

Ferentinos, K. P., K. G. Arvanitis, H. J. Tantau, and N. Sigrimis. 2006. Section 5.8 Special Aspects of IT for Greenhouse Cultivation, pp. 294-312 of Chapter 5 Precision Agriculture, in CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology. Edited by CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE. Copyright American Society of Agricultural Engineers.

Çevirmen: Mehmet Ali DAYIOĞLU

Çeviri Editörleri: Sefa TARHAN ve Mehmet Metin ÖZGÜVEN

5.8 Sera Tarımında Bilgi Teknolojisinin Özel Hususları

Yazarlar: K. P. Ferentinos, K. G. Arvanitis, H. J. Tantau ve N. Sigrimis

Çevirmen: Mehmet Ali DAYIOĞLU

Özet: *Bu bölümde bugün ve yakın gelecekte bilgi teknolojisinin (BT) sera tarımında kullanımı anlatılmıştır. Sera sistemlerini yöneten temel fiziksel mekanizmalara giriş yapıldıktan sonra, sera yönetimi ve kontrolüne ilişkin yatay ve dikey yönleri ele alan iki farklı yaklaşım irdelenmiştir. Düşük ve orta seviye kontrol ile birlikte orta ve yüksek seviye yönetimler tartışılmıştır. Sera kontrolü ve tümleşik yönetimi için yeni geliştirilmiş bazı araçlar ve son ürünler sunulmuştur.*

Anahtar Kelimeler: *Sera tarımı, Bilgi teknolojisi, Kontrol, Tümleşik üretim yönetimi.*

5.8.1 Giriş

Son yıllarda bilgi teknolojisindeki gelişmelerin sera tarımına uygulanması, yıl boyunca istikrarlı üretimin sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Modern seralarda yapılan bitkisel üretim, verimliliği dolaylı ya da doğrudan etkileyen çok parametreliliği karmaşık bir süreçtir. Sera çevresinde kontrol edilen tüm fiziksel büyüklüklerin enerji ve kütle dengelerini hesaplamak için irdelenmesi zorunludur. Geri beslemeli kontrol gerçek zamanlı ölçümlere dayanır, ancak optimal kontrol ve daha iyi yönetim için fiziksel [1,2] ve biyolojik [3-7] sistemlerin bütün modelleri göz önüne alınır. Fiziksel sistemlerin tanımlanması kolay olmasına karşın, biyolojik sistemler daha karmaşık ve belirsizdir. Biyofiziksel modelleme üzerine yapılan son çalışmalar pratik kullanım aşamasına henüz ulaşmış olmakla birlikte [8], biyolojik bilimler ve teknolojinin birlikteliğinin olgunlaşması açısından alınması gereken uzun bir yol olduğu açıktır.

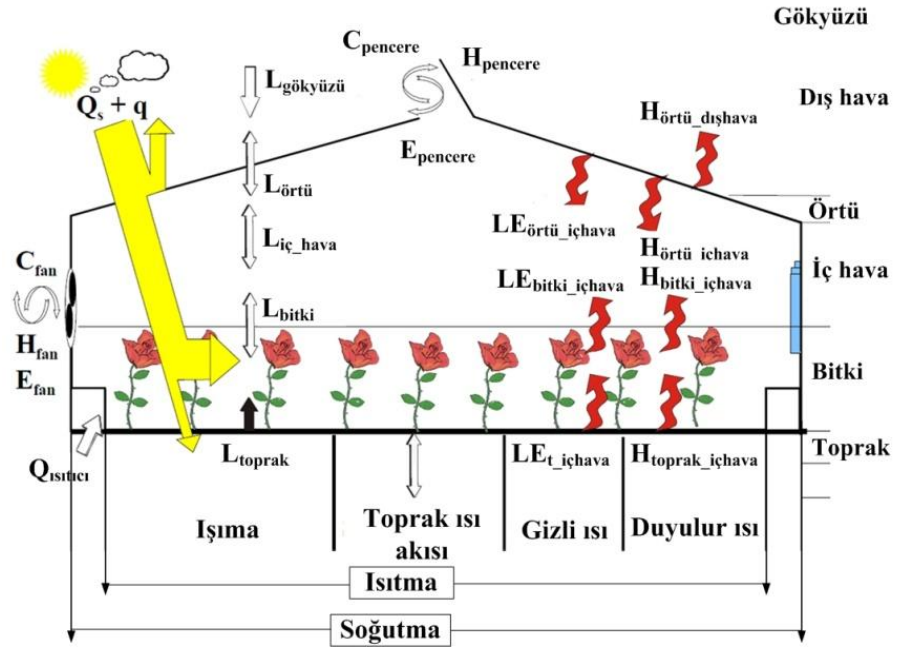
Ancak küresel piyasalardaki rekabet nedeniyle, çevresel açıdan sosyal gereksinimler ve tüketicinin kalite talepleri optimal yönetim açısından yeni ölçütlerin ve kısıtların eklenmesine neden olmaktadır. Tümleşik üretim yönetiminin itici gücü bu alandaki gelişmeler için birçok dayanak sağlamaktadır. Biyolojik modellerin (böcekler, hastalık ve üretim vs ilgili modeller) ve bilgi teknolojisine ilişkin uygulamaların üretim sürecinde bazı girdileri kullanması gerekir ve bu verilerin güvenilir olmasına ihtiyaç vardır. Üretim teknolojileri (topraksız üretim, robotik

hasat makinaları, bitki fabrikaları vs.) geliştikçe, daha ucuz üretim sağlandıkça, bilgi çağından bilgiye dayalı topluma geçeceğiz. Modern iletişim teknolojilerine dayalı çalışmalar başlamıştır. Burada uzman ekiplerin tecrübelerine dayalı bilgi tabanı ile sahadaki düşük seviyeli kontrol cihazları arasında eksik kalan köprünün kurulması amaçlanır [10].

Taşınım mekanizmalarının anlaşılması için sera sisteminin enerji ve kütle dengeleri oluşturulur. Burada üç ana taşınım mekanizması tartışılabilir:

- *İletim*: Sera konstrüksiyonu, saydam örtü, toprak gibi katı materyaller içinde ısının iletimi yoluyla oluşan ısı taşınım işlemidir.
- *Taşınım*: Sera havası ile ısıtma boruları, örtü, bitki ve toprak yüzeyleri gibi iç yüzeyler arasında, sera dışındaki hava ile dış yüzeyler arasında oluşan ısı ve kütle taşınım işlemidir.
- *Işıma*: Sera içindeki tüm bileşenlerin yüzeyleri arasında elektromanyetik dalgalar (ışık ve ısı) yoluyla olan taşınım işlemidir.

