TARIM BİLİMLERİ DERGİSİ 2009, 15(1) 65-73
ANKARA ÜNİVERSİTESİ ZİRAAT FAKÜLTESİ

Sera İçi Bitki Topluluklarının Mikroklimatolojik Modelle Isı ve Kütle Transferi Karakteristiklerinin Saptanması*

Mehmet Ali DAYIOĞLU[1]

Geliş Tarihi: 13.10.2008 Kabul Tarihi: 30.01.2009

Öz: Bu çalışmada, sera bitki örtüsü içindeki ısı ve kütle transferi işlemlerini mikroklimatolojik yöntemlerle tanımlayan matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bitki yapısı bitki mimari parametreleri ve dağılım fonksiyonları ile gösterilmiştir. Bitki standının diferansiyel tabakaları için enerji ve kütle dengeleri kurulmuştur. Model bitki standının farklı derinliklerinde güneş radyasyonu fraksiyonları (toplam, PAR, NIR), net radyasyon, su buharı ve CO_2 taşınımı gibi işlemleri kapsamıştır. Yaprak yüzeylerinden olan ısı transferi elektriksel akım ve ısı akısı benzeşimine göre direnç kavramıyla hesaplanmıştır. Bu benzeşim su buharı ve CO_2 taşınımına uyarlanmıştır. Model 24 saatlik bir zaman aralığı için stand parametreleri ve değişkenleri girilerek çalıştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, toplam güneş radyasyonunun bitki standının z=1 m'de ve z=0m için girişim oranları sırasıyla % 49 ve %32.3'tür. Simülasyon gününde bitki standında oluşan net radyasyonun 10 ile 289.4 W/m^2 aralığında değiştiği hesaplanmıştır. Bitki örtüsünden ve toprak yüzeyinden olan su buharı taşınımlarının günlük integrasyonları sırasıyla 2.731 kg/m^2 ve 1.478 kg/m^2 olup; evapotranspirasyon 4.209 kg/m^{2}gün olarak tespit edilmiştir. Simülasyon ve ölçüm bulguları arasındaki ilişkileri saptamak için modelin doğrulaması regresyon analizi yapılarak sağlanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model bitki standındaki ısı ve kütle transfer işlemleri için etkili bir hesaplama aracı olarak kullanılabilir. Model daha etkin iklim yönetimi için uzman sistemlerle birleştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Sera mikrokliması, matematiksel model, ısı ve kütle transferi, simülasyon.

Determination of Heat and Mass Transfer Characteristics of Greenhouse Crops by Microclimatologic Model

Abstract: In this study, a mathematical model was developed to define heat and mass transfer processes by microclimatologic methods in the greenhouse crops. The crop structure was depicted by means of plant architectural parameters and distribution functions. The energy and mass balances were identified for a differential stratum of the plant stand. The model contained the processes such as the solar radiation fractions (total, PAR and NIR), net radiation; water vapor and CO_2 transfer for different levels of plant stand. The sensible heat flux from leaf surfaces was computed by using resistance concept according to an analogy between electrical current and heat flux, and this analogy was adapted to both water vapor and CO_2 transfer. The model was simulated for a period of 24 hours using the crop stand inputs and variables. According to the simulation results, the penetration rates of total solar radiation for z=1 m and z=0 m was %49 and %32.3 respectively. The net radiation was computed as 10 and 289.4 W/m^2 for simulation day. The daily integrations crop transpiration and soil evaporation were determined as 2.731 kg/m^2 and 1.478 kg/m^2 respectively. As a result of these integrations, the evapotranspirasyon was 4.209 kg/m^2.day The validation of model was performed with regression analysis to determine correlations between simulation results and measurement data. As a consequence, the model developed can be employed as a tool determining the heat and mass transfer processes for greenhouse crops, and can be integrated with expert systems to provide a more effective climate management.

Key Words: Greenhouse microclimate, mathematical model, heat and mass transfer, simulation.

Giriş

Sera, bitkisel üretimin iyileştirilmiş çevresel koşullarda gerçekleştirildiği ışık geçirgen bir yapıdır. Seradaki bitkinin gelişiminde güneş ışınımı, sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü, yağış gibi meteorolojik faktörler etkilidir. Ancak, seranın bitki olan ve bitki olmayan bölümlerinde güneş ışınımı, sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı gibi fiziksel koşullar eşit değildir. Bu nedenle, "mikroklima" kavramı geliştirilmiştir. Sera mikroklimaası araştırmalarının temel amacı, hava-bitki-toprak ve diğer yüzeyler arasındaki

* Doktora tezinden hazırlanmıştır.

[1] Ankara Üniv. Ziraat Fak. Tarım Makinaları Bölümü - Ankara

ısı ve kütle değişim işlemlerini ve bunların bitkilerde neden olduğu fizyolojik yansımaları nicel olarak tanımlamaktır (Yang ve ark. 1989, Yang ve ark. 1990a). Mikroklima kavramı kullanılarak bitki toplulukları içinde ısı ve kütle transfer karakteristikleri saptanmalıdır. Bitki kümesi içinde bağıl nem ve sıcaklık gibi mikroklimatolojik değişkenlerin özel koşulları bitkilerde hastalık yapan zararlıların popülasyonu ve dağılımıyla doğrudan ilişkilidir.

Rosenberg ve ark. (1983), mikroklima adlı kitaplarında bitki örtü enerji dengesini, güneş radyasyonu, net radyasyon transpirasyon işlemlerini ele almışlardır.

Stanghellini (1987), serada bitki transpirayonu adlı tez çalışmasında, mikroklimanın bir fonksiyonu olarak sera bitkilerinde suyun buharlaşma işlemini tanımlayan bir yöntem geliştirmiş ve test etmiştir.

Yang ve ark. (1990a), bir sera bitkisi mikroklimasının dinamik modelenmesi konulu çalışmalarında seradaki bir bitki standında ısı ve kütle taşınım proseslerini tanımlayan teorik bir model geliştirmişlerdir. Bitki örtüsünü dikdörtgen kesite benzeyen ve değişken mimari parametreli paralel seriler olarak tanımlamışlardır.

Yang ve ark. (1995), seralarda bitkiler ve hava arasındaki ısı ve kütle değişiminde havayla ilgili koşulların etkisi adlı makalelerinde, deneysel ve teorik çalışmalarını sera havasının aerodinamik ve ısıl koşullarının etkilerini sınamak için birleştirmişlerdir.

Bu çalışmada sera bitki örtüsü ve çevresinde etkili olan ısı ve kütle transfer mekanizmalarını matematiksel olarak tanımlayan mikroklimatolojik bir model geliştirilmiş ve model sonuçları ölçülen verilerle test edilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Deneyler Antalya Seracılık Araştırma Enstitüsünde genişliği 384 m^2, mahya yüksekliği 4 m olan cam örtülü TZDK Agroser tipi serada yapılmıştır. Bitki örtüsü olarak hıyar bitkisinin HM.41-F1 varyetesi kullanılmıştır. Serada, tohum ekimi 03.01.1994, fide dikimi 15.02.1994; 1. hasat 29.03.1994 ve 12. hasat 04.05.1994 tarihlerinde yapılmıştır. Örnek parametrelerin alınması 29.04.1994 ile 06.05.1994 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Geniş sıra arası uzaklık 1.6 m, dar sıra arası uzaklık 0.5 m ve sıra üzeri uzaklık 0.45 m'dir.

Bitki mimari parametreleri: Bitki mimarisini tanımlamak amacıyla rastgele 10 adet hıyar bitki standı seçilmiş; yaprak sayısı (n), yaprağın uzunluğu (l_L) ve genişliği (w_L), yaprak sapının yatay izdüşüm uzunluğu (l_p), yaprağın toprak yüzeyinden yüksekliği (z), yaprağın zenit (θ_L), ve azimut (φ_L).açıları gibi yaprak parametreleri ölçülmüştür (Şekil 1).

Bitki standındaki yaprak alanını ölçmek için 23 adet sağlıklı hıyar yaprağı toplanmış ve Hayashi Denko AAM - 5 (Tokyo) alan-ölçeri kullanılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre, hıyar yaprak alanı için regresyon katsayısı R^2 = 0. 952 olan aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

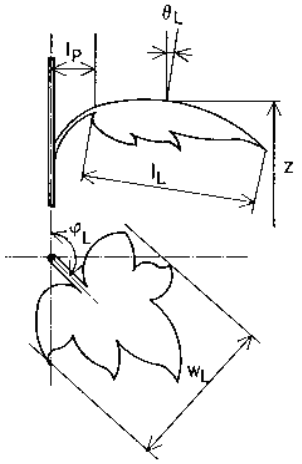
$$A_L = 0.65996\ l_L . w_L - 0.00159 \qquad (1)$$

Seradaki yaprak alan indeksi (LAI) bitki yüksekliğine göre tanımlanmış ve yüksek korelâsyonlu (R^2=0.997) aşağıdaki eşitlik türetilmiştir:

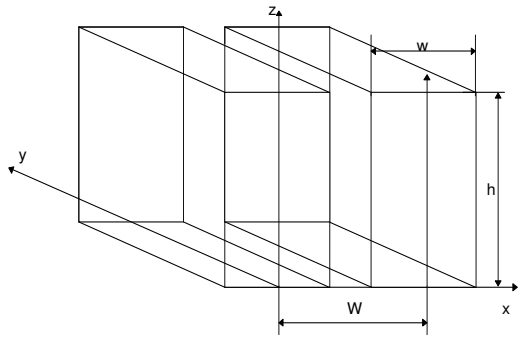
$$LAI = 0.92188 . h - 0.07468 \qquad (2)$$

Bitki standı modeli ve bitki mimarisi: Domates ve hıyar gibi yüksek sera bitkilerinin dikdörtgene yakın bir kesite sahip olduğu gözlenmiştir. Buna göre, Şekil 2'deki gibi, bitki standı sera içinde paralel sıralı diziler halinde modellenmiştir. Kartezyen koordinat sistemine göre, x-ekseni sıraya dik, y-ekseni sıra yönünde ve z-ekseni de yukarı yönde seçilmiştir. Koordinat sisteminin orijini, bitki standının simetri eksenine uygun biçimde yerleştirilmiştir. Modelde, h bitki yüksekliği, w stand genişliği ve W sıralar arası uzaklıktır.

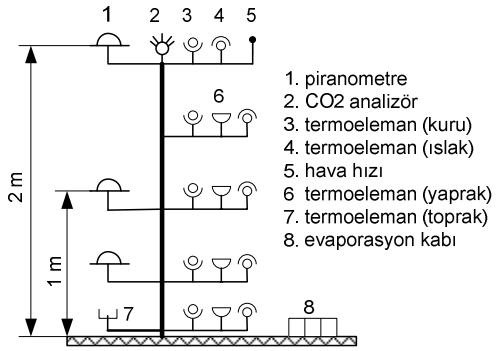
Bitki yapraklarının mekânsal dağılımları sırasıyla, x ve z yönlerindeki yaprak alanı dağılım fonksiyonlarıyla tanımlanmıştır. Yaprak alanının dikey dağılımı dikey yaprak alanı yoğunluk fonksiyonuyla gösterilir. Bu da birim hacimdeki yaprak alanını ifade eder. Bitki yapraklarının dikey dağılımı yaprak alanı yoğunluğu Beta dağılım fonksiyonuyla karakterize edilir(Goel ve Strebel 1984).



Şekil 1. Bitki mimarisini tanımlayan yaprak parametreleri



Şekil 2. Bitki standı modeli



Şekil 3. Sera mikroklimaası ölçüm seti

Beta fonksiyonu, bitki standının ($0 \leq z \leq h$) aralığında istatistiksel olarak tanımlanır:

$$a_z(z) = LAI.\ \beta(z) \qquad (3)$$

Seradaki bitki toplulukları için sıraya dik yaprak alanı dağılımı da dikey yaprak alanı dağılımına benzer şekilde tanımlanabilir. Yaprak alanının x yönündeki yoğunluk fonksiyonu kosinüs dağılımına (C(x)) göre tanımlanmıştır (Yang ve ark. 1990 a):

$$a_x(x) = W.\ LAI.C(x) \qquad -W/2 \leq x \leq +W/2 \quad (4)$$

Bitki stand mimarisini tanımlamada, özellikle ışınım transferinde, kullanılan diğer önemli parametre G-fonksiyonudur. G-fonksiyonu, güneş zenit açıları ve yaprak normallerinin yönleriyle ilişkili olarak yaprak yön dağılımını tanımlar. Uygulamada G-fonksiyonunu hesaplamak için yaprak eğim indeksi ve güneş zenit açısının fonksiyonu olan bazı ampirik eşitlikler vardır (Sellers 1985, Myneni ve ark. 1989).

Sera mikroklimaası ölçüm seti: Sera içinde bitki ve çevresi arasında oluşan ısı ve kütle transferi işlemlerini tanımlamak ve geliştirilen matematiksel modeli çalıştırmak, yani simüle etmek, için Şekil 3'te gösterilen mikroklima ölçüm seti kullanılmıştır. Bu ölçüm setinde 23 adet Omega ANSI/MC96.1 T tipi termoeleman kullanılarak bitki standı içindeki hava, yaprak ve toprak sıcaklıkları ile havanın bağıl nem değişimleri ölçülmüştür. İğne tipi yaprak sıcaklığı termoelemanları yaprak altı damar içine batırılmıştır. Bitki standı üstünde ve stand içindeki toplam güneş radyasyonu verilerini ölçmek için 3 adet LI-200SB kullanılmıştır.

Bitki üstü hava hızı Wilh. Lambrecht GmbH 641 N kızgın telli anemometresi ve CO_2 konsantrasyonu Siemens TN501331 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sistemde kullanılan tüm termoelemanlar, radyasyon sensörleri, hava hızı ve CO_2 ölçüm cihazları Kaye Instruments Digistrip II veri toplama cihazına bağlanmıştır. Ölçümler anlık olarak yapılmış olup; 10'ar dakikalık aralıklarla ortalamalar alınarak dijital formatta yazdırılmıştır.

Kuru ve ıslak termoelemanlardan alınan veriler psikrometrik alt modelde işlenerek bağıl nem değerleri elde edilmiştir. Sera içindeki evaporasyon standart buharlaşma kabı (d=1220 mm, h =254 mm) kullanılarak günlük olarak ölçülmüştür.

Bitki elemanlarının enerji dengesi: Bitki standının diferansiyel tabakası için, Şekil 4'te gösterildiği gibi, bitki elemanları ve onların çevresi arasındaki enerji alışverişi işlemleri dört ana bileşenden oluşur. Bunlar, dQ_R net radyasyon, dQ_{HL} konveksiyonla ısı transferi, dQ_W transpirasyonla olan buharlaşma ısı transferi, dQ_M metabolik enerji kazancı yada kaybıdır.

Net radyasyon taşınım proseslerinin devinim kuvveti olarak etki eder. Şekil 4'te oklarla gösterildiği gibi, net radyasyon sistemin girdisi, diğer bileşenler çıktısı olup; fazla enerji depolanarak sistem sürekli dengelenir (Rosenberg ve ark. 1983):

$$dQ_S = dQ_R - (dQ_{HL} + dQ_W + dQ_M) \qquad (5)$$

Bu eşitlikteki tüm terimler z dikey pozisyonunda dx, dy ve dz hacmi için tanımlanmıştır. Net radyasyon bitki standının belirli bir z derinliğinde bitki elemanları tarafından soğurulan ve kesilen toplam ışınım enerjisidir ve şu şekilde ifade edilir:

$$dQ_R = \alpha_{PAR} I_{PAR} dA_{PAR} + \alpha_{NIR} I_{NIR} dA_{NIR} + \alpha_{LWR} I_{LWR} dA_{LWR} \quad (6)$$

Bu eşitlikte α güneş ışınımının spektral bantları (PAR, Photosynthetically Active Radiation; NIR, near infrared; LWR, longwave radiation) için soğurma katsayılarıdır. I söz konusu spektral bantlar için net güneş ışınımıdır. Bitki standı içinde dik gelen güneş

ışınımına etki eden diferansiyel yüzey alanı, her spektral bant için, dA direkt ve diffuz radyasyon bileşenlerinin toplamından oluşur:

$$dA = (1-d_{\sim})\, G(z,\theta)\, dLAI_ + d_{\sim}\, G(z,0)\, dLAI_z \quad (7)$$

Burada, $d_{\sim}$ diffuz ışınımın toplam ışınıma oranıdır. G yaprak yön dağılım fonksiyonudur (G-fonksiyonu). dLAI_ direk güneş ışınımının geldiği yön boyunca birikimli yaprak alan indeksinin diferansiyeline ve $dLAI_z$ z derinliğinde birikimli yaprak alan indeksinin diferansiyeline karşılık gelir.

Şekil 5'de gösterildiği gibi, termodinamiğin birinci yasası uyarınca, diferansiyel hava tabakasında kazanılan (dH_g, dW_g, dC_g) ve üretilen (dH_z, dW_z, dC_z) ısı yada kütle değişimlerinin toplamı, depolanan ısı yada kütle değişimine (dH_s, dW_s, dC_s) eşit olmalıdır. Burada sıra üzerinde ve sıraya dik eksende ısı ve kütle değişimi olmadığı varsayılarak, sadece bitki standı dikey profilindeki ısı ve kütle dengeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir (Jacobs ve ark. 1994):

Isı değişimi: $dH_s = dH_z + dH_g$ (8)

Su buharı değişimi: $dW_s = dW_z + dW_g$ (9)

CO_2 konsantrasyonu değişimi: $dC_s = dC_z + dC_g$ (10)

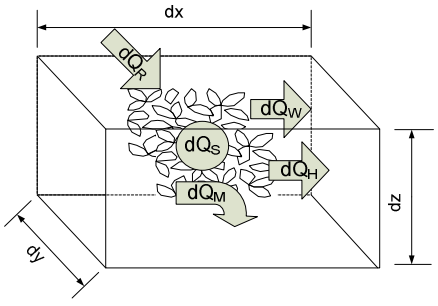
Diferansiyel tabakada ısı değişimi aşağıdaki şekilde tanımlanır (Kakaç ve Yener, 1995):

$$dH_z = d(\ K_h \frac{\partial H_g}{\partial z}\ ) \quad (11)$$

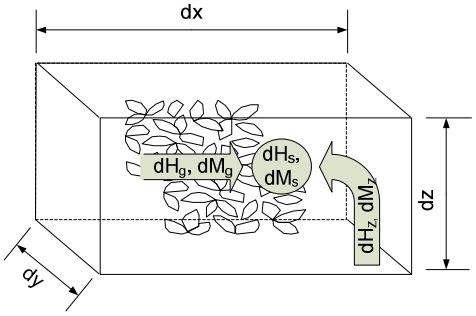
$$dH_g = dQ_{HL} \quad (12)$$

$$\frac{\partial H_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\ (K_h \frac{\partial H_g}{\partial z}\ ) + \frac{\partial H_g}{\partial z} \quad (13)$$

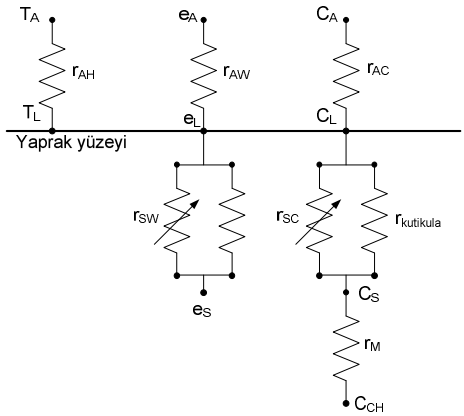
Burada, K_h ısı değişim katsayısıdır**.** Benzer şekilde su buharı ve karbondioksit değişim katsayıları için de K_w ve K_c değişim katsayıları kullanılır **(**Kays ve Crawford 1993).



Şekil 4. Bitki elemanları için enerji dengesi.



Şekil 5. Bitki çevresindeki diferansiyel hava tabakasında ısı ve kütle dengeleri ($dM_z = dW_z$, dC_z ve $dM_g = dW_g$, dC_g)



Şekil 6. Yaprak yüzeyi için ısı, su buharı ve CO_2 transferi işlemlerinin direnç kavramıyla tanımlanması.

Yaprak yüzeyi ve yaprağı çevreleyen hava tabakası arasındaki ısı transferi elektriksel akım ve ısı akısı benzeşiminden türetilerek, şekil 6'da şematik olarak gösterilen, direnç kavramıyla tanımlanmıştır (Stanghellini 1987). Bu benzeşim kütle transfer işlemleri olarak bilinen su buharı ve CO_2 taşınımına uyarlanmıştır (Yang ve ark. 1990 a). Konveksiyonla olan ısı transferi işlemleri için r_{AH}, su buharı için r_{AW} ve karbondioksit için r_{AC} aerodinamik dirençleri türetilmiştir (Zang ve Lemeur 1992).

Temel transpirasyon işlemi stoma yoluyla olur. Kutikula üzerinden olan transpirasyon sınırlıdır ve yok varsayılabilir (Hopkins 1995). Bu nedenle, transpirasyon ve fotosentez gibi fizyolojik işlemlerin tanımlanması için r_{sw} ve r_{sc} gibi stoma dirençleri tanımlanmıştır (Şekil 6).

Sonuç olarak bitki yaprakları çevresinde ve içinde oluşan ısı ve kütle transfer işlemler için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır:

$$dQ_{HL} = 2\frac{\rho_A c_{pA}}{r_{AH}}(T_L - T_A)dLAI \qquad (14)$$

$$dW_L = 2\left(\frac{W_S - W_A}{r_{AW} + r_{SW}}\right)dLAI \qquad (15)$$

$$W_S = \frac{\rho_A c_{pA}}{h_{fg}\gamma} e_s(T_L) \qquad (16)$$

$$W_A = \frac{\rho_A c_{pA}}{h_{fg}\gamma} e(T_A) \qquad (17)$$

$$dC = \rho_A \frac{C_A - C_{CH}}{r_{AC} + r_{SW} + r_{SC}} dLAI \qquad (18)$$

Bu eşitliklerde, ρ_A havanın yoğunluğu (kg/m^3), c_{pA} havanın özgül ısısı (J/kg.K), T_L yaprak sıcaklığı (Kelvin, K), T_A hava sıcaklığı (K), ve dLAI diferansiyel yaprak alan indeksi, w_s stomata içindeki havanın mutlak nemi (kg/m^3), w_A yaprağın çevresindeki havanın mutlak nemi (kg/m^3), h_{fg} buharlaşma entalpisi (J/kg^1), γ psikrometrik sabit (Pa/K), e_s havanın doygun buhar basıncı (Pa), C_A havadaki CO_2 konsantrasyonu (ppm), C_{ST} kloroplast stromasındaki CO_2 konsantrasyonu(ppm), r_{SW} su buharı taşınımı stomatal direnci (s/m), r_{SC} CO_2 taşınımı stomatal direnci (s/m).

Stomatal direnç, Stanghellini (1987) tarafından bildirilen yöntemle çok parametreli olarak hesaplanabilir. Ancak, Yang ve ark. (1989) pratik stomatal direnç ile toplam güneş radyasyonu arasında üssel bir eşitlik kullanmışlardır. Bu çalışmada, fizyolojik anlam ifade etmesi açısından, toplam güneş radyasyonu ölçümleri fotosentez etkili radyasyona (PAR) dönüştürülmüş ve hıyar bitkisine ilişkin aşağıdaki stomatal direnç eşitliği kullanılmıştır (Yang ve ark.1989):

$$r_{sw} = 142.7 + 953.9\exp(-0.0117\, I_{PAR}) \qquad (19)$$

CO_2 taşınımı stomatal direnci (r_{SC}) bitki yüksekliği ve z derinliğine göre tanımlanan r_{sw} direnci, su buharı (α_w) ve CO_2 taşınımı (α_c) difüzyon katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır:

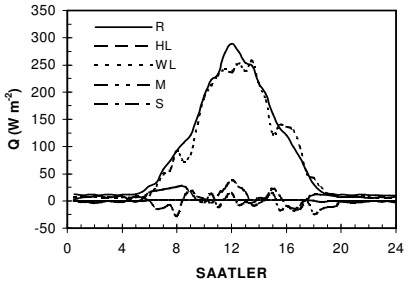
$$r_{sc} = r_{sw}(h,z)\frac{\alpha_w}{\alpha_c} \qquad (20)$$

Mikroklimatolojik modelin çözümü: Bitki standı 10 tabakaya ayrılmış olup; her tabakaya eşitlik (5) uygulanmıştır. Matematiksel model, bu makalede özet olarak verilen, 8…18 nolu ısı ve kütle transfer eşitlikleri kullanılarak 10 bilinmeyenli ikinci dereceden diferansiyel denklemlerle tanımlanmıştır. Bu diferansiyel denklemler Crank–Nicholson sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Serada bitki standının ısı ve kütle transfer karakteristiklerinin hesaplanması için Borland TurboPascal 6.0 kullanılarak mikroklima programı yazılmıştır. Bitki mimari parametreleri ve standı değişkenleri girilerek, model en az 24 saatlik simülasyon sonuçlarını sağlayacak şekilde 1 dakikalık zaman aralığı esas alınarak çalıştırılmıştır.

Bulgular ve tartışma

Bu makale bitki standındaki toplam güneş ışınımı, konveksiyon, net radyasyon, su buharı taşınımı, CO_2 taşınımı gibi işlemlere ek olarak hava, yaprak sıcaklıkları ve bağıl nem değişimlerini kapsayacak şekilde ele alınmıştır. Boyutsuz sayılara, hava hızı değişimlerine, aerodinamik ve stomatal direnç değişimlerine yer verilmemiştir. Hava ve yaprak sıcaklıkları, ısı ve kütle transferi işlemlerinde yaygın olarak kullanılan termodinamik sıcaklık skalası olan Kelvin (K= C+273.15) ölçeğinde değerlendirilmiştir. Bitki standının her diferansiyel tabakası için (5) nolu enerji dengesi tanımlanmış ve bulguların değerlendirilmesi tüm bitki standı için yapılmıştır.

Bitki standında enerji bileşenleri: Net radyasyon bitki örtüsünün ana enerji kaynağıdır. Net radyasyon konveksiyon, transpirasyon ve metabolik ısı bileşenlerinin toplamından daha fazla ise; eldeki enerji fazlası depolanır. Bitki standının enerji bileşenleri şekil 7'deki grafikte gösterilmiştir. Eksi değerler ısı akısının yönünü göstermektedir. Bitki örtüsünde etkili olan diğer enerji bileşeni transpirasyonla olan gizli ısı transferidir. Buna göre, Stanghellini (1987) ile Yang ve ark. (1990 a, b) tarafından da ifade edildiği gibi, bitki örtüsünde transpirasyon önemli bir enerji tüketim işlemidir. Transpirasyonla olan ısı transferi net radyasyondan daha yüksek olduğunda konveksiyonla ısı transferi negatif olmaktadır. Net radyasyonun üstündeki tranpirasyon enerjisinin hemen hepsi yaprakları soğutmakta kullanılmaktadır. Klimatolojide metabolik ısı genellikle yok varsayılır. Konveksiyonla ve transpirasyonla olan ısı transfer bileşenlerinin toplamı gece süresince çoğunlukla net radyasyon akı yoğunluğundan daha yüksektir.



Şekil 7. Bitki standında enerji bileşenleri

Bitki örtüsü içindeki net radyasyonun gün boyunca değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Gündüz periyodunda net radyasyonun temel bileşeni toplam güneş radyasyonudur. Gece ise ısıl radyasyon etkindir. Güneş radyasyonunun bitki örtüsü içine girişimi yukarıdan aşağıya doğru olmasına karşın (şekil 9); net radyasyon (Şekil 8) için bunun tersi söz konusudur. Çünkü bitki örtüsü içindeki net radyasyonun değişimi spektral bileşenlere göre tabandan tepeye yaprak alan indeksinin fonksiyonudur. Buna göre, stand içinde diferansiyel ölçekte değişen net radyasyon bitki yüksekliğiyle orantılı olarak değişmez; stand içinde radyasyonun girişimi yaprak alan indeksinin dağılımıyla orantılıdır.

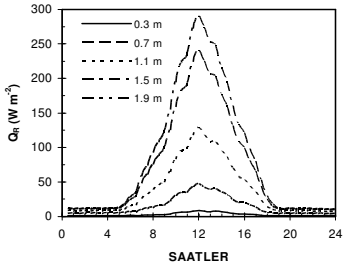
Bitkinin farklı z derinlikleri için hesaplanan toplam güneş radyasyonu zaman grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Bu grafikte bitki standı üstünde (z=2 m) ölçülen ve hesaplanan veriler aşağıda irdelenmiştir.

Maksimum toplam güneş radyasyonu akı yoğunluğu Saat 11:30' da 888.3 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, saat 12:00'de bitki standının üstünde ölçülen toplam (I), PAR (I_{PAR}) ve NIR (I_{NIR}) sırasıyla 875.1, 469.3 ve 405.9 W/m^2 'dir. Toplam radyasyon fraksiyonlarına ilişkin z-profili şekil 10'da gösterilmiştir. Model sonuçlarına göre, toplam güneş radyasyonunun (100) z=1m ve z=0'daki girişimleri sırasıyla %49 ve %32.3 a kadar azalmıştır. Güneş ışınımının 400 – 700 nm'lik spektrumunda etkili olan PAR girişimi ise sırasıyla % 44.7 ve % 25'dir. Güneş ışınımının 700 – 1100 nm spektrumunda etkili olan NIR ise % 53.9 ve % 40.8 oranlarında girişim yapabilmiştir. Karşılaştırma ölçütü olarak, toplam güneş radyasyonu, PAR ve NIR akı yoğunlukları Çizelge 1'de verilmiştir.

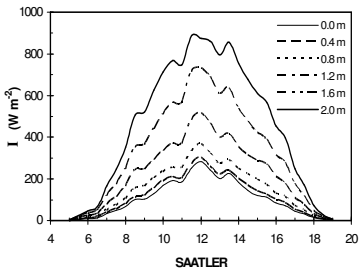
Bitki standında güneş ışınımı penetrasyonu ve net radyasyon değişimi bulguları Yang ve ark (1990b) tarafından elde edilen bulgularla uyumluluk göstermektedir.

Konveksiyonla ısı transferi: Bitki standındaki diferansiyel enerji dengesinde (5 nolu eşitlik) işleme giren bitki ve onu çevreleyen hava arasındaki ısı transferi (14) nolu eşitlikte tanımlanmış ve model simülasyonu sonucunda Şekil 11'de verilen zaman-Q_H grafiği elde edilmiştir. Bitki standının farklı seviyelerinde konveksiyonla olan ısı transferi, şekil 11'de gösterildiği gibi, -28.24 ile 37.88 W/m^2 aralığında değişmiştir. Eksi konveksiyonda hava sıcaklığı yaprak sıcaklığından yüksek olup; artı konveksiyonda tersi söz konusudur. Karışık konveksiyon etkilidir (Stanghellini 1993, Yang ve ark. 1995).

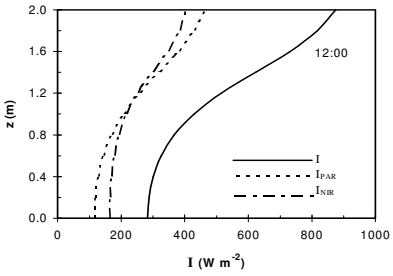
Su buharı taşınımı: Isı ve kütle transferi modelinde bitki standının her diferansiyel tabakası için 15, 16 ve 17 eşitlikleri kullanılmıştır. Bitki standında kütle dengesi kurularak, mikroklimatolojik modelin su buharı değişimi için integrali alınmıştır. Transpirasyonla olan su buharı taşınımı 2.57 ile 105.15 mg/m^{2}s arasında değişmiştir (Şekil 12). Bu koşullarda bitki örtüsünden transpirasyonla günde serbest bırakılan toplam su buharı miktarı 2.731 kg/m^2 dir. Elde edilen bulgular, Stanghellini (1987) ile Yang ve ark. (1990 a, b)"nın sonuçlarıyla benzerdir.



Şekil 8. Bitki standında net radyasyon değişimi



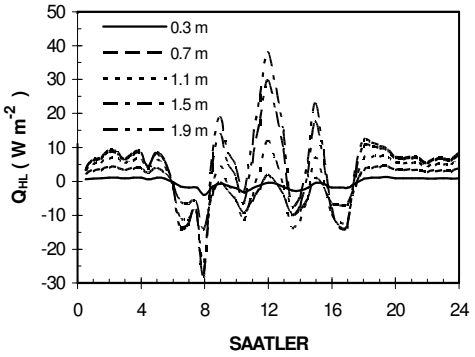
Şekil 9. Bitki standında güneş radyasyonu değişimi



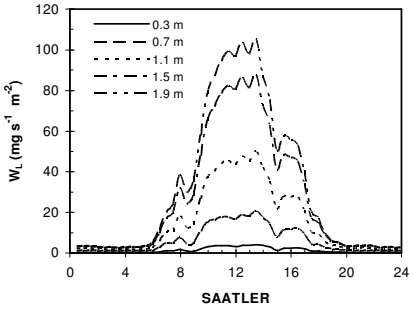
Şekil 10. Saat 12:00'de I, I_{PAR} ve I_{NIR} profili

Çizelge 1. Saat 12:00'de bitki standında toplam güneş ışınımı, PAR ve NIR profili ve (% penetrasyon).

	0.0 m	1.0 m	2.0 m
I	283.0 (32.3)	428.5 (49.0)	875.1 (100)
I_{PAR}	117.5 (25.0)	210.0 (44.7)	469.3 (100)
I_{NIR}	165.6 (40.8)	218.6 (53.9)	405.9 (100)



Şekil 11. Bitki standında etkili olan Q_{HL} akı yoğunluğu değişimi

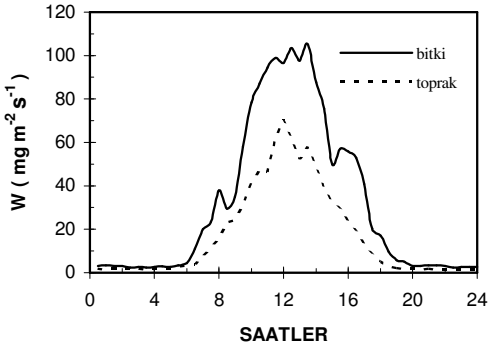


Şekil 12. Bitki standında su buharı değişimi

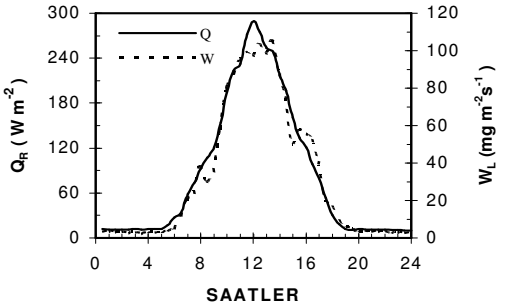
Bitki örtüsü ve toprak yüzeyinden olan su buharı taşınımı birlikte irdelenebilir. Şekil 13'te bitki örtüsü ve toprak yüzeyinden maksimum su buharı taşımı sırasıyla 105 ve 70 mg/m^2s olarak simüle edildiği görülmektedir. Sonuç olarak, serada toprak yüzeyinden olan toplam evaporasyon 1.478 kg/gün.m^2 olarak hesaplanmıştır. Sera koşullarında, bitki örtüsü ve toprak yüzeyinden olan evapo-transpirasyon 4.209 kg/gün.m^2'dir. A sınıfı buharlaşma kabı kullanılarak yapılan ölçüm sonuçlarına göre, serbest su yüzeyinden gerçekleşen buharlaşma miktarı 5.10 mm/gün'dür. Serada oluşan evapotranspirasyon 4.213 kg/gün.m^2 (k_p=0.95, buharlaşma kabı katsayısı) olarak ölçülmüştür. Ölçüm ve simülasyon bulgularının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 14'deki grafikle gösterildiği gibi, bitkiden kaynaklanan su buharı taşınımı ile net radyasyon rejimi gün boyunca benzerdir. Bunlar ilişkilendirilirse pratik olarak kullanılabilir (R^2=0.9768):

$$W_L = 0.3853\ Q_R - 0.6227 \qquad (21)$$



Şekil 13. Transpirasyon ve evaporasyon rejimi

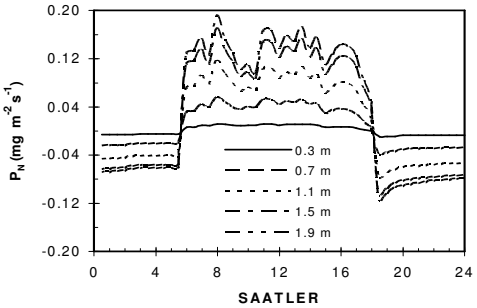


Şekil 14. Net radyasyon ve bitkiden su buharı taşınımının günlük değişimi

CO_2 taşınımı: Bitki örtüsünde kütle transferi fotosentez ve solunum işlemleriyle olur. Net fotosentez işlemi güneşlenme süresince kazanılan fotosentez ve tüm gün boyunca tüketilen solunum işleminin farkı olarak tanımlanır. Bitkiden havaya olan CO_2 taşınımı, su buharı taşınımına oranla çok düşüktür. Ayrıca, gündüz CO_2 transferi yaprağa doğru (+), gece ters yönde (-) gelişmektedir.

Tüm bitki standında gelişen fotosentez (P) 0.185 ile 0.382 $mgm^{-2}s^{-1}$, solunum (R) 0.062 ile 0.242 mg/m^2s ve net fotosentez (P_N) -0.068 ile 0.191 mg/m^2s aralıklarında değişmiştir. Bitki standında farklı z derinlikleri için net fotosentez rejimleri şekil 15'deki grafikle verilmiştir.

Bitki üzerinde etkili olan güneş ışınımı arttıkça yaprak sıcaklığı da artar; ancak yaprak sıcaklığındaki artış transpirasyonla sınırlanır. Yaprak üzerindeki stomalar gerektiği zaman açılan kapanan valfler gibi işlev görür. Bitkinin zor koşullarda soğuması sağlanırken aşırı su tüketimi de engellenmiş olur. Bu nedenle yaprak sıcaklığı ve yaprağı çevreleyen havanın sıcaklığı mikroklimatolojide önemli değişkenlerdir.



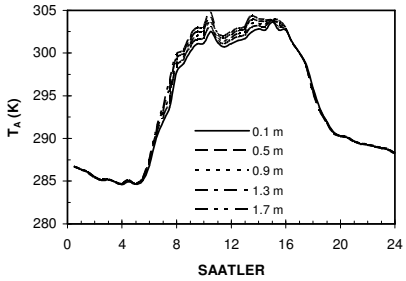
Şekil 15. Bitki standında net fotosentez rejimi

Hava ve yaprak sıcaklıkları: Bitki standı üstünde termodinamik sıcaklık skalasında ölçülen hava sıcaklığı 284.5 ile 305.35 K arasında değişmiştir. Bitki standının 10 farklı yüksekliğinde simüle edilen hava sıcaklığının değişimi Şekil 16'da verilen z=0.1, 0.5, 0.9, 1.3 ve 1.7 m seviyelerileri için gösterilmiştir.

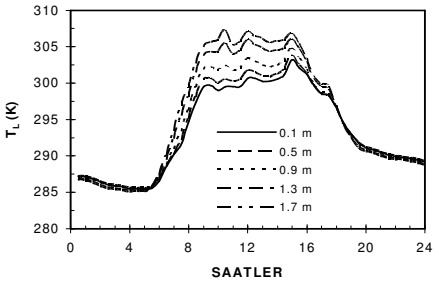
Bitki standında yaprak sıcaklığının 284.91 ile 307.28 K aralığında değiştiği hesaplanmış; günlük değişimler, 5 farklı z derinliği için Şekil 17'de verilmiştir. Ayrıca, bitki standında 10 noktada simüle edilen hava ve yaprak sıcaklıklarına ilişkin veriler ile ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Serada bitki örtüsü içindeki hava ve yaprak sıcaklıkları Yang ve ark. (1990a, b) tarafından elde edilen bulgularla uyumludur.

Hava sıcaklığına ilişkin simülasyon ve ölçüm verilerinin ortalama değerler üzerinden günlük değişimleri Şekil 18 (a)'da gösterilmiştir. Hava sıcaklığı için simülasyon ve ölçüm verilerine göre standart hata 0.5849 K ve regresyon katsayısı 0.9935'dir. Benzer şekilde yaprak sıcaklığı için stand ortalamaları üzerinden günlük değişim rejimi Şekil 18 (b)'de gösterilmiştir. Yaprak sıcaklığı için simülasyon ve ölçüm verilerine göre standart hata 0.8847 K ve regresyon katsayısı 0.9847'dir.

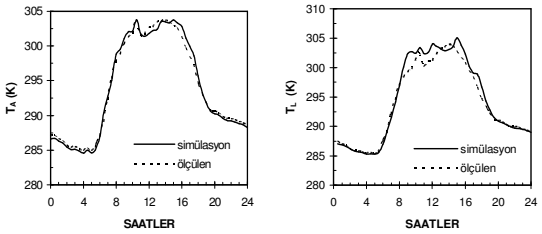
Bağıl nem: Bitki örtüsü üstünde bağıl nemin (RH) % 64.63 ile % 98.01 değerleri arasındaki değiştiği ölçülmüştür. Grafiklerde verilen 5 z derinliği için simüle edilen bağıl nemin zamana göre değişimleri Şekil 19'da verilmiştir. Bitki standı ortalamasına göre, simüle edilen ve ölçülen bağıl nem verilerine ilişkin zaman grafiği Şekil 20'de gösterilmiştir. Bağıl nem için simülasyon ve ölçüm verilerine göre standart hata % 1.549 ve regresyon katsayısı 0.9804'dir.



Şekil 16. Farklı z derinliklerinde hava sıcaklığı rejimi

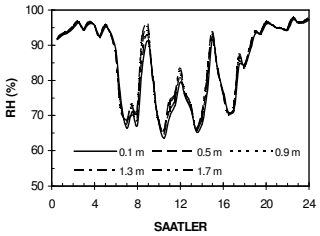


Şekil 17. Farklı z derinliklerinde yaprak sıcaklığı rejimi

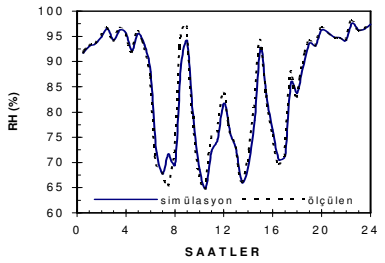


(a) (b)

Şekil 18. (a) Hava sıcaklığı, (b) yaprak sıcaklığı simülasyon ve ölçüm verilerinin günlük değişimleri



Şekil 19. Farklı z derinliklerindeki bağıl nem rejimi



Şekil 20. Bitki standında ölçülen ve hesaplanan bağıl nem

Çizelge 2. Modelin istatistiksel doğrulaması S=Öx+b
1 tüm bitki standı verileri, 2 stand ortalaması

	a	b	R^2	SE	RMSE	n
T_A [1]	1.026	-7.59	0.986	0.828	0.851	245
T_L [1]	1.091	-26.38	0.966	1.329	1.549	245
RH [2]	0.966	2.69	0.980	1.549	1.158	49
I [1]	0.908	14.96	0.876	87.90	90.40	124

Sonuç

Seralardaki bitki toplulukları için bir mikroklima modeli geliştirilmiş olup; Çizelge 2'de özet olarak verilen istatistiksel parametrelere göre test edilmiştir. Burada (y=ax+b) ilişkisi için R^2 belirtme katsayısı, SE standart hata, RMSE (Root Mean Square Error) kare ortalama karekök hatası, n örnek sayısıdır. Geliştirilen mikroklima modeli sera bitki kümeleri içindeki hava ve yaprak sıcaklıkları ile bağıl nem seviyelerini; güneş ışınımının alt tabakalara girişimini ve transpirasyon seviyelerini yüksek doğrulukla hesaplayabilir. Model zamanın fonksiyonu olarak ısı ve kütle değişimlerini tahmin edebilme yeteneğine sahiptir. Sonuç olarak, model bitki standındaki ısı ve kütle transfer işlemleri için etkili bir hesaplama aracı olarak kullanılabilir. Enerji ve suyu verimli kullanan sistemlerin gelişiminde katkı sağlayabilir. Model etkin iklim yönetimi için uzman sistemlerle birleştirilebilir.

Kaynaklar

Kays, W. M. and M. E. Crawford. 1993. Convective Heat and Mass Transfer. 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc. p.1-601, New York.

Kakaç, S. and Y. Yener. 1995. Convective Heat Transfer. 2nd Edition, CRC Press, Inc., p.1-422, Florida.

Jacobs, A.F.G., J. H. Van Boxel and M.M. El-Kilani. 1994. Nighttime free convection characteristics within a plant canopy. Boundary -Layer Meteorology 71: 375-391.

Hopkins, J. G. 1995. Introduction to Plant Physiology. John Wiley & Sons, p. 464, New York.

Goel, N.S. and D.E. Strebel. 1984. Simple beta distribution represantation of leaf orientation in vegetation canopies. Agronomy Journal 76: 800-802.

Myneni, R.B., J. Ross and G. Asrar. 1989. A review on the theory of photon transport in leaf canopies. Agricultural and Forest Meteorology 45: 1-151.

Rosenberg, N.J., B. L. Blad and S. B. Verma. 1983. Microclimate: The Biological Environment. 2nd edition, John Wiley & Sons, p.495, New York.

Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. International of Journal Remote Sensing 6(8): 1335-1372.

Stanghellini, C.1987. Transpiration of Greenhouse Crops: an aid to climate management. Ph.D. Thesis, Agricultural University, p. 1-150, Wageningen.

Stanghellini, C. 1993. Mixed convection above greenhouse crop canopies. Agricultural and Forest Meteorology 66: 111-117.

Yang, X., T. H. Short, R.D. Fox and W.L. Bauerle. 1989. The Microclimate an transpiration of a greenhouse cucumber crop. Transaction of the ASAE 32(6): 2143-2150.

Yang, X., T. H. Short, R.D. Fox and W.L. Bauerle. 1990a. Dynamic modeling of the microclimate of a cucumber crop: Part 1. Theoretical model. Transaction of ASAE 33(5): 1701-1709.

Yang, X., T. H. Short, R.D. Fox and W.L. Bauerle. 1990b. Dynamic modeling of the microclimate of a cucumber crop: Part 2. Validation and simulation. Transaction of ASAE 33(5): 1710-1716.

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. Transaction of the ASAE 38(1):225-229.

Zang, L. and R. Lemeur. 1992. Effect of aerodynamic resistence on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. Agricultural and Forest Meteorology 58: 209-228.

İletişim Adresi:
Mehmet Ali DAYIOĞLU
Ankara Üniv. Ziraat Fak. Tarım Makinaları Bölümü – Ankara
Tel: 0 312 596 1 596
E-posta: dayioglu@agri. ankara.edu.tr