

Berckmans Daniel, and Erik Vranken. 2006. Section 6.3 Monitoring, Prediction, and Control of the Micro-Environment, pp. 383-401 of Chapter 6 Management and Decision Support Systems, 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

6.3 Mikroçevrenin Görüntülenmesi, Tahmini ve Kontrolü

Yazarlar: D. Berckmans ve E. Vranken

Çevirmen: Mehmet Ali DAYIOĞLU

Özet: Canlı her organizma (insan, hayvan, bitki) ideal olmayan karışık bir akışkanın (nemli hava) içinde yaşıyor ve onun yakınındaki mikroçevresine tepki veriyor. Biyolojik tepkinin etkili kontrolünü sağlamak için, kontrol girdilerinin değişimlerine göre sinyallerin sürekli izlenmesi, gelişen olayların tahmini ve mikroçevrenin kontrol edilmesi gerekir. Bu bölüm canlı organizma etrafındaki üç boyutlu (3D) mikroçevrenin aktif kontrolünü sağlamak için bilgi teknolojisinin bize nasıl yardımcı olduğunu tanımlar.

Anahtar Kelimeler: 3D mikroçevre, Eksik karışım, Biyolojik tepki, Havalandırma debisi kontrolü, Hava akış deseninin kontrolü.

6.3.1 Tarımsal Yapıların Evrimi

Geçmişte, hayvan barınakları esas olarak sundurma işlevine sahipti. Bu alandaki önceki bilimsel araştırmalar hayvan performansı [1] üzerine iklimin etkilerini göstermiştir ve bu da barınakların yapımında yeni mühendislik kavramlarının gelişimine sebep olmuştur. Daha sonra, dış alanlara doğrudan bağlantısı olmadan hayvanları koruma uygulaması başladı. Bu gelişim hayvan barınaklarının fonksiyonunu sade bir sundurma fonksiyonundan hayvansal üretimin (et, yavru, süt, yumurta) ana merkeze oturduğu bir üretim aracına dönüştürdü. Geleneksel hayvan barınakları büyük ölçekli üretim birimlerine dönüştü. Çiftçi daha büyük hayvan grupları oluşumu karşısında hayvanların bireysel özelliklerini bilemez hale geldi. Benzer şekilde sera büyüklükleri arttı. İyi yetiştirme koşulları sağlamak için sera iklim kontrolünde daha gelişmiş kontrol cihazlarına gereksinim duyuldu.

Proses kontrol birimlerine elektroniğin girmesi hayvan barınaklarında, seralarda ve depolarda otomatik kontrolün daha fazla kullanılmasını sağladı. Bir sonraki aşama ise sensörler, havalandırma sistemleri ve donanım konusunda uzman tedarikçi şirketlerin sağladığı bilgisayarlar ve dijital kontrol cihazların ortaya çıkmasıdır. Ancak, bu donanımların gelişiminde biyolojik proseslerle ilgisi olmayan

teknoloji şirketlerinin aktif rol oynadığı ifade edilmelidir. Bugün güvenilir kontrol cihazlarını ve bilgisayarları yapmak için gerekli teknik kapasite mevcut olup, bu şirketler bilgi teknolojisini biyolojik proseslere uygulamak için yeni yollar araştırmaktadır.

6.3.2 Tarımsal Yapılarda Mikroçevre Kontrolünün Önemi

Tarımsal yapıların kullanım alanlarındaki mikroçevre koşulları (sıcaklık, nem, gaz konsantrasyonu, toz, vd); hayvanların, bitkilerin ya da ürünlerin tepkilerini etkilediği uzun zamandan beri bilinmektedir. Bu koşullar büyüme hızı, ürün kalitesi ve sağlığı üzerinde birçok etkiye sahiptir [2-8]. Tablo 1; hayvanların, bitkilerin ve biyolojik ürünlerin sağlık durumu, refahı ve performansı hakkında iklim parametrelerinin etkisini göstermek için bir literatür özeti verir.

Tablo 1. Hayvanların, bitkilerin ve biyolojik ürünlerin sağlık durumu, refahı ve performansı üzerinde iklim parametrelerinin etkileri.

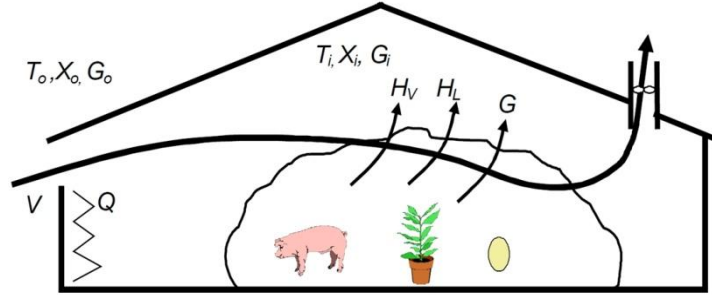
Yazar	Çevresel değişken	Gözlenen etki
Cannell and Thornley, 1998 [9]	Sıcaklık ve CO ₂	Yaprak ve bitki fotosentezi
Daudet et al., 1999 [10]	Rüzgâr hızı	Fotosentez üzerine etkisi, stoma iletkenliği, transpirasyon hızı
Hartung et al., 1994 [11]	Toz ve mikroorganizmalar	Yüksek toz ve mikroorganizma sonucu solunum hastalıkları ve azalmış enfeksiyon direnci
Hilbert et al., 1991 [12]	CO ₂ ve günlük foton akı yoğunluğu	Yaprak azot konsantrasyonu üzerine etkisi ve kök: dal oranı
Kittas et al., 2001 [13]	Sera havalandırma rejimi	Yaz koşullarında gül bitkisinin enerji paylaşımı ve mikroklima üzerinde etkisi
Nienaber et al., 1993 [14]	Sıcaklık	Oda sıcaklığı domuzların yeme alışkanlığında önemli bir rol oynar.
Ogilvie, 1993 [15]	Sıcaklık ve hava hızı	Pratik tarla koşullarında belirli sınırlar içinde, istediği zaman beslenmesi durumunda domuzların sağlık durumuna sıcaklık ve hava hızının etkisi önemli değildir.
Stanghellini and van Meurs, 1992 [16]	Işık, sıcaklık ve bağıl nem	Bitki transpirasyonu üzerine etkisi
Yang et al., 1995 [17]	Hava koşulları	Seralarda bitki ve hava arasında ısı ve kütle değişimi üzerine etkisi

Biyolojik üretim biriminde mikroçevre koşulları; ısı, nem ve gazların iç ortamda üretimi ve bunların kullanım alanlarından hava taşınımı yoluyla uzaklaştırılmasının bir sonucudur. Bu nedenle, havalandırma sisteminin amacı maksimum üretim etkinliği ve/veya ısıl konforu sağlamak için tarımsal yapıların

kullanılan bölümlerindeki mikroçevrenin (sıcaklık, nem, gaz konsantrasyonu, toz, vd) kabul edilebilir bir seviyede kontrol edilmesidir.

Çevrenin kontrolünde üç temel eşitlik kullanılır: 1. Duyulur ısı dengesi, 2. Nem dengesi ve 3. Gaz dengesidir (Şekil 1). Tarımsal yapılar açısından havalandırma debisinin kontrolünde bu dengelerin tanımı çok önemlidir. Durgun koşullarda barınaktaki havanın tam karışmış ve homojen sıcaklıkta olduğu varsayılırsa, duyulur ısı, nem ve gazlara ilişkin dengeler saptanabilir. Bu dengeler iç hava sıcaklığı, nemi ve/veya gaz konsantrasyonunu kontrol etmek için gerekli havalandırma oranını hesaplamada kullanılabilir (Şekil 1 ve 2). Bu üç eşitlik, etkin bir çevre kontrol sisteminde, yıl boyunca çoğu zaman yeterlidir.