Sera çevresinde yapısal bileşenler dahil örtü, sera havası, bitki ve toprakta oluşan enerjinin girişi ve çıkışında yukarıda tanımlanan taşınım mekanizmaları etkilidir. Sera örtüsü üzerinde gelen güneş ışınımı, gökyüzüyle ve sera iç tarafıyla olan ışınım değişimi, iç ve dış hava ile yüzeyler arasında oluşan taşınım, su buharının yoğunlaşmasıyla üretilen gizli ısı değişimleri etkilidir. Sera içindeki havanın enerji değişimi; örtü, ısıtma sistemi, toprak ve bitkiler arasında ve havalandırma sırasında dış hava arasında taşınım yoluyla oluşur. Topraktaki enerji değişimleri; güneş ışınımının soğurulması, örtü ve bitki arasındaki ışınım değişimi, sera havasıyla olan taşınım, toprak alt tabakaları arasında iletim yoluyla oluşur. Sonuç olarak, bitkiler güneş ışınımını soğurur; örtü, toprak ve ısıtma sistemi arasında ışınım alışverişi oluşur. Sera iç havası ile aralarında konveksiyonla enerji alışverişi ve evapotranspirasyonla gizli ısı değişimi gerçekleşir. Sera çevresinde oluşan ısı enerjisi değişim işlemleri Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Sera bitki üretim sistemlerinde enerji değişim işlemlerinin şematik gösterimi.

Sera içinde saydam örtü, hava, bitki ve toprak gibi katmanlar arasındaki ısı işlemler aşağıdaki diferansiyel eşitliklerle tanımlanır:

$$Z_c C_c \frac{dT_c}{dt} = \quad (1a)$$

$$(Q_s a_c + q a_q) + \Delta L_{\text{örtü}} - H_{\text{örtü-dışhava}} - H_{\text{örtü-ichava}} - LE_{\text{örtü-ichava}} - LE_{\text{örtü-dışhava}}$$

$$Z_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \quad (1b)$$

$$\Delta L_{\text{ichava}} + H_{\text{örtü-ichava}} + H_{\text{bitki-ichava}} + H_{\text{toprak-ichava}} - H_{\text{pencere}} - H_{\text{fan}} + Q_{\text{ısıtıcı}}$$

$$Z_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \quad (1c)$$

$$(Q_s + q) \tau_c a_p + \Delta L_{\text{bitki}} - H_{\text{bitki-ichava}} - LE_{\text{bitki-ichava}}$$

$$Z_s C_s \frac{dT_s}{dt} = \quad (1d)$$

$$(Q_s + q) \tau_c \tau_p a_s + \Delta L_{\text{toprak}} - H_{\text{toprak-ichava}} - LE_{\text{toprak-ichava}} - Q_{\text{taban}}$$

Bu eşitliklerde T_c , T_i , T_p ve T_s sırasıyla örtü, iç hava, bitki ve toprak yüzeyi sıcaklıklarıdır. Z_x ve C_x x katmanının sırasıyla ortalama yüksekliği ve ısı kapasitesini gösterir. H_{x-y} ve LE_{x-y} x ve y katmanları arasında duyulur ve gizli ısı alışverişine karşılık gelir. İşaret kuralı gereğince, $H_{x-y} = H_{y-x}$ ve $LE_{x-y} = LE_{y-x}$ olarak

kabul edilmiştir. $Q_{\text{ısıtıcı}}$ ısıtma sisteminden gelen ısı enerji girişi, Q_{taban} toprak üstü ve toprak alt tabakaları arasında oluşan ısı akı yoğunluğudur. a_x soğurma katsayısı τ_x katmanlara ilişkin güneş ışınımı geçirgenlik katsayısıdır. a_c ve a_q camın sırasıyla direkt ve difüz soğurma katsayılarını gösterir. Toprak katmanı için, sadece üst toprak sıcaklığı eşitlik 1d'de tanımlanmıştır. Yüzeydeki toprak akı yoğunluğu toprağın ısı iletim katsayısı ve toprak üst tabakasındaki sıcaklık değişimine göre hesaplanır:

$$Q_{\text{taban}} = 2k_s \left(\frac{T_s - T_{sl}}{Z_s + Z_{sl}} \right) \quad (2)$$

Diğer toprak tabakalarının ısı durumunun ayrı olarak tanımlanması gerekir. Farklı derinliklerdeki toprak sıcaklıkları aşağıdaki diferansiyel eşitlikle simüle edilebilir.

$$Z_{sj} C_{sj} \frac{dT_{sj}}{dt} = 2k_{sj} \left(\frac{T_{sj-1} - T_{sj}}{Z_{sj} + Z_{sj-1}} + \frac{T_{sj+1} - T_{sj}}{Z_{sj} + Z_{sj+1}} \right) \quad (3)$$

Burada j toprağın hangi alt tabakası olduğunu,

T_s = toprak sıcaklığını

C_s = hacimsel özgül ısısını

k_s = ısı iletim katsayısını

Z_s = toprak tabakasının kalınlığını göstermek için kullanılır.

Sera içinde temel ölçülebilir değişkenler hava sıcaklığı, bağıl nem, ışık yoğunluğu ve karbondioksit konsantrasyonudur. Bitki kök bölgesindeki değişkenler ise pH, elektriksel iletkenlik (EC, Electrical Conductivity), toprak sıcaklığı, toprak nemi, tuzluluk ve besin konsantrasyonlarıdır. Seralarda bitkilerin isteklerini sağlayacak şekilde bu parametrelerin ayarlanması başarılı bir üretim için gereklidir. Sera çevresinin kontrolü ve yönetimi için serada birçok donanım ve sistem kullanılır. Bunlar istenen sera iklimini yaratmak için ısıtma, havalandırma, soğutma sistemleri, gölgeleme perdeleri, yapay aydınlatma ve CO₂ enjeksiyon sistemleri olarak sıralanabilir. Bitki kök bölgesi için, üretimin tipine göre (toprakta ya da topraksız) ısıtıcılar, pH ve EC kontrol sistemleri ve amaca özel topraksız yönetim sistemleri kullanılır. Son yıllarda, üretilen bitkilerin tuzluluk toleransını göz önüne alan daha ileri karar destek sistemleri geliştirilmiştir [9].

Seralarda bu sistemlerin olması ve bunların etkin çalıştırılması oldukça karmaşıktır. Sera çevresinin hassas kontrolü gelişmiş yöntemleri kapsayan zor bir süreçtir. Bu nedenle, seralarda kontrol ve yönetim Şekil 2'de gösterilen *dikey* ya da Şekil 3'de gösterilen *yatay bakış açılarına* göre oluşturulmuştur. Dikey kontrol ve yönetim, çok hassas kontrol yöntemlerine gereksinim duyar. Yatay kontrol ve yönetim, serada farklı süreçler için farklı zaman ölçeklerini kullanır [10, 11].

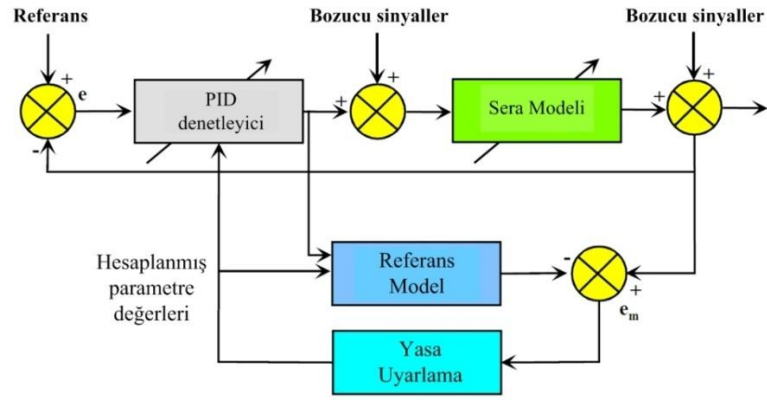
5.8.2 Düşük Seviyeli Kontrol Döngüleri

Esas olarak sera çevresinin kontrolü düşük seviyeli kontrol döngülerini oluşturmak için bazı bilgi teknolojilerine dayalı yöntemleri kapsar [13-17]. Bu yöntemler gerçek zamanlı kontrol için klasik ya da akıllı kontrol teknikleri olarak sınıflandırılabilir.

Klasik Kontrol

Klasik kontrolde, kontrol edilecek sistemler girdi çıktı sistemleri olarak ele alınır. Girdiler genellikle kontrol girdileri ve bozucu değişkenler olmasına karşın, çıktılar kontrol edilecek değişkenlerdir. Sera çevresinde kontrol girdileri; ısıtma seviyesi, havalandırma oranı (pencere açıklık seviyesi, fanların hızı), yapay aydınlatma seviyesi, gölgeleme perdesinin konumu ve CO₂ enjeksiyon hızı olabilir. Dış hava sıcaklığı ve nemi, rüzgâr hızı ve yönü, güneş ışınımı ve dış CO₂ konsantrasyonu bozucu değişkenler olarak göz önüne alınır. Çıktılar ise iç hava sıcaklığı, bağıl nem, CO₂ konsantrasyonu ve bitki seviyesindeki ışık yoğunluğu gibi kontrol değişkenleridir.

Seralarda en yaygın kullanılan teknik geri beslemeli kontroldür. Kontrol cihazı çoğunlukla ya basit AÇIK/KAPALI (ON/OFF) ya da oransal integral türev (PID, Proportional Integral Derivative) olabilir. PID denetleyici (kontrol cihazı) bozucu değişkenleri dengelemek ve geniş model belirsizliklerini karşılamak için ayar yapma yeteneğine sahiptir [18]. Seranın yönetimi ve kontrolünü iyileştirmek için uyarlanmış PID kontrol stratejisi uygulanabilir (Şekil 4). Burada önceden tanımlanmış maliyet performans fonksiyonu kullanılarak optimal kontrol sinyalleri hesaplanır. PID denetleyicinin daha basit sürümleri sera çevre kontrolünde uzun yıllardan beri anahtar (termostat, higrostat, presostat) olarak kullanılmaktadır [13, 19-21]. Çoğu sera donanımı ikili anahtar tipinde olduğundan böyle dinamik kontrol yöntemlerini uygulamaya uygun değildir. Donanımların dinamik kontrole uygun hale getirilmesi için her duruma karşılık gelen doğrusal dinamik eşitlikler türetilir ve açma kapama hızının kontrolü darbe genişlik modülasyonuna (PWM, Pulse Width Modulation) benzer şekilde yapılabilir [22]. PID'e benzeyen başka bir denetleyici olan *PDF* (*Pseudo Derivative Feedback*) algoritması [23] seralarda sıcaklık ve nemin kontrolünde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [12, 24]. Sera çevre kontrol araştırmalarında kullanılan diğer kontrol yöntemi klasik PID ya da PI kontrole [25, 26] göre daha üstün olan *PIP* (*Proportional Integral Plus*) [16] denetleyicidir. PID denetleyicinin iyileştirilmiş sürümü *Smith Predictor* [27] kapalı döngüde kararlı olduğu aralıkları kısaltarak ölü zamanları dengede tutar. *Smith Predictor* sera çevre kontrolünde olumlu sonuçlar vermektedir [3]. Sonuç olarak, daha iyi sıcaklık dağılımı sağlama, iç içe döngüleri ve yük paylaşımı kavramını [28] kullanarak ısı kayıplarını azaltmayı esas alır. Böylece girdilere göre kontrol cihazları arasında görev paylaşımı yaparak sistemin daha iyi performans göstermesini sağlar.



Şekil 4. Uyarlanmış PID denetleyicinin yapısı.

Akıllı Gerçek Zamanlı Kontrol

Son birkaç yıldan beri, bilgi teknolojisi sera kontrol sistemlerinin gelişimi ve uygulamaya aktarılmasında önemli rol oynamaktadır. Özellikle, yapay zekâ (AI, Artificial Intelligence) alanından alınan bilgi teknolojisi yöntemleri seraların gerçek zaman kontrolü ve yönetimini sağlamak için etkili şekilde kullanılmaktadır. Burada geleneksel matematiksel kontrol yaklaşımları uygulanmaz [29]. *Yapay sinir ağları* (ANN, Artificial Neural Networks) hem sera iklimi hem de topraksız üretimin akıllı kontrolünde en etkili araç olarak kullanılmaktadır. Yapay sinir ağlarının temel üstünlüğü herhangi bir matematiksel formülasyona ya da transfer fonksiyonuna gerek duymadan çözüm yapabilmesidir. Bu ağların çalışması, modellenecek prostesten alınan eğitim veriler kullanılarak kalıcı öğrenme yeteneklerinin geliştirilmesi üzerine kurulur. İlk ANN uygulamaları bazı girdileri kullanarak sera ikliminin modellenmesi için yapılmıştır. Bu amaçla, dış çevresel parametreler (sıcaklık, nem, güneş ışınımı, rüzgâr hızı, vd), kontrol değişkenleri ve üretilen bitkilerin koşullarını tanımlayan durum değişkenleri (girdiler) olarak kullanılmıştır [30-32]. Bitki koşullarını hesaba katmayan daha basit modeller de sıcaklık değişiminin modellenmesinde başarılı şekilde uygulanmaktadır [33, 34]. Ancak, burada ANN'de kullanılan eğitim veri setinin farklı koşullara uygulanmasında yeterli olmadığı bilinmelidir. Topraksız üretim uygulamalarında, ANN besin çözeltilerinin pH ve elektriksel iletkenliğinin [35] modellenmesinde üretilen bitkilerin fotosentez hızının [36] yüksek doğrulukla tespitinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ANN sera ikliminin kontrol uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [37]. *Genetik algoritmaları* (GAs, Genetic Algorithms) ANN kullanımı klasik ANN'den daha başarılı sonuçlar vermektedir [38].

GA'lar esas olarak seraların yönetimi ve kontrolü amacıyla kullanılan diğer bir yapay zekâ tekniğidir. Bunlar yeni olan bazı mühendislik uygulamalarının tasarımında ve optimizasyonunda kolaylık sağlamaktadır. Dolayısıyla, sera ikliminin denetiminde optimizasyon aracı olarak [39], tarımsal modellerin ANN'in eğitim yöntemlerinde [40], optimal ayar değerlerinin belirlenmesinde [41-43] ve bulanık

mantık (fuzzy logic) gibi yazılım tabanlı denetleyicilerin geliştirilmesinde [44] kullanılmaktadır. GA'lara benzeyen diğer bir teknik olan *fotosentetik algoritma* [45], bitkilerin fotosentez sürecinde optimizasyon işlemlerini benzeştiren algoritmayı kullanır. Bu algoritma tarımsal modellerin ANN'nin eğitiminde uygulanmıştır [40].

Bulanık mantık sera sistemlerinin kontrolü ve yönetiminde yaygın olarak kullanılan yapay zekâ tekniğidir. Sera çevresinin karmaşık prosesleri ve aralarındaki etkileşimler bulanık mantığa dayalı güçlü ve başarılı yazılımlar ile denetlenebilir. Sera sistemlerinin hassas kontrolünde ya bulanık mantık [46, 47], ya da GA ve ANN ile bileştirilmiş bulanık mantık [41, 44] uygulamaları kullanılabilir. Sera iklimi ve toprak üretiminin gerçek zamanlı akıllı kontrolü yönetim kararları açısından da uygulanmaktadır [3, 50].

5.8.3 Orta Seviye Kontrol ve Yönetim

Buraya kadar tanımlanmış kontrol planları orta seviye kontrol yöntemleri olarak kullanılabilir. Bunlar sera yönetimi için özel geliştirilmiş iki alana odaklanmıştır: zaman katmanlı yönetim, çelişki çözme ile yönetim.

Zaman Ölçekli Prosesler

Yukarıda ifade edildiği gibi, sera üretiminde farklı zaman ölçekleri kullanılır. Orta ölçekli kontrol yöntemleri için ilk aşama, örneğin enerji tasarrufu, ilgili parametrelerin (sıcaklık ya da ışık) ortalamasını alma yöntemini kapsar. Bu bitkilerin biyolojik özelliklerinin göstergesi olarak kullanılabilir. Belirli bir zaman aralığında her parametrenin ortalama değeri alındığı sürece, kısa dönem sıcaklık ve ışık dalgalanmaları bitkilerin büyümesini etkilemez [51-54]. Örneğin sıcaklık integrasyonu yapılarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Geliştirilen teknik, belirli bir zaman aralığı için gerekli ortalama sıcaklığı kullanır. Bu şekilde minimum ısı kayıpları olsun diye, dış sıcaklığa göre düşük sıcaklık seviyelerini esas alan bir yöntem geliştirilebilir. İntegrasyon periyodu sonunda özel ortalama sıcaklık değerine ulaşılması gerekir [55]. Eğer uygun bir algoritma bulunabilirse, yeterli enerji tasarrufu sağlanabilir.

Koning tarafından, sıcaklık integrasyonuna dayalı kontrol stratejileri üzerine bir araştırma yapılmıştır. Koning 24 saatlik zaman aralığı için [56] ve birkaç günlük [57] ortalama sıcaklığı esas alan algoritmalar geliştirmiştir. Ayrıca, ısıtma ayar değerlerini kısa aralıklarla değiştirerek, seradaki sıcaklık sapmalarını dengeleyebilen bir algoritma üzerinde durmuştur [58]. Yazarlar ortaya çıkan sıcaklık şablonuna göre, yukarı ya da aşağı sapmaları dengelemenin iyi sonuç verdiğini ifade etmektedirler. Timmons ve Gates [59] bağıl nemin kontrolü için zaman integrali yaklaşımını geliştirdi ve çiftlik hayvanları için ısı stresi koşullarına [60] ve optimal zaman integrali ayar değerlerine [61] göre uyarlamıştır. Marsh ve Albright [62, 63] sera marul üretiminde ekonomik olarak optimum sıcaklıkları hesaplayan bir algoritma kullanarak ısıtma maliyetlerini azaltan bir stratejiyi sundu. Sera marul üretiminde

optimal ayar değerlerini sağlamak için alternatif bir yöntemi [64]'de önerdi. Son yıllarda bilgi teknolojisindeki gelişmeleri kullanarak, enerji tasarrufu sağlamak için bitkilerin sıcaklık integrasyonunun uygun olup olmadığını irdeleyen ileri kontrol stratejileri de geliştirilmektedir [65-68]. Işık integrasyonu örneğinde, Albright ve ark. [69] günlük ışık toplamını elde etmek için kural tabanlı bir algoritma geliştirdiler. Ferentinos ve ark. [70], [54]'de geliştirilen kurallara göre, sera çevresinin CO₂ konsantrasyonuyla ilişkisini kontrol eden bir optimizasyon çalışması yaptı.

Bazı çevresel parametreler için integrasyonla yapılan kontrol yaklaşımı diğer kontrol parametrelerini olumsuz etkileyebilir. Örneğin, sıcaklık integrasyonu örneğinde, bağıl nem çok sık aralıklarla dalgalanabilir ve bunun yüksek değerleri riskli seviyelere ulaşabilir [71]. Uzun dönem kontrol stratejilerinde, bitkinin kısa dönem dinamikleri dikkate alınmalıdır [72]. Buna göre, sera çevresinin tümleşik kontrolü birbiriyle çatışan noktaları çözebilen gelişmiş sera yönetim sistemlerine gereksinim duyar [73].

Bir sera üretim sisteminde kontrol stratejilerini düzenleyebilen ve iyileştirebilen ek bilgiler önceden kontrolün tahmin edilmesini sağlayabilir. Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan hava tahmini çalışmaları optimum sıcaklık kontrolünü sağlamak için kullanılmaktadır. Buna karşın, yapay aę modelleri beklenen meteorolojik koşullara göre sera davranışını simüle etmek için kullanılmaktadır [75].

Topraksız üretim, iklim kontrolü gibi orta zaman ölçekli prosesleri kapsayan farklı bir sera üretim uygulamasıdır. Topraksız üretimde sulama planlaması ve besin temini çok önemlidir. Üretim miktarı ve kalitesini optimize etmek ve üretim maliyetleri ile atıkları nedeniyle oluşan çevre kirliliğini azaltmak için hassas kontrole ihtiyaç vardır. Sistem tanımlamasını kullanarak su temini için bir kontrol cihazı tasarımı kaynak [76]'da önerildi. Ancak, toplam güneş ışınımının fonksiyonu olarak su ihtiyacını hesaplamak için önerilen cihaz sadece kontrol döngüsüne ileri beslemeli bir eleman eklendiğinde düzgün çalışmaktadır. Diğer taraftan, bitki sulama ihtiyaçlarının tahmininde model kullanımı başarılı sonuçlar vermektedir. Genellikle, sıcaklık, güneş ışınımı, CO₂ konsantrasyonu ve buhar doyma açığı gibi çevresel koşullara dayalı bitki transpirasyonunu tahmin eden bir model çoğunlukla kullanılır [77]. Ancak, gerekli su talebini sağlamak için basitleştirilmiş transpirasyon modellerini kullanan karma yaklaşımlar da önerilmektedir [78].

