم فان إيبيرين (van Ieperen)^(٢٦) نموذجاً يصف مسار (pathway) الماء من بيئة الجذور إلى الجو خلال حجرة جذر واحدة (one root compartment) وثلاث طبقات فروع (three shoot layers) في النبات النابت (النامي، المخضر (vegetative plant))، كما يصف ديناميكيات جهد الماء في الجذور (roots) والجذوع (stems) والأوراق. توجد معلومات (premises) حول نمذجة تدفق الماء للطماطم من خلال أوعية الفلويم (اللحاء (phloem)) والزيلم (الجزء الخشبي من النبات (xylem))، في جويشارد وآخرين (Guichard et al.)^(٢٧). وتعتمد هذه المعلومات على نموذج فيشمان وجينارد (Fishman and Genard model)^(٢٨). يعتمد تدفق الماء السائد، في اللحاء (dominating phloem flux) على تركيز الكربوهيدرات في أوعية اللحاء وعلى مقدرة الفاكهة (الثمرة) على عدم تحميل هذه الكربوهيدرات (unload (arbohydrites)^(٢٨). ويختلف تدفق الجزء الخشبي (xylem flux) باختلاف جهد الماء في الجذع، إذ إن جهد الماء للثمرة يبقى ثابتاً بدرجة معقولة، في أوقات وأحوال بيئية مختلفة^(٢٧). وبسبب المقاومة الكبيرة لتدفق الماء في القشرة (البشرة (epidermis))، فإن نتح فاكهة أو ثمرة الطماطم محدود؛ وقد تمت نمذجة النتح كدالة على التآلق (السطوع (irradiance)) وال VPD بواسطة لينوناردي وآخرين (leonardi et al.)^(٢٩).

وعلى مستوى القبة (canopy scale)، تمت نمذجة نتح محصول الطماطم بتطبيق طريقة بينمان-مونتيث التقليدية (classical Penman-Monteith approach)^(٣٠)، وذلك بمجموع المكون الإشعاعي (radiative component) متناسباً مع الإشعاع الكلي الممتص بواسطة القبة، وكذلك بالمكون الحملية (convective component) متناسباً مع نقص ضغط بخار الماء (VPD). إن مقاومة القبة لنقل بخار الماء تكون المقاومة الديناميكية الهوائية (aerodynamic resistance) التي تعتمد على سرعة الرياح (wind speed) ودرجة حرارة الهواء والأوراق والمقاومة الثغيرية التي تعتمد بدورها على الإشعاع ونقص تشبع الأوراق بالهواء (leaf air saturation) ودرجة حرارة الأوراق لمحصول الطماطم مثلاً (بولارد وآخرون *Boulard et al.*)^(٣١). ومن أجل الأغراض التشغيلية، فإن النموذج التحليلي التام قد تم تبسيطه إلى معادلة ذات قياسين (two-parameter formula) إذ تم اشتقاق القياسات إما من النموذج المعقد (complex model) أو أنها قد حددت في الموضوع الأصلي، أي الحقيقي (*in situ*)^(٣٢).

٣, ٤, ٥) الطاقة Energy

مقارنة قبة المحصول (crop canopy) بالجامع الشمسي (الجامع لأشعة الشمس (soler collector)) والأشعة الممتصة (absorbed radiation) هي التوازن بين الأشعة الكلية (global radiation) الساقطة (incident) والأشعة المعكوسة (reflected) والمنقولة (transmitted) وفي دراستهم لحصر محاصيل البيوت المحمية للضوء (light interception by glass house crops)، قاس وارين ميلسون وآخرون (Warren Wilson *et al.*)^(٣٣) لقبة الطماطم (tomato canopy) متوسط الانعكاس البالغ ١٣٪ ومتوسط النقل (average transmittance) البالغ ٢٣,٥٪ للضوء الساقط في الحزام الموجي الإشعاعي النشط للتمثيل الضوئي (PAR) (photosynthetic active radiation wave band). تحسن امتصاص الضوء بنسبة ١٠٪ عندما تمت تغطية التربة بغطاء بلاستيكي

أبيض (white plastic sheet). وأيضاً، زاد امتصاص الضوء بتطور الأوراق (foliage development) إلى أن بلغ الامتصاص الكامل التام (complete absorption) تقريباً، عند بلوغ مؤشر مساحة الأوراق (leaf area index (LAI) الدرجة ٤ أو أعلى. يرتبط امتصاص الضوء بكثافة النبات (plant density) والمسافات بين صفوف النبات (row spacing)، إذ يميل إلى الزيادة عندما يكون توزيع النبات أكثر انتظاماً (more uniform)^(٣٤). إن توزيع الضوء وامتصاصه بصفوف محاصيل القنب (rows of caponies) مثل محصول الطماطم، قدمت نمذجتها باستخدام معالجات (مداخل) (approaches) راجعها كريتين (Critten)^(١٥) ومن بين هذه المعالجات منحنى الأفول الأسّي (exponential extinction curve) ونماذج أخرى متنوعة تضع اعتباراً لتشتت الضوء (light scattering) ولتوزيع الضوء المنتشر (diffuse light) والضوء المباشر (direct light)^(٣٦).

يستخدم جزء من الإشعاع الممتص بواسطة التمثيل الضوئي لتمثيل (استهلاك وامتصاص) الكربون (carbon assimilation) وإنتاج البيوماس (الكتلة الحيوية)، وتقدر هذه النسبة بكفاءة استخدام الإشعاع (RUE) (radiation use efficiency)، وهي النسبة بين مكافئ الطاقة للكتلة الحيوية والإشعاع الكلي (أو الـ PAR أي الإشعاع النشط للتمثيل الضوئي) الممتص (أو الساقط) لمحصول الطماطم. قدر إيكمان (Aikman)^(٣٧) الإشعاع الممتص ليكون حوالي ٧٪ اعتماداً على الإشعاع النشط للتمثيل الضوئي (PAR) الممتص، وقدره بـ ١,٦٪ اعتماداً على الإشعاع الكلي خارج البيت المحمي.

وفعالياً، يتم تشتيت وتفرق جزء كبير من الطاقة الممتصة بواسطة المحصول في شكل حرارة كامنة بالتتح. وكتبعة لذلك تكون درجة حرارة قبة المحصول الناتحة (transpiring capony) أقل من درجة حرارة الهواء. يولد هذا الفرق في درجة الحرارة تدفق حرارة محسوسة (flux of sensible heat) من الهواء إلى القبة. في البيت المحمي، واعتماداً على مؤشر مساحة الأوراق (LAI)، فإن ٥٠-٧٠٪ من دخل الطاقة الشمسية

(solar energy input) يستخدم للنتح التبخري (evapotranspiration)^(٣٧). ويسبر هذا، حقيقة أن متطلبات المحصول للماء تقدر من الإشعاع الكلي الممتص أو الساقط.

(٥, ٤, ٤) العناصر المعدنية Minerals

بنفس الطريقة كما للكربون والماء فقد تم تصميم كل من النموذجين: الآلي (mechanistic) ونموذج الصندوق الخلفي (back-box) [انظر الاستعراض الواسع لـ لي بوت وآخرين (Le Bot et al.)^(٣٨). تصف النماذج الآلية عمليات محددة مثل أخذ العناصر الغذائية (nutrient uptake) والنقل والتمثيل الغذائي، وحتى للنيتروجين العنصر الذي درس أكثر من غيره، مازالت موضوعات تنظيم وتكامل هذه العمليات على نطاق النبات كاملاً (whole plant scale)، قيد البحث والمناقشات. وللطماطم تم اقتراح معالجتين آليتين رئيسيتين للنمذجة. وفقاً لـ لي بوت وآخرين (Le Bot et al.)^(٣٨)، فإن وقت مسار أخذ النترات (time-course of nitrate uptake)، يرتبط بالنقل الموضعي (translocation) للكربوهيدرات إلى الجذور لتغطية تكاليف الطاقة لأخذ العناصر الغذائية (energy cost of nutrient uptake)، ووفقاً لجارديناس - نافارو وآخرين (Gardenas-Navarro et al.)^(٣٩)، فإن أخذ النترات يرتبط بالمحافظة على تركيزات أيونات داخلية ثابتة (steady internal ion concentration).

وتربط النماذج الأكثر عمومية (نماذج الصندوق الخلفي (more general back box) والطلب/ الحاجة للعناصر التغذوية، مباشرة، بمعدل النمو (grow rate). وقد تم تأسيس الطلب لعدة عناصر معدنية (النيتروجين والبوتاسيوم والفسفور)، وضرورة المحافظة على التركيزات الحرجة (critical concentration) لهذه العناصر المعدنية في أنسجة النبات وأن تقارب/توافق النمو المحتمل الكامن (potential growth) اعتماداً على الإشعاع الكلي المحجوز (total intercepted radiation). للنيتروجين، ينخفض هذا التركيز الحرج تدريجياً مع تجمع الكتلة الحيوية أثناء مرحلة الإنبات (vegetative phase)^(٤٠). قاس لي بوت وآخرون (Le bot et al.)^(٤١) هذه العلاقة لنبات الطماطم. ولتفسير هذا

الانخفاض في محتوى النيتروجين، اقترح كالوين ويو (Caloin & Yu)^(٤٢) حجرتين في الكتلة الحيوية، إحداهما في غالب الأمر نشطة للنمو وبها محتوى عال من النيتروجين، والأخرى مخصصة للتراكيب (structures) وللتخزين وبها محتوى منخفض من النيتروجين. مع تطور المحصول، تميل الحجرة الثانية للسيادة. تمت معايرة (calibrated) هذا النموذج لمحصول طماطم البيت المحمي بواسطة بيليرت وآخرين (Bellert et al.)^(٤٣). وقد تم تطبيق منهج مماثل (comparable approach) لمطلب النيتروجين من تصنيع الطماطم في نموذج الـ EPIC، وذلك لتقييم مختلف سياسات التسميد من ناحية نمو المحصول وديناميكيات النيتروجين في التربة^(٤٤).

وتتوافر نماذج تحليل للعناصر الفيزيائية الأخرى لحظة كتابة هذا الكتاب^(٤٥). وقد تم ذكر النموذج الأول الذي يماثل تدفق الكالسيوم في ثمرة الفلفل وعلاقته بحدوث عفن نهايات الزهرات (blossom-end-rot) (وهذا عيب من عيوب الجودة (quality defects) يلاحظ في الطماطم، أيضاً)^(٤٦).

(٥,٥) تكون الناتج

Yield Formation

تعتبر الطماطم عينة رائدة لنمذجة المحاصيل. تمت دراسة تكون الناتج وإنتاج المادة الجافة (dry matter production) والتجزئة / التقسيم (partitioning) بشكل دقيق، كما تم تدوينه بشكل نظامي أو رسمي (formalized) بمختلف المعالجات (المدخل)، مرة أخرى إما آلياً (mechanistic) وإما تجريبياً (empirical). اعتمد مدخل نمو الثمرة (fruit growth) على نماذج إنتاج المادة الجافة (models of any matter production). درست تدفقات الماء نحو ثمرة الطماطم اللحمية (flesh tomato fruits) (حوالي ٩٥٪ ماء) كما تمت نمذجة ذلك، فقط، حديثاً.

١,٥,٥) إنتاج الكتلة الحيوية Production of Biomass

تم تطوير مختلف مداخل أو معالجات إنتاج الكتلة الحيوية لمختلف أنواع المحاصيل بما في ذلك الطماطم. في النماذج المشغلة بالتمثيل الضوئي (photosynthesis-driven) استخدم تكامل التمثيل الضوئي الصافي (الصرف، net photosynthes) وتحويل المثلاث الضوئية (غذائياً، photoassimilates) الناتجة إلى كتلة حيوية لحساب تجمع المادة الجافة. قدر شاللا وباكرا (Challa & Bakker)^{٤٧} الإنتاج المحتمل لمحاصيل البيوت الزجاجية في مختلف أقاليم العالم باستخدام هذا المدخل - وأيضاً هي الخطوة الأولى في معظم نماذج محاصيل الطماطم^(١٧، ٣٦، ٤٨) قارن بيرتين وهيو فيلينك (Bertin & Heuvelink)^(١٣) إنتاج المادة الجافة المقدر بنماذج جونس وآخرين (Jones et al.)^(٣٦) وهيو فيلينك^(١٧).

في مدخل كفاءة استخدام الإشعاع (RUE)، اعتبر إنتاج الكتلة الحيوية نتيجة لتحويل الطاقة من الإشعاع الساقط إلى محتوى الكتلة الحيوية من الطاقة.

ربط حصر الإشعاع بمؤشر مساحة الأوراق (LAI) بمنحنى تشبع (saturation type curve) ومعامل تحويل الضوء المحصور إلى كتلة حيوية أعلى للكربون ٤ (C₄) (أي محصول الذرة maize مما لكربون ٣ (C₃) (أي محصول الطماطم)، ويرتفع بارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون. لقد تم تقويم هذا المدخل في أحوال مختلفة لمحصولات البيوت الخضراء من الطماطم^(٤٩-٥١) وقد استخدم مدخل مماثل لأنواع مختلفة تشمل الطماطم في برنامج نمذجة ال modelling platform.

٢,٥,٥) توقيت التطوير Timing of Development

تشمل عمليات التطور تكوّن الأعضاء الجديدة وتعميرها، ونضجها (ageing) والتحويلات المرحلية (phase transitions) في كامل النبات (أي الفترة النمائية الإنبائية مقابل الفترة التولدية الإنتاجية (vegetative versus generative periods) والنسب القياسية للأعضاء (organ scales) (أي وضع الثمر fruit setting). يعتمد تكوين الأعضاء

ونموها، أي تعميمها، على درجة الحرارة^(٥٣)، ويتبع ذلك منحني شبيه بالجرس (bell-shaped curve) يمكن وصفه جزئياً بمعادلة أرهينيوس (Arrhenius equation)^(٥٤) مثل منحني الاستجابة (response curve) هذا، قد تم تدرجه (تمت معايرته) لتكون الأوراق والعناقيد الزهرية (أو الثمرية ملتزمة الوحدات trusses) الجديدة، ولتطور الثمرة من مرحلة الأزهار (flowering) إلى مرحلة النضج (maturity) وكما أدخل في معظم نماذج محصول الطماطم (مثل دي كونينج De koning)^{٥٥}. ووفقاً للنظرية القائلة بإمكانية اعتبار استجابة معدل التطور لدرجة الحرارة استجابة خطية (linear) في مدى محدود لدرجات الحرارة، فإن درجات الحرارة اليومية يمكن تجميعها لحساب وقت حرارة (thermal time) معبر عنه في أيام درجات (degree days)، وذلك بالتحديد، غير معتمد على برنامج (نظام) درجات الحرارة (temperature regime)^(٥٦). (راجع أو أعدد تي جكينس وفيردينيس (Tijksens and Verdenius) نمذجة العمليات الحيوية التي تعتمد على درجة الحرارة).

في نباتات الطماطم، وضع الثمرة هو مرحلة الانتقال من الأزهار إلى مرحلة نمو الثمرة. وقد تمت ملاحظة أنه كلما كبرت نسبة المصدر—أي حوض تجمع الماء—(source sink ratio) (أي جزء معدل النمو المحتمل للنبات الذي يمكن تحقيقه بالإنتاج الحالي للتمثيل الغذائي الضوئي)، كان وضع الثمر أكثر نجاحاً^(٥٨). لقد تم تشكيل هذه العلاقة في نموذج الـ TOMGRO^(٥٩). في هذا النموذج، تحدد ديناميكية الأزهار (dynamics of flowering) ووضع الثمر وتعمير الثمر والتركيب العمري (age structure) لمجموعات الأعضاء النامية والمتولدة في أي وقت أثناء مراحل الإنتاج.

(٥،٥،٣) توزيع المادة الجافة Dry-matter Partitioning

يعتمد الوزن الجاف للأعضاء المحصودة على جزء المادة الجافة المخصصة المعينة لها (للأعضاء allocated to them) وفي حالة أنواع الثمار مثل الطماطم، فإن توازن الوزن الجاف النامي — المتولد (vegetative-generative dry weight balance) هو المكون

المفتاحي (الأساسي) لنماذج المحصول. قد تتغير هذه النسبة مع مرحلة تطور النبات، وديناميكيا قوة المخزون (مخزون الماء) التتموية والتوليدية (vegetative & generative sinks) هي معدل النمو المحتمل عندما لا يوجد تنافس بين الأعضاء على مصادر الكربون^{٦٠}. وتختلف هذه القوة المقدرة باختلاف مرحلة تطور العضو؛ ترتفع مع درجات الحرارة، ولا تتأثر بتوافر الممثلات الغذائية نفسها. أثبت هيو فيلينك^{٦١} أنه، في الطماطم يكون لكل أعضاء نبات الطماطم نفس إمكانية الحصول على أو الوصول إليها كل مصادر الكربون، وتبعاً لذلك (١) فإن نسبة تخصيص الوزن الجاف التوليدي النمائي (vegetative generative dry weight allocation ratio) تعتمد على عدد الألياف وتركيبها العمري والعقد المبينة للجذع (stem internodes) والتمر، و(٢) عندما يكون النشاط المصدر (التمثيل الضوئي) أقل من متطلب الحوض (sink demand)، فإن معدل النمو الفعلي للأعضاء يكون محدوداً بنفس النسبة. نفذت هذه المفاهيم في نماذج محصول الطماطم المصممة للزروعات العنقودية (determinate cultivars)^(٦٢) وحتى الآن تمت محاولات قليلة^(٦٣) لتأكيد وتوثيق أو إثبات نظرية البذور العنقودية هذه.

(٥, ٥, ٤) محتوى الثمرة من المادة الجافة Dry Matter Content of Fruit

إن محتوى ثمرات الطماطم العالي من الماء ناتج من تدفقات الجزء الخشبي للنبات واللحاء (xylem & phloem infuxes) وتوقف الدفق التعرقي، التنحي (transpiration) (lateral fluxes) أثناء نمو الثمرة. وكما ذكر سابقاً، فإن نمذجة التدفقات الطرفية (fruit transpiration) قد داخل النبات (من الجذع إلى الثمر) وكذلك نمذجة نتح الثمر (fruit transpiration) قد درست فقط حديثاً جداً. وستدخل هذه العمليات في نموذج محصول الطماطم شريطة اقتران تدفق الماء والكربون. وإلى هذه النهاية، لا بد من تحديد ديناميكيات جهد الماء في الجذع وديناميكيات محتوى الكربوهيدرات في اللحاء وكذلك تحديد الاختلافات أو الفروقات الممكنة في مقاومة نقل الماء في سويقات (fruit peduncle) وقشر الثمر.

ولحظة كتابة هذا الكتاب ، فإن نماذج محصول الطماطم اعتمدت على استهلاك وتوزيع الكربون ، فقط. يحسب الوزن الجاف للثمر المحصود ويحول إلى وزن طازج بتطبيق معامل محتوى المادة الجافة (coefficient of dry matter content) الذي إما أن يكون ثابتاً (fixed)^(١٦) وإما أن يكون متغيراً ومختلفاً باختلاف الموسم.^(٥٥) في الحالة الأخيرة (الاختلاف) يكون محتوى المادة الجافة للثمر أعلى في الصيف مقارنة بالمحتوى في الشتاء ، وإذ إن الظروف البيئية في الصيف تميل لصالح الإجهاد المائي (favour water stress) عندما يكون الإشعاع وVPD أو تركيزات الملح في محلول العناصر التغذوية عالية) وأيضاً ، يحدد محتوى الثمر الناضج من المادة الجافة وراثياً: عادة يكون أعلى في الثمرات الصغيرة (الأعناب والكوكثيل) مقارنة بما في الفواكه الكبيرة (الثمرات).

(٥,٦) تكون جودة المنتجات

Formation of Product Quality

تغطي جودة ثمار الطماطم عدداً من الخصائص المختلفة ، ومن بينها لاقت درجة الثمرة (تدرجها fruit grade) مزيداً من الاهتمام. ويمكن نمذجة متوسط وزن الثمر الطازج اعتماداً على وزن وعدد الثمرات المحصودة. معدل نمو الثمر المحتمل قياس وراثي (genetic parameter). في الطماطم ، يرتفع معدل النمو المحتمل من الكرز عبر الكوكثيل إلى الأصناف الدائرية وأصناف الفطر (round and beefsteak cultivars). وخلال مدى درجات الثمر المحددة وراثياً ، يمكن ضبط حجم الثمر الحقيقي (الفعلي) في البيوت المحمية عن طريق ضبط المناخ وإدارة عمليات المحصول (الزراعية). ويمكن الحصول على ثمار كبيرة بزيادة التمثيل الغذائي الصرف ، على سبيل المثال ، بإمداد ثاني أكسيد الكربون (إغناء CO2 enrichment) ، أو بتخفيف التنافس على المثليات الغذائية ، على سبيل المثال ، بتشذيب (تقليم) الثمار (fruit pruning). لقد تم تقليد (تشبيه) هذه السلوكيات بنموذج الـ TOMGRO : في تقليد الـ SIMULSERRE simulator ، ويمكن تقييم مختلف إستراتيجيات إدارة المناخ والمحصول في شكل مسار

زمني للناتج الأسبوعي (weekly yield) ومتوسط درجات الثمار (average fruit grade)^(٦٤).

عند كتابة هذا الكتاب، كانت آليات مدخل نمذجة لون الثمار ونكهتها وقوامها أقل عملاً، إذ إن العمليات التحتية كانت معقدة. ويتضمن تغير اللون أثناء الإنضاج وتحول البلاستيدات (جبيبات البخضور) (chloroplasts) إلى جبيبات ملونة لجسيمات صابغة في جيلة الخلية النباتية فيهن مادة ملونة صفراء أو حمراء وهي التي تلون الزهر والثمر وتتميز عن جبيبات اليخضور (chromoplasts) مع هدم اليخضور (degredation of chlorophyll) وتصنيع الكاروتينويدات وتجمع الليكوبين (accumulation of lycopene) مما يؤدي إلى ثمار ملونة باللون الأحمر (red-coloured fruits). تستجيب هذه العمليات استجابات مختلفة لدرجة الحرارة، وبالتالي، تصبح الثمار صفراء بدلاً من أن تكون حمراء في درجات حرارة أقل من ١٢°م وأعلى من ٣٠°م.^(٦٥) ببساطة قد تميز أو تصنف مثل هذه التغيرات الفسيولوجية بجهاز قياس الألوان (colorimetry) بقيم إل (L) وأ (a) وبي (b) لجهاز أو نظام هنتر ثلاثي الأبعاد (three dimensional Hunter system) أو بقيم أ (a) وبي (b) المحولة إلى هيو (تدرج اللون hue) وكروما (صفاء اللون chroma) على التوالي، وليوفرا مع إل (L) تقيماً للون والذي يرتبط أو يتوافق جيداً مع إدراك المستهلك (consumer perception)^(٦٧).

أوضح تاهي وشيوفيلت (Thai & Shewfelt)^(٦٨) أن قيمة الهيو (تدرج اللون) قد تغيرت سنياً (شكل sigmoidally) مع الوقت واستجابت لدرجة الحرارة وأن الكروما (صفاء اللون) وقيمة إل (L) متغيرات معتمدة على الهيو (تدرج اللون Hue)) ونتج عن ذلك، نموذج إحصائي بسيط (simple statistical model) لمماثلة ومشابهة تغيرات لون الطماطم تحت المعاملات الحرارية (درجة الحرارة) الثابتة والمتغيرة. أجرى تيجسكينس وإفيلو (Tijksens & Evelo)^(٦٥) تحليلاً قابلاً للمقارنة باستخدام قيمة أ (a) ونسبة أ للبي (أ/بي) وأدخل تصحيحات للعمر البيولوجي (العمر الحيوي)

للثمار عند الحصاد. ومع ذلك قلت دقة التنبؤ باللون عندما تحول لون المحصول من اللون الوردي (pink) إلى الأخضر مرحلة النضج (mature green age).

بجانب الحجم واللون، يساهم وجود العيوب والظواهر غير الطبيعية (abnormalities) في المظهر البصري (visual appearance) لثمار الطماطم. صنف جاهنس وآخرون (Jahns et al.)^(٦٩) الحجم واللون والشكل (الانحراف عن المسار الدائري) (shape eccentricity) والعيوب (النقاط البنية brown spots) والتشقق (cracks) (انخفاض معامل الانعكاس (reduced reflectance) والانتظام (uniformity) (أي توزيع اللون الأخضر - الأحمر (green-red distribution)) وأتموا ذلك بتحليل الصورة (image analysis). كما صمموا نموذجاً مشوشاً (fuzzy model) لتدريج الجودة (quality rating) بواسطة المستهلكين اعتماداً على هذه الخصائص البصرية (optical properties).

تم استساغة ثمار الطماطم (pleasantness of tomato fruit) في الغالب، بالنكهة والرائحة (aroma) والحلاوة (sweetness) والتحبب (mealiness) (الذي يتميز بالتركيب المحبب والرخو للحم (اللبن) (loose and granular structure of the flesh)). وإذ إن الرائحة ترتبط بالحلاوة، استخدم فيركيركي وآخرون (Verkerke et al.)^(٧٠) تحليل الانحدار الخطي المتعدد لربط الحلاوة والتحبب اللذين تم تقييمهما بواسطة محكمين مدربين (trained panel) لوضع قياسات للقوام (texture measurements) وتحليلات كيميائية (chemical analysis). وبالمثل، وجد اسكوتي وآخرون (Schotte et al.)^(٧١) علاقة لوغريتمية (logarithmic relation) بين الصلابة (firmness) مقاسة بتقنية الاستجابة النبضية الصوتية (acoustic impulse-response technique) ومقدرة بواسطة خبراء. قلت الصلابة أسياً مع مرور الوقت، وتتأثر هذه الديناميكية بالنضج عند الحصاد (مع التفاعل مع زراعة الصنف) وبدرجة الحرارة وبالموسم (يكون معامل أو ثابت التدهور أعلى في الربيع spring مقارنة بما يكون في المواسم الأخرى).

فترة الصلاحية (keeping quality) أثناء التخزين متغير تكاملي (integrative variable). وتجعل فترة الصلاحية لوقت قبول المنتج قيمة كمية (quantity the time of product acceptability) والتي تعتمد على كل من خصائص المنتج (product properties) وسلوك المستهلك (consumer behaviour). ويمكن ربط فترة صلاحية ثمار الطماطم بالصلابة عند الحصاد.^(٧٢) من ثم تم تشكيل إطار نموذج عامة (general medelling frame work) بواسطة تيجسكينس وبولديرديجك (Tijksens & Polderdijk)^(٧٣) والذي فيه تعتمد حركات التعفن (تعفن تحلل النبات أو الطعام) (decay kinetics) (لواحدة أو عدة خصائص جودة، على درجة الحرارة والقيمة الأصلية (initial value) وحدود القبول من قبل المستهلك.

ومن الملاحظ، أن معظم نماذج جودة الفواكه ليست واضحة الشرح (not explicative) وأن قليلاً منها (اللون والصلابة وفترة الصلاحية) ديناميكي. وتجرى أبحاث مستمرة في فسيولوجيا تكون (صيرورة) جودة ثمار الطماطم فيما يتعلق بالمحتوى (التركيب) الكيميائي (chemical composition) (أي محتوى السكر والحموضة والرائحة وما إلى ذلك) والمظهر (كاللون والتشقق وتعفن نهايات الأزهار (blossom – end- rot) وما إلى ذلك) ووجود المركبات المحفزة والمحسنة للصحة (health promoting compounds) (كمضادات الأكسدة (antioxidants)). إذا ظلت النماذج غير متوافرة لمعظم متغيرات الجودة هذه، يمكن ربط بعضها بالكربون والماء أو تدفق العناصر المعدنية للثمار^(٧٤) والتي تتوافر لها نماذج (انظر الأقسام السابقة لهذا الفصل والشكل رقم ١، ٥). على سبيل المثال، يمكن ربط المحتوى من السكر بتوافر الكربون (لكن لا يمكن ربط المحتوى من الحموضة والرائحة بذلك^(٧٥))، وقد ربط تكرار تشقق قشرة الثمار بحالة ماء

المحصول^(٧٥)، وربط وجود تعفن نهايات الأزهار بتدفق الكالسيوم المنقول بواسطة شبكة الجزء الخشبي (xylem network)^(٧٦).

(٥,٧) التفاعلات مع الآفات والأمراض

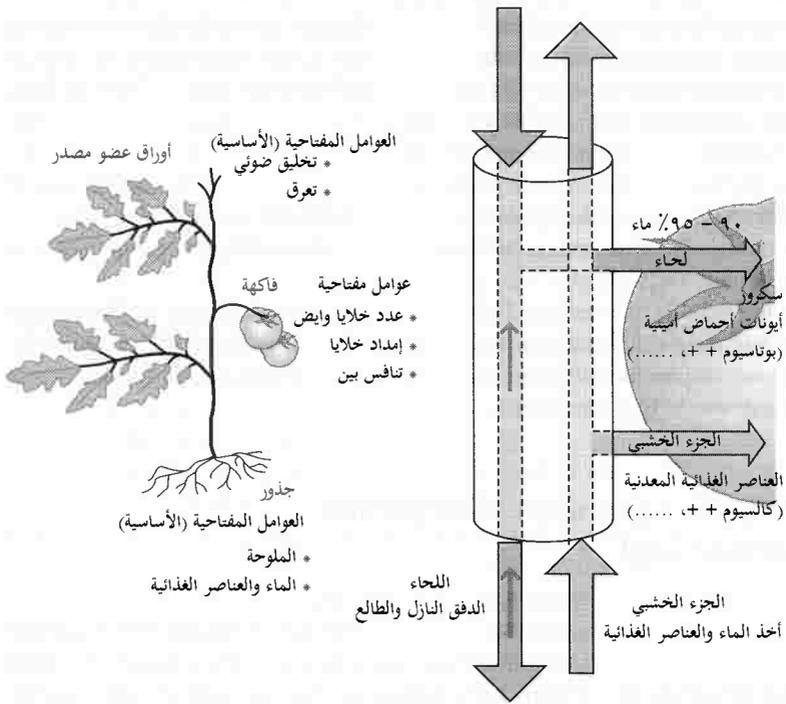
Interactions with Pests and Diseases

تتوافر قليل من نماذج المحاكاة للآفات والأمراض بالرغم من أن آثارها ذات أهمية كبرى في أنظمة إنتاج محاصيل الطماطم، وذلك فيما يتعلق بالاهتمامات البيئية والصحية راجع سيجهي وآخرين (Seghi et al.)^(٧٧) بعض النماذج التجريبية (empirical models) التي تتنبأ بالأمراض من البيانات (المعلومات) المناخية في تصنيع محاصيل الطماطم. في السبعينيات (1970)، تم تصميم نموذج الفاصت (FAST model) ليتنبأ بشدة أو وحدة مخاطر تفشيات الآفات المبكرة (Early blight outbreak) (اللاتيناريًا سولاني *Alternaria solani*)^(٧٨). تم تقييم المخاطر من نماذج تتنبأ بالندى (predicting dew) (محفز لتكون الجراثيم favorable to spore formation) وبالأمطار (محفزة لتكون الجراثيم والعدوى) (and infection) يعتمد هذان النموذجان على عدد من منظومات بيانات الجو (المناخ) (sets of weather data): امتداد فترات (أوقات) البلل (wet periods)، ودرجة حرارة الهواء أثناء هذه الأوقات الرطبة لنموذج الندى (dew model)، والأمطار ودرجة الحرارة وامتداد أوقات الرطوبة العالية (duration of high humidity) أثناء الأسبوع لنموذج الأمطار (rain model). تم دمج نموذج إنذار بالأمراض (disease-warning model) آخر، مع نموذج الـ FAST. اعتماداً على درجة حرارة الهواء ووقت (فترة) ارتفاع الرطوبة (time of high humidity) يتنبأ هذا النموذج بتفشيات الآفات المتأخرة (outbreaks of late blight) (الفايثوفاتوبورا انفيستانس *Phytophthora infestans*). في التسعينيات (1990s) تنبأ الـ CU-FAST بكل من حلقات (دورات

episodes) الآفات المبكرة والانتشاراكنوز (anthracnose) (الكولبتوتريكيوم كوكسوديس (*Colletotrichum coccodes*))^(٧٨). ويقدر هذا النموذج فترة البلل (الرطوبة duration of wetness) اعتماداً على الأمطار وامتداد فترات الرطوبة العالية (high humidity) والرطوبة الدنيا اليومية (minimum daily humidity). وفي خطوة للأمام، تم تطوير نموذج الـ TOM-CAST للسيطرة على الآفات المبكرة الـ anthracnose والسيبتوريا المنقطعة للأوراق السيبتوريا ليكوبيرسيسسي (*Septoria lycopersici*) (Septoria leaf spot). يتطلب نموذج الـ FAST المعدل فقط، تشغيل نموذج الندى^(٧٨). ومخرجات كل هذه النماذج متغيرات تعمل على تجميع وتراكم قيم التدرج اليومي (variable cumulating the daily rating values) لحدة المخاطر. أدخل باترسون ونوكيس (Patterson & Nokes)^(٧٩) للـ TOM-CAST نموذجاً لمبيد الفطريات (Fungicide) (الكلوروثالونيل (Chlorothalonil) والذي يبقى ثابتاً عالقاً بأوراق نباتات الطماطم (persistence on tomato foliage)).

حدد نيكوت وبايللي (Nicot & Baille)^(٨٠) في مراجعتهم للسيطرة على العفن الرمادي (grey mould) (البوتريتيس سنييريا (*Botrytis cinerea*)) في البيوت الزجاجية للطماطم فقط، عدداً قليلاً من نماذج البيوت المحمية للخضراوات، صمم أحدهما للتنبؤ بالوبائيات الفطرية (fungus epidemics) التي تصيب الخيار (cucumber) في بيت محمي مسخن، والآخر لمحاكاة إنبات الجراثيم (simulate spore germination) على أوراق الطماطم. ونادراً ما تتم نمذجة تفاعل ممرضات المحصول (crop pathogen interactions). على سبيل المثال، قدر تأثير المرض على منتج محصول الطماطم والذي تسببه السيبتوريا ليكوبيرسيسسي (*Septoria lycopersice*): تمت ملاحظة علاقة خطية جيدة بين محصول الطماطم وطول فترة مساحة الأوراق السليمة (healthy leaf area duration)^(٨١). نماذج الآفات نادرة، أيضاً: ومثال لنموذج أبحاث يماثل علاقة الطفيل -

العائل (parasitoid-host relation) بين الانكارسيا فورموسا (*Encarsia formosa*) والذبابة البيضاء (green-house whitefly) المحمية (Trialeurodes vaporariorum) وأثرها على محصول الطماطم، بواسطة فان رويرموند وآخرين (van Roermund et al.)^(٨٢).



الشكل رقم (٥، ١). العوامل الأساسية المؤثرة على تدفق الماء والكربون والعناصر الغذائية من الأعضاء المصدر إلى

الثمرة في نبات الطماطم (Reproduced from Guichard et al (2001)).

ظل حقل وقاية النبات حقلاً للتطور المتميز لقواعد المعرفة (المعلومات

knowledge bases) والتي كثيراً ما تصمم لأغراض التشخيص (diagnosis purposes).

الـ Boutou والـ HYPP^(٨٤) مثالان لقواعد البيانات (databases) للتعرف على الممرضات والآفات والأعشاب الضارة كالطحالب (weeds) لمدى من أنواع المحاصيل ، بما في ذلك الطماطم.

(٥,٨) حقول التطبيق: توقعات الناتج وإدارة المحصول

Areas of Application Yield Prediction and Crop Management

يمكن تعريف الإدارة بأنها سلسلة ثلاث عمليات (sequence of three operations) التخطيط (planing) الإنفاذ أو التنفيذ ، التطبيق (implementation) الضبط / السيطرة (control). وتحدد عملية التخطيط (planning operation) الإستراتيجية التي تتضمن الأهداف المحددة لنظام زراعة المحصول (cropping system) والوسائل أو الطرق التي بواسطتها تتحقق تلك الأهداف. الإنفاذ يعني ترجمة الإستراتيجية إلى أفعال بينما تضمن السيطرة أو يضمن الضبط والتطبيق السليم لهذه الأفعال بمراقبة العملية/ العمليات مراقبة مستمرة ومراجعة أنماط التطبيق الفعال.

عملية اتخاذ القرار المؤدية إلى تحديد الأفعال التي يجب القيام بها ، عملية معقدة. وتعتمد هذه العملية على العوامل الخارجية غير المتحكم أو غير المسيطر عليها ، وعلى التفاعلات بين المحصول وبيئته ، كما تعتمد على معرفة حالة المحصول.

وبالنظر في هذا ، فإن أول تطبيق لنماذج المحاصيل هو توفير المعلومات والتي من غير ذلك لا يستطيع المزارع الحصول عليها بسهولة ، إما بسبب عدم توافر نظام قياس (measurement system) وإما بسبب أن تكاليف الحصول على المعلومات قد تكون عالية. التطبيق الثاني هو تمثيل عمليات المحصول في روتين الوضع الأمثل (optimisation routines) (للعمليات الزراعية). في الأقسام الفرعية (subsections) التالية يقدم استعراض شامل (overview) للأعمال الحالية المستخدمة للنماذج الموفرة للمعلومات

(إدارة المحصول والوقاية) وعمليات ممثلة (process representations) للسيطرة على المناخ والتسميد بالري وضبطهما (Climate and fertigation control).^[1]

تختلف الحاجة للتنبؤ بالإنتاج باختلاف نظام زراعة الطماطم (tomato cultivation system). في الإنتاج الحقلية (للطماطم)، يتم اختيار الأصناف المحددة (determinate cultivars) للحصول على نضج ثمار (fruits ripe) لحصدة واحدة (single harvest). يتم التنبؤ بالوقت المتوقع للحصاد (expected time of harvest) والكمية المتوقعة من المنتج، ذلك للتمكن من التخطيط المتكامل (integrated planning) للإنتاج والتصنيع. على سبيل المثال، قدر ولف وآخرون^(٨٥) (Wolf et al.) أوقات الإنبات والإزهار (flowering) ومرحلة التحول (turning stage) والحصاد للطماطم القابلة للتصنيع اعتماداً على مجموع (ذروات) الحرارة (التسخين heat sums). وذهب ماكنيال وآخرون (McNeal et al.)^(٨٧) إلى أبعد من ذلك خطوة، وتنبأ بكتلة الثمار عند الحصاد مستخدماً نموذج محصول طماطم بيوت محمية (TOMGRO) موطن ومتأقلم مع الأحوال الحقلية (adopted to field conditions). في إنتاج البيوت المحمية (الخ)، يخطط الناتج (yield) منذ فترة طويلة من الوقت. في المفاوضات مع البائعين، على المزارعين أن يقدروا على إعلان إنتاجهم الأسبوعي قبل عدة شهور قادمة. ولهذا الغرض، فقد طور نموذج محصول طماطم بسيط يعرف بالـ (TOMPOUSSE) ليتنبأ بالناتج الأسبوعي ومتوسط درجات الثمار (average fruit grade)، وذلك باستخدام معلومات متوافرة في المزرعة.^(٤٩) ويمكن استخدام نفس النموذج كمثال لتقييم الإستراتيجيات المختلفة لإدارة المحصول للتشذيب (truss pruning) والإغناء بثاني أكسيد الكربون (CO₂) enrichment والتغيرات في كثافة الجذع (changes in stem density). وقد استخدم دي كونينج (De Koning)^(٥٥) مدخلاً مشابهاً في نموذج تقسيم المادة الجافة (dry matter partitioning) وذلك لجعل كثافة البراعم وعدد الثمار لكل نبتة في معدلاتها القصوى المثلى (optimize shoot density and number of fruit per plant).

مازالت نماذج المحصول هذه ، والمستخدم لتقييم المآلات أو العواقب الحيوية أو العواقب (biological consequences) لسياسات إدارة المحصول ، بعيدة عن أنظمة دعم اتخاذ القرار الحقيقية الفعلية (real decision support systems DSS) ولهذا الغرض ، يجب أن تصف هذه النماذج ، ليس فقط ، ديناميكيات المحصول وبيئته الفيزيائية (مناخ البيت المحمي و/أو التربة) ، ولكن يجب أن تصف عملية اتخاذ القرار (decision-making process) نفسها وتفاعلاتها مع النظام البيوفيزيائي (biophysical system) ، أيضاً. على سبيل المثال ، نظام الـ GXL SIM^(٨٧) برنامج مماثل للبيت المحمي والذي يمكن أن يحدد قواعد القرار التي يستخدمها المزارع لتطبيق منظومات المناخ (climate settings) للمناخ الحالي (current climate) وأحوال المحصول.

في مشروع الـ CONCERTO^(٨٨) ، صمم نموذج ديناميكي لنظام إنتاج البيوت المحمية (greenhouse production) ، ولهذا النموذج ثلاثة مكونات : نظام القرار (اتخاذ القرار) ، ونظام التعليمات - لل- الأفعال (instructions -to- actions system) والنظام البيوفيزيائي. يصف نظام اتخاذ القرار إستراتيجية الإدارة (management strategy) (المناخ والعمليات اليدوية (manual operations) مثل تشذيب الثمار والأوراق ، والتدريب والحصاد) المطبقة في فترة الزراعة إدراكاً للأهداف الإنتاجية. يحول نظام التعليمات - لل- الأفعال القرارات إلى أفعال بواسطة الأنظمة الآلية (automatons) (أنظمة السيطرة على المناخ والتسميد بالري) والعمال. ويشتمل النظام البيوفيزيائي على مناخ البيت المحمي ونموذج محصول الطماطم (TOMGRO)^(١٦٠ ، ٥٩) والمنفذ في إطار (هيكل) موجه شكلياً (object-oriented framework)^(٨٩) . توفر المخرجات ليس فقط المعلومات عن الأداء الفيزيائي والحيوي للنظام تحت منظومة أفعال (set of actions) ، ولكن توفر مؤشرات (indicators) لمثل حيوية النبات (plant vigour) أو توقعات الأحداث المهمة

(predictions of important events) مثل الإزهار أو نضج الثمار، والتي تعتبر مفيدة لنظام اتخاذ القرار.

(٥,٩) حقول التطبيق: السيطرة على المناخ

Areas of Applications Climate Control

يضم فهمنا للسيطرة على المناخ والمعتمدة على النماذج (model-based climate control) كل المداخل (المعالجات)، حيث تحدد نقاط - ضبط المناخ الجديدة (new climate set-points) باستخدام مخرجات المعلومات (information output) من النموذج أو المعرفة المضمنة في النموذج نفسه. ربما أن الضبط الأمثل (optimal control) هو الطريقة الأكثر أو الأوسع استخداماً لاستغلال النماذج المتوافرة وتحديد الظروف أو الأحوال البيئية المثلى للمحصول.^(٩٠-٩٢) أيضاً، تتطلب تطبيقات ضبط المناخ لنماذج المحصول ضمن إطار السيطرة المثلى، نموذج مناخ بيت محمي، لأن متغيرات الضبط أو السيطرة تعدل المناخ بشكل مباشر. إن سلوك النبات (plant behaviour) مدفوع بشكل غير مباشر، من خلال استجاباته، بتعديلات البيئة.

وفي أشكالها الأكثر بساطة تعرف مشكلة الوضع الأمثل للمناخ (climate optimisation problem) كما يلي: باستخدام نموذج تجميع المادة الجافة للمحصول (crop dry matter accumulation model) وتعبيراً جبرياً (algebraic expression) لنموذج مناخ البيت الأخضر، أوجد درجة حرارة النهار والليل (day-and night-time temp) التي توصل معامل التكلفة لأقصى مدى (maximise a cost function) ومحقة لتوازن معدل النمو النسبي (relative growth rate) وتكاليف التسخين (heating costs) ويمكن تضمين الإغناء بثاني أكسيد الكربون، أيضاً). أوضح جال وآخرون (Gal et al)^(٩٣) وسيجينر (Seginer)^(٩٤،٩٥) وآخرون (Seginer et al.)^(٩٦) وكريتين (Critten)^(٩٧) إمكانية

وصف المحلول الأمثل (optimal solution) بأنه معامل مباشر (direct function) بصفة مستقلة (independently) وفي الأحوال العملية يسهل هذا من حساب الجداول البصرية خارج الحاسب الآلي (offline computation of lookup tables) التي تشير إلى الأفعال الواجب القيام بها في الأحوال الحالية (القائمة) أو توضيحها. درس سيتجينر وآخرون (Seginer et al.)^(٩٢) مشكلة الوضع الأمثل لدرجة الحرارة (temp optimization problem) فقط بالاعتماد على احتياجات النبات. وقد استخدم هؤلاء الباحثون نموذجاً ديناميكياً (dynamic model) لتوازن الكربون للمحصول بمخزون كربوهيدرات مؤقت (temporary carbohydrate pool) لزيادة درجات حرارة النهار والليل التي ترفع معدلات النمو النسبية إلى أقصاها، ذلك لدفق إشعاعي يومي محدد (given daily radiative flux) والنتائج هي أن المحصولات الصغيرة (النباتات) تحتاج لدرجات حرارة أعلى مقارنة بالمحصولات الكبيرة إذ إن معدل تنفس الخطط (maintenance respiration) يكون أعلى وأنه يكون لحالة معينة تكون أزواج درجات الحرارة النهارية والليلية (daily and night temperature are optimal) خلالها في المعدلات المثلى.

استخدم تاها ميتشيان وآخرون (Tchamitchian et al)^(٩٨) وتاب وآخرون (Tap et al)^(٩٩) نموذج بيت أخضر ديناميكى (dynamical greenhouse model) بدلاً من النموذج الجبري (الحسابي algebraic) لإدخال إخماد درجة الحرارة (damping of temperature) الذي تسببه التركيبات الموجودة في البيت الأخضر. وقد ثبت أن حل مشكلة المناخ، كان ذلك للطماطم أو للخس، على التوالي، مشكلة عددية صعبة نوعاً ما (rather difficult numerical problem).

لمقارنة النموذج الديناميكى لمناخ البيت الزجاجي (المحمي) مع نموذج نمو الخس (leff uce growth model) استخدم فان هينتين (Van Henten)^(١٠٠) المدخل الأحادي

التشويشي (singular perturbation approach) ^(١٠) لحل مشكلة النماذج بأقذار مختلفة لثوابت (معامل) الوقت (different magnitudes of time constants).

يستخدم التطور، وللتقدم الجديد في هذا الحقل للتاب (Tap) الاتصال الشخصي (personal communication) نفس الطريقة كنموذج مبسط لمحصول الطماطم ومن ثم يمكن تحقيق التحكم اليومي في المناخ بجعله في أمثل معدلاته (ما يسمى بالعمليات السريعة) مع معوقات التحكم لأمثل وأفضل المعدلات على المدى البعيد (long-term optimisation) لإنتاج المحصول (ما يسمى بالعمليات البطيئة).

بالرغم من دراسة كثير من التطبيقات النظرية (theoretical applications) لنماذج السيطرة على المناخ، إلا أن قليلاً منها قد أخضع للاختبار عملياً، والسبب التقني هو أنه عند كتابة هذا الكتاب، فإن السيطرة المثلى تنتج نقاط ضبط (set-points) مختلفة الأوقات (time-varying) والتي لا يمكن تطبيقها في حسابات مناخ البيوت المحمية التجارية.

(٥، ١٠) حقول التطبيق: الري والتسميد

Areas of application : Irrigation and Fertilisation

في كل من الإنتاج الحقلية وإنتاج البيوت المحمية، هناك ضغط متزايد لتحسين سياسات الري والتسميد واللذين يجب أن يحققا أهداف الإنتاج والجودة وتفاذي فواقد العناصر الغذائية في البيئة. وعند كتابة هذا الكتاب، استخدمت الطرق التجريبية (empirical methods) والتي يجب تحسينها بنماذج آلية (mechanistic models) يتم تطويرها. يجب أن يستوفي المحصول بمطالباته من المياه في الزراعة بدون تربة (soil-less culture) عادة يتم حساب الري اعتماداً على قياسات الإشعاع. وقد تم تأسيس عدة علاقات بين مأخوذ المحصول من الماء (crop water uptake) والإشعاع الساقط،

للطماطم وبالمثل لمحاصيل الخضروات الأخرى (روجعت الصيغ بواسطة جوليت (Joliet) ^(٢٥)). ويجب أخذ ال VBD في الاعتبار عندما لا يقترن الإشعاع مع ال VPD ، على سبيل المثال ، عند تغيير الأحوال المناخية وعندما تستخدم أنظمة السيطرة على المناخ مثل الستائر الحرارية (thermal screens) أو أنظمة الضباب (fog systems) ^(٣٢) تعتمد متطلبات الماء على معامل المحصول (crop coefficient) الذي يرتفع مع تطور مساحة الأوراق (leaf area development) في مزارع التربة (منابت التربة (soil culture)) يجب إعطاء اعتبار لتوافر الماء في حجرات أو فضاءات التربة (water compartments): ويعتمد ذلك على الخصائص الهيدروليكية (المائية (hydraulic properties)) للتربة وعلى تطور الجذور. في الحقل ، يجب أن يدخل تدفق المطر (rain flux) في توازن الماء (water balance).

في البيوت المحمية ، تستخدم الحاسبات الآلية لمراقبة الإشعاع وللسيطرة على كمية الماء الذي يوفر للأنظمة المفتوحة (open systems) (على التربة أو بدون تربة) ، ذلك التعرق التبخري المسحوب (calculated evapotranspiration) زائداً حوالي ٢٥٪ فاقد سريان (run-off) لتفادي تركيز الملح في مادة تفاعل الجذور (root substrate) في الأنظمة المقفولة بدون تربة (closed soil-less systems) ، يجب أن يتناسب أو يقابل مدخل الماء (water in put) متطلبات المحصول (الطماطم) منه ، وذلك للمحافظة على الحجم الكلي لمحلول العناصر التغذوية الدائر (circulating nutrient solution) في الحقل صممت نماذج ال DSS لحساب إمداد الماء المضبوط ، على سبيل المثال ، نظام (برنامج) معلومات الحاسب (IRRIGERE software) المصمم لطماطم الحقل يقدر التعرق التبخري (evapotranspiration) اليومي من تطور المناخ والمحصول واحتياطي ماء التربة (soil water reserve) من خصائص التربة وعمق الجذور (root depth) ^(١٠٣) لا يفى الري بمتطلبات المحصول عندما يكون ضغط الماء (water pressure) مطلوباً لرفع الجودة

(المحتوى من المادة الجافة) من الثمار. وفي هذه الحالة ، يكون الهدف هو استنزاف الماء (exhaust the water) الموجود في حيز الجذور (root zone) عند الحصاد. مع هذه المعوقات ، يوصى بالري عندما ترتفع جرعة إمداد الماء (water in dose gets) إلى أعلى من القيمة الحدية (threshold value) البالغة ٣ ملم (3mm).

وقد جرت قليل من المحاولات لوضع إستراتيجيات تسميد (fertilization strategies) باستخدام نماذج متطلبات المحصول ، حتى في المزارع الخالية من التربة. في نظام الزراعة هذا ، عادة توفر العناصر الغذائية بكميات زائدة مع الماء. عليه ، لا مجال للسيطرة على نمو المحصول أو على جودة المنتج من خلال تنظيم التسميد عن طريق الري (fertigation). اقترح مارسيليس وآخرون (Marcalis et al.)^(١٠٣) الجمع بين النماذج والحساسات (المستشعرات (sensors)) من أجل جعل إمداد العناصر التغذوية في أفضل وأمثل مستوياته في الأنظمة المغلقة.

(٥, ١١) حقول التطبيق : وقاية النبات

Areas of application: plant protection

صممت النماذج الوبائية المعروضة مبكراً في هذا الفصل (explicitly designed) ، لبناء أنظمة منذرة بالأمراض (disease - warning) على سبيل المثال ، تم تطبيق نموذج الـ TOM-CAST في شرق أمريكا الشمالية (eastern North America) في شبكات جمعيات مزارعي الطماطم (networks grouping tomato growers) والعمليات الصناعية (processing industry) والخدمات الإرشادية (extension services) والجامعات. يمكن أن يتم استشعار (إرصاد) المناخ (الجو) (weather sensing) أتوماتيكياً أو يدوياً (manual) ، وتتم مركزة المعلومات (date are centralized) ويتم نشر وتوعية المزارعين حول شدة وحادّة الأمراض (disease severity) وحول رش مبيدات الفطريات (fungicide spray) ، وذلك عن طريق الهاتف والفاكس. ولمكافحة الآفات ، يمكن استخدام النموذج المصمم

بواسطة فان رويرماند وآخرين (van Roermand et al)^{١٢} لتقييم إستراتيجيات فسح الحشرات لمضادات الطفيليات (parastoid release) للمكافحة الحيوية تحت الظروف المناخية المختلفة.

بإستراتيجيات وقاية النبات هذه، يمكن رش مبيدات الفطريات، وإطلاق الحشرات (insect release) أو السيطرة على المناخ. وفي هذا الحقل الأخير، اقترح كوزايا (Kozai)^(١٠٤) استخدام المعارف الهندسية (knowledge engineering) ومن ثم تم الاعتراف به في نظام الـ Serriste للخبراء^(١٠٥) الذي يكون فيه منع العفن الرمادي (gray mould) معوقاً أساسياً لاختيار وقت مسار درجة الحرارة والرطوبة المضبوطتين (proper time-course of temperature and humidity) في البيوت المحمية.

أخيراً، لقد أصبح من الممكن السيطرة على حالة النظام بقواعد المعرفة (knowledge bases) المستخدمة للتشخيص. طور بلانكارد وآخرون (Blancard et al)^(١٠٦) وجولياني وجوثيار (Guay and Gauthier)^(١٠٧) أنظمة خبراء للتعرف على أمراض الطماطم.

(٥, ١٢) التطورات الحالية والمستقبلية في النمذجة

Current and Future Developments in Modelling

من هذا العرض الشامل للعمليات المختلفة لإنتاج الطماطم والتي تمت نمذجتها، اتضح أن مدى واسعاً من الطرق قد تم تحريكه لتصميم وتخطيط البحوث أو النماذج الهندسية وفي مجال الكربون بدرجة أقل. وفي مجال أخذ الماء والعناصر التغذوية، فقد فضلت المداخل الآلية، في أحيان كثيرة، وقد بذلت جهود كبيرة وكثيرة لتكوّن المحصول، وقد اعتمدت في غالب الأمر على تكامل المساحات (space) والوقت للتمثيل الضوئي الصافي (net photosynthesis) ويمكن الحصول على النواتج العملية لهذه البحوث (practical outputs of these research) في نماذج السيطرة على مناخ البيوت

المحمية وعلى الري وعلى التسميد، وكذلك السيطرة على إدارة المحصول. وقبل استخدام النماذج لتصميم الإستراتيجيات أو اتخاذ القرارات وإنتاجها، لابد من تبسيطها في أحيان كثيرة.

وفي حقول جودة الفواكه أو الثمار وحماية المحصول، فقد قادت تعقيدات العمليات المتضمنة (في الإنتاج) وبدرجة كبيرة متزايدة، إلى تصميم نماذج إحصائية أو نماذج مساعدة على الكشف (statstical or heuristic models). ومما يثير الاهتمام، أن عدم توافر المعارف الآلية (الهندسية (mechanistic knowledge)) لم يكن معوقاً أو محداً لتطوير التطبيقات. وقد أعطت الأولوية للنماذج الهندسية فيما يتعلق بالسيطرة على أحوال ما بعد الحصاد (post-harvest conditions) والسيطرة على عمليات وقاية النبات المتكاملة (integrated crop production) ولهذا السبب فقد حفظ مستوى تعقيدات هذه النماذج في معدلات الكفاية، أي التماشي أو التوافق مع الحاجة للمعلومات لبناء (صنع) إستراتيجيات الإدارة. وعلى أي حال، ما زال الفهم الضعيف أو غير الكامل لبعض العمليات معوقاً ومن المحذات (لوضع إستراتيجيات) على سبيل المثال، لم يتم وصف أو تشكيل العلاقة بين إدارة المحصول قبل الحصاد (pre-harvest crop management) وجودة الثمار الناضجة، بوضوح. وبالتالي، ما زالت توجد فقط، ارتباطات بسيطة (minor connections) بين ضبط المناخ تحت الغطاء وبين التسميد بالري، وكذلك بين الوصول لجودة الثمار عند الحصاد وبعده.

إن التحدي المائل أمام بستنة الخضروات (vegetable horticulure) هو تحسين وضمان الاستدامة (sustainability) إلى هذا الحد (to this end) ومعالجة منظومة المعوقات والعقبات التي جمعت في إطار مشكلة الإنتاج المتكامل (framework of integrated production) يجب أن يكون مفهوم الجودة عالمياً (global) وذلك بتكامل جودة المنتج الخارجية (external product quality) وهي الوحيدة التي تعطي اعتباراً من قبل السوق في معظم الأحوال^(٢٠٠)، وجودة المنتج الداخلية (internal product quality) والجودة البيئية (ecological quality) للإنتاج والتصنيع والجودة الأخلاقية والاجتماعية الاقتصادية

(ethical and socioeconomic quality) للإنتاج والتصنيع وظروف العمل (working conditions) للناس المعينين^(١٠٨) عليه، يجب أن تعمل النماذج والـ DSS على مزيد من الجمع للأبعاد المختلفة لأنظمة زراعة وإنتاج الخضروات (vegetable cropping system). ويبدو من بعض المعالجات أن المدخلات للنمذجة (modelling approaches) قد طبقت تطبيقاً جيداً وحققت أهدافها. على سبيل المثال، مشروع الـ ERRISTE^(١٠٩، ١١٠) فقد هدف إلى استخدام التقنيات الذكية الصناعية (ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES) وذلك لتمثيل المعرفة المتضمنة في كل من إدارة مناخ البيوت المحمية واستجابة المحصول.

تمثل المعرفة بعلم المحاصيل (agronomical knowledge) والمتحصلة من مجموعة خبراء من خلال منظومة متغيرات ومنظومة معوقات ترتبط بهذه المتغيرات (set of constraints) على سبيل المثال يمكن الحصول على متوسط درجة الحرارة اليومية المستهدفة بواسطة:

● حوسبة درجة الحرارة المثلى من الإشعاع المتوافر المتوقع (forcasted available radiation).

● عمل تعديلات لـ صنف الطماطم.

● تثبيت نافذة درجة حرارة مئوية واحدة حول هذه القيمة وفقاً للحالة الحيوية للمحصول.

ويعبر عن المعوق بالجمع الخطي (Linear combination) والذي توجه نتائجه نحو مكون مثال غير واضح (fuzzy domain). مثال على ذلك: يجب أن يرجع فرق درجات الحرارة بين النهار والليل (جمع خطي) إلى مدى يمتد من ٢م° إلى ٥م°، القيم التي يمكن تغييرها اعتماداً على الأحوال السائدة وقتها (أي يحدد اللوغاريتم constraint satisfaction algerithem منظومات القيم المتغيرة (set of variable values) والتي تقابل (تعالج) كل المعوقات.

تخلط (تجمع) المعارف المعلنة declared knowledge والنماذج الحاسوبية في ما يعرف أو يسمى قاعدة المعرفة (knowledge base) وقد أثبتت خلال سنتين من التجارب في محطات التجارب (experimental stations) في ثلاثة أقاليم فرنسية الجردوى والنجاح النباتي (feasibility and agronomic success) للمعالجات .

ووفقاً لبرهان جيويرين ودوماس (Guerrin and Dumas)، فإن الجمع بين النماذج المعلنة والحاسوبية، يُمكن من مدى النظام الذي يُمكن وصفه وصفاً عاماً بالمجال (scope of the system) وبالتالي قد يكون طريقاً لربط مختلف أنواع النماذج التي حددت في هذا الاستعراض. زد على ذلك وفي كثير من الأحيان، قد يكون بناء نموذج إعلاني (declarative model) أسرع وأرخص من العمل التجريبي والنظري والذي قد يكون مطلوباً للحصول على نموذج عددي لنفس العمليات. وعلى أي حال، ما زال تصميم النماذج الهجين (hybrid models) لدعم إدارة المحصول عملاً محدوداً.

(١٣، ٥) مصادر مزيد من المعلومات والنصائح

Sources of Further Information and Advice

لمزيد من المعلومات، يمكن للقراء الرجوع إلى بعض الكتب العامة التي تتحدث عن محصول الطماطم^(١١٢) والزراعة في البيوت المحمية^(١١٣، ٥). نشرت مجلة علوم البساتين (Scientia horticulture) موضوعاً خاصاً حول نمذجة المحصول في البستنة (الموضوع ١-٢، ٧٤-١٩٩٨ م (1998 74, issue 1-2)) مقالا حول الزراعة في البيوت المحمية، البيئة وجودة المنتج، *Agronomie on "greenhouses, environment and product Quality* (العدد ٢٠٠١٢١، ٤، (200121, issue 4)) تنظم مختلف الأقسام (sections) والهيئات (commissions) ومجموعات العمل (working groups) للجمعية العالمية لعلوم البساتين (International Society of Horticulture) (Sciences (ISHSI) لقاءات علمية وتصدر أعدادا لمجلة أكتا البستانية (*Acta Horticulturae*))

تتناول موضوعات مرتبطة بالاستعراض الحالي الذي نحن بصددده (انظر موقع
الـ (www.ishs.org).

(٥, ١٤) المراجع

References

- (1) UN/ECE, *UN/ECE Standard for Tomatoes (FFV-36)*, Working party on standardization of perishable produce and quality development, 56th session, Add. 14, Genova, UN/ECE, 2000, 7 pp.
- (2) FAO/WHO, *Codex Standard for Processing Tomato Concentrates (CODEX STAN 57, 1981)*, Rome, Codex Alimentarius Commission, 1981, 6 pp.
- (3) GARY C, JONES J W and TCHAMITCHIAN M, 'Crop modelling in horticulture: state of the art', *Scientia Hortic*, 1998 74 3-20.
- (4) BAILLE A, 'The energy cycle', in *Greenhouse Ecosystems*, eds Enoch Z and Stanhill G, Amsterdam, Elsevier, 1999, 265-86.
- (5) BAKKER J C, BOT G P A, CHALLA H and VAN DE BRAAK N J, *Greenhouse Climate Control, an Integrated Approach*, Wageningen, Wageningen Pers, 1995.
- (6) GARY C and BAILLE A, 'The carbon cycle', in *Greenhouse Ecosystems*, eds Enoch Z and Stanhill G, Amsterdam, Elsevier, 1999, 287-301.
- (7) PASSIOURA J B, 'Simulation models: science, snake oil, education, or engineering?' *Agron J*, 1996 88 690-4.
- (8) LONGUENESSE J J, GARY C and TCHAMITCHIAN M, 'Modelling CO2 exchanges of greenhouse crops: a matter of scales and boundaries', *Acta Hortic*, 199332833-47.
- (9) GIJZEN H, 'CO2 uptake by the crop', in *Greenhouse Climate Control, an Integrated Approach*, eds Bakker J C, Bot G P A, Challa H and Van de Braak N J, Wageningen, Wageningen Pers, 1995, 16-35.
- (10) ACOCK B, CHARLES-EDWARDS D A, FITTER D J, H and D W, LUDWIG L J, WARREN WILSON J and WITHERS A C, 'The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy photosynthesis: an experimental examination of two canopy models', *J Exp Bot*, 197829815-27.
- (11) THORNLEY J H M, *Mathematical Models in Plant Physiology*, London, Academic Press, 1976.
- (12) SPITTERS C J T, 'Separating the direct and diffuse component of global radiation and its implication for modelling canopy photosynthesis. II Calculation of canopy photosynthesis', *Agric For Meteorol*, 198638231-42.
- (13) BERTIN N and HEUVELINK E, 'Dry-matter production in a tomato crop: comparison of two simulation models', *J Hortic Sci*, 199368995-1011.
- (14) GIJZEN H, 'Interaction between CO2 uptake and water loss', in *Greenhouse Climate Control, an Integrated Approach*, eds Bakker J C, Bot G P A, Challa H and Van de Braak N J, Wageningen, Wageningen Pers, 1995, 51-62.
- (15) CRITTEN D L, 'A review of the light transmission into greenhouse crops', *Acta Hortic*, 1993 3289-32.
- (16) JONES J W, DAYAN E, ALLEN L H, VAN KEULEN H and CHALLA H, 'A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO)', *Trans ASAE*, 1991 34663-72.

- (17) HEUVELINK E, 'Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development' , *Ann Bot*, 1999 83 413-22.
- (18) GARY C, LE BOT J, FROSSARD J S and ANDRIOLO J L, 'Ontogenic changes in the construction cost of leaves, stems, fruits and roots of tomato plants', *J Exp Bot*, 1998 49 59-68.
- (19) GENT M P N and ENOCH H Z, 'Temperature dependence of vegetative growth and dark respiration: a mathematical model' , *Plant Physiol*, 1983 71 562-7.
- (20) GARY C, 'A simple carbon balance model simulating the short-term responses of young vegetative tomato plants to light, CO₂ and temperature', *Acta Hort*, 1988 229 245-50.
- (21) GARY C, 'Interest of a carbon balance model for on-line growth control: the example of a daylight dependent night temperature control', *Acta Hort*, 1989 248 265-8.
- (22) SEGNER I, GARY C and TCHAMITCHIAN M, 'Optimal temperature regimes for a greenhouse crop with a carbohydrate pool: a model study', *Scientia Hort*, 1994 60 55-80.
- (23) JONES H G and TARDIEU F, 'Modelling water relations of horticultural crops: a review', *Scientia Hort*, 1998 74 21-46.
- (24) VAN DE SANDEN PAC M, 'Water balance', in *Greenhouse Climate Control, an Integrated Approach*, eds Bakker J C, Bot G P A, Challa H and Van de Braak N J, Wageningen, Wageningen Pers, 1995, 35-50.
- (25) JOLLIET O, 'The water cycle', in *Greenhouse Ecosystems*, eds Enoch Z and Stanhill G, Amsterdam, Elsevier, 1999, 303-26.
- (26) VAN IEPEREN W, *Consequences of Diurnal Variation in Salinity on Water Relations and Yield of Tomato*, Thesis, Wageningen Agricultural University, 1996.
- (27) GUICHARD C, GARY C, LONGUENESSE J J and LEONARDI C, 'Water fluxes and growth of greenhouse tomato fruits under summer conditions', *Acta Hort*, 1999 507 223-30.
- (28) FISHMAN S and GENARD M, 'A biophysical model of fruit growth: simulation of seasonal and diurnal dynamics of mass', *Plant Cell Environ*, 1998 21 739-52.
- (29) LEONARDI C, BAILLE A and GUICHARD S, 'Predicting transpiration of shaded and non-shaded tomato fruits under greenhouse environments', *Scientia Hort*, 2000 84 297-307.
- (30) STANGHELLINI C, 'Vapour balance', in *Greenhouse Climate Control, an Integrated Approach*, eds Bakker J C, Bot G P A, Challa H and Van de Braak N J, Wageningen, Wageningen Pers, 1995, 141-50.
- (31) BOULARD T, BAILLE A, MERMIER M and VILLETTE F, 'Mesures et modelisation de la resistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre', *Agronomie*, 1991 11 259-74.
- (32) BOULARD T and JEMAA R, 'Greenhouse tomato crop transpiration model. Application to irrigation control', *Acta Hort*, 1993 335 381-7.
- (33) WARREN WILSON J, HAND D W and HANNAH M A, 'Light interception and photosynthetic efficiency in some glasshouse crops', *J Exp Bot*, 1992 43 363-73.
- (34) PAPADOPOULOS A P and PARARAJASINGHAM S, 'The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): a review', *Scientia Hort*, 1997 69 1-29.
- (35) GIJZEN H and GOUDRIAAN J, 'A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops', *Agric For Meteorol*, 1989 48 1-20.
- (36) TCHAMITCHIAN M and LONGUENESSE J J, 'Photosynthese d'une culture en rangs de tomates sous serre. Modelisation analytique et cartographie de l' activite du feuillage', *Agronomie*, 1991 11 17-26.

- (37) AIKMAN D P, 'Potential increase in photosynthetic efficiency from the redistribution of solar radiation in a crop', *J Exp Bot*, 198940 855-64.
- (38) LE BOT J, ADAMOWICZ S and ROBIN P, 'Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review', *Scientia Hortic*, 19987447-82.
- (39) CARDENAS-NAVARRO R, ADAMOWICZ S, GOJON A and ROBIN P, 'Modelling nitrate influx in young tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants', *J Exp Bot*, 199950625-35.
- (40) GREENWOOD D J, LEMAIRE G, GOSSE G, CRUZ P, DRAYCOTT A and NEETESON J J, 'Decline in percentage N in C3 and C4 crops with increasing plant mass', *Ann Bot*, 199066425-36.
- (41) LE BOT J, ANDRIOLO J L, GARY C, ADAMOWICZ S and ROBIN P, 'Dynamics of N accumulation and growth of tomato plants in hydroponics: an analysis of vegetative and fruit compartments', in *Diagnostic Procedures for Crop N Management*, eds Lemaire G and Burns I G, Paris, INRA Editions, 1995, 37-51.
- (42) CALOIN M and YU O, 'Analysis of the time course of change in nitrogen content in *Dactylis glomerata* L', *Ann Bot*, 1984 54 69-76.
- (43) BELLERT C, LE BOT J, DORAIS M, LOPEZ J and GOSSELIN A, 'Nitrogen accumulation and growth of fruiting tomato plants in hydroponics', *Acta Hortic*, 1998458293-301.
- (44) CAVERO J, PLANT R E, SHENNAN C, WILLIAMS J R, KINIRY J R and BENSON V W, 'Application of EPIC model to nitrogen cycling in irrigated processing tomatoes under different management systems', *Agric Syst*, 1998 56 391-414.
- (45) MANKIN K RAND FYNN R P, 'Modeling individual nutrient uptake by plants: relating demand to microclimate', *Agric Syst*, 199650 101-14.
- (46) BAR-TAL A, KEINAN M, FISHMAN S, ALONI B, OSEROVITZ Y and GENARD M, 'Simulation of environmental effects on Ca content in pepper fruit', *Acta Hortic*, 1999 507 253-62.
- (47) CHALLA H and BAKKER M, 'Potential production within the greenhouse environment', in *Greenhouse Ecosystems*, eds Enoch Z and Stanhill G, Amsterdam, Elsevier, 1999, 333-48.
- (48) KANO A and VAN BAVEL C H M, 'Design and test of a simulation model of tomato growth and yield in a greenhouse', *J Jpn Soc Hortic Sci*, 198858406-16.
- (49) GARY C, BAILLE A, NAVARRETE M and ESPANET R, 'TOMPOUSSE, un modele simplifie de prevision du rendement et du calibre de la tomate', in *Actes du Seminaire de l'AIP intersectorielle 'Serres'*, ed Baille A, Avignon, INRA, 1997, 100-9.
- (50) DE HALLEUX D and GAUTHIER L, 'Adaptation d'un modele de prevision de recolte de tomates en serre (TOMPOUSSE) a une culture commerciale quebecoise', *Csa/Scgr (Canadian Society for Engineering in Agricultura_ Food, and Biological Systems) Paper No. 97-602*, 1997, 1-8.
- (51) ANDRIOLO J L, DUARTE T DA S, LUDKE L and SKREBSKY E C, 'Avaliação da produtividade do tomateiro em cultivo protegido através de um modelo de simulação da produção', *Hortic Bras*, 1998 16 13-18.
- (52) BRISSON N, MARY B, RIPOCHE D, JEUFRLOY M H, RUGET F, NICOUILLAUD B, GATE P, DEVIENNE-BARRET F, ANTONIOLETTI R, DURR C, RICHARD G, BEAUDOIN N, RECOUS S, TAYOT X, PLENET D, CELLIER P, MACHET J M, MEYNARD J M and DELECOLLE R, 'STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterisation applied to wheat and corn', *Agronomie*, 1998 18311-46.

- (53) CHALLA H, HEUVELINK E and VAN MEETEREN U, 'Crop growth and development', in *Greenhouse Climate Control, an Integrated Approach*, eds Bakker J C, Bot G P A, Challa H and Van de Braak N J, Wageningen, Wageningen Pers, 1995, 62-84.
- (54) FENG Y, LI X and BOERSMA L, 'The Arrhenius equation as a model for explaining plant responses to temperature and water stresses', *Ann Bot*, 1990 66 237-44.
- (55) DE KONING A N M, *Development and Dry Matter Distribution in Glasshouse Tomato: a Quantitative Approach*, Thesis, Wageningen Agricultural University, 1994.
- (56) JOHNSON I R and THORNLEY J H M, 'Temperature dependence of plant and crop processes', *Ann Bot*, 1985 55 1-24.
- (57) TIJSKENS L M M and VERDENIUS F, 'Summing up dynamics: modelling biological processes in variable temperature scenarios', *Agric Syst*, 2000 66 1-15.
- (58) BERTIN N, 'Competition for assimilates and fruit position affect fruit set in indeterminate greenhouse tomato', *Ann Bot*, 1995 75 55-65.
- (59) GARY C, BARCZI J, BERTIN N and TCHAMITCHIAN M, 'Simulation of individual organ growth and development on a tomato plant: a model and a user-friendly interface', *Acta Hort*, 1995 399 199-205.
- (60) MARCELIS L F M, 'Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant', *J Exp Bot*, 1996 47 1281-91.
- (61) HEUVELINK E, 'Dry matter partitioning in a tomato plant: one common assimilate pool?' *J Exp Bot*, 1995 46 1025-33.
- (62) HEUVELINK E and BERTIN N, 'Dry matter partitioning in a tomato crop: comparison of two simulation models', *J Hort Sci*, 1994 69 885-903.
- (63) SCHOLBERG J, *Adaptive Use of Crop Growth Models to Simulate the Growth of Field-grown Tomato*, Pill Thesis, University of Florida, Gainesville, 1996.
- (64) GARY C, CHARASSE L, TCHAMITCHIAN M, BERTIN N, REBILLARD A, BOULARD T, CARD J P and BAILLE A, 'SIMULSERRE: an educational software simulating the greenhouse-crop system', *Acta Hort*, 1998 456 451-8.
- (65) TIJSKENS L M M and EVELO R G, 'Modelling colour of tomatoes during postharvest storage', *Postharvest Biol Tech*, 1994 48 5-98.
- (66) THAI C N, 'Modeling quality characteristics', in *Postharvest Handling: a Systems Approach*, eds Shewfelt R L and Prussia S E, San Diego, USA, Academic Press, 1993, 167-85.
- (67) THAI C N and SHEWFELT R L, 'Modeling sensory color quality of tomato and peach: neural networks and statistical regression', *Trans ASAE*, 1991 34 950-5.
- (68) THAI C N and SHEWFELT R L, 'Tomato color changes under constant and variable storage temperatures: empirical models', *Trans ASAE*, 1990 33 606-14.
- (69) JAHNS G, NIELSEN H M and PAUL W, 'Measuring image analysis attributes and modelling fuzzy consumer aspects for tomato quality grading', *Comput Electron Agric*, 2001 31 17-29.
- (70) VERKERKE W, JANSE J and KERSTEN M, 'Instrumental measurement and modelling of tomato fruit taste', *Acta Hort*, 1998 456 199-205.
- (71) SCHOTTE S, DE BELIE N and DE BAERDEMAEKER J, 'Acoustic impulse-response technique for evaluation and modelling of firmness of tomato fruit', *Postharvest Biol Tech*, 1999 17 105-15.
- (72) POLDERDIJK J J, TIJSKENS L M M, ROBBERS J E and VAN DER VALK H C P M, 'Predictive model of keeping quality of tomatoes', *Postharvest Biol Tech*, 1993 2 179-85.

- (73) TIJSKENS L M M and POLDERDIJK J J, 'A generic model for keeping quality of vegetable produce during storage and distribution', *Agric Syst*, 1996 51 431-52.
- (74) GUICHARD S, BERTIN N, LEONARDI C and GARY C, 'Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes', *Agronomie*, 2001 21 385-92.
- (75) BERTIN N, GUICHARD S, LEONARDI C, LONGUENESSE J J, LANGLOIS D and NAVEZ B, 'Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under Mediterranean conditions, as affected by air vapour pressure deficit and plant fruit load', *Ann Bot*, 2000 85 741-50.
- (76) HO L C, BELDA R, BROWN M, ANDREWS J and ADAMS P, 'Uptake and transport of calcium and the possible causes of blossom-end rot in tomato', *J Exp Bot*, 1993 44 509-18.
- (77) SEGHI L, ORLANDINI S and GOZZINI B, *Survey of Simulation Models of Plant Disease*, Firenze, Italy, Centre for Computer Science Application in Agriculture (CeSIA), 1996.
- (78) GLEASON M L, MACNAB A A, PITBLADO R E, RICKER M D, EAST D A and LATIN R X, 'Disease-warming systems for processing tomatoes in eastern North America: are we there yet?', *Plant Disease*, 1995 79 113-21.
- (79) PATTERSON J M and NOKES S E, 'Incorporation of chlorothalonil persistence on processing tomato in TOM-CAST', *Agric Syst*, 2000 64 171-87.
- (80) NICOT P and BAILLE A, 'Integrated control of *Botrytis cinerea* on greenhouse tomatoes', in *Aerial Plant Surface Microbiology*, eds Morris C E, Nicot P C and Nguyen The C, New York, Plenum Press, 1996, 169-89.
- (81) FERRANDINO F J and ELMER W H, 'Reduction in tomato yield due to *Septoria* leaf spot', *Plant Disease*, 1992 76 208-11.
- (82) VAN ROERMUND H J W, VAN LENTEREN J C and RABBINGE R, 'Biological control of greenhouse whitefly with the parasitoid *Encarsia formosa* on tomato: an individual-based simulation approach', *Biol Control*, 1997 9 25-47.
- (83) Anonymous, 'Bouto, système d'aide à la reconnaissance des champignons pathogènes, plantules adventices et ravageurs sur ble, orge, avoine, maïs, sorgho, vigne, tomate (CD-ROM)', Paris, INRA Editions, 1995.
- (84) Anonymous, 'HYPP, Hypermedia for the Protection of Plants (CD-ROM)', Paris, INRA Editions, 1996.
- (85) WOLF S, RUDICH J, MARAN I A and REKAH Y, 'Predicting harvesting date of processing tomatoes by a simulation model', *J Am Soc Hortic Sci*, 1986 111 11-16.
- (86) MCNEAL B L, SCHOLBERG J M S, JONES J W, STANLEY C D, CSIZINSZKY A A and OBREZA T A, 'Application of a greenhouse tomato-growth model (TOMGRO) to field-grown tomato', *Soil Crop Sci Soc Fla Proc*, 1995 54 86-93.
- (87) GAUTHIER L, 'GX: a Smalltalk-based platform for greenhouse environment control. 1. Modeling and managing the physical system. 2. Supporting and implementing control strategies', *Trans ASAE*, 1992 35 2003-20.
- (88) RELIER J P, MARTIN-CLOUAIRE R, NAVARRETE M, JEANNEQUIN B, GARY C, MONTBROUSSOUS B, TCHAMITCHIAN M and BAILLE A, 'Modeling and simulating decision making for greenhouse tomato production: the Concerto project', *Acta Hort*, 1998 456 485-92.
- (89) GAUTHIER L, GARY C and ZEKKI H, 'GPSF: a generic and object-oriented framework for crop simulation', *Ecol Model*, 1999 116 253-68.
- (90) PONTRYAGIN L S, BOLTYANSKII V G, GAMKRELIDZE R V and MISHCHENKO E F, *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, New York, John Wiley Interscience, 1962.

- (91) BELLMAN R E and DREYFUS S E, *Applied Dynamic Programming*, Princeton, Princeton University Press, 1962.
- (92) LEWIS F L, *Optimal Control*, New York, John Wiley Interscience, 1986.
- (93) GAL S, ANGEL A and SEGNER I, 'Optimal control of greenhouse climate: methodology', *EurJ Oper Res*, 1984 1745-56.
- (94) SEGNER I, 'Optimising greenhouse operation for best aerial environment', *Acta Horti*, 1980 106 169-78.
- (95) SEGNER I, 'Optimal greenhouse production under economic constraints', *Agric Syst*, 1989 2967-80.
- (96) SEGNER I, ANGEL A, GAL S and KANTZ D, 'Optimal CO₂ enrichment strategy for greenhouses: a simulation study', *J Agric Eng Res*, 1986 34285-304.
- (97) CRITTEN D L, 'Optimisation of CO₂ concentration in greenhouse crops: a modelling analysis for the lettuce crop', *J Agric Eng Res*, 1991 48 261-71.
- (98) TCHAMITCHIAN M, VAN WILLIGENBURG L G and VAN STRATEN G, 'Optimal control applied to tomato crop production in a greenhouse' *ECC'93, European Control Conference*, Groningen, 1993.
- (99) TAP R F, VAN WILLIGENBURG L G, VAN STRATEN G and VAN HENTEN E, 'Optimal control of greenhouse climate: computation of the influence of fast and slow dynamics' *IFAC Conference*, Sydney, IFAC, 1993.
- (100) VAN HEN TEN E J, *Greenhouse Climate Control: an Optimal Control Approach*, Thesis, Wageningen Agricultural University, 1994.
- (101) KOKOTOVIC P V, KHALIL H K and O'REILLY J, *Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design*, New York, Academic Press, 1986.
- (102) BATTILANI A, BUSSIERES P, COMBRES J P, ANCONCELLI S and DUMAS Y, 'Irrigere: a computer program to facilitate processing tomato irrigation management', *Acta Horti*, 1999 487 537-46.
- (103) MARCELIS L F M, VAN DEN BOOGAARD R and MEINEN E, 'Control of crop growth and nutrient supply by the combined use of crop models and plant sensors', *Proceedings of IFAC Agricontrol 2000, International Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-harvested Processing*, 10-12 July 2000, Wageningen, 2000, 351-6.
- (104) KOZAI T, 'Ideas of greenhouse climate control based on knowledge engineering techniques', *Acta Horti*, 1985 174365-73.
- (105) TCHAMITCHIAN M, MONTBROUSSOUS B, JEANNEQUIN B and MARTIN-CLOUAIRE R, 'SERRISTE: daily greenhouse climate set-point determination for tomatoes', in *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, eds Munack A and Tantau H J, Oxford, Pergamon-Elsevier, 1997, 25-30.
- (106) BLANCARD D, BONNET A and COLENO A, 'TOM, un systeme expert en maladies des tomates', *PHM Revue Horticole*, 1985 261 7-14.
- (107) GUAY R and GAUTHIER L, 'Knowledge representation in a tomato disorder diagnosis system', *Comput Electron Agric*, 1991 621-32.
- (108) BOLLER E F, EL TITI A, GENDRIER J P, AVILLA J, JORG E and MALAVOLTA c, 'Integrated Production: Principles and Technical Guidelines, 2nd edition', *IOBC WPRS Bulletin*, 1999 22 38 pp.
- (109) MARTIN-CLOUAIRE R, KOVÁTS K, and CROS M J, 'Determination of greenhouse climate setpoints by SERRISTE: the approach and its object-oriented implementation', *AI Applications*, 1993 7 1-15.

- (110) JEANNEQUIN B, MARTIN-CLOUAIRE R and TCHAMITCHIAN M, 'Planning daily climate set-points for a greenhouse tomato production: the SERRISTE system', in *Mode-based Decision Support in Agriculture, Quantitative Approaches in Systems Analysis*, eds ten Berge H F M and Stein A, 1997, volume 15, 9-14.
- (111) GUERRIN F and DUMAS J, 'Knowledge representation and qualitative simulation of salmon redd functioning. Part I: qualitative modeling and simulation', *Biosystems*, 2001 59 75-84.
- (112) ATHERTON J G and RUDISH J (eds), *The Tomato Crop. A scientific basis for improvement*, London, Chapman and Hall, 1986.
- (113) ENOCH Z and ST ANHILL A (eds), *Greenhouse Ecosystems*, Amsterdam, Elsevier, 1999.