

58638

SERA İÇİ BİTKİ TOPLULUKLARININ
MİKROKLİMATOLOJİK MODELLE
ISI VE KÜTLE TRANSFER
Karakteristiklerinin
SAPTANMASI
Mehmet Ali DAYIOĞLU
DOKTORA TEZİ
TARIM MAKİNALARI ANABİLİM DALI
1997

T.C. YÜKSEK ÖĞRETİM KURUMU
ANTASYON MERKEZİ
58638

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERA İÇİ BITKİ TOPLULUKLARININ MİKROKLİMATOLOJİK MODELLE
ISI VE KÜTLE TRANSFER KARAKTERİSTİKLERİİN SAPTANMASI

Mehmet Ali DAYIOĞLU

DOKTORA TEZİ

TARIM MAKİNALARI ANABİLİM DALI

Bu tez 8.12.1997 tarihinde aşağıdaki juri tarafından ...100... (.....) not takdir edilerek Oybirligi/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa Özcan ÜLTANIR
(Danışman)

Prof. Dr. Ali BAŞÇETİNÇELİK
(Juri)

Prof. Dr. Demir İNAN
(Juri)

ÖZET

Doktora Tezi

SERA İÇİ BITKİ TOPLULUKLARININ MİKROKLİMATOLOJİK MODELLE ISI VE KÜTLE TRANSFER KARAKTERİSTİKLERİİN SAPTANMASI

Mehmet Ali DAYIOĞLU

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarım Makinaları Anabilim Dalı

Danışman : Prof.Dr. Mustafa Özcan ÜLTANIR

1997, Sayfa: 135

Jüri : Prof.Dr. Mustafa Özcan ÜLTANIR
Prof.Dr. Ali BAŞÇETİNÇELİK
Prof.Dr. Demir İNAN

Bu çalışmada, sera bitki standında ısı ve kütle taşınım işlemlerinin tanımlanması için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bitki örtüsü, yaklaşık dikdörtgen kesit alanlı paralel diziler halinde ve değiştirilebilir bitki mimari parametrelerine göre modellenmiştir. Bitki örtüsü içindeki radyasyon transferi, kısa dalgalı ve uzun dalgalı radyasyon ile net radyasyon alt modelleri kullanılarak irdelenmiştir. Bitki örtüsü içindeki ısı transferinin araştırılmasında konveksiyonla ve buharlaşmayla olan ısı transferi alt modelleri, kütle transferinin araştırılmasında ise su buharı ve CO_2 taşınımı alt modelleri kullanılmıştır. Bireysel alt modellerin her biri hıyar bitki standı için düzenlenmiştir.

Sera yapısı, bitki mimari parametreleri, bitki örtüsünün fiziksel ve fizyolojik özellikleri ile bitki üstü klimaya ilişkin değişkenler modelin simülasyonunda girdi olarak kullanılmıştır. Bitki yaprakları ve sera havasının diferansiyel tabakası için eşzamanlı enerji ve kütle dengesi uygulanmış; teorik yaklaşımlar zamanın fonksiyonu olarak değişen simülatörle birleştirilmiştir. Modelin simülasyonuyla elde olunan çıktılar, sera mikroklimasının birincil ve ikincil analiz sonuçları kapsamında kullanılmıştır. Model tanıtım disketi ekte verilmiştir.

Model tahminleri ölçüm verileriyle karşılaştırılmış; modelin yeterli doğrulukla kullanılabilirliği saptanmıştır. Örneğin, ölçülen ve hesaplanan hava sıcaklıklarına ilişkin veri kümesinin standart hatası 0.828 K, kare ortalama karekök hatası 0.851 K ve belirtme katsayısı ise 0.9865 olarak belirlenmiştir.

Bitki standı içindeki ısı ve kütle konveksiyonu boyutsuz sayılar, radyasyon, aerodinamik ve stomatal dirençler ile film katsayıları kullanılarak irdelenmiştir.

Bitkinin tepki mekanizması, mikroklimatolojik direnç yaklaşımına göre araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sera mikrokliması, mikroklimatolojik model, simülasyon, bitki mimari parametreleri, radyasyon, ısı ve kütle transferi, aerodinamik ve stomatal dirençler, mikroklimatolojik direnç.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THE DETERMINATION OF THE HEAT AND MASS TRANSFER CHARACTERISTICS OF THE GREENHOUSE CROPS BY MICROCLIMATOLOGIC MODEL

Mehmet Ali DAYIOĞLU

**Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Agricultural Machinery**

Supervisor : Prof.Dr. Mustafa Özcan ÜLTANIR

1997, Page: 135

**Jury : Prof.Dr. Mustafa Özcan ÜLTANIR
Prof.Dr. Ali BAŞÇETİNÇELİK
Prof.Dr. Demir İNAN**

In this work, a mathematical model of greenhouse microclimate was developed for describing heat and mass transport processes in a greenhouse crop stand. The canopy was modelled as a series of parallel rows with pseudo-rectangular cross-sections and variable architectural parameters. The radiation transfer within canopy stand was analysed that being used sub-models of shortwave and longwave radiation and net radiation. The heat transfer within canopy stand was described using sub-models of the convection and latent heat, and that mass transfer also using sub-models of the water vapour and CO₂ transport. Each of the individual submodels was organised for cucumber row-crop.

The greenhouse structure, plant architecture, physical and physiological specifications of the plant canopy and climatological variables of the bulk air above the canopies were used as input for simulation of the model. The energy and mass balance simultaneously over differential strata of plant leaves and greenhouse air were applied that the theoretical considerations were assembled into a transient simulator. The outputs obtained by simulating transient model were employed as the results of primary and secondary analysis of the greenhouse microclimate. The presentation floppy disk of the model was given in appendix.

The model predictions were compared with measurement data, and that were determined to be used with an acceptable level of accuracy. For example, it was determined as 0.828 K, 0.851 K and 0.9865 of the standard error, root mean square error and determination coefficient for data group of air temperatures measured and predicted, respectively.

The heat and mass convection within plant canopy stand were analysed being used dimensionless numbers, radiation, aerodynamic, stomatal resistances and film coefficients.

The mechanism of plant response was investigated from approximation of the microclimatologic resistance.

Key Words: Greenhouse microclimate, microclimatological model, simulation, plant architectural parameters, radiation, heat and mass transfer, aerodynamic and stomatal resistances, microclimatological resistance.

Ö N S Ö Z

Ülkemiz sera tarımı, son yıllarda ticari boyut kazanmakla birlikte endüstriyel anlamda umut verici gelişme eğilimi içerisinde yeni girmiş bulunmaktadır. Sera endüstrisinin ekonomik getirişi, bitkisel üretim ve maliyeti arasındaki dengelere bağlı olduğundan üretimi istenen düzeyde tutmak ve ürün kalitesini iyileştirmek için sera klimasının ve kaynaklarının rasyonel işletilmesi her zaman en önemli gereksinimdir. Araştırmalar, bitkileri etkileyen zararlı popülasyonunun ve hastalık yapan sporların gelişiminin bağıl nem ve sıcaklık gibi klimatolojik değişkenlerle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu açıdan mikroklima ve bitkiler arasındaki ilişkilerin daha iyi anlaşılması çok önemlidir.

Sera mikroklimasının enerji ve kütle değişimlerini doğrudan yönettiği, bitki metabolik aktivitelerini etkilediği bilinmektedir. Günümüzde klimatoloji ve meteorolojide yaygın olarak kullanılan temel fiziksel ve fizyolojik prensipleri uygulayarak, sera mikroklimasına yönelik ısı ve kütle transfer işlemlerinin tanımlanması yeni bir aşama olarak kabul edilmektedir. Bitki ve çevresi arasında oluşan tepki mekanizmalarının saptanmasında da kullanılmakta olan sera mikrokliması simülasyon modellerinden ülkemiz sera tarımında henüz yararlanılmamaktadır. Sera mikroklimasına ilişkin ısıl ve kütlesel karakteristiklerinin belirlenmesi, en uygun sera tasarıımına yol gösterecek; gelişmiş otomasyon sistemlerinin kurulmasını ve işletilmesini sağlayacaktır. Sera işletmeciliği açısından mevcut olanakların etkili kullanımı için mikroklima ve bitki büyümeye modellerinden elde edilecek bulgulara göre gelecekte uygulamaya sokulacak uzman sistemlere taban oluşturacaktır.

Bu çalışmada, sera mikroklimasına ilişkin radyasyon, ısı ve kütle transfer işlemlerinin simülasyonu için zamanla değişen bir model geliştirilmiş; modelin işletilmesi sonucunda elde olunan veriler değerlendirilmiş; bitki bioklimasını tanımlayan karar değişkenlerine ulaşılmıştır.

Bu konuyu bana veren, destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof.Dr. Mustafa Özcan ÜLTANIR 'a, deney çalışmalarının yapıldığı Antalya Seracılık Araştırma Enstitüsü'nde uygulama olanağı sağlayan enstitü müdürü Sayın Dr. Ali ÖZTÜRK 'e, ölçüm çalışmalarım süresince çok değerli yardımlarını gördüğüm Sayın Zir. Yük. Müh. Hüseyin CEVRI 'ye ve çalışmalarım süresince bana destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım...

Mehmet Ali DAYIOĞLU

Ankara, 1997.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1. 1. Makroklima ve Mikroklima Kavramı	1
1. 2. Modelleme Tekniği ve Simülasyon Kavramı	4
1. 3. Çalışmanın Amacı ve İçeriği	5
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1. Güneş – Yerküre Arasındaki Fiziksel İlişkiler	6
2. 1. 1. Güneş açıları.....	6
2. 1. 2. Atmosfer dışı ışınım...	7
2. 2. Radyasyon Transfer Mekanizmaları	7
2. 3. Moleküler Taşınım İşlemleri	10
2. 3. 1. Momentum transferi.....	10
2. 3. 2. İşı transferi	11
2. 3. 3. Kütle transferi	11
2. 3. 4. Zamanla değişen moleküller taşınım	12
2. 4. Direnç Benzeşimi	14
2. 5. Boyutsuz Sayılar	15
2. 6. Bitki Örtüsü İçindeki Konveksiyon Rejimi	16
2. 7. Hava, Su buharı ve CO ₂ 'de İlişkin Fiziksel Özelliklerin Saptanması.....	16
2. 8. Bitkinin Fiziksel Özellikleri	18
2. 8. 1. Transpirasyon	18
2. 8. 1. 1. Stoma içindeki mutlak nem	19
2. 8. 1. 2. Doygun buhar basıncı	19
2. 8. 1. 3. Bağlı nem.....	20
2. 8. 2. Fotosentez ve solunum	20
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	21
4. MATERİYAL VE YÖNTEM	25
4. 1. Materyal	25
4. 1. 1. Deney serasına ilişkin özellikler	25
4. 1. 2. Sera bitki örtüsüne ilişkin özellikler	26

4. 1. 3. Deneme standlarında yapılan ölçümler	26
4. 1. 4. Sera mikrokliması deney simülatörü	27
4. 1. 5. Model ve alt modellerde kullanılan girdiler	32
4. 2. Yöntem	34
4. 2. 1. Bitki standı modeli	34
4. 2. 1. 1. Yaprak alan indeksi.....	35
4. 2. 1. 2. Dağılım fonksiyonları	36
4. 2. 1. 3. G-fonksiyonu	37
4. 2. 1. 4. Yaprak eğim indeksi	37
4. 2. 2. Radyasyon transferi modeli	38
4. 2. 2. 1. Güneş radyasyonu alt modeli	38
4. 2. 2. 1. 1. Direkt güneş radyasyonu	39
4. 2. 2. 1. 2. Diffuz güneş radyasyonu	41
4. 2. 2. 1. 3. Bitki elemanlarından yayılan güneş radyasyonu	43
4. 2. 2. 1. 4. Toplam güneş radyasyonu	44
4. 2. 2. 1. 5. Fotosentez etkili radyasyon	44
4. 2. 2. 1. 6. Yakın kızılötesi radyasyon	45
4. 2. 2. 2. Isıl radyasyon alt modeli	45
4. 2. 2. 3. Net radyasyon alt modeli	47
4. 2. 3. Isı transferi modeli	48
4. 2. 3. 1. Bitkinin enerji dengesi	48
4. 2. 3. 2. Havanın enerji dengesi	49
4. 2. 3. 3. Konveksiyonla olan ısı transferi alt modeli	50
4. 2. 3. 3. 1. Yapraktan konveksiyonla olan ısı transferi.....	50
4. 2. 3. 3. 2. Topraktan konveksiyonla olan ısı transferi.....	51
4. 2. 3. 4. Buharlaşmayla olan ısı transferi alt modeli	51
4. 2. 3. 4. 1. Yapraktan transpirasyonla ısı transferi.....	51
4. 2. 3. 4. 2. Topraktan evaporasyonla olan ısı transferi.....	54
4. 2. 3. 5. Metabolik ısı değişimi	54
4. 2. 4. Kütle transferi modeli	55
4. 2. 4. 1. Havanın kütle dengesi	55
4. 2. 4. 2. Yapraktan konveksiyonla olan kütle transferi	56
4. 2. 4. 2. 1. Su buharı taşınımı alt modeli	56
4. 2. 4. 2. 1. 1. Transpirasyon hızı	57
4. 2. 4. 2. 2. CO ₂ taşınımı alt modeli	57
4. 2. 4. 2. 2. 1. Net fotosentez hızı	57
4. 2. 4. 3. Topraktan olan kütle transferi	59
4. 2. 4. 3. 1. Su buharı taşınımı alt modeli	59
4. 2. 4. 3. 2. Toprak solunumu alt modeli	60

4. 2. 5. Momentum, ısı ve kütle değişim katsayılarının saptanması.....	60
4. 2. 6. Radyasyon ısı ve kütle transfer modellerinin çözümü	62
4. 2. 6. 1. İntegrallerin sayısal çözümü	62
4. 2. 6. 2. Diferansiyel denklemelerin sayısal çözümü	63
4. 2. 7. Hazırlanan bilgisayar programının özelliklerı	67
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	69
5. 1. Sera Mikrokliması Birincil Analiz Sonuçları	69
5. 1. 1. Hava sıcaklığı	69
5. 1. 2. Yaprak sıcaklığı	72
5. 1. 3. Bağışıl nem	76
5. 1. 4. CO ₂ konsantrasyonu	77
5. 1. 5. Hava hızı	80
5. 1. 6. Boyutsuz sayılar	82
5. 1. 7. Aerodinamik dirençler	88
5. 1. 8. Film katsayıları	90
5. 1. 9. Stomatal dirençler	92
5. 1. 10. Radyasyon transfer direnci	93
5. 2. Sera Mikrokliması İkincil Analiz Sonuçları	94
5. 2. 1. Radyasyon transferi bulguları	94
5. 2. 1. 1. Güneş radyasyonu	94
5. 2. 1. 2. Uzun dalgalı radyasyon	99
5. 2. 1. 3. Net radyasyon	100
5. 2. 2. Isı transferi bulguları	103
5. 2. 2. 1. Konveksiyonla ısı transferi	104
5. 2. 2. 2. Transpirasyonla ısı transferi.....	105
5. 2. 2. 3. Metabolik ısı transferi	108
5. 2. 3. Kütle transferi bulguları	109
5. 2. 3. 1. Su buharı taşınımı	109
5. 2. 3. 2. CO ₂ taşınımı	112
6. TARTIŞMA ve ÖNERİLER	115
6. 1. Birincil Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	115
6. 2. Boyutsuz Sayılar ve Aerodinamik Dirençlere İlişkin Değerlendirmeler	116
6. 3. Isı Transfer İşlemlerinin Değerlendirilmesi	118
6. 4. Kütle Transfer İşlemlerinin Değerlendirilmesi	119
6. 5. Karar Mekanizması Olarak Mikroklimatolojik Direncin Kullanılması	120
6. 6. Model Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	122
KAYNAKLAR	126
EK	132

SİMGELER DİZİNİ

a	dağılımın birinci momenti için katsayı
A	integrasyon alanı
A_L	yaprak alanı (m^2)
$a_x(x)$	yatay yoğunluk fonksiyonu (m^{-1})
$a_z(z)$	dikey yoğunluk fonksiyonu (m^{-1})
b	dağılımın ikinci momenti için katsayı
C_A	havadaki CO_2 konsantrasyonu (kg m^{-3} , ppm)
C_{ST}	kloroplast stromasındaki CO_2 konsantrasyonu
$C(x)$	kosinüs dağılım fonksiyonu
$C_d(z)$	sürükleme katsayısı
c_{pA}	sabit basınçta havanın özgül ısısı ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
c_{pL}	sabit basınçta yaprağın özgül ısısı ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
c_R	kloroplasttaki CO_2 konsantrasyonu (ppm)
d	gün sayısı
d_s	diffuz radyasyon indeksi
$d_{s,NIR}$	diffuz NIR indeksi
$d_{s,PAR}$	diffuz PAR indeksi
d_L	yaprak kalınlığı (m)
dA	üst yarıküre koni taban alanı (m^2)
dC_s	depolanan CO_2 akı yoğunluğu ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
dC_z	z derinliğinde net CO_2 değişimi ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
dP_N	diferansiyel net fotosentez hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
dQ_s	depolanan ısı akı yoğunluğu (W m^{-2})
dQ_z	z derinliğinde net ısı değişimi (W m^{-2})
dW_L	diferansiyel transpirasyon hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
dW_s	depolanan subuharı akı yoğunluğu ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
dW_z	z derinliğinde net subuharı değişimi ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
$d\omega$	hacim açısı
d_o	atmosfer bulutluluk indeksi
D_-	Direkt PAR dönüşüm indeksi
D_s	Diffuz PAR dönüşüm indeksi
D_{NIR}	NIR dönüşüm indeksi
D_{PAR}	PAR dönüşüm indeksi
e_A	havanın buhar basıncı (Pa)
e_F	toplak yüzeyindeki buhar basıncı (Pa)
e_L	yaprak yüzeyindeki buhar basıncı (Pa)
e^*	doygun buhar basıncı (Pa)

E_c	Eckert sayısı
E_f	yörüngeSEL eksantriklik düzeltme faktörü
F_{-}	direkt şekil faktörü
F_{\sim}	diffuz şekil faktörü
F_{PAR}	PAR şekil faktörü
F_{NIR}	NIR şekil faktörü
F_{LWR}	LWR şekil faktörü
g	yerçekimi ivmesi ($m s^{-2}$)
$G(z,\theta)$	G-fonksiyonu
$g(\theta,\varphi)$	yaprak alanı yön dağılım fonksiyonu
Gr	Grashof sayısı
h	bitki yüksekliği (m)
h_c	CO_2 taşınımı film katsayısı ($g m^{-2} s^{-1}$)
h_H	isi transferi film katsayısı ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_w	subuharı taşınımı film katsayısı ($g m^{-2} s^{-1}$)
h_{cr}	CO_2 özümleme entalpisi ($J kg^{-1}$)
h_{fg}	buharlaşma entalpisi ($J kg^{-1}$)
i_{\sim}	üst yarıkürenin ışınması ($W m^{-2} radian^{-1}$)
i_{\downarrow}	aşağı yönde olan ışına ($W m^{-2} radian^{-1}$)
I	güneş radyasyonu akı yoğunluğu ($W m^{-2}$)
I_{-}	direkt güneş radyasyonu akı yoğunluğu ($W m^{-2}$)
I_L	bitki elemanları arasındaki LWR ($W m^{-2}$)
$I_{L(x,z)}$	(x,z) de ısıl radyasyon akı yoğunluğu ($W m^{-2}$)
I_{\sim}	diffuz güneş radyasyonu akı yoğunluğu ($W m^{-2}$)
I_e	atmosfer dışı ışınım ($W m^{-2}$)
I_{sc}	güneş sabiti ($W m^{-2}$)
$I(x,z)$	(x,z)de toplam güneş radyasyonu akı yoğunluğu($W m^{-2}$)
$I(x,z)_{PAR}$	(x,z) de PAR akı yoğunluğu($W m^{-2}$)
$I(x,z)_{NIR}$	(x,z) de NIR akı yoğunluğu($W m^{-2}$)
k_A	havanın ısıl kondüktivitesi ($W m^{-1} K^{-1}$)
L	plaka uzunluğu (m)
l	ortalama yaprak boyutu (m)
l_L	yaprak uzunluğu (m)
l_m	karişim uzunluğu (m)
LAI	yaprak alan indeksi
LAI_{OP}	OP yolu boyunca yaprak alan indeksi
LAI_{OQ}	OQ yolu boyunca yaprak alan indeksi
LAI_z	dikey yaprak alan indeksi
Le_c	CO_2 taşınımı Lewis sayısı
Le_w	subuharı taşınımı Lewis sayısı

[M]	katsayılar matrisi
n_L	örnek bitkilerin yaprak sayısı (adet)
Nu	Nusselt sayısı
P	atmosferik basınç (Pa)
P_N	net fotosentez hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
P_λ	Planck fonksiyonu ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$)
$P(x,z)_-, P_-$	direkt penetrasyon fonksiyonu
$P(x,z)_\sim, P_\sim$	diffuz penetrasyon fonksiyonu
$P_\infty \downarrow$	aşağı yönde yayılan penetrasyon fonksiyonu
$P_\infty \uparrow$	yukarı yönde yayılan penetrasyon fonksiyonu
$P(x,z)_{\text{PAR}}$	PAR penetrasyon fonksiyonu
$P(x,z)_{\text{NIR}}$	NIR penetrasyon fonksiyonu
Pr	Prandtl sayısı
q_θ	içsel moleküler üretim ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}, \text{Wm}^{-3}$)
Q_H	ısı transferi akı yoğunluğu (W m^{-2})
Q_{HL}	bitkiden konveksiyonla ısı transferi akı yoğunluğu
Q_{HF}	tabandan konveksiyonla ısı transferi akı yoğunluğu
Q_R	net radyasyon akı yoğunluğu (Wm^{-2})
Q_{10}	bağlı değişim faktörü
r	üst yarıkürenin yarıçapı (m)
r_{AH}	ısı transferi aerodinamik direnci (s m^{-1})
r_{AW}	subuharı taşınımı aerodinamik direnci (s m^{-1})
r_{AC}	CO_2 taşınımı aerodinamik direnci (s m^{-1})
$r_{hd'}$	hücre duvarı direnci (s m^{-1})
r_m	mezofil hücre direnci (s m^{-1})
r_s	sitosol direnci (s m^{-1})
r_{ST}	kloroplast stroması direnci (s m^{-1})
r_z	hücre zarı direnci (s m^{-1})
r_R	radyasyon transfer direnci (s m^{-1})
r_{SC}	CO_2 taşınımı stomatal direnci (s m^{-1})
r_{SW}	subuharı taşınımı stomatal direnci (s m^{-1})
r_\sim	mikroklimatolojik direnç
R	solunum hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
R_{dL}	yaprığın karanlık solunum hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
R_{dF}	toprağın karanlık solunum hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Re	Reynolds sayısı
RH	bağlı nem (%)
Ri	Richardson sayısı
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı

St	Stanton sayısı
t	zaman (s)
t_e	zaman denklemi
t_L	yerel zaman
T	film sıcaklığı (K)
T_A	hava sıcaklığı (K)
T_L	yaprak sıcaklığı (K)
u	hava hızı ($m s^{-1}$)
u^*	sürtünme hızı ($m s^{-1}$)
$[V]$	sütun vektörü
w	bitki genişliği (m)
w_A	havanın mutlak nemi ($kg m^{-3}$)
w_L	yaprak genişliği (m)
w_s	stomata içindeki havanın mutlak nemi ($kg m^{-3}$)
W	bitki sıraları arası uzaklık (m)
W_F	evaporasyon hızı ($kg m^{-2} s^{-1}$)
W_L	transpirasyon hızı ($kg m^{-2} s^{-1}$)
z	bitki standında referans yükseklik (m)
\wedge	gün açısı
α	soğurma katsayısı
α_H	ıslı difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
α_w	subuanlı difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
α_C	CO_2 difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
β	sönüüm faktörü
$\beta(\xi), \beta(z^*)$	beta dağılım fonksiyonu
ε	yüzey yayınım katsayısı
ΔB	yerel boylam ile standart boylam arasındaki fark
Δt	zaman aralığı (s)
ΔT	sıcaklık farkı (K)
$\Delta\phi_{-}$	$ PR $ ve $ PS $ arasındaki açı
δ	deklinasyon açısı
ϕ	enlem
ϕ_{-}	direkt azimut açısı
ϕ_{\approx}	diffuz azimut açısı
ϕ_L	yaprak azimut açısı
ϕ_s	güneşin azimut açısı
ζ	bağıl türbulans yoğunluk faktörü
$\Gamma(x)$	gama fonksiyonu
γ	psikrometrik sabit ($Pa K^{-1}$)

κ_s	genelleştirilmiş moleküller değişim katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
κ_H	ıslık değişim katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
κ_M	momentum değişim katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
κ_w	subuharı değişim katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
κ_c	CO_2 değişim katsayısı ($m^2 s^{-1}$)
λ	dalga boyu (nm)
μ	dinamik viskozite ($kg m^{-1} s^{-1}$)
μ_h	dikey yoğunluk fonksiyonunun ortalaması (m)
Ω_M	klimatolojik momentum stabilitet fonksiyonu
Ω_s	genelleştirilmiş klimatolojik stabilitet fonksiyonu
τ_λ	spektral geçirgenlik
τ_{PAR}	PAR geçirgenlik
τ_{NIR}	NIR geçirgenlik
$\tau(z)$	kayma gerilmesi ($N m^{-2}$), momentum transferi ($N m^{-2}$)
$\tau(x,z)$	efektif geçirgenlik katsayısı
θ_-	direkt zenit açısı
θ_n	diffuz zenit açısı
θ_L	yaprak zenit açısı
θ_s	güneş zenit açısı
θ_-^*	$ OP $ ile $ OQ $ arasındaki açı
σ_h	dikey yoğunluk fonksiyonunun standart sapması (m)
σ	Stephan Boltzman sabiti ($W m^{-2} K^{-4}$)
ρ_λ	spektral yansıtkanlık
ρ_{PAR}	PAR yansıtkanlık
ρ_{NIR}	NIR yansıtkanlık
ρ_A	havanın yoğunluğu ($kg m^{-3}$)
ρ_L	yaprağın hacim ağırlığı ($kg m^{-3}$)
ρ_F	toplak yüzeyinin SWR yansıtkanlığı
χ_L	yaprak eğim indeksi
ψ	genelleştirilmiş yoğunluk fonksiyonu ($J m^{-3}$, $kg m^{-3}$)
$[\psi]$	çözüm vektörü
η_c	CO_2 için yaprak yüzey faktörü
η_t	ısı transferi ve su buharı taşınımı yaprak yüzey faktörü
v	kinematik viskozite ($m^2 s^{-1}$)
ω	saat açısı
\mathfrak{R}	doygun buhar basıncı eğrisinin eğimi ($Pa K^{-1}$)

alt indisler

-	direkt
~	boyutsuz
≈	diffuz
∞	yayılan
*	doygun, referans konum
**	* gözlem noktası üstü referans konum
↓	aşağı yönde
↑	yukarı yönde
A	aerodinamik, hava, izotermal
c	cam, CO ₂
F	toplak, sera tabanı
H	İSİ
L	yaprak, yaprak yüzeyi, ışıl radyasyon
LL	yapraklar arası
LWR	uzun dalgalı radyasyon
m	mezofil
M	momentum , metabolik, kütle
N	net
NIR	yakın kızıl ötesi radyasyon
o	dış, atmosferik
PAR	fotosentez etkili radyasyon
R	radyasyon transferi, net radyasyon
s	depolama, doygun, gökyüzü
S	stomata
ST	kloroplast stroması
SWR	kısa dalgalı radyasyon
w	su buharı taşınımı
Y	kuzey
§	genelleştirilmiş notasyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sera makrokliması fiziksel modeli.....	3
Şekil 1.2. Sera mikrokliması fiziksel modeli.....	3
Şekil 1.3. Modelleme işleminin karakteristikleri	4
Şekil 2.1. Bitki yaprağının yansıtma, soğurma ve geçirme spektral dağılımı ...	8
Şekil 2.2. Hareketli havadan duran yüzeye olan momentum transferi.....	10
Şekil 2.3. Durgun sıcak havadan soğuk yüzeye olan ısı transferi.....	11
Şekil 2.4. Nemli havadan gözenekli yüzeye olan buhar transferi.....	12
Şekil 2.5.Zamanla değişen moleküller taşınım teorisi	13
Şekil 2.6. Ohm yasası direnç benzeşimi	14
Şekil 2.7. Konveksiyon modu ve akış tipini belirleyen akış şeması.....	17
Şekil 2.8. Stomatal model ile kütle transfer mekanizması	18
Şekil 4.1. TZDK Agroser tipi deneme serası	25
Şekil 4.2. Bitki mimarisini tanımlayan yaprak parametreleri	26
Şekil 4.3. Sera içi ve dışı modüler ölçüm seti	27
Şekil 4.4. Deney standı ve sensör konumları	29
Şekil 4.5. Kaye Instruments Digistrip II digital veri toplama sistemi	30
Şekil 4.6. Kızgın telli anemometre, CO_2 anlizörü ve veri toplama sistemine olan tüm bağlantılar	31
Şekil 4.7. Deney standı elektriksel iletişim kablolarının veri toplama sistemine bağlanması	31
Şekil 4.8. Omega OS-2000A infrared pirometresi ile yaprak yüzey sıcaklığının ölçülmesi	32
Şekil 4.9. Bitki standı modeli	35
Şekil 4.10. Yaprağın azimut (ϕ_L) ve zenit (θ_L) açıları	38
Şekil 4.11. $dxdydz$ diferansiyel hacmindeki direkt güneş radyasyonu transferi	39
Şekil 4.12. Direkt güneş radyasyonu modeli	41
Şekil 4.13. Diffuz güneş radyasyonu modeli	42
Şekil 4.14. θ ve ϕ ile $d\omega$ arasındaki ilişki	42
Şekil 4.15. Bitki standının (x^*, y^*) noktası için uzun dalgalı radyasyon modeli...	47
Şekil 4.16. Bitki standı diferansiyel tabakasına ilişkin enerji dengesi.....	48
Şekil 4.17. Havanın enerji dengesi	49
Şekil 4.18. Yaprak yüzeyinden konveksiyonla ısı transferi direnç benzeşimi	50
Şekil 4.19. Toprak yüzeyinden konveksiyonla ısı transferi direnç benzeşimi....	51
Şekil 4.20. Yapraktan transpirasyonla olan ısı transferi direnç benzeşimi.....	52
Şekil 4.21. Toprak yüzeyinden evaporasyonla olan ısı transferi direnç benzeşimi	54
Şekil 4.22. Su buharı ve CO_2 dengesi	55
Şekil 4.23. Yaprağın su buharı taşınımına ilişkin direnç benzeşimi	56

Şekil 4.24. Yaprak karboksilasyon katında CO_2 taşınımına ilişkin direnç benzeşimi	58
Şekil 4.25. Sayısal integrasyon kuralı	62
Şekil 4.26. Çözüm ve tanım alanının çalışma şeması	64
Şekil 4.27. Bitki profili ile zaman profili için düğüm noktaları	64
Şekil 4.28. Program tasarım aşamaları	68
Şekil 5.1. Bitki standı üstünde ölçülen hava sıcaklığı rejimi	69
Şekil 5.2. Bitki standında hesaplanan T_A günlük değişimi ve trend analizi.....	70
Şekil 5.3 $z=1.0$ m'de T_A rejimi ve $T_{A,S}$ ve $T_{A,O}$ için trend analizi.....	71
Şekil 5.4. Ortalama T_A rejimi ve trend analizi	71
Şekil 5.5. T_A hava sıcaklığı profili	72
Şekil 5.6. Bitki standında yaprak sıcaklığı rejimi ve trend analizi.....	73
Şekil 5.7. $z=1.0$ m'de T_L rejimi ve trend analizi	74
Şekil 5.8. Ortalama T_L rejimi ve trend analizi	74
Şekil 5.9. T_L yaprak sıcaklığı profili	75
Şekil 5.10. Bitki üstü T_A ile ortalama T_L'nin ve T_A'nın günlük değişimi	75
Şekil 5.11. Yaprak ve hava sıcaklıklarının simüle edilen dikey profilleri	76
Şekil 5.12. Bitki örtüsü üstünde ölçülen ve bitki standında simüle edilen bağıl nem rejimi	76
Şekil 5.13. Ölçülen ve simüle edilen ortalama bağıl nem rejimi ve trend analizi	77
Şekil 5.14. Bağıl nem profili	78
Şekil 5.15. Bitki örtüsü üstünde ölçülen ve stand içinde hesaplanan CO_2 konsantrasyonu rejimi	78
Şekil 5.16. Ölçülen-simüle edilen CO_2 konsantrasyonu rejimi ve trend analizi ..	79
Şekil 5.17. CO_2 konsantrasyonu profili	79
Şekil 5.18. Bitki örtüsü üstünde ölçülen ve stand içinde hesaplanan hava hızı rejimleri.....	80
Şekil 5.19. Ölçülen-simüle edilen hava hızı rejimi ve trend analizi	81
Şekil 5.20. Hava hızı profili	81
Şekil 5.21. Bitki standında Re sayısının günlük değişimi ve Re profili	82
Şekil 5.22. Bitki standında $In(Gr)$ sayısının günlük değişimi ve $In(Gr)$ profili	83
Şekil 5.23. $GrRe^{-2}$ nin günlük değişimi ve $GrRe^{-2}$ profili	83
Şekil 5.24. Pr, Sc_w ve Sc_c sayılarının günlük değişimi	84
Şekil 5.25. Bitki standında Le_w ve Le_c sayılarının günlük değişimi	84
Şekil 5.26. Bitki standında Nu, Sh_w ve Sh_c sayılarının günlük değişimi	85
Şekil 5.27. Nu sayısı profili	85
Şekil 5.28. Sh_w sayısı profili	86
Şekil 5.29. Sh_c sayısı profili.....	86

Şekil 5.30. Ri sayısının günlük değişimi	87
Şekil 5.31. Ri sayısı profili	87
Şekil 5.32. r_{AH} , r_{AW} ve r_{AC} aerodinamik dirençleri rejimi	88
Şekil 5.33. r_{AH} direnç profili	89
Şekil 5.34. r_{AW} direnç profili	89
Şekil 5.35. r_{AC} direnç profili	89
Şekil 5.36. h_H , h_W ve h_C aerodinamik film katsayılarının değişimi	90
Şekil 5.37. h_H aerodinamik film katsayıları profili	91
Şekil 5.38. h_W aerodinamik film katsayıları profili	91
Şekil 5.39. h_C aerodinamik film katsayıları profili	91
Şekil 5.40. r_{SW} ve r_{SC} stomatal dirençlerin günlük değişimi.....	92
Şekil 5.41. r_{SW} direnç profili	92
Şekil 5.42. r_{SC} direnç profili	93
Şekil 4.43. Radyasyon transfer direnci ve hava sıcaklığı rejimi	93
Şekil 5.44. Bitki standı üstünde ölçülen I akı yoğunluğu ile stand içinde simüle edilen I akı yoğunluğu rejimi	94
Şekil 5.45. I için trend analizi	95
Şekil 5.46. $z=1.0$ m'de I akı yoğunlukları rejimi	95
Şekil 5.47. Bitki standında I ve P rejimi	96
Şekil 5.48. Bitki standında PAR ve P_{PAR} rejimi	96
Şekil 5.49. Gün ortasında I , I_{\perp} , I_{\parallel} , I_{\downarrow} ve I_{\uparrow} akı yoğunlukları profili	98
Şekil 5.50. Gün ortasında I , I_{PAR} ve I_{NIR} akı yoğunlukları profili	98
Şekil 5.51. Bitki standında dI_{LL} ve I_{LL} akı yoğunluğu rejimi	99
Şekil 5.52. I_{LL} akı yoğunluğu profili.....	100
Şekil 5.53. Bitki standında dQ_R ve Q_R rejimi.....	100
Şekil 5.54. Q_R akı yoğunluğu profili.....	101
Şekil 5.55. Günlük Q_R akı yoğunluğu ile z/h arasındaki ilişki	101
Şekil 5.56. Bitki standında $dQ_{R,A}$ ve $Q_{R,A}$ akı yoğunluğu rejimi	102
Şekil 5.57. $Q_{R,A}$ akı yoğunluğu profili.....	103
Şekil 5.58. Bitki standında etkili olan dQ_{HL} ve Q_{HL} akı yoğunluğu rejimi	104
Şekil 5.59. Q_{HL} akı yoğunluğu profili, a)gündüz, b)gece	104
Şekil 5.60. Q_{HF} akı yoğunluğu rejimi	105
Şekil 5.61. dQ_{WL} ve Q_{WL} akı yoğunlukları rejimi	105
Şekil 5.62. Q_{WL} akı yoğunluğu profilleri	106
Şekil 5.63. Q_{WL} ve Q_R akı yoğunlukları rejimi ve Q_{WL} - Q_R ilişkisi	106
Şekil 5.64. Q_{WF} ve Q_{WL} akı yoğunlukları ile Q_{WF} - Q_R arasındaki ilişki	107
Şekil 5.65. dQ_M ve Q_M akı yoğunlukları rejimi	108
Şekil 5.66. Q_M akı yoğunlukları profilleri.....	108
Şekil 5.67. dW_L ve W_L 'nin günlük değişimi.....	110
Şekil 5.68. W_L profili	110

Şekil 5.69 Q_R ve W_L 'nın günlük değişimi, W_L ve Q_R arasındaki ilişki.....	111
Şekil 5.70. W_L transpirasyon hızı ve W_F evaporasyon hızı rejimi.....	112
Şekil 5.71. Q_R ve W_F 'nın günlük değişimi ile $Q_R - W_F$ için trend analizi.....	112
Şekil 5.72. Bitki standında dP_N ve P_N net fotosentez hızı rejimleri	113
Şekil 5.73. P_N profili	113
Şekil 5.74. P ve I_{PAR} arasındaki ilişki	114
Şekil 6.1. Bitki standında güneş radyasyonu rejimi ve yaprak sıcaklığı rejimi ..	115
Şekil 6.2. Re sayısı ile hava hızı arasındaki doğrusal ilişki	117
Şekil 6.3. Aerodinamik direçler ile hava hızı arasındaki ilişkiler	118
Şekil 6.4. Tüm bitki standında enerji bileşenleri	118
Şekil 6.5. Günlük su buharı değişim rejimi	119
Şekil 6.6. Günlük CO_2 değişim rejimi	119
Şekil 6.7. Bitki standında mikroklimatolojik direncin günlük değişimi	120
Şekil 6.8. Mikroklimatolojik direnç profili	121
Şekil 6.9. r^* , a ve b koşullarının değişimi; a) $z=0.1$ m, b) $z=1.9$ m	122

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelgel 2.1. Ortalama yeşil yaprakların kısa dalgalı radyasyon özellikleri.....	8
Çizelge 2.2. Direkt, diffuz güneş radyasyonu, PAR dönüşüm indeksleri.....	9
Çizelge 2.3. Momentum, ısı ve kütle transferi akı yoğunluklarının direnç benzeşimi	14
Çizelge 2.4. Momentum ve ısı transferine ilişkin boyutsuz sayılar	15
Çizelge 2.5. Kütle transferine ilişkin boyutsuz sayılar	16
Çizelge 2.6. Hava, su buharı ve CO ₂ 'e ilişkin fiziksel özellikler	17
Çizelge 4.1. TZDK Agroser tipi deneme serasının teknik özellikleri.....	25
Çizelge 4.2. HM41.F1 varyetesi hıyar bitkisinin kronolojisi.....	26
Çizelge 4.3. Ölçülen klimatalojik değişkenler, algılayıcılar ve özellikleri.....	27
Çizelge 4.4. Kaye Instruments Digistrip II dijital veri toplama sisteminin özellikleri.....	30
Çizelge 4.5. Modelde kullanılan sabit girdiler	33
Çizelge 5.1. Hava sıcaklığı için trend analizi sonuçları	70
Çizelge 5.2. Hava sıcaklığı için seçilen model sonuçlarının değerlendirilmesi...	71
Çizelge 5.3. Hava sıcaklığı için trend analizi sonuçları	73
Çizelge 5.4. Yaprak sıcaklığı için seçilen model sonuçlarının değerlendirilmesi	73
Çizelge 5.5. Bitki standında bağıl nem değişimi	77
Çizelge 5.6. Bitki standında CO ₂ konsantrasyonu değişimi	77
Çizelge 5.7. Bitki standında hava hızlarının değişimi	80
Çizelge 5.8. Bitki standında Re sayısının değişimi	82
Çizelge 5.9. Bitki standında GrRe ⁻² indeksinin değişimi	83
Çizelge 5.10. Bitki standında Nu ve Sh sayısının değişimi	86
Çizelge 5.11. Bitki standında St sayılarının değişimi	87
Çizelge 5.12. Bitki standında Ri sayısının değişimi	87
Çizelge 5.13. Bitki standında aerodinamik dirençlerin değişimi	88
Çizelge 5.14. Bitki standında film katsayılarının değişimi	91
Çizelge 5.15. Ortalama boyutsuz sayılar ile film katsayıları arasındaki fonksiyonel ilişkiler	92
Çizelge 5.16. Bitki standında stomatal dirençlerin değişimi	93
Çizelge 5.17. Bitki standında güneş radyasyonu akı yoğunluğunun değişimi ...	96
Çizelge 5.18. Bitki standında penetrasyon oranlarının değişimi	97
Çizelge 5.19. Bitki standında direkt, diffuz, aşağı doğru yayılan ve yukarı doğru yansyan ile PAR ve NIR oranları.....	97

Çizelge 5.20. Bitki standında ıslı radyasyon akı yoğunluğunun değişimi	99
Çizelge 5.21. Net radyasyon akı yoğunluğu ile net radyasyon indeksinin değişimi.....	101
Çizelge 5.22. Bitki standında izotermal net radyasyon akı yoğunluğunun değişimi	102
Çizelge 5.23. Bitki standında konveksiyonla ısı transferi akı yoğunluğunun değişimi	104
Çizelge 5.24. Bitki standında transpirasyonel ısı transferi akı yoğunluğunun değişimi	106
Çizelge 5.25. Q_{WL} ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler.....	107
Çizelge 5.26. Bitki standında metabolik ısı transferi akı yoğunluğunun değişimi	108
Çizelge 5.27. Q_M ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler	109
Çizelge 5.28. Transpirasyon hızının değişimi	110
Çizelge 5.29. W_L ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler	111
Çizelge 5.30. P, R ve P_N 'nin değişimi.....	113
Çizelge 5.31. Net fotosentez ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler	114
Çizelge 5.32. CO_2 taşınım işlemleri ile I_{PAR} ve Q_R arasındaki ilişki	114
Çizelge 6.1. Aerodinamik dirençler ile hava hızı arasındaki ilişkiler	117
Çizelge 6.2. Bitki standında mikroklimatolojik direcin değişimi	121
Çizelge 6.3. Modelin test edilmesine ilişkin bazı istatistiksel parametreler	122
Çizelge 6.4. Sera mikrokliması karar parametreleri	125

1. GİRİŞ

Sera, bitkisel üretimin iyileştirilmiş çevresel koşullarda gerçekleştirildiği ışık geçirgen bir yapıdır. Bitki büyümesi ve gelişimini etkileyen çevresel faktörlerin kontrol edilmesinde kullanılan bio-mühendislik uygulamaları sera tarımının gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu şekilde gündeme kalan sera tarımı, endüstriyel etkinlik kazanan üretim potansiyeline sahiptir. Sera endüstrisinin ekonomik faydaları, bitkisel üretim ve üretim maliyeti arasındaki dengelere bağlıdır. Bu nedenle, sera kimasının yönlendirilmesi ve üretimi garanti altına almak için, eldeki kaynakları rasyonel kullanmak gerekmektedir. Bu amaçla ürünlerin niteliğini iyileştirmek, niceliğini artırmak hem üreticiler hem de bilim adamları için önemli parametrelerden bazlılardır.

Türkiye genelinde 1991 verilerine göre, alçak ve yüksek tüneller dışında cam ve plastik örtülü sera alanı 87310 dekarıdır. Bunun % 23.7'si cam ve % 76.3'ü plastik örtülüdür. Ülkemizde en yoğun seracılık Antalya yöresinde yapılmakta olup, cam ve plastik sera alanı 60605 dekarıdır (Aybak 1992). Türkiye'de varolan seraların hemen hemen tamamına yakın bölümü modern anlamda bir ısıtma ve havalandırma sistemine sahip değildir. Bu nedenle, üretici sürekli olarak sıcaklık değişimlerini izleyerek önlem almak zorundadır. Seralarda klimatolojik koşulları kontrol eden cihazların kullanımı sayesinde ürünlerin kalitesi ve verimliliği yükselecektir. Ekonomik ve teknolojik gelişme birbirinden ayrı düşünülemez. Teknolojik gelişme ancak kazancın sürekliliği ile gerçekleşir. Seracılığın yayılması da temelde üretimden elde edilen kazancın çekiciliğine bağlıdır.

Sera içinde bitkiyi çevreleyen hava ile ilgili en önemli faktörler güneş radyasyonu, sıcaklık, nem, hava hareketi ve havanın CO₂ içeriği olup; tüm bu faktörlerin bitki gelişimi üzerindeki etkilerini birbirinden ayrı düşünmek oldukça güçtür. Klimayı oluşturan bu faktörlerin kontrolunda, bitki için uygun yetişirme seviyelerinin belirlenmesi ve uygun yetişirme seviyelerine göre klimanın kontrol altına alınması önemli sorunlar arasında yer alır.

Fiziksel bakış açısından göre, modern bir sera, bioreaktör olarak kabul edilebilir. Bu bioreaktörlerde girdi olarak CO₂ ve sudan, satılabilir bir ürün olarak bitki üretilir. Bioreaktörün genel hareket mekanizması güneş radyasyonudur. "Reaktör" deki çevresel faktörler seti sera kliması olarak tanımlanır (Bot 1993).

1. 1. Makroklima ve Mikroklima Kavramı

Sera kliması radyasyon, sıcaklık, nem, hava hızı, CO₂ konsantrasyonu gibi çevresel faktörlerin etkisi altında olup; bitki büyümesi ve gelişimini yönlendirir. Sera makrokliması sera içinde, bitki örtüsü üzerinde bir ya da bir kaç konumdaki fiziksel değişkenlerin hacimsel ortalama değerleriyle gösterilir ve bu değerlere göre kontrol edilen klima olarak tanımlanır. Sera makrokliması üzerindeki araştırmalar bitki çevresini iyileştirmek için yapılmıştır.

Serada bitki örtüsü içindeki klimatolojik faktörler mevsimlik, günlük değişimler göstermektedir. Özellikle bitki örtüsü içindeki fiziksel büyüklüklerden oluşan klima sera mikrokliması (sera biokliması) olarak tanımlanır. Sera mikrokliması bitki metabolik aktivitelerini ve üretimi etkiler. Yapraklar, toprak yüzeyi, saydam örtü ya da ısıtma boruları arasında oluşan

değişim işlemleri, her yüzeyin fiziksel koşullarına göre belirlenir. Klimatolojik değişkenler, sera içinde homojen olmadığı için "mikroklima" kavramı sera çevresi araştırmalarında çok önemlidir. Sera mikrokliması yalnız sera makroklimasından etkilenmez; aynı zamanda bitki elemanları fiziksel ortam değişimlerinden de etkilenir. Sera mikrokliması araştırmalarının temel amacı, ortam içindeki enerji ve kütte taşınım işlemlerinin hava-bitki-diğer yüzeyler arasındaki değişim işlemlerini ve çevresel faktörlere cevap veren fizyolojik işlemleri nicel olarak tanımlamaktır (Yang et al 1989).

Taşınım işlemleri konveksiyon mekanizmasıyla gerçekleşen enerji ve kütte transferi olarak tanımlanır. Sera içinde enerji, subuharı ve CO₂ akışı en önemli taşınım işlemleridir. Sera havası gibi hareketli bir ortamda taşınım işlemleri genellikle difüzyonla gerçekleşir.

Sera havasının termodinamik sistem sınırları içinde aşağıdaki enerji ve kütte değişim işlemleri oluşur:

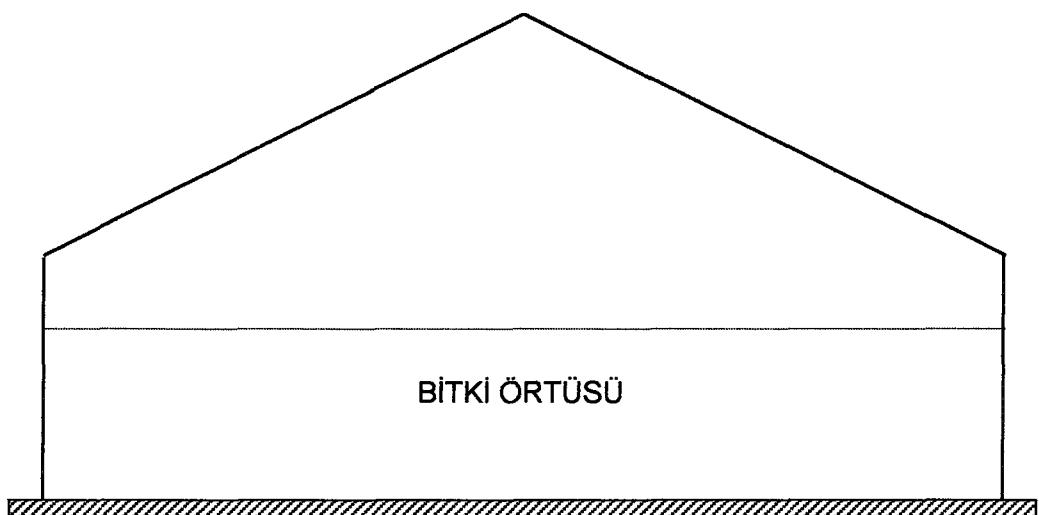
- konveksiyonla ısı transferi,
- transpirasyon ve evaporasyonla olan ısı transferi,
- yapraklardan olan transpirasyon ve topraktan olan evaporasyon,
- fotosentezle özümlenen CO₂,
- solunumla serbest bırakılan CO₂.

Klimatolojik değişkenlere ilişkin bitki tepkileri fizikseldeden çok fizyolojik karakter taşımaktadır. Mikroklima araştırmalarında bitkinin fizyolojik özellikleri anlam kazanır. Sera mikro-çevresindeki subuharı ve CO₂ konsantrasyonlarının değişimleri fizyolojik olarak stomatal açılma ile tanımlanır.

Sera kliması simülasyonları temelde, fiziksel model organizasyonlarına göre düzenlenir. Makroklima ve mikroklima çalışmaları, kavramsal olarak teorik tanımlara dayalı fiziksel modeller bazında birbirinden ayrılır. Makro ölçekte sera bitki örtüsü "büyük yaprak modeli" ne göre tasarlanır. Sera içinde "hareketli hava zarfı" ile bitki örtüsünü (büyük bir yaprak) çevreleyen koşullar makroklimayı karakterize eden doğal çıktıları tanımlar. Makroklima araştırmalarında şekil 1.1' de gösterilen fiziksel model kullanılır. Sera bitki örtüsü için dikey yönde mikroklima modeli bitki örtüsünün sırasal yapısına göre belirlenir (Bot 1983).

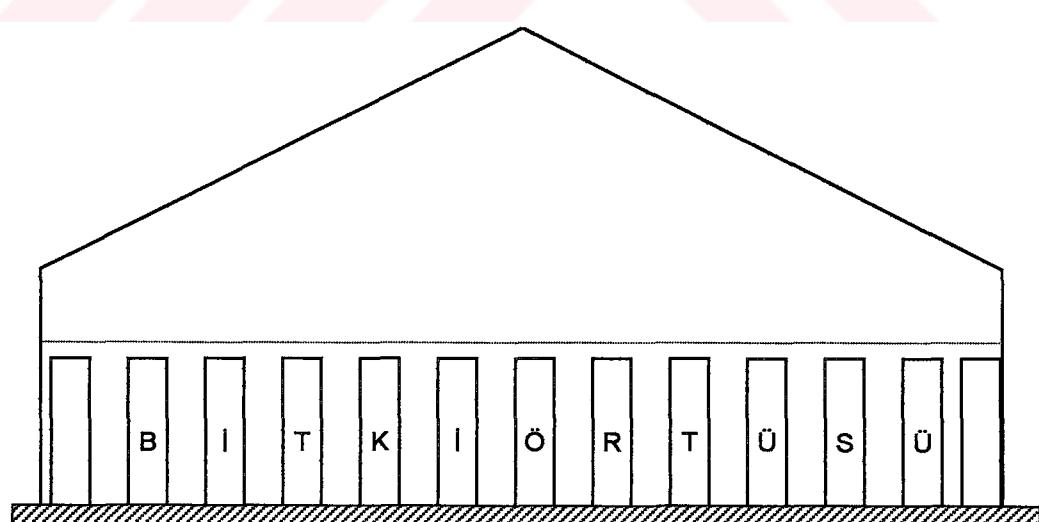
Mikro ölçekte sera iklimini tanımlayabilmek için yerel fiziksel değişkenlerin tahminine olanak sağlayan yeni bir fiziksel model oluşturulmalıdır. Karışık desenleri ya da dağılımları sınırlayarak tek bir yaprak için fiziksel model ortaya koymak gerçekçi olmaz. Teorik hesaplamalar içinde bu yaklaşımın etkisi görülmeyebilir. Makroklima modelinin bir bütün olması fiziksel olarak süreklilik sağlar; ancak teorik olarak ideal değildir. Mikroklima modeli, yatay yönde homojen olan ortalama değerlere göre makroklima modelinden yararlanır. Mikroklima modelinde bitki örtüsü içindeki geometriye dayalı olarak klimatolojik göstergelerin fonksiyonel davranışları araştırılır (Mahrer and Avissar 1984).