Çok İşlemlili Bağlantılı Sistemler ve Çelişkiler

Biyolojik sistemler karmaşık, eksik tanımlı ve birbiriyle bağlantılı proseslerden oluşmasına karşın; bugüne kadar optimum kontrol stratejileri tüm sistem için değil her bir prosese ayrı olarak uygulanmıştır [79, 80]. Karmaşık bir sistemin bireysel prosesler olarak işlenmesi, özellikle bu prosesler aralarında tutarsızlık olduğu zaman (sera iklimi ve topraksız üretimin kontrolünde olduğu gibi), tüm sistem açısından optimal çözümün sağlanması yetmez. Böyle sistemlerin kontrolü için ayar değerleri ve kısıtların tanımlanması zor ve sorunlu bir işittir. Ayrıca her proses,

sistemin son çıktısına birkaç derecelik fark yaratabilir. Geleneksel kontrol yöntemleri bazı temel zorluklarla karşılaşır. Burada örneğin sıcaklık ve nem gibi (doğrusal olmayan termodinamik yasalarıyla tanımlanan) kontrol değişkenlerinin birleştirilmesi gerekir. Bu gibi durumlarda, kontrol eyleyiciler bozucu değişkenlerden gelen sinyallere göre kazanç esas alınarak karakteristikleri değiştirme işlemine tabi olur. Bu gibi durumlara diğer bir örnek, topraksız üretimde besin çözeltisinin pH'sını düşürmek için asit eklenmesi sırasında çözeltinin elektriksel iletkenliğinin önemli seviyede değişmesidir. Elektriksel iletkenliğin kontrolü sırasında bazı gübreler, pH'nın sabit kalmasına ya da etkilenmesine neden olur.

Son yıllarda, sıcaklık ve nem eşleşmesinden [81] ve eşzamanlı sıcaklık CO₂ konsantrasyonu kontrolü [82] sırasında bu tip kontrol problemleriyle karşılaşmaktadır. Sıcaklık nem eşleşmesi kaynaklı çelişkilere; doğrusallaştırma ve karşılıklı etkileşmeyen geri beslemeli/ileri beslemeli kontrol denetleyicilerin güçlü bir kombinasyonunu, geleneksel dış döngülü dinamik denetleyiciler (örnek: PID ya da PDF denetleyiciler) ile birlikte ön dengeleyici ve emir üreteç modülünden oluşan yaklaşımda karşılaşılır [81]. Bu yaklaşımda ayar değerlerinin ödünleşimleri; psikrometrik özelliklere, eyleyici limitleri ve maliyetlere göre değiştirerek hesaplanır. Böylece geri beslemeli/ileri beslemeli kontrol cihazlarının salınım yapmadan ve gürültüsüz çalışmasını sağlayacak optimize edilen ayar değerleri elde edilir.

Daha genel bir anlatımla; proseslerin eşleşmesi ve ayrışması durumlarında, her bir proses lokal hedefe göre en iyi şekilde ayarlanmış ve kendisine ait olan lokal dinamik kontrol sistemine sahiptir. Bu lokal hedef, bütün sistemin son çıktısını dikkate alacak şekilde genel çevre içerisinde tanımlanır. Bu yaklaşım bitki büyümesi sırasında oluşan karmaşık durumlarda, birbiriyle çelişkili kontrol kararlarının çözümünü sağlayan *çok ajanlı sistemlerin* gelişmesine yol açmıştır [83].

5.8.4 Yüksek Seviyeli Yönetim

Modern seralarda ürün kalitesi ve üretim performansını iyileştirme; gelişmiş bitki yönetimi ve akıllı kontrol sistemlerinin olmasına bağlıdır. Geleneksel olarak, bilgi sistemleri veri tabanları, uygulama programları ve kullanıcı ara yüzlerinden oluşmaktadır. Bu uygulama yeni istekler çerçevesinde değişiyor. Küresel bakış açısını esas alan açık tümleşik mimariler benimseniyor [84]. Bilgi teknolojisiyle birleştirilmiş bilgi tabanlı sistemler, veri tabanı yönetim sistemleri ve akıllı kontrol sistemleri giderek yaygınlaşıyor. Veri tabanları bilgi paylaşımı sağlar. Yeni sayısal akıllı teknikler; veri madenciliği, çok ajanlı sistemler, planlama, listeleme ve istişare yapmaya izin verir. Sera yönetim sistemleri; endüstriyel otomasyon araçlarını, modern kontrol teorisini ve bilgi teknolojisini kullanarak her geçen gün gelişmektedir. Bilgisayar ve iletişim teknolojileri bu gelişmelerle yakından ilişkilidir. Bu teknolojiler sera üretim sistemini kapsayan proseslerde yüksek zekâ seviyeli ve

esnek olarak programlanabilen tümleşik yönetim sistemlerinin gelişmesinde etkili olmaktadır.

Uzun Dönem Etkileri ve Bitki Yaşam Süresi Katmanları

Çevresel parametrelerin fonksiyonu olarak büyüme hızını tahmin etmek için bitki üzerinde uzun dönem etkilerini hesaba katan, her parametrenin en uygun ayar değerlerinin tespitini amaçlayan bazı modeller geliştirilmektedir [85, 3].

Bitkilerin fizyolojik durumunu gerçek zamanlı olarak izleyen fizyolojik modeller buna uygun kontrol stratejilerinin geliştirilmesini sağlayabilir. Uygulamada, esas olarak bitki tepkilerinin ölçümü ve tanımlanması ile bitki tepkilerine dayalı optimal kontrol gerekli olmaktadır. Bu *konuşan bitki yaklaşımının (SPA, Speaking Plant Approach)* ortaya çıkmasına öncülük etmiştir [Kaynak 86 ve Bölüm 5.3'e bakılabilir]. Bu yaklaşım, çok sayıda bitkiye dayalı ölçümlerden yararlanır. Birkaç yıldır SPA, yapay zekâ alanından gelen tümleşik akıllı kontrolü amaçlayan modern tekniklerle birleştirilmektedir. Bilgi tabanlı sistemler bu konudaki çalışmalarda önemli rol oynamaktadır [87, 88].

Yüksek seviyede bilgisayarlaştırılan ve otomatik hale getirilen sistemlerde önemli hususlar; sensörlerin sağladığı bilgilerin kalitesi ve eyleycilere gönderilen kararların kalitesidir. Bilgi teknolojisi kendi kendini sınamaya yetenekli akıllı kontrol sistemlerinin gelişimini sağlayabilir. Farklı sensörlerden elde edilen birleştirilmiş bilgi, özel sensörler veya eyleycilerden türetilen izole bilgilerin kalite sınıflandırılmasını gerekli kılmıştır [89]. Bu şekilde, sera sistemlerinde bazı hata tespiti ve teşhis yöntemleri geliştirilmektedir [90-93].

Tümleşik Sera Yönetimi (IGM, Integrated Greenhouse Management)

Günümüzdeki çoğu tüketici endişeleri; gıdalardaki tarım ilaçları ve diğer kimyasal maddelerin izlerine doğrudan maruz kalınması ve tarımsal üretimde kullanılan sentetik kimyasalların çevre üzerine yaptığı dolaylı etkiler hakkındadır. Tüketici ve çevre korumaya ve üreticinin korunmasını dikkate alan güncel araştırmalar, iki temel çözüme işaret etmektedir: organik ürünler ve tümleşik yönetim. Üretici özel organizasyonlardan alınan belgelerle, ürünlerinin kalite seviyesini onaylatmak zorundadır. Bitki korumaya yönelik doğal ve/veya biyolojik (sentetik kimyasallar değil) yöntemler kullanımına yönelik birçok araştırma geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu araştırmalar, tümleşik hastalık ve zararlı yönetimi (IPM, Integrated Pest Management) teknikleri [94] ile su gübre kullanımını azaltma üzerine yoğunlaşmaktadır.

Seraların yönetimi bu iş için özel olarak tasarlanmış bir program olan *tümleşik yönetim sistemi* tarafından takip edilmeli ve yönetilmelidir. Bu program sertifikalı ürünlerin gelişimine yardımcı olan aşağıda özellikleri kapsar:

- İyi tarım uygulamaları,
- İşçilerin güvenliği ve hijyeni,

- Ürünlerin güvenliği,
- İzlenebilirlik,
- Çevreye dost faaliyetler.

Seraların tümleşik yönetiminin ana amacı, ekonomik olarak uygulanabilir ve çevreye duyarlı olan bir tarımsal tesiste karlı ürün yetiştirmektir. Bu tesis faydalı olan doğal prosesleri modern üretim teknikleri içerisine yerleştirir. Sistemin uygulanmasından elde edilen faydalar şunlardır:

- Tüm üretimi ve yetiştiricinin kazancını güvenceye alma,
- Tarımsal üretimin çevreye olan olumsuz etkilerini azaltma,
- Daha az sentetik kimyasal bileşenler kullanarak tarımsal ürünleri ve çevreyi koruma.

5.8.5 Bilgi ve İletişim Teknolojisi (ICT, Information and Communication Technology) Araçları ve Son Ürünler

Farklı açılardan teknoloji seviyeleri aşağıda sıralanmıştır:

- *Sistem mimarileri:* Tek başına çalışan denetleyiciler, PC tabanlı, ağa bağlı PC tabanlı ve SCADA sistemleri.

- *Diller ve araçlar:*

1. DOS tabanlı sistemler: Bu işletim sisteminin güvenilirliği ve PC platformlarındaki yaygınlığı sebebiyle 2004'de bu işletim programını kullanan sistemler vardır.
2. Araştırma amaçlı LabView ya da Matlab kurulumları: Bunlar I/O kontrol kartları ile beraber kullanılır.
3. Görsel OOPS ve Windows uygulamaları: Genellikle denetleyicinin görsel sunum ve ayar fonksiyonları için kullanılır. Uygun kontrol cihazları assembly, PLC tip yazılımlarla ve C dilinde gelişmiş yüksek fonksiyonlu yazılımlarla programlanır.
4. Karar destek sistemleri farklı programlama platformları ve yüksek seviyede karar verme özelliğine sahip teknolojiler (örneğin uyumsuzluk yönetimi ve optimizasyon için ajan teknolojileri) kullanılarak geliştirilir. Veri alış verişi için özel DDE yapılarını kullanarak diğer düşük seviyeli ancak güvenilir sistemlere rehberlik yapmak için ilave sistemler olarak yer alır.

- *İletişim:* Optik ya da manyetik izolasyonlu kablolu ya da sensörden kontrol cihazına ve bilgisayar sunucusuna kadar kablosuz RF ile sağlanır. İnternet bağlantısı uzaktan izleme ve kontrol için yaygın olarak kullanılan bir özellik olmaktadır. Cep telefonu bağlantısı kullanıcıya düzenli ve alarm raporlama sağlamak için gömülü teknolojiyi kullanır.

- *Sera kontrol cihazları:* Seralarda donanımlarla birlikte kullanılan cihazlarda; kendi kendine işlem yapma, gelişmiş işlem yapma, amaca göre uygulama geliştirme ve uyarılabılme yetenek ve özelliklere sahiptir.

5.8.6 Sera Üretim Yönetimi için Gelecek Bilgi Teknolojileri

Gerçek saha uygulamalarında ulaştığımız seviye, tarımsal otomasyon konusunda çalışan araştırmacıların ve şirketlerin gayretleri sayesinde geliştiriliyor. Bu gelişmeler teknolojiyi yaygın hale getiriyor, maliyet sürekli düşüyor. Biz artık kablosuz sensörleri ve eyleyicileri, dağıtık mikrodenetleyicileri, web kameraları destekleyen ana bilgisayarları, internet bağlantılı uzaktan erişimli denetleyici sistemleri sera otomasyonunda görüyoruz. Bilgi ağları gelişmeye devam etmektedir. Bunlar yapılan işleri uzaktan izleyebilecek, riskli durumlarda (örneğin: hastalıklar, kapalı çevrimli topraksız üretimde besin çözültisine ilişkin problemler) yetiştiricinin hassas kararlar almasına yardım edecek ya da bitkiye uygun iklim koşullarının oluşmasını sağlayabilecektir. Özel sera birimleri gıda üretim fabrikaları olarak (örneğin: iklim odalarında sürekli üretilen marul, kıvrıkcık gibi yapraklı bitkiler) geliştirilmektedir. Bunlar sızdırmaz ortamlarda üretilen bitkiler için tam donanımlı bilgi tabanlı gömülü kontrol ekipmanları ve yönetim sistemlerine sahiptir.

Kaynaklar

1. Bot, G. P. A. 1991. Physical modelling of greenhouse climate. *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, eds. Y. Hashimoto, and W. Day, 7-12. Oxford, UK: Pergamon Press.
2. Bakker, J. C., G. P. A. Bot, H. Challa, and N. J. van de Braak. 1995. *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen.
3. Jones, J. W., E. Dayan, L. H. Allen, H. Vankeulen, and H. Challa. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Trans. ASAE* 34: 663-672.
4. Challa, H., and G. van Straten. 1993. Diurnal control in greenhouses. *The Computerized Greenhouse*. eds. Y. Hashimoto, G. P. A. Bot, W. Day, H.-J. Tantau, and H. Nonami, 119-137. San Diego, CA: Academic.
5. Aaslyng, J. M., N. Ehler, P. Karlsen, and E. Rosenqvist. 1999. Intelligrow: A component-based climate control system for decreasing greenhouse energy consumption. *Acta Horticulturae* 507: 35-42.
6. Bates, M. E., and D. L. Bubenheim. 1999. Applications of process control to plant-based life support systems. SAE Technical Paper No. 972359. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
7. Volk, T., B. Bugbee, and R. M. Wheeler. 1995. An approach to crop modeling with the energy cascade. *Life Support and Biosphere Sci.* 1: 119-127.
8. Marcelis, L. F. M., E. Heuvelink, and J. Goudriaan. 1997. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Sc. Horticulturae*, 83-104.
9. Ferentinos, K. P., A. Anastasiou, G. D. Pasgianos, K. G. Arvanitis, and N. Sigrimis. 2003. A decision support system as a tool to optimal water management in soilless cultures under saline conditions. *International ISHS Symposium on Managing Greenhouse Crops in Saline Environment*.
10. Sigrimis, N., K. G. Arvanitis, and G. D. Pasgianos. 2000. Synergism of high and low level systems for the efficient management of greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture* 29: 21-39.
11. Seginer, I. 1993. Crop models in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae* 328: 79-97.

12. Albright, L. D., R. S. Gates, K. G. Arvanitis, and A. Drysdale. 2001. Environmental control for plants on Earth and in space. *IEEE Control Systems Magazine* 21(5): 28-47.
13. Gates, R. S., L. W. Turner, and D. G. Overhults. 1992. A survey of environmental controllers. *Trans. ASAE* 35: 993-998.
14. Albright, L. D. 1990. *Environment Control for Animals and Plants*. St. Joseph, MI: ASAE.
15. Young, P. C., W. Tych, and A. Chotai. 1991. Identification, estimation and control of glasshouse systems. *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, eds. Y. Hashimoto, and W. Day, 33-40. Oxford, UK: Pergamon Press.
16. Chotai, A., P. C. Young, P. Davis, and Z. Chalabi. 1991. True digital control of glasshouse systems. *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*. eds. Y. Hashimoto, and W. Day, 41-46. Oxford, UK: Pergamon Press.
17. Young, P. C., A. Chotai, and W. Tych. 1993. Identification, estimation and true digital control of glasshouse systems. *The Computerized Greenhouse*, eds. Y. Hashimoto, G. P. A. Bot, W. Day, H.-J. Tantau, and H. Nonami, 3-50. Academic Press.
18. Åström, K., and T. Hägglund. 1998. *PID controllers: Theory, Design and Tuning*. Research Triangle Park, NC: ISA Publications.
19. Jones, P., J. W. Jones, L. H. Allen, and J. W. Mishoe. 1984. Dynamic computer control of closed environmental plant chambers: Design and verification. *Trans. ASAE* 27: 879-888.
20. Stanghellini, C., and W. T. M. van Meurs. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *J. Agricultural Engineering Research* 51: 297-311.
21. Arvanitis, K. G., P. N. Paraskevopoulos, and A. A. Vernardos. 2000. Multirate adaptive temperature control of greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 303-320.
22. Chao, K., and R. S. Gates. 1996. Design of switching control systems for ventilated greenhouses. *Trans. ASAE* 39: 1513-1523.
23. Phelan, R. M. 1977. *Automatic Control Systems*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
24. Setiawan, A., L. D. Albright, and R. M. Phelan. 2000. Application of pseudoderivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 283-302.
25. Young, P. C., M. J. Lees, A. Chotai, W. Tych, and Z. S. Chalabi. 1994. Modelling and PIP control of a glasshouse microclimate. *Control Engineering Practice* 2: 591-604.
26. Lees, M. J., M. J. Taylor, A. Chotai, P. C. Young, and Z. S. Chalabi. 1996. Design and implementation of a Proportional-Integral-Plus (PIP) control system for temperature, humidity and carbon dioxide in a glasshouse. *Acta Horticulturae* 406: 115-123.
27. Smith, O. J. M. 1957. Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress* 53: 217.
28. Sigrimis, N., K. G. Arvanitis, G. D. Pasgianos, and K. P. Ferentinos. 2002. Computer integrated management and intelligent control of greenhouses. *Environment Control in Biology* 40(1): 39-53.
29. Hashimoto, Y. 1997. Applications of artificial neural networks and genetic algorithms to agricultural systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 18: 71-72.
30. Seginer, I., T. Boulard, and B. J. Bailey. 1994. Neural network models of the greenhouse climate. *J. Agricultural Engineering Research* 59: 203-216.
31. Seginer, I., Y. Hwang, T. Boulard, and J. Jones. 1996. Mimicking an expert greenhouse grower with a neural network policy. *Trans. ASAE* 39: 299-306.
32. Kok, R., R. Lacroix, G. Clark, and E. Taillefer. 1994. Imitation of a procedural greenhouse model with an artificial neural-network. *Canadian Agricultural Engineering* 36: 117-126.

33. Ferreira, P. M., E. A. Faria, and A. E. Ruano. 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction. *Neurocomputing* 43: 51-75.
34. Frausto, H. U., and J. G. Pieters. 2004. Modelling greenhouse temperature using system identification by means of neural networks. *Neurocomputing* 56: 423-428.
35. Ferentinos, K. P., and L. D. Albright. 2002. Predictive neural network modeling of pH and electrical conductivity in deep-trough hydroponics. *Trans. ASAE* 45: 2007-2015.
36. Frick, J., C. Precetti, and C. A. Mitchell. 1998. Predicting lettuce canopy photosynthesis with statistical and neural network models. *J. American Society for Horticultural Science* 123: 1076-1080.
37. Seginer, I. 1997. Some artificial neural network applications to greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture* 18: 167-186.
38. Ferentinos, K. P. 2005. Biological engineering applications of feedforward neural networks designed and parameterized by genetic algorithms. *Neural Networks* 18: 934-950.
39. Goggos, V., and R. E. King. 2000. Qualitative-evolutionary design of greenhouse environment control agents. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 271- 282.
40. Hashimoto, Y., H. Murase, T. Morimoto, and T. Torii. 2001. Intelligent systems for agriculture in Japan. *IEEE Control Systems Magazine* 21(5): 71-85.
41. Morimoto, T., K. Hatou, and Y. Hashimoto. 1996. Intelligent control for plant production system. *Control Engineering Practice* 4: 773-784.
42. Morimoto, T., T. Torii, and Y. Hashimoto. 1995. Optimal-control of physiological processes of plants in a green plant factory. *Control Engineering Practice* 3: 505-511.
43. Husmann, H. J., and H. J. Tantau. Integrated optimization of energy supply systems in horticulture using genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 31: 47-59.
44. Caponetto, R., L. Fortuna, G. Nunnari, L. Occhipinti, and M. G. Xibilia. 2000. Soft computing for greenhouse climate control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 8: 753-760.
45. Murase, H. 2000. Finite element inverse analysis using a photosynthetic algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture* 29: 115-123.
46. Kurata, K., and N. Eguchi. 1990. Machine learning of fuzzy rules for crop management in protected cultivation. *Trans. ASAE* 33: 1360-1368.
47. Salgado, P., J. B. Cunha, and C. Couto. 1998. A fuzzy identification and controller for the agricultural greenhouse. *7th International Conference on Computers in Agriculture*. St. Joseph, MI: ASAE.
48. Gates, R. S., K. Chao, and N. Sigrimis. 2001. Identifying design parameters for fuzzy control of staged ventilation control systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 31: 61-74.
49. Chao, K., R. S. Gates, and N. Sigrimis. 2000. Fuzzy logic controller design for staged heating and ventilating systems. *Trans. ASAE* 43: 1885-1894.
50. Sigrimis, N. A., K. G. Arvanitis, and R. S. Gates. 2000. A learning technique for a general purpose optimizer. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 83-103.
51. Krug, H., and H.-P. Liebig. 1980. Diurnal thermoperiodism of the cucumber. *Acta Horticulturae* 118: 83-94.
52. Langhans, R. W., M. Wolfe, and L. D. Albright. 1981. Use of average night temperatures for plant growth for potential energy savings. *Acta Horticulturae* 115: 31-37.
53. Miller, W. B., R. W. Langhans, and L. D. Albright. 1985. Plant growth under average day/night temperatures. *Acta Horticulturae* 174: 313-320.
54. Both, A. J., L. D. Albright, and R. W. Langhans. 1997. Coordinated management of daily PAR integral and carbon dioxide for hydroponic lettuce production. *Acta Horticulturae* 456: 45-51.

55. Saffell, R. A., and B. Marshall. 1983. Computer control of air temperature in a glasshouse. *J. Agricultural Engineering Research* 28: 469-478.
56. De Koning, A. N. M. 1988. An algorithm for controlling the average 24-hour temperature in glasshouses. *J. Horticultural Science* 63: 473-477.
57. De Koning, A. N. M. 1990. Long term temperature integration of tomato: Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae* 45: 117-127.
58. Hooper, A. W., and P. F. Davis. 1988. An algorithm for temperature compensation in a heated greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture* 3: 251-262.
59. Timmons, M. B., and R. S. Gates. 1987. Relative humidity as a ventilation control parameter in broiler housing. *Trans. ASAE* 30: 1111-1115.
60. Timmons, M. B., R. S. Gates, R. W. Bottcher, T. A. Carter, J. T. Brake, and M. J. Wineland. 1995. Simulation analysis of a new temperature control method for poultry housing. *J. Agricultural Engineering Research* 62: 237-245.
61. Gates, R. S., M. B. Timmons, D. G. Overhults, and R. W. Bottcher. 1997. Fuzzy reasoning for environment control during periods of heat stress. *Proc. of the Fifth International Symposium, Livestock Environment*, 553-562. St Joseph, MI: ASAE.
62. Marsh, L. S., and L. D. Albright. 1991. Economically optimum day temperature for greenhouse hydroponic lettuce production Part 1: A computer model. *Trans. ASAE* 34: 550-556.
63. Marsh, L. S., and L. D. Albright. 1991. Economically optimum day temperature for greenhouse hydroponic lettuce production Part 2: Results and simulations. *Trans. ASAE* 34: 557-562.
64. Seginer, I., G. Shina, L. D. Albright, and L. S. Marsh. 1991. Optimal temperature setpoints for greenhouse lettuce. *J. Agricultural Engineering Research* 49: 209-226.
65. Tantau, H.-J. 1998. Energy saving potential of greenhouse climate control. *Mathematics and Computers in Simulation* 48: 93-101.
66. Sigrimis, N., A. Anastasiou, and N. Rerras. 2000. Energy saving in greenhouse using temperature integration: A simulation survey. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 321-341.
67. Bot, G. P. A. 2001. Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving. *Computers and Electronics in Agriculture* 30: 151-165.
68. Korner, O., and H. Challa. 2003. Design for an improved temperature integration concept in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture* 39: 39-59.
69. Albright, L. D., A.-J. Both, and A. J. Chiu. 2000. Controlling greenhouse light to a consistent daily integral. *Trans. ASAE* 43: 421-431.
70. Ferentinos, K. P., L. D. Albright, and D. V. Ramani. 2000. Optimal light integral and carbon dioxide concentration combinations for lettuce in ventilated greenhouses. *J. Agricultural Engineering Research* 77: 309-315.
71. Korner, O., and H. Challa. 2003. Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 39: 173-192.
72. van Straten, G., H. Challa, and F. Buwalda. 2000. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 221-238.
73. van Straten, G., L. G. van Willigenburg, and R. F. Tap 2002. The significance of crop co-states for receding horizon optimal control of greenhouse climate. *Control Engineering Practice* 10: 625-632.
74. Chalabi, Z. S., B. J. Bailey, and D. J. Wilkinson. 1996. A real-time optimal control algorithm for greenhouse heating. *Computers and Electronics in Agriculture* 15: 1-13.
75. Lacroix R, and R. Kok. 1999. Simulation-based control of enclosed ecosystems—A case study: Determination of greenhouse heating setpoints. *Canadian Agricultural Engineering* 41: 175-183.

76. Gieling, T., H. J. J. Janssen, G. van Straten, and M. Suurmond. 2000. Identification and simulated control of greenhouse closed water supply systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 361-374.
77. Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management. PhD diss. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University.
78. Sigrimis, N., K. G. Arvanitis, G. D. Pasgianos, and K. Ferentinos. 2001. Hydroponics water management using adaptive scheduling with an on-line optimiser. *Computers and Electronics in Agriculture* 31: 31-46.
79. Gal, S., A. Angel, and I. Seginer. 1984. Optimal control of greenhouse climate: methodology. *European J. Operational Research* 17: 45-56.
80. Seginer, I., and R. W. McClendon. 1992. Methods for optimal control of the greenhouse environment. *Trans. ASAE* 35: 1299-1307.
81. Pasgianos, G. D., K. G. Arvanitis, P. Polycarpou, and N. Sigrimis. 2003. A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 153-177.
82. Linker, R., P. O. Gutman, and I. Seginer. 1999. Robust controllers for simultaneous control of temperature and CO₂ concentration in greenhouses. *Control Engineering Practice* 7: 851-862.
83. Ferentinos, K. P., K. G. Arvanitis, S. Hontas, D. Lambrou, and N. Sigrimis. 2004. A multi-agent system for integrated production in greenhouse hydroponics. *AgEng 2004, Leuven, Belgium*, accepted for publication.
84. King, R. E., and N. Sigrimis. 2001. Computational intelligence in crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 31: 1-3.
85. Jolliet, O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. Agricultural Engineering Research* 57: 23-37.
86. Morimoto, T., and Y. Hashimoto. 2000. An intelligent control for greenhouse automation, oriented by the concepts of SPA and SFA—An application to a postharvest process. *Computers and Electronics in Agriculture* 29: 3-20.
87. Chao, K., R. S. Gates, and R. G. Anderson. 1998. Knowledge-based control systems for single stem rose production Part I: Systems analysis and design. *Trans. ASAE* 41: 1153-1161.
88. Anastasiou, A., N. Rerras, and N. Sigrimis. 1998. A knowledge based SCADA system for agricultural process control. *Proc. of International Federation of Automatic Control—CAEA '98*, eds. N. Sigrimis, and P. Groumpos, 163-168. Oxford, UK: Pergamon.
89. Ferentinos, K. P., and L. D. Albright. 2003. Fault detection and diagnosis in deep-trough hydroponics using intelligent computational tools. *Biosystems Engineering* 84: 13-30.
90. Beulah, S. A., and Z. S. Chalabi. 1997. Intelligent real-time fault diagnosis of greenhouse sensors. *Control Engineering Practice* 5: 1573-1580.
91. Linker, R., P. O. Gutman, and I. Seginer. 2002. Observer-based robust failure detection and isolation in greenhouses. *Control Engineering Practice* 10: 519-531.
92. Ferentinos, K. P., L. D. Albright, and B. Selman. 2003. Neural network-based detection of mechanical, sensor and biological faults in deep-trough hydroponics. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 65-85.
93. Linker, R., and I. Seginer. 2003. Water stress detection in a greenhouse by a step change of ventilation. *Biosystems Engineering* 84: 79-89.
94. Antignus, Y., 2001. Manipulation of wavelength-dependent behaviour of insects: An IPM tool to impede insects and restrict epidemics of insect-borne viruses. *Virus Research* 71: 213-220.