Tam olarak karışmayan bir akışkan içinde yaşayan organizmaların biyolojik tepkilerinin kontrolünde dört aşama gerçekleşmelidir: (1) Havalandırma debisinin kontrolü, (2) hava akış şeklinin kontrolü, (3) mikroçevre koşullarının kontrolü ve (4) kontrol sisteminde hayvan tepkilerinin bütün olarak değerlendirilmesi. Biyolojik süreçlerin kontrolünde bu dört farklı aşama Şekil 2’de gösterilmiştir.



$$H_v + Q = V \cdot \gamma \cdot c_{DA}(T_i - T_o) + \sum k \cdot S(T_i - T_o) \quad (1)$$

$$\frac{H_L}{\epsilon} + W = V \cdot \gamma(X_i - X_o) \quad (2)$$

$$G = V(G_i - G_o) \quad (3)$$

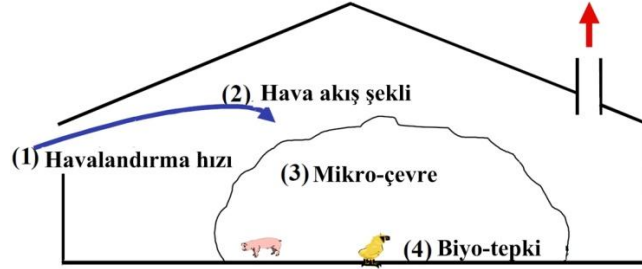
H_v = duyulur ısı üretimi (J/s), H_L = gizli ısı üretimi (J/s), G = gaz üretimi (kg/s), Q = ısı temini ($Q>0$, $Q<0$) (J/s), V = Havalandırma debisi (m^3/s), γ hava yoğunluğu (kg kuru hava/ m^3), c_{DA} = kuru havanın ısı kapasitesi (J/kg kuru hava K), k = ısı transfer katsayısı (J/ sm^2K), S = ısı değişimi yüzey alanı (m^2), T_i =istenen iç hava sıcaklığı (K), X_i =iç havanın nem oranı (kg H_2O /kg kuru hava), G_i = iç gaz konsantrasyonu (kg/ m^3) T_o =dış hava sıcaklığı (K), X_o =dış havanın nem oranı (kg H_2O /kg kuru hava), G_o = dış gaz konsantrasyonu (kg/ m^3).

Şekil 1. Duyulur ısı (1), nem (2) ve gaz (3) dengesinin hesaplanması.

Bu şekilde karmaşık bir süreçte mikroçevrenin etkin kontrolünü sağlamak için, kontrol teorisi model tabanlı kontrol yaklaşımını kullanır. Süreç çıktılarının nasıl davranacağını tahmin etmek için matematiksel model kullanılır ve elde edilen bilgiler daha etkin kontrole müsaade eder. Literatürde bulunan modellerin çoğu

kullanılan denklemler nedeniyle karmaşık oldukları için kontrol amacıyla doğrudan kullanılamaz. Bu denklemlerin çoğu sadece durgun ortam koşulları için geçerlidir. Yeni yazılımlarla böyle karmaşık süreçlerin doğru modeli çevrimiçi matematiksel teknikler kullanılarak çözülebilir. Bu çevrimiçi tekniklerde ele alınan sürecin girdileri ve çıktılarının sürekli izlenmesi gereklidir [18].

Model tabanlı kontrol prensibi Şekil 2’de gösterildiği gibi dört farklı seviyede uygulanabilir. Genel bir sunum sonraki bölümlerde verilmiştir.



Şekil 2. Biyosüreç kontrolünde dört aşama.

6.3.3 Havalandırma Debisinin Optimal Kontrolü

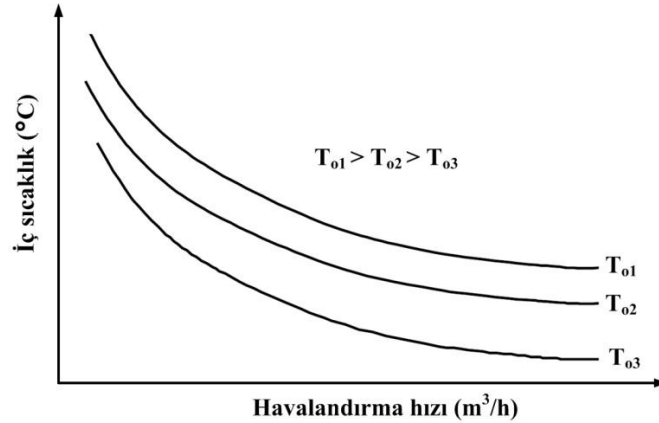
Havalandırma Debisi Kontrolünün Önemi

Çoğu yazar fiziksel mikroçevre parametreleri ve havalandırılan bir yapının havalandırma debisi arasındaki ilişkiyi belirlemek için denge eşitlikleri kullanmaktadır [19-22]. Tüm yazarlar özellikle düşük havalandırma hızlarında; elde edilen iç hava sıcaklığı, hava nemi ve gaz konsantrasyonu üzerine havalandırma debisindeki değişimin etkisinin oldukça güçlü olduğu sonucuna varmışlardır. Şekil 3’de farklı dış hava sıcaklıklarında, hayvan barınağı iç sıcaklığı ve havalandırma debisi arasındaki ilişkiler örnek olarak gösterilmiştir.

Şekil 1’de verilen üç temel eşitliğin bir değişken yardımıyla, birbirlerine bağlantılı olduğu görülmektedir. Bu değişken havalandırma debisidir. Sonuç olarak, havalandırma debisinin değişimi; oluşan iç hava sıcaklığı, nem ve gaz konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, uygun ve sabit iç iklim koşullarının kontrolü için, mutlak ölçüt olarak alınan havalandırma debisi matematiksel olarak tanımlanır.

Ancak, mevcut havalandırma donanımlarına ilişkin yapılan laboratuvar testleri ve saha analizlerine göre çoğu tarımsal havalandırma sistemleri başarılı bir şekilde havalandırma debisinin kontrolünde yeterli olmadığı ve otomatik kontrollü mekanik havalandırma sistemlerinin sağladığı ekonomik faydalar hakkında şüpheler bulunduğunu göstermiştir [23-25]. Bu konuda uygulamaya gelişmiş kontrol algoritmalarının aktarılmasından önce, barınaklara özgü havalandırma debisinin etkin kontrolü gereklidir.

Ayrıca, havalandırma debisi hayvan barınaklarında zararlı maddelerin (amonyak ve toz gibi) yayılmasında da etkilidir. Barınaklarda yüksek amonyak konsantrasyonu, işçiler ve hayvanlar için yüksek seviyede sağlık sorunlarını tetikleyebilir [26]. Yüksek amonyak emisyonu çevresel ve ekolojik zararlarla ilişkilidir. Domuz barınağında havalandırma debisinin kontrolü ile yıllık amonyak emisyonunun %10 azaltılabileceği tespit edilmiştir [27, 28].



Şekil 3. Duyulur ısı dengesinde $Q = 0$ olduğu varsayılarak, hayvan barınağında iç sıcaklık (T_i), dış sıcaklık (T_o) ve havalandırma debisi (V) arasındaki ilişkiler.

Literatür ve saha araştırmalarına göre, tarımsal yapıların iklim kontrolünde havalandırma debisi *iç iklim koşullarını* belirleme özelliği ve *yapı içindeki hacimsel dağılımı* nedeniyle en önemli parametredir. Bunun sonucunda biyolojik materyallerin *sağlık durumu, üretim miktarı ve kalitesi, zararlı emisyonlar* ve genel havalandırma ve ısıtma için toplam *enerji tüketimi* değişim gösterir. Bu nedenle, tarımsal yapılarda etkin havalandırma debisi kontrolü sayesinde bazı faydaların elde edilmesi beklenir.

Uygulamada, barınağın havalandırma debisinin etkin kontrolü basit değildir. Yapıların çoğunda ucuz olması ve çok farklı havalandırma hızlarında üretilebilmesi nedeniyle aksiyal fanlar kullanılır. Ancak, bunların sakıncalı yönleri rüzgâr etkisi nedeniyle basınç farklarından, hava giriş açıklıklarının şeklinden aşırı etkilenmesidir.

Havalandırma debisinin kontrolünde daha iyi bir çözüm Amerika’da yaygın olarak kullanılan negatif basınç kontrol tekniğidir. Basınç sensörü, hava girişlerinin konumunu kontrol etmek için kullanılır. Öyle ki, bu girişlerde yaklaşık 20 Pa sabit negatif basınç uygulayarak, fanın dengeli aralıkta çalışmasını sağlayan, fan gerilimi ile havalandırma debisi arasında matematiksel bir eşitlik türetilmiştir.

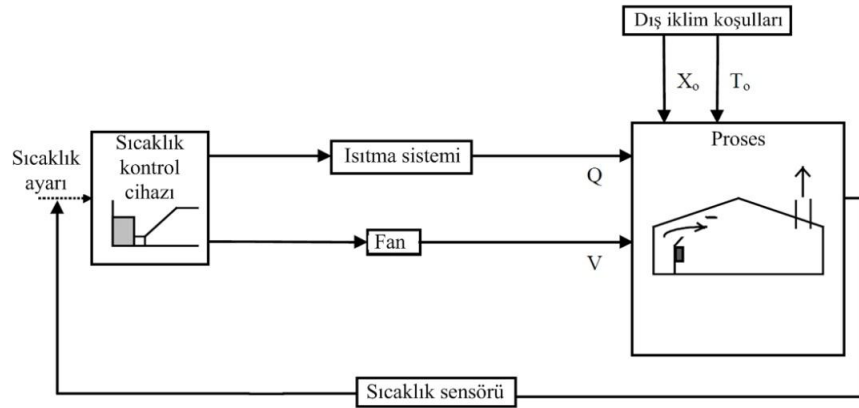
Diğer bir çözüm, havalandırma debisini sürekli ölçmek ve bu bilgiyi havalandırma debisi kontrol cihazının geri beslemeli döngüsünde kullanmaktır. Sonraki bölümde gösterildiği gibi basınç kontrolü ile bazı üstünlüklere sahip olan bu teknik Avrupa’da çok sık kullanılır.

Havalandırma Debisinin Kapalı Döngü Kontrolü

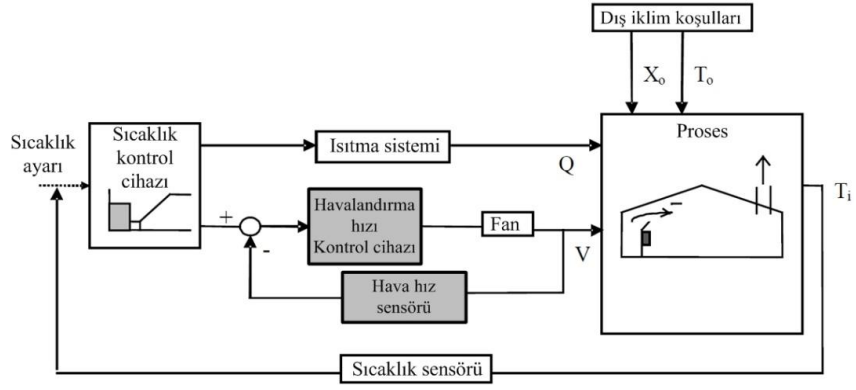
Günümüzün tarımsal uygulamalarında ana kontrol prensibi iç hava sıcaklığının geri beslemeli kontrolü ve havalandırma debisi, nem, emisyonlar, hava akış şekli ve biyolojik tepkiler gibi diğer değişkenlerin tümü açık döngülü kontroldür (Şekil 4a). Bilgi teknolojisinin kullanımı ve farklı seviyelerdeki model tabanlı kontrol, biyolojik süreçlerin kontrolünde önemli üstünlükler sağlar.

Geleneksel havalandırma kontrol sisteminde (Şekil 4b) geri beslemenin birleştirilmesi, laboratuvar ve alan testlerinde gösterildiği gibi bazı üstünlüklere sahiptir [22]. Havalandırma debisinin kontrolünde aktif geri beslemeli kontrol yönteminin kullanılmasının sebebi, havalandırma debisinin dinamik değişiminin yer aldığı frekans aralığının dış ve oluşan iç sıcaklığın frekans aralığından tamamen farklı olmasıdır. Ayrıca, havalandırma debisinin sürekli dalgalanması; hava akış şeklinin kararlılığı ve seviyesi, 3D mikroçevre, emisyonlar ve enerji kullanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

Bu geri beslemeli kontrol sisteminde, sürekli havalandırma debisini ölçen bir sensör gereklidir. Bu amaçla, her biri özel hassasiyete sahip olan bazı teknikler literatürde tanımlanır. Genel olarak, havalandırma debisini izleme iki grupta sınıflandırılabilir: Doğrudan izleme ve dolaylı izlemedir. Dolaylı izlemede uzun zaman aralığında (örneğin birkaç saat); iz gazı kullanımı, CO₂ dengesi ya da ısı dengesi gibi dolaylı yöntemler kullanılarak havalandırma debisi tespit edilebilir. Ancak bu yöntemlerde koşulların durgun olduğu ve havalandırılan ortamın tam karışmış olduğu varsayılır. Bu koşullar pratik saha koşullarında oluşmadığı için, %40'a kadar ulaşan ölçüm hatalarına neden olabilir. Genel olarak dolaylı izleme teknikleri, havalandırılan yapılarda salınım yapan yüksek havalandırma hızlarının çevrim içi izlenmesi için yeterince hızlı değildir ve yeterince doğru sonuçlar vermemektedir. Ayrıca, bunlar sürekli kontrol uygulamaları için aşırı pahalıdır.



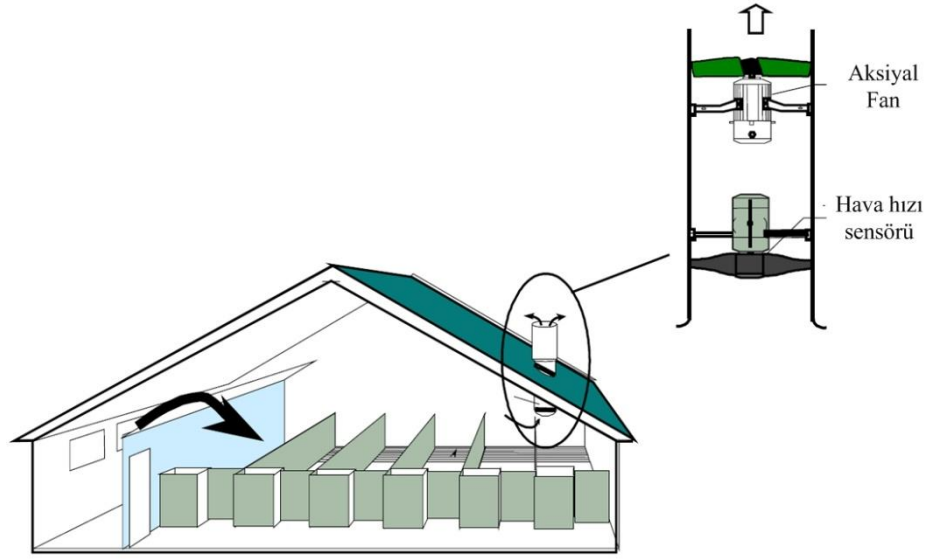
Şekil 4a. Geleneksel açık döngü iklim denetimi.



Şekil 4b. Geleneksel iklim kontrol sistemine havalandırma debisi kontrol cihazının bağlanması.

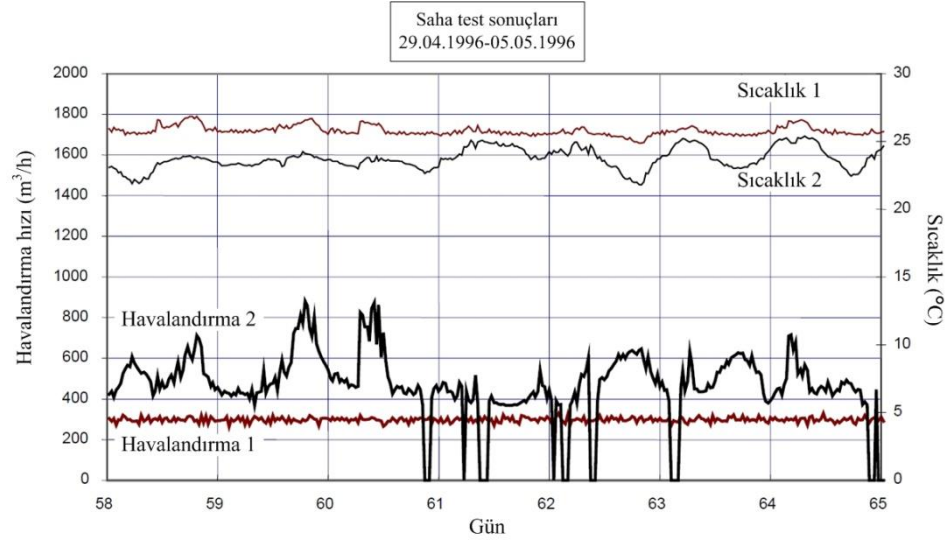
Diğer taraftan doğrudan izleme yöntemleri her havalandırma açıklığında hızın (dağılımı) izlenmeye çalışır. Bunların çoğunda havalandırılan bölgeyi tanımlayan nokta ölçümler yapılır. Genel olarak kullanılan sensörler; pitot tüpleri, rüzgâr gülü ve kızgın telli anemometreler olarak sıralanabilir. Bu doğrudan ölçüm tekniklerinin ana sakıncası, ölçülen bölgede hız dağılımının tek düze olduğunun varsayılmasıdır. Ancak, doğal ya da mekanik havalandırma sistemlerinde genellikle hava akış biçimi çok karmaşık ve türbülanslı olduğundan, ölçülen hava hızı profili havalandırma açıklığı önündeki statik hava basıncı farkına bağlı olarak değişir. Aşılması gereken ikinci sorun hız profilinin geçici dalgalanmasıdır. Özellikle daha büyük giriş ve çıkış bölümlerinde, rüzgâr etkisinden kaynaklanan basınç dalgalanmaları dikkate alınabilir. Bu koşullarda kullanılan havalandırma hız sensörü hızlı salınımları da karşılayacak havalandırma debisini ölçebilen çabuk tepki verme özelliğine (optimal olarak 3 saniyelik zaman sabiti) sahip olmalıdır.

Bu bulgulara göre, istenen ölçüm düzlemindeki hız profili çok karmaşıktır ve böyle bir durumda hava akışı ölçüm tekniği için uygun sensör tasarımına ihtiyaç vardır. Saha koşullarında kontrol amaçlı sürekli ve hassas havalandırma debisi ölçümleri için tüm havalandırma açıklığını kapatan pervane tipi sensörler yeterli sonuçlar vermektedir. Bunların uygun kanat tasarımı sayesinde, 0-120 Pa basınç farklarında, 200 ile 14,000 m³/h çalışma aralığında tam ölçekte %1 hassasiyetle çalıştıkları tespit edilmiştir. Şekil 5 mekanik olarak havalandırılan tarımsal yapıların bacasına pervane tipi sensörün nasıl bağlandığını gösterir [29].



Şekil 5. Tüm havalandırma açıklığını kapatan pervane tipi sensörün çalışma prensibi.

Saha testlerinde gösterildiği gibi [29], havalandırmanın geri beslemeli kontrolü için sisteme serbest hareketli pervane tipi bir sensörün bağlanması, havalandırma debisinin ve bunun sonucunda iç iklim koşullarının kararlı olmasına katkıda bulunur. Saha denemeleri sırasında, aynı büyüklükteki iki domuz barınağında, iki farklı fan kontrol sistemlerinin sağladığı havalandırma hızları eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Bir hafta boyunca, barınak 1 (havalandırma debisinin geri beslemeli kontrolü) ve barınak 2 (açık döngü gerilim kontrolü) için havalandırma hızları Şekil 6'da gösterilmiştir. Her iki barınak için istenen havalandırma hızları $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 'tir. Bu örneğe göre, kapalı döngülü havalandırma debisi denetleyicisi, açık döngülü gerilim kontrollü denetleyiciye göre daha kararlı ve daha doğru havalandırma hızları vermektedir (Şekilde gösterilen yedi günlük zaman aralığı için 11'e karşı 167 m^3/h standart sapma).



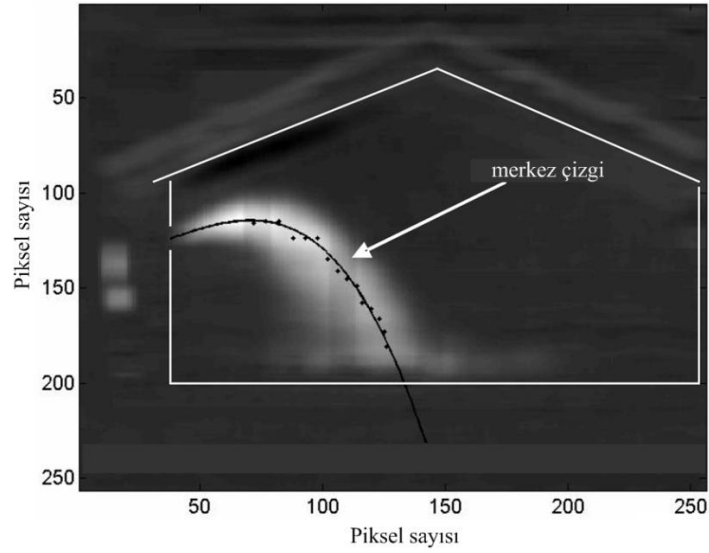
Şekil 6. İki farklı fan kontrol stratejisine göre ölçülen havalandırma hızları ve ortalama iç hava sıcaklığı değişimi (1: geri beslemeli havalandırma debisi kontrolü, 2: açık döngü gerilim kontrolü).

6.3.4 Havalandırılan Ortamda Hava Akış Şeklinin Kontrolü

Kapalı ortamlarda, birim zamanda içeri giren havanın miktarı ve bunun dağılımı ortamda yaşayan organizmalar açısından optimal koşulların sağlanmasında büyük bir etkiye sahiptir [20, 30]. Hayvan barınaklarındaki hava akış şekilleri hava hızlarının dağılımını, sıcaklığı, gaz konsantrasyonlarını ve gübreden gaz çıkışını etkilemektedir [11, 31]. Günümüzün tarımsal yapılarında, hava akış dağılımı aktif olarak kontrol edilemez. Çoğu durumlarda, iç sıcaklık ölçümleri giriş açıklıklarını ayarlamak için kullanılır. Ancak hava akış şeklinin hızlı dalgalanmalarına karşılık ölçülen iç sıcaklık tepkisinin yavaş olması yeterli kontrolün sağlanmasını engeller. Sonuç olarak, hava akış şeklinin ölçümü ve kontrolü son yıllarda bilim adamlarının önemli ilgi alanları arasındadır [32, 35].

Hava akış şeklinin doğrudan saptanmasında görüntü işleme teknikleri kullanılabilir [36, 37]. Bu teknikler içeri giren havanın izini çıkarmak için dumanın kullanıldığı iki boyutlu hava akış şeklinin görüntülenmesine dayanır (Şekil 7). Boyutları 8x4x2.5 m olan test odasına 4 m mesafede yerleştirilen kameranın tespit ettiği izin merkez hattının doğruluğu 0.05 m'dir [38]. Bu hassasiyete karşın, bu tip hava akış şeklini görüntüleme sadece bilimsel çalışmalarda kullanılabilir; kontrol için gerekli olan sürekli ölçümlerin yapılmasına uygun değildir.

Hava hızı ölçümleri hava akış şeklinin çıkarılmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır [31, 34, 35, 39, 40]. Önceki yöntemle benzeyen bu ölçüm tekniğinin hassasiyeti %1 ile %5 arasında olmakla birlikte bu yöntem pahalıdır. Hayvan barınağının kirli, aşındırıcı zor koşullarında nadiren kullanılabilir.



Şekil 7. Görüntü analizi ile hava akış şekli ve düşme mesafesinin tespiti.

Literatüre göre, hava akış şeklinin sayısallaştırılmasında genellikle yüzdürme kuvvetlerinin başlangıçtaki jet momentumuna oranı olan Arşimet sayısı kullanılır [41]. Oda ve giriş boyutlarını hesaba katarak Randall ve Battams [21] aşağıda verilen düzeltilmiş Arşimet sayısını (Ar_c) tanımladılar:

$$Ar_c = \frac{C_d a b B H (B + H) (T_{hs} - T_o)}{V^2 (T_{hs} - T_o)} \quad (4)$$

Burada C_d = boşaltma katsayısı

a ve b= hava girişinin dikey ve yatay boyutları (m)

B ve H= havalandırılan odanın genişliği ve yüksekliği (m)

V = havalandırma debisi (m^3/s)

T_o = giren hava sıcaklığı (K)

T_{hs} = ısıtılan yüzey sıcaklığı yani odadaki en sıcak elamanın sıcaklığı (ısıtıcı eleman veya canlı organizma)

Teorik olarak, (4) nolu eşitlik belirli bir havalandırma debisi ve giriş sıcaklığı için istenen Arşimet sayısına karşılık gelen dikey giriş boyutu a'nın hesaplanmasında kullanılabilir.

Hava akış şeklini tanımlamak için bir parametre olarak Arşimet sayısı ve düşme mesafesinin kullanımı Leonard ve McQuitty [42] tarafından yapıldı. Jetin düşme mesafesi girişten jetin ulaştığı noktaya kadar olan yatay uzaklık olarak tanımlanır [43]. Yönlendirme plakası ile sağlanan farklı giriş açıklıkları için düşme mesafesi ve giriş Ar_c sayısı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Ar_c sayısı giriş mesafesinin sıcaklık farkı ve havalandırma debisinin birleşik

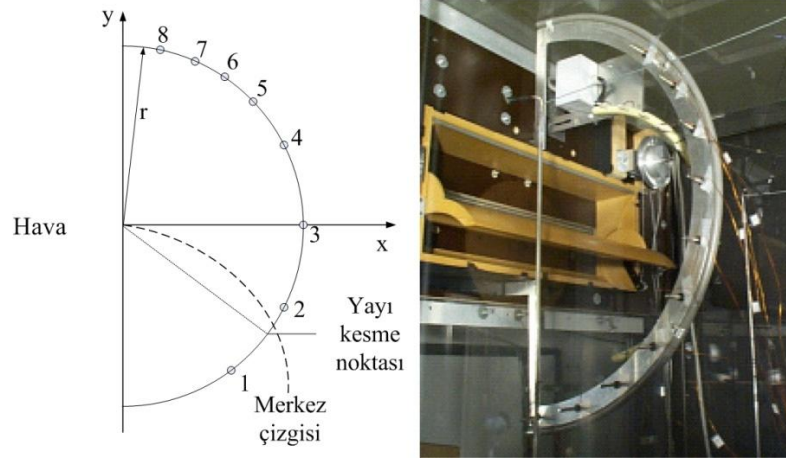
etkilerini tam olarak ortaya koydu. Ancak bu sayı düşme mesafesi üzerinde tüm giriş açıklık ve yönlendirmelerin etkilerini göstermedi [39]. Ar_c sayısını kullanmanın diğer bir zorluğu, girişin dikey boyutunu (a) bulmak için etkili açıklık alanını hesaplamaktır. Zhang ve ark. [39] alanı hesaplamak için girişteki hava hızı ve basınç farkı arasındaki ilişkiyi kullandı. Ancak bu dolaylı ölçüm, cihazın doğruluğundan gelen hatalara maruz kalmıştır. Ayrıca, gerçek saha şartlarında hava hızı, rüzgârın etkisi nedeniyle tüm hava girişlerinde eşit olarak dağıtılmaz. Sonuç olarak, Arşimet sayısının kullanımı uygulamada hava akış şeklinin doğru olarak tespitine izin vermez; dolayısıyla başka ölçüm teknikleri geliştirilmelidir.

Bugün ticari sistemlerin çoğunda, iç taraftaki basınç hava girişlerini kontrol etmek için ayarlanır. Ancak bu sistem iç ve dış taraf arasındaki sıcaklık farkını doğrudan hesaba katmadığı için hava akış şeklini hassas olarak kontrol edemez. Sadece dış bozucu sinyallere göre bir basınç varsayarak ileri beslemeli kontrolü sağlar.

Birçok araştırmacı iç taraftaki hava akışını ön görmek için kullanışlı araçlar olarak akışkanlar dinamiği gibi sayısal simülasyon yöntemlerini kullanmaktadır [33,44-46]. Bu sayısal yöntemlerin geçerli olması için deneysel veriler kullanılması gerekli olmasına rağmen çoğu zaman böyle verilerden yeterli miktarlarda olmayabilir [35]. Karşılaşılan ana zorluklar, modelin oluşturulması ve uygun sınır şartlarının tanımlanması ve özelleştirilmesinin zor olmasıdır. Ayrıca, hesaplamalar çok zaman alıcıdır ve yüksek bilgisayar hafızası gerektirir ve bazen çözüme ulaşmakta başarısız olur [47-49].

Literatür ve gözlemlerimize göre, hava akış şeklinin geri beslemeli denetiminde kullanılabilecek ucuz ve doğru bir sensör hala mevcut değildir ve bunun sonucunda yeni bir sensör kavramı geliştirilmelidir.

Yeni hava akış şekli sensörü, giriş sıcaklık dağılımından hava akış şeklinin tahmin edilmesi fikrini esas almaktadır [50]. Girişte kavisli hat üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörleri hava jetinin yörüngesinin tespit edilmesinde yeterli olduğu gösterilmiştir [51]. Kontrol amacıyla bunlar düşük maliyetli hava akış şeklinin saptanmasında sensör olarak (Şekil 8) kullanılabilir.



Şekil 8. Hava giriş penceresinde hava akış patern sensörünün şematik gösterimi ve fotoğrafı.

Bu sensör kavramına göre odadaki hava akış biçiminin iki boyutlu olarak saptanması için 0.3 m yarıçaplı bir yay üzerine sekiz ısılcift yerleştirildi. Isılcift sensörleri girişin merkezinden itibaren -50° , -25° , 0° , 25° , 50° , 60° ve 75° açılarda yerleştirildi ve sırasıyla T_1 'den T_8 'e kadar isimler verildi. Yay, hava giriş açıklığına dik olarak yerleştirildi. Bu sıcaklık gözlemlerinden iki boyutlu hava akış biçimi ve düşme mesafesi (DD) matematiksel model aracılığıyla saptandı. Tam ölçekli test deneyleri, doğrusal bir modelin (Eşitlik 5) $8 \times 4 \times 3$ m boyutlu bir odada 0.73 m'lik hassasiyetle düşme mesafesinin tespitinde yeterli olduğunu gösterdi.

$$DD = m_1 T_1 + m_2 T_2 + \dots m_8 T_8 + m_9 T_{in} + m_{10} T_{oda} \quad (5)$$

Burada Eşitlikte, $T_1, T_2 \dots T_8$ = yay sıcaklıkları,

T_{in} = giren hava sıcaklığı,

T_{oda} = ortalama oda sıcaklığı,

$m_1, m_2, \dots m_{10}$ = özel giriş açıklığını ve oda düzenini gösteren sabit parametrelerdir.

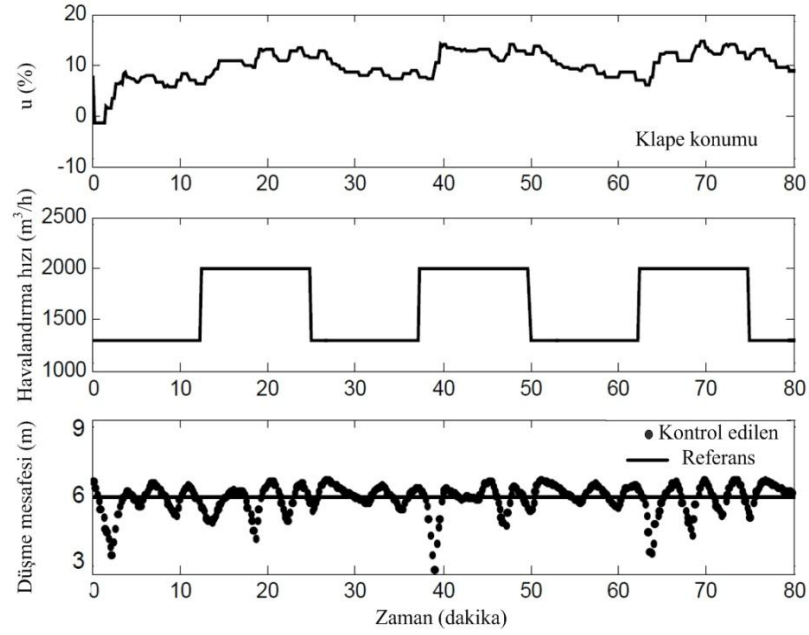
Son aşamada bu hava akış sensörü, model esaslı hava akış şekli denetleyicisinin geri beslemeli döngüsü içine eklendi. Bu amaçla, dinamik deneyler gerçek ölçekli test ünitelerinde sınılandı. Testler sırasında, klape konumları rastgele olarak kademeli şekilde değiştirildi. Hava akış biçimindeki değişim (DD, düşme mesafesi) hava akış sensörüyle ölçüldü. Deneysel dinamik giriş çıkış verilerinden, genel ayrık ARX model yapısını kullanarak dinamik bir model elde edildi:

$$y(k) = a_1 y_{k-1} + a_2 y_{k-2} = b_1 u_{k-nk} + b_2 u_{k-nk-1} + b_3 u_{k-nk-2} \quad (6)$$

Burada, $y(t) = t$ zaman kademesindeki çıktı (düşme mesafesi)

$u(t) = t$ zaman kademesindeki kontrol girdisi (klape konumu)

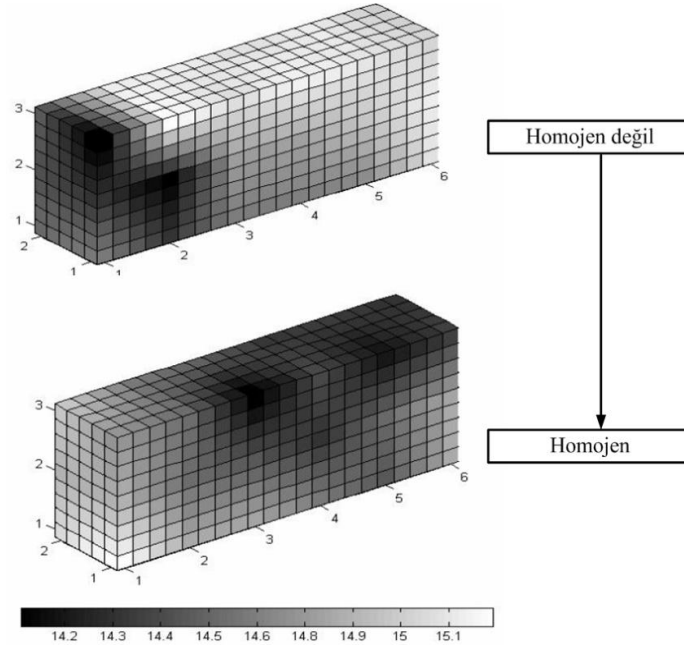
Bu model, modele dayalı olarak hava akış şekli kontrol sisteminin bir sonraki kademede kontrol parametrelerini hesaplamak için kullanıldı. Gerçek ölçekteki test uygulamasında kontrol cihazının performansı Şekil 9'da gösterilmiştir. Havalandırma debisi değişimleri, bozucu bir değişken olarak kullanıldı. Kontrol cihazı optimal düşme mesafesine göre 25 cm'den daha az bir sapma gösterdi. Hava akışı sensör kavramı havalandırılan ortamda temiz hava şeklinin çevrim içi kontrolü açısından yeni fırsatlar sunar.



Şekil 9. Gerçek ölçek test ünitesinde hava akış paterni kontrol cihazının performansı.

6.3.5 Üç Boyutlu Mikroçevrenin Model Tabanlı Kontrolü

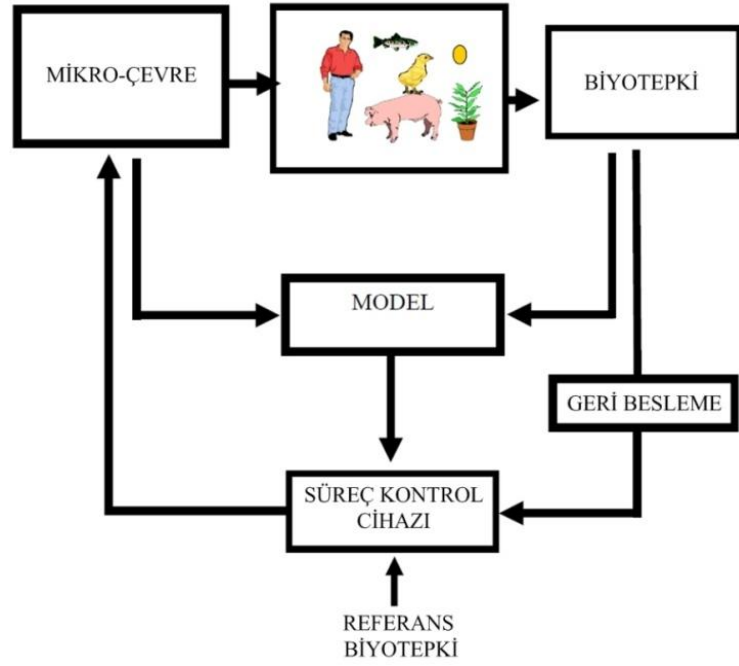
Üç boyutlu mikroçevreyi kontrol etmek için model tabanlı kontrol yaklaşımı kullanıldı. Tam olarak karışmamış havalandırılan bir ortamda üç boyutlu mikroçevrenin enerji ve kütle transferini tahmin eden dinamik bir model kullanılmıştır [18]. Model kavramsal olarak Şekil 10'da gösterilmiştir. Havalandırılan ortam; sıcaklık, nem ve gaz konsantrasyonları bakımından tam karışmış halde değildir. Böyle bir oda da sıcaklık için iyi karışmış bölgelerin tanımlanabildiği gösterilmiştir [22, 38, 52]. İyi karışmış bölge (İKB) sıcaklık gradyentleri ölçülebilen üç boyutlu matematiksel bir hacimdir. Kapalı bir hacimde İKB göz önüne alınırsa (Şekil 10), bu bölgedeki enerji ve kütle akışı tanımlanabilir. Odaya giren toplam havalandırma debisinin (V) V_c kısmı İKB'ye ulaşacaktır. Benzer şekilde, toplam ısı üretiminin (Q) Q_c kısmı İKB'ye ulaşır. İKB'deki sıcaklık gibi mikroklima değişkenlerinin dinamik davranışını tanımlamak için kuramsal tümdengelim yaklaşımı kullanılır. Bu yaklaşımda, önce fiziksel olarak açıklanması



Şekil 11. Kontrol eyleminden önce (üst) ve sonra (alt) tam karımmamış akışkanda üç boyutlu sıcaklık dağılımı (Oda boyutları 3x2x1.5 m).

6.3.6 Bireysel Biyolojik Tepkinin Model Tabanlı Kontrolü

Son aşamada, bilgi teknolojisi kullanılarak hayvanların, bitkilerin ve ürünlerin çevresel tepkilerinin nasıl etkili bir şekilde kontrol edileceği gösterilir. Çevresel bir kontrol sisteminde yaşayan organizmanın kendisi en önemli bileşen olmasına karşın, bugünkü iklim kontrol cihazları tipik hayvan, bitki ya da ürün için optimal olduğu varsayılan ayar değerlerini kullanır. Bu yaklaşım yaşayan organizma ve onun mikroçevresi arasında karmaşık ilişkilerin basitleştirilmesi nedeniyle her zaman beklenen performansı vermez. Bireysel performansı ya da konforu sürdürmek için proses girdileriyle çevrim içi biyolojik tepkileri ölçmek ve bunları çevre kontrolünde birleştirmek akıllıca bir çözüm sağlar [53-55]. Hayvanlar için bu kontrol teknolojisi *tümleşik yönetim sistemi* ya da *hassas hayvancılık* olarak tanımlanır (Şekil 12). Bu teknolojinin esasları, ele alınan prosesin girdi ve çıktılarının sürekli izlenmesi ile birlikte çevrimiçi matematiksel teknikler kullanarak böyle karmaşık proseslerin hassas modelinin yapılmasına dayanır. Bu yaklaşımın insan, hayvan ve bitkiler için uygulanabilir olduğu gösterilmektedir (<http://labr.be/deki> proje listesine bakılabilir).



Şekil 12. Yaşayan organizmaların yönetimi için tümleşik yönetim sistemi ya da hassas hayvancılık sisteminin şematik tasviri.

Yaşayan organizmaların tepkileri; fizyolojik, davranış biçimi ya da üretim ile ilgili olabilir. Gerçekte, doğrudan ya da dolaylı performans ve/veya davranış ile ilgili olan örneğin kalp atım hızı, ısı üretimi, metabolizma hızı, fotosentez vd gibi büyüklükler tepki olarak kullanılabilir. (1) Biyolojik tepkiler için bir hedef ya da referans değer ve (2) bunları algılayacak araçların verilmesi durumunda, istenen biyolojik tepkiyi üretmek için kontrol cihazı mikroçevreyi ayarlar. Bugün bu kavram tavukların sıcaklık ya da ışık yoğunluğuna tepki olarak ürettikleri ısıнын kontrolü [55] için sadece laboratuvar şartlarında denenmiştir. Ancak bu yaklaşım; hayvanların, bitkilerin ve depolanan ürünlerin üretim koşullarını iyileştirmesinde büyük bir potansiyele sahiptir.

Yaşayan organizmaların biyolojik tepkilerini ölçmek için bazı algılama teknikleri gelişim aşamasındadır. Bir örnek olarak, yumurta tavukları için eşeleme, yeme, içme, kuluçkaya yatma ve kanatlarını açma gibi davranış değişkenleri görüntü analizi aracılığıyla çevrim içi olarak görüntülenebilir [56]. Gelecekte, yumurta tavuklarının tepkisinin çevrim içi görüntülenmesi, onların davranışlarının tahmin edilmesini ve tavukların mikroçevresinin düzenlenmesiyle onların iyi yetiştirilmesini sağlayacaktır.

6.3.7 Sonuçlar

Bilgi teknolojisi farklı seviyelerde yaşayan organizmaların mikroçevresini ve biyolojik tepkilerini kontrol etmek için kullanılabilir. Tarımsal yapılarda hayvan,

bitki ve ürün gibi bireysel her biyolojik faktör, kendi yerel mikroçevresine tepki verir. Mikroçevrenin üç boyutlu kontrolü, kalite ve miktar bakımından optimal üretim için kesin bir koşuldur. Bu bölümde, biyolojik tepkilerin kontrol işlemlerine çevrimiçi olarak entegrasyonuna dayanan ve farklı mantık adımlarına sahip model esaslı kontrol tekniklerinin kullanımının optimum çevre kontrolünü sağladığı gösterilmiştir.

Semboller Listesi	
a, b	hava girişinin dikey ve yatay boyutları (m)
B, H	havalandırılan odanın genişliği ve yüksekliği (m)
C_d	boşaltma katsayısı
C_p	kuru havanın ısı kapasitesi (J/kgkuru hava K)
H_v	duyulur ısı üretimi (W)
H_L	gizli ısı üretimi (W)
G_i	iç gaz konsantrasyonu (kg/m^3)
G_o	dış gaz konsantrasyonu (kg/m^3)
G	gaz üretimi (kg/s)
İKB	iyi karışmış bölge
k	ısı transfer katsayısı (W/kgK)
Q	havalandırılan ortamın ısı talebi (W)
Q_c	İKB'nin ısı talebi (W)
S	Isı değişim yüzey alanı (m^2)
T	zaman (s)
T_i	istenen iç hava sıcaklığı (K)
T_{hs}	ısıtılan yüzeyin sıcaklığı (K)
$T_1, T_2, \dots T_8$	yay sıcaklıkları (K)
T_{in}	giren hava sıcaklığı (K)
T_{oda}	ortalama oda sıcaklığı (K)
T_o	dış hava sıcaklığı (K)
u(t)	t zaman kademesinde kontrol girdisi (klape konumu)
V	havalandırılan ortama geçen havalandırma debisi (m^3/s)
V_c	İKB'ye giren havalandırma debisi (m^3/s)
X_i	iç taraftaki nem oranı (kg/kg kuru hava)
X_o	dış taraftaki nem oranı (kg/kg kuru hava)
y(t)	t zaman kademesinde çıkış (saptırma açısı)
γ	hava yoğunluğu (kg/m^3)
τ	zaman sabiti (s)
C_{DA}	kuru havanın ısı kapasitesi
DD	düşme mesafesi (m)
$m_1, m_2, \dots m_{10}$	sabit parametreler
Ar_c	Arşimet sayısı
T_{buff}	tampon bölge sıcaklığı (K)

Kaynaklar

1. Kleiber, M. 1961. *The Fire of Life*. New York, NY: John Wiley.
2. Mount, L. E. 1968. *The Climatic Physiology of the Pig*. London, UK: Edward Arnold.

3. Monteith, J. L., and L. E. Mount. 1974. *Heat Loss from Animals and Man*. London, UK: Butterworths.
4. Verstegen, M. W. A., E. W. Brascamp, and W. Van der Hel. 1978. Growing and fattening pigs in relation to temperature housing and feeding level. *Canadian J. Animal Science* 58: 1-13.
5. Adams, P. 1991. Effect of diurnal fluctuations in humidity on the accumulation of nutrients in the leaves of tomatoes. *J. Horticultural Science* 545-550.
6. Challa, H. 1990. Crop growth models for greenhouse climate control. *Theoretical Production Ecology: Reflections and Prospects. Simulation Monographs* 34, eds. R. Rabbinge, J. Goudriaan, H. Van Keulen, F. W. T. Penning de Vries, and H. H. Van Laer, 125-145. Wageningen, The Netherlands.
7. Van Henten, E. J. 1994. Greenhouse climate management: An optimal approach. Dissertation. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University.
8. Udink ten Cate, A. J. 1985. Modelling and (adaptive) control of greenhouse climates. PhD thesis. Wageningen, The Netherlands: Landbouwhogeschool.
9. Cannell, M. G. R., and J. H. M. Thornley. 1998. Temperature and CO₂ responses of leaf and canopy photosynthesis: A clarification using the non-rectangular hyperbola model of photosynthesis. *Annals of Botany* 82: 883-892.
10. Daudet, F. A., X. Le Roux, H. Sinoquet, and B. Adam. 1999. Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown: consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions. *Agricultural and Forest Meteorology* 97: 171-185.
11. Hartung, J. 1994. Environment and animal health. *Livestock Housing*, eds. C. M. Wathes and D. R. Charles, 25-48. Cambridge, UK.
12. Hilbert, D. W., A. Larigauderie, and J. F. Reynolds. 1991. The influence of carbon dioxide and daily photon-flux density on optimal leaf nitrogen concentration and root:shoot ratio. *Annals of Botany* 68: 365-376.
13. Kittas, C., N. Katsoulas, and A. Bailie. 2001. Influence of greenhouse ventilation regime on the microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions. *J. Agricultural Engineering Research* 79(3): 349-360.
14. Nienaber, J. A., G. L. Hahn, et al. 1993. Eating behavior of swine as influenced by environmental temperature. *Proc. of the Fourth International Symposium of Livestock Environment*, 937-944.
15. Ogilvie, J. R. 1993. Operant response of weanling pigs to temperature and air speed. *Proc. of Fourth International Symposium of Livestock Environment*, 779- 787.
16. Stanghellini, C. and W. T. M. Van Meurs. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *J. Agricultural Engineering Research* 51: 297-311.
17. Yang, X., K. M. Ducharme, R. J. McAvoy, G. Elliott, and D. R. Miller. 1995. Effect of aerial conditions on heat and mass exchange between plants and air in greenhouses. *Trans. ASAE* 38(1): 225-229.
18. Berckmans, D., and M. De Moor. 1994. Linking a physical model to identification to model the air flow pattern and the 3D energy and mass transfer in a ventilated space. *Proc. of Fourth Int. Conference on Air Distribution in Rooms—ROOMVENT '94*.
19. Carpenter, G. A. 1974. Ventilation of buildings for intensively housed livestock. *Heat Loss from Animals and Man*, J. L. Monteith, and L. E. Mount, 389-403. London, UK: Butterworths.
20. Randall, J. M. 1981. Ventilation systems design. *Environmental Aspects of Housing for Animal Production*, ed. J. A. Clark, 351-369. London, UK: Butterworths.

21. Randall J. M., and V. A. Battams. 1979. Stability criteria for airflow patterns in livestock buildings. *J. Agricultural Engineering Research* 24(4): 361-374.
22. Berckmans D., and V. Goedseels. 1986. Development of new control techniques for the ventilation and heating of livestock buildings. *J. Agricultural Engineering Research* 33: 1-12.
23. Berckmans D., E. Vranken, R. Geers, and V. Goedseels. 1988. Efficiency of climate control equipment in pig houses. *Farm Building Progress* 93: 15-22.
24. Geers, R., V. Goedseels, D. Berckmans, and W. Huybrechts. 1984. Mortality, feed efficiency and carcass value of growing pigs in relation to environmental engineering and control; A case study of Belgian contract farming. *Livestock Production Science* 11: 235-241.
25. Maes, F., R. Geers, E. Vranken, V. Goedseels, and D. Berckmans. 1988. Environment control for growing finishing. *Pig International*, 6-8.
26. Carr, L. E., and L. W. Douglas. 1990. Empirical models to determine ammonia concentrations from broiler chicken litter. *Trans. ASAE*: 1337-1342.
27. Van Breemen, N., P. A. Burrouhg, E. J. Velthorst, H. F. Van Dobben, T. De Wit, T. B. Ridder, and H. F. R. Reijnders. 1982. Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall. *Nature* 299: 548-550.
28. Ni, J.-Q., D. Berckmans, E. Vranken, and J. Coengrachts. 1994. A simulation model to evaluate ammonia emission from pig house. *Proc. of European Simulation Symposium ESS 94*, eds. A. R. Kaylan, et al., 13-15.
29. Vranken, E., and D. Berckmans. 1998. Control of the ventilation rate in agricultural buildings by using a newly designed ventilation rate sensor in the controller feed-back loop. *Computers in Agriculture*, 829-841.
30. Chen, Q., A. Moser, and P. Suter. 1992. A numerical study of indoor air quality and thermal comfort under six kinds of air diffusion. *Trans. ASHRAE* 98(1): 203- 217.
31. Heber, A. J., C. R. Boon, and M. W. Peugh. 1996. Air patterns and turbulence in experimental livestock building. *J. Agricultural Engineering Research* 64(3): 209-226.
32. Gosman, A. D., P. V. Nielsen, A. Restivo, and J. H. Whitelaw. 1980. The flow properties of rooms with small ventilation opening. *Trans. ASME* 102: 316-323.
33. Chow, W. K., and W. Y. Fung.. 1996. Numerical studies on the indoor airflow in the occupied zone of ventilated and air-conditioned space. *Building and Environment* 31(4): 319-344.
34. Harral, B. B., and C. R. Boon. 1997. Comparison of predicted and measured airflow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *J. Agricultural Engineering Research* 66(3): 221-228.
35. Posner, J. D., C. R. Buchanan, D. Dunn-Rankin. 2003. Measurement and prediction of indoor airflow in a model room. *Energy and Buildings* 35(5): 515-526.
36. Janssens, K., D. Berckmans, and M. De Moor. 1996. Modelling the three- dimensional air flow pattern in a ventilated agricultural building. *Proc. of ROOMVENT '96, Fifth International Conference on Air Distribution in Rooms*, ed. S. Murakami, 441-442.
37. Van Brecht, A., K. Janssens, D. Berckmans, and E. Vranken. 2000. Image processing to quantify the trajectory of a visualized air jet. *J. Agricultural Engineering Research* 76(1): 91-100.
38. Berckmans D., K. Van de Weyer, and M. De Moor. 1993. Visualization and quantification of the airflow pattern using image analysis. *Proc. of the International Conference on Building Design, Technology and Occupant Wellbeing in Temperate Climates*, eds. E. Sterling, C. Bieva, and C. Collett, 207-216.

39. Zhang, G. Q., J. Strom, and S. Morsing. 1996. Jet drop models for control of air jet trajectories in ventilated livestock buildings. *Proc. of Roomvent 1996, Fifth International Conference on Air Distribution in Rooms*, ed. S. Murakami, 305-316.
40. Bjerg, B., S. Morsing, K. S. Svidt, and G. K. Zhang. 1999. Three-dimensional airflow in a livestock test room with two dimensional boundary conditions. *J. Agricultural Engineering Research* 74(3): 267-274.
41. Koestel, A. 1955. Paths of horizontally projected heated and chilled air jets. *Trans. ASAE* 61: 213-232.
42. Leonard, J. J., and J. B. McQuitty. 1985. Criteria for control of cold ventilation air jets. ASAE Paper No. 85-4014. St. Joseph, MI: ASAE.
43. Zhang, G. Q., J. S. Strøm, and S. Morsing. 1992. Wall inlets for winter ventilation control. ASAE Paper No. 92-4531. St. Joseph, MI: ASAE.
44. Murakami, S., and S. Kato. 1989. Current status of numerical and experimental methods for analyzing flow field and diffusion field in a room. *Building Systems: Room Air and Air Contaminant Distribution*, ed. L. L. Christianson, 36-56.
45. Chen, Q. 1995. Comparison of different k- ϵ models for indoor airflow computations. *Numerical Heat Transfer, Part B* (28): 353-369.
46. Fan, Y. 1995. CFD modeling of the air and contaminant distribution in rooms. *Energy and Buildings* 23(1): 33-39.
47. Hong, T., and Y. Jiang. 1997. A new multizone model for the simulation of building thermal performance. *Building and Environment* 32(2): 123-128.
48. Dascalaki, E., M. Santamouris, M. Bruant, C. A. Balaras, A. Bossaer, D. Ducarme, and P. Wouters. 1999. Modeling large openings with COMIS. *Energy and Buildings* 30(1): 105-115.
49. Ren, Z., and J. Stewart. 2003. Simulating air flow and temperature distribution inside buildings using a modified version of COMIS with sub-zonal divisions. *Energy and Buildings* 35(3): 257-271.
50. Berckmans D., E. Vranken, and K. Janssens. 2001. Method and apparatus for determining a flow pattern of a fluid in a space. *International Patent WO 01/01082*.
51. Vranken, E., S. Schuysemans, A. Van Brecht, and D. Berckmans. 2002. On-line model based control of the airflow pattern in ventilated spaces. *Proc. of AgEng 2002, International Conference on Agricultural Engineering*.
52. Janssens, K., D. Berckmans, and A. Van Brecht. 2000. Modelling the spatio-temporal temperature distribution in an imperfectly mixed ventilated room, *Proc. Of Roomvent 2000. 7th Int. Conference on Air Distribution in Rooms*, 223-228.
53. Aerts, J.-M., D. Berckmans, P. Saevels, E. Decuypere, and J. Buyse. 2000. Modelling the static and dynamic response of total heat production of broiler chickens to step changes in air temperature and light intensity. *British Poultry Science* 41: 651-659.
54. Aerts J.-M., M. Lippens, G. De Groote, J. Buyse, E. Decuypere, E. Vranken, and D. Berckmans. 2003a. Recursive prediction of broiler growth response to feed intake by using a time-variant parameter estimation method. *Poultry Science* 82(1): 40-49.
55. Aerts, J.-M., C. M. Wathes, and D. Berckmans. 2003b. Dynamic data-based modeling of heat production and growth of broiler chickens: development of an integrated management system. *Biosystems Engineering* 84: 257-266.
56. Leroy, T., J. Ceunen, E. Vranken, E. Struelens, F. Tuytens, B. Sonck, A. Janssen, K. De Baere, J. Zoons, and D. Berckmans. 2003. Developing a quantitative computer vision method for on-line classification of poultry behavior in furnished cages. ASAE paper No. 034006. St. Joseph, MI.: ASAE.