Ross'a (1989) göre, bitki toplulukları mimarisi bitki elemanlarının şekli, boyutu, geometrisi, dış yapısı ve yönsel dağılımlarıyla tanımlanan özelliklere göre belirlenir. Bitki topluluğu mimarisinin tanımlanması, fitoaktinometrede hem hacimsel hem de zamansal olarak bitki yapısındaki değişimler nedeniyle en zor belirlenen problemlerden birisidir. Yaşayan bir organizma olan bitki bir bütündür; kendi kendini ayarlayan bir biosistemdir (Myineni et al 1989).



Şekil 1.1 Sera makrokliması fiziksel modeli

Sera bitki örtüsü için tek ya da iki boyutlu mikroklima modellerinin kurulabilmesi için bitki mimarisini tanımlayan fiziksel yapının bilinmesi gereklidir. Bu nedenle, öncelikli olarak, sera içinde sırada bulunan bitki elemanları, paralel sıralı diziler olarak kabul edilir (Şekil 1.2). Hem bitki mimari parametreleri hem de bitki içindeki değişkenler hacimsel değişkenler olarak alınırlar. Bitki örtüsü terimi yalnız bitki elemanlarını değil, aynı zamanda çevresindeki hava hacmini de içerir. Modelleme aşamasında seradaki bitki elemanlarının yatay olarak homojen yayıldığı ya da periyodik dağılım gösterdiği varsayılar (Yang et al 1990b, Sinoquet and Bonhomme 1992).



Şekil 1.2 Sera mikrokliması fiziksel modeli

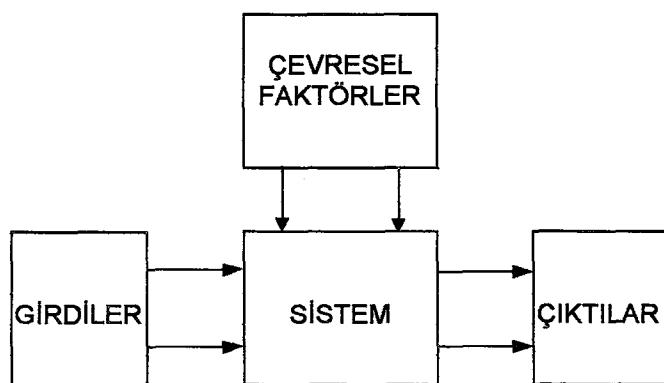
1. 2. Modelleme Tekniği ve Simülasyon Kavramı

Model, bir problemin analizinde gerçek ile sanal ortam arasında iletişim kurulmasını sağlayan bir araçtır. Modeller genellikle gerçek sistemleri tanımlayan ya da tahmin eden farklı bakış açılarına göre hazırlanabilir. Her iki yaklaşım tekniğini kullanarak, gerçek boyutun ideal sanal boyuta taşınması amaçlanır. Modelleme ise, fiziksel ya da matematiksel formda sistemin/sistem elemanlarının gösterimidir.

Matematiksel modeller gerçek sistemin bileşenlerini, işlem aşamalarını ve denge eşitliklerini diferansiyel, integral, mantıksal ilişkiler ile grafiklerden ve çizelgelerden doğrudan tanımlayan modellerdir. Matematiksel modellemede bir sistemin bileşenleri, davranışları matematiksel denklemlerle tanımlanan ve gerçek bileşenlerin temel karakteristiklerine sahip olan en uygun simge ve terimlerle gösterilir (Bell et al 1992).

Bir sistem ya da sistem bileşeni için matematiksel modelin genel gösterimi şekil 1.3 'de verilmiştir. Modellemenin sistemin seçimi, modelin başarısında önemli bir faktördür. Mühendislik sistemleri oldukça karmaşıktır. Bu sistemlerin basit bileşenlere ayrılarak, bileşenler arası karşılıklı etkileşimleri sağlanmalıdır. Şekil 1.3 'de gösterildiği gibi, bu nicelikler girdi ve çıktı parametreleri halinde gruplandırılır. Farklı fiziksel niceliklerin uygun fiziksel yasalar aracılığıyla bir diğeryle ilişkisi kurulur. Tasarlanan çıktıları elde etmek için, modelin girdi modu uygun şekilde düzenlenir. Girdileri amaca uygun çıktılar biçimine dönüştüren ilişkiye "transfer fonksiyonu" adı verilir. Transfer fonksiyonu cebirsel, diferansiyel ve integral denklemleri formunda olabilir. Analitik, sayısal ve grafiksel çözüm yöntemlerine göre, bu denklemlerin çözümü, modelleme işleminin son aşamasıdır (Dieter 1991).

Simülasyon, hazırlanan modelin işletilmesidir. Geliştirilen modellerin kontrol edilmesinde ve çalıştırılmasında bilgisayarlardan yararlanılmaktadır. Çözüm için sayısal yöntemlerin kullanımı ve modelin bireysel aşamalarını test eden iteratif işlemlerin bilgisayar aracılığıyla son derece kolaylaşması bilgisayar simülasyon tekniklerinin gelişmesini sağlamıştır. Simülasyon sürecinde, karmaşık matematiksel yaklaşımları kullanan ideal modeller için görsellik-dış ortam iletişimini büyük üstünlükler sağlar (Dieter 1991).



Şekil 1.3. Modelleme işleminin karakteristikleri (Dieter 1991)

1. 3. Çalışmanın Amacı ve İçeriği

Sera işletmeciliği açısından, sera çevresinin optimum kontrolü ve sera olanaklarının yeterince kullanımı, sürekli kılınacak bir verim için temel faktördür. Seralarda elde olunan ürünün nitelik ve niceliği, sera mikro-çevresinin düzenlenmesi açısından önemlidir. Klasik yaklaşımına göre, klimatolojik faktörlerin ortalama değerleri makroklimayı karakterize eder. Ancak, sera içinde bitki mimarisi ve klimatolojik değişkenler homojen değildir; ortalama değerlerle tanımlanamazlar. Bu nedenle, bir serada yetişen bitkilere ilişkin ısı ve kütle transfer karakteristiklerinin belirlenmesinde mikroklima kavramından yararlanılmaktadır. Sera mikrokliması, hem sera makroklimasından hem de fiziksel ortam değişkenlerinden olan bitki örtüsü mimarisinden ve ısisal koşullardan etkilenir. Günümüzde klimatolojide ve meteorolojide yaygın olarak kullanılan temel fiziksel ve fizyolojik prensipleri uygulayarak, sera mikroklimasına yönelik ısı ve kütle transfer işlemlerini tanımlamak yeni bir aşama olarak kabul edilmektedir. Sera mikroklimasının ısıl ve kütlesel karakteristiklerinin belirlenmesi, en uygun sera tasarımlı için yol göstermekte, bitki tepkimelerinin anlaşılması ile birlikte bitki üretim stratejisinin ortaya konulmasında yardımcı olmaktadır.

Araştırmalar, bitkileri etkileyen zararlı popülasyonunun ve hastalık yapan sporların oluşumunun, bağıl nem ve sıcaklık gibi mikroklimatolojik değişkenlerle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymustur. Bu açıdan da mikroklima ve bitkiler arası ilişkilerin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Bitkiye ilişkin temel geometrik parametrelerden biri olan yaprak alan indeksi ve ortalama yaprak boyutu, enerji ve kütle transfer işlemlerini büyük ölçüde etkilemektedir.

Bitki örtüsü üzerindeki güneş radyasyonu yoğunluğu, enerji dengesinin temel bir bileşeni olmakla kalmayıp, aynı zamanda çoğu transfer işlemlerini etkilemektedir. Fotosentez etkili radyasyon (PAR), bitki büyümesi için temel faktördür. Bu nedenle, bitki mikrokliması araştırmaları için bitki içindeki güneş radyasyonunun ayrıntılı ve doğru tanımlanması önemlidir. Ayrıca, yaprak alanı yoğunluk fonksiyonlarından yararlanarak, bir diferansiyel hacimdeki güneş radyasyonu değişiminin modellenebilmesi de bir yeniliktir. Bitki standına gelen güneş radyasyonu akı yoğunluğunun fonksiyonu olarak bitki stomatal direnç değişimlerinin belirlenmesi de bir başka sorundur. Stomatal direnç ile yaprak sıcaklığı arasındaki ilişkilere göre, transpirasyon ve fotosentez gibi bitki fizyolojik işlemlerinin belirlenmesi olanaklıdır.

Bu çalışmanın amacı, sera mikrokliması için zamanla değişen enerji ve kütle transfer işlemlerini tanımlayan bir model geliştirmek; bitki ile mikroçevresi arasında etkili olan fiziksel ve fizyolojik büyüklüklerin değişimi ile mikroklimatolojik cevap mekanizmalarını kullanarak bitki davranışını araştırmaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2. 1. Güneş – Yerküre Arasındaki Fiziksel İlişkiler

2. 1. 1. Güneş açıları

Yerkürenin güneş etrafında ve kendi ekseni etrafında olmak üzere iki değişik hareket yaptığı bilinmektedir. Yeryüzeyine gelen güneş ışınımının belirlenmesinde dünyaya göre güneşin hareketi incelenir. Güneşin konumu ve yerküreye göre güneşin bağılı hareketi güneş açıları ile saptanır.

Yeryüzeyinde enlemi bilinen bir noktaya düşen güneş ışınımının doğrultusu deklinasyon açısı ve saat açısıyla belirlenebilir. Yerkürenin güneş etrafındaki yörunge düzleminin normali ile kendi dönüş eksenleri arasında 23.45° lik bir açı söz konusudur. Deklinasyon açısı yılın gün sayısına göre aşağıdaki ilişkiye belirlenebilir (Rosenberg et al 1983):

$$\delta = 23.45 \cos\left[\frac{2\pi(d - 172)}{365}\right] \quad (2.1)$$

Saat açısı, gözönüne alınan yerin boylamı ile güneşin bulunduğu boylam arasındaki açıdır. Saat açısı güneş boylamının ele alınan yerin boylamı ile çakıştığı güneş öğleninden itibaren ölçülür; güneş öğleninden önce pozitif, sonra negatif alınır. Yerküre sabit bir oranda döner; her 15° lik saat açısı (boylam farkı) 1 saat zamana karşılık gelir. Genellikle güneş ışınımları ölçümleri ve hesaplamaları güneş zamanına göre yapılır. Buna göre, saat açısı;

$$\omega = 15 \left[12 - \left(t_L + t_e + \frac{\Delta B}{15} \right) \right] \quad (2.2)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir (Söderström and Magnusson 1995). Bu eşitlikte, t_L yerel zaman, ΔB standart boylam ile yerel boylam arasındaki fark ve t_e zaman denklemi için

$$t_e = 0.000075 + 0.001868 \cos(\Lambda) - 0.032077 \sin(\Lambda) - 0.014615 \cos(2\Lambda) - 0.040849 \sin(2\Lambda) \quad (2.3)$$

eşitliği kullanılır (Kamada and Flochini 1986). Burada, Λ terimi gün açısıdır:

$$\Lambda = \frac{2\pi(d - 1)}{365} \quad (2.4)$$

Burada, d yılın 1 Ocaktan itibaren gün sayısıdır.

Yerküre üzerindeki yatay düzlemin normali ile direkt güneş ışınları arasındaki açı güneş zenit açısı olup; hesaplamalarda aşağıdaki eşitlik kullanılır (Taşdemiroğlu 1990):

$$\cos \theta_s = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.5)$$

Güneş ışınlarının yatay düzlemdeki izdüşümü ile kuzey - güney doğrultusu arasındaki açı güneş azimut açısı olarak tanımlanır (Söderström and Magnusson 1995):

$$\cos \varphi_s = [\cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos \omega] / \sin \theta_s \quad \omega \geq 0 \quad (2.6)$$

$$\cos \varphi_s = 2\pi - [\cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos \omega] / \sin \theta_s \quad \omega < 0 \quad (2.7)$$

Bu eşitliklerde, ϕ enlem derecesi, δ deklinasyon açısı ve ω saat açısıdır.

2. 1. 2. Atmosfer dışı ışınım

Atmosfer dışında yerküreye paralel olan bir düzleme gelen ışına aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Vazquez et al 1991):

$$I_e = I_{sc} E_f \cos \theta_s \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte, I_{sc} güneş sabiti, E_f yörungesel eksantrikliğe ilişkin düzeltme faktörü ve θ_s güneş zenit açısıdır.

1968-1970 yıllarında atmosfer üzerinde NASA tarafından yapılan ölçümlere göre, güneş sabitinin 1338 ile 1368 Wm^{-2} arasında değiştiği, ağırlıklı ortalamasının da 1353 Wm^{-2} olduğu kabul edilmiştir (Thekaekara 1973). Ancak 1968 – 1980 yılları arasında NASA ve WMO tarafından yapılan değişik ölçümlere göre elde olunan veriler değerlendirilmiş ve 1981 yılından itibaren güneş sabitinin 1367 Wm^{-2} olarak kullanılması tavsiye edilmiştir (Kamada and Flocchini 1986, Vazquez et al 1991).

Yörungesel eksantriklik düzeltme faktörü gün açısının fonksiyonu olarak şu eşitlikle tanımlanabilir (Taşdemiroğlu 1990):

$$E_f = 1 + 0.033 \cos \Lambda \quad (2.9)$$

2. 2. Radyasyon transfer mekanizmaları

Yerküre atmosferi altındaki güneş radyasyonunun spektral dağılımı, $380 < \lambda < 4000 \text{ nm}$ aralığında değişir, alınan enerjinin % 95'i bu aralıktadır. Oda sıcaklığında bir cisimden yayılan enerji, ışıl radyasyon formunda olup; 3000 ve 100000 nm dalga boyu aralığında etkilidir (Oke 1978).

Yapraktan yayılan radyasyon net radyasyon olup, spektral aralıklara göre aşağıda verilen integrasyona göre tanımlanabilir (Stanghellini 1987):

$$Q_R = \int_0^{\infty} [(1 - \tau_{\lambda} - \rho_{\lambda}) I_{\lambda} - \varepsilon_{\lambda} P_{\lambda}] d\lambda \quad (2.10)$$

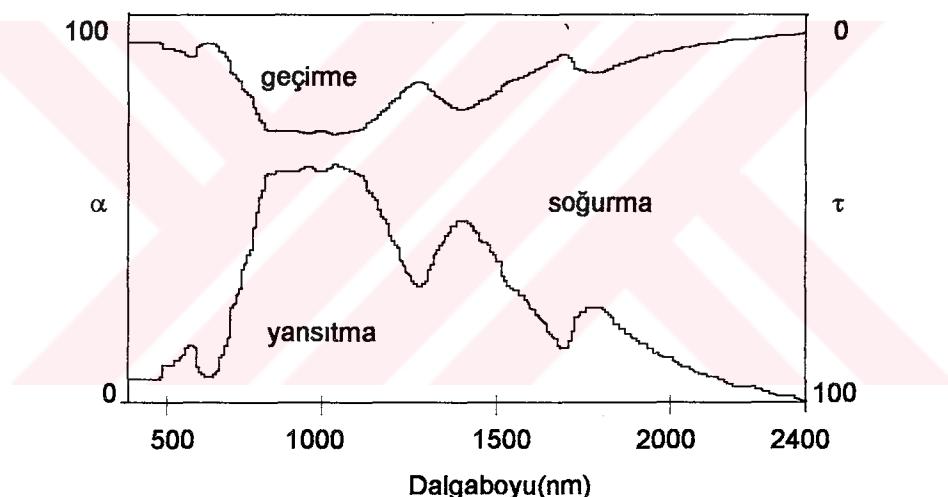
Burada, τ_{λ} yaprağın spektral geçirgenlik katsayısı, ρ_{λ} yaprağın spektral yansıtma katsayısı, I_{λ} yaprak yüzeyindeki spektral ışına ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$), ε_{λ} yaprağın spektral yayınım katsayısı, P_{λ} Planck fonksiyonu ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$), λ dalga boyu (nm) olarak alınır.

Yaprak yüzeyinin kısa dalga optik özellikleri yaprağın spektral soğurma (α_{λ}), geçirme (τ_{λ}) ve yansımıma (ρ_{λ}) katsayıları ile gösterilirse, Kirchhoff yasası şu şekilde tanımlanır (Rosenberg et al 1983):

$$\alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad (2.11)$$

Yapraklar, hücresel yapıları nedeniyle çoğunlukla diffuz yayılma oluşturma eğilimindedir. Bu durum, yapraktan geçen ve tekrar yansyan radyasyonun yaklaşık eşit oranlarda olmasından kaynaklanır ve şekil 2.1'de verilen grafikteki gibi yansımıma ve geçirme eğrilerinin benzer yönelikimle açıklanır. Klorofil ve diğer pigmentler, elektromagnetik spektrumun görünürlük kısmının mavi (400-510 nm) ve kırmızı (610-700 nm) dalga bandlarında etkili olan soğurucularıdır ve

soğurma işleminin % 90'ını bu bandlarda gerçekleştir. Görünür ışığın kırmızı ve mavi ışık bölgeleri, fotosentez için gerekli ışık bandı olup; burada soğurma iyileşir. Bitki büyümesiyle ilgili olan 400-700 nm arasındaki dalga bandı fotosentez etkili radyasyon (PAR) olarak tanımlanır. Bu bölgenin 500-550 nm aralığında yansıtma ve geçirme için dar bir tepe geçiş bölgesi vardır. Yeşil-sarı (480-600 nm) ışık bölgesinde mutlak yansıtma daha fazladır ve insan gözü tarafından algılanlığı gibi çoğu bitki yaprakları yeşil olarak görünür. 700 - 4000 nm dalga bandı aralığında yakın kızıl ötesi radyasyon (NIR) bitkinin çiçeklenme döneminde etkilidir. Ross'a göre, "ortalama" yeşil yaprakların PAR ve NIR spektrumundaki soğurma (α), geçirme (τ), yansıtma (ρ) ve yayılma ($w = \rho + \tau$) katsayıları, çizelge 2.1'de verildiği gibi, farklılıklar göstermektedir. 700 nm'de soğurma keskin şekilde azalır ve sonra kademeli olarak 2500 nm'ye kadar artar. Bu nedenle uzun dalgalı bölgede, yapraklar tüm radyasyonun yaklaşık tamamını soğurur; geçişe izin vermez. Bu dalga boyalarında birincil derecede soğurmayı etkileyen yaprakların içindeki hücre özsuvidur. Bu bölgede yapraklar sürekli bir radyatör gibi davranışları. Bu nedenle yapraklar, uzun dalgalı radyasyonun etkili yayıcıları durumundadır; yayma katsayıları 0.94-0.99 arasında olan gri-kara bir cisim gibi davranışları (Oke 1978, Yang et al 1990a, Ültanır 1992b).



Şekil 2.1. Bitki yaprağının yansıtma, soğurma ve geçirme spektral dağılımı (Oke 1978)

Çizelge 2.1. "Ortalama" yeşil yaprakların kısa dalgalı radyasyon özellikleri (Oke 1978, Ültanır 1992b); PAR : Fotosentez etkili radyasyon,
NIR : Yakın kızıl ötesi radyasyon, SWR : Kısa dalgalı radyasyon

	PAR(400-700 nm)	NIR(700-4000 nm)	SWR(350-3000 nm)
α	0.85	0.15	0.50
ρ	0.09	0.51	0.30
τ	0.06	0.34	0.20
$w = \rho + \tau$	0.15	0.85	0.50

Çizelge 2.1'e göre, tüm kısa dalga bandı için geçirme ve yansıtma katsayıları, PAR ve NIR bileşenlerinin toplamından oluşur :

$$\tau = D_{PAR} \tau_{PAR} + D_{NIR} \tau_{NIR} \quad (2.12)$$

$$\rho = D_{PAR} \rho_{PAR} + D_{NIR} \rho_{NIR} \quad (2.13)$$

Bu eşitlikte verilen PAR ve NIR dönüşüm indeksleri (D_{PAR} ve D_{NIR}) hem atmosferdeki diffuz radyasyonu yüzdesinin hem de güneşin konumunun bir fonksiyonudur. PAR dönüşüm indeksi aşağıdaki eşitlikle tanımlanır (Choudhury 1987):

$$D_{PAR} = \frac{D_s I_s + D_{\perp} I_{\perp}}{I} \quad (2.14)$$

Bu eşitlikte kullanılan direkt ve diffuz güneş radyasyonu PAR dönüşüm indeksleri, çizelge 2.2'den güneş zenit açılarına göre saptanır. I toplam güneş radyasyonu, I_{\perp} direkt güneş radyasyonu, I_s diffuz güneş radyasyonu ağı yoğunluklarıdır. Eşitlik (2.14) diffuz radyasyon indeksine (d_s) göre düzenlenirse aşağıdaki bağıntıya ulaşılır :

$$D_{PAR} = d_s D_s + (1-d_s) D_{\perp} \quad (2.15)$$

Diffuz PAR ve NIR indeksleri de eldeki bağıntılarla türetilibilir (Choudhury 1987):

$$d_{s,PAR} = \frac{D_s d_s}{D_{PAR}} \quad (2.16)$$

$$d_{s,NIR} = \frac{(1 - D_s) d_s}{1 - D_{PAR}} \quad (2.17)$$

Diffuz radyasyon indeksinin saptanmasında atmosferik bulutluluk indeksine göre tanımlanan aşağıdaki eşitlik kullanılabilir (Arinze et al 1986):

$$d_s = \begin{cases} 1 - 0.249 d_o & d_o < 0.35 \\ 1.557 - 1.84 d_o & 0.35 < d_o < 0.75 \\ 0.177 & d_o > 0.75 \end{cases} \quad (2.18)$$

Atmosferik bulutluluk indeksi (d_o), toplam güneş radyasyonunun atmosfer dışı güneş radyasyonu ağı yoğunluğuna oranıdır (Taşdemiroğlu 1990):

$$d_o = \frac{I}{I_e} \quad (2.19)$$

Çizelge 2.2. Direkt ve diffuz güneş radyasyonu PAR dönüşüm indeksleri (Ültanır 1992b)

θ_s	20	30	40	50	60	70	80	85
D_{\perp}	0.43	0.43	0.425	0.42	0.40	0.37	0.28	0.20
D_s	0.76	0.73	0.70	0.67	0.65	0.63	0.62	0.61

2. 3. Moleküler Taşınım İşlemleri

Havadaki moleküler hareket doğada bulunan tüm sıcaklık aralığında yeterince hızlıdır ve bu hareket mikrometeorolojiye temel olan işlemlerden sorumludur. Hareket eden havadaki momentum transferi viskozite fenomeniyle, ısı transferi kondüksiyon işlemiyle ve kütle transferi su buharı, CO_2 ve diğer gazların difüzyonuyla açıklanır. Transferin bu üç formu moleküler hareketin doğrudan bir sonucu olduğundan, bunlar tek boyutlu olarak ele alınacak olan benzer ilişkilerle tanımlanırlar.

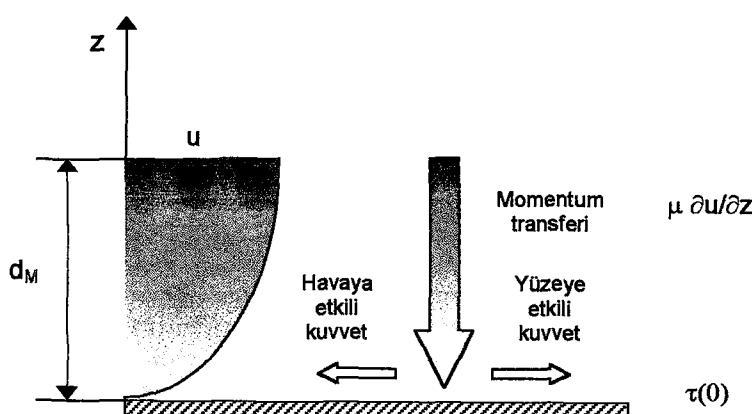
2. 3. 1. Momentum transferi

Katı bir yüzey üzerinden hava akımı geçerken havanın hızı yüzeyden olan uzaklıkla artar. Moleküler karışımının bir sonucu olarak, yatay momentumun dikey değişimine göre komşu yatay tabakalar arasındaki moleküllerin iç değişimini sabit kılar. Şekil 2.2'deki gibi, momentum transferi, transfer edilen büyüklükle orantılı bir kuvvet geliştirir. Havanın komşu tabakaları arasındaki momentum transferi, uzaklıkla hızın değişim miktarıyla orantılı olan bir viskoz kuvvetler sistemi üretir. Yüzeyden olan z uzaklığında, kesme gerilmesi olarak bilinen birim alana düşen viskoz kuvvet aşağıdaki gibi yazılabilir (Monteith 1973):

$$\tau(z) = \mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\mu}{\rho_A} \frac{\partial(\rho_A u)}{\partial z} = v \frac{\partial(\rho_A u)}{\partial z} \quad (2.20)$$

Burada μ dinamik viskozite (N s m^{-2}), v , kinematik viskozite ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), ρ_A havanın yoğunluğu (kg m^{-3}) ve u hava hızıdır (m s^{-1}).

Plaka yüzeyinden itibaren akış hızının sabit akım hızına ulaştığı, hız gradyentinin söz konusu olduğu bölgeye, momentum sınır tabakası (d_M) adı verilir (Rogers and Mayhew 1992, Schetz 1993).



Şekil 2.2. Hareketli havadan duran bir yüzeye olan momentum transferi (Monteith 1973)

2. 3. 2. Isı transferi

Durgun bir havadaki ısı kondüksiyonu momentum transferine benzerdir. Şekil 2.3 'deki gibi, soğuk bir yüzey durgun sıcak bir hava tabakasıyla karşı karşıya bırakılırsa; moleküler hareketin hızı z mesafesiyle artar. Komşu tabakalar arasındaki moleküler değişim moleküler enerji ($mv^2/2$), dolayısıyla ısı değişiminden kaynaklanır. Birim alandan olan ısı transferi akı yoğunluğu sıcaklık gradyentiyle ($\partial T/\partial z$) orantılıdır ve şu biçimde yazılabilir (Monteith 1973):

$$Q_H(z) = -k \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{k_A}{P_A c_{pA}} \frac{\partial(P_A c_{pA} T)}{\partial z} = -\alpha_H \frac{\partial(P_A c_{pA} T)}{\partial z} \quad (2.21)$$

Burada k ısıl kondüktivite ($W m^{-1} K^{-1}$), T mutlak sıcaklık (K), c_{pA} havanın özgül ısısı ($J kg^{-1} K^{-1}$), α_H havanın ısıl difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$). Denklemdeki eksi işaret, sıcaklık yüzeyden uzaklaşıkça artarken ($\partial T/\partial z > 0$), ısı akışının yüzeye doğru ($Q_H < 0$) gelişliğini gösterir.

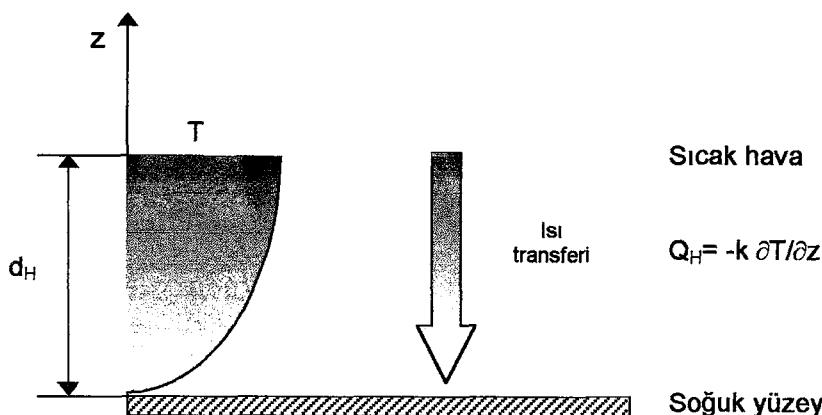
Plaka yüzeyinden itibaren sabit hava sıcaklığına ulaştığı, sıcaklık gradyentinin söz konusu olduğu bölgeye, ısıl sınır tabakası (d_H) adı verilir (Rogers and Mayhew 1992).

2. 3. 3. Kütle transferi

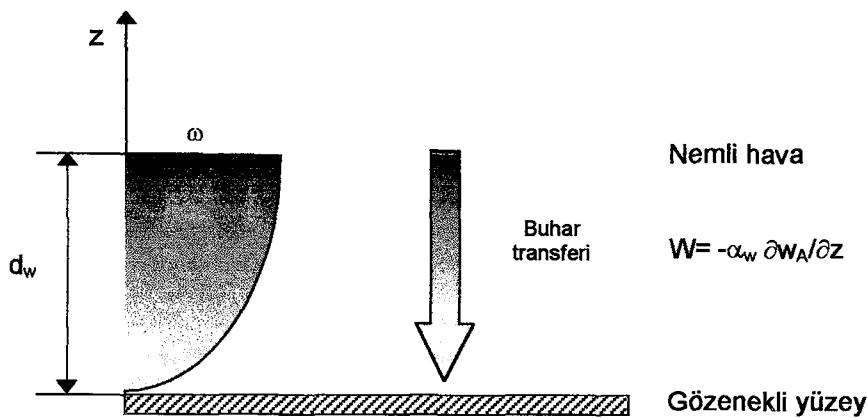
Konsantrasyon gradyentinin (havadaki su buharı ya da CO_2) bulunması durumunda, moleküler hareket, difüzyon olarak bilinen kütle transferine neden olur. Şekil 2.4'deki gibi, su buharının soğurulduğu higroskopik bir yüzey, uniform sıcaklıklı su buharı içeren durgun hava tabakasına bırakılırsa; havanın birim hacmindeki su buharı molekülleri sayısı yüzeyden olan uzaklığa artar. Komşu tabakalar arasındaki molekülerin değişimini yüzeye doğru olan net buhar hareketini sağlar. Birim alandan buhar hareketi olarak tanımlanan moleküler transfer, konsantrasyon gradyentiyle ($\partial w_A/\partial z$) orantılıdır ve (2.20) ve (2.21) eşitliklerine benzer transfer denklemi şu biçimde yazılır (Monteith 1973):

$$W(z) = -\alpha_w \frac{\partial w_A}{\partial z} \quad (2.22)$$

Bu eşitlikte, α_w su buharının moleküler difüzyon katsayısıdır ($m^2 s^{-1}$). Genel olarak kütle transfer katsayısı difüzyona uğrayan ve taşıyıcı gazların moleküler ağırlıkları ile moleküler arası kuvvetlere bağlıdır.



Şekil 2.3. Durgun sıcak havadan soğuk yüzeye olan ısı transferi (Monteith 1973)



Şekil 2.4. Nemli havadan gözenekli yüzeye olan buhar transferi (Monteith 1973)

2. 3. 4. Zamanla Değişen Moleküller Taşınım

Hacmi bilinen bir ortama giren ve çıkan moleküller akılar arasındaki fark, ortamda değişen moleküller taşınım oranına eşittir. Bu değişim oranı depolanan terime karşılık gelir. Durgun ortama ulaşıldığından depolanan terim sıfırdır. Depolanan terim, negatif ya da pozitif olabilir (Kays and Crawford 1993):

$$\text{Depolama terimi} = \text{Girdi terimi} - \text{Çıktı terimi} \quad (2.23)$$

Şekil 2.5 'deki gibi bir $\Delta x \Delta y \Delta z$ diferansiyel hacmi göz önüne alınırsa, z-yönünde oluşan genel moleküller taşınım işlemi tanımlanabilir. Düzlem 1'deki genelleştirilmiş konsantrasyon gradyenti $(d\Psi/dz)_1$ olup, girdi oranı;

$$G_1 = \left[\kappa_s \Delta x \Delta y \left(\frac{d\Psi}{dz} \right) \right]_1 \quad (2.24)$$

düzlem 2'deki genelleştirilmiş konsantrasyon gradyenti $(d\Psi/dz)_2$ olup, çıktı oranı;

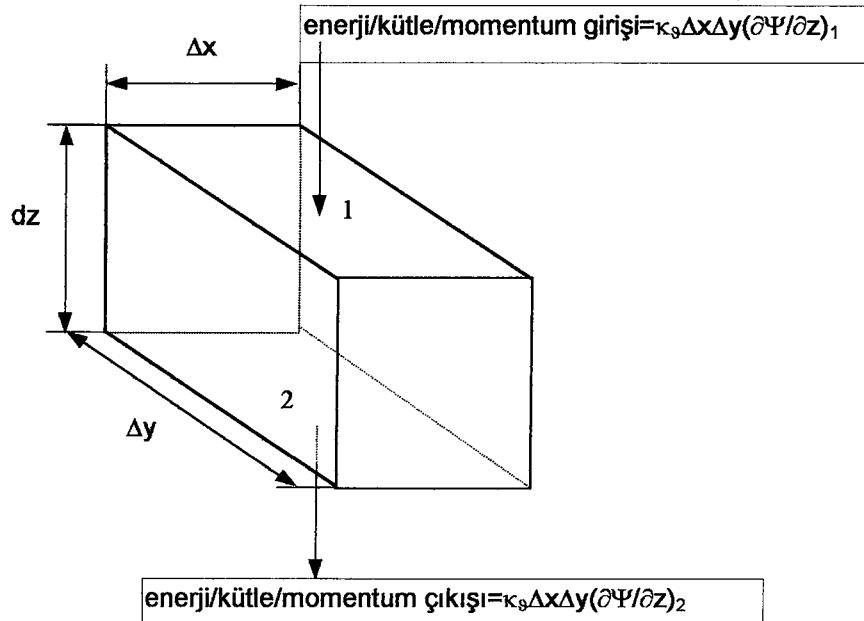
$$G_2 = \left[\kappa_s \Delta x \Delta y \left(\frac{d\Psi}{dz} \right) \right]_2 \quad (2.25)$$

olarak tanımlanır. Burada, κ_s genelleştirilmiş moleküller değişim katsayısıdır. Konsantrasyon gradyentlerinin terimleriyle taşınım oranları da aşağıdaki denklemle verilir (Foust et al 1960):

$$\left[\kappa_s \Delta x \Delta y \left(\frac{d\Psi}{dz} \right) \right]_1 - \left[\kappa_s \Delta x \Delta y \left(\frac{d\Psi}{dz} \right) \right]_2 = \frac{d\Psi}{dt} \Delta x \Delta y dz \quad (2.26)$$

(2.26) denkleminin sol tarafındaki terimlerde, Ψ , yalnız z'nin, sağ tarafındaki terim de yalnız t 'nin fonksiyonudur. Bu nedenle bu durumu matematiksel olarak göstermek için, son denklem kısmi türev formunda yazılabılır (Foust et al 1960):

$$\left[\kappa_s \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \right]_1 - \left[\kappa_s \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \right]_2 = \frac{\partial \Psi}{\partial t} dz \quad (2.27)$$



Şekil 2.5. Zamanla değişen moleküller taşınım (Foust et al 1960)

Zaman terimi çekilirse aşağıdaki denkleme ulaşılır :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_9 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \right] \quad (2.28)$$

Bu denklem, zamanla değişen genel moleküller taşınım denklemidir. Diferansiyel hacim içinde zamanla konsantrasyonun değişimi, konsantrasyon gradyentinin değişimiyle orantılıdır.

Diferansiyel hacim içerisinde moleküller üretim söz konusu ise, (2.23) denge denklemi şu şekilde düzenlenir :

$$\text{Depolama terimi} = \text{Girdi terimi} - \text{Çıktı terimi} + \text{İçsel üretim terimi} \quad (2.29)$$

İçsel üretim söz konusu ise, (2.24) denge denklemi aşağıdaki formda yazılır (Foust et al 1960):

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_9 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \right] + q_9 \quad (2.30)$$

Bu denklemelerde genelleştirilmiş koordinat olarak kullanılan Ψ , ilgili hava hacminin enerji içeriği, mutlak nem ve CO_2 konsantrasyonu olarak işlev görür.

x -, y -, z - yönlerindeki moleküller taşınım için aşağıdaki denklem uygulanır :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \kappa_9 \left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right] + q_9 = \kappa_9 \nabla^2 \Psi + q_9 \quad (2.31)$$

Zamanla değişen momentum, ısı ve kütle transferi olayları, sırasıyla Euler, Fourier ve Fick yasalarıyla açıklanır.

2. 4. Direnç Benzeşimi

Fick difüzyon yasasının genel bir gösterimi olan (2.20), (2.21) ve (2.22) eşitliklerinin tümü aşağıdaki forma sahiptir (Woodword and Sheehy 1983):

$$\text{Aki yoğunluğu} = \text{Difüzyon katsayısı} \times \text{Gradyent} \quad (2.32)$$

Momentum, ısı ve kütle transferi akı yoğunlukları için Ohm yasası uygulanır ve Çizelge 2.3'de verilen kalıp kullanılabilir (Woodword and Sheehy 1983, Kustas 1990, Lhomme 1991):

$$\text{Akım} = \text{Gerilim farkı} / \text{Direnç} \quad (2.33)$$

Yaprak yüzeyi için tüm transfer işlemleri yaprak yüzeyi sınır tabakasında gelişir; sınır tabaka kalınlığının ve sınır tabaka sıcaklığının saptanması zordur. Şekil 2.6'daki gibi, ısı akı yoğunluğu yaprak sıcaklığı (T_L) ve yaprak üstü hava sıcaklığı (T_A) ile ısı transfer direcine (r_{AH}) göre tanımlanır (Fynn et al 1993):

$$Q_{HL} = \frac{\rho_A C_{pA}}{r_{AH}} (T_L - T_A) \quad (2.34)$$

Çizelge 2.3. Momentum, ısı ve kütle transferi akı yoğunlıklarının direnç benzeşimi

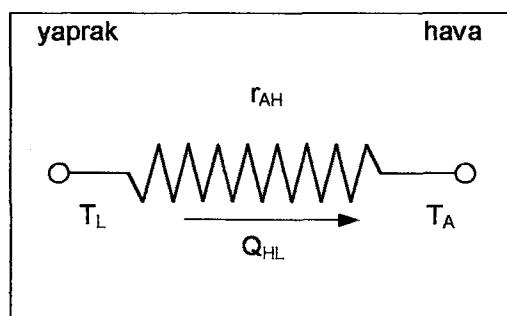
(Monteith 1973, Haldin and Lindroth 1986)

u hava hızı, T sıcaklık, w_A havanın mutlak nemi, C_A havanın CO_2

konsantrasyonu, v kinematik viskozite, α_H havanın ısıl difüzyon katsayısı,

α_W su buharı difüzyon katsayısı, α_C CO_2 difüzyon katsayısı

Akım (i)	Gerilim Farkı (V)	Direnç(Ω)	
Momentum akı yoğunluğu(τ)	$\rho_A \partial u$	$r_M = \partial z / v$	momentum direnci
Isı akı yoğunluğu (Q_{HL})	$\rho_A C_{pA} \partial T$	$r_{AH} = \partial z / \alpha_H$	aerodinamik direnç (ısı)
Transpirasyon hızı (W_L)	∂w_A	$r_{AW} = \partial z / \alpha_W$	aerodinamik direnç (H_2O)
Fotosentez hızı (P)	∂C_A	$r_{AC} = \partial z / \alpha_C$	aerodinamik direnç (CO_2)



Şekil 2.6. Ohm yasası direnç benzeşimi

2. 5. Boyutsuz sayılar

Momentum ve ısı transferi olaylarının açıklanmasında çizelge 2.4'deki boyutsuz sayılarından yararlanılmaktadır.

Momentum, ısı ve kütle transferinin birbirlerine girişim yapan sınır tabakalarında geliştiği bilinmektedir. Bu üç taşının işlemi, temelde giren sınır tabakalarında moleküler difüzyon katsayıları ile tanımlanır. Bu moleküler difüzyon katsayıları, kütle transferi işlemlerine ilişkin yeni boyutsuz sayıların türetilmesinde kullanılır. Konveksiyonla kütle transfer işlemlerinin tanımlanması için ısı transferinde kullanılan yeni boyutsuz sayı gruplarına gereksinim duyulur. Konveksiyonla ısı transferini tanımlayan temel boyutsuz sayının Nusselt sayısı olduğu bilinmektedir. Konveksiyonla kütle transferi olaylarının açıklanmasında da kütle transferi Nu sayısı kullanılır ve Sherwood sayısı (Sh) olarak bilinir. Kütle transferinin bir ölçüsü olan Sherwood sayısı temelde, akışı tanımlayan Re ve/veya Gr sayısı ile akışkanın özelliklerini tanımlayan Schmidt sayısının (Sc) fonksiyonudur. Konveksiyonla kütle transferindeki Sc sayısı, konveksiyonla ısı transferindeki Pr sayısına benzer bir rol oynar. (Welty et al 1984). Kütle transferi işlemlerinin tanımlanmasında çizelge 2.5'de verilen boyutsuz sayılarından yararlanılmaktadır.

Çizelge 2.4. Momentum ve ısı transferine ilişkin boyutsuz sayılar

(Woodword and Sheehy 1983, Jacobs et al 1992, Kotake et al 1993, Kakaç and Yener 1995):

Momentum/Isı	Boyutsuz sayı	Simgeler	Tanımı
Reynolds sayısı	$Re = \frac{ul}{v}$	l: uzunluk(m) u:hava hızı(ms ⁻¹) v:kinematik vis.	<u>Momentum kuvveti</u> <u>viskoz kuvvet</u>
Grashof sayısı	$Gr = \frac{g\Delta T l^3}{T v^2}$	g:yerçekimi ivmesi T: film sıcaklığı $\Delta T = T_L - T_A$	<u>yüzdürme kuvveti</u> <u>viskoz kuvvet</u>
Eckert sayısı	$Ec = Gr Re^{-2}$	-	<u>yüzdürme kuvveti</u> <u>eylemsizlik kuvveti</u>
Nusselt sayısı	$Nu = \frac{1}{\alpha_H \Gamma_{AH}}$	-	<u>moleküler ısı difüzyon direnci</u> <u>konveksiyon ısı taşınım direnci</u>
Prandtl sayısı	$Pr = \frac{\nu}{\alpha_H}$	-	<u>momentum difüzyon katsayısı</u> <u>isıl difüzyon katsayısı</u>
Stanton sayısı	$St = \frac{Nu}{Re Pr} = \frac{h_H}{\rho c_p u}$	h_H :film katsayısı	<u>ısı transferi film katsayısı</u> <u>momentum transfer katsayısı</u>
Richardson sayısı	$Ri = \frac{g(\partial T_A / \partial z)}{T_A (\partial u / \partial z)^2}$	-	<u>yüzdürme kuvvetleri kinetik enerjisi</u> <u>kesme gerilmesi kinetik enerjisi</u>

Çizelge 2.5. Kütle transferine ilişkin boyutsuz sayılar (Welty et al 1984, Pieters et al 1994)

Kütle transferi	Boyutsuz sayı	Tanımı
Sherwood sayısı	$Sh_{w,c} = \frac{1}{\alpha_{w,c} f_{aw,c}}$	<u>moleküler kütle difüzyon direnci</u> <u>konveksiyon kütle taşınım direnci</u>
Schmidt sayısı	$Sc = \frac{v}{\alpha_{w,c}}$	<u>momentum difüzyon katsayısı</u> <u>kütle difüzyon katsayısı</u>
Stanton sayısı	$St_{w,c} = \frac{Sh}{Re Sc} = \frac{h_{w,c}}{\rho c_p u}$	<u>kütle transferi film katsayısı</u> <u>momentum transfer katsayısı</u>
Lewis sayısı	$Le = \frac{\alpha_H}{\alpha_{w,c}}$	<u>Isıl difüzyon katsayısı</u> <u>kütle difüzyon katsayısı</u>

2. 6. Bitki Örtüsü İçindeki Konveksiyon Rejimi

Bitki örtüsü içindeki konveksiyon rejiminin saptanması genellikle Gr ve Re sayılarına dayandırılır. Bu amaçla kullanılan ve çizelge 2.4'de tanımlanan $GrRe^{-2}$ indeksi farklı akış rejimlerini, geçiş bölgelerini tanımlamak için uygun bir karakteristiktedir (Stanghellini 1993). Sera içindeki bitki topluluklarında konveksiyon işlemi doğal ve zorlanmış bölgede gelişmesine karşın akış modu temelde laminerdir. Şekil 2.7, $GrRe^{-2}$ ölçütüne göre, konveksiyon modunun ve akış tipinin belirlenmesinde kullanılan akış şemasını içermektedir. $GrRe^{-2}$, akış sürecinde yüzdürme kuvvetinin eylemsizlik kuvvetine oranının bir ölçüsüdür (Jacobs et al 1994, Pieters et al 1994):

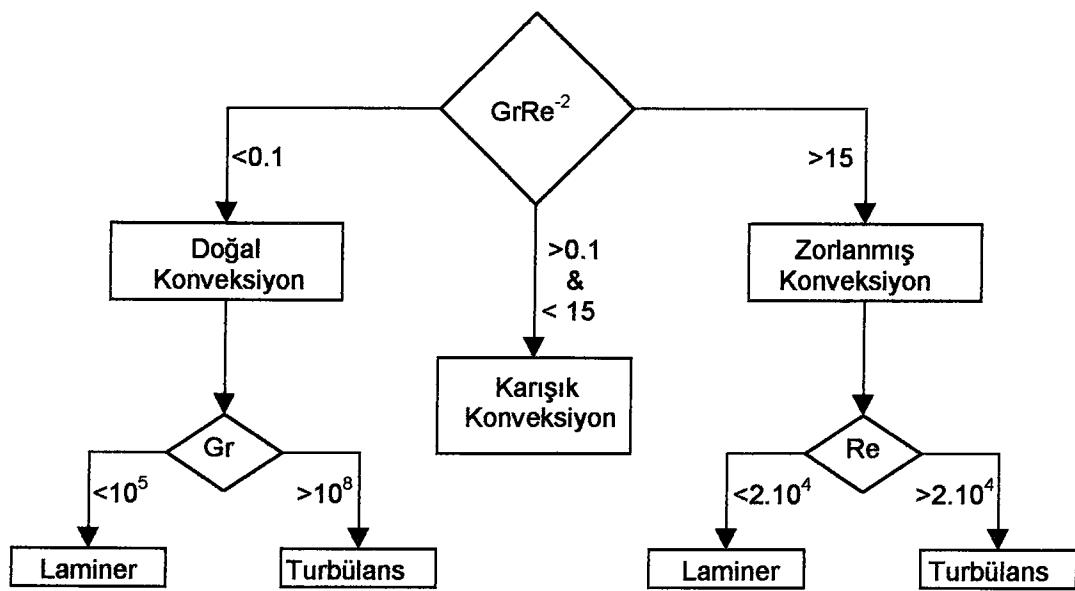
$$\frac{Gr}{Re^2} \gg 1 \quad (\text{doğal konveksiyon}) \quad (2.35)$$

$$\frac{Gr}{Re^2} \ll 1 \quad (\text{zorlanmış konveksiyon}) \quad (2.36)$$

$$\frac{Gr}{Re^2} = 1 \quad (\text{kanışık konveksiyon} = \text{doğal} + \text{zorlanmış}) \quad (2.37)$$

2. 7. Hava, Subuharı ve Karbondiokside İlişkin Fiziksel Özelliklerin Saptanması

Hava, subuharı ve CO_2 'e ilişkin fiziksel özellikler sıcaklığın fonksiyonları olarak tablolarda listelenmektedir. Hesaplamalarda standart oda sıcaklığının kullanımı % 25 'e ulaşan hatalara neden olabilmektedir. Bunu önlemek için, sıcaklık aralığı 278 - 318 K olan veri seti içinde 298 K değerine göre elde edilen doğrusal fonksiyonlardan yararlanılmıştır (Monteith 1973, Wong 1977, Kakaç and Yener 1995). Çizelge 2.6'da verilen doğrusal fonksiyonlar 278 – 318 K aralığında geçerli olup; iki terimden oluşmaktadır.



Şekil 2.7. Konveksiyon modu ve akış tipini belirleyen akış şeması (Pieters et al 1994)

Hesaplamalarda ısı ve kütle transferinin geliştiği yüzey ve yüzey üstü hava sıcaklığını karakterize eden film sıcaklığının (sınır tabaka sıcaklığı) kullanılması gereklidir (Kakaç and Yener 1995):

$$T = \frac{T_L + T_A}{2} \quad (2.38)$$

Çizelge 2.6. Hava, subuharı ve CO_2 'e ilişkin fiziksel özellikler (Monteith 1973, Wong

1977, Kakaç and Yener 1995), $f(T) = a + b(T-298)$,

a: 298 K 'deki fiziksel özellik, b: 278-318 K aralığında fiziksel özelliğin eğimi

Fiziksel özellik	$f(T)$	a	b
Havanın yoğunluğu (kg m^{-3})	ρ_A	1.169	-3.975×10^{-3}
Havanın özgül ısısı ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	c_{pA}	1007	0.03
Havanın ısıl kondüktivitesi ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	k_A	26×10^{-3}	0.07×10^{-3}
Havanın kinematik viskozitesi ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	ν	15.5×10^{-6}	9.25×10^{-8}
Havanın ısıl difüzyon katsayısı ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	α_H	22.2×10^{-6}	0.135×10^{-6}
Subuharının difüzyon katsayısı ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	α_w	24.9×10^{-6}	0.15×10^{-6}
CO_2 'in difüzyon katsayısı ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	α_c	15.1×10^{-6}	9.25×10^{-8}
Suyun buharlaşma entalpisi (J kg^{-1})	h_{fg}	2442000	-2375

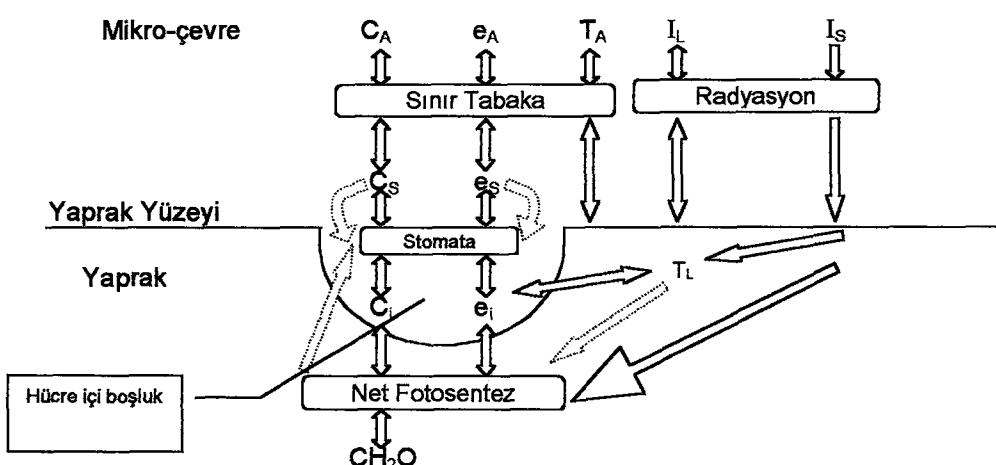
2. 8. Bitkinin Fizyolojik Özellikleri

Bitki, sera havasıyla aralarında ısı, subuharı ve CO_2 alışverişi olan iyi tanımlanmış bir biokütle olarak alınır (Bot 1993). Taşınım işlemlerinin kolay anlaşılabilmesi için bitki simülasyon modelleri geliştirilmiştir (Dickinson et al 1991). Bu modeller, hem transpirasyonu hem de yaprak hava ortamı içindeki CO_2 gereksinimini hesaplamak için kullanılırlar. Stomatal modeller, laminer sınır tabakanın yaprak içi fizyolojik mekanizmaları üzerine etkilerini ortaya çıkarmak için geliştirilirler. Yaprak yüzeyi, fizyolojik işlemleri ayıran sınır olarak göz önünde tutulur. Fizyolojik işlemler taşınım işlemlerine göre yaprak içinde oluşur. Taşınım işlemleri ise sınır tabakada gerçekleşir. Fizyolojik model, yaprak yüzeyinde özelleştirilmiş çevre koşullarına göre tanımlanır. Bitkinin kütte transfer mekanizması şekil 2.8'de verilen stomatal model ile tanımlanabilir (Collatz et al 1991, Dougherty et al 1994).

2. 8. 1. Transpirasyon

Rosenberg'e (1983) göre, bitkiler tarafından sıvı haldeki suyun yalnız %1'i metabolik işlemlerde kullanılır. Bitki köklerinden geçerek alınan suyun büyük kısmı havaya buharlaştırılır. (Al-Faraj et al 1994). Transpirasyon bir enerji tüketim işlemidir. Güneş radyasyonu ya da diğer enerji kaynaklarının etkisine bağlı olarak yaprak ve hava sıcaklıklarını düzenler (Yang et al 1990e).

Su, yaprak sıcaklığındaki iç hava boşluklarında doyma basıncında buharlaşır. Su buharı, sera havasına ulaşmadan önce yaprağın hücre içi boşluğu, kutiküla ve stomata ile sınır tabakayı geçmek zorundadır (Bailey et al 1993, Papadakis et al 1994). Lawlor'a (1987) göre, yaprak içi tabakaların herbiri su buharı akışına karşı direnç gösterirler.



Şekil 2.8. Stomatal model ile kütte transfer mekanizması (Collatz et al 1991)

2. 8. 1. 1. Stoma içindeki mutlak nem

Stomata içindeki havanın belirli bir yaprak sıcaklığında doyduyu varsayılarak, stomata havasının mutlak nemi aşağıdaki eşitliği kullanarak hesaplanır (Stanghellini 1987):

$$w_s = \frac{\rho_A c_{pA}}{h_{fg} \gamma} e^*(T_L) \quad (2.39)$$

Burada, ρ_A havanın yoğunluğu (kg m^{-3}), c_{pA} sabit basınçta havanın özgül ısısı ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), h_{fg} suyun buharlaşma entalpisi (J kg^{-1}), γ psikrometrik sabit (Pa K^{-1}), $e^*(T_L)$ yaprak sıcaklığında doygun buhar basıncı (Pa).

Psikrometrik sabit, havanın özgül ısısı, atmosfer basıncı ve suyun buharlaşma entalpisine göre hesaplanır (Kimball 1986):

$$\gamma = \frac{c_p P}{0.622 h_{fg}} \quad (2.40)$$

2. 8. 1. 2. Doygun buhar basıncı

Belirli bir T sıcaklığında doygun buhar basıncı, doygun buhar basıncının eğimine göre şu eşitlikle tanımlanır (Fynn et al 1993):

$$e^*(T) = e^*(T_A) - R(T_A - T) \quad (2.41)$$

Burada, sıcaklığın fonksiyonu olarak, doygun buhar basıncı aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplanır (ASAE Standards 1993):

$$\ln(e^*(T)/R) = \left(\frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2} \right) \quad 273.16 \leq T \leq 533.16 \quad (2.42)$$

Burada, $R = 22105649.25$,

$D = 0.12558 \times 10^{-3}$,

$A = -27405.526$,

$E = -0.48502 \times 10^{-7}$,

$B = 97.5413$,

$F = 4.34903$,

$C = -0.146244$,

$G = 0.39381 \times 10^{-2}$.

Doygun buhar basıncı eğrisinin eğimi sıcaklığın fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitlikle saptanabilir (Jollet 1994):

$$R = 1.41 \times 10^{10} \exp\left(\frac{-3928.5}{T - 41.5}\right) \frac{3928.5}{(T - 41.5)^2} \quad (2.43)$$

Yaprak yüzeyindeki doygun buhar basıncı, yaprak sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplanır :

$$e_L = e^*(T_L) \quad (2.44)$$

Toprak yüzeyindeki doygun buhar basıncı, toprak sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplanır :

$$e_F = e^*(T_F) \quad (2.45)$$

2. 8. 1. 3. Bağıl nem

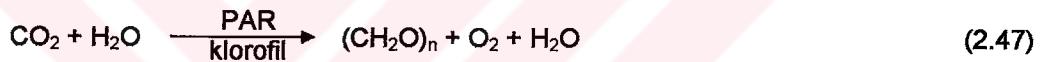
Havanın buhar basıncının herhangi bir T sıcaklığındaki doygun buhar basıncına oranı bağıl nem olarak tanımlanır (Young and Day 1988):

$$RH = \frac{e_A}{e^*(T)} \quad (2.46)$$

2. 8. 2. Fotosentez ve Solunum

Fotosentez ve solunum işlemleri temelde karbon ve su akışının gerçekleştiği kapalı bir enerji çevrimidir. Yeşil bitkiler, fotosentez ve solunum işlemlerinin olduğu biokütleler olup; CO_2 ve H_2O gibi ham materyalleri PAR yardımıyla işleyerek karbonhidrat haline dönüştürler:

[fotosentez işlemi];



[solunum işlemi];



tepkimelerine göre gelişir (Lawlor 1987, Kacar 1989).

Dolayısıyla, bitkiler temelde PAR formundaki ışık enerjisini ısı enerjisine dönüştüren enerji konvektörleri olarak da tanımlanabilirler(Twidell and Weir 1986, Lawlor 1987):



Yaprak düzeyinde tespit edilen CO_2 ile serbest bırakılan CO_2 akışına göre net fotosentez hızı şu biçiminde tanımlanır:

$$\text{Net fotosentez hızı} = \text{Fotosentez hızı} - \text{Solunum hızı} \quad (2.50)$$

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bot (1983), "fiziksel işlemlerden dinamik bir modele sera kliması" konusundaki çalışmasında, sera klimasında bitki büyümeye ve gelişimini etkileyen çevresel koşullar setinin araştırılması gerektiğini vurgulamış; bu çevresel koşulları temelde sıcaklık ve buhar basıncı terimleriyle tanımlamıştır. Ayrıca sera klimasını oluşturan, yöneten fiziksel işlemleri açıklamıştır. Sera konstrüksiyonu, havalandırma ve ısıtmaya ilişkin fiziksel özellikleri neden-sonuç ilişkilerine bağlı olarak tanımlamıştır.

Direkt ve diffuz güneş radyasyonuyla sera örtüsü arasındaki ilişkileri tanımlamış; direkt güneş radyasyonu için bu ilişkileri güneşin konumuna, optik yasalara ve sera yönelik ile çatı konstrüksiyonuna göre düzenlemiştir. Diffuz güneş radyasyonu üst yarıküreden gelen radyasyondan olduğu için, direkt radyasyon hesaplama işlemini, yarıkürenin belirli herhangi bir yönüne göre radyasyonla olan ilişkisini hesaplamak için uygulamıştır.

Çalışmasında, sera klimasını anlık olarak simüle etmek amacıyla genel fiziksel işlemleri fiziksel bir modelde birleştirmiştir, önemsiz fiziksel işlemleri geçeri kılmak amacıyla parametrik hesaplama teknikleri kullanmıştır. Açıklayıcı bir şema ortaya çıkarmak için Bond grafik notasyonunu uygulamıştır.

Baldocchi et al (1985), "mikroklima - bitki mimari etkileşimleri : soya fasulyesinin kütle ve enerji değişimleri üzerine yaprak genişliğinin etkisi" konusundaki çalışmalarında, yaprak genişliğindeki farklılıkların bitki üstü radyasyon dengesini etkilemediğini, ancak bitki örtüsü içindeki net radyasyon dengesini etkilediğini saptamışlardır. Net radyasyon dikey profilindeki bu farkın bitki mikroklimasını etkilediğini ve bitki yüksekliğiyle orantılı değiştirdiğini ortaya koymuşlardır. Dar yapraklı bitkileri geniş yapraklı bitkilerle kıyaslamışlardır. Dar yapraklı bitki örtüsünde daha yüksek hava sıcaklıkları, daha düşük buhar basıncları, daha az gizli ısı değişimi ve daha büyük duyular ve toprak ısı akısı gözlemlemişlerdir.

Sellers (1985), "bitki yansımıası, fotosentez ve transpirasyon" adlı çalışmasında, görünür ve yakın infrared dalga boyu aralıklarında yarıküresel bitki yansımmasını hesaplamak için radyasyonla transfere ilişkin iki akımlı yaklaşım modelini kullanmıştır. Çalışmasında, bitki örtüsü içindeki tüm yaprakların gelen PAR ile etkileşime girdiği varsayıma göre, bitkinin hacimsel stomatal direncini hesaplamıştır.

Stanghellini (1987), "sera bitkilerinin transpirasyonu" adlı araştırmasında, mikroklimanın bir fonksiyonu olarak sera bitkilerinin buhar üretimini tahmin eden bir yöntem geliştirmiştir ve test etmiştir. Bitki örtüsünün en basit bileşeni olarak seçilen "ideal bir yaprak" için iki enerji denge denklemi kullanmıştır. İdeal bir yaprak yüzeyi ve çevrenin özelliklerini tanımladıktan sonra, hem yaprağın enerji denge denklemi hem de yaprak ve çevresi arasındaki duyu ısı ve buharlaşma ısısı denklemelerini türetmiştir. Bitki transpirasyonunun göstergesi olan buharlaşma ısı transferi ve yaprak sıcaklığı ile fiziksel ortam değişkenleri arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Çalışmasında, hava sıcaklığının artmasının her zaman yüzeyde daha çok enerji olmasından kaynaklandığını ve yaprağın bu nedenle sürekli olarak yeni bir denge sıcaklığına kavuştuğunu

belirlemiştir. Bu işlemin radyasyon ya da buharlaşma ısısı formunda enerjinin açığa çıkmasıyla oluştuğunu belirtmiştir.

Araştırmasında, domates bitkisi için transpirasyon ve fotosentez mekanizmalarını tanımlamak amacıyla bitki stomatal direncine ilişkin bir optimizasyon modeli kullanmıştır.

Bitki örtüsü, üniform bir çevrede tutulan üniform bir tabaka olduğuna göre, hava hızının sadece bitkinin aerodinamik direncini etkilediğini; sıcaklık ve nem dağılımını etkilemediğini bulgulamıştır. Yaprak yüzey sıcaklığı ve buharlaşma ısı akı yoğunluğunun aerodinamik direnç tarafından etkilenmediğini, "transpirasyon ve yüzey sıcaklığı hava hızından etkilenmeyebilir" ifadesini kullanarak vurgulamıştır.

Yang et al (1990b), çalışmalarında sera mikroklimasına ilişkin ısı ve kütle taşınım işlemlerini tanımlamak için teorik bir model geliştirmiştir. Isı ve kütle taşınım işlemlerini radyasyon transferi, enerji dengesi, transpirasyon ve CO₂ değişimini kapsayacak formatta düzenlemiştir. Çevresel faktörlere göre, radyasyon transferi, konveksiyonla taşınım işlemleri ve bitki tepkimelerini; bitki mimarisi, sera yapısı ve bitki üstü durgun hava hacmi fiziksel değişkenlerinin fonksiyonu olarak tanımlamışlardır. Bireysel alt modelleri, sera hıyar bitki örtüsüne ilişkin deneyel verilerden derlemiştir. Sera mikroklimasını bitki yaprakları ve sera havasının diferansiyel tabakaları için eşzamanlı olarak simüle etmiştir.

Myneni (1991) çalışmasında, bitki örtüsünde üç boyutlu radyasyon transferi ve fotosentezin modellenmesine ilişkin yeni bir yöntem ortaya koymuştur. Yöntemi, diferansiyel bir hacimdeki radyasyon enerji dengesi biçiminde ifade edilen radyasyon transfer denklemine dayandırılmıştır. Transfer denklemini yaprak alanı yoğunluk fonksiyonu, yaprak normal yönelimi, olasılık yoğunluk fonksiyonu ve yaprak dağılımı faz fonksiyonu modelleriyle tanımlamıştır.

Baldocchi (1992), çalışmasında soya fasulyesi bitki örtüsünde su buharı, CO₂ ve duyulur ısı akı yoğunlıklarının ve skaler profillerin simülasyonu için bir Langrange random yürüme modeli geliştirmiştir ve test etmiştir. Kütle ve enerji akıları ile skaler profilleri, bitki kaynak-çukur modeliyle birlikte Langrange türbülans difüzyon modeli bağlantısı aracılığıyla çözümlenmiştir. Model ile ilişkin akış diyagramına da yer vermiştir.

Kuusk (1992), "bitki örtüsünde kısa dalgalı radyasyona ilişkin soğurma profilleri" konusundaki çalışmasında, homojen bitki örtüsü içinde soğurma profillerinin hesaplanması için Nilson - Kuusk bitki yansımı modelini teklif etmiştir. Ele aldığı model, yapraklar üzerinde ayna gibi yansıyan ve temas-noktası etkisini taşıyan hiç yansımamış ve bir kere yayılmış radyasyonun soğurulmasını kapsamaktadır. Bir çok kere yayılan radyasyon için iki akımlı Schwarzschild yaklaşımını kullanmıştır.

Sinoquet and Bonhomme (1992), "karışık ve sırasal bitki örtüsünde radyasyon trasferinin modellenmesi" adlı çalışmasında, iki boyutlu bitki örtüsü için radyasyon transferi modelini tanımlamışlardır. Karışık ortam benzeşimine göre, modeli temelde bitki geometrik yapısı, yaprak alanı yoğunluğu ve yaprak açı dağılımıyla tanımlanan komşu hücreler seti olarak almışlardır. Bitki örtüsü üst düzlemi ile toprak düzlemi arasında sınırlanan hacmi, eşit yatay tabakaya ve eşit dikey dilim sayısına bölmuştur. Yatay karmaşıklık nedeniyle, radyasyon

kaynakları ve alıcılar arasındaki ortalama değişim katsayılarını bitki örtüsü içindeki başlangıç ışınımına göre hesaplamışlardır. Radyasyon değişim katsayılarını, gelen radyasyonun direkt, diffuz ve yayılan bileşenleri için belirlemiştir.

Ültanır (1992b), "sera mekanizasyonu" adlı ders notlarında, sera ısıl çevresini termodinamiğin birinci yasası bazında irdelemiş ve bitki üzerindeki enerji denge eşitliklerini vermiştir. Ayrıca, sera – güneş radyasyonu ilişkileri üzerinde durmuş; ışınımın spektral dağılımının etkilerini, bitki örtüsüne ilişkin optik özelliklerini ve bitki mimarisine ilişkin kuramsal temelleri tanımlamıştır. Ders notlarında bitki kümesi alanı eğim indeksine degenmiş ve örnek bitkiler için yaprak eğim indeksi ağırlıklı ortalama değerlerini vermiştir.

Zhang and Lemeur (1992), "sera koşullarında enerji dengesi üzerine aerodinamik direncin etkisi ve evapotranspirasyona ilişkin Penman-Monteith eşitlikleri" konusundaki çalışmalarında, sera bitki örtüsü ve çevre havası arasındaki duyular ısı transferini bitki yaprak sıcaklığı, hava sıcaklığı ölçümleri ile momentum transferine ilişkin aerodinamik dirence göre hesaplamışlardır. Havadan daha soğuk bir yüzeyin aerodinamik direncinin, havadan daha sıcak bir yüzeydeki dirençten daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Temelde düzensiz yüzeylere ilişkin havadan daha soğuk durum için aerodinamik direnç eşitliklerinin uygulanabilirliğini sınamışlar, dirençlerin duyular ve buharlaşma ısısı hesaplamalarındaki etkilerini tartışmışlardır. Ayrıca, enerji dengesi ve Penman - Monteith eşitliklerine göre, evapotanspirasyon hesaplamaları ile deneysel bulguları karşılaştırmışlardır.

Tantau (1992), "enerji dengelerini kullanarak yaprak stomasının bağıl açılma derecesinin hesaplanması" konusundaki çalışmasında, güneş radyasyonu ya da su stresinin neden olduğu yapraklardaki bağıl stomatal açılma derecesinin hesaplanabildiğini ortaya koymuştur. Sera klimasının kontrolu için, mikroklimadaki değişimlere göre bitkilerin reaksiyonunu geri beslemeli olarak gösteren bir yöntem geliştirmiştir. Yaprakların sınır tabakasını rahatsız etmeksızın sürekli ölçüm alınabilmesinin yöntemin üstün yönü olduğunu, ancak algılayıcıların doğruluğu ve ısı transfer katsayı ile yaprak alan indeksinin hatalı hesaplanmasına karşı duyarlı olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, bu yöntemin su buharına ilişkin mutlak stomatal direnci ölçmek için uygun olmadığını degenmiştir.

Longuenesse et al (1993), "sera bitkilerinin CO_2 değişimlerinin modellenmesi" adlı çalışmalarında, en çok kullanılan yaprak asimilasyonu cevap fonksiyonlarını incelemiştir. Yaprak asimilasyonu cevap fonksiyonunu foton aki yoğunluğuna (PPFD) bağlı olarak tanımlamışlardır. Fotosentez asimilasyonu cevap fonksiyonu için alternatif olarak asimptotik üssel yaklaşımın da kullanılabileceğini önermektedirler. Yaprağın net asimilasyon oranının ya RuBISCO aktivitesi (uç CO_2 konsantrasyonuna bağlı) ya da RuBP'in rejenerasyon oranı ve elektron taşınım oraniyla; böylece soğurulan PAR ile sınırlandığını belirtmişlerdir. Bitki asimilasyon modellerinden bitki büyümeye modellerine doğru olan gelişim zincirini bio-mekanistik modeller bazında ele almışlardır.

Solunum modellerinin temel hareket noktaları üzerinde durmuşlar ve solunumu kontrol eden dış ve iç kontrol faktörlerinin sınırlarını tanımlamışlardır. Dış kontrol faktörlerinden olan sıcaklığa göre, solunum hızının cevap eğrisinin üssel olarak tanımlanabileceğini bildirmiştir.

Papadakis et al (1994), "domates bitkisi ve sera çevresi arasında ısı ve kütle transferinin deneysel araştırılması ve modellenmesi" konusundaki çalışmalarında, bitkinin enerji dengesini deneysel olarak belirleyerek bitki transpirasyonu ve yaprak sıcaklığına ilişkin genel karakteristikleri irdelemişlerdir. Sera mikroklimasına ilişkin değişken parametreleri kullanarak bitki transpirasyonu ve sıcaklığı için dinamik bir model geliştirmiştir ve modeli test etmişlerdir. Konveksiyonla ısı transferinin saptanması için gerekli deneysel çalışmaları temelde yapay yapraklılarda denemişlerdir. Bu amaçla, bazı akış rejimlerinde yapraklar ve hava arasındaki pozitif ya da negatif sıcaklık farklarını kullanmışlar ve bazı ilişkilerden yararlanmışlardır. Yatay olarak konumlandırılmış yapay yapraklar için Nusselt sayısının bazı yaklaşımalarla hesaplanabileceğini önermişlerdir.

Ioslovich et al (1995), "seraların sub-optimal CO₂ zenginleştirilmesi" adlı makalelerinde, optimal CO₂ zenginleştirilmesi işlemini sabit ve yarı değişken durum için ortaya koymuşlardır. Bu amaçla, sera bileşenlerine ilişkin enerji ve CO₂ denge denklemlerini tanımlamışlar; ancak evapotranspirasyon işlemini hesaba katmamışlardır. Optimizasyon probleminin çözümünde, Pontryagin'in maksimizasyon prensibini kullanmışlardır. Kararlı(SS) ve yarı değişken durumun (QSS) çözümünde, CO₂ zenginleştirme ve havalandırma akısını oransal kontrol değişkeni olarak kullanmışlardır. Yarı değişken durumun (QSS) çözümünde, puls-genişliği modülasyon yaklaşımını kullanmışlar; bu yaklaşıma göre, açık-kapalı kontrol varsa, açık-kapalı anahtarlama sıklığı ile çözümün sağlanabildiğini öne sürmüşlerdir.

Yang et al (1995), seralarda bitkiler ve hava arasındaki ısı ve kütle değişimi üzerine havayla ilgili koşulların etkisi adlı makalelerinde, deneysel ve teorik çalışmalarını sera havasının aerodinamik ve ıslı koşullarının etkilerini sınamak için birleştirmiştir. Seralardaki hava akış modunun karmaşık, değişken ve çoğulukla karışık modda olduğunu bildirmiştir. Bitki örtüsü üzerindeki ile içindeki hava sıcaklığı ve hava hızı farklarının çok önemli olduğunu; ilgisiz referans değerlerinin kullanılması, hava akış modunun farklı sınıflanmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Yerel olarak tanımlanan boyutsuz sayılar kullanılarak saptanın direncin bitki örtüsü içindeki havaya ilişkin parametrelere göre hesaplanması gerektiğini belirtmişlerdir. Duyulur ısı akısı ile yapraklar ve bitki üstü hava arasındaki sıcaklığa göre kalibre edilen aerodinamik direncin boyutsuz sayılar kullanılarak tanımlanandan kavramsal açıdan farklı olduğunu ve bitkiler ve sera havası arasındaki değişim proseslerini tanımlamada yetersiz kaldığını saptamışlardır. Sera mikrokliması ve taşınım işlemleri üzerine gelecekte yapılacak araştırmalar için bitki üstü temel alınarak bitki içindeki koşulların diferansiyel olarak irdelemesi gerektiğini vurgulamışlardır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4. 1. Materyal

Deney materyali sera, hıyar bitki örtüsü, hıyar bitki standı ve ölçüm setinden oluşmuştur.

4. 1. 1. Deneme serasına ilişkin özellikler

Antalya Seracılık Araştırma Enstitütüsünde kurulu bulunan şekil 4.1'deki TZDK Agroser tipi serada deneyel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Seraya ilişkin teknik özellikler çizelge 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. TZDK Agroser tipi deneme serası

Çizelge 4.1. TZDK Agroser tipi seranın teknik özellikleri

Sera boyutları	Ölçüleri
Genişlik	2x6.4 m
Uzunluk	30 m
Yükseklik(kaidesiz)	2.4 m
Mahya yüksekliği	4 m
Toprak yüzey alanı	384 m ²
Çatı açısı	26.5°
Makaslar arası uzaklık	3 m
Cam kalınlığı	3.8 mm
Cam boyutları(kare)	0.74 m
Üst havalandırma yüzeyi	100 m ²
Yan havalandırma yüzeyi	33 m ²
Toplam sera yüzeyi alanı	655 m ²

4. 1. 2. Sera bitki örtüsüne ilişkin özellikler

Bitki örtüsü deneme materyali olarak hıyar bitkisinin HM.41-F1 varyetesi kullanılmıştır. Bitki örtüsüne ilişkin özellikler çizelge 4.2'de verilmiştir.

Seranın uzun kenarı boyunca 61 adet, kısa kenarı boyunca 16 adet olmak üzere toplam 976 adet hıyar fidesi bitki örtüsü olarak alınmıştır.

4. 1. 3. Deneme standlarında yapılan ölçümeler

Hıyar bitkisinin HM.41-F1 varyetesi fide dikimi 15.2.1994 tarihinde yapılmış olup; örnek parametrelerin alınması 29.4.1994 ile 6.5.1994 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Bitki mimarisini tanımlayan parametreleri ölçmek için bitki örtüsünü örnekleyen rastgele 10 adet hıyar bitki standı seçilmiştir.

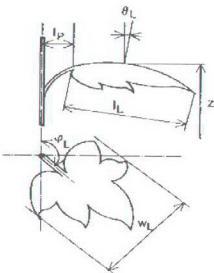
Sıralar arası uzaklık 1.6 m, dar sıra arası uzaklık 0.5 m ve sıra üzeri uzaklık 0.45 m olarak ölçülmüştür.

Her örnek için şekil 4.2'de verilen aşağıdaki parametreler ölçülmüştür:

1. Yaprak sayısı (n),
2. Her yaprağın uzunluğu (l_L),
3. Her yaprağın genişliği (w_L),
4. Her yaprak sapının yatay izdüşüm uzunluğu (l_p),
5. Her yaprağın tabandan olan uzaklığı (z),
6. Her yaprağın zenit açısı (θ_L),
7. Her yaprağın azimut açısı (ϕ_L).

Çizelge 4.2. HM41.F1 varyetesi hıyar bitkisi kronolojisi

Tohum ekim tarihi	03.1.1994
Fide dikim tarihi	15.2.1994
1. hasat	29.3.1994
12. hasat	04.5.1994



Şekil 4.2. Bitki mimarisini tanımlayan yaprak parametreleri (Yang et al 1990d)

10 adet hiyar bitki standı içinden belirli yüksekliklerde 23 adet sağlıklı hiyar yaprağı, bitki standını örnekleyecek biçimde toplanmıştır. Hiyar bitkisi yaprak alanını ölçmek için Tokyo - Hayashi Denko AAM - 5 alanmetresi kullanılmıştır.

Bitkinin yaprak alan indeksi (LAI) dikey profilde ölçülen toplam yaprak alanının ilgili taban alanına oranı ile saptanmış olup; 1.623 olarak ölçülmüştür.

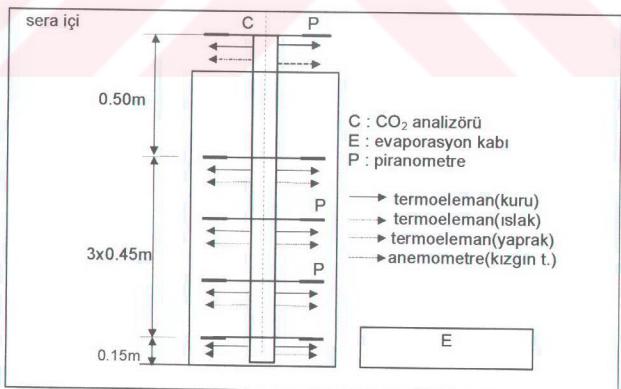
Olgun hiyar bitkisinin üst seviyelerinde yapraklar yataya yakın olup, alt kısımdaki yapraklar daha eğiktir. Gözlem ve ölçümlere göre, bitki yüksekliğine bağlı olarak alınan yaprak örneklerinden yaprak eğim indeksinin ağırlıklı ortalaması 0.3934 olarak saptanmıştır.

Ortalama yaprak boyutu, yaprak uzunluğu ve genişliğinin geometrik ortalamasıdır. Bitki standına ilişkin yapılan ölçümlerden ortalama yaprak uzunluğu 0.2472 m ve ortalama yaprak genişliği 0.2394 m olarak ölçülmüştür.

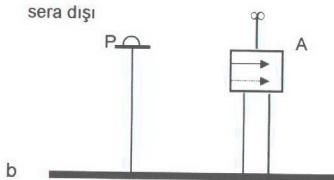
4. 1. 4. Sera mikrokliması deney simülatörü

Matematiksel modeli çalıştmak ve test etmek için tesis edilen deney simülatörü ile gerekli veri tabanı oluşturulmaya çalışılmıştır. Deney simülatörü, şekil 4.3 'de gösterildiği gibi sera içi (a) ve dışı (b) olmak üzere iki ayrı modül halinde düzenlenmiş ve çizelge 4.3 ' de verilen klimatolojik büyütükler ölçülmüştür. Sera içi ölçüm seti, şekil 4.4 'de görüldüğü gibi bitki standı içine yerleştirilmiştir.

Rüzgar hızı ve evaporation değişimi dışında tüm analog klimatolojik büyütükler, şekil 4.5'de gösterilen Kaye Instruments Digistrip II veri toplama sistemi tarafından 10'ar dakikalık aralıklarla ortalaması alınacak formatta programlanmış ve dijital olarak yazdırılmıştır. Veri toplama sistemine ilişkin özellikler çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.3. a) Sera içi modüler ölçüm seti



Şekil 4.3. b) Sera dışı modüler ölçüm seti

Çizelge 4.3. Ölçülen klimatolojik değişkenler, algılayıcılar ve özellikleri,

X : sera dışı Y : sera içi), *) sera dışı rüzgar hızları 7/14/21 saatlerinde ölçülmüştür; **) günlük buharlaşma olarak ölçülmüştür.

Değişkenler	X	Y	Algılayıcılar	Özellikleri	Kalibrasyon
Sıcaklık					
- hava	1	10	termoeleman	ANSI/MC96.1 T tipi - 217° C / 403 ° C	Omega 450 ATT
- yaprak	-	10			
- cam yüzeyi	-	1			
- toprak yüzeyi	-	1			
Bağıl nem	1	1	termoeleman	ANSI/MC96.1 T tipi	Omega 450 ATT
Hava hızı	1*	1	anemometre	0-110 mV	kendi skaları ile
Güneş Radyasyonu	1	3	piranometre	10 mV = 1000 W/m ²	
CO ₂ konsantrasyonu	-	1	CO ₂ analizörü	% 0-0.3 = 0-100 mV	kendi skaları/ S.CO ₂
Evaporasyon**	1	1	evaporasyon	0- 100 mmSS	-
Toplam	5	29	34		

Sera dışı ve bitki standına ilişkin sıcaklık profilleri ile cam ve toprak yüzey sıcaklıklarını için toplam 23 adet Omega ANSI/MC96.1 T tipi termoeleman kullanılmıştır. Hava sıcaklığı termoelemanları, şekil 4.4 'deki gibi, radyasyon hatalarını önlemek için gölgeleme plakaları altına yerleştirilmiştir. Yaprak sıcaklığı termoelemanları ise, yaprak altı damar içine batırılmıştır. Güneş radyasyonu, sera dışı (1) ve sera içi(3) olmak üzere toplam 4 adet radyasyon sensörü (LI - 200SB piranometre) ile ölçülmüştür.

Sera içi ve dışı bağıl nem desenleri için ıslak termoeleman versiyonu kullanılmış olup; bağıl nem, kuru ve ıslak termometre sıcaklıklarının fonksiyonu olarak hazırlanmış bir psikrometrik alt model ile saptanmıştır. Şekil 4.6 'daki fotoğrafta görüldüğü gibi, hava hızının ölçülmesinde Wilh. Lambrecht GmbH 641 N kızgın telli anemometre ve CO₂ konsantrasyonunun ölçülmesinde 1 adet Siemens TN501331 CO₂ analizörü kullanılmıştır. Algılayıcılar ile veri toplama sistemi arasındaki elektriksel bağlantıların yapılması şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Deney standı ve sensör konumları

Sera dışında ve içinde oluşan evaporation, 2 adet standart buharlaşma kabı ($d=1220$ mm, $h=254$ mm) kullanılarak günlük olarak ölçülmüştür.

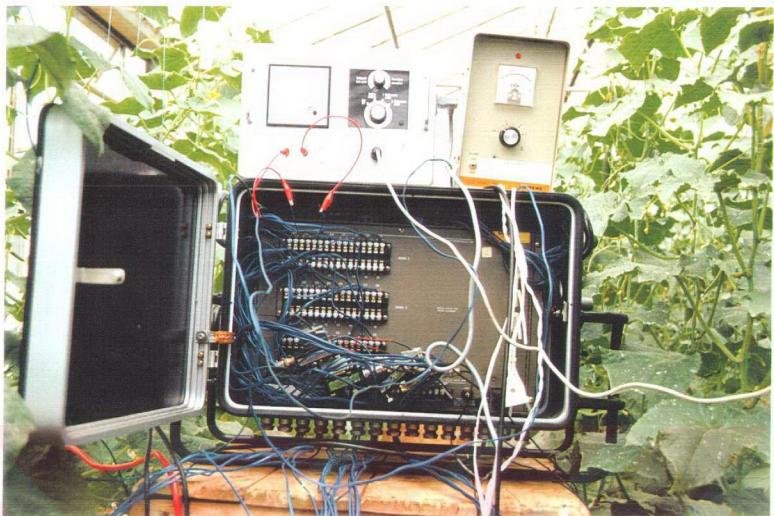
Ayrıca, bitki standı içinde termo elemanlarından başka, şekil 4.8 'deki fotoğrafta görülen Omega OS - 2000A infrared pirometresi ile güneşli ve gölgeli koşullarda yaprak, toprak ve cam yüzey sıcaklıklarını anlık olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.4. Kaye Instruments Digistrip II dijital veri toplama sisteminin özellikleri
(Kaye Instruments)

Boyu Ağırlık	44.5x31.1x48.3 cm 20.5 kg
Güç	210 - 285 VAC 50 Hz, boş 50 W
sigorta	0.75 A-slo-blo 220/250 AC
çevre sıcaklığı	0 - 50 °C
giriş kanal kapasitesi	2x16 kanal 48 kanala genişletilebilir.
tarama hızı	8 kanal/s
giriş empedansı	> 10^9 Ω
Maksimum genel mod gerilimi	170 V
gerilim girdilerinin doğruluğu	± % 0.003
çözünürlük	1:65 535
duyarlılık	0.5 μV
sıcaklık katsayısı	±% 0.005/°C
standart fonksiyonlar	
gerilim	65mV, 650 mV, 6500mV
termoelemanlar	E, J, K, R, S, T (°C yada F)
platinyum RTD	100 Ω/1 ma
kullanıcı tanımlı fonksiyonlar	32 doğrusal /16 biriktirmeli fonksiyon
Veri kaydetme aralığı	1 - 9999 dakika
yazıcı tipi	5 x 7 do matriks 137 sütun üzerine
yazma hızı	3.5 kanal/s
Başlık alanı	8 karakter / kanal alfanümerik , 128
Bilgisayar arabirimleri	standart RS232 C ve 20 ma(pasif) TTY



Şekil 4.5. Kaye Instruments Digistrip II digital veri toplama sistemi



Şekil 4.6. Kızgın telli anemometre, CO₂ analizörü ile veri toplama sistemine olan tüm bağlantılar



Şekil 4.7. Deney standı elektriksel iletişim kablolarının veri toplama sistemine bağlanması



Şekil 4.8. Omega OS-2000A infrared pirometresi ile yaprak yüzey sıcaklığının ölçülmesi

4.1.5. Model ve alt modellerde kullanılan girdiler

Model ve alt modellerde kullanılan girdiler, sabit ve değişken veri setlerinden oluşmuştur. Modelde kullanılan sabit girdiler, seranın örtü ve taban malzemesi ile bitki örtüsüne ilişkin verileri içermektedir. Bu girdiler çizelge 4.5'de literatüre dayalı olarak verilmiştir. Modelin çalıştırılmasında kullanılan değişken veri seti ise, Antalya koşullarında sera bitki standında kurulu bulunan deney simülatöründeki sensörler tarafından algılanmıştır.

Çizelge 4.5. Modelde kullanılan sabit girdiler

Veriler	Değeri	Literatür no.
Bitki örtüsü	hiyar	-
Bitki sıraları yönü	kuzey-güney	-
Taban yüzey malzemesi	toprak	-
Sera örtü malzemesi	tek cam	-
Havalandırma modu	çatı+pencere	-
c_{PL} bitkinin özgül ısısı	$4186 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	*
c_R kloroplasttaki CO_2 konsantrasyonu	50 ppm	62
d_L yaprak kalınlığı	0.002 m	**
h_{cr} CO_2 özümleme entalpisi	$10.659 \times 10^6 \text{ J}(\text{kgCO}_2)^{-1}$	62
Q_{10} bağıl değişim faktörü	2	30,64
P atmosfer basıncı	101.325 kPa	42
R_{dl} yaprağın karanlık respirasyonu oranı	$0.042 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$	***
R_{ds} toprağın karanlık respirasyonu oranı	$0.042 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$	***
r_m mezoofil direnci	300 s m^{-1}	****
α_{LWR} yaprağın LWR soğurma katsayısı	0.95	8
α_{NIR} yaprağın NIR soğurma katsayısı	0.15	57
α_{PAR} yaprağın PAR soğurma katsayısı	0.85	57
ε_{LWR} yaprağın LWR yayınım katsayısı	0.95	57
η_c CO_2 taşınımı yaprak yüzey faktörü	1.2	53
η_t ISI, SU buharı taşınımı yaprak yüzey faktörü	2	53
ρ_L yaprağın özgül ağırlığı	1000 kg m^{-3}	*
ρ_{NIR} yaprağın NIR yansıtma katsayısı	0.51	57
ρ_{PAR} yaprağın PAR yansıtma katsayısı	0.09	57
σ Stephan-Boltzman sabiti	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$	85
τ_{NIR} yaprağın NIR geçirme katsayısı	0.34	57
τ_{PAR} yaprağın PAR geçirme katsayısı	0.06	57
ε_c camın LWR yayınım katsayısı	0.94	29
ρ_c camın SWR yansıtma katsayısı	0.10	43
τ_{Lc} camın LWR geçirme katsayısı	0.03	44
ε_F toprak yüzeyinin LWR yayınım katsayısı	0.95	57
ρ_F toprak yüzeyinin SWR yansıtma katsayısı	0.20	18,62
standart meridyen	30°	43
I_{sc} güneş sabiti	1367 Wm^{-2}	40,83

-) deneme ortamı,

*) suya eşdeğer alınmıştır,

**) ölçülmüştür,

***) referans karanlık respirasyonuna göre, 288 K 'deki karanlık respirasyonu hesaplanmıştır,

****) C_3 bitkileri için kaynaklara dayalı olarak hesaplanmıştır.

4. 2. Yöntem

Yapılan bu tez çalışmasında, sera mikroklimasına ilişkin enerji ve kütle transfer işlemlerini tanımlayan zamanla değişen bir model geliştirilmiştir; bitki ile mikroçevresi arasında etkili olan fiziksel ve fizyolojik işlemler araştırılmıştır.

Bitki örtüsü, yaklaşık dikdörtgen kesit alanlı paralel diziler halinde ve değiştirilebilir bitki mimari parametrelerine göre modellenmiştir. Bitki örtüsü içindeki radyasyon transferi, kısa dalgalı ve uzun dalgalı radyasyon ile net radyasyon alt modelleri kullanılarak İrdelenmiştir. Bitki örtüsü içindeki moleküler taşınım işlemlerinin araştırılmasında ısı, su buharı ve CO_2 taşınımı alt modelleri kullanılmıştır. Bireysel alt modellerin her biri hiyar bitki standı için düzenlenmiştir.

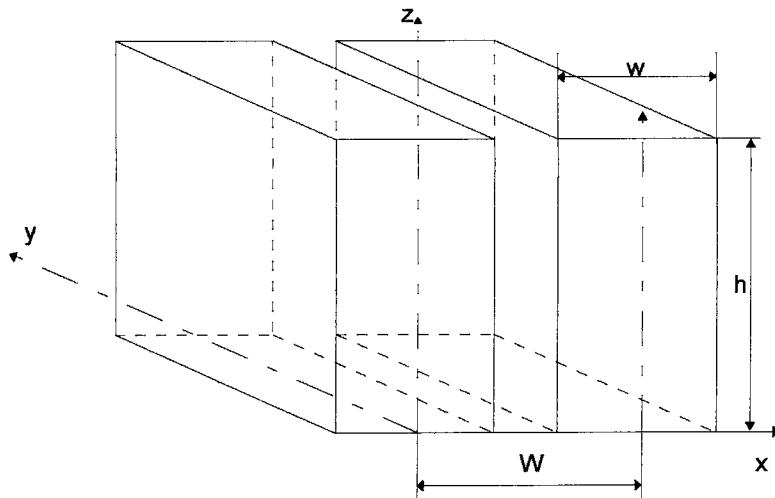
Bitki mimarisi, sera yapısı ve bitkiler üzerindeki klimayla ilgili değişkenler radyasyon transferi, ısı ve kütle taşınım işlemleri ile bitki cevaplarının modellenmesi için girdi olarak kullanılmıştır. Bitki yaprakları ve sera havasının diferansiyel tabakasında eşzamanlı enerji ve kütle dengesi uygulanmış; teorik yaklaşımlar bir bilgisayar simülatöründe birleştirilmiştir. Modelin simülasyonuyla elde olunan çıktılar, eşzamanlı olarak alınan deneysel verilerle karşılaştırılmış; sera mikroklimasına ilişkin analiz sonuçları olarak kullanılma sunulmuştur. Her bir çıktı değişkeni için model tahminleri ve ölçümler, istatistiksel parametreler kullanılarak sınınamıştır.

Analiz sonuçlarının ilk bölümü, hava sıcaklığı, yaprak sıcaklığı, bağıl nem, CO_2 konsantrasyonu ve hava hızı ile bazı klimatolojik parametrelerin hem günlük değişimlerini hem de dikey profillerini içermiştir. Analiz sonuçlarının ikinci bölümü radyasyon, ısı ve kütle transferi akı yoğunlıklarının diferansiyel ve kümülatif günlük değişimleri ile dikey profilleri kapsamında ele alınmıştır. Ayrıca, hiyar bitki standında değişen ısı ve kütle konveksiyonu, boyutsuz sayılar, radyasyon, aerodinamik ve stomatal dirençler ile film katsayıları kullanılarak İrdelenmiştir.

Bitkinin cevap mekanizması, mikroklimatolojik direnç yaklaşımına göre araştırılmıştır.

4. 2. 1. Bitki standı modeli

Bitki standı modeli, ele alınan bitkinin stand yapısına göre tasarlanır. Yatay sera boyutları sonsuza giderken bitki elemanlarının sırasal dağılımları periyodik özellikler gösterir. Bir çok bitki için sıraya dik kesiti elipsoidale yakın olsa da, domates ve hiyar gibi yüksek sera bitkilerinin dikdörtgene yakın bir kesite sahip olduğu gözlenmiştir. Buna göre, şekil 4.9 'daki gibi, bitki standı sera içinde paralel sıralı diziler halinde modellenebilir. Kartezyen koordinat sistemine göre, x-ekseni sıraya dik, y-ekseni sıra yönünde ve z-ekseni de yukarı yönde seçilmiştir. Koordinat sisteminin orjini, simetri eksenine uygun biçimde yerleştirilmiştir. Modelde, h bitki yüksekliği, w stand genişliği ve W sıralar arası uzaklıktır.



Şekil 4.9. Bitki standı modeli

4. 2. 1. 1. Yaprak alan indeksi

Toplanan yaprak örneklerinin yaprak alanmetresinden yapılan ölçüm verilere göre, yaprak uzunluğu (l_L) ve genişliğinin (w_L) fonksiyonu olarak regresyon katsayısı (R^2) 0.952 olan aşağıda verilen yaprak alanı eşitliği elde edilmiştir :

$$A_L = 0.65996 l_L \cdot w_L - 0.00159 \quad (m^2) \quad (4.1)$$

Bitkinin yaprak alan indeksi (LAI) düşey profilde ölçülen toplam yaprak alanının ilgili taban alanına oranı olup; LAI ile bitki yüksekliği (h) arasında belirtme katsayısı 0.997 olan aşağıdaki regresyon eşitliğine ulaşılmıştır:

$$LAI = 0.92188 \cdot h - 0.07468 \quad (4.2)$$

Yaprak alan indeksi, yaprak miktarını gösteren genel bir parametre olmasına karşın, stand içindeki yaprak alanı hacimsel dağılımlarının tanımlanmasında kullanılır. Bu dağılımlar genellikle dikey ve yatay dağılım fonksiyonlarıyla gösterilirler.

Dikey yaprak alanı dağılımının tüm bitki standı için integrasyonu, yaprak alan indeksine karşılık gelir (Yang et al 1990d):

$$LAI = \int_0^h a_z(z) dz \quad (4.3)$$

Yatay yaprak alanı dağılımı, dikey yaprak alanı dağılımına benzer şekilde bitki standının simetri ekseni göre integrasyonu yaprak alan indeksini verir (Yang et al 1990d) :

$$LAI = \int_{-1/2}^{1/2} a_x(x) dx \quad (4.4)$$

4. 2. 1. 2. Dağılım fonksiyonları

Yaprak alanı dikey yoğunluk fonksiyonunun tanımlanmasında genellikle beta dağılımı kullanılır (Goel and Strelbel 1984, Yang et all 1990d):

$$a_z(z) = LAI_i \beta(z) \quad (4.5)$$

Beta dağılımı, $0 \leq \xi \leq 1$ kapalı aralığında olasılık yoğunluk fonksiyonu özelliği taşımaktadır. Beta dağılımı (β), gama fonksiyonu (Γ) terimleriyle tanımlanır (Chia and Huntchison 1991):

$$\beta(\xi) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \xi^{(a-1)} (1-\xi)^{(b-1)} \quad 0 \leq \xi \leq 1 \quad (4.6)$$

Beta dağılımı, bitki standının $[0, h]$ kapalı aralığında tanımlanan z^* değişkenine göre düzenlenirse aşağıdaki eşitliğe ulaşılır:

$$\beta(z^*) = \frac{1}{h} \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left(\frac{z^*}{h} \right)^{(a-1)} \left(1 - \frac{z^*}{h} \right)^{(b-1)} \quad 0 \leq z^* \leq h \quad (4.7)$$

Gama fonksiyonu (Γ), aşağıdaki verilen Stirling'in fonksiyonel yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilir (Goel and Strelbel 1984):

$$\Gamma(x) = \sqrt{\frac{2\pi}{x}} x^x \exp\left(-\frac{1}{12x} - \frac{1}{360x^3} - x\right) \quad (4.8)$$

Buradaki x parametrik değişken olup; gama fonksiyonunun hesaplanmasıında $x=a$, $x=b$ ve $x=a+b$ parametreleri kullanılır.

a ve b katsayıları, dağılımin birinci ve ikinci momentlerine bağlı olarak şu eşitliklerle hesaplanır (Chia and Huntchinson 1991):

$$a = \frac{\mu_h | \mu_h(h - \mu_h) - \sigma_h^2 |}{h \sigma_h^2} \quad (4.9)$$

$$b = \frac{a(h - \mu_h)}{\mu_h} \quad (4.10)$$

Dikey yoğunluk fonksiyonunun ortalaması ve varyansı aşağıda verilen istatistiksel eşitliklerle saptanır :

$$\mu_h = \frac{1}{LAI} \sum_{i=1}^{n_L} z_i LAI_i \quad (4.11)$$

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{LAI} \sum_{i=1}^{n_L} (z_i - \mu_h)^2 LAI_i \quad (4.12)$$

Burada, n_L örnek bitkinin yaprak sayısı, LAI_i bitki standında z_i 'deki yaprak alan indeksidir.

Bitki standında yapılan ölçümler sonucunda, bitki standına ilişkin dikey yoğunluk fonksiyonunun ortalaması ve varyansı, belirtme katsayıları (R^2) sırasıyla 0.978 ve 0.972 olan aşağıdaki regresyon eşitlikleriyle saptanmıştır :

$$\mu_h = 0.60808 h - 0.22335 \quad (4.13)$$

$$\sigma_h^2 = 0.069746 h^2 - 0.05678 h + 0.01155625 \quad (4.14)$$

Yaprak alanının yatay yoğunluk fonksiyonu kosinüs dağılımına göre tanımlanır: (Yang et al 1990):

$$a_x(x) = W \cdot LAI \cdot C(x) \quad -W/2 \leq x \leq W/2 \quad (4.15)$$

Bitki topluluğunun yatay yönde sonsuz düzlem üzerinde birbirine paralel stand dizilerinden oluşan kabul edilebilir. Buna göre, yaprak alanı dağılımının periyodu W olan periyodik bir fonksiyon olarak kosinüs dağılımı kullanılabilir. Kosinüs dağılım fonksiyonu genellikle Fourier serileriyle tanımlanır:

$$C(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{W} x\right) \quad (4.16)$$

Bu eşitlikte, a_0 ve a_n Fourier katsayıları, n birbirine paralel sıra sayısı, x yatay konumu gösterir.

4. 2. 1. 3. G - fonksiyonu

Bitki stand mimarisinin tanımlanmasında, özellikle radyasyon transferinin modellenmesinde kullanılan diğer önemli parametre de G-fonksiyonudur. G – fonksiyonu, belirli bir yöndeki birim yaprak alanının ortalama izdüşümü olarak ifade edilmektedir.

Yaprak eğim indeksi (χ_L) ve güneş zenit açısına (θ_s) göre hesaplanan G – fonksiyonu için bazı yarı empirik eşitlikler bulunmaktadır (Sellers 1985, Myneni et al 1989):

$$G(z, \theta_s) = 0.5 - 0.633 \chi - 0.33 \chi^2 + 0.877 [1 - 2(0.5 - 0.633 \chi - 0.33 \chi^2)] \cos \theta_s \quad (4.17)$$

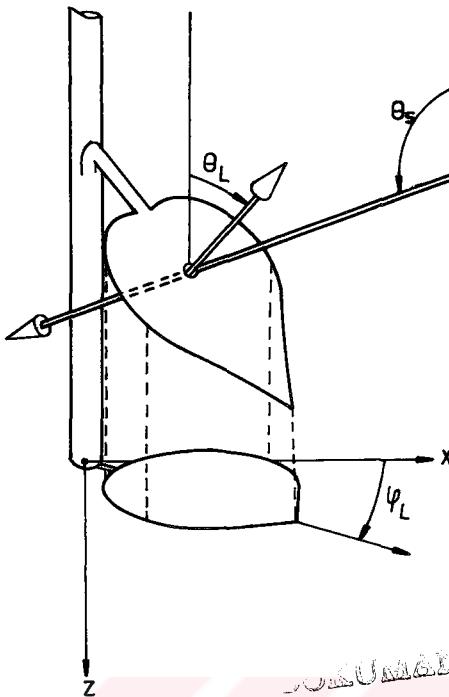
Bu eşitlik $-0.4 < \chi_L < 0.6$ aralığında geçerlidir.

4. 2. 1. 4. Yaprak eğim indeksi

Bitki standında ağırlıklı olan yaprak yöneliminin belirlenmesi hem gözleme hem de yapılan ölçümlere dayanır. Yaprak eğim indeksi, şekil 4.10'da tanımlanan yaprak zenit ve azimut açıları ile yaprak alanı yön dağılım fonksiyonuna göre ifade edilir (Gutschick 1984, Myneni et al 1989):

$$\chi_L(\theta_L, \phi_L) = \pm \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} |\sin \theta_L - g(\theta_L, \phi_L)| d\theta_L \quad (4.18)$$

Küresel, yatay ve dikey dağılımlar için, yaprak eğim indeksleri sırasıyla 0, 1 ve -1 olan ekstrem koşullarla tanımlanırlar.



Şekil 4.10. Yaprağın azimut (ϕ_L) ve zenit (θ_L) açıları (Gutschick 1984)

4. 2. 2. Radyasyon transferi modeli

Bitki standı içindeki radyasyon transferi, temelde, kısa ve uzun dalgalı radyasyon ile net radyasyon kavramı kullanılarak araştırılmıştır.

4. 2. 2. 1. Güneş radyasyonu alt modeli

Bitki örtüsü üzerine gelen güneş radyasyonu, toprak yüzeyi, yapraklar ve sera örtüsü arasındaki çoklu yansımalarla artırmaktadır. Bitki standı içindeki kısa dalgalı radyasyon direkt, diffuz ve yayılan bileşenleri ile PAR ve NIR bileşenlerinden oluşur (Spitters et al 1986, Spitters 1986).

Belirli bir zaman için güneşin konumu zenit (θ_s) ve azimut (ϕ_s) açılarıyla karakterize edilir. Güneş zeniti, yerel düşey ile güneş ışını arasındaki açı; güneş azimutu ise, kuzyey-güney doğrultusu ile güneş ışınının yatay izdüşümü arasındaki açı olarak tanımlanır (Lang et al 1985, Yang et al 1990a). Bu hesaplamalar 2. Bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

4. 2. 2. 1. Direkt güneş radyasyonu

Işın izdüşüm yaklaşımını kullanarak direkt güneş radyasyonunun bitki standı içindeki penetrasyonu modellenmiştir. Yaprak elemanlarını geçerek yansıtılan ve/veya geçirilen radyasyonun tümünün yalnız diffuz bileşene katkıda bulunduğu varsayılarak, şekil 4.11' de gösterildiği gibi, $dxdydz$ diferansiyel hacmi içindeki direkt güneş radyasyonunun yaprak tarafından tutulması aşağıdaki biçimde tanımlanabilir (Yang et al 1990a):

$$dl_{\perp} = -I(z) G(\theta_{\perp}, z) dLA_{OP} \quad (4.19)$$

Burada, $I(z)$ gelen direkt güneş radyasyonu, $G(\theta_{\perp}, z)$ G - fonksiyonu, θ_{\perp} zenit açısı, dLA_{OP} OP ışık yolu boyunca söz konusu olan kümülatif yaprak alan indeksinin diferansiyelidir.

Şekil 4.11'den direkt güneş radyasyonu zenit açısı için aşağıdaki trigonometrik bağıntılar yazılabilir :

$$\cos \theta_{\perp} = \frac{|OR|}{|OP|} \quad (4.20)$$

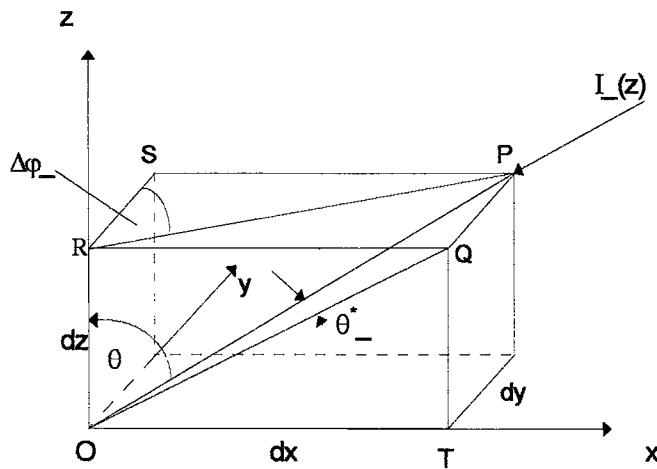
$$\sin \theta_{\perp} = \frac{|PR|}{|OP|} \quad (4.21)$$

$$\sin^2 \theta_{\perp} + \cos^2 \theta_{\perp} = 1 \quad (4.22)$$

OP yolu boyunca yaprak alanı yoğunluğu hem yatay hem de dikey bileşenler boyunca değişiyorsa, dLA_{OP} yaprak alan indeksi θ^* ve dLA_{OQ} 'nun fonksiyonu olmalıdır :

$$dLA_{OP} = \sec \theta^* dLA_{OQ} \quad (4.23)$$

θ^* , görünür işin doğrultusu (OP) ve OP'nin xz düzlemini üzerindeki izdüşümü (OQ) arasındaki açıdır.



Şekil 4.11. $dxdydz$ diferansiyel hacmindeki direkt güneş radyasyonu transferi (Yang et al 1990a)

Şekil 4.11'den θ^* açısı için aşağıdaki trigonometrik bağıntılar yazılabilir :

$$\cos \theta^* = \frac{|OQ|}{|OP|} \quad (4.24)$$

$$\sin \theta^* = \frac{|PQ|}{|OP|} \quad (4.25)$$

(4.24) nolu eşitlikten θ^* açısının belirlenmesi için OQ uzunluğu bilinmelidir. Bu amaçla $\Delta\phi$ açısından yararlanılır. $\Delta\phi$ açısı, görünür işin doğrultusunun xy düzlemi üzerindeki izdüşümü (PR) ile y doğrultusu arasındaki açıdır. Şekil 4.11 'den $\Delta\phi$ açısının belirlenmesinde aşağıdaki trigonometrik bağıntı kullanılır :

$$\sin \Delta\phi = \frac{|PS|}{|PR|} \quad (4.26)$$

Eşitlik (4.20) 'den OR ve (4.21)'den PR uzunluğu saptanır; PS=QR=OT ve OR=QT olduğu bilindiğine göre, θ^* açısı için aşağıdaki eşitliğe ulaşılır :

$$\sec \theta^* = \frac{|OP|}{|OQ|} = \frac{|OP|}{\sqrt{|PS|^2 + |OR|^2}} = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta_+ \sin^2 \Delta\phi_- + \cos^2 \theta_-}} \quad (4.27)$$

$dLAI_{OQ}$ için diferansiyel notasyonda bilinen zincir kuralı uygulanır ve yatay ve dikey yaprak alanı yoğunluk fonksiyonlarıyla tanımlanabilir (Yang et al 1990a):

$$dLAI_{OQ} = - \left[\frac{\partial LAI}{\partial x} dx + \frac{\partial LAI}{\partial z} dz \right] = - [a_x(x)dx + a_z(z)dz] \quad (4.28)$$

Eşitlik (4.19) 'un çözümlenmesi için x ve z arasındaki ilişkilerin saptanması gereklidir. Eşitlik (4.20), (4.21) ve (4.26) 'yi kullanarak x-z arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

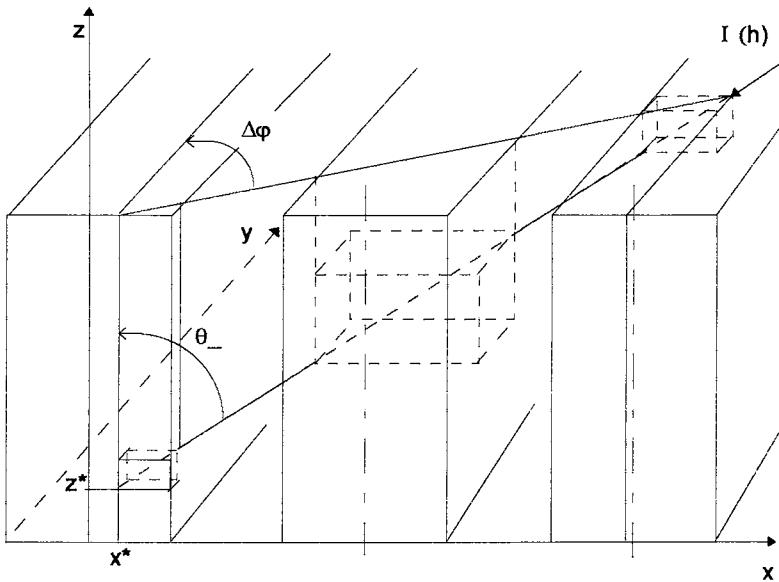
$$\frac{dx}{dz} = \frac{|OT|}{|QT|} = \frac{|OP| \sin \theta_- \sin \Delta\phi_-}{|OP| \cos \theta_-} = \tan \theta_- \sin \Delta\phi_- \quad (4.29)$$

Buna göre, (4.23) eşitliğindeki terimler yerine konulursa aşağıdaki denkleme ulaşılır :

$$dLAI_{OP} = \sec \theta^* \cdot \{a_x[x(z)] \tan \theta_- \sin \Delta\phi_- + a_z(z)\} dz \quad (4.30)$$

Şekil 4.12 'de gösterilen bitki standının belirli bir noktasındaki (x^*, z^*) direkt güneş radyasyonu penetrasyon fonksiyonu, (4.30) denkleminin (4.19) nolu eşitlikte yerine konulmasıyla ve $[z^*, h]$ kapalı aralığında integralinin alınmasıyla saptanır (Allen 1974, Yang et al 1990a):

$$P(x^*, z^*) = \exp \left[- \sec \theta^* \int_{z^*}^h G(\theta_-, z) \{a_x[x(z)] \tan(\theta_-) \sin(\Delta\phi_-) + a_z(z)\} dz \right] \quad (4.31)$$



Şekil 4.12. Direkt güneş radyasyonu modeli (Yang et al 1990a)

$[z^*, h]$ aralığından sonra, direkt güneş radyasyonu penetrasyonu $[-W/2, W/2]$ kapalı aralığı için hesaplanır:

$$P_{-} = \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} P(x^*, z^*) dx^* \quad (4.32)$$

4. 2. 2. 1. 2. Diffuz güneş radyasyonu

Direkt ve diffuz radyasyon arasındaki en temel farklılık, diffuz radyasyonun üst yarıkürenin tüm yönlerinden yapraklara ulaşabilmesidir. Bitki yaprakları tarafından yayılan radyasyon hariç tutulursa, belirli bir yönde diffuz radyasyona ilişkin tüm teorik yaklaşımların direkt radyasyon analiziyle benzerlikler gösterdiği bilinmektedir. Ancak, diffuz güneş radyasyonu penetrasyonu ilgili koordinatlarda zamanla değişmez, aynı kalır.

Bitki örtüsü üzerine gelen diffuz güneş radyasyonu Lambert'in kosinüs yasasından yararlanarak tanımlanır (Rosenberg et al 1983, Ültanır 1987):

$$i_{\approx} = i_{\approx} \cos(\theta_{\approx}) \quad (4.33)$$

Burada, i_{\approx} ($\theta_{\approx}, \phi_{\approx}$) yönünde bitki üstündeki ışılma, θ_{\approx} ve ϕ_{\approx} diffuz zenit ve azimut açılarıdır.

İşinim her yönde ilerlediğinden bir ortamdaki diffuz ışılma, her bir radyal dilim için tanımlanır (Kılıç ve Öztürk 1984):

$$i_{\approx} = \frac{l(h)_{\approx}}{\pi} \quad (4.34)$$

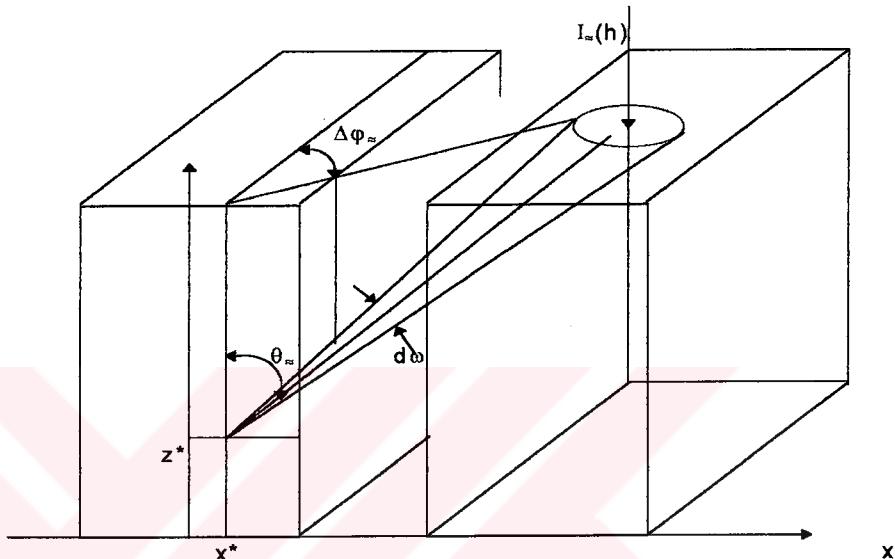
Bitki standı içindeki diffuz güneş radyasyonu değişimi, aşağıdaki eşitlikle tanımlanır (Yang et al 1990a):

$$dl_{\approx} = i_{\approx} P(x^*, z^*) d\omega \quad (4.35)$$

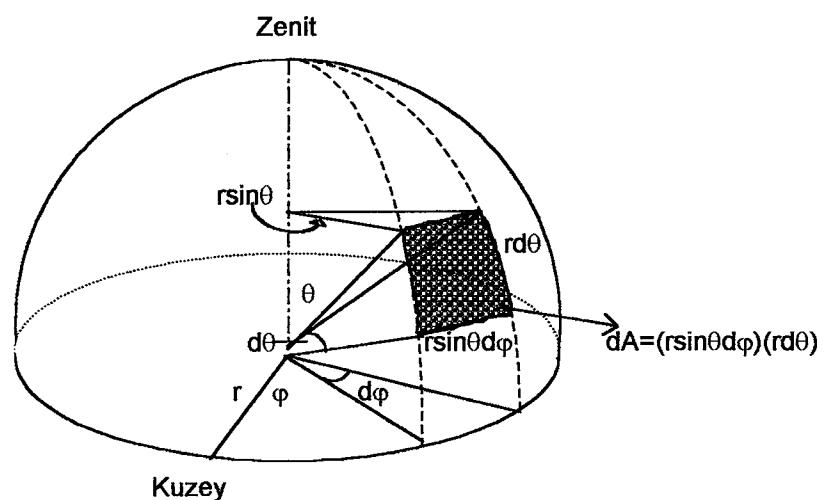
Burada, $P(x^*, z^*)$ _(x^*, z^*) noktasında θ_{\approx} ve φ_{\approx} açılarıyla ifade edilen rastgele bir yönde oluşan direkt güneş radyasyonu penetrasyon fonksiyonu, $d\omega$ şekil 4.13 'de verilen diferansiyel hacim açısıdır.

Diferansiyel hacim açısı ($d\omega$) koni taban alanının (dA) yarıküre yarıçapının (r) karesine oranı olup; şekil 4.14 'e göre aşağıdaki gibi tanımlanır (Woodword and Sheehy 1983):

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{(r \sin \theta_{\approx} d\varphi_{\approx})rd\varphi_{\approx}}{r^2} = \sin \theta_{\approx} d\theta_{\approx} d\varphi_{\approx} \quad (4.36)$$



Şekil 4.13. Diffuz güneş radyasyonu modeli (Yang et al 1990a)



Şekil 4.14. θ ve φ ile $d\omega$ arasındaki ilişki (Woodword and Sheehy 1983)

(4.33) ... (4.36) nolu eşitlikleri kullanarak sera bitki standında diffuz güneş radyasyonu penetrasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır (Yang et al 1990a):

$$P(x^*, z^*)_{\approx} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} P(x^*, z^*)_{\approx} \sin(\theta_{\approx}) \cos(\theta_{\approx}) d\theta_{\approx} d\phi_{\approx} \quad (4.37)$$

Burada, $P(x^*, z^*)_{\approx}$ fonksiyonunun hesaplanması θ_{\approx} ve $d\phi_{\approx}$ yerine θ_{\approx} ve $d\phi_{\approx}$ açıları kullanılır. $[z^*, h]$ aralığından sonra, diffuz güneş radyasyonu penetrasyonu $[-W/2, W/2]$ kapalı aralığı için de hesaplanır:

$$P_{\approx} = \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} P(x^*, z^*)_{\approx} dx^* \quad (4.38)$$

4. 2. 2. 1. 3. Bitki elemanlarından yayılan güneş radyasyonu

Bitki standı içindeki güneş radyasyonunun yayılmasına temelde yapraklar neden olur. Bu şekilde dağıtılan radyasyon, yaprakların yansımıma ve geçirme karakteristiklerine göre değişir.

Radyasyon kaynağı hacimsel olarak alınır ve diferansiyel hacim içerisinde çok yönlü yayılma olmadığı varsayılsa, yayılan radyasyon diffuz radyasyona benzer yaklaşımalarla modellenebilir.

(x^{**}, z^{**}) noktasına göre, (x^*, z^*) gözlem noktasındaki sonsuz küçük bir alan üzerindeki aşağı yönde yayılan ışınım şu eşitlikle hesaplanır (Yang et al 1990a):

$$dI_{\infty} = i(x^{**}, z^{**}) \downarrow \cos \theta_{\infty} P(x^*, z^{**}-z^*)_{\approx} \sin \theta_{\infty} d\theta_{\infty} d\phi_{\infty} \quad (4.39)$$

Bu eşitlikte, $i(x^{**}, z^{**}) \downarrow$ yayılan ışınının ışima alanının izotropik olduğunu varsayarak, (x^*, z^*) gözlem noktası üstündeki herhangi bir (x^{**}, z^{**}) noktasındaki diferansiyel bir hacimde oluşan aşağı yöndeki ışınım, θ_{∞} ve ϕ_{∞} zenit ve azimut açılarıdır. $P(x^*, z^{**}-z^*)_{\approx}$ penetrasyon fonksiyonunun hesaplanması (4.31) nolu eşitlikteki integrasyon aralığı $[z^*, h]$ aralığı yerine $[z^*, z^{**}]$ olarak alınır.

(x^{**}, z^{**}) noktasında aşağı yönde olan ışima şu eşitliğe karşılık gelir :

$$i(x^{**}, z^{**}) \downarrow = \frac{1}{\pi} [I(x^{**}, z^{**}) \tau(z^{**}) G(\theta, z^{**}) d\Delta \Omega_{OP^{**}}] \quad (4.40)$$

Burada, $I(x^{**}, z^{**})$, (x^{**}, z^{**}) noktasına ulaşan hem direkt hem de diffuz bileşenleri içeren toplam güneş radyasyonu akı yoğunluguudur. $\tau(z^{**})$ yaprakların aşağı yönde efektif kısa dalga geçirme katsayısıdır. $d\Delta \Omega_{OP^{**}}$ θ_{∞} , $\Delta\phi_{\infty}$, z^{**} değişkenlerini kullanarak (4.30) eşitliğinden hesaplanan OP boyunca (x^{**}, z^{**}) noktasında kümülatif yaprak alan indeksinin diferansiyeline karşılık gelir.

(4.39) nolu eşitliğin hacimsel integrasyonu, belirli bir (x^*, z^*) noktasında aşağı yönde yayılan toplam ışınımı verir.

Sonuç olarak, z^* derinliğinde aşağı ve yukarı yönlerde yayılan radyasyon penetrasyon fonksiyonları sırasıyla aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır (Yang et al 1990a):

$$P_{\infty} \downarrow = \int_{z^*}^h [(1-d_s)P(z^{**})_+ + d_s P(z^{**})_{\approx}] \tau(z^{**}) dz^{**} \quad (4.41)$$

$$P(x^*, z^{**} - z^*)_{\approx} G(0, z^{**}) a_z(z^{**}) dz^{**}$$

$$P_{\infty} \uparrow = \int_0^{z^*} [(1-d_s)P(z^{**})_- + d_s P(z^{**})_{\approx}] \rho(z^{**}) P(x^*, z^{**} - z^*)_{\approx} G(0, z^{**}) a_z(z^{**}) dz^{**} \quad (4.42)$$

$$+ \rho_F [(1-d_s)P(0)_- + d_s P(0)_{\approx}] P(x^*, z^* - 0)$$

Bu eşitlikte, $P(x^*, z^{**} - z^*)_{\approx}$ z^{**} noktasından daha alttaki z^* noktasına diffuz radyasyonun penetrasyon fonksiyonudur. Ayrıca, $\rho(z^{**})$, yaprakların yukarı yönde kısa dalga efektif yansıtma katsayısı, ρ_F sera tabanının kısa dalga yansıtma katsayısıdır.

(4.42) eşitliğinin sağ tarafındaki ikinci terim sera taban yüzeyi tarafından olan yansımaya karşılık gelir. Bu eşitliğin sayısal değeri, $0 \leq z^* \leq h$ kapalı aralığında bitki taban sisteminin efektif kısa dalga yansıtma katsayıdır ve genel olarak bitkinin albedosu olarak bilinir.

4. 2. 2. 1. 4. Toplam güneş radyasyonu

Bitki standının herhangi bir z^* noktasındaki toplam güneş radyasyonu akı yoğunluğu direkt, diffuz ve aşağı doğru yayılan bileşenlerin toplamından hesaplanır (Yang et al 1990a):

$$I(z^*) = \{(1-d_s)P_- + d_s P_{\approx} + P_{\infty} \downarrow\} I(h) \quad (4.43)$$

Belirli bir (x^*, z^*) noktasındaki bitki standı geçirgenliği direkt, diffuz ve aşağı yönde yayılan penetrasyon fonksiyonlarının toplamından oluşur:

$$\tau(x^*, z^*) = (1-d_s)P(x^*, z^*)_+ + d_s P(x^*, z^*)_{\approx} + P(x^*, z^*)_{\infty} \downarrow \quad (4.44)$$

Son eşitlik, $z^*=h$ için düzenlenirse, tüm bitki standı için efektif geçirgenlik katsayısına ulaşılır.

4. 2. 2. 1. 5. Fotosentez etkili radyasyon

Bitki standı içinde etkili olan PAR penetrasyon fonksiyonu direkt PAR, diffuz PAR ve aşağı-yukarı doğru yayılan PAR penetrasyon oranlarının toplamından oluşur:

$$P(x^*, z^*)_{PAR} = D_- (1-d_s)P(x^*, z^*)_+ + D_s d_s P(x^*, z^*)_{\approx} + P(x^*, z^*)_{\infty, PAR} \downarrow + P(x^*, z^*)_{\infty, PAR} \uparrow \quad (4.45)$$

Bu eşitlikte, d_s diffuz radyasyon indeksi, D_- direkt, D_s diffuz PAR dönüşüm indeksleri olup; çizelge 2.2 ' de zenit açısının fonksiyonu olarak verilmiştir.

Bitki standının herhangi bir z^* noktasındaki PAR akı yoğunluğu, bitki örtüsü üzerindeki toplam güneş radyasyonu akı yoğunluğu ile PAR penetrasyon fonksiyonu kullanılarak hesaplanır :

$$I(z^*)_{\text{PAR}} = I(h) P(x^*, z^*)_{\text{PAR}} \quad (4.46)$$

4. 2. 2. 1. 6. Yakın kıızılötesi radyasyon

Bitki standı içinde 700-4000 nm'lik dalga boyu spektrumunda etkili olan NIR penetrasyon fonksiyonu, PAR'a benzer şekilde, direkt, diffuz ve yayılan bileşenlerin toplamından oluşur :

$$P(x^*, z^*)_{\text{NIR}} = (1-D_{\perp}) (1-d_{\infty}) P(x^*, z^*)_{\perp} + (1-D_{\infty}) d_{\infty} P(x^*, z^*)_{\infty} + P(x^*, z^*)_{\infty, \text{NIR}} \downarrow + P(x^*, z^*)_{\infty, \text{NIR}} \uparrow \quad (4.47)$$

Bitki standının herhangi bir z^* noktasındaki NIR akı yoğunluğu için, genellikle aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$I(z^*)_{\text{NIR}} = I(z^*) - I(z^*)_{\text{PAR}} \quad (4.48)$$

4. 2. 2. 2. Isıl radyasyon alt modeli

Uzun dalgalı radyasyonun kompozisyonu iki nedenden dolayı tekdüze değildir. Bunlardan ilki, yüzey elemanları tüm yönlerde eşit yoğunluklu enerji yaymazlar. İkinci, yayılan radyasyon farklı dalgaboylarında elektromagnetik dalgalarдан oluşur ve enerji, dalgaboylarının tüm aralıklarında tekdüze dağıtılmaz. Bir elemandan olan enerji yayınınının hacimsel dağılımı, üst yarıküre kavramıyla açıklanmaktadır (Rogers and Mayhew 1992).

Sera mikro-çevresinde isıl radyasyonun tüm spektral aralığında diffuz güneş radyasyonu için kullanılan üst yarıküre yaklaşımı kullanılabilir. Bu yaklaşımına göre, uzun dalgalı radyasyon penetrasyon fonksiyonu ile diffuz radyasyon penetrasyon fonksiyonu arasında bire bir ilişkiler türetilir. Uzun dalgalı radyasyonun modellenmesinde, diffuz radyasyona benzer olarak, bir yüzeyden yayılan ışımının üst yarıkürenin herhangi bir hacim açısı altında gerçekleştiği savlanır.

Gökyüzü, sera örtü malzemesi, sera tabanı yayının yüzeyleri gri cisim olarak varsayılsa, uzun dalgalı enerji yoğunlukları Stephan-Boltzmann denklemiyle hesaplanabilir (Rogers and Mayhew 1992):

$$I_L = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.49)$$

Burada, ϵ ele alınan yüzeye ilişkin yayının katsayısı, σ Stephan-Boltzmann sabiti, T sıcaklığıdır.

Gökyüzünden olan uzun dalgalı radyasyon, efektif gökyüzü sıcaklığı ya da standard yükseklikteki dış hava sıcaklığına (T_o , K) ve buhar basıncının (e_o , Pa) fonksiyonu olarak efektif gökyüzü uzun dalga yayınım katsayısına göre değişir (Asaeda and Vu 1993):

$$\epsilon_s = \epsilon_o + 5.95 \times 10^{-7} e_o \exp\left(\frac{1500}{T_o}\right) \quad (4.50)$$

Burada, ϵ_o konuma göre atmosferik yayınım katsayıısı olup; deniz kenarı için 0.70, iç bölgeler için 0.60 alınabilir.

Bitki örtüsü üzerinde/altımda aşağı yönde uzun dalgalı radyasyon işimaları aşağıdaki eşitlik kalibriyle hesaplanır (Kimbal 1986):

$$I_L \downarrow = \tau_c \cdot \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_o^4 + \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_c^4 \quad (4.51)$$

Burada, τ_c cam örtünün uzun dalga geçirgenliği, ϵ_s gökyüzünün uzun dalga yayınım katsayıısı, ϵ_c cam örtünün uzun dalga yayınım katsayıısı, T_c cam yüzey sıcaklığıdır.

Bitki örtüsü altında yukarı yönde oluşan ısıl işimalar da benzer biçimde şu eşitlikle hesaplanır (Kimbal 1986):

$$I_L \uparrow = \epsilon_F \cdot \sigma \cdot T_F^4 \quad (4.52)$$

Burada, ϵ_F toprak yüzeyinin uzun dalga yayınım katsayıısı, T_F toprak yüzeyinin sıcaklığıdır.

Sera makroklimasını tanımlayan büyük yaprak modellerine göre, bitki elemanları arasında yayılan ısıl radyasyon ise şu eşitlikle tanımlanır :

$$I_L' = \epsilon_L \cdot \sigma \cdot T_L^4 \quad (4.53)$$

Bu eşitliğin hesaplanmasında bitki örtüsünden yayılan enerjinin yalnız yaprak yüzeylerinden olduğu ve yaprak yüzeylerinin karşılıklı olarak etkileşimde kaldığı varsayılar.

Bitki standı içindeki kısa dalgalı radyasyon ile ısıl radyasyonun davranışı benzer olduğundan direkt ve diffuz radyasyon modelleme tekniklerinden yararlanılır. Belirli bir z^* derinliğinde yapraklardan aşağı ya da yukarı doğru oluşan ısıl radyasyon akı yoğunluğu şu şekilde tanımlanabilir:

$$dI_{LL}(z^*) = I_L' G(0, z^*) a_z(z^*) dz^* \quad (4.54)$$

Son eşitliğin $[0, h]$ kapalı aralığındaki integrali alınırsa, aşağıdaki eşitliğe ulaşılır:

$$\int_0^h G(0, z) a_z(z) \epsilon_L \sigma T_L^4(z) dz = \bar{G}(0) \cdot \epsilon_L \sigma T_L^4 \quad (4.55)$$

Bitki standındaki belirli bir (x^*, z^*) noktası için toplam uzun dalgalı radyasyon akı yoğunluğu, şekil 4.15 'deki modele göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$I_L(x^*, z^*) = [I_L \downarrow - I_{LL}(x^*, z^*)] \cdot P(x^*, h-z^*)_{\sim} + [I_L \uparrow - I_{LL}(x^*, z^*)] \cdot P(x^*, z^*-0)_{\sim} \quad (4.56)$$

Burada, $P(x^*, h-z^*)_{\sim}$ ve $P(x^*, z^*-0)_{\sim}$ diffuz güneş radyasyonunun sırasıyla aşağı ve yukarı penetrasyon fonksiyonlarıdır.

4. 2. 2. 3. Net radyasyon alt modeli

Net radyasyon, belirli bir z derinliğindeki diferansiyel tabakada bulunan bitki elemanları tarafından tutulan ve soğurulan radyasyon enerjisinin toplam miktarı olarak tanımlanır. Net radyasyon akı yoğunluğu için aşağıdaki diferansiyel eşitlik kullanılır (Stanghellini 1987, Yang et al 1990b, c):

$$dQ_R = \int_0^{\infty} (1 - \tau - \rho)_{L\lambda} dF_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda \equiv \sum_j (1 - \tau - \rho)_{Lj} I_j dF_j \quad (4.57)$$

Bu eşitliğin sol tarafındaki parametreler dalga boyuna (λ), sağ tarafındaki parametreler dalga bandına (j) göre düzenlenmiştir. $I_{\lambda,j}$ $dF_{\lambda,j}$ altında kalan net spektral ışma, τ yaprağın spektral geçirgenliği, ρ yaprağın spektral yansıtkanlığı, $dF_{\lambda,j}$ yaprak-radyasyon şekil faktöründür.

Yaprak yönelimi ve gelen radyasyonun yönüyle ilişkili olan şekil faktörleri PAR, NIR ve LWR spektral bölgeleri için sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$dF_{PAR} = (1 - d_{\sim,PAR}) dF_{\sim} + d_{\sim,PAR} dF_{\sim} \quad j=PAR \quad (4.58)$$

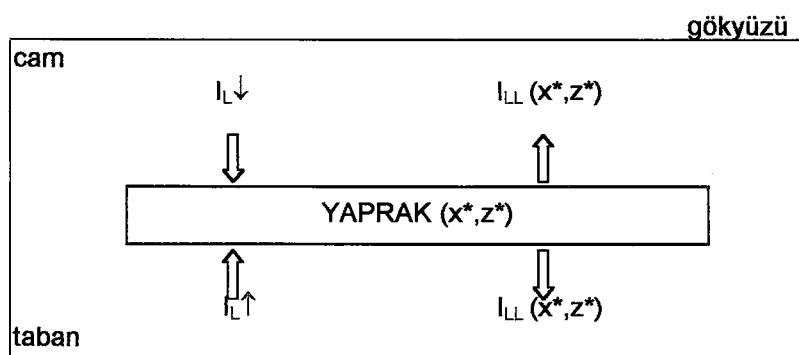
$$dF_{NIR} = (1 - d_{\sim,NIR}) dF_{\sim} + d_{\sim,NIR} dF_{\sim} \quad j=NIR \quad (4.59)$$

$$dF_{LWR} = dF_{\sim} \quad j=LWR \quad (4.60)$$

Burada, $d_{\sim,PAR}$ ve $d_{\sim,NIR}$ sırasıyla diffuz PAR ve NIR indeksleri, dF_{\sim} ve dF_{\sim} direkt ve diffuz şekil faktörleri olup; aşağıdaki eşitlikler kullanılır (Yang et al 1990b, c):

$$dF_{\sim} = G(0, z) dLA_{OP} \quad (4.61)$$

$$dF_{\sim} = G(0, z) \cdot dLA_{OR} \quad (4.62)$$



Şekil 4.15. Bitki standının (x^*, z^*) noktası için uzun dalgalı radyasyon modeli

4. 2. 3. Isı transferi modeli

Bitki örtüsü termodinamik bir sistem olarak ele alınmış olup; ısı transferi modeli kapsamında bitkinin ve havanın enerji dengeleri oluşturulmuştur. İşı transferi işlemleri konveksiyon, buharlaşma ve metabolik ısı transferi akı yoğunlukları bazında ele alınmıştır.

4. 2. 3. 1. Bitkinin enerji dengesi

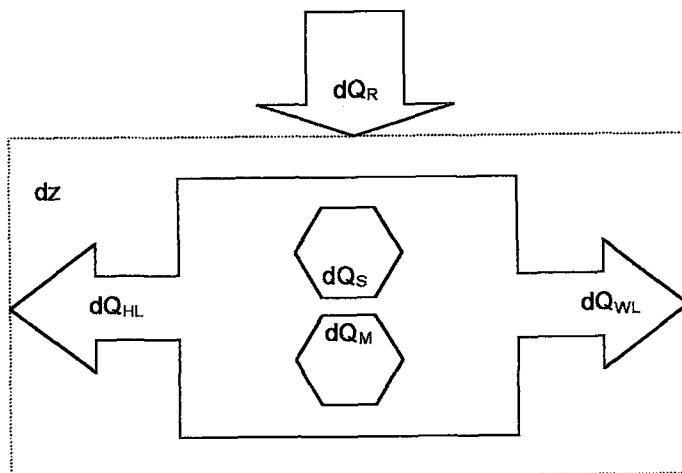
Bitki standının diferansiyel tabakasında bitki elemanları ve çevresi arasındaki temel enerji değişimleri dört bileşenden oluşur. Bunlar;

1. net radyasyon değişimi (dQ_R),
 2. konveksiyonla ısı değişimi (dQ_{HL}),
 3. buharlaşmayla ısı değişimi (dQ_{WL}),
 4. metabolik ısı değişimi (dQ_M)dır.

Bitki örtüsü termodinamik bir sistem olarak ele alınırsa, net radyasyon sistem girdisi olarak davranışırken, diğer bileşenler sistem çıktısı olarak davranış gösterirler. Net radyasyon, diğer taşınım işlemlerinin temel devitim kuvvetidir. Sistem, ancak girdi-çıktı fazlası depolanarak dengelenir. Buna göre, şekil 4.16'da verildiği gibi, bitki standının diferansiyel tabakalarında depolanan ısı tanımlanarak enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılır (Oke 1978, Rosenberg et al 1989, Yang et al 1990b, c):

$$dQ_S = dQ_R - (dQ_{HL} + dQ_{WL} + dQ_M) \quad (4.63)$$

Bu eşitlikteki tüm terimler z konumu ve dz kalınlığı ile karakterize edilen diferansiyel tabakaya göre tanımlanırlar. Buharlaşmayla olan ısı değişimi ile metabolik ısı değişimi temelde kütle transferiyle ilişkili olan sanal ısı değişimleridir.



Sekil 4.16. Bitki standı diferansiyel tabakasına ilişkin enerji dengesi

4. 2. 3. 2. Havanın enerji dengesi

Termodinamiğin birinci yasası uyarınca, diferansiyel hava tabakasında kazanılan ve üretilen enerji değişimleri toplamı, depolanan enerji değişimine eşit olmalıdır. Şekil 4.17 'de şematik olarak gösterilen genel enerji denge eşitliği (2.29) nolu eşitliğin sonucu olarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$dQ_S = dQ_z + dQ_{HL} \quad (4.64)$$

Bu eşitlikte, dQ_S depolanan ısı (W m^{-2}), dQ_z kazanılan net ısı değişimi (W m^{-2}), dQ_{HL} konveksiyonla ısı değişimidir.

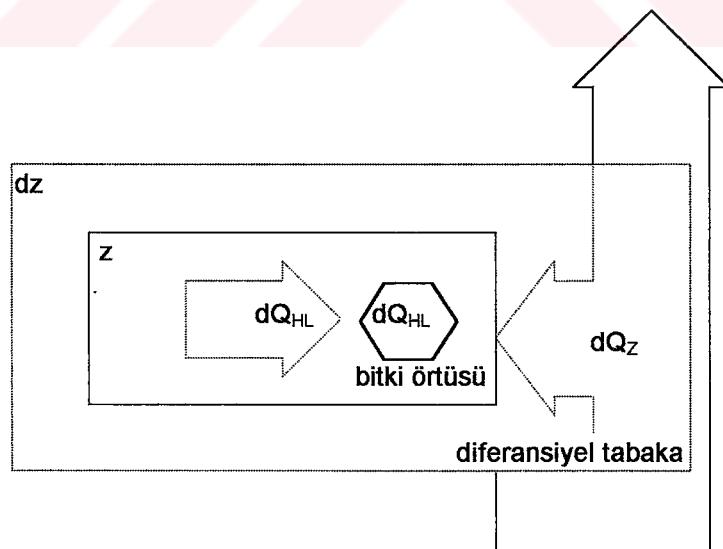
Bitki standında kazanılan net ısı değişimi, Fourier yasasının (2.28) nolu eşitlige uygulanmasıyla elde olunur :

$$dQ_z = d\left(\kappa_H \frac{\partial(\rho_A c_{pA} T_A)}{\partial z}\right) \quad (4.65)$$

Burada, κ_H moleküller ısı değişim katsayısı ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), c_{pA} havanın özgül ısısı ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T_A havanın sıcaklığıdır.

Sonuç olarak, bitki standında hava sıcaklığının değişimi, ikinci dereceden diferansiyel denklem kullanılarak tanımlanır:

$$\frac{\partial(\rho_A c_{pA} T_A)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_H \frac{\partial(\rho_A c_{pA} T_A)}{\partial z} \right] + \frac{\partial Q_{HL}}{\partial z} \quad (4.66)$$



Şekil 4.17. Havanın enerji dengesi

4. 2. 3. 3. Konveksiyonla olan ısı transferi alt modeli

Bitki standında yaprak ve toprak yüzeylerinden olan konveksiyonla ısı transferi işlemleri ayrı ayrı modellenmiştir. Her iki yüzeyde gelişen konveksiyon rejimi, $GrRe^{-2}$ indeksine göre saptanmış olup; doğal, zorlanmış ve karışık konveksiyon modları için sırasıyla aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır (Wong 1977, Stanghellini 1987, Jacobs et al 1994, Pieters et al 1994):

$$Nu = 0.54 (Gr Pr)^{0.25} \quad GrRe^{-2} > 10 \quad (4.67)$$

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.333} \quad GrRe^{-2} < 0.1 \quad (4.68)$$

$$Nu = 0.37 (Gr + 6.92 Re^2)^{0.25} \quad 0.1 < GrRe^{-2} < 10 \quad (4.69)$$

4. 2. 3. 3. 1. Yapraktan konveksiyonla olan ısı transferi

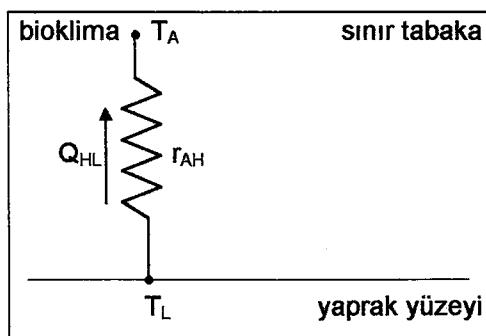
Konveksiyonla ısı transferinin yaprakların her iki tarafından eşit olarak geliştiği varsayılarak bitki standının z derinliğinde konveksiyonla olan ısı değişimi, şekil 4.18'de gösterildiği gibi, direnç kavramı kullanılarak şu eşitlikle tanımlanır (Tantau 1992):

$$dQ_{HL} = \frac{\eta_t \rho_A C_p A}{\Gamma_{AH}} (T_L - T_A) dLAI \quad (4.70)$$

η_t yaprak yüzey faktörü, ρ_A havanın yoğunluğu (kgm^{-3}), C_p havanın özgül ısısı ($J kg^{-1}.K^{-1}$), T_L yaprak sıcaklığı (K), T_A hava sıcaklığı (K), Γ_{AH} konveksiyonla ısı transferi aerodinamik (sınır tabaka) direnci(sm^{-1}) ve $dLAI$ dikey profilde diferansiyel yaprak alan indeksidir.

Konveksiyonla ısı transferi işleminin tanımlanmasında kullanılan sınır tabaka direnci, yüzeye ilişkin karakteristik boyut (l), ısıl difüzyon katsayısı (α_H) ve Nusselt sayısının (Nu) fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Zang and Lemeur 1992):

$$\Gamma_{AH} = \frac{1}{\alpha_H Nu} \quad (4.71)$$



Şekil 4.18. Yaprak yüzeyinden konveksiyonla ısı transferi direnç benzeşimi

4. 2. 3. 2. Topraktan konveksiyonla olan ısı transferi

Toprak yüzeyi geniş yatay bir yüzey olarak alınırsa, şekil 4.19 'daki gibi, sera tabanı ve hava arasındaki konveksiyonla ısı transferi aerodinamik direnç yaklaşımına göre aşağıdaki eşitlikle tanımlanır :

$$Q_{HF} = \frac{\rho_A C_{pA}}{r_{AF}} (T_F - T_A) \quad (4.72)$$

Bu eşitlikte, T_F , toprak yüzey sıcaklığı (K), r_{AF} , toprak yüzeyi aerodinamik direnci (sm^{-1}) olup; (4.71) nolu eşitliğe benzer olarak hesaplanır.

4. 2. 3. 4. Buharlaşmayla olan ısı transferi alt modeli

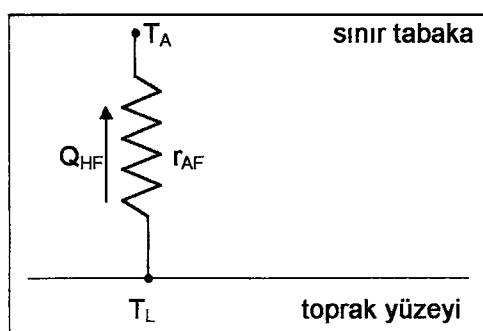
Bitki standında buharlaşmayla olan ısı transferi, yaprak ve toprak yüzeyinden olmak üzere modellenmiştir. Konveksiyon ile buharlaşma işleminin geliştiği sınır tabakadaki yönelimler tamamen aerodinamik direncin değişimine bağlı olarak saptanmalıdır.

4. 2. 3. 4. 1. Yapraktan transpirasyonla olan ısı transferi

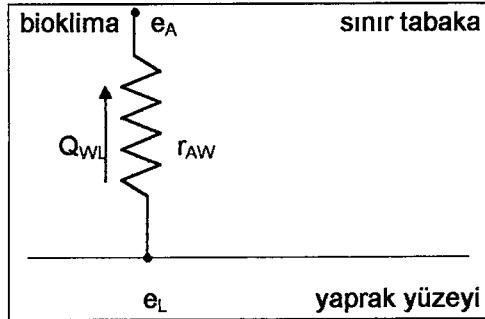
Birim yaprak alanından suyun buharlaşmasını sağlayan enerji tüketim işlemi transpirasyonla ısı transferine karşılık gelir. Bitki standının diferansiyel tabakasında buharlaşmayla olan ısı transferi akı yoğunluğu, şekil 4.20 'deki gibi sınır tabakada direnç benzeşimi kullanılarak modellenmiştir (Fynn et al 1993):

$$dQ_{WL} = \frac{\eta_t \rho_A C_{pA}}{\gamma(r_{AW} + r_{SW})} (e_L - e_A) dLAI \quad (4.73)$$

Burada, e_L yaprak yüzeyindeki buhar basıncı (Pa), e_A havanın buhar basıncı (Pa), r_{AW} su buhar taşınamı aerodinamik direnci (sm^{-1}), r_{SW} stomatal direnç (sm^{-1}), γ psikrometrik sabit (PaK^{-1}) parametrelerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.19. Toprak yüzeyinden konveksiyonla ısı transferi direnç benzeşimi



Şekil 4.20. Yapraktan transpirasyonla olan ısı transferi direnç benzeşimi

Isı ve kütle transfer eşitlikleri düzenlenerek, su buharı taşınımı aerodinamik direnci için aşağıdaki ilişki kullanılabilir (Yang et al 1990e):

$$r_{AW} = r_{AH} \left(\frac{\alpha_H}{\alpha_W} \right)^{1.333} \quad (4.74)$$

Bu eşitlikte, α_H ısıl difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$), α_W su buharı difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$).

Stanghellini (1987) 'ye göre, aerodinamik dirence ilişkin aşağıdaki ekstem koşullar değerlendirilebilir:

- Dirençteki bir artış bazen akının da artışına neden olabilmektedir. Ancak, gerçekte, buharlaşmayla olan ısı akı yoğunluğu her zaman su buharı taşınımı aerodinamik direncinin azalan bir fonksiyonudur:

$$\lim_{r_{AW} \rightarrow \infty} Q_{WL} = 0 \quad (4.75)$$

- Aerodinamik direnç yok varsayılsa, tam izotermal koşullarda dahi yüzeyde terleme oluşur. Çünkü serbest bırakılan ısı, enerji akılarını dengelemek için en etkili işledir :

$$\lim_{r_{AW} \rightarrow 0} Q_{WL} = \frac{\rho_A c_{pA} (e^* - e_A)}{\gamma r_{sw}} \quad (4.76)$$

- Yaprak yüzeyinde aerodinamik direncin sonsuz küçük olması durumunda yüzey sıcaklığı çevre sıcaklığına eşit olmalıdır :

$$\lim_{r_{AW} \rightarrow 0} (T_L - T_A) = 0 \quad (4.77)$$

- Sınır tabaka direncinin artışıyla yüzeyin soğuması ya da ısınmasına ilişkin karar mekanizmaları türetilebilir :

$$\lim_{r_{AW} \rightarrow \infty} (T_L - T_A) = \frac{r_R (Q_{R,A} - Q_S)}{\rho_A \cdot c_{pA}} \quad (4.78)$$

Burada, $Q_{R,A}$ izotermal net radyasyon akı yoğunluğu ($W m^{-2}$), Q_S depolanan ısı ($W m^{-2}$), r_R radyasyon transfer direnci (sm^{-1}) olup; aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$r_R = \frac{\rho_A \cdot c_{pA}}{4 \cdot \sigma \cdot T_A^3} \quad (4.79)$$

Izotermal net radyasyon akı yoğunluğu,

$$Q_{R,A} = Q_{HL} + Q_{WL} + Q_S + 4\sigma T_A^3 (T_L - T_A) \quad (4.80)$$

eşitliği ile tanımlanır (Stanghellini 1987).

Tamamıyla ıslak bir yaprak yüzeyinde evaporasyon hızı ve yaprak sıcaklığı ya da yoğunlaşma hızı ve yaprak sıcaklığı hesaplanabilir. Her iki durum için de stomatal direnç, r_{sw} sıfır olmalıdır. $Q_w \leq 0$ ya da $T_L \leq T_{dp}$ ($e_A = e^*(T_{dp})$) yoğunması için aşağıdaki mikrometeorolojik bir sonuca ulaşılır (Stanghellini 1987) :

$$\frac{\Re(Q_{R,A} - Q_S)}{p_A c_{pA} (e_A^* - e_A)} r_R \leq - \left(1 + \frac{r_R}{r_{AW}} \right) \quad (4.81)$$

Bu eşitsizliğin sol tarafındaki terim, önemli bir parametredir ve mikroklimatolojik direnç olarak tanımlanır :

$$\tilde{r} = \frac{\Re(Q_{R,A} - Q_S)}{p_A c_{pA} (e_A^* - e_A)} r_R \quad (4.82)$$

Bu eşitlikte, \Re doygun buhar basıncı eğrisinin eğimidir. Mikroklimatolojik direnç kavramı, hava sıcaklığı etkisini \Re ve r_R gibi karakteristik parametreleri hesaba kattığı için tercih edilir.

Eşitlik (4.78)'e göre, sıcaklık fazlası pozitif ise, radyasyon terimi daha büyük; sıcak fazlası negatif ise, radyasyon terimi depolanan ısından daha küçük olacaktır. Radyatif kazanç pozitif, ancak evaporatif soğumayı dengelemeyecek kadar küçükse, bir dönüm noktası olduğundan yüzey soğur. Buna göre, $\partial(T_L - T_A)/\partial r_{AW}$ kısmının türevinin tartışmasına ilişkin sonuçlar şu şekilde değerlendirilebilir (Stanghellini 1987):

a) Yaprak sıcaklığı, aerodinamik dirence monoton olarak büyüyen bir fonksiyondur:

$$\tilde{r} \geq \frac{\Re}{\gamma} \frac{r_R}{r_{sw}} \quad (4.83)$$

b) Aşağıdaki koşulda yaprak sıcaklığı, aerodinamik direncin herhangi bir artışında azalır:

$$\tilde{r} \leq - \frac{\Re}{\Re + \gamma} \quad (4.84)$$

$$c) - \frac{\Re}{\Re + \gamma} < \tilde{r} < \frac{\Re}{\gamma} \frac{r_R}{r_{sw}} \quad (4.85)$$

koşulu ise, yeterlidir. Sıcaklık fazlasını minimize eden bir aerodinamik direnç değeri her zaman vardır.

4. 2. 3. 4. 2. Topraktan evaporasyonla olan ısı transferi

Toprak yüzeyinden suyun buharlaşmasıyla olan ısı transferi, yaprak yüzeyine benzer şekilde toprak yüzeyi sınır tabakasında gerçekleşir. Topraktan evaporasyonla olan ısı transferi, buhar basıncı gradyentine göre şekil 4.21 'de verilen model yaklaşımıyla aşağıdaki gibi tanımlanır :

$$Q_{WF} = \frac{\rho_A C_{pA}}{\gamma r_{WF}} (e_F - e_A) \quad (4.86)$$

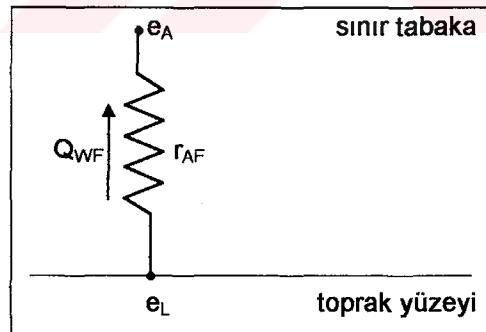
Burada, e_F toprak yüzeyindeki buhar basıncı (Pa), r_{WF} toprak yüzeyi için su buharı transferi aerodinamik direncidir.

4. 2. 3. 5. Metabolik ısı değişimi

Metabolik işlemlerle kazanılan ya da kaybedilen ısı değişimleri doğrudan kütle transferi parametreleriyle tanımlanabilir (Oke 1978):

$$dQ_M = h_{cr} dP_N \quad (4.87)$$

Bu eşitlikte, h_{cr} CO_2 özümleme entalpisi (J kg^{-1}), dP_N net fotosentez hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).



Şekil 4.21. Toprak yüzeyinden evaporasyonla olan ısı transferi direnç benzeşimi

4. 2. 4. Kütle transferi modeli

4. 2. 4. 1. Havanın kütle dengesi

Havanın enerji dengesine benzer olarak, diferansiyel hava tabakasının kütle değişimleri ısı transferinde ele alınan termodinamik sistemle sınırlanır. Diferansiyel hava tabakasının kazandığı ve burada üretilen kütle toplamı, depolanan kütle yoğunluğununa eşit olmalıdır. Buna göre, kütle dengesi, şekil 4.22'deki ilgili diferansiyel tabaka için aşağıdaki eşitliklerle tanımlanır.

Termodinamiğin birinci yasası uyarınca, su buharı taşınımı için eşitlik (2.29) ve (4.64)'e benzer olarak aşağıdaki denge denklemi tasarılanır :

$$dW_S = dW_Z + dW_L \quad (4.88)$$

Bu eşitlikte; dW_S depolanan su buharı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), dW_Z net su buharı değişimi ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), dW_L transpirasyon hızıdır.

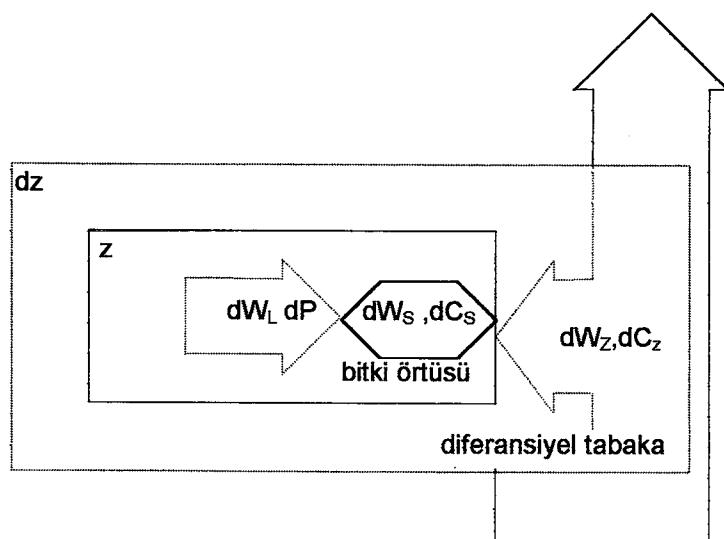
(4.90) denklemindeki, net su buharı değişimi benzer şekilde Fick yasasının (2.28) nolu eşitliğine uygulanmasıyla saptanır:

$$dW_Z = d\left(\kappa_w \frac{\partial w_A}{\partial z}\right) \quad (4.89)$$

Burada, κ_w ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) moleküler su buharı değişim katsayısı, w_A havanın mutlak nemidir.

Sonuç olarak, bitki standında havadaki nem değişimi Fick yasasına göre aşağıda verilen ikinci dereceden diferansiyel denklem kullanılarak tanımlanır:

$$\frac{\partial w_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_w \frac{\partial w_A}{\partial z} \right] + \frac{\partial W_L}{\partial z} \quad (4.90)$$



Şekil 4.22. Su buharı ve CO_2 dengesi

CO_2 taşınımı için benzer olarak aşağıdaki denge denklemi kullanılır:

$$dC_S = dC_z - dP_N \quad (4.91)$$

Bu eşitlikte; dC_S depolanan CO_2 ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), dC_z net CO_2 değişimi ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), dP_N net fotosentez hızıdır.

(4.91) denklemindeki net CO_2 değişimi, aşağıdaki eşitlikle saptanır:

$$dC_z = d\left(\kappa_c \frac{\partial C_A}{\partial z}\right) \quad (4.92)$$

Burada, κ_c moleküler CO_2 taşınımı değişim katsayısı ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), C_A havanın CO_2 konsantrasyonu (kg m^{-3}).

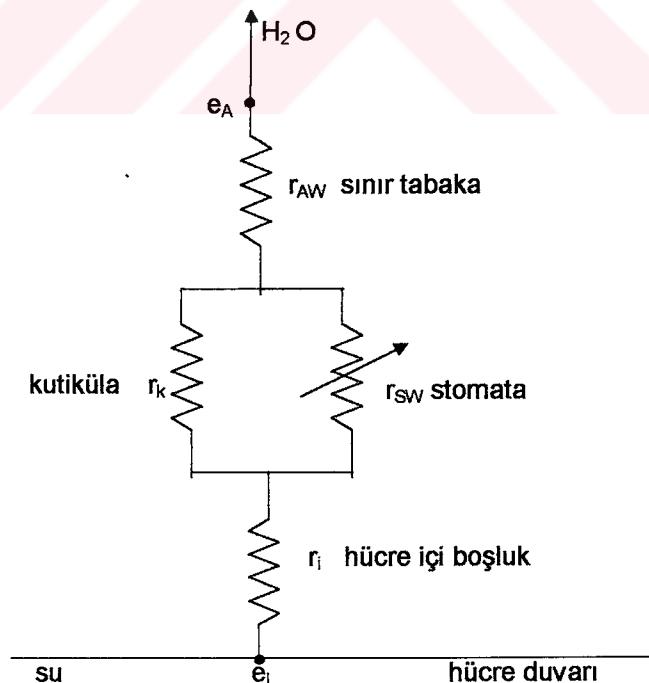
Sonuç olarak, bitki standında havadaki CO_2 konsantrasyonunun değişimi Fick yasasına göre aşağıda verilen ikinci dereceden diferansiyel denklem kullanılarak tanımlanır:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_c \frac{\partial C_A}{\partial z} \right] - \frac{\partial P_N}{\partial z} \quad (4.93)$$

4. 2. 4. 2. Yapraktan konveksiyonla olan kütle transferi

4. 2. 4. 2. 1. Su buharı taşınımı alt modeli

Yaprak içinde hücre içi boşluklar ile yaprak yüzeyi sınır tabakası ve hava zarfı arasındaki su buharı akışı direnç benzeşimi uygulanarak şekil 4.23'deki gibi modellenebilir.



Şekil 4.23. Yaprağın su buharı taşınımına ilişkin direnç benzeşimi

4. 2. 4. 2. 1. Transpirasyon hızı

Yaprak yüzeyinden su buharı taşınımı, transpirasyonla ısı transferi akı yoğunluğuna göre tanımlanır. Bitki standının diferansiyel diliminde gelişen transpirasyon hızı, buharlaşma ısısının (dQ_{WL}) buharlaşma entalpisine (h_{fg}) oranıdır (Goudriaan 1989):

$$dW_L = \frac{\eta_e \rho_A C_{PA}}{h_{fg} \gamma (r_{AW} + r_{SW})} (e^*(T_L) - e_A(T_A)) dLAI \quad (4.94)$$

Mikroklimatolojik değişimler stomatal yansımala neden olur (Aubinet et al 1989). Stomatal direnç ile güneş radyasyonu arasındaki üssel ilişkiler, PAR için düzenlenirse, hıyar bitkisine ilişkin stomatal direnç aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir (Yang et al 1989):

$$r_{sw} = 142.7 + 953.9 \exp(-0.0117 I_{PAR}) \quad (4.95)$$

4. 2. 4. 2. 2. CO₂ taşınımı alt modeli

Yaprak içinde hücre içi boşluklar ile yaprak yüzeyi sınır tabakası ve hava zarfı arasındaki CO₂ akışı direnç benzeşimi uygulanarak şekil 4.24'deki gibi modellenebilir.

4. 2. 4. 2. 2. 1. Net fotosentez hızı

Net fotosentez hızı, bitkinin fizyolojik tabanında bitki büyümeye indeksinin saptanmasında kullanılan önemli bir nicelik olup; doğrudan bitki verimliliği ile ilgilidir. CO₂, ışık ve sıcaklık gibi klimatolojik değişkenler bitkinin net fotosentez hızını doğrudan etkilemektedir.

Diferansiyel tabakalardaki net fotosentez hızı, fotosentez hızı (dP) ve solunum hızı (dR) terimleriyle aşağıdaki gibi tanımlanır (Oke 1978):

$$dP_N = dP - dR \quad (4.96)$$

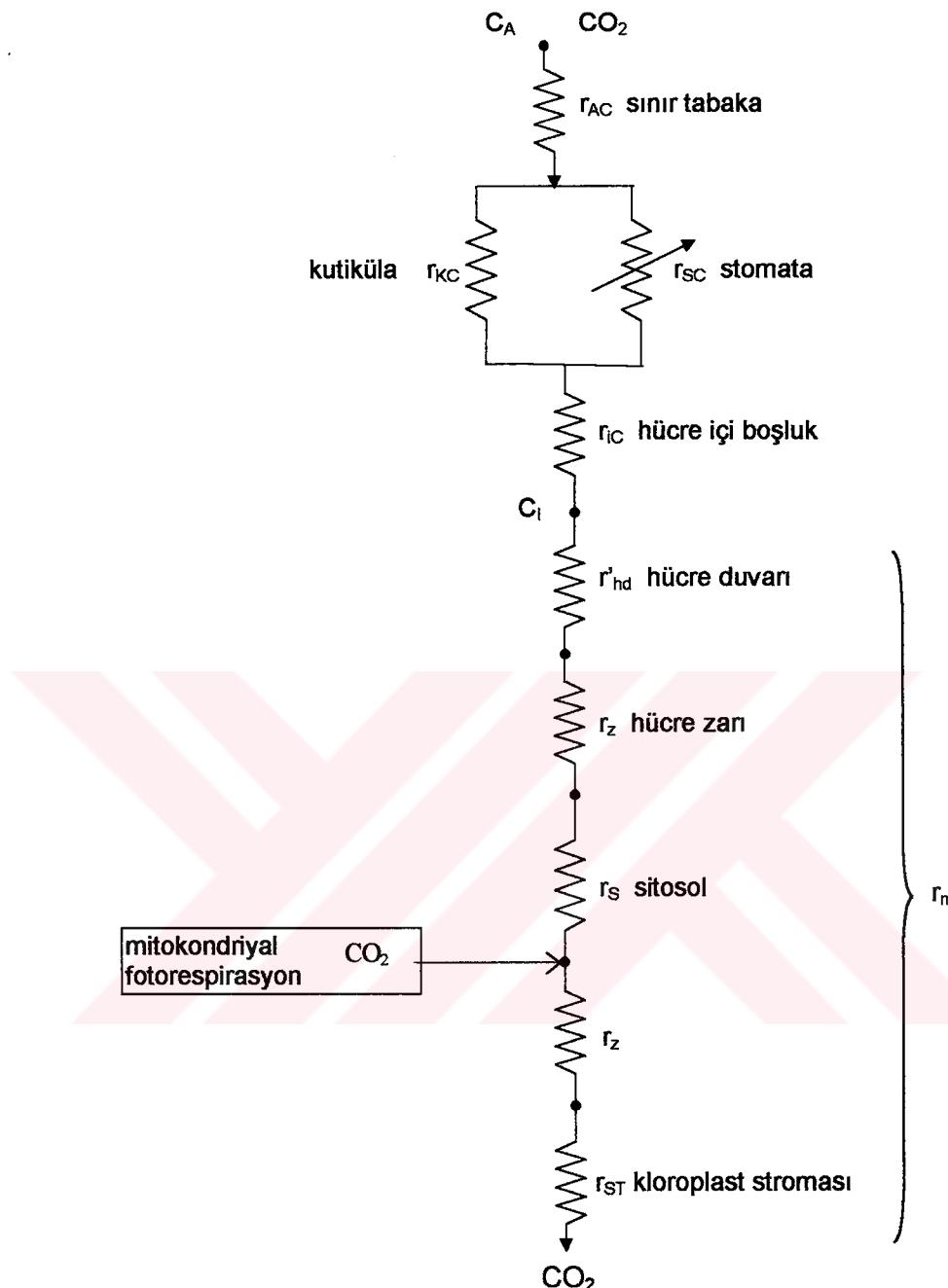
Fotosentez hızı şu eşitlik kullanılarak hesaplanır (Rosenberg et al 1983):

$$dP = \frac{\eta_c \rho_A}{r_{AC} + r_{SC} + r_m} (C_A - C_{ST}) dLAI \quad (4.97)$$

Burada; η_c yaprak yüzey faktörü, r_{AC} CO₂ taşınımı aerodinamik direnci ($s m^{-1}$), r_{SC} CO₂ taşınımı stomatal direnci ($s m^{-1}$), r_m mezofil direnci ($s m^{-1}$), C_A havadaki CO₂ konsantrasyonu (ppm), C_{ST} kloroplast stroması hava boşluğunundaki CO₂ konsantrasyonudur.

İşı ve kütle transfer eşitlikleri düzenlenerek, CO₂ taşınımı aerodinamik direnci için şu eşitlik kullanılabilir (Yang et al 1990e):

$$r_{AC} = r_{AH} \left(\frac{\alpha_H}{\alpha_c} \right)^{1.333} \quad (4.98)$$



Şekil 4.24. Yaprak karboksilasyon katına CO_2 taşınımına ilişkin direnç benzeşimi (Lawlor 1987)

Su buharı ile CO_2 taşınımına ilişkin stomatal dirençler, bu moleküllerin difüzyon katsayılarından dolayı farklıdır. Difüzyon teorisine göre, CO_2 taşınımı stomatal direnci, su buharı ve CO_2 taşınımı Lewis sayılarına göre hesaplanır (Lawlor 1987):

$$r_{sc} = r_{sw} \frac{Le_c}{Le_w} \quad (4.99)$$

Stomatal yolu kullanarak geçen CO_2 , hücre içi boşluklardan sonra mezofil hücreleri ile karşılaşır. CO_2 , yaprak mezofil hücrelerindeki kloroplast stroması hava boşluklarında yayılır. Her tabakada oluşan CO_2 geçiş dirençlerinin şekil 4.24'deki gibi birbirine seri bağlı olduğu kabul

edilir. Mezofil hücre direnci, r'_{hd} hücre duvarı direnci, r_z hücre zarı direnci, r_s sitosol direnci, r_{ST} kloroplast stroması direncinin toplamına eşittir (Oke 1978, Lawlor 1987):

$$r_m = r'_{hd} + 2r_z + r_s + r_{ST} \quad (4.100)$$

Çok karmaşık biokimyasal faktörlere bağlı olan mezofil hücre direncinin (r_m) 100 sm^{-1} ile 1000 sm^{-1} aralığında değiştiği bilinmektedir (Rosenberg et al 1983). CO_2 akışının hücre içi boşluklardan kloroplasta ulaşması geçiş yolunun iletkenliğine bağlıdır. Ortamın iletkenliği yalnız fiziksel olmayıp, hücredeki metabolizmaya da bağlıdır. C_3 bitkileri için her bir hücre içi geçiş yolu iletkenliğinin $0.04 - 0.2 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (direnç olarak $10 - 50 \text{ s m}^{-1}$) aralığında değiştiği bilinmektedir (Lawlor 1987). Buna göre, geçiş yolları için, $r'_{hd} = 25 \text{ sm}^{-1}$, $r_z = 100 \text{ sm}^{-1}$, $r_s = 50 \text{ sm}^{-1}$, $r_{ST} = 25 \text{ sm}^{-1}$ olarak alınarak $r_m = 300 \text{ sm}^{-1}$ değerine ulaşılmıştır.

Diferansiyel bitki standında solunum hızı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Rosenberg et al 1983):

$$dR = R_{dL} Q_{10}^{(T_L - T_{dL})/10} dLAI \quad (4.101)$$

Burada, R_{dL} referans sıcaklıkta karanlıktaki solunum hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), T_L yaprak sıcaklığı (K), T_{dL} karanlıktaki yaprak sıcaklığı (K), Q_{10} bağıl değişim faktöründür (van Henten and van Straten 1994).

4. 2. 4. 3. Topraktan olan kütle transferi

4. 2. 4. 3. 1. Su buharı taşınımı alt modeli

Sera toprak yüzeyinden olan evaporasyon sürekli denge işlemi olarak işlev görür (Bristow et al 1986). Sera toprak yüzeyinden olan evaporasyon hızı, şekil 4.21 'de verilen aerodinamik direnç yaklaşımına göre tanımlanır (Yang and Albright 1985):

$$W_F = \frac{\mathfrak{R} (1 - \rho_F) l(0) + \frac{\rho_A C_p}{\Gamma_{WF}} \Delta e}{h_{fg} (\gamma + \mathfrak{R})} \quad (4.102)$$

Bu eşitlikte, W_F toprak yüzeyinden olan evaporasyon hızı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), γ psikrometrik sabit (Pa K^{-1}), \mathfrak{R} doygun su buhar basıncı eğrisinin eğimi (Pa K^{-1}), ρ_F toprak yüzeyinin kısa dalga yansıtma katsayısı, Γ_{WF} toprak yüzeyi sınır tabakası su buharı transferi aerodinamik direnci, Δe toprak yüzeyi üzerindeki havanın buhar basıncı açığıdır.

4. 2. 4. 3. 2. Toprak solunumu alt modeli

Toprak solunumu, yapraktan olan CO_2 taşınımına benzer şekilde sıcaklığın fonksiyonu olarak modellenebilir (Rosenberg et al 1983):

$$R_F = R_{dF} Q_{10}^{(T_F - T_{dF})/10} \quad (4.103)$$

Burada, R_F toprak yüzey sıcaklığındaki solunum hızı ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$), R_{dF} referans sıcaklıkta karanlıktaki solunum hızı ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$); Q_{10} bağıl değişim faktörüdür.

4. 2. 5. Momentum, ısı ve kütle değişim katsayılarının saptanması

Aerodinamik teoriye göre, bitki örtüsü içindeki momentum, ısı ve kütle transferi akı yoğunlukları benzer denklemler kullanılarak hesaplanabilir (Rosenberg et al 1983, Woodward and Sheehy 1983):

$$\text{Momentum akı yoğunluğu} : \tau(z) = \rho_A \kappa_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4.104)$$

$$\text{İşı akı yoğunluğu} : Q(z) = \rho_A c_p \kappa_H \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.105)$$

$$\text{Su buharı akı yoğunluğu} : W(z) = \kappa_w \frac{\partial w_A}{\partial z} \quad (4.106)$$

$$\text{CO}_2 \text{ akı yoğunluğu} : C(z) = \kappa_w \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (4.107)$$

Bu eşitliklerde κ_M , κ_H , κ_w ve κ_c sırasıyla momentum, ısı, su buharı ve CO_2 değişim katsayılarıdır. ρ_A havanın yoğunluğu, c_p sabit basınçta havanın özgül ısısı, $\partial u / \partial z$, $\partial T / \partial z$, $\partial w_A / \partial z$ ve $\partial C_A / \partial z$ sırasıyla hava hızı, hava sıcaklığı, mutlak nem ve CO_2 konsantrasyonu dikey gradyentleridir.

Klimatolojik nötr koşullarda değişim katsayılarının özdeş olduğu varsayıılır. Değişim katsayılarının özdeş olması varsayımlına Reynolds analogisi adı verilir (Rosenberg et al 1983):

$$\kappa_M = \kappa_H = \kappa_w = \kappa_c \quad (108)$$

Gözlemlere göre, nötr koşullar yalnız sınırlı periyotlarda geçerlidir. Nötr olmayan koşullar altında değişim katsayıları arasındaki ilişkiler üzerinde deneyel olarak yapılan mikrometeorolojik araştırmalarla klimatolojik stabilitet etkileri saptanmaktadır. Nötr olmayan koşulların tanımlanmasında aşağıda verilen momentum değişim katsayısı kullanılmaktadır (Woodward and Sheehy 1983):

$$\kappa_M = \frac{l_m \zeta u}{\Omega_M} \quad (109)$$

Bu eşitlikte, l_m ortalama karışım uzunluğu, ζ bağıl türbülans yoğunluk faktörü, u hava hızı, Ω_M klimatolojik momentum stabilitet faktörüdür.

ζ bağıl turbülans yoğunluk faktörü, normalize edilmiş bitki yükseklik indeksine göre hesaplanabilir (Shaw et al 1974):

$$\zeta = 0.8 - 0.5 \frac{z}{h} \quad (4.110)$$

Bitki örtüsü içindeki hava hızı için üstel fonksiyonel ilişkiler kullanılır (Kustas 1990):

$$u(z) = u(h) \exp[-\beta(1-z/h)] \quad (4.111)$$

Burada, β sönüm faktörü olup, aşağıdaki eşitlikle formüle edilir:

$$\beta = \sqrt{\frac{\int_0^h C_d(z) \cdot a(z) \cdot h \cdot dz}{2 \cdot l_m \cdot \zeta}} \quad (4.112)$$

$C_d(z)$ z yüksekliğinde etkili olan sürükleme katsayısı olup; u^* sürtünme hızının fonksiyonu olarak hesaplanır (Baldochi et al 1985) :

$$C_d(z) = \frac{(u^*)^2}{\int_0^h a(z) u(z)^2 dz} \quad (4.113)$$

Burada, sürtünme hızı bağıl turbülans yoğunluk faktörüne bağlı olarak hesaplanır:

$$u^* = \zeta u \quad (4.114)$$

İş, su buharı ve CO_2 değişimi katsayılarının hesaplanmasıında eşitlik (4.109)'da verilen momentum değişim katsayısından yararlanılır. İş, su buharı ve CO_2 taşınımına ilişkin genelleştirilmiş notasyonla(9) verilen değişim katsayısı aşağıdaki eşitlikle tanımlanır ve sırasıyla κ_H , κ_w ve κ_c formatında gösterilir(Yang et al 1990):

$$\kappa_s = \frac{l_m \cdot u^*}{\Omega_s} \quad (4.115)$$

Kararlı ve kararsız koşullar için aşağıda verilen klimatolojik stabilité faktörü kullanılabilir (Yang et al 1990, Viney 1991):

$$\Omega_s = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1-16Ri}} & Ri < 0 \quad \text{kararsız} \\ 1 & Ri = 1 \quad \text{nötr} \\ \frac{1}{1-5Ri} & Ri > 0 \quad \text{kararlı} \end{cases} \quad (4.116)$$

Bu eşitlikteki Ri Richardson sayısı olup, konveksiyonun bağıl etkisini tanımlamada kullanılır.

4. 2. 6. Radyasyon, ısı ve kütle transferi modellerinin çözümü

Bitki standının fiziksel yapısı göz önüne alınarak mikroklima ana modelinin simülasyonunda sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Klimatolojik değişkenlerin bitki örtüsü içinde anlık değişmediği varsayılarak eşit aralıklı düğüm noktaları tasarılmıştır. Modelin çözümünde kümülatif değişimler için sayısal integrasyon ve noktasal değişimler için sayısal diferansiyel yaklaşım kullanılmıştır.

4. 2. 6. 1. İntegralerin sayısal çözümü

Bitki standının dikey profilinde güneş radyasyonu değişimi doğrusal karakter taşıdığınından $[a, b]$ kapalı aralığındaki A integralinin sayısal karşılığı, $f(z)$ eğrisi altında kalan alana eşittir:

$$A = \int_a^b f(z) dz \quad (4.117)$$

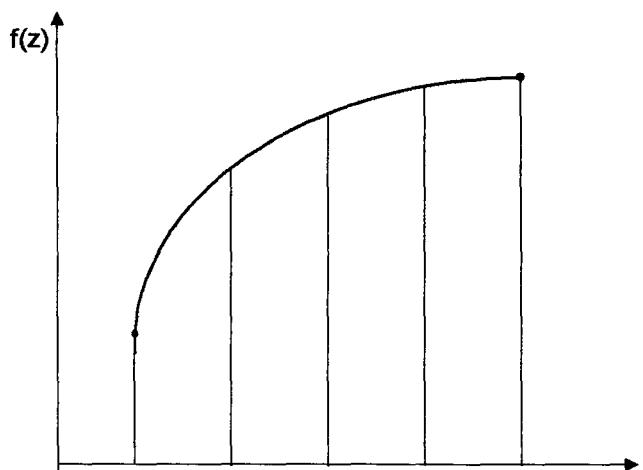
Şekil 4.25 'de verilen $f(z)$ eğrisi altında kalan alan (a ve $b = a + n\Delta z$ arasındaki alan), n eşit parçaya bölünür ve Newton - Cotes yamuk formülü kullanılarak hesaplanır (Aktaş vd 1984):

$$A = \int_a^b f(z) dz = \frac{\Delta z}{2} \cdot [(f_a + f_1) + (f_1 + f_2) + \dots + (f_{n-1} + f_b)] \quad (4.118)$$

Isı ve kütle transfer işlemlerinin tanımlanmasında kümülatif yaprak alan indeksi gibi diğer temel değişkenlerin fonksiyonel etkisi nedeni ile Newton - Cotes yamuk formülü yetersiz kalmıştır. Integrasyona bitki örtüsünün hacimsel yansımalarını katmak için Simpson kuralı uygulanmıştır (Rao and Shantha 1992):

$$A = \int_{z_1}^{z_2} f(z) dz = \frac{1}{3} \cdot [f_1 + 4 \cdot f_{1.5} + f_2] \Delta z \quad (4.119)$$

Bu sayısal yaklaşımada, $f_{1.5}$ fonksiyonu $[z_1, z_2]$ kapalı aralığı orta noktasındaki f değerine göre tasarlanmıştır.



Şekil 4.25. Sayısal integrasyon kuralı

4. 2. 6. 2. Diferansiyel denklemlerin çözümü

Bitki standında enerji ve kütle dengeleri kurularak elde edilen diferansiyel denklemler uygun yöntemler kullanılarak nümerik olarak çözümlenmiştir.

Zamanın fonksiyonu olarak türetilen diferansiyel denklemlerin gradyent fonksiyonları hesaplanabilirse, zaman alanı üzerinden nümerik integrasyonu alınabilir. Yaprak sıcaklığı bitki standının durum değişkeni olup; enerji ve kütle dengelerinin bir sonucudur. Eşitlik (4.63) esas alınarak bitki standı z-yönü boyunca 10 bölüme ayrılmıştır. Vektör notasyonu kullanılarak; (4.63) denklemi, birinci dereceden diferansiyel denklem seti formunda aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\frac{dT_L}{dt} = f(t, T_L) \quad (4.120)$$

Problemin başlangıç değeri,

$$T_L(0) = T_{0L} \quad (4.121)$$

olarak tanımlanır.

Eşitlik (4.122) 'nin nümerik çözümü, ileri farklar yaklaşımına göre, şu şekilde yazılır :

$$\frac{T_{t+1,L} - T_{t,L}}{\Delta t} = f(t, T_L) \quad (4.122)$$

Yaprak sıcaklığının zamanla değişiminin saptanmasında aşağıda verilen formasyonda tanımlanan Euler-Cauchy formülü kullanılmıştır.

$$T_{t+1,L} = T_{t,L} + f(t, T_L) \Delta t \quad (4.123)$$

Euler formülü kararlı ve zamana duyarlı olduğu için tercih edilmiştir. Yaprakların zaman sabiti oldukça büyük olduğu için, kararlılık büyük bir sorun olmamıştır.

Eşitlik (4.122) 'de $f(t, T_L)$ depolanan ısının fonksiyonu olmalıdır ve bitkinin fiziksel özelliklerine göre aşağıdaki şekilde yazılır :

$$f(t, T_L) = \frac{dQ_R - dQ_{HL} - dQ_{WL} - dQ_M}{d_L c_{pL} \rho_L L A_l z}$$

Bu eşitlikte, d_L yaprağın kalınlığı, c_{pL} yaprağın özgül ısısı, ρ_L yaprağın yoğunluğu, $L A_l z$ yaprak alan indeksidir.

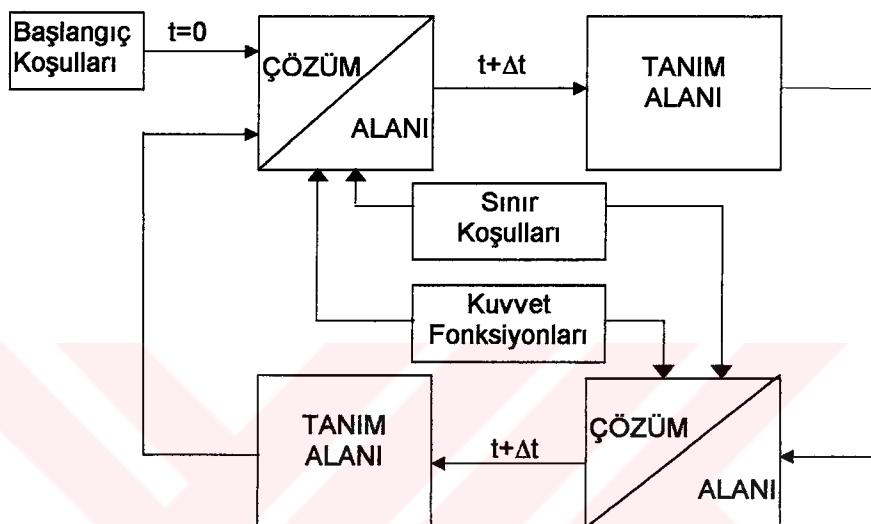
Bitki örtüsü içindeki ısı ve kütle taşınım işlemleri, zamana (t) göre birinci dereceden ve bitki standındaki hacimsel değişkeni(z) göre ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemlerle gösterilirler. Kısımlı diferansiyel denklemlerin zaman sabitleri küçük olduğu için çok katı bir sistem özelliği gösterirler. Sabit değişim katsayılı ısı denklemi için kararlılık ölçüsü;

$$\frac{\kappa_H \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2} < \frac{1}{2} \quad (4.124)$$

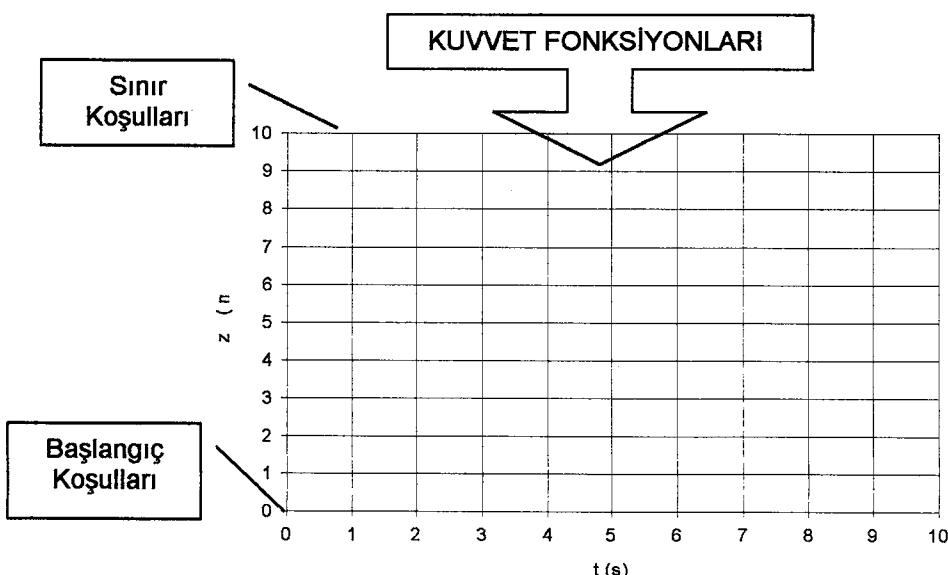
biçiminde tanımlanır. Bu eşitsizlik, Δt 'e göre düzenlenebilir (Kakaç 1982, Ültanır 1992a):

$$\Delta t < \frac{(\Delta z)^2}{2\kappa_H} \quad (4.125)$$

Problem, şekil 4.26 'da verilen tanım alanı ve çözüm alanı olmak üzere iki kodlama alanına göre programlanır. Bitki standı dikey profili baz alınarak her düğüm noktası için bu kodlama işlemi uygulanır. Çözüm alanında doğrusal programlama yöntemleri kullanılarak klimatolojik değişkenlere ulaşılır. Tanım ve çözüm alanından sağlanan durum değişkenlerine göre ısı ve kütle taşınım işlemlerine ilişkin doğrusal olmayan parametreler hesaplanır (Smith 1986). Diferansiyel denklemlerin çözümü, şekil 4.27 'den amaçlanan çözüm alanı için sonlu farklar yöntemi kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 4.26. Çözüm ve tanım alanının çalışma şeması



Şekil 4.27. Bitki profili ile zaman profili için düğüm noktaları - çözüm alanı
z($j=1 \dots 10$); ($t=1 \dots 10$ s)

Bitki standında z-ekseni yönünde zamanla değişen ısı ve kütle transferi için (2.30) nolu eşitlikle verilen ikinci dereceden diferansiyel denklem kalıbı kullanılır:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_s \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + q_s \quad (4.126)$$

İkinci dereceden diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümlenmesinde sonlu farklar yöntemlerinden birisi olan Crank - Nicolson yaklaşımı uygulanmıştır. Öncelikli olarak, şekil 4.27'de verilen bitki profili-zaman arasındaki düğüm noktaları tanımlanmış ve aşağıdaki Crank - Nicolson açılımına ulaşılmıştır:

$$\frac{\Psi_{t+1,j} - \Psi_{t,j}}{\Delta t} = \frac{\kappa_s}{2} \left[\frac{\Psi_{t,j+1} - 2 \cdot \Psi_{t,j} + \Psi_{t,j-1}}{(\Delta z)^2} + \frac{\Psi_{t+1,j+1} - 2 \cdot \Psi_{t+1,j} + \Psi_{t+1,j-1}}{(\Delta z)^2} \right] + q_s \quad (4.127)$$

Bu eşitlikte, t zamanı, j bitki standı içindeki dikey konumu göstermektedir. Model, $\Delta t = 60$ saniye ve $j = 1 \dots 10$ olarak tasarlanmıştır. $j = 1$ toprak üstü düzlemine, $1 < j < 10$ taban - tepe düzlemleri arasına ve $j = 10$ bitki tepe düzlemine karşılık gelecek biçimde düzenlenmiştir. Modelde genelleştirilmiş notasyonla gösterilen büyüklüklerin nümerik açılımları hava sıcaklığı, bağıl nem ve CO_2 konsantrasyonları için oluşturulmuştur.

Aşağıda verilen (4.66) denklemının nümerik açılımı hava sıcaklığı için aşama aşama verilmiştir:

$$\frac{\partial (\rho_A c_{pA} T_A)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_H \frac{\partial (\rho_A c_{pA} T_A)}{\partial z} \right) + \frac{\partial Q_{HL}}{\partial z} \quad (4.128)$$

1. (4.128) denklemine (4.127)'deki Crank - Nicolson açılımı uygulanır,
2. Eşitliğin her iki tarafı $\rho_A c_{pA}$ ile bölünür,
3. Eşitliğin her iki tarafı $(\Delta z)^2$ ile çarpılır ve $\kappa_H/2$ 'ye bölünür,
4. Eşitliğin her iki tarafı (-1) ile çarpılır ve
5. (t+1) li terimler eşitliğin sol tarafında toplanır;

$$T_{t+1,j+1} - \left[\frac{2(\Delta z)^2}{\Delta t \kappa_H} + 2 \right] T_{t+1,j} + T_{t+1,j-1} = -T_{t,j+1} - \left[\frac{2(\Delta z)^2}{\Delta t \kappa_H} - 2 \right] T_{t,j} - T_{t,j-1} - \frac{2\Delta z}{\rho_A c_{pA} \kappa_H} \Delta Q_{HL} \quad (4.129)$$

nümerik açılımına ulaşılır.

6. Kısa yol simgeleri kullanılrsa;

$$S_1 = - \left[\frac{2(\Delta z)^2}{\Delta t \kappa_H} + 2 \right] \quad (4.130)$$

$$S_2 = - \left[\frac{2(\Delta z)^2}{\Delta t \kappa_H} - 2 \right] \quad (4.131)$$

$$S_3 = \frac{2\Delta z}{\rho_A c_{pA} \kappa_H} \quad (4.132)$$

$$T_{t+1,j+1} + S_1 T_{t+1,j} + T_{t+1,j-1} = -T_{t,j+1} + S_2 T_{t,j} - T_{t,j-1} - S_3 \Delta Q_{HL} \quad (4.133)$$

açılımına ulaşılır.

7. Elde olunan (4.133) denklem seti $1 < j < 10$ aralığında kullanılır.
8. (4.133) genel denklemi sınır koşullar kullanılarak hem toprak yüzeyi hem de bitki tepe düzlemi için düzenlenir.
9. $j = 1$ (toprak üstü düzlemi) için,

$$\kappa_H \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_F - T_1}{r_{AF}} \quad (4.134)$$

geçerli olup; $(t+1)$ için açılımı写字楼 ve $(t+1)$ 'li terimler halinde düzenlenir:

$$T_{t+1,0} = \left(1 - \frac{\Delta z}{\kappa_H r_{AF}}\right) T_{t+1,1} + \frac{\Delta z}{\kappa_H r_{AF}} T_{t+1,F} \quad (4.135)$$

10. Toprak yüzeyi için $(t+1)$ 'li terimler söz konusu olmadığından (t) 'li terimler üzerinden yaklaşım yapılır; (4.133) eşitliği $j=1$ olarak düzenlenir ve

$$S_4 = 1 - \frac{\Delta z}{\kappa_H r_{AF}} \quad (4.136)$$

$$S_5 = \frac{\Delta z}{\kappa_H r_{AF}} \quad (4.137)$$

kısa yol simgeleri kullanılırsa;

$$T_{t+1,2} + S_1 T_{t+1,1} = -T_{t,2} + (S_2 - 2S_4) T_{t,1} - 2S_5 T_{t,F} - S_3 \Delta Q_{HL} \quad (4.138)$$

açılımına ulaşılır.

11. $j = 10$ (bitki tepe düzlemi) için, sınır koşul bitki üstü hava sıcaklığı olup ($T_{t+1,j+1} = T_A$);

$$S_1 T_{t+1,10} + T_{t+1,9} = -2T_A + S_2 T_{t,10} - T_{t,9} - S_3 \Delta Q_{HL} \quad (4.139)$$

açılımı elde olunur.

Bitki standının dikey profilinde $j = 1 \dots 10$ olarak tasarlanan düğüm nokaları (nodları) için homojen olmayan doğrusal denklem sisteme ulaşılmıştır. Bu işlemler bağıl nem ve CO_2 konsantrasyonu için yinelenir ve tüm denklemler kendi içinde alt alta dizilerek aşağıdaki matris kalıbında写字楼:

$$[M] \cdot [\Psi] = [V] \quad (4.140)$$

Burada, $[M]$ katsayılar matrisi, $[\Psi]$ bilinmeyen elemanlardan oluşan çözüm vektörü, $[V]$ sağ taraf vektördür. Bu kalıp stratejik olarak, tridiagonal sistemde aşağıdaki şekilde düzenlenir:

$$\left[\begin{array}{ccccccccc} M_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & M_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & M_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & M_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & M_5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & M_6 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & M_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & M_8 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & M_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & M_{10} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \\ \Psi_5 \\ \Psi_6 \\ \Psi_7 \\ \Psi_8 \\ \Psi_9 \\ \Psi_{10} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \\ V_{10} \end{array} \right] \quad (4.141)$$

Bu matris kalıbında, matris ve sağ taraf vektörü karşılıkları aşağıda verilmiştir ($j = 1 \dots 10$):

[katsayılar matrisi] :

$$M_j = S_1 \quad (4.142)$$

[sağ taraf vektörü] :

$$V_1 = -\Psi_{t,2} + (S_2 - 2S_4)\Psi_{t,1} - 2S_5\Psi_{t,F} - S_3\Delta Q_{HL} \quad (4.143)$$

$$V_j = -\Psi_{t,j+1} + S_2\Psi_{t,j} - \Psi_{t,j-1} - S_3\Delta Q_{HL} \quad (4.144)$$

$$V_{10} = -2\Psi_A + S_2\Psi_{t,10} - \Psi_{t,9} - S_3\Delta Q_{HL} \quad (4.145)$$

Denklem sisteminin çözümlenmesinde Thomas algoritması kullanılmıştır (James 1992). Thomas algoritması, çok az yer kaplaması ve basit yapısı nedeniyle benimsenmiştir.

4. 2. 7. Bilgisayar programının özellikleri

Sera mikroklimasına ilişkin radyasyon, ısı ve kütle transfer işlemleri, şekil 4.28 'deki gibi, girdi, simülasyon ve çıktı alanlarına göre modellenmiş ve bilgisayar programı olarak Turbo Pascal 6.0 kullanılmıştır. Geliştirilen bilgisayar programına ilişkin akış diyagramı Ek 'de verilmiştir. Program, Microsoft Excel 5.0 'a uygun formatta tasarlanmıştır; simülasyon, Visual Basic makroları kullanılarak genişletilmiştir.

Girdi alanı, birincil ve ikincil veri tabanından oluşmaktadır. Birincil veri tabanı modeli tanımlayan girdileri, ikincil veri tabanı ise makroklimatolojik ölçüm verilerini içermektedir.

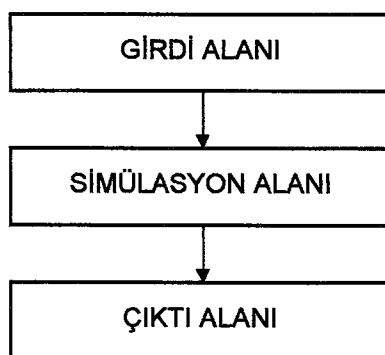
[Birincil veri tabanı]:

1. yörenin enlem derecesi,
2. yörenin boylam derecesi,
3. yerel zamanın standart meridyen derecesi,
4. zaman aralığı,
5. simüle edilen gün,
6. sera boyutları,
7. sera örtü malzemesi,
8. sera taban yüzey malzemesi,
9. bitki örtüsü,
10. bitki sıralarının yönü,
11. bitki yüksekliği,
12. bitki sıraları arası uzaklık,
13. olgun bitki standı genişliği,
14. ortalama yaprak uzunluğu,
15. ortalama yaprak genişliği.

[Ikincil veri tabanı]:

1. yerel saat,
2. bitki üstündeki güneş radyasyonu aki yoğunluğu,
3. dış hava sıcaklığı,
4. dış hava bağıl nemi,
5. cam örtü sıcaklığı,
6. sera tabanı yüzey sıcaklığı,
7. bitki örtüsü üstündeki hava sıcaklığı.
8. bitki örtüsü üstündeki havanın bağıl nemi,
9. bitki örtüsü üstündeki hava hızı,
10. bitki örtüsü üstündeki havanın CO_2 konsantrasyonu.

Turbo Pascal ve Excel Visual Basic Makro editöründe hazırlanan programlar ile grafiksel - istatistiksel alt yapılarıyla birlikte tüm dosyalar toplam 12.58 MB yer kaplamıştır.



Şekil 4.28. Program tasarım aşamaları

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Sera bitki örtüsü içindeki ısı ve kütle transfer karakteristikleri, geliştirilen mikroklimatolojik modelle araştırılmıştır. Ortaya konulan matematiksel model, Turbo Pascal 6.0 kodları kullanılarak programlanmıştır. Model, Antalya koşullarında Agroser tipi bir seradaki hıyar bitki örtüsü içine kurulan ölçüm standından 5.5.1994 tarihinde alınan ölçüm verileri kullanılarak çalıştırılmıştır.

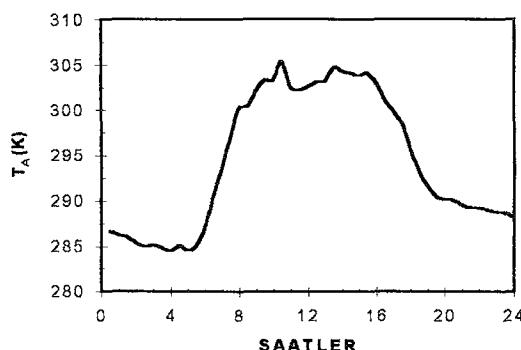
Araştırma bulguları, hava sıcaklığı, yaprak sıcaklığı, bağıl nem, CO_2 konsantrasyonu ve hava hızı gradyentleri için ele alınmış olup; saptanan değişkenler birincil analiz sonuçları kapsamında değerlendirilmiştir. Bu gradyentler, bitki standının $z=0.1$ ve $z=1.9$ m yükseklikleri arasındaki 10 diferansiyel tabakada simüle edilmiştir. Ölçüm verileri ve simülasyon bulguları karşılaştırılmış olarak irdelenmiştir. Radyasyon, ısı ve kütle transferi işlemleri ise, ikincil analiz sonuçları kapsamında değerlendirilmiştir. Güneş radyasyonu, bitki standının $z=0$ ve $z=2.0$ m yükseklikleri arasındaki 11 diferansiyel tabakada; ışıl radyasyon, net radyasyon, ısı ve kütle transferi işlemleri $z=0.1$ ve $z=1.9$ m düzlemleri arasındaki 10 diferansiyel tabakada irdelenmiştir. Hesaplanan tüm ısı ve kütle transfer karakteristiklerinin bitki standı içindeki değişimleri, profil bakış açısı altında değerlendirilmiştir.

5. 1. Sera Mikroklimasının Birincil Analiz Sonuçları

Hava ve yaprak sıcaklıklarını, bitki standının 20 ($=2 \times 5 + 2 \times 5$) noktasında alınmış olup; bağıl nem, CO_2 konsantrasyonu ve hava hızı bitki üstünde ölçülmüştür. Bitki standı içinde ölçülen veriler ile simülasyon sonuçları trend analizi kapsamında değerlendirilmiştir. Sıcaklıkların bitki standı içindeki ve stand ortalamalarına göre olan günlük değişimleri araştırılmış ve bitki standının 0.1, 0.5, 0.9, 1.3 ve 1.7 m için grafikleri çizilmiştir. Değişkenlerin profilleri, 10:00, 12:00, 14:00 ve 22:00, 24:00, 02:00 saatlerinde grafik olarak verilmiştir.

5. 1. 1. Hava sıcaklığı

Bitki standı üstünde ölçülen hava sıcaklığı rejimi şekil 5.1 'de verilmiştir. Gün boyunca stand üstünde ölçülen hava sıcaklığı ($T_{A,0}$) 284.5 ile 305.35 K arasında değişmiş olup; maksimum ve minimum sıcaklık farkı 20.85 K'dır.

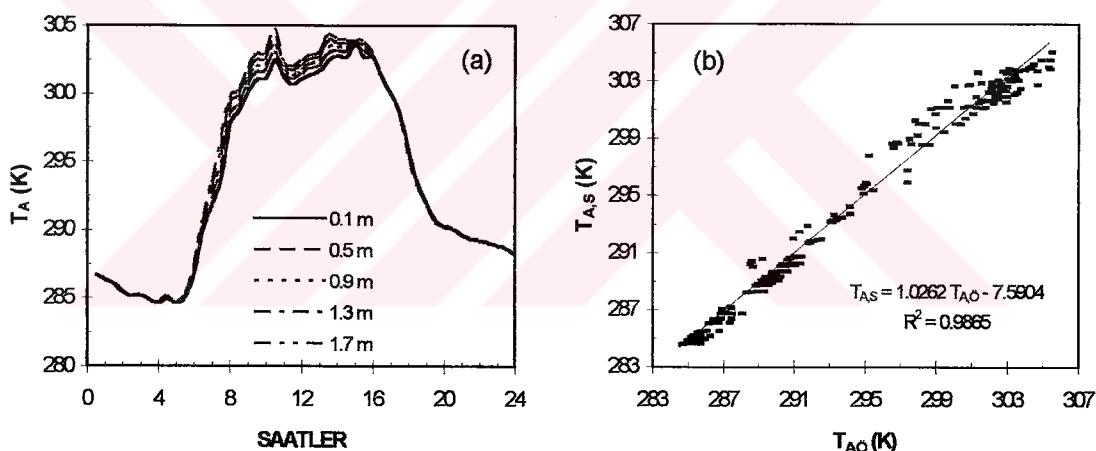


Şekil 5.1. Bitki standı üstünde ölçülen hava sıcaklığı rejimi

Bitki standının 10 noktasında simüle edilen hava sıcaklığının ($T_{A,S}$) 284.52 ile 305.05 K aralığında değiştiği hesaplanmıştır. Bitki standı içindeki hava sıcaklığının günlük değişimi, 5 düzlem için şekil 5.2 a'da örnek olarak verilmiştir. Hava sıcaklığının saat 12:00'deki stand ortalaması 301.82 K, saat 24:00'de ise, 288.28 K olarak hesaplanmıştır.

Bitki standı içinde, $z=1.0$ m'de ve stand ortalaması olarak hava sıcaklığının değişimi ile trend analizi sonuçları şekil 5.2; 5.3 ve 5.4 'de grafik olarak verilmiştir. Bu değerlendirme çizelge 5.1'de toplu olarak gösterilmiştir. Ayrıca, günün farklı zamanları için bitki standının 0.6, 1.0 ve 1.5 m yüksekliklerindeki ölçülen ve tahmin edilen hava sıcaklıkları çizelge 5.2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Örneğin, saat 12:00 'de bitki standının $z=1.0$ m 'de hava sıcaklığının hesaplanan ve ölçülen değerleri arasındaki fark, $T_{A,S} - T_{A,O} = -0.77$ K 'dir. Saat 24:00'de ise, bu fark, -0.20 K 'dir. Buna göre, gece bitki örtüsü ısıl açıdan daha kararlı olduğu için ölçülen ve tahmin edilen hava sıcaklıkları arasındaki hata payının daha düşük olduğu söylenebilir.



Çizelge 5.1. Hava sıcaklığı için trend analizi sonuçları

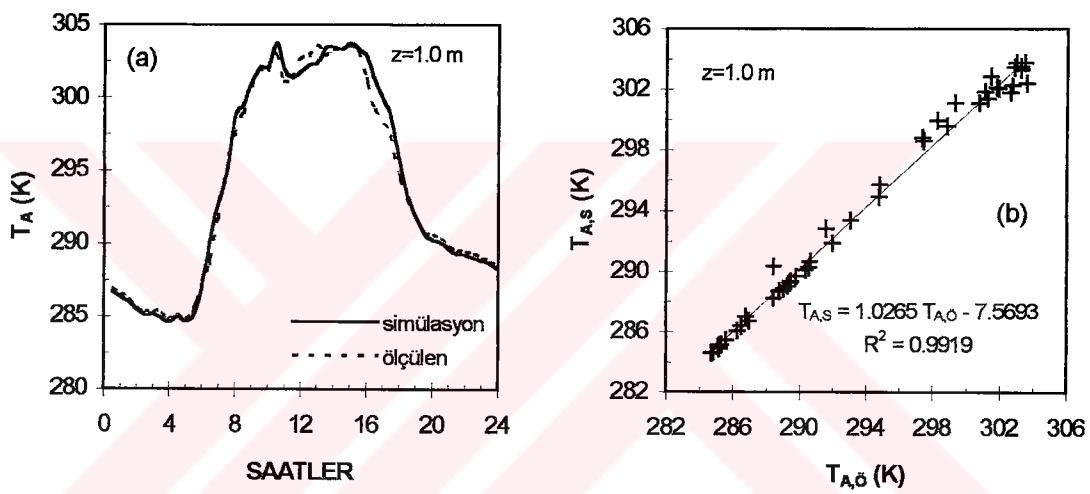
$$T_{A,S} = aT_{A,O} + b, R^2 \text{ belirtme katsayısi, STE standard hata (K)}$$

T_A için trend analizi	a	b	R^2	STE (K)	Şekil No
Tüm bitki standı	1.0262	-7.5904	0.9865	0.8280	5.2
$z = 1.0$ m	1.0265	-7.5693	0.9919	0.6496	5.3
Stand ortalaması	1.0346	-10.084	0.9935	0.5849	5.4

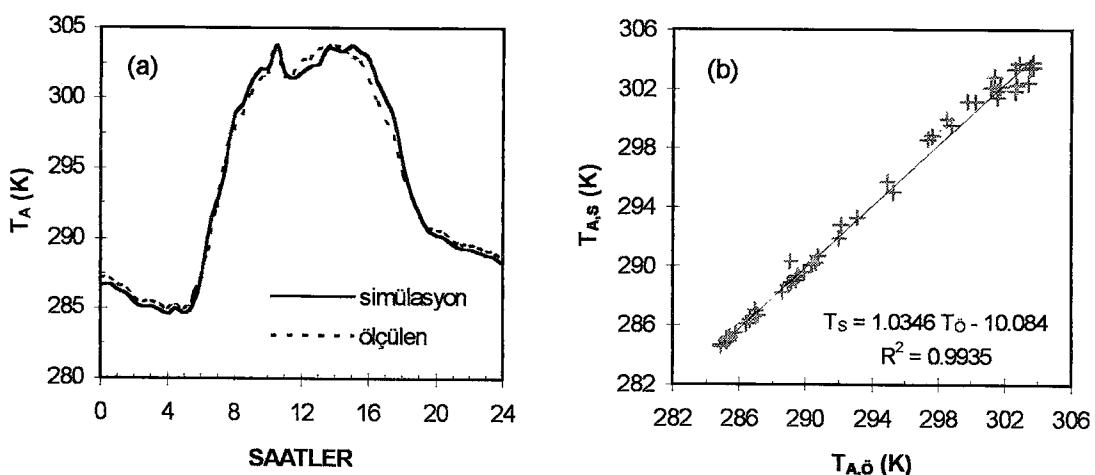
Çizelge 5.2. Hava sıcaklığı için seçilen model sonuçlarının değerlendirilmesi

S : simülasyon, Ö : ölçülen, STE : standart hata (K)

SAATLER	z=0.6 m		z=1.0 m		z=1.5 m	
	S	Ö	S	Ö	S	Ö
06:00	286.89	286.75	286.97	286.75	287.08	287.30
12:00	301.52	302.80	301.83	302.60	302.20	303.40
18:00	295.80	294.95	295.70	294.80	295.55	294.65
24:00	288.27	288.8	288.25	288.45	288.21	288.20
ortalama	293.95	293.64	294.08	293.71	294.25	294.14
	STE=0.9135		STE=0.6496		STE=0.6345	

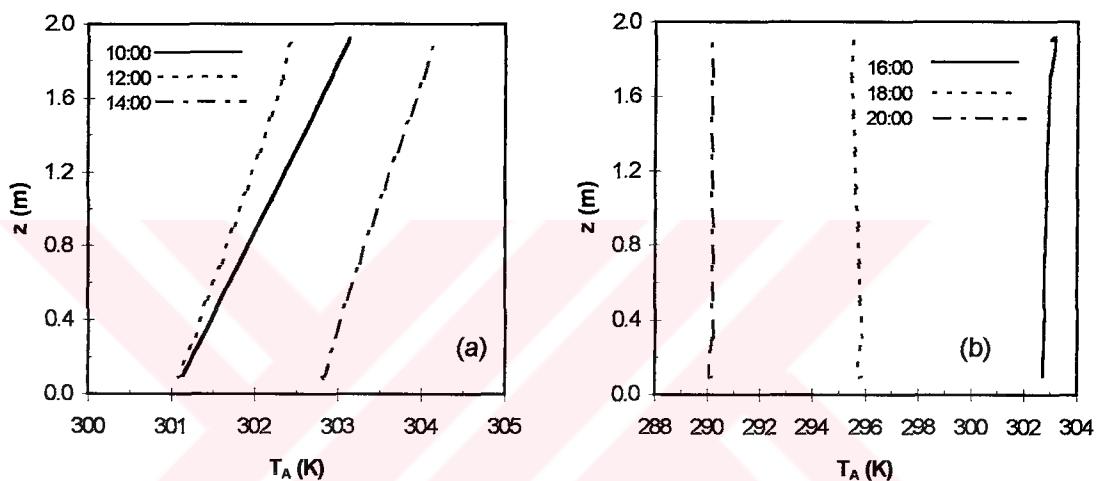


Şekil 5.3. a) z=1.0 m 'de T_A rejimi, b) T_{A,S} ve T_{A,O} için trend analizi



Hava sıcaklığı profili tüm gün boyunca simüle edilen verilere göre seçilen gündüz ve gece saatleri için şekil 5.5'de verilmiştir. Beklendiği gibi, hava sıcaklığı, gündüz saatlerinde bitkinin tabanından tepesine doğru düzgün artış göstermesine karşın; gece saatlerinde bitkinin alt ve üst seviyelerinde hemen hemen sabit kalmıştır. Yani, günlük ortalama hava sıcaklığı rejimi ile normalize bitki yüksekliği arasında belirtme katsayısı 0.9999 olan doğrusal bir ilişki türetilebilir:

$$\overline{T_A} = 0.6675 \frac{Z}{h} + 293.74 \quad (5.1)$$



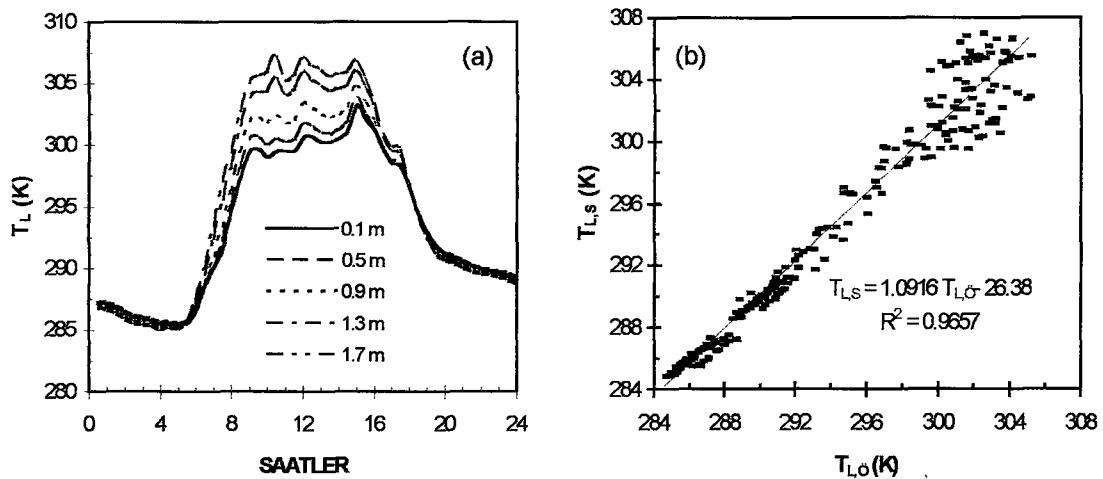
Şekil 5.5. T_A hava sıcaklığı profili; a) gündüz, b) gece

5. 1. 2. Yaprak sıcaklığı

Bitki standında yaprak sıcaklığının (T_{LS}) 284.91 ile 307.28 K aralığında değiştiği hesaplanmıştır; günlük değişimi, şekil 5.6 a'da 5 düzlem için verilmiştir. Yaprak sıcaklığı stand ortalamaları saat 12:00'de 303.99 K, saat 24:00'de 288.89 K olarak hesaplanmıştır.

Bitki standı içinde, z=1.0 m'de ve stand ortalaması olarak yaprak sıcaklığının değişimi ile trend analizi sonuçları şekil 5.6, 5.7 ve 5.8 'de verilmiştir. Bu değerlendirme çizelge 5.3'de toplu olarak gösterilmiştir.

Ayrıca, günün farklı zamanları için bitki standının 0.6, 1.0 ve 1.5 m yüksekliklerindeki ölçülen ve tahmin edilen hava sıcaklıkları çizelge 5.4'de karşılaştırılmış olarak verilmiştir.



Şekil 5.6. a) Bitki standında yaprak sıcaklığı rejimi, b) $T_{L,S}$ ve $T_{L,O}$ için trend analizi

Çizelge 5.3. Yaprak sıcaklığı için trend analizi sonuçları

$$T_{L,S} = aT_{L,O} + b, R^2 \text{ belirtme katsayısı, STE standard hata (K)}$$

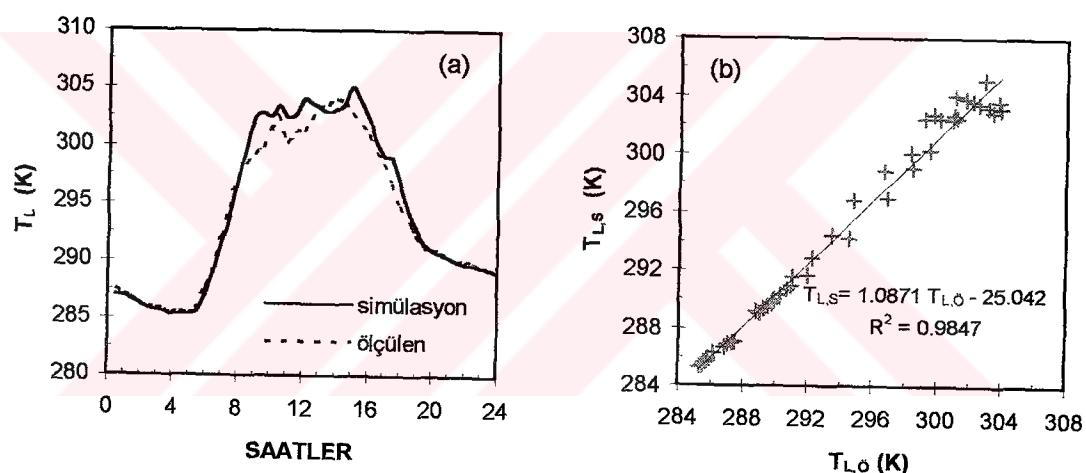
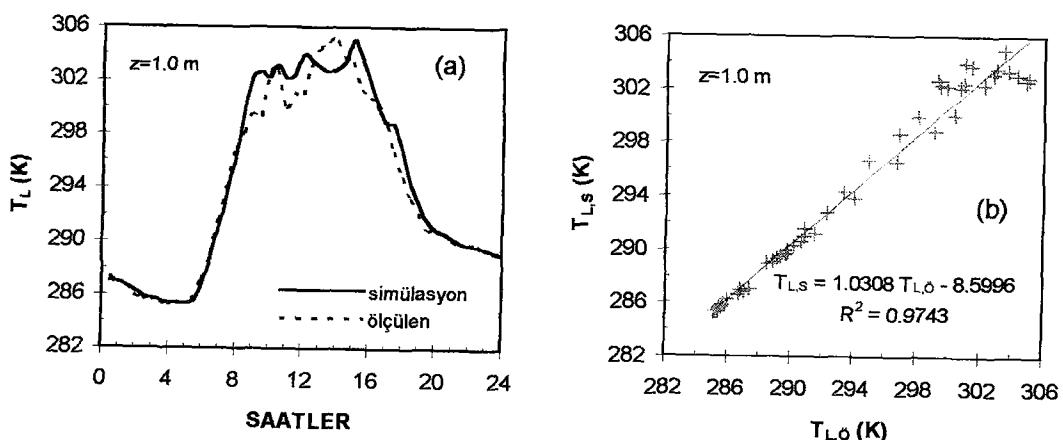
T_L için trend analizi	a	b	R^2	STE (K)	Şekil No
Tüm bitki standı	1.0916	-26.38	0.9657	1.3296	5.6
$z = 1.0 \text{ m}$	1.0308	-8.5996	0.9743	1.1385	5.7
Stand ortalaması	1.0871	-25.042	0.9847	0.8847	5.8

Çizelge 5.4. Yaprak sıcaklığı için seçilen model sonuçlarının değerlendirilmesi

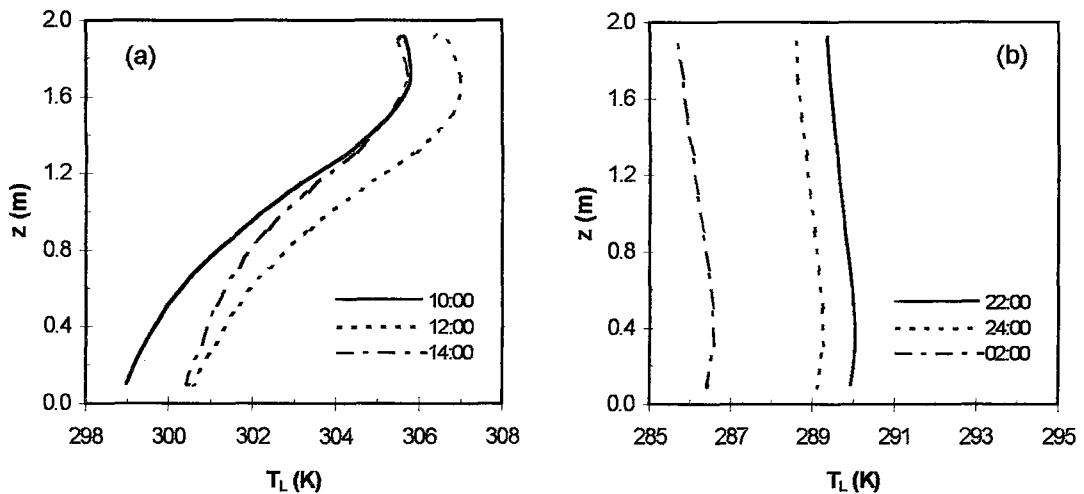
S : simülasyon, Ö : ölçülen, STE : standart hata. (K)

SAATLER	$z=0.6 \text{ m}$		$z=1.0 \text{ m}$		$z=1.5 \text{ m}$	
	S	Ö	S	Ö	S	Ö
06:00	286.66	287.05	286.81	287.00	287.29	287.10
12:00	302.05	301.40	303.96	300.95	306.81	301.60
18:00	296.62	294.95	296.71	294.90	297.00	294.40
24:00	289.22	289.30	289.01	288.90	288.75	288.40
ortalama	293.80	293.68	294.39	293.79	295.29	293.83
	STE=0.8638		STE=1.1385		STE=1.0828	

Örneğin, saat 12:00 'de bitki standının $z=1.0 \text{ m}$ 'de yaprak sıcaklığının simüle edilen ve ölçülen değerleri arasındaki fark $T_{L,S}-T_{L,O}=3.01 \text{ K}$ 'ne dek ulaşmıştır. Saat 24:00'de ise bu fark, $T_{L,S}-T_{L,O}=0.11 \text{ K}$ 'e kadar düşmüştür. Güneşlenme sürecinde yaprak sıcaklığındaki dalgalanma, enerji dengesinin dolayısıyla bitki elemanlarında depolanan ısının sürekli yön değiştirmesinden kaynaklanmaktadır.

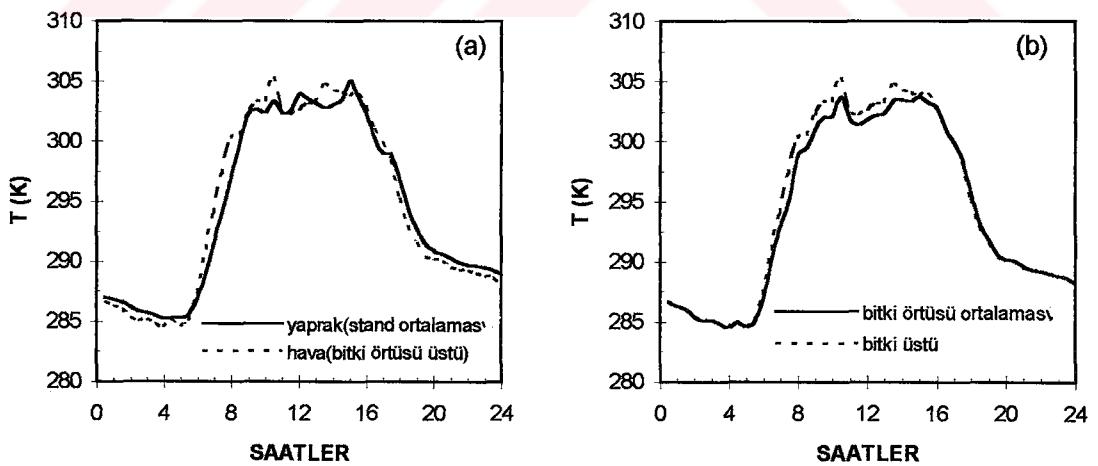


Yaprak sıcaklığı profili, örneklenen gündüz ve gece saatlerinde şekil 5.9'daki gibi simüle edilmiştir. Bitki standı içindeki hava ile yaprak sıcaklığı profilleri farklılık göstermektedir. Bu farklılık gündüz periyotlarında daha belirgin olup; profil parabolik yönetim göstermektedir. Profilin gece yaklaşık sabit kaldığı vurgulanabilir. Alt tabakalarda yaprak sıcaklığının düşük olması güneş radyasyonunun etkili olmamasından kaynaklanır. Gece ise ısıl radyasyon etkilidir.

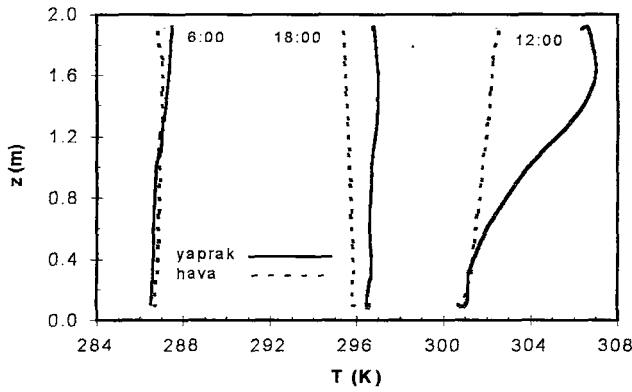


Şekil 5.9. T_L yaprak sıcaklığı profili; a) gündüz, b) gece

Sıcaklıklara ilişkin analiz sonuçları, yaprak ve hava sıcaklığının günlük değişimleri bazında genişletilmiştir. Model girdi değişkenleri ile simüle edilen yaprak ve hava sıcaklıklarının günlük değişimleri şekil 5.10'daki gibi çizilmiştir. Şekil 5.10 a'da simüle edilen ortalama yaprak sıcaklığı ile ölçülen bitki üstü hava sıcaklığının günlük değişimleri kıyaslanmıştır. Şekil 5.10 b'de ise, simüle edilen bitki örtüsü ortalama hava sıcaklığı ile ölçülen bitki üstü hava sıcaklığının günlük değişimleri karşılaştırılmıştır. Bitki standına ilişkin yaprak ve hava sıcaklıkları profili şekil 5.11'de verilen grafikle 06:00, 12:00 ve 18:00 saatleri için karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.10. Bitki üstü T_A ile ortalama a) T_L 'nin ve b) T_A 'nın günlük değişimi



Şekil 5.11. Yaprak ve hava sıcaklıklarının simüle edilen dikey profilleri

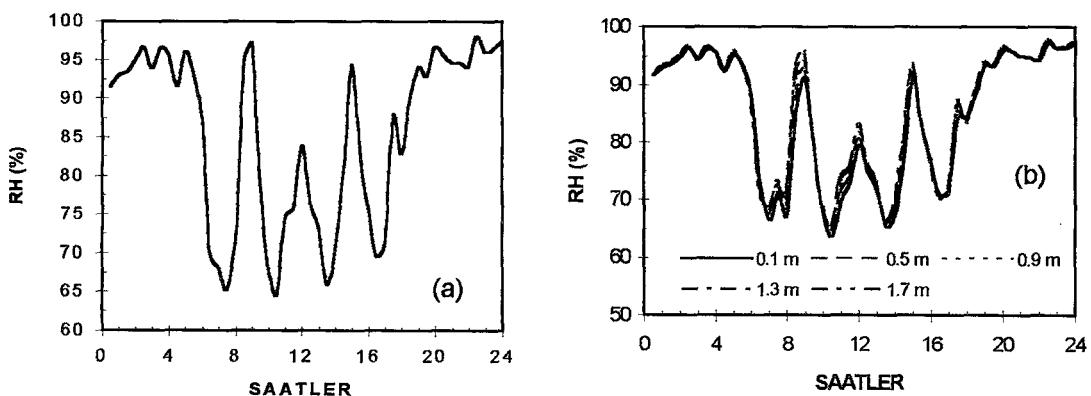
Yaprak sıcaklığı teorik olarak, bitki elemanları üzerindeki enerji dengesinin pasif bir çıktısıdır. Bu nedenle, teoride yaprak sıcaklığının saptanmasında sınır koşullar doğrudan etkili değildir; matematiksel olarak yeter koşul enerji dengesinin sağlanmasıdır. Bitki örtüsü üzerine gelen güneş radyasyonunun yaklaşık yarısı yapraklar tarafından soğurulur. Net radyasyon, transpirasyon için gereksinim duyulan buharlaşma ısısından daha düşük kaldığında, yaprak sıcaklığı hava sıcaklığından yeterince düşük düzeye çekilir.

5.1.3. Bağıl nem

Bitki örtüsü üzerinde ölçülen bağıl nemin % 64.63 ile % 98.01 değerleri arasındaki değişimi grafik olarak şekil 5.12 a 'da verilmiştir. Simüle edilen ortalama bağıl nem rejimi ise, % 64.88 ile % 97.57 aralığında değişmiştir (şekil 5.12 b). Ara değerler çizelge 5.5'de verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan bağıl nem değişimi ile trend analizi şekil 5.13 a ve b'de görülmektedir. Bu analize göre, bitki üzerinde ölçülen ve simüle edilen verilerin stand ortalaması arasında aşağıdaki doğrusal regresyon eşitliği elde olunmuştur:

$$RH_S = 0.9658 RH_O + 2.6921 \quad (5.2)$$

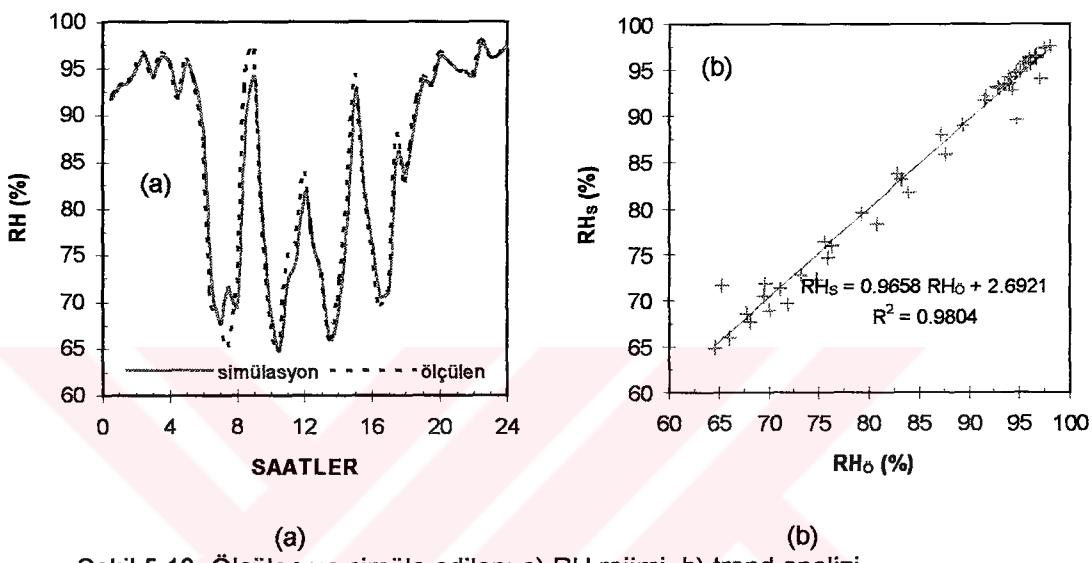
Bu ilişkinin belirtme katsayısı 0.9804 olup; standart hatası % 1.549 'dır.



Şekil 5.12. a) Ölçülen bağıl nem, b) bitki standında hesaplanan bağıl nem rejimleri

Çizelge 5.5. Bitki standında bağıl nemin değişimi

saat	$z=0.5\text{ m}$	$z=1.0\text{ m}$	$z=1.5\text{ m}$
	Bağıl nem (%)		
12:00	80.61	81.91	82.96
24:00	97.32	97.39	97.43



Şekil 5.13. Ölçülen ve simüle edilen; a) RH rejimi, b) trend analizi

Bağıl nem profili, gündüz ve gece saatleri için şekil 5.14 a ve b'de ömeklenmiştir. Buna göre, bağıl nem, bitki standı içinde farklı yönelikler göstermiştir. Gün ortasında, standın taban düzleminde % 79.50, tepe düzleminde % 83.59 olup; stand ortalaması % 81.76'dır. Gece yarısında ise, bağıl nem hemen hemen sabit kalmıştır.

5. 1. 4. CO_2 konsantrasyonu

Bitki örtüsü üzerinde ölçülen CO_2 konsantrasyonu gün boyunca, şekil 5.15 a 'da verilen grafikteki gibi, 214.9 ile 262.5 ppm arasında değişmiştir.

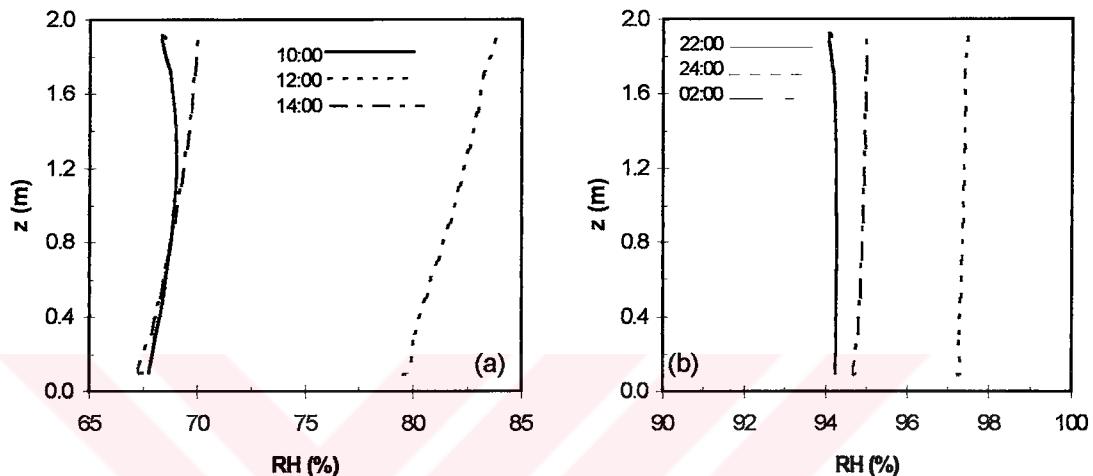
Bitki standındaki CO_2 konsantrasyonu, şekil 5.15 b'deki gibi taban ve tepe düzlemleri arasında 215.9 ile 262.9 ppm aralığında değiştiği hesaplanmış ve çizelgede 5.6'da ara tabakalar için sayısal değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.6. Bitki standında CO_2 konsantrasyonunun değişimi

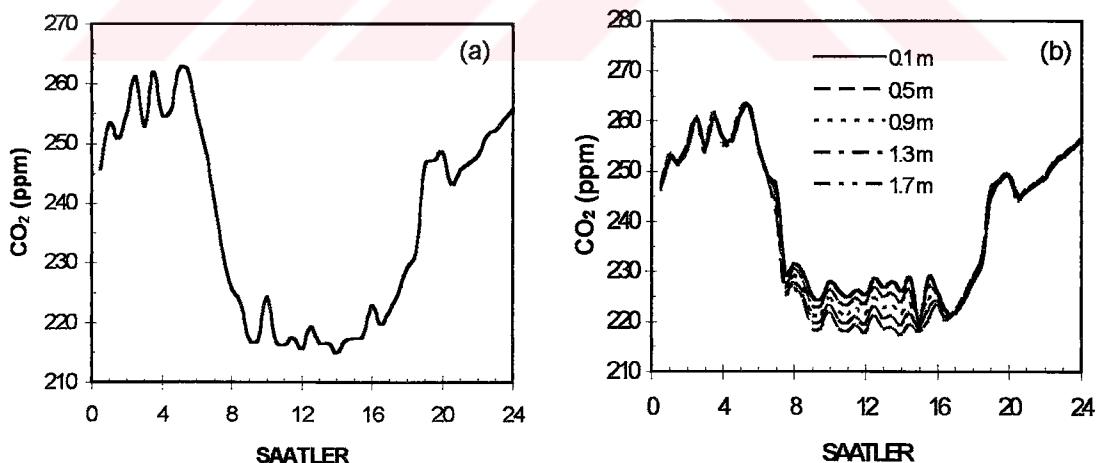
saat	$z=0.5\text{ m}$	$z=1.0\text{ m}$	$z=1.5\text{ m}$
	CO_2 konsantrasyonu (ppm)		
12:00	223.2	220.7	218.3
24:00	256.4	256.3	256.1

Bitki standının diferansiyel tabakalarında hesaplanan CO_2 konsantrasyonundan ortalama büyülüklere geçilmiştir. Bitki standının ortalama CO_2 konsantrasyonu, şekil 5.16 a'daki gibi 218.8 ile 262.7 ppm kapalı aralığında değişmiştir. Bu iki veri kümesi için aşağıdaki doğrusal regresyon eşitliğine ulaşılmış olup; bu ilişkinin belirtme katsayısı 0.9869 ve standart hatası 1.7679'dur (şekil 5.16 b) :

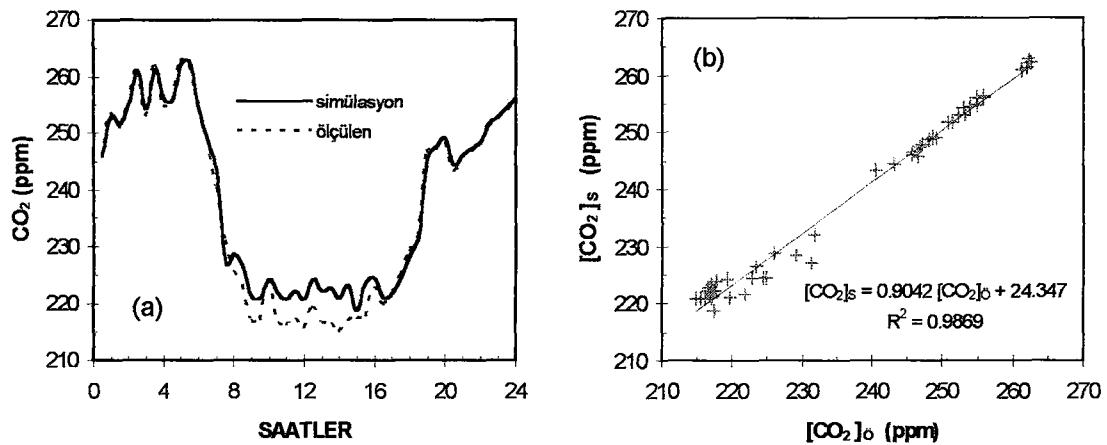
$$[\text{CO}_2]_S = 0.9042 [\text{CO}_2]_0 + 24.347 \quad (5.3)$$



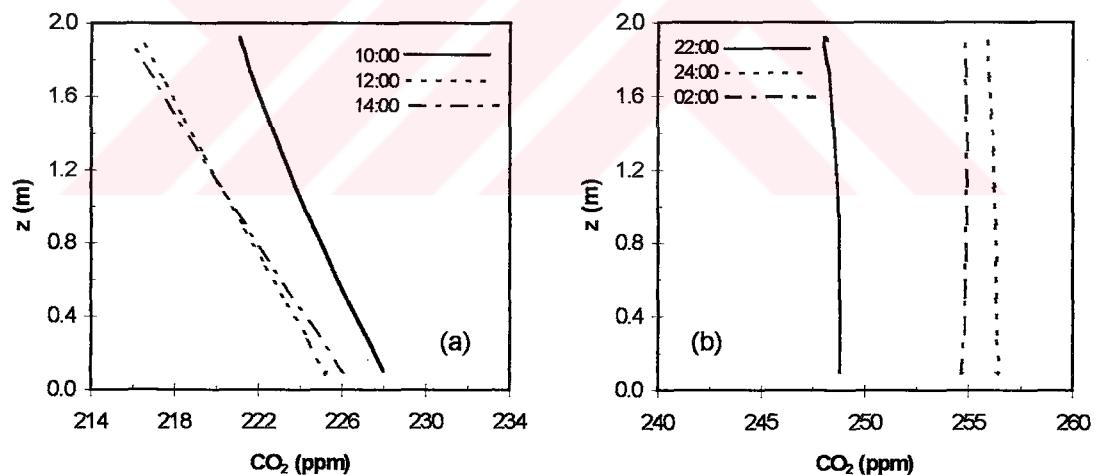
Şekil 5.14. Bağıl nem profili; a) gündüz; b) gece



Şekil 5.15. a) Ölçülen CO_2 konsantrasyonu , b) hesaplanan CO_2 konsantrasyonu rejimleri



Bitki standında CO_2 konsantrasyonu profili, şekil 5.17 a ve b'deki grafikle gündüz ve gece saatleri için ömeklenmiştir. Buna göre, saat 12:00 'de taban ve tepe düzlemlerindeki CO_2 konsantrasyonları sırasıyla 225.27 ve 216.50 ppm, saat 24:00 'de ise 256.34 ppm ve 255.92 ppm olarak hesaplanmıştır.



5. 1. 5. Hava hızı

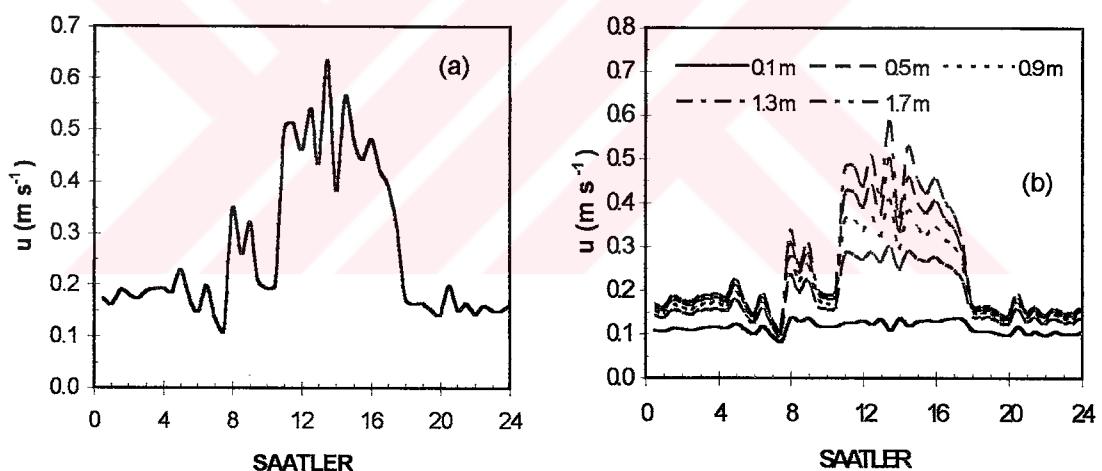
Bitki örtüsü üzerinde hava hızının, şekil 5.18 a'da verilen grafikteki gibi 0.112 ile 0.635 ms^{-1} arasında ölçülmüştür. Bu koşullarda, bitki üzerinde ölçülen hava hızı gece periyodunda daha dingindir.

Bitki örtüsü içindeki hava hızı, standın farklı düzlemlerinde 0.083 ile 0.635 ms^{-1} aralığında değiştiği hesaplanmıştır; şekil 5.18 b'de seçilen düzlemler için örneklenmiş ve çizelge 5.7'de ara tabakalar için sayısal değerleri verilmiştir. Bitki örtüsü tabanına yakın olan 0.1 m seviyesindeki hava hızı gün boyunca çok fazla değişmemiş yaklaşık 0.1 ms^{-1} düzeyinde kalmıştır.

Bitki standının ortalama hava hızı, şekil 5.19 a'daki grafiğe göre, 0.102 ile 0.381 ms^{-1} arasında değişmiştir. Bitki örtüsü üzerinde ölçülen hava hızı ile bitki standının ortalama hava hızı arasındaki ilişkinin regresyon eşitliği elde olunmuştur (şekil 5.19 b):

$$\bar{u}_s = 0.6126 u_{0.2,0} + 0.0461 \quad (5.4)$$

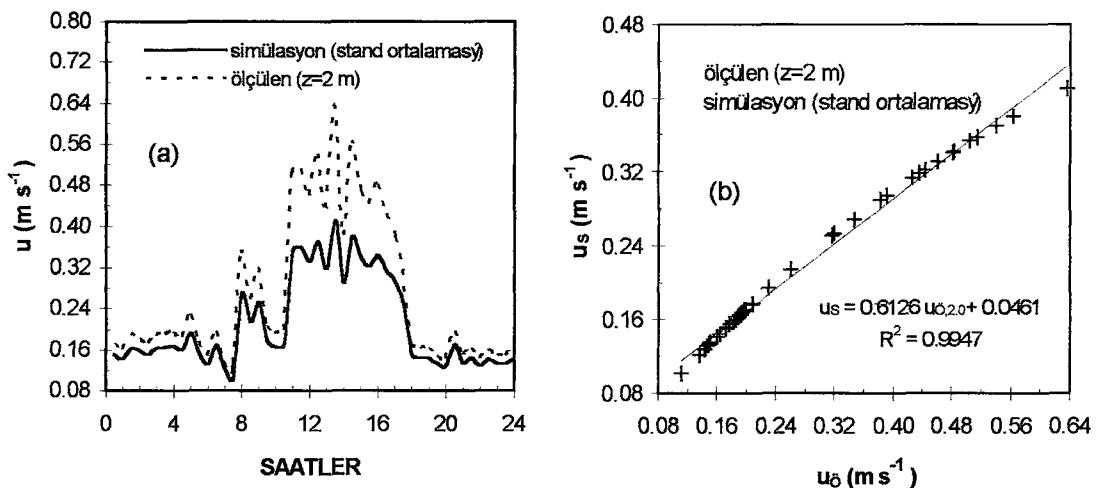
Bu ilişkinin belirtme katsayısı 0.9947 olup; standart hatası 0.006536 ms^{-1} 'dir.



Şekil 5.18. a) Ölçülen hava hızı rejimi, b) simüle edilen hava hızı rejimi

Çizelge 5.7. Bitki standında hava hızlarının değişimi

	$z=0.5 \text{ m}$	$z=1.0 \text{ m}$	$z=1.5 \text{ m}$
	Hava hızı (m/s)		
12:00	0.268	0.349	0.411
24:00	0.134	0.147	0.155

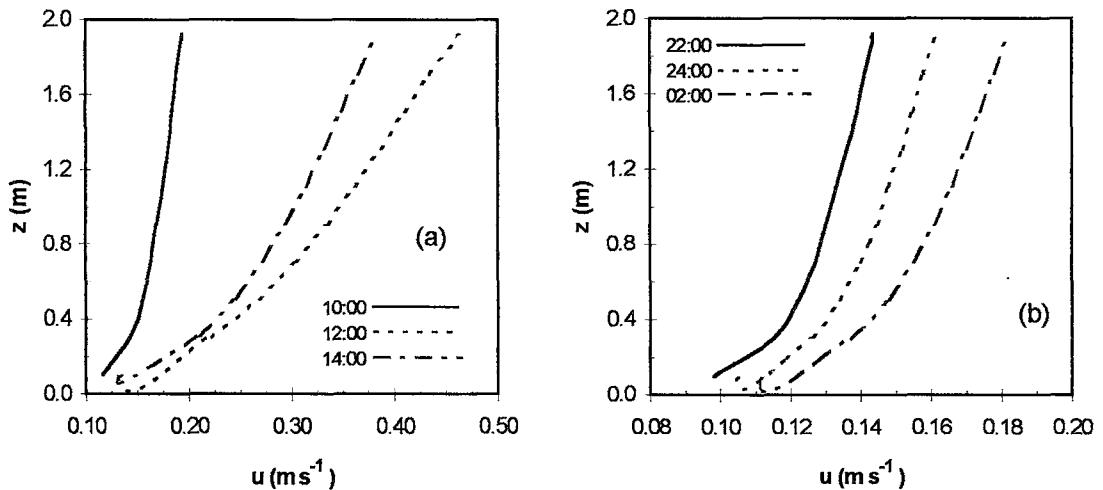


Şekil 5.19. Ölçülen ve simüle edilen; a) hava hızı rejimi, b) trend analizi

Bitki standında hava hızı profili, şekil 5.20 a ve b'deki grafikle gündüz ve gece saatleri için örmeklenmiştir. Buna göre, saat 12:00 'da taban ve tepe düzlemlerindeki hava hızları, sırasıyla 0.132 ms^{-1} ve 0.461 ms^{-1} ; saat 24:00 'de ise, 0.105 ms^{-1} ve 0.161 ms^{-1} değerlerini almıştır.

Bitki standında hava hızı ile stand indeksi arasında ilişkilerin türetilmesi hem model hem de deneysel çalışmalarında kullanılabilir. Bu amaçla normalize bitki yüksekliği ile ortalama hava hava hızı arasında belirtme katsayısı 0.9122 olan aşağıdaki üssel ilişkiye ulaşılmıştır:

$$\bar{u} = 0.2685 \left(\frac{z}{h} \right)^{0.3173} \quad (5.5)$$



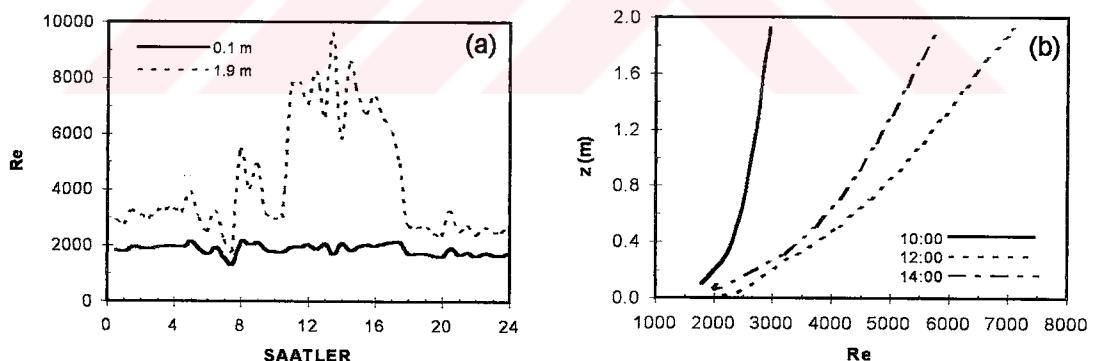
Şekil 5.20. Hava hızı profili; a) gündüz, b) gece

5. 1. 6. Boyutsuz sayılar

Bitki standında sıcaklığın değişmesi hava, su buharı ve karbondioksidin fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Dolasıyla, bitki standında ısı ve kütle transferinin tanımlanmasında kullanılan boyutsuz sayılar da viskoz, yüzdürme ve eylemsizlik kuvvetlerinin etkisi altında kalmaktadır. Bu bölümde ısı transferi işlemleri kapsamında Reynolds, Grashof, Prandtl, Nusselt ve Stanton sayılarıyla birlikte kütle transferi işlemleri için kullanılan Schmidt, Sherwood, Stanton ve Lewis sayıları irdelemiştir. Ayrıca, sıcaklık ve hız gradyentlerine göre, Richardson sayısının değişimi de araştırılmıştır.

Eylemsizlik kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan Re sayısı bitki standının farklı yüksekliklerinde 1337.5 ile 9594.0 arasında değişmiştir. Şekil 5.21 a'da, $z=0.1$ m ve $z=1.9$ m'deki günlük değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Gün boyunca Re sayısı değişimi, tabanda dingin iken, tepede değişken bir davranış göstermiştir. Re sayısı profili, gündüz 10:00, 12:00 ve 14:00 saatleri için şekil 5.21 b'de ömek olarak verilmiştir. Bitki standının farklı yüksekliklerinde gün ortası ile gece yarısına ilişkin değerleri çizelge 5.8'de özetlenmiştir.

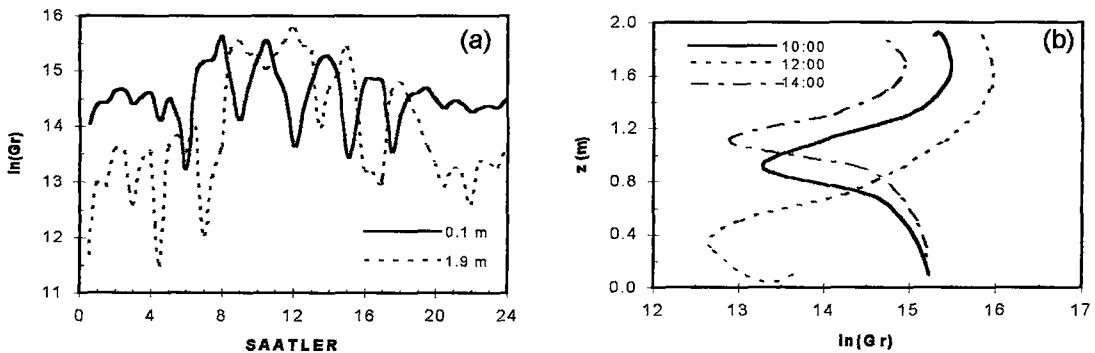
Akış sürecinde yüzdürme kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan $In(Gr)$ sayısı gün boyunca 10.8 ile 16.0 değerleri arasında değişmiş olup; bitki standının $z=0.1$ m ve $z=1.9$ m için şekil 5.22 a'da verilmiştir. Gece periyotlarında $In(Gr)$ sayısı, özellikle taban seviyesinde daha dingin bir davranış sergilemiş olup; gündüz periyodunda sapmalar göstermiştir. Gr sayısı profili, gündüz saatleri için şekil 5.22 b'de çizilmiştir.



Şekil 5.21. a) Bitki standında Re sayısının günlük değişimi, b) Re profili

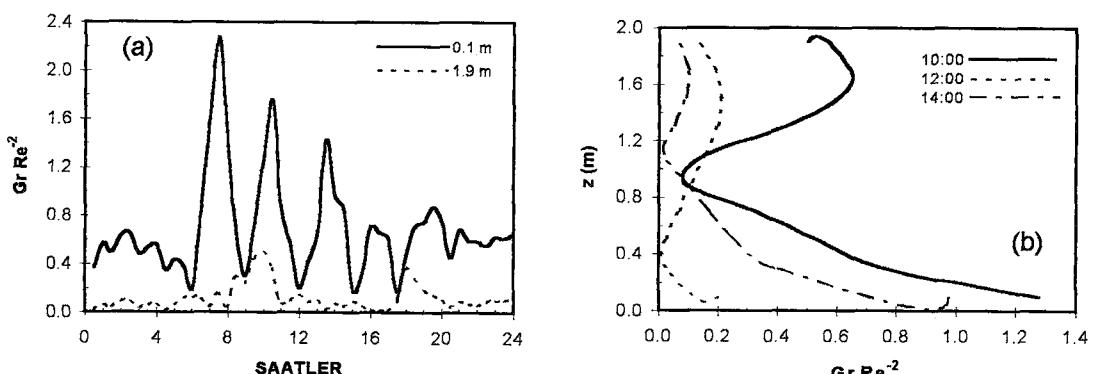
Çizelge 5.8. Bitki standında Re sayısının değişimi

saat	$z=0.5$ m	$z=1.0$ m	$z=1.5$ m
	Reynolds sayısı		
12:00	4121.8	5347.3	6292.8
24:00	2232.7	2441.4	2583.6



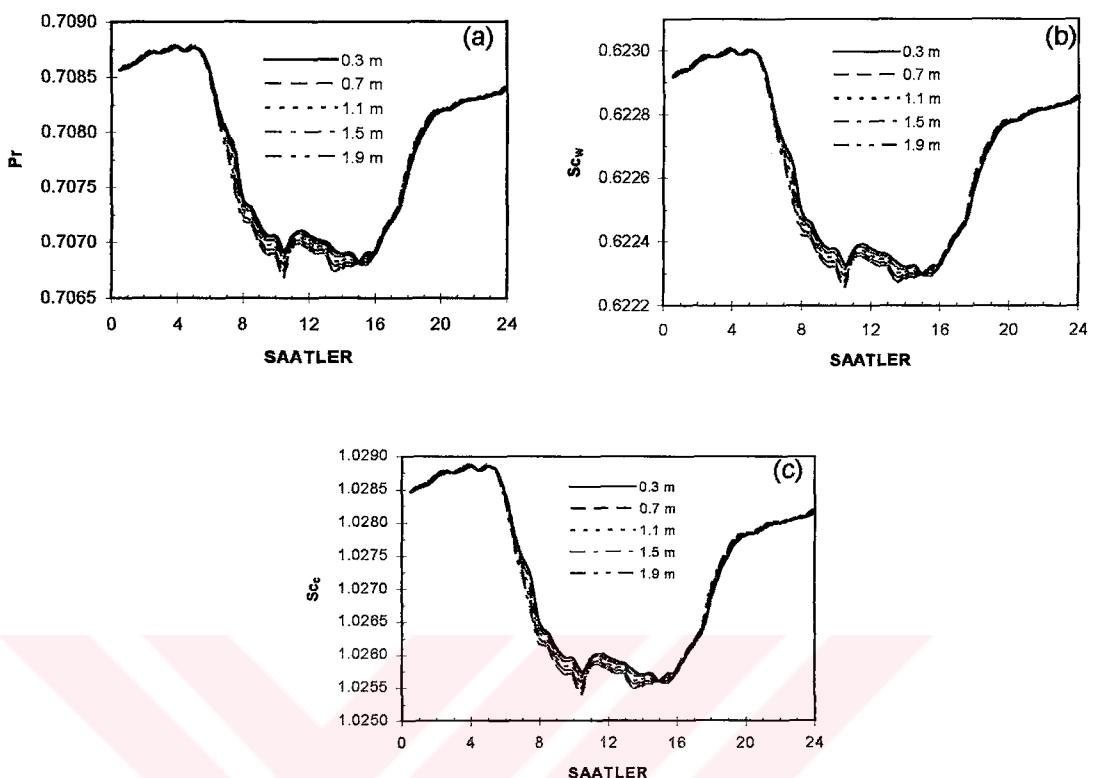
Yüzdürme kuvvetlerinin eylemsizlik kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan GrRe^{-2} indeksi 0.09 ile 2.3 değerleri arasında değişmiştir. Bitki standının taban ve tepe düzlemleri için günlük değişimi şekil 5.23 a'da, GrRe^{-2} indeksi profili şekil 5.23 b'de verilmiştir. Farklı yüksekliklerde GrRe^{-2} indeksinin değişimi çizelge 5.9'da özetlenmiştir. GrRe^{-2} indeksi, farklı akış rejimlerinde geçiş bölgelerinin saptanmasında kullanılır. $\text{GrRe}^{-2} > 1$ ise doğal konveksiyon, $\text{GrRe}^{-2} = 1$ ise karışık konveksiyon ve $\text{GrRe}^{-2} < 1$ ise zorlanmış konveksiyon söz konusudur.

Konveksiyonla ısı transferi, temelde akışı tanımlayan Re sayısı kadar akışkanın özelliklerini tanımlayan Prandtl sayısının da fonksiyonudur. Pr sayısı, stand içinde hemen hiç değişmemiş olup; ortalama değeri 0.7078 olarak saptanmıştır. Kütle taşınımı işlemlerinde akışkanın özellikleri, Pr sayısına benzer bir rol oynayan Schmidt sayısı ile tanımlanır. Su buharı Schmidt sayısı (Sc_w) 0.6225; CO_2 taşınımı Schmidt sayısının (Sc_c) 1.026 ortalama değerleri bazında değişim göstermiştir. Pr ve Sc sayılarının bitki standı içindeki günlük değişimi şekil 5.24 a, b, c'de verilmiştir.



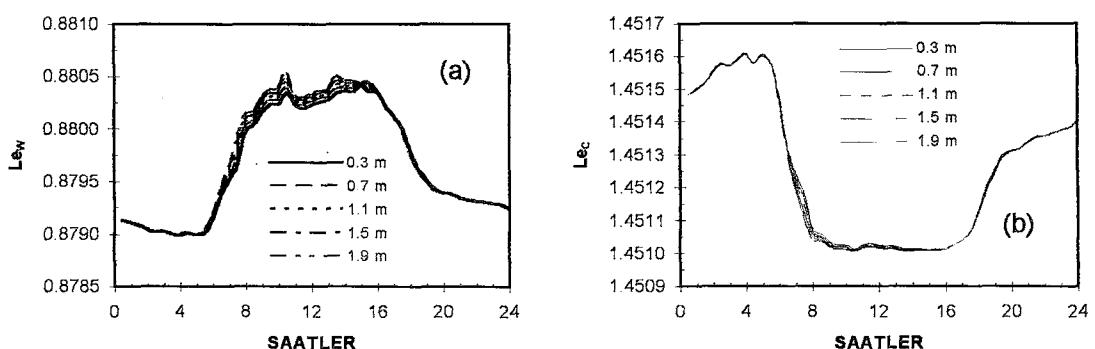
Çizelge 5.9. Bitki standında GrRe^{-2} indeksinin değişimi

saat	$z=0.5 \text{ m}$	$z=1.0 \text{ m}$	$z=1.5 \text{ m}$
	GrRe^{-2} indeksi		
12:00	0.026	0.136	0.214
24:00	0.352	0.295	0.186



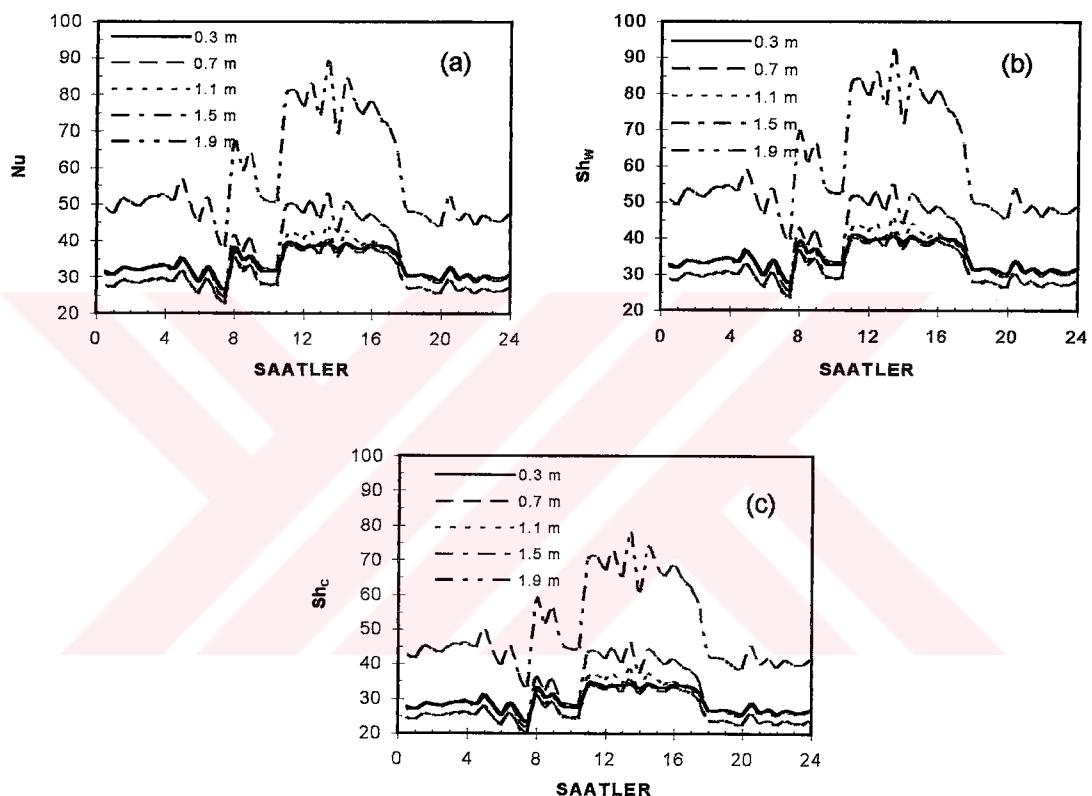
Şekil 5.24. Bitki standında Pr ve Sc_W ve Sc_C sayılarının günlük değişimi

Bir taşınım işlemi, eşzamanlı olarak ısı ve kütle konveksiyonu işlemlerini kapsadığı zaman Lewis (Le) sayısının kullanılması uygundur. Moleküler ısı difüzyonu ile moleküler kütle difüzyonunun anlaşılması açısından Le sayının irdelenmesi gerekir. Sc ve Pr sayılarına dayalı biçimde tasarlanan ve su buharı ve CO_2 konveksiyonu ile ısı konveksiyonunun göstergesi olan Le sayısının günlük değişimi, şekil 5.25 a ve b'deki grafiklerle gösterilmiştir. Buna göre, su buharı taşınımı Le_w sayısı 0.8790 ile 0.8805; CO_2 taşınımı Le_c sayısı 1.4510 ile 1.4516 arasında değişmiştir.

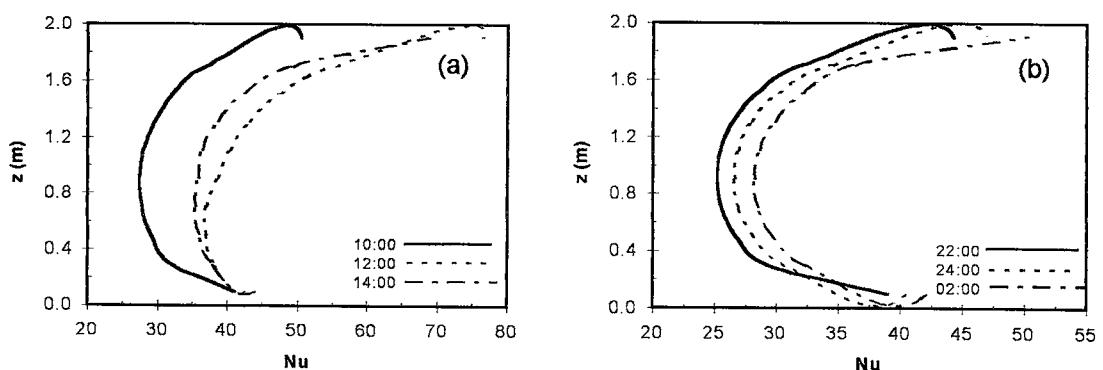


Şekil 5.25. Bitki standında a) Le_w , b) Le_c sayısının günlük değişimi

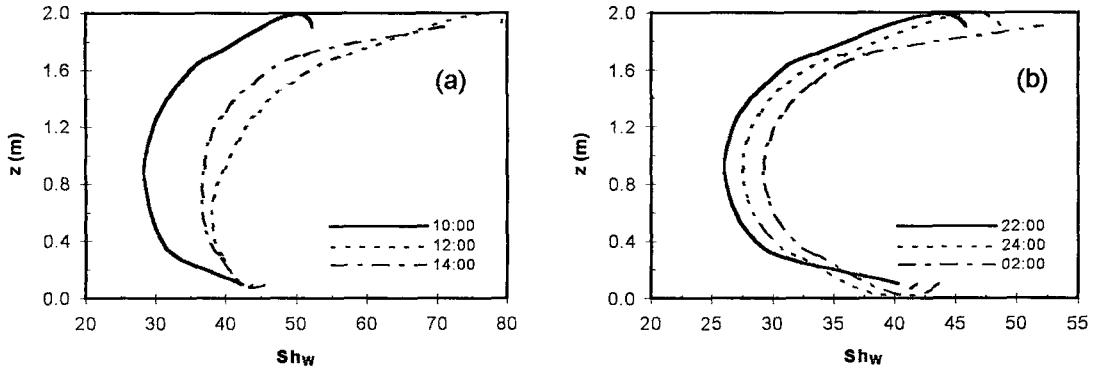
Konveksiyonla ısı transferinin bir ölçüsü olan Nusselt sayısı ile konveksiyonla kütle taşınımının tanımlanmasında kullanılan Sherwood sayılarının bitki standı içindeki günlük değişimi şekil 5.26 a, b ve c'de verilmiştir. Nu sayısı 22.5 ile 89.1 arasında değişirken; su buharı taşınımı Sh_w sayısının 23.3 ile 92.2 ve CO_2 taşınımı Sh_c sayısının 19.7 ile 78.1 olarak değiştiği saptanmıştır. Nu ve Sh sayılarına ilişkin profiller, gündüz ve gece periyotları için sırasıyla şekil 5.27, 28 ve 29'da çizilmiştir. Konveksiyonla ısı ve kütle transferi, gece ve gündüz periyodunda tepe düzleminde etkili olmuştur. Belirli saatlerde bitki standının farklı yüksekliklerindeki sayısal değerleri çizelge 5.10'da özetlenmiştir.



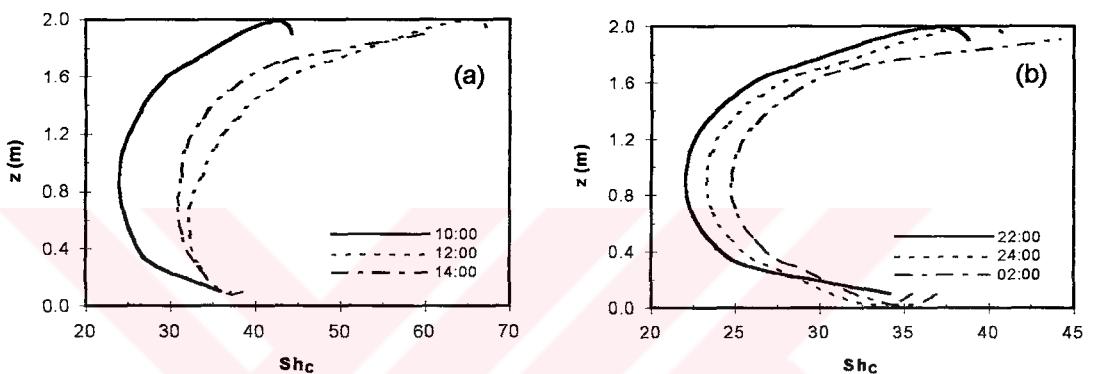
Şekil 5.26. Bitki standında a) Nu b) Sh_w ve c) Sh_c sayılarının günlük değişimi



Şekil 5.27. Nu sayısı profili; a) gündüz, b) gece



Şekil 5.28. Bitki standında Sh_w sayısı profili a) gündüz, b) gece



Şekil 5.29. Sh_c sayısı profili; a) gündüz, b) gece

Çizelge 5.10. Bitki standında Nu ve Sh sayılarının değişimi

saat	$z=0.5$ m			$z=1.0$ m			$z=1.5$ m		
	Nu	Sh_w	Sh_c	Nu	Sh_w	Sh_c	Nu	Sh_w	Sh_c
12:00	37.1	38.3	32.4	39.5	40.9	34.6	47.5	49.1	41.6
24:00	28.1	29.1	24.6	26.8	27.8	23.5	30.2	31.3	26.5

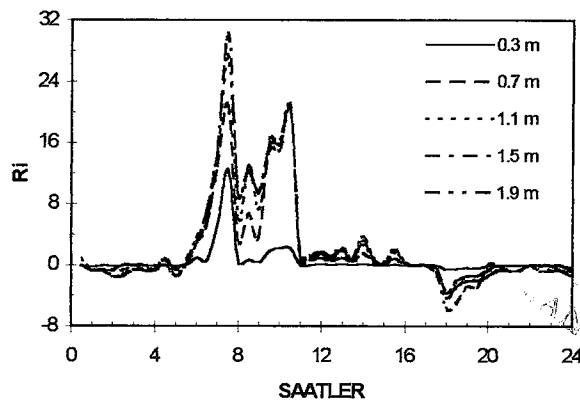
İşı transferi ve akışkanın sürtünmesi kavramlarından yararlanılarak ısı ve kütle konveksiyonu sürtünme sürükleşmesi ölçümleri yapılarak ısı transfer katsayıları kolaylıkla saptanabilir. Bu amaçla, Nu ve Sh sayıları yerine Stanton sayıları kullanılabilir. Çizelge 5.11'de ısı ve kütle transferi St sayılarının bitki standındaki değişimleri özetlenmiştir.

Richardson sayısı, ısı ve kütle transferinde karar mekanizması olarak kullanılır. Ri sayısının büyülüğu ve işaretti önemlidir. Ri sayısı bağılı konveksiyon ve klimatolojik durumu tanımlar.

Tüm bitki standı araştırmalarına göre, Ri sayısının gün boyunca -6.97 ile 30.16 değerleri arasında değiştiği saptanmıştır. Bitki standının farklı yüksekliklerindeki Ri sayısının günlük değişimi şekil 5.30'da ve sayısal değerleri çizelge 5.12'de verilmiş olup; Ri sayısı profilleri gündüz ve gece periyotları için şekil 5.31 a ve b 'de çizilmiştir.

Çizelge 5.11. Bitki standında St sayılarının değişimi

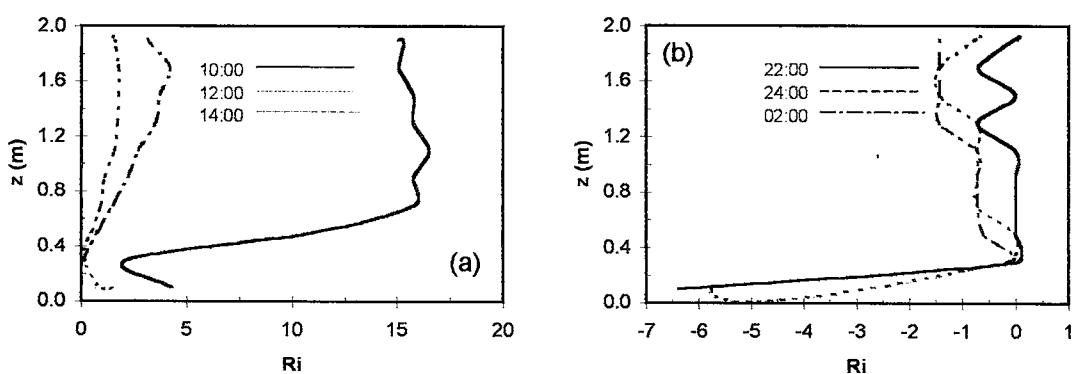
saat	z=0.5 m			z=1.0 m			z=1.5 m		
	St _H	St _w	St _c	St _H	St _w	St _c	St _H	St _w	St _c
12:00	0.013	0.015	0.008	0.010	0.012	0.006	0.011	0.013	0.006
24:00	0.018	0.021	0.011	0.015	0.018	0.009	0.017	0.019	0.010



Şekil 5.30. Bitki standında Ri sayısının günlük değişimi

Çizelge 5.12. Bitki standında Ri değişimi; a) kararlı, b) nötr, c) kararsız

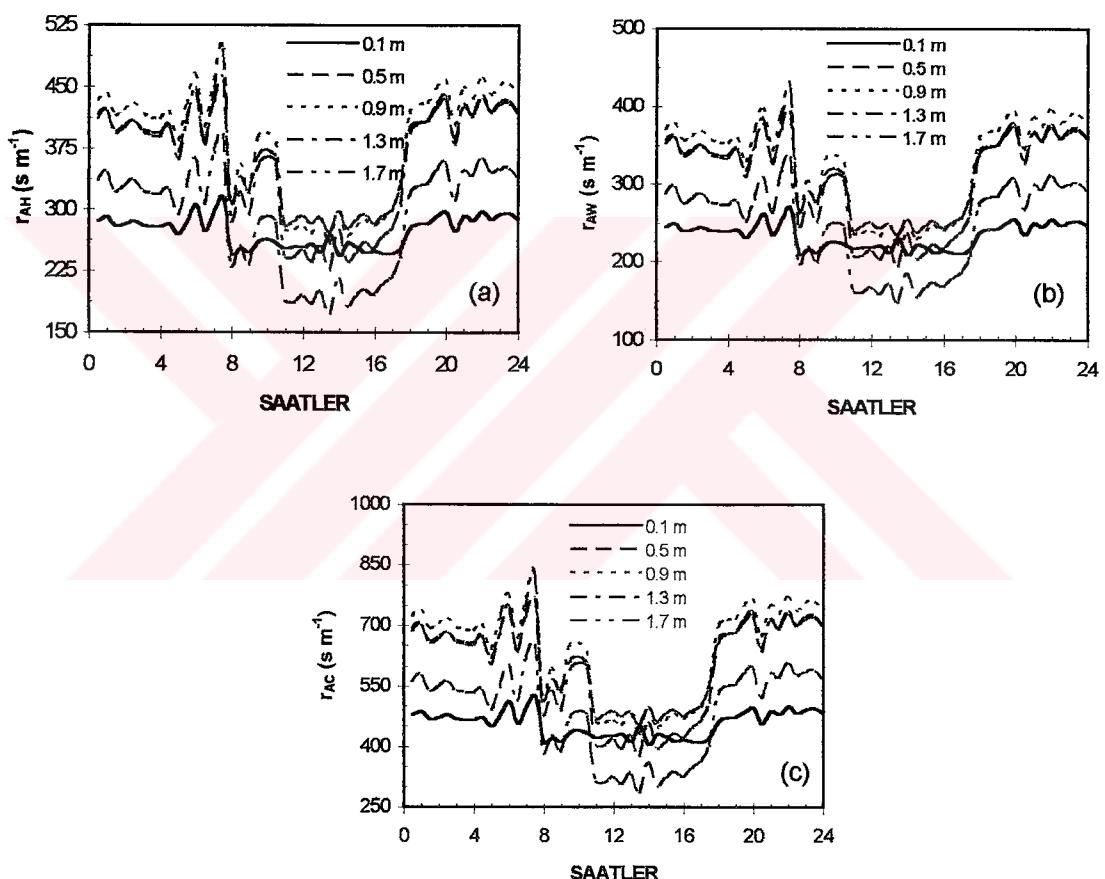
saat	z=0.5 m	z=1.0 m	z=1.5 m
	Ri sayısı		
12:00	0.488 ^a	1.348 ^a	1.745 ^a
24:00	0.000 ^b	-0.718 ^c	-1.436 ^c



Şekil 5.31. Ri sayısı profili a) gündüz, b) gece

5. 1. 7. Aerodinamik dirençler

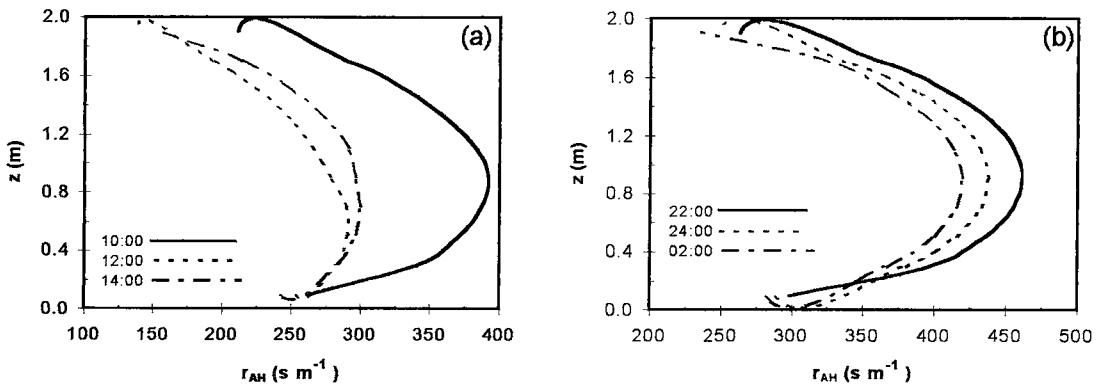
Bitki örtüsü ve çevresi arasındaki ısı, su buharı ve CO_2 transferi akı yoğunlıklarının tanımlanmasında kullanılan aerodinamik dirençlerin stand içindeki günlük değişimleri şekil 5.32 'de gösterilmiştir. Stand ortalamalarına göre ısı, su buharı ve CO_2 taşınımı aerodinamik dirençleri sırasıyla $228.9 - 429.4 \text{ sm}^{-1}$, $196.5 - 368.3 \text{ sm}^{-1}$ ve $382.6 - 717.8 \text{ sm}^{-1}$ aralıklarında değişmiştir. Aerodinamik dirençlerin stand içindeki sayısal değerleri çizelge 5.13 'de örnek olarak verilmiştir. Gece ve gündüz periyotları için direnç profilleri şekil 5.33, 34 ve 35 'de çizilmiştir.



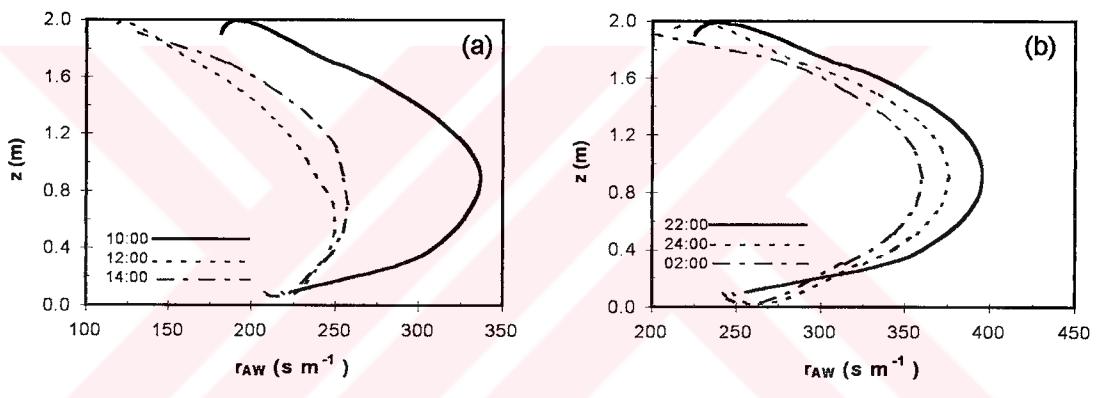
Şekil 5.32. Bitki standında a) r_{AH} , b) r_{AW} rejimi, c) r_{AC} rejimi

Çizelge 5.13. Bitki standında aerodinamik dirençlerin değişimi

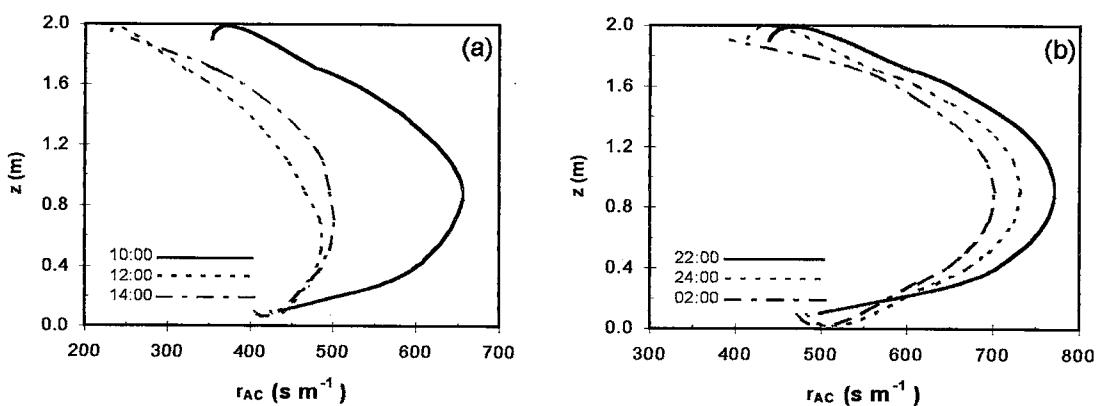
saat	$z=0.5 \text{ m}$			$z=1.0 \text{ m}$			$z=1.5 \text{ m}$		
	r_{AH}	r_{AW}	r_{AC}	r_{AH}	r_{AW}	r_{AC}	r_{AH}	r_{AW}	r_{AC}
12:00	291.0	249.8	486.4	272.2	233.7	454.9	225.9	193.9	377.4
24:00	415.5	356.4	695.1	435.8	373.7	728.9	387.3	332.1	647.7



Şekil 5.33. r_{AH} direnç profilleri; a) gündüz, b) gece



Şekil 5.34. r_{AW} direnç profilleri; a) gündüz, b) gece



Şekil 5.35. r_{AC} direnç profilleri; a) gündüz, b) gece

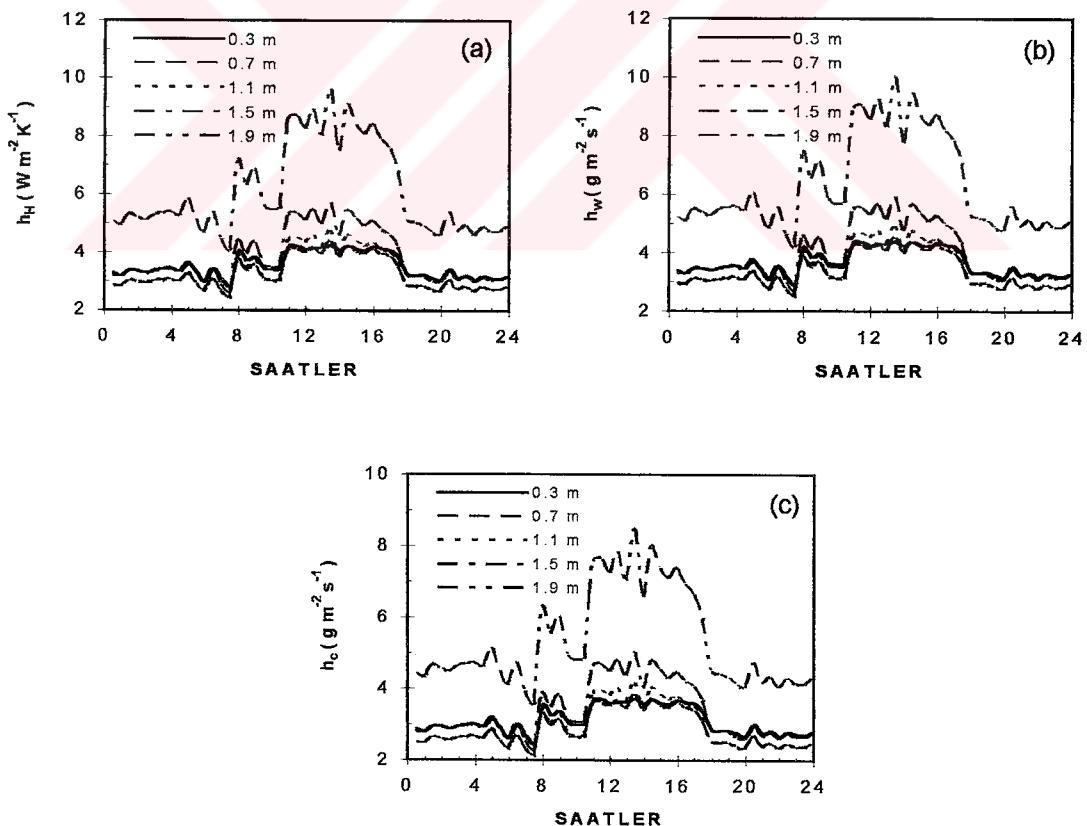
5. 1. 8. Film katsayıları

Isı, su buharı ve CO_2 taşınımı işlemleri aerodinamik direçler dışında film katsayılarıyla da değerlendirilmektedir. Aerodinamik dirençler ile film katsayılarının bitki standı içindeki yönelimleri simetriktir; film katsayıları, aerodinamik dirençlerin fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

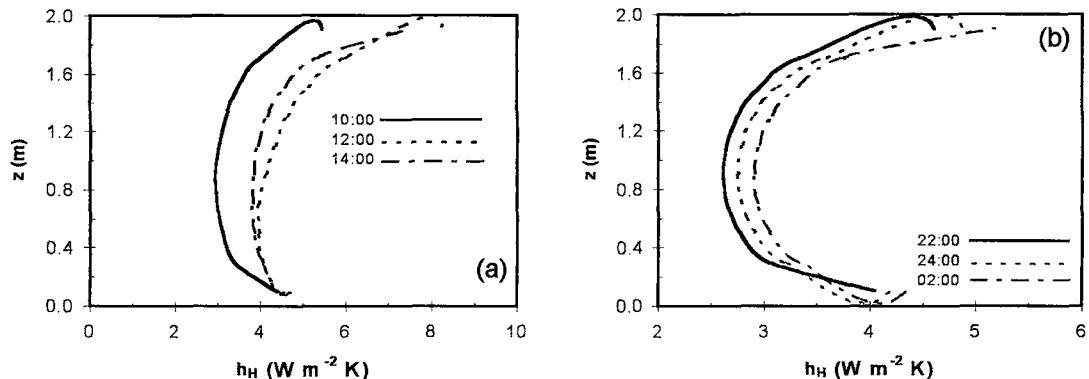
Gün boyunca, konveksiyonla ısı transferi film katsayısı, 2.40 ile $9.65 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; su buharı film katsayısı 2.45 ile $9.96 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; CO_2 taşınımı film katsayısı 2.08 ile $8.43 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aralıklarında değişmiş olup; bitki standı içindeki günlük yönelimleri şekil 5.36'da verilmiştir.

Isı, su buharı ve CO_2 transferi film katsayıları profilleri ise gündüz ve gece saatleri için şekil 5.37, 38 ve 39'da, sayısal değerleri ise çizelge 5.14'de verilmiştir.

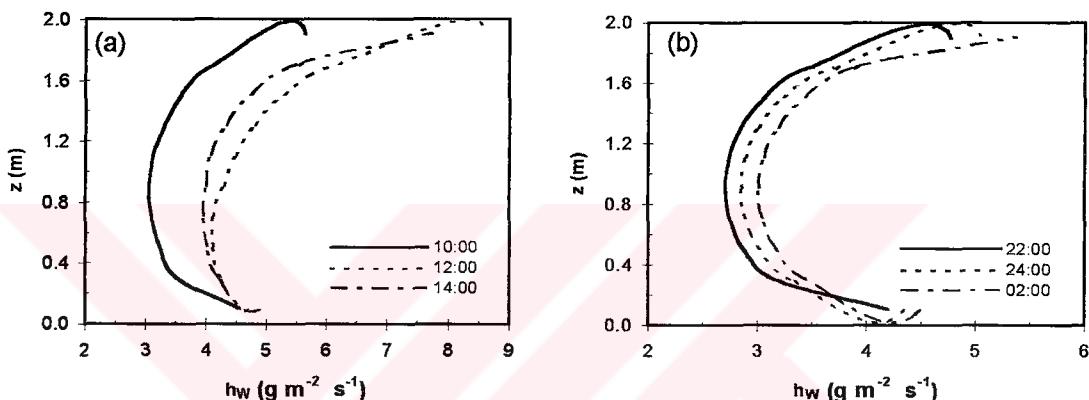
Isı ve kütle transfer işlemleri temel olarak Nu ve Sh sayıları kullanılarak tanımlandığından film katsayılarının bitki standı içindeki desenleri, şekil 5.27, 28 ve 29'daki yönelimlere benzerdir. Bu nedenle boyutsuz sayılar ile film katsayıları arasındaki ilişkilerin türetilmesi ısı ve kütle transfer işlemleri hakkında karar mekanizmalarının oluşturulması açısından önemlidir. Bu ilişkiler çizelge 5.15'de toplu olarak yazılmıştır.



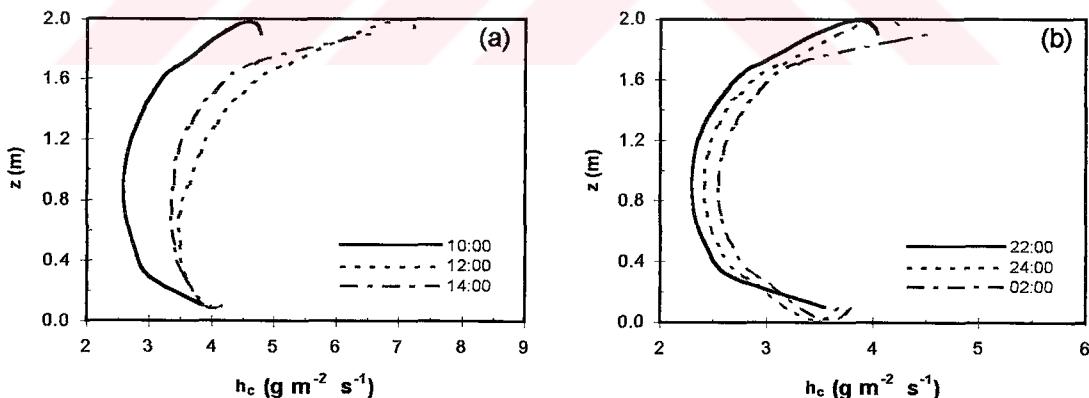
Şekil 5.36. a) h_H , b) h_W , c) h_C aerodinamik film katsayıları



Şekil 5.37. h_H aerodinamik film katsayısı profili; a) gündüz, b) gece



Şekil 5.38. h_W aerodinamik film katsayısı profili; a) gündüz, b) gece



Şekil 5.39. h_C aerodinamik film katsayısı profili; a) gündüz, b) gece

Çizelge 5.14. Bitki standında film katsayılarının değişimi

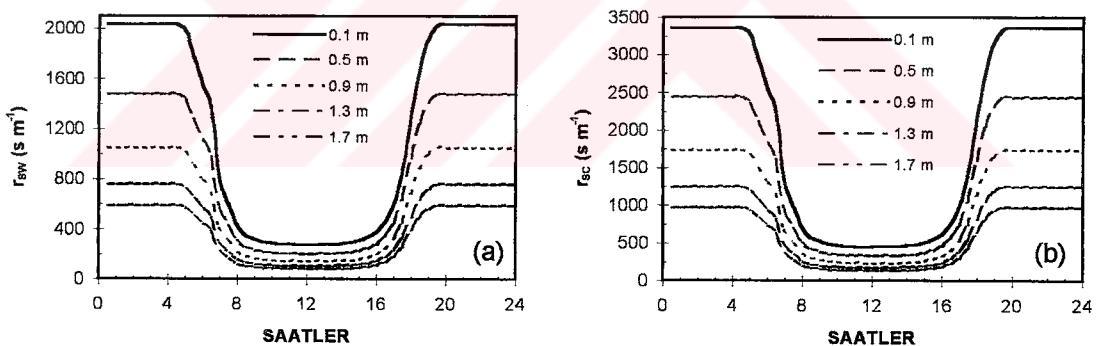
saat	z=0.5 m			z=1.0 m			z=1.5 m		
	h_H	h_W	h_C	h_H	h_W	h_C	h_H	h_W	h_C
12:00	3.98	4.10	3.48	4.25	4.39	3.71	5.11	5.28	4.47
24:00	2.92	3.01	2.55	2.78	2.87	2.43	3.13	3.23	2.73

Çizelge 5.15. Ortalama boyutsuz sayılar ile film katsayıları arasındaki fonksiyonel ilişkiler

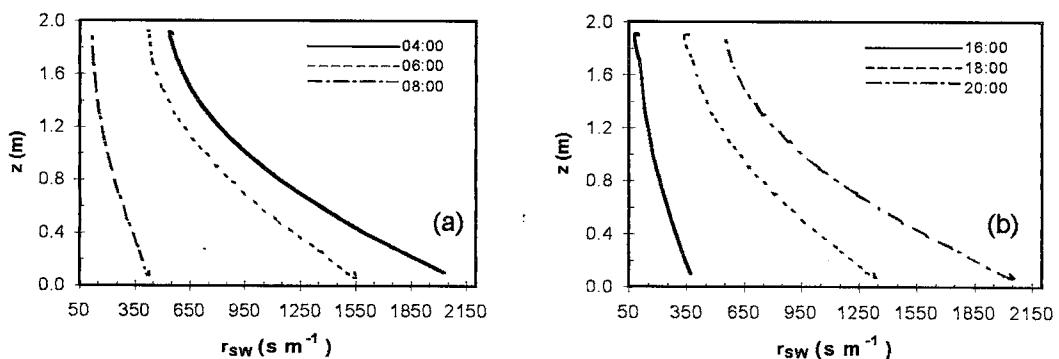
İlişkiler	Belirtme katsayısı (R^2)
$Nu = 0.0049 Re + 20.419$ $h_H = 0.1151 Nu - 0.3481 \quad (W m^{-2}K^{-1})$	0.9931 0.9959
$Sh_W = 0.0051 Re + 21.183$ $h_W = 0.1150 Sh_W - 0.3722 \quad (g m^{-2}s^{-1})$	0.9930 0.9952
$Sh_C = 0.0043 Re + 17.916$ $h_C = 0.1150 Sh_W - 0.3150 \quad (g m^{-2}s^{-1})$	0.9930 0.9952

5. 1. 9. Stomatal dirençler

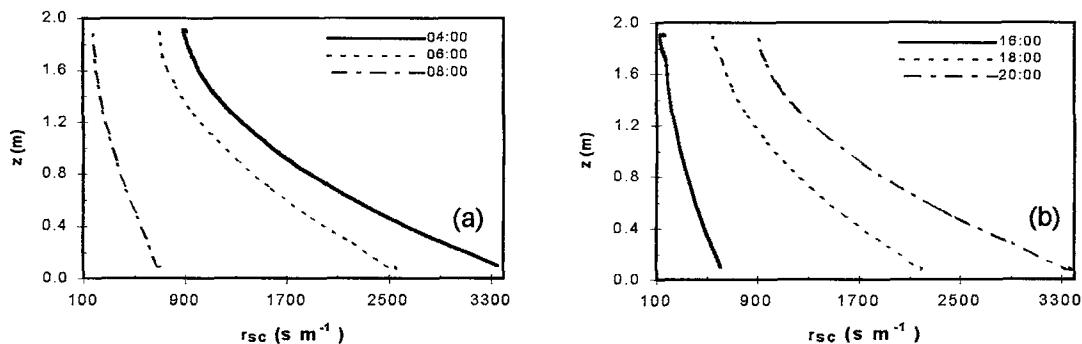
Yaprağın gözeneklerinde subuharı ve CO_2 taşınımında etkili olan stomatal direnç, sırasıyla 74.4 ile 2032.8 sm^{-1} ve 122.6 ile 3356.9 sm^{-1} olmak üzere çok geniş bir aralıktır. Su buharı taşınımı, kısmen yaprak yüzeyi film tabakası ile kısmen yaprak stomalarında gelişir. Bitki standının farklı düzlemlerinde saptanan stomatal direncin günlük değişimi hem subuharı hem de CO_2 taşınımı için şekil 5.40'da verilmiştir. Bitki standında etkili olan stomatal direç profilleri şekil 5.41 ve 5.42'de çizilmiştir. Stand içinde hesaplanan stomatal dirençler gece ve gündüz için çizelge 5.16'da özetlenmiştir. Şekil 5.40'a göre, stomatal direnç gün boyunca simetrik yönelim gösterir; bu nedenle direnç profili sabah ve akşam saatlerinde çakışmaz(şekil 5.41, 42).



Şekil 5.40. Bitki standında a) r_{sw} ve b) r_{sc} nin günlük değişimi



Şekil 5.41. r_{sw} profili; a) sabah, b) akşam

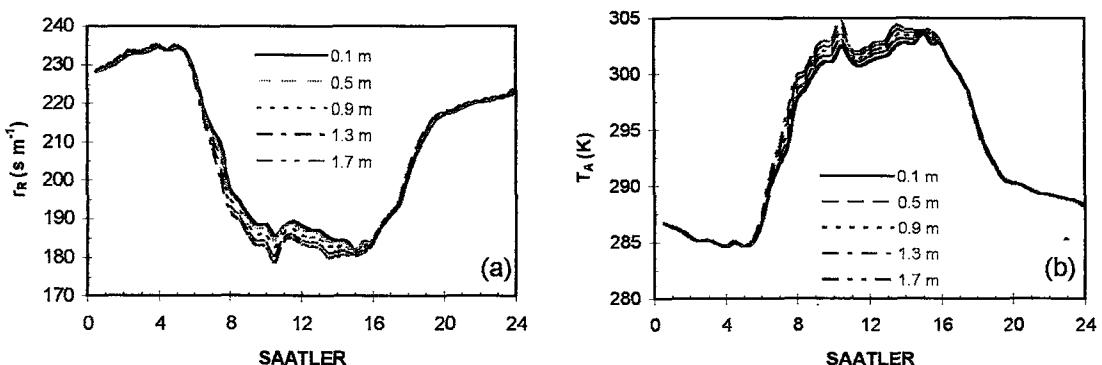
Şekil 5.42. r_{sc} profili; a) sabah, b) akşam

Çizelge 5.16. Bitki standında stomatal dirençlerin değişimi

saat	$z=0.5\text{ m}$		$z=1.0\text{ m}$		$z=1.5\text{ m}$	
	r_{sw}	r_{sc}	r_{sw}	r_{sc}	r_{sw}	r_{sc}
12:00	198.6	327.3	129.9	214.0	87.7	144.6
24:00	1473.6	2432.3	963.7	1590.7	651.1	1074.8

5. 1. 10. Radyasyon transfer direnci

Radyasyon transfer direnci, bitki örtüsü içinde havanın sıcaklığına bağlı olarak havanın fiziksel özelliklerinin değişimini yansıtmaktadır. Bitki standının diferansiyel tabakaları arasında radyasyon transfer direnci, 177.8 ile 235.1 sm^{-1} aralığında değişmiştir. Radyasyon transfer direnci rejimi, şekil 5.43 a'da verilmiştir. Radyasyon transfer direnci hava sıcaklığı rejimine göre simetrik yönelik göstermiştir (şekil 5.43 b). Radyasyon transfer direncinin stand ortalaması gün ortasında 185.4 sm^{-1} , gece yarısında 223.2 sm^{-1} kadardır. Radyasyon transfer direnci gece stabil kalırken, gündüz üst tabakalara doğru azalmıştır. Radyasyon transfer direnci, transfer işlemlerini yönlendirecek anlamda stand içinde çok fazla değişmemiştir. Bu nedenle, Pr, Sc ve Le sayıları gibi, radyasyon transfer direnci de bitki üzerinde ölçülen hava sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplanabilir.



Şekil 5.43. a) Radyasyon transfer direnci, b) hava sıcaklığı rejimi

5. 2. Sera Mikrokliması İkincil Analiz Sonuçları

5. 2. 1. Radyasyon transferi bulguları

Bitki standının tamamında etkili olan güneş radyasyonu değişimleri, sera tabanı ($z=0.0$ m) ve bitki üstü düzlemleri ($z= 2.0$ m) arasında; ısıl radyasyon ve net radyasyon akı yoğunlukları ise, bitki standının $z=0.1$ m ve $z=1.9$ m aralığındaki diferansiyel tabakalarda araştırılmıştır.

5. 2. 1. 1. Güneş radyasyonu

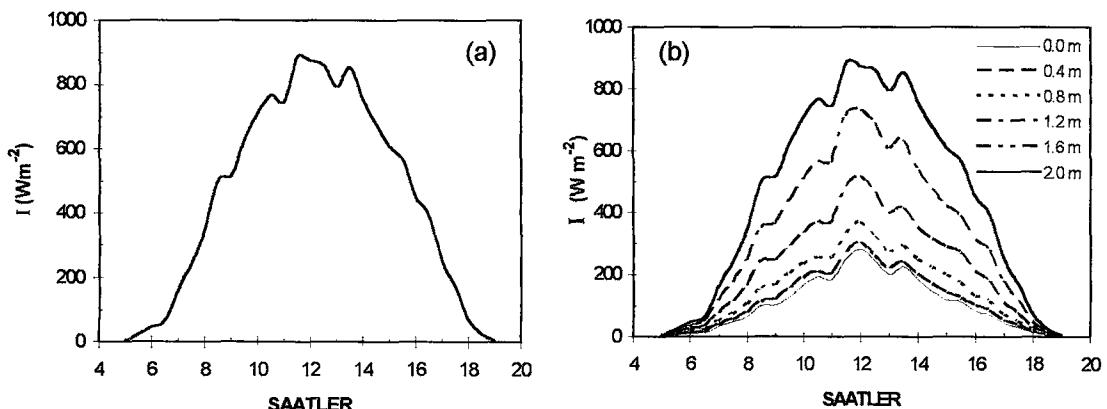
Bitki standı üstünde ölçülen toplam güneş radyasyonu akı yoğunluğu şekil 5.44 'deki gibi değişim göstermiştir. Güneşlenme, 05:00 ve 19:00 saatleri arasında etkili olmuştur. Maksimum toplam güneş radyasyonu akı yoğunluğu saat 11:30' da 888.3 W m^{-2} olarak ölçülmüştür.

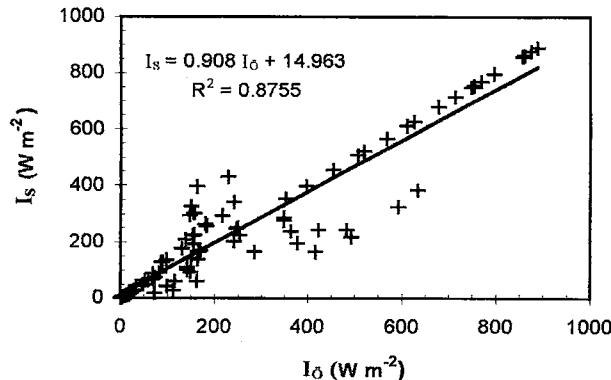
Güneş radyasyonu modeli bazında hesaplanan veriler ile bitki standında ölçülen veriler karşılaştırılmıştır. Buna göre her iki veri kümesi arasında standart hatası 87.9 W m^{-2} ve belirtme katsayısı 0.8755 olan şekil 5.45 'de verilen ilişki türetilmiştir:

$$I_S = 0.908 I_0 + 14.963 \quad (5.6)$$

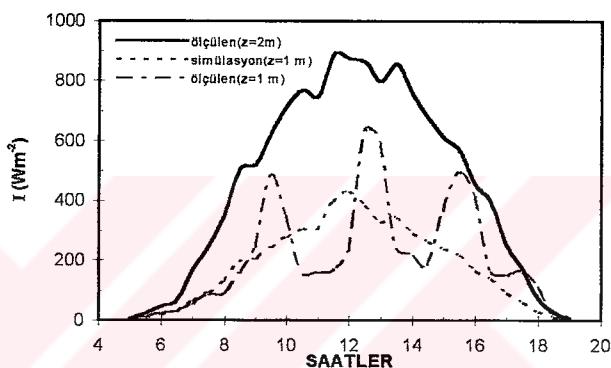
Hıyar bitki örtüsünün yüksek yapısı ve geniş yaprak yüzeyi nedeniyle bitki üstü ile bitki alt tabakaları arasında radyasyon önemli ölçüde tutulmuştur. Bitki standının $z=1.0$ m 'de şekil 5.46 'da verildiği gibi ölçüm veri kümesi, simülasyon veri kümesi çevresinde salınım göstermiştir.

Bitki standındaki güneş radyasyonu profili taban düzleminden bitki üstü düzlemine kadar 10 eşit diferansiyel tabakada araştırılmıştır. Bu tabakalardaki radyasyon girişiminin 6 noktadaki ($z=0.0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0$ m) değişimi grafiklerle örneklenmiştir.





Şekil 5.45. I akı yoğunluğu için trend analizi

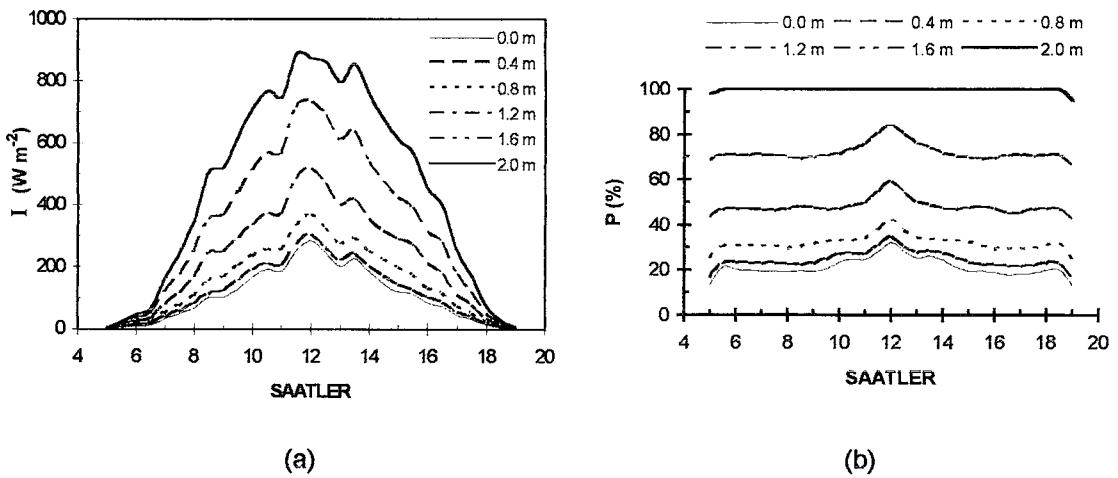


Şekil 5.46. $z=1.0$ m de ölçülen ve simüle edilen I akı yoğunluğu rejimi

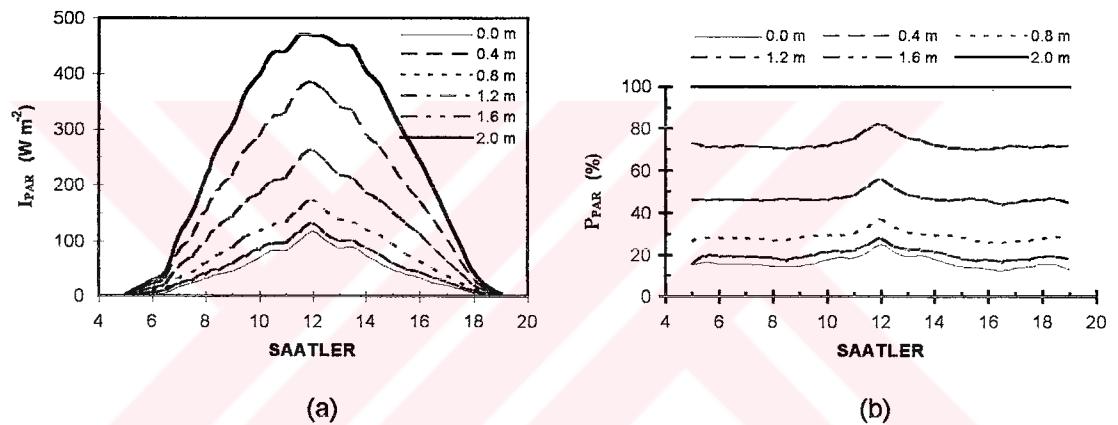
Toplam, direkt, diffuz, aşağı ve yukarı doğru yayılan güneş radyasyonu akı yoğunlukları ile penetrasyonların günlük değişimleri simülasyon aşamasında araştırılmıştır. Beklendiği gibi, akı yoğunlukları, bitkinin alt tabakalarına doğru azalmıştır. Toplam güneş radyasyonunun bitki standı içindeki değişimi şekil 5.47 a'da ve penetrasyon oranlarının günlük değişimleri de şekil 5.47 b'de verilmiştir. Genellikle, $z=1.0$ m 'de bitki üzerindeki toplam güneş radyasyonu akı yoğunluğu yaklaşık yarısına kadar azalmış; toprak yüzeyine ise bunun yaklaşık üçte biri ulaşmıştır. Ayrıca radyasyondaki azalma oranı zaman ve hava koşullarına bağlı kalmıştır. Sabah ve akşam saatlerinde radyasyondaki azalma oranı yaklaşık beşte bir oranına dek düşmüştür.

Benzer değerlendirme PAR için yapılrsa, PAR'ın günlük değişimi şekil 5.48 a'da, penetrasyon oranlarının günlük değişimi ise şekil 5.48 b'de verilmiştir. PAR'ın toplam radyasyonla benzer şekilde, ancak daha kararlı değiştiği; girişim yaptığı vurgulanabilir. Genel olarak, bitki üstündeki PAR'ın taban düzlemine dörtte bir oranında azalduğu saptanmıştır. Ancak bu oran sabah ve akşam saatlerinde % 15'in altına inmiştir.

Sabah, öğle ve akşam saatleri için toplam, direkt, diffuz, aşağı ve yukarı doğru yayılan güneş radyasyonu akı yoğunlukları, PAR ve NIR ile penetrasyon oranlarına ilişkin simülasyon sonuçları sırasıyla çizelge 5.17 ve çizelge 5.18'de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 5.47. Bitki standında a) I rejimi, b) P rejimi



Şekil 5.48. Bitki standında PAR akı yoğunluğu rejimi, b) P_{PAR} rejimi

Çizelge 5.17. Güneş radyasyonu akı yoğunluklarının değişimi

	8:00			12:00			16:00		
	0.0 m	1.0 m	2.0 m	0.0 m	1.0 m	2.0 m	0.0 m	1.0 m	2.0 m
I	68.2	128.8	352.7	283.0	428.5	875.1	85.2	164.7	454.0
I_{\perp}	9.9	34.2	116.4	178.8	307.6	638.9	21.1	76.2	254.2
I_{\approx}	32.0	79.6	236.3	32.0	79.6	236.3	27.1	67.3	199.8
I_{\downarrow}	26.3	15.0	0.0	72.2	41.3	0.0	37.0	21.1	0.0
I_{\uparrow}	8.4	22.6	43.2	42.0	81.3	138.0	9.6	29.7	58.7
I_{PAR}	31.6	74.4	213.4	117.5	210.0	469.3	33.5	84.3	246.6
I_{NIR}	36.6	54.4	139.3	165.6	218.6	405.9	51.6	80.4	207.4

Ayrıca, radyasyon bileşenleri ile toplam radyasyon arasındaki oranlar çizelge 5.19'daki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.18. Penetrasyon oranlarının değişimi

	8:00			12:00			16:00		
	0.0 m	1.0 m	2.0 m	0.0 m	1.0 m	2.0 m	0.0 m	1.0 m	2.0 m
P	19.3	36.5	100	32.3	49.0	100	18.8	36.3	100
P ₋	8.5	29.4	100	28.0	48.1	100	8.3	30.0	100
P _~	13.5	33.7	100	13.5	33.7	100	13.6	33.7	100
P _↓	100	57.0	0	100	57.2	0	100	57.0	0
P _↑	19.4	52.3	100	30.4	58.9	100	16.4	50.1	100
P _{PAR}	14.8	34.9	100	25.0	44.7	100	13.6	34.2	100
P _{NIR}	26.3	39.1	100	40.8	53.9	100	24.9	38.8	100

Çizelge 5.19. Direkt, diffuz, aşağı doğru yayılan ve yukarı doğru yansıyan ile PAR ve NIR oranları (%)

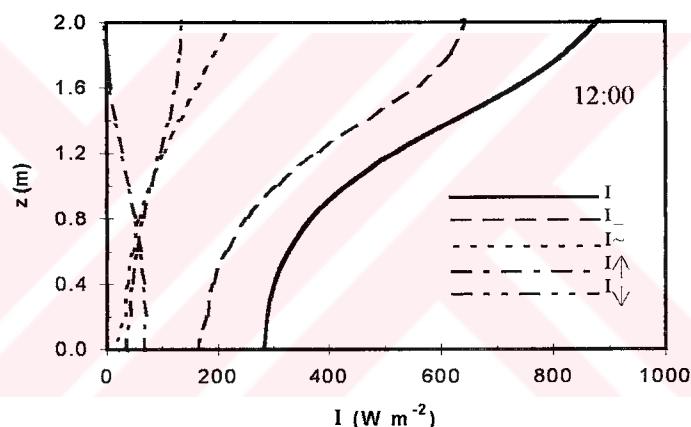
	8:00			12:00			16:00		
	0.0 m	1.0 m	2.0 m	0.0 m	1.0 m	2.0 m	0.0 m	1.0 m	2.0 m
I ₋ /I	14.5	26.6	33.0	63.2	71.8	73.0	24.8	46.3	56.0
I/I	46.9	61.8	67.0	11.3	18.6	27.0	31.8	40.9	44.0
I _↓ /I	38.6	11.6	0.0	25.5	9.6	0.0	43.4.	12.8	0.0
I _↑ /I	12.3	17.5	12.2	14.8	19.0	15.8	11.3	18.0	12.9
I _{PAR} /I	46.3	57.8	60.5	41.5	49.0	53.6	39.3	51.2	54.3
I _{NIR} /I	53.7	42.2	39.5	58.5	51.0	46.4	60.6	48.8	45.7

Toplam, direkt, diffuz, aşağı doğru yayılan ve yukarı doğru yansıyan güneş radyasyonu aki yoğunlıklarının bitki standındaki profilleri saat 12:00 için şekil 5.49 'da çizilmiştir. Direkt güneş radyasyon profili toplam radyasyonun en önemli bileşenidir. Direkt radyasyon girişimi, yaprak geometrisi ile güneşin konumunun bir fonksiyonu olurken, diffuz radyasyon tanımlanmış bitki standı için sabit kalır. Ele alınan deney koşullarına göre, direkt güneş radyasyonu diffuz radyasyonunun genellikle 3 ya da 4 katı kadardır. Bitki örtüsünün üzerinde aşağı yönde yayılan radyasyon bekleniği gibi sıfır olmalıdır. Aşağıya doğru inildikçe yaprakların artmasıyla yayılmanın artması beklenir. Ancak, alttaki yaprakların aldığı radyasyon, üstteki yapraklardan daha az olduğu alt tabakalara doğru radyasyon bloke edilir. Yukarı yönde yansılma, bloke edilen refleksiyona ve radyasyonun yapraklar tarafından tutulmasına bağlıdır. Toprak yüzeyi herhangi bir formda kısa dalgalı radyasyon alıyorsa, z=0 m 'de yüzeyin kısa dalgalı reflektivitesi sıfırdan büyük olmalıdır. Genel olarak, hem aşağı hem de yukarı yönde olan güneş radyasyonu, kısa dalgalı radyasyon rejiminin önemsiz bileşenleridir. z=1.0 m 'deki toplam, direkt, diffuz, aşağı ve yukarı yönde yayılan aki yoğunlukları, sırasıyla 428.5, 307.6, 79.6, 41.3 ve 81.3 W m⁻² olarak hesaplanmıştır. Güneş radyasyonunun direkt, diffuz ve aşağı yönde

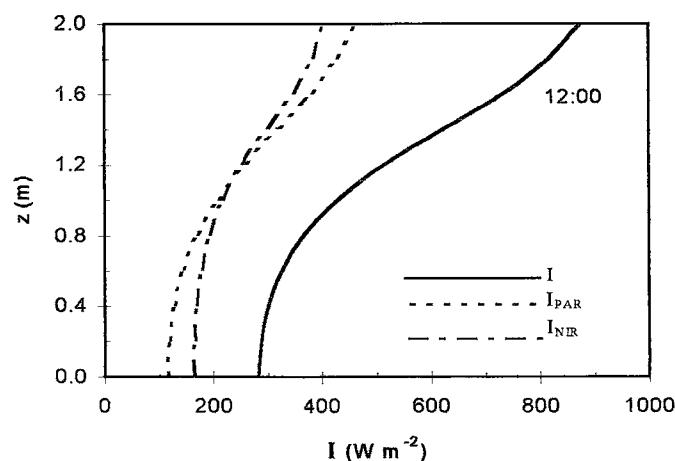
yayılan bileşenleri, toplam akı yoğunluğunun sırasıyla % 71.8, % 18.6 ve % 9.6 'lık kısmına karşılık gelmiştir. Aynı bitki yüksekliğinde toprak + bitki örtüsü elemanlarından oluşan albedo ise % 9.3 düzeyinde kalmıştır.

Spektral bakış açısına göre, bitki standı içinde dikey profildeki PAR ve NIR akı yoğunlıklarının değişimi de araştırılmıştır. Şekil 5.50 'de saat 12:00'deki dikey profilleri çizilen toplam (SWR), PAR ve NIR akı yoğunlıklarının stand içindeki yönelimlerine göre, anıltılı bulgulara ulaşıldığı söylenebilir. PAR'ın bitki standı içine toplam güneş radyasyonu desenine benzer şekilde girişim yaptığı görülmüştür. Bunun nedeni, yapraklar tarafından tutulan PAR'ın % 85 'inin, NIR'ın % 15'inin soğurulmasıdır.

Günlük rejim incelendiğinde, bitki örtüsünün alt tabakalarına doğru PAR'ın toplam radyasyon içindeki oransal payının azaldığı, NIR 'in arttığı söylenebilir. Sonuçlara göre, I_{PAR} / I oranı, bitki profilinin $z = 0.2 \text{ m}$ 'de % 42.0 iken, $z=1.8 \text{ m}$ 'de % 52.8 oranına yükselmiş olup; I_{NIR}/I oranı ise, $z=0.2 \text{ m}$ 'de % 58.0 iken, $z=1.8 \text{ m}$ 'de % 47.2 oranına düşmüştür. Böylece, bitki standının üst yarısında PAR 'ın, alt yarısında NIR 'in etkin olduğu söylenebilir.



Şekil 5.49. Gün ortasında güneş radyasyonu akı yoğunlukları profili

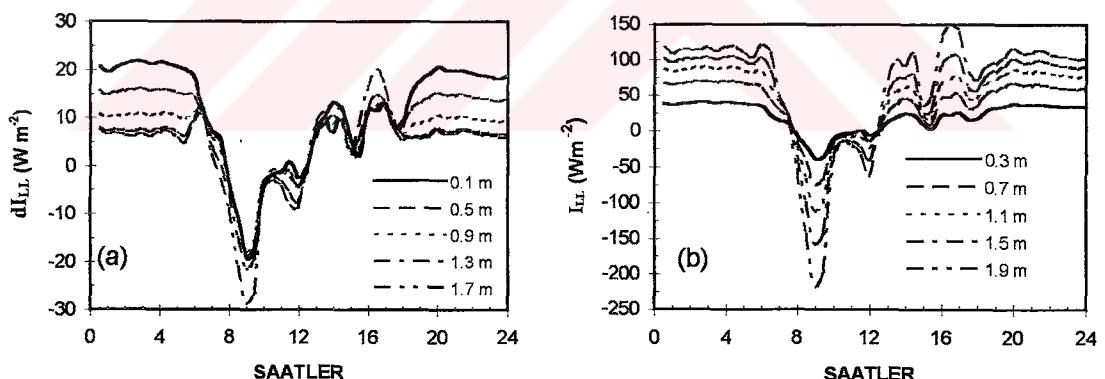


Şekil 5.50. Gün ortasında I , I_{PAR} ve I_{NIR} akı yoğunlukları profili

5. 2. 1. 2. Uzun Dalgalı Radyasyon

Bitki standı içinde yapraklar arasında oluşan ısıl radyasyon araştırılmış; seranın diğer bileşenleri arasındaki akı yoğunlukları üzerinde durulmamıştır. Diferansiyel tabakalarda etkili olan ısıl radyasyon akı yoğunluğu -31.35 ile 25.03 W m^{-2} aralığında (Şekil 5.51 a); bitki standında etkili olan uzun dalgalı radyasyon akı yoğunluğu ise Şekil 5.51 b'deki gibi -219.9 ile 148.3 W m^{-2} arasında değişmiştir. Bitki standının farklı yüksekliklerindeki ısıl radyasyon akı yoğunlukları Çizelge 5.20'de özetlenmiştir. Bitki standındaki ısıl radyasyon profili, gündüz ve gece saatleri için Şekil 5.52 a ve b'de örmeklenmiştir.

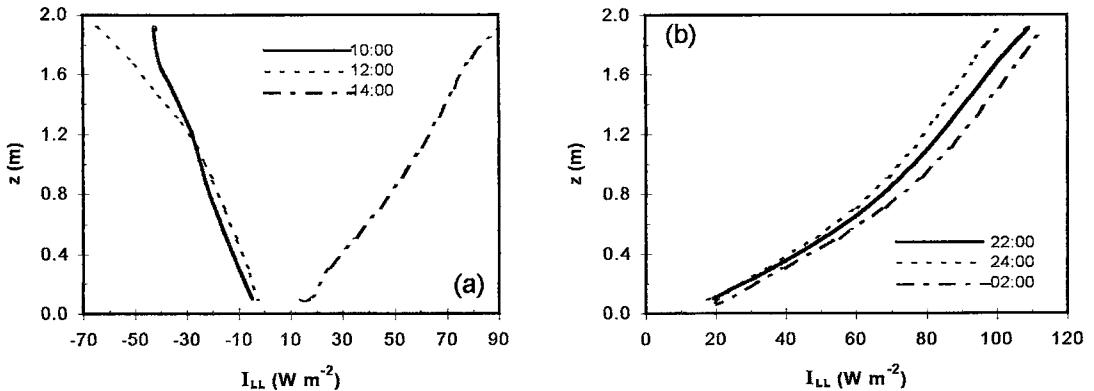
Gece periyodunda gökyüzü ile cam örtüden bitki elemanlarına aşağıya doğru ve tabandan bitki elemanlarına olan ısıl radyasyon bileşenleri, yapraklar arasında oluşan ısıl radyasyondan daha yüksek olduğu için toplam ısıl radyasyon pozitiftir. Sabah saatlerinde güneş radyasyonunun etkisiyle yaprak sıcaklığının artması sonucu birbirine göre sıcak ve soğuk yüzeyler arasında ısıl radyasyon değişimi nedeniyle toplam ısıl radyasyon negatifye yönelmiş; bu durum öğlene kadar devam etmiş ve sonra pozitif akı yoğunlukları oluşmuştur. Beklendiği gibi, toplam ısıl radyasyon akı yoğunlıklarının bitki örtüsü içindeki profilleri gece süresince pozitif olarak artma eğilimindedir; sabah saatlerinde ise bunun tersi söz konusudur.



Şekil 5.51. Bitki standında, a) dI_{LL} ve b) I_{LL} akı yoğunluğu rejimi

Çizelge 5.20. ısıl radyasyonu akı yoğunluğunun (W m^{-2}) değişimi

saat	$z=0.5 \text{ m}$		$z=1.0 \text{ m}$		$z=1.5 \text{ m}$	
	dI_{LL}	I_{LL}	dI_{LL}	I_{LL}	dI_{LL}	I_{LL}
12:00	-4.4	-10.6	-5.2	-22.8	-9.5	-43.0
24:00	13.6	48.5	8.3	72.6	5.7	88.3

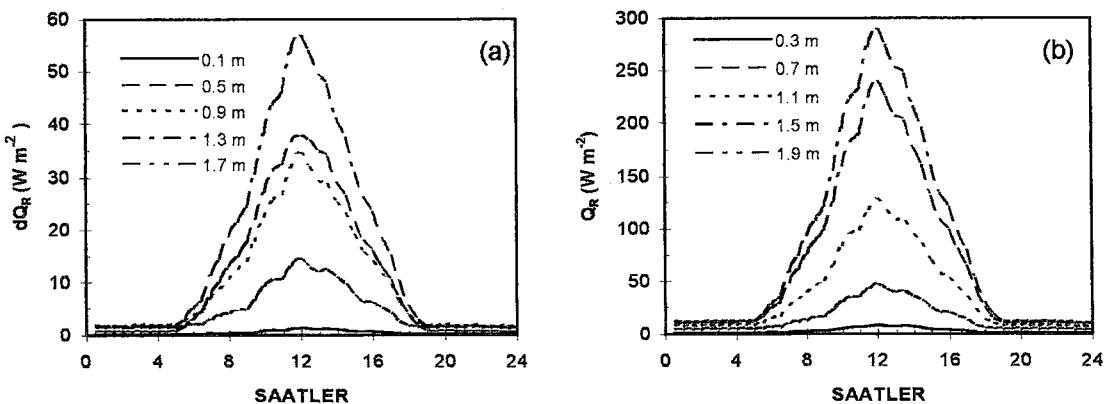


Şekil 5.52. I_{LL} akı yoğunluğu profili a) gündüz ve b) gece

5. 2. 1. 3. Net radyasyon

Bitki standının 10 noktasında simüle edilen net radyasyon akı yoğunluğu diferansiyel ölçekte 0.16 ile 56.90 Wm^{-2} ve kümülatif ölçekte 10.0 ile 289.4 Wm^{-2} aralıklarında değişmiştir (Şekil 5.53 a,b). Bitki standında etkili olan net radyasyon akı yoğunlukları hem diferansiyel hem de kümülatif ölçekte araştırılmış olup; ek olarak net radyasyon indeksi çizelge 5.21'deki örnek koşullar için saptanmıştır. Ayrıca, bitki standı içindeki net radyasyon profili Şekil 5.54'de çizilmiştir.

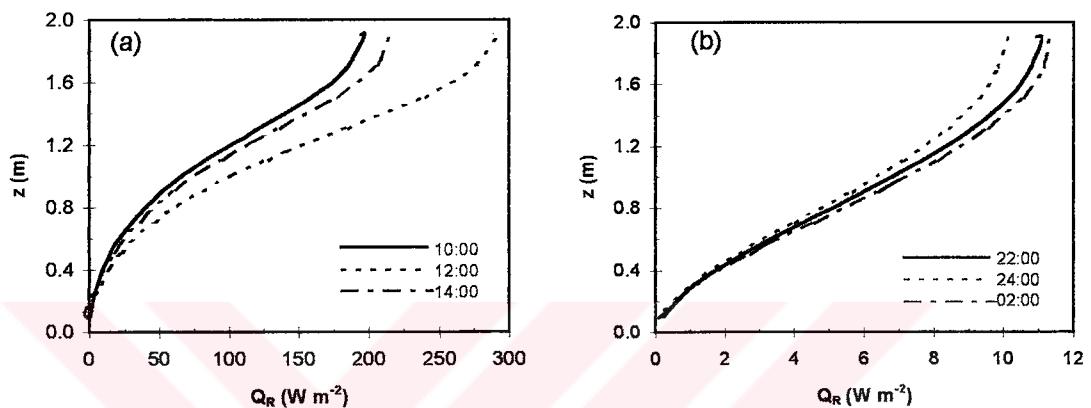
Gündüz periyodunda net radyasyonun temel bileşeni toplam güneş radyasyonudur. Gece ise ısıl radyasyon etkindir. Güneş radyasyonunun bitki örtüsü içine girişimi yukarıdan aşağıya doğrumasına karşın; net radyasyon için bunun tersi söz konusudur. Çünkü bitki örtüsü içindeki net radyasyonun değişimi spektral 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.



Şekil 5.53. Bitki standında a) dQ_R ve b) Q_R akı yoğunluğu rejimi

Çizelge 5.21. Net radyasyon akı yoğunluğu (Q_R , W m^{-2}) ile net radyasyon indeksinin (i_R , %) değişimi

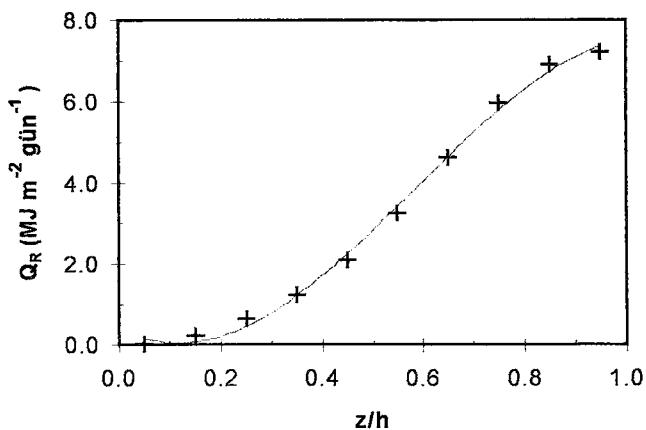
saat	$z=0.5 \text{ m}$			$z=1.0 \text{ m}$			$z=1.5 \text{ m}$		
	dQ_R	Q_R	i_R	dQ_R	Q_R	i_R	dQ_R	Q_R	i_R
12:00	14.4	23.0	12.6	40.8	104.6	36.1	54.8	239.8	82.8
24:00	1.35	2.40	24.0	1.57	6.40	63.8	0.92	9.32	93.0



Şekil 5.54. Q_R akı yoğunluğu profili a) gündüz b) gece

Bitki standında günlük net radyasyon akı yoğunluğu ile normalize bitki yüksekliği arasında aşağıdaki ilişki elde olunmuştur (şekil 5.55):

$$Q_R = -19.023 \left(\frac{z}{h} \right)^3 + 33.224 \left(\frac{z}{h} \right)^2 - 7.1095 \left(\frac{z}{h} \right) + 0.461 \quad (R^2 = 0.9969) \quad (5.7)$$



Şekil 5.55. Günlük Q_R akı yoğunluğu ile z/h arasındaki ilişki

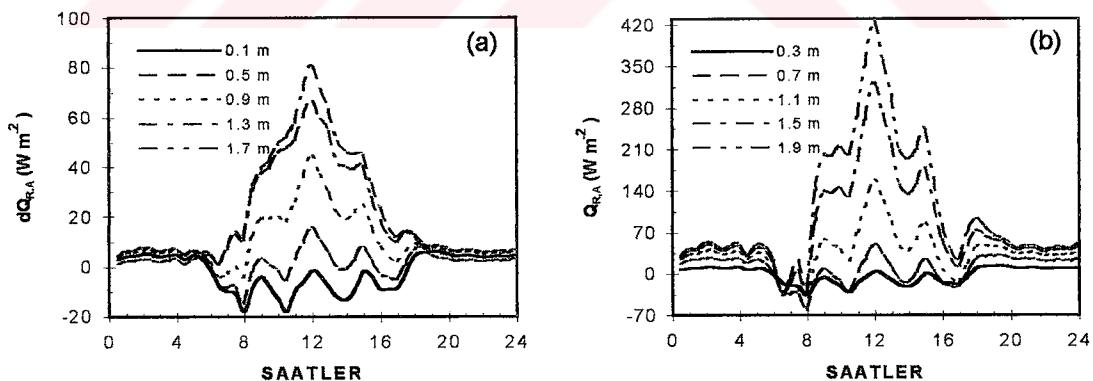
Net radyasyon akı yoğunluğu ile güneş radyasyonu (I), karakteristik sıcaklık farkı ($\Delta T = T_L - T_A$) ve radyasyon transfer direnci (r_R) arasında belirtme katsayısı (R^2) 0.9781 olan aşağıdaki regresyon denklemi elde olunmuştur:

$$Q_R = 0.2764 \times I + 911.38 \frac{\Delta T}{r_R} + 6.8451 \quad (5.8)$$

Bu eşitlikte, ilk terim toplam güneş radyasyonunun ve ikinci terim ışıl radyasyonun fonksiyonel etkisini ortaya koyduğundan yüksek korrelasyonlu bir ilişki olduğu vurgulanabilir.

İzotermal net radyasyon yaklaşımı, hava sıcaklığı ile yaprak sıcaklığı arasındaki fiziksel ve/veya fizyolojik ilişkileri düzenlemek amacıyla kullanılmıştır. Buna göre, hava ve yaprak arasında her zaman bir sıcaklık farkı vardır. Minimum enerji ve su kullanımı açısından bu sıcaklık farkını en düşük değere çekmek amaçlanır. Otomasyon sistemi olmayan seralarda bu durum çoğunlukla sağlanamaz. Izotermal net radyasyon kavramı ise bu sıcaklık farkının olmadığı sanal denge konumuna göre tasarlanan önemli fonksiyonel parametrelerden birisidir.

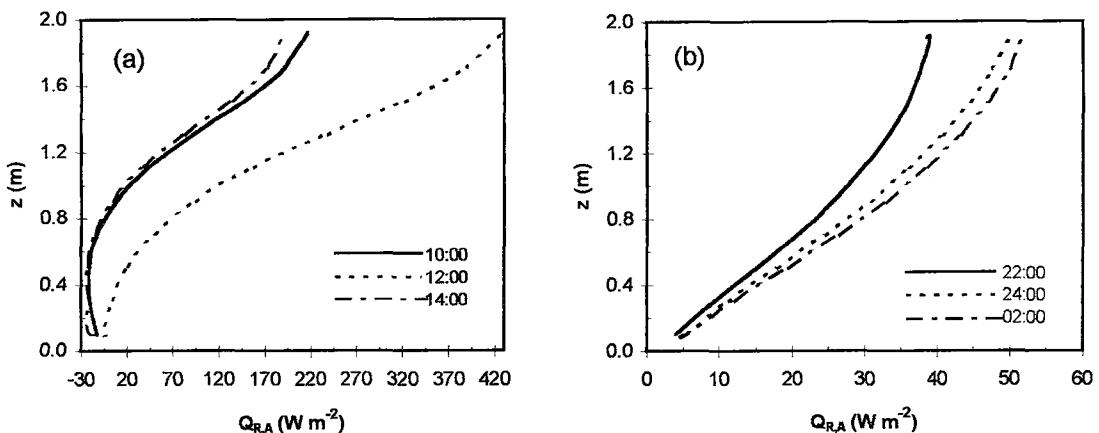
Bitki standındaki izotermal net radyasyon rejimi, şekil 5.56'da grafiklerde verildiği gibi, diferansiyel ölçekte -18.15 ile 83.68 W m^{-2} ve kümülatif ölçekte -66.3 ile 425.2 W m^{-2} aralıklarında değiştiği hesaplanmıştır. Böylece, izotermal net radyasyon, net radyasyona göre daha geniş bir aralıkta dalgalanmıştır. Bu durum, ΔT sıcaklık farkından kaynaklanmıştır. Negatif radyasyon değerleri, çoğunlukla hava sıcaklığının yaprak sıcaklığından yüksek olduğu periyotlarda etkilidir. Bitki standında izotermal net radyasyonun değişimi çizelge 5.22'de özetlenmiştir. Izotermal net radyasyon profili ise gece ve gündüz periyotları için şekil 5.57'de çizilmiştir.



Şekil 5.56. Bitki standında a) dQ_{RA} ve b) Q_{RA} akı yoğunluğu rejimi

Çizelge 5.22. Izotermal net radyasyon akı yoğunluğunun (W m^{-2}) değişimi

saat	$z=0.5 \text{ m}$		$z=1.0 \text{ m}$		$z=1.5 \text{ m}$	
	dQ_{RA}	Q_{RA}	dQ_{RA}	Q_{RA}	dQ_{RA}	Q_{RA}
12:00	15.9	24.5	44.6	117.9	83.7	268.6
24:00	6.7	7.8	5.5	10.6	3.9	12.36



Şekil 5.57. Q_{RA} akı yoğunluğu profili, a) gündüz b) gece

İzotermal net radyasyon ve net radyasyon arasında regresyon analizi yapılmış ve belirtme katsayıısı 0.8125 olan şu ilişkiye ulaşılmıştır:

$$Q_{RA} = 1.046 Q_R + 17.65 \quad (5.9)$$

İzotermal net radyayon ile radyasyon transfer direnci ve sıcaklık farkı arasındaki ilişki araştırılmış; belirtme katsayıısı (R^2) 1.0 olan aşağıdaki eşitlik elde olunmuştur :

$$Q_{RA} = 0.995 Q_R + 11747.05 \frac{\Delta T}{r_R} + 0.8764 \quad (5.10)$$

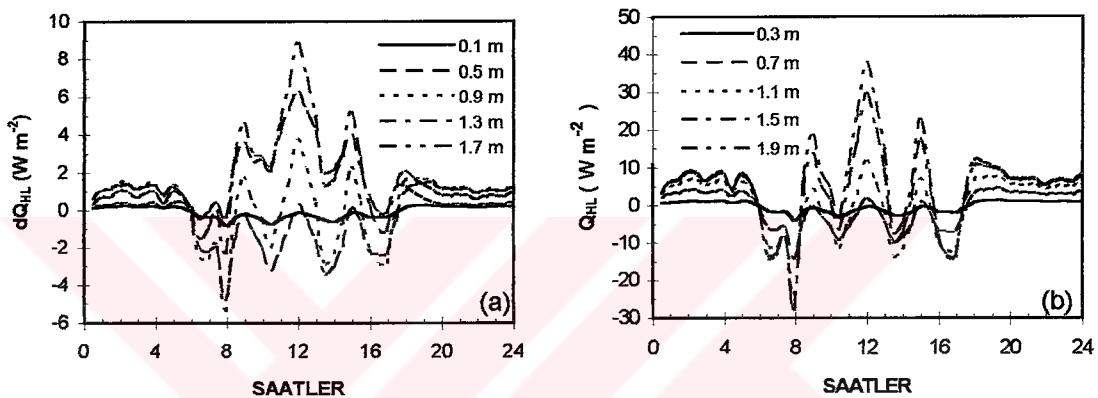
Bu eşitlik, yaprak ve hava sıcaklıklarının eşit olduğu koşullarda, izotermal net radyasyonun net radyasyona yaklaşık eşit olduğunu tanımlaması açısından çok kullanışlıdır. Ele alınan koşullarda net radyasyonun pozitif olduğu bilindiğine göre, hava sıcaklığının yaprak sıcaklığından yüksek olması durumunda izotermal radyasyon akı yoğunlukları negatiftir. Bu durum özellikle, güneşlenmenin olduğu saatlerde, bitki standının alt tabakalarında söz konusudur.

5. 2. 2. Isı transferi bulguları

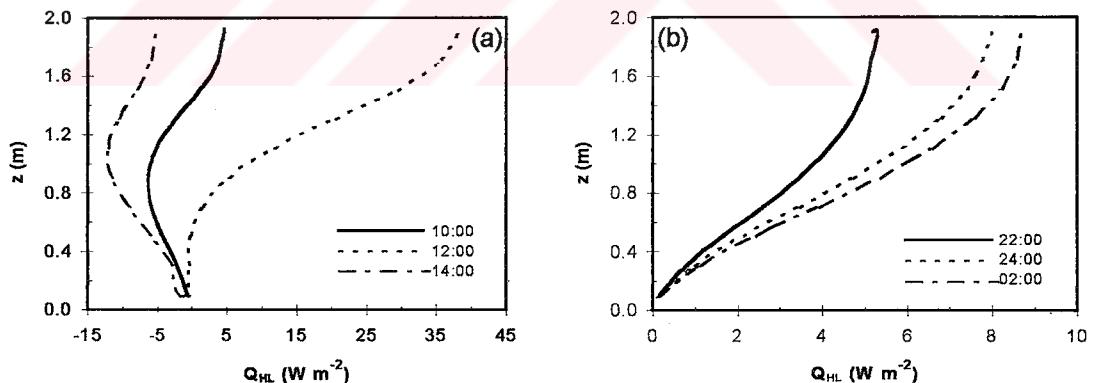
Bitki standında ısı transferinin irdelenmesi temelde konveksiyon, transpirasyon ve metabolik ısı transferi kapsamında ele alınmış olup; 10 ayrı düzlemede simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının grafiksel organizasyonu, bitki standının $z=0.1, 0.5, 0.9, 1.3, 1.7 \text{ m}$ için diferansiyel ve $z=0.3, 0.7, 1.1, 1.5, 1.9 \text{ m}$ için kümülatif ölçekte yapılmıştır.

5. 2. 2. 1. Konveksiyonla ısı transferi

Konveksiyonla ısı transferi akı yoğunluğu, şekil 5.58 a ve b'de verildiği gibi, diferansiyel ölçekte -5.67 ile 8.96 W m^{-2} ; kümülatif ölçekte ise -28.24 ile 37.88 W m^{-2} aralığında değişmiştir. Konveksiyonla ısı transferi akı yoğunluğu profili şekil 5.59'de çizilmiştir. Bitki standının farklı yüksekliklerindeki akı yoğunlukları ve sıcaklık farkına ilişkin sayısal değerler çizelge 5.23'de özetlenmiştir. Sayısal değerlere göre, ΔT sıcaklık farkı konveksiyonla ısı transferinin temel mekanizmasıdır. Dikkat edilirse, bitki standı içinde izotermal net radyasyon ile konveksiyonla ısı transferinin günlük değişimini benzerdir.



Şekil 5.58. Bitki standında etkili olan a) dQ_{HL} ve b) Q_{HL} akı yoğunluğu rejimi



Şekil 5.59. Q_{HL} akı yoğunluğu profili, a) gündüz ve b) gece

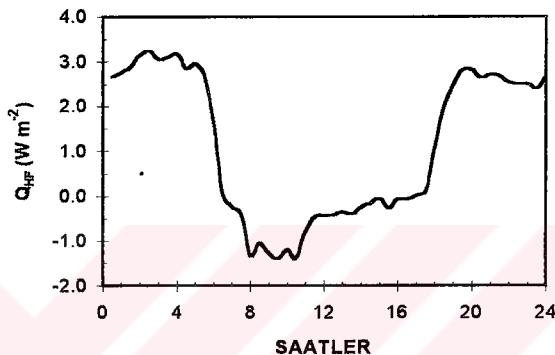
Çizelge 5.23. Konveksiyonla ısı transferi akı yoğunluğunun (Q_{HL} , W m^{-2}) değişimi

saat	$z=0.5 \text{ m}$			$z=1.0 \text{ m}$			$z=1.5 \text{ m}$		
	dQ_{HL}	Q_{HL}	ΔT	dQ_{HL}	Q_{HL}	ΔT	dQ_{HL}	Q_{HL}	ΔT
12:00	0.31	-0.01	0.24	5.06	8.51	3.25	8.96	29.53	4.61
24:00	1.16	2.14	0.99	1.21	5.31	0.77	0.65	7.43	0.54

Yaprak yüzeyi sınır tabakasında konveksiyonla ısı transferinin oluşumunda aerodinamik direnç etkilidir. Bitki standından konveksiyonla olan ısı transferi akı yoğunluğu, sıcaklık farkı (ΔT) ile aerodinamik direnç (r_{AH}) arasında aşağıdaki ilişki elde olunmuştur:

$$Q_{HL} = 0.48439 + 4125.412 \frac{\Delta T}{r_{AH}} \quad R^2 = 0.992 \quad (5.11)$$

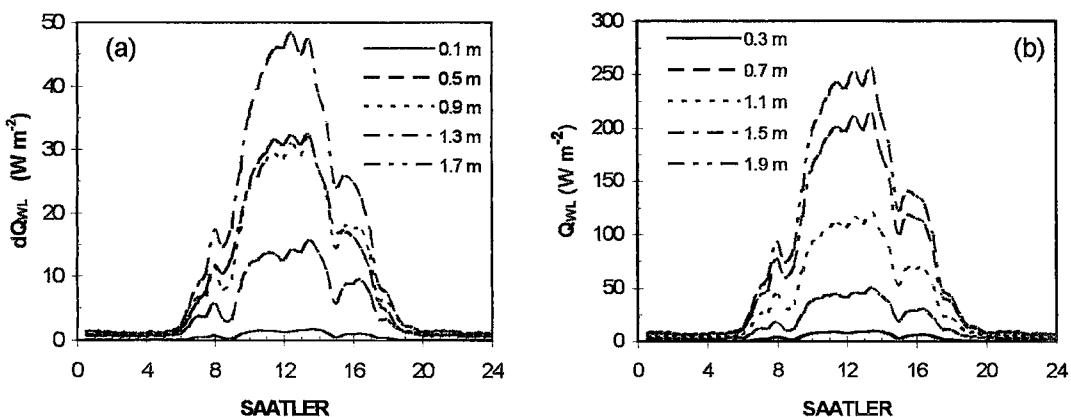
Sera tabanından konveksiyonla olan ısı akı yoğunluğu, -1.40 ile 3.24 Wm^{-2} arasında değişmiştir. Negatif akı yoğunlıklarının şekil 5.60'da görüldüğü gibi, güneşlenmenin etkin olduğu 7:00-16:30 saatleri arasında oluşturduğu saptanmıştır. Gece periyodunda ise, akı yoğunlukları pozitif bölgede olmuştur. Bunun nedeni, sera toprak sıcaklığının yüzey sınır tabakası hava sıcaklığından daha yüksek olmasıdır.



Şekil 5.60. Q_{HF} akı yoğunluğu rejimi

5. 2. 2. Transpirasyonla olan ısı transferi

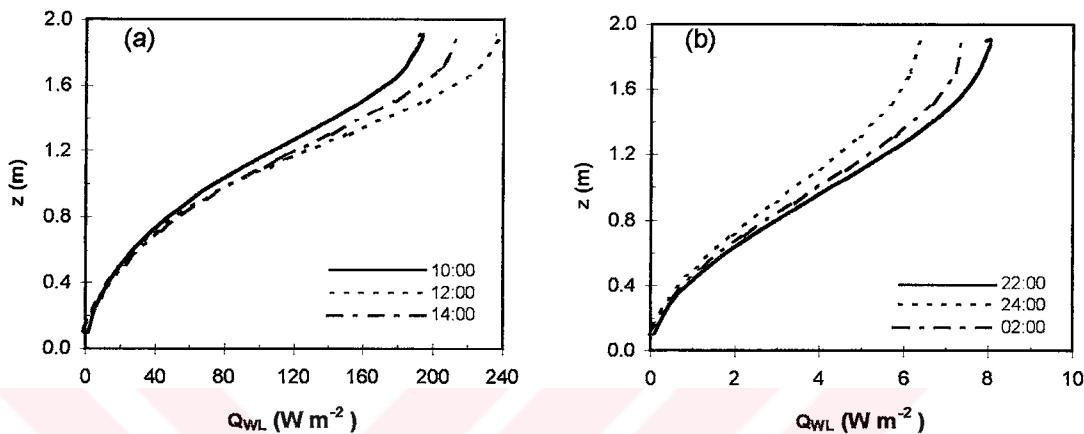
Diferansiyel ölçekte 0.07 ile 48.07 Wm^{-2} ; kümülatif ölçekte ise, 6.3 ile 256.8 Wm^{-2} aralıklarında değişen yapraktan transpirasyonla olan ısı transferi akı yoğunlukları şekil 5.61 a ve b'de gösterilmiştir. Akı yoğunluğunun stand içinde sayısal değerleri gündüz ve gece saatleri için çizelge 5.24'de özetlenmiş olup; akı yoğunluğu profilleri şekil 5.62 a ve b'de çizilmiştir.



Şekil 5.61. a) dQ_{WL} ve b) Q_{WL} akı yoğunlukları rejimi

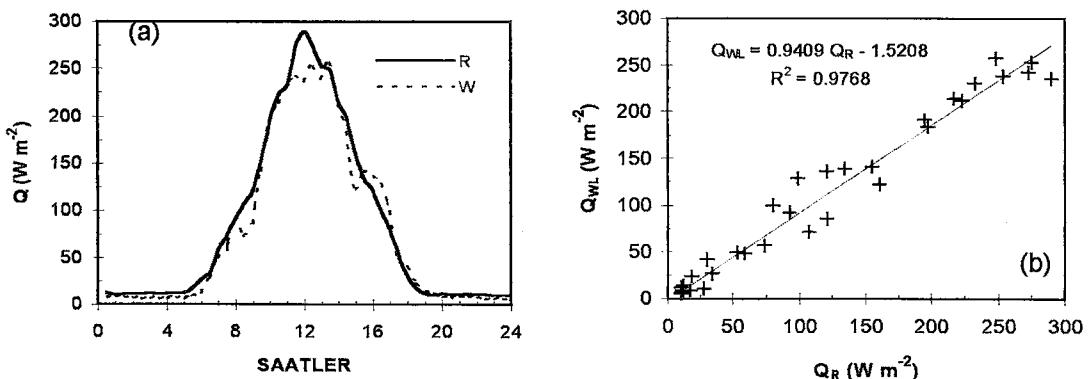
Çizelge 5.24. Transpirasyonel ısı transferi akı yoğunluğunun (Q_{WL} , W m^{-2}) değişimi

saat	$z=0.5 \text{ m}$			$z=1.0 \text{ m}$			$z=1.5 \text{ m}$		
	dQ_{WL}	Q_{WL}	Δe	dQ_{WL}	Q_{WL}	Δe	dQ_{WL}	Q_{WL}	Δe
12:00	12.4	20.1	0.74	33.2	87.1	0.72	44.2	196.0	0.68
24:00	0.64	1.06	0.046	1.03	3.47	0.045	0.75	5.7	0.044

Şekil 5.62. Q_{WL} akı yoğunluğu profilleri, a) gündüz ve b) gece

Transpirasyon temel enerji tüketim işlemidir. Transpirasyon için gereksinim duyulan enerji önemli parametrelerden biri olup; şekil 5.63'deki gibi, her zaman net radyasyon akı yoğunluğuna yakın kaldığı saptanmıştır. Su buharı taşınımıyla olan ısı transferinin temel mekanizması gündüz periyodunda güneş radyasyonudur; ancak, transpirasyon gece periyodunda önemli bir enerji tüketim işlemi değildir. Dolayısıyla, bitki örtüsünden buharlaşmayla olan ısı akı yoğunluğu ile net radyasyon akı yoğunluğu arasında yüksek korelasyonlu ilişkilerin bulunması anlamlidır. Buna göre, belirtme katsayıısı 0.9768 olan regresyon eşitliği aşağıda verilmiştir (şekil 5.63 b) :

$$Q_{WL} = 0.9409 Q_R - 1.5208 \quad (5.12)$$

Şekil 5.63 a) Q_{WL} ile Q_R akı yoğunlukları rejimi, b) Q_{WL} ile Q_R ilişkisi

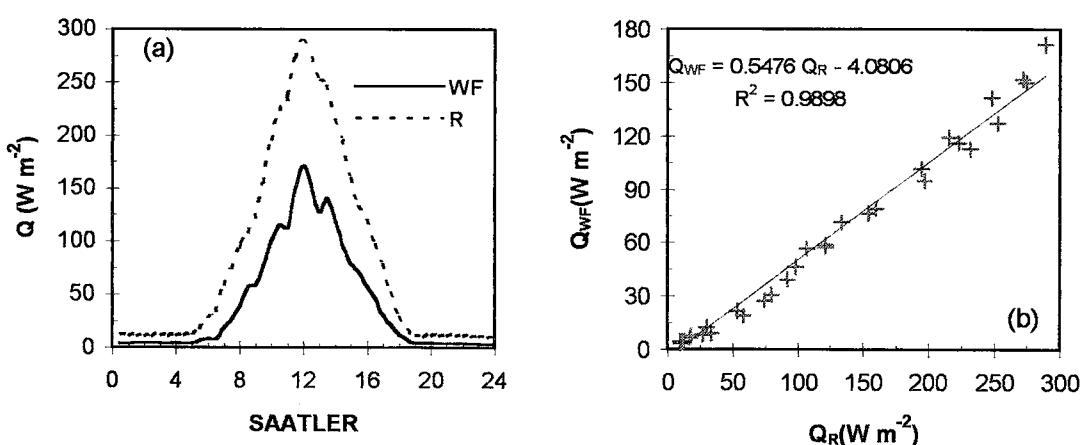
Tüm bitki standında oluşan transpirasyonel ısı akı yoğunluğu ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasında anlamlı ilişkiler türetilmiş; bu eşitlikler çizelge 5.25'de toplu olarak verilmiştir. Parametrik analiz sonucuna göre, transpirasyonel ısı akı yoğunluğu, konveksiyonla ısı transfer ile radyasyon transfer mekanizmalarından başka, stomatal mekanizmaların da davranışına göre değişmektedir.

Sera tabanından evaporasyonla olan ısı transferi akı yoğunluğu gün boyunca 3.59 ile 171.6 W m^{-2} aralığında değişmiştir. Şekil 5.64a'da bitki standında etkili olan net radyasyon ve toprak yüzeyinden olan su buharı taşınımı gizli ısı akı yoğunlukları verilmiştir. her iki akı yoğunlıklarının grafiksel yönelimi benzerdir. Bu nedenle, Q_{WF} ile Q_R arasındaki ilişki araştırılmış ve şekil 5.64 b'de grafiği çizilen aşağıdaki doğrusal regresyon ilişkisi saptanmıştır :

$$Q_{WF} = 0.5476 Q_R - 4.0806 \quad R^2 = 0.9898 \quad (5.13)$$

Çizelge 5.25. Q_{WL} ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler

Fonksiyonel ilişki	Belirtme katsayısı(R^2)
$Q_{WL} = 38.26 \frac{\Delta e}{r_{AW}} + 0.3033$	0.8516
$Q_{WL} = 42.84 \frac{\Delta e}{r_{AW}} + 12109.3 \frac{\Delta T}{r_{AH}} - 23.01$	0.9822
$Q_{WL} = 41.62 \frac{\Delta e}{r_{AW}} + 30293.6 \frac{\Delta T}{r_{AH}} - 12883.3 \frac{\Delta T}{r_R} - 18.69$	0.9874
$Q_{WL} = 68.86 \frac{\Delta e}{(r_{AW} + r_{SW})} + 27138.3 \frac{\Delta T}{r_{AH}} - 12557 \frac{\Delta T}{r_R} - 4.38$	0.9920



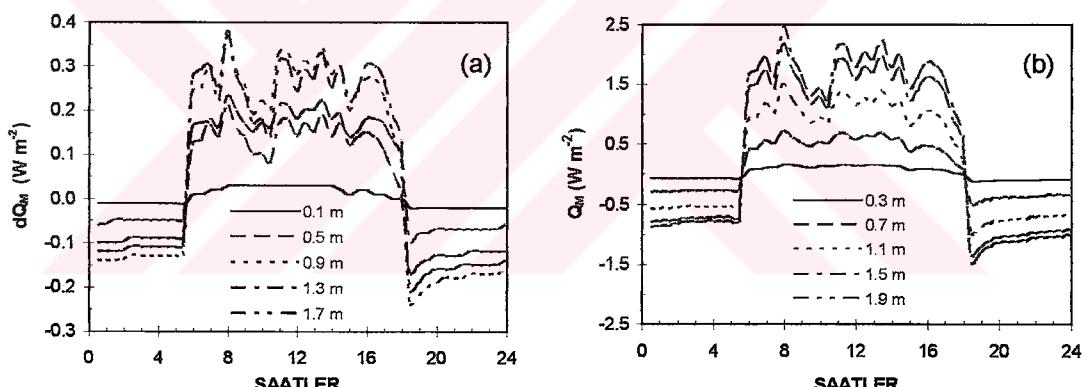
Şekil 5.64. a) Q_{WF} ve Q_{WL} akı yoğunlukları, b) Q_{WF} ile Q_R arasındaki ilişki

5. 2. 2. 3. Metabolik ısı transferi

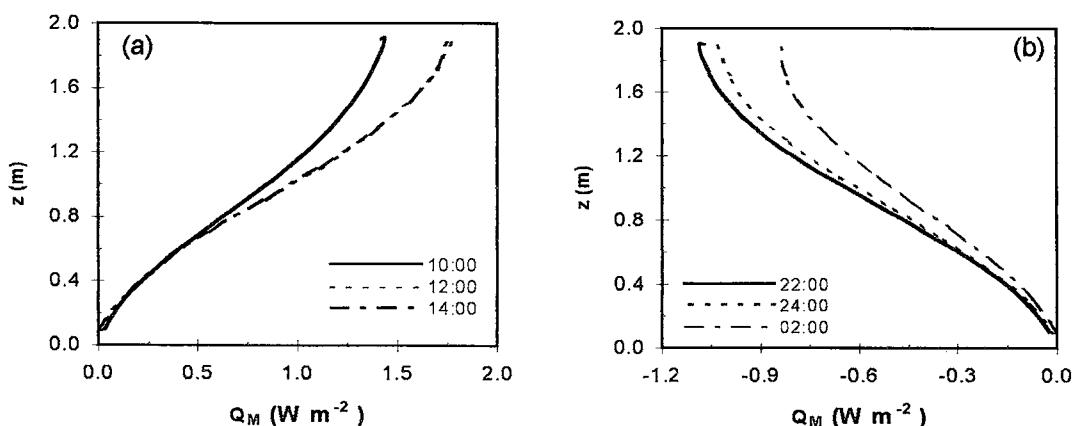
CO_2 taşınımıyla olan ısı transferi, temelde fizyolojik temellere dayalı biçimde gelişen metabolik ısı transferi işlemidir. Bitki standının diferansiyel tabakalarındaki metabolik ısı -0.24 ile 0.40 W m^{-2} ; tüm bitki standında ise -1.49 ile 2.45 W m^{-2} aralıklarında değişmiş olup; gündüz ve gece için akı yoğunlukları çizelge 5.26'da verilmiştir. Şekil 5.65'de Q_M akı yoğunlıklarının günlük değişimleri hem diferansiyel hem de kümülatif ölçeklerde gösterilmiştir. Ayrıca, metabolik akı yoğunlukları profili şekil 5.66'da çizilmiştir. CO_2 taşınımı akı yoğunlukları, su buharı taşınımı akı yoğunluklarına oranla oldukça düşüktür. Ayrıca, gündüz akı yoğunlukları yaprağa doğru (+) oluşurken, gece akı yoğunlukları film tabakasına doğru (-) gelişmektedir.

Çizelge 5.26. Metabolik ısı transferi akı yoğunluğunun ($Q_M, \text{W m}^{-2}$) değişimi
 $\Delta c(\text{ppm})$

saat	$z=0.5 \text{ m}$			$z=1.0 \text{ m}$			$z=1.5 \text{ m}$		
	dQ_M	Q_M	Δc	dQ_M	Q_M	Δc	dQ_M	Q_M	Δc
12:00	0.18	0.32	23.2	0.28	0.98	20.7	0.20	1.56	18.3
24:00	-0.12	-0.21	56.4	-0.16	-0.6	56.3	-0.11	-0.93	56.1



Şekil 5.65. a) dQ_M ve b) Q_M akı yoğunlukları rejimi



CO_2 taşınımı olaylarının açıklanmasında Q_M aksi yoğunluğu ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasında saptanan ilişkiler çizelge 5.27'de toplu olarak verilmiştir. CO_2 taşınımıyla oluşan ısı transferi, su buharı taşınımındaki benzer fiziksel faktörler kısmen etkin olmasına karşın, temelde metabolik işlemler daha etkin rol oynamaktadır.

Çizelge 5.27. Q_M ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler

Fonksiyonel ilişki	Belirtme katsayısı(R^2)
$Q_M = -46.8615 \frac{\Delta C}{\Gamma_{AC}} + 3.4435$	0.5635
$Q_M = -46.8277 \frac{\Delta C}{\Gamma_{AC}} - 127.0928 \frac{\Delta T}{\Gamma_{AH}} + 3.5892$	0.6257
$Q_M = -22.0139 \frac{\Delta C}{\Gamma_{AC}} + 0.34615 \frac{\Delta e}{\Gamma_{AW}} - 49.2489 \frac{\Delta T}{\Gamma_{AH}} + 1.199$	0.7198
$Q_M = -22.983 \frac{\Delta C}{\Gamma_{AC}} + 0.2543 \frac{\Delta e}{\Gamma_{AW}} + 1184.9 \frac{\Delta T}{\Gamma_{AH}} - 875.73 \frac{\Delta T}{\Gamma_R} + 1.5748$	0.8150
$Q_M = 121.44 \frac{\Delta C}{\Gamma_{AC} + \Gamma_{SC}} + 0.4536 \frac{\Delta e}{\Gamma_{AW}} + 16.989 \frac{\Delta T}{\Gamma_{AH}} - 3.3673$	0.7643
$Q_M = 81.587 \frac{\Delta C}{\Gamma_{AC} + \Gamma_{SC}} + 0.4267 \frac{\Delta e}{\Gamma_{AW}} + 821.98 \frac{\Delta T}{\Gamma_{AH}} - 575.69 \frac{\Delta T}{\Gamma_R} - 2.2859$	0.7957

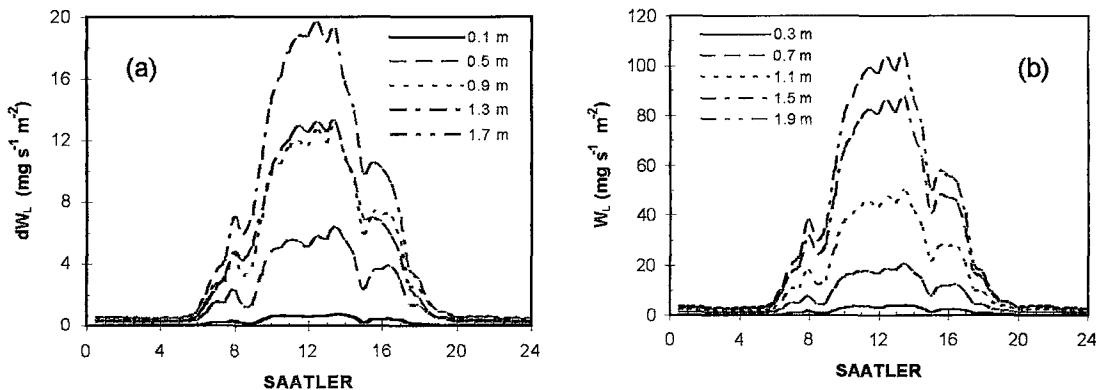
5. 2. 3. Kütle transferi bulguları

Bitki standında su buharı ve CO_2 taşınımı ile gerçekleşen kütle transferinin hem fiziksel hem de fizyolojik olayların bir sonucu olduğu bilinmektedir. Bu bölümde transpirasyon hızı, evaporasyon hızı ve fotosentez hızı gibi nicel büyüklükler irdelenmiştir.

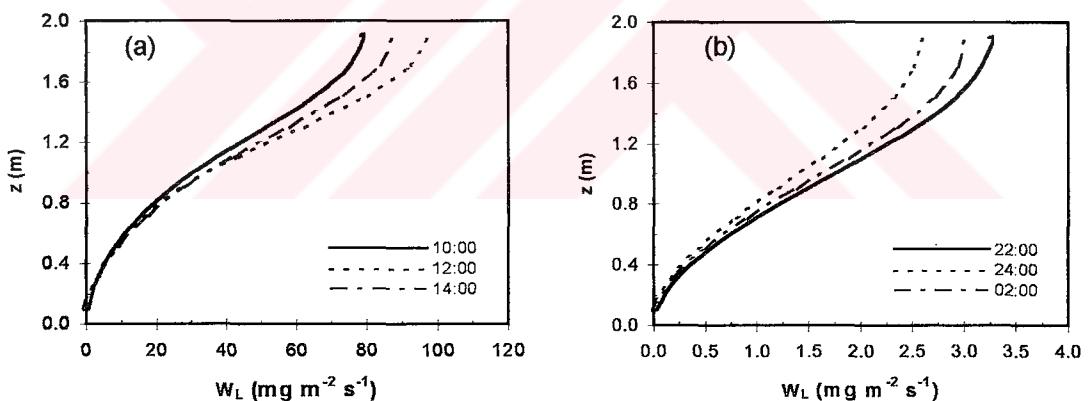
5. 2. 3. 1. Su buharı taşınımı

Bitki standında transpirasyon hızı diferansiyel ölçekte 0.02 ile $19.68 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; kümülatif ölçekte ve 2.57 ile $105.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ arasında değiştiği hesaplanmıştır. Tüm gün periyodunda bitki standında gelişen transpirasyon hızı rejimi, şekil 5.67'de ve gündüz ile gece periyotları için örnek sayısal veriler çizelge 5.28'de özetlenmiştir. Transpirasyon hızı profili şekil 5.68'de çizilmiştir.

Ele alınan deneysel koşullara göre, bitki örtüsünden günde serbest bırakılan toplam transpirasyon hızı 2.731 kg m^{-2} olarak simül edilmiştir.

Şekil 5.67. a) dW_L ve b) W_L 'nin günlük değişimiÇizelge 5.28. Transpirasyon hızıının (W_L , mg m⁻² s⁻¹) değişimi

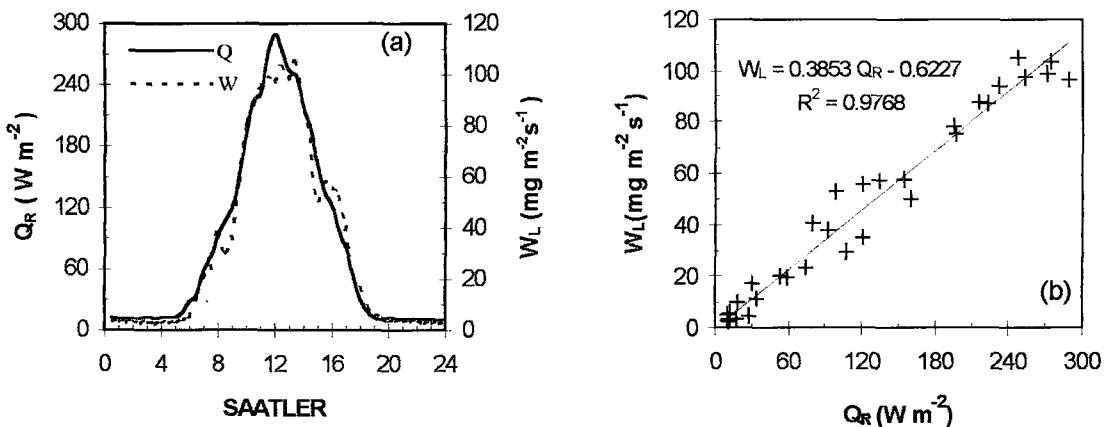
saat	$z=0.5\text{m}$		$z=1.0\text{ m}$		$z=1.5\text{ m}$	
	dW_L	W_L	dW_L	W_L	dW_L	W_L
12:00	5.06	8.22	13.59	35.65	18.08	80.25
24:00	0.26	0.43	0.42	1.42	0.31	2.33

Şekil 5.68. W_L profili; a) gündüz, b) gece

Kümülatif transpirasyon hızı ile net radyasyon akı yoğunluğunun şekil 5.69 a' da günlük değişim eğrisi verilmiş ve aşağıdaki doğrusal regresyon eşitliği saptanmıştır (şekil 5.69 b):

$$W_L = 0.3853 Q_R - 0.6227 \quad R^2=0.9768 \quad (5.14)$$

Transpirasyon hızı, ısı ve kütle transfer parametrelerinin fonksiyonu olarak irdelenmiş olup; çizelge 5.29'da parametreler kapsamında toplu olarak verilmiştir. Transpirasyon hızı aerodinamik dirençler kadar radyasyon transfer direncinin de fonksiyonudur. Tranpirasyon hızı, su buharı taşınımı sırasında etkili olan ısı transferinin bir sonucu olup; benzer parametrelerle tanımlanır.



Şekil 5.69 a) Q_R ve W_L 'nın günlük değişimi, b) W_L ve Q_R arasındaki ilişki

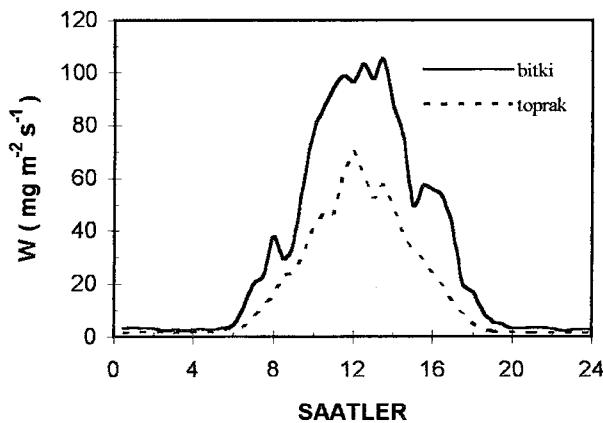
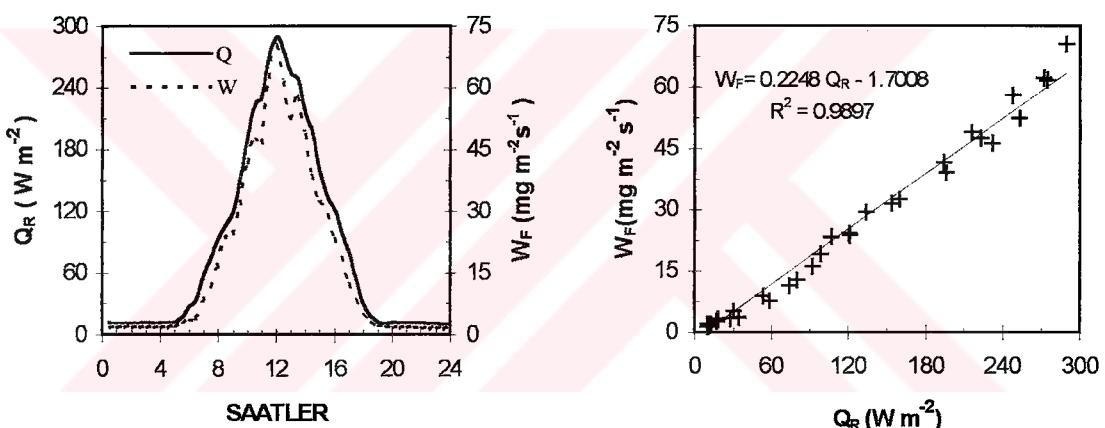
Çizelge 5.29. W_L ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler

Fonksiyonel ilişki	Belirtme sayısı(R^2)
$W_L = 27.232 \frac{\Delta e}{(r_{AW} + r_{SW})} + 2.971$	0.9060
$W_L = 29.326 \frac{\Delta e}{(r_{AW} + r_{SW})} + 2567.8 \frac{\Delta T}{r_R} - 3.8205$	0.9807

Sera tabanının film tabakası içinde gelişen su buharı taşınımı bir evaporasyon işlemidir. Toprak yüzeyinden birim zamanda olan su buharı taşınımı, yani evaporasyon hızı, gün boyunca şekil 5.70 'deki gibi 1.46 ile 70.4 $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ arasında değişmiştir. Sera tabanından çevreye günlük toplam evaporasyon hızı 1.478 kg m^{-2} olarak hesaplanmıştır. Hem bitki örtüsü hem de sera tabanından olan evapotranspirasyon hızı $4.209 \text{ kg gün}^{-1} \text{ m}^{-2}$ olarak simüle edilmiştir. A sınıfı buharlaşma kabı kullanılarak yapılan ölçüm sonuçlarına göre, serbest su yüzeyinden gerçekleşen buharlaşma miktarı 5.1 mm gün^{-1} değerine eşittir. Sera koşullarında buharlaşma kabı katsayısının $k_p=0.95$ alınması durumunda ölçülen evapotranspirasyon hızı $4.213 \text{ kg m}^{-2} \text{ gün}^{-1}$ 'e eşittir. Ölçüm ve simülasyon bulgularının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Bitki standından olan net radyasyon akı yoğunluğu ile toprak yüzeyinden olan su buharı taşınımı, şekil 5.71 a'da, trend analizi şekil 5.71 b'de verilmiştir. Buna göre, bitki örtüsündeki gibi, toprak yüzeyinden olan su buharı taşınımı net radyasyonun fonksiyonu olarak saptanabilir. Bu nedenle, W_F ile Q_R arasındaki ilişki araştırılmış ve şekil 5.71'de grafiği çizilen aşağıdaki doğrusal regresyon ilişkisi elde olunmuştur:

$$W_F = 0.2248 Q_R - 1.7008 \quad R^2 = 0.9897 \quad (5.15)$$

Şekil 5.70. W_L transpirasyon hızı ve W_F evaporasyon hızı rejimiŞekil 5.71. a) Q_R ve W_F 'nin günlük değişimi, b) Q_R - W_F için trend analizi

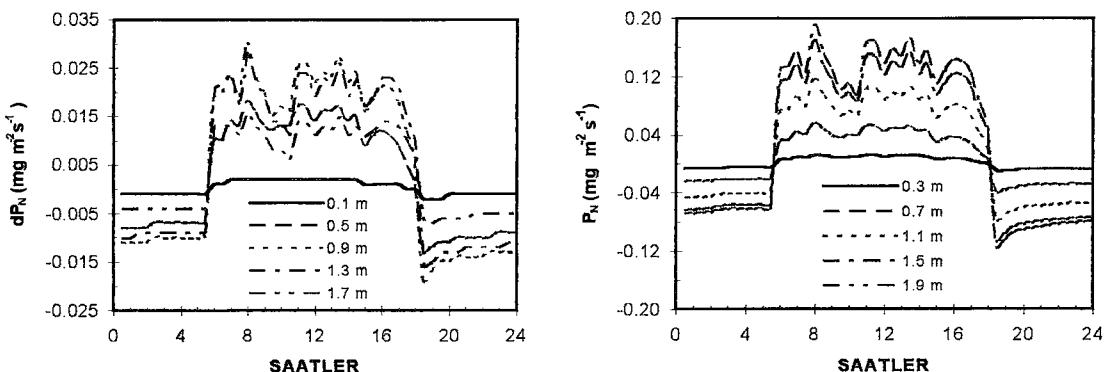
5. 2. 3. 2. CO_2 taşınımı

Fiziksel ve fiziolojik koşullar altında biokimyasal reaksiyonlarla birim zamanda oluşan kütlesel üretim, net fotosentez hızıyla tanımlanır. Fotosentez olayı, güneşlenme süresince, solunum olayı tüm gün boyunca etkilidir. Bitki standında fotosentez, solunum ve net fotosentez hızları diferansiyel ve kümülatif olarak simüle edilmiş; grafiklerle verilen ayrıntılı bulgulara ulaşılmıştır.

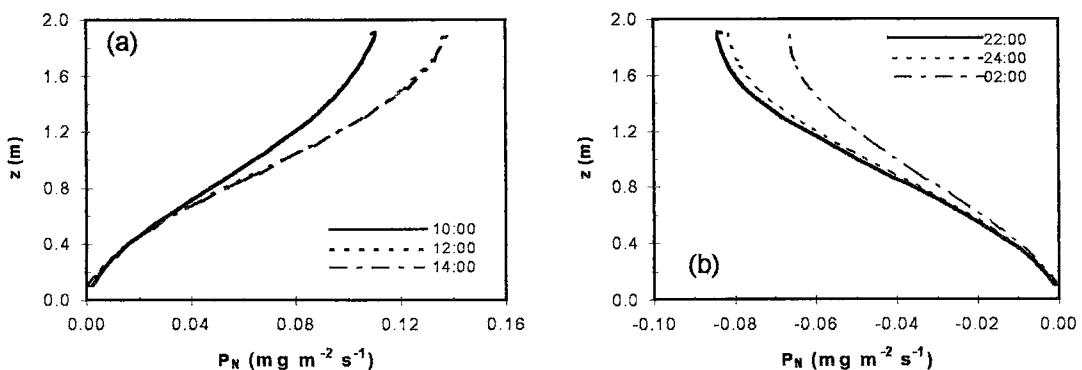
Tüm bitki standında gelişen fotosentez hızı (P) 0.185 ile $0.382 \text{ mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$, solunum hızı (R) 0.062 ile $0.242 \text{ mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ve net fotosentez hızı (P_N) -0.068 ile $0.191 \text{ mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ aralıklarında değişmiştir. Bitki standının farklı yüksekliklerinde CO_2 taşınımına ilişkin sayısal değerler çizelge 5.30'da özetlenmiş olup; diferansiyel ve kümülatif ölçeklerde net fotosentez hızlarının günlük değişimleri şekil 5.72'de ve net fotosentez hızı profili şekil 5.73'de verilmiştir.

Çizelge 5.30 P, R ve P_N ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) değişimi

saat	z=0.5 m			z=1.0 m			z=1.5 m		
	P	R	P_N	P	R	P_N	P	R	P_N
12:00	0.062	0.038	0.024	0.196	0.120	0.076	0.325	0.204	0.121
24:00	-	0.016	-0.016	-	0.048	-0.048	-	0.074	-0.074

Şekil 5.72. Bitki standında a) dP_N rejimi ve b) P_N rejimi

Net fotosentez hızı ile ısı ve kütte transfer parametreleri arasındaki ilişkiler araştırılmış olup; regresyon analizi sonuçları çizelge 5.31'de toplu olarak verilmiştir. Metabolik ısı akı yoğunlukları ile net fotosenteze ilişkin veriler, bekleniği gibi, benzer yönelimler göstermektedir. Yani, fiziksel ve fizyolojik parametreler kullanılarak, fotosentez için karar mekanizmaları türetilebilir. Ancak, çizelge 5.32'deki ilişkilere dayanarak, fotosentez hızı ile net radyasyon ve fotosentez etkili radyasyon arasında yeterli ilişkilere ulaşılabilmiştir (Şekil 5.74). Fotosentez işlemi güneşlenme süresince etkili olduğundan, fotosentez hızı fotosentez etkili radyasyonun fonksiyonu olarak tanımlanabilir (Çizelge 5.32). Çizelge 5.32'deki ilişkiler incelendiğinde, en yüksek korrelasyonun ($R^2=0.8269$) solunum hızı ile net radyasyon arasında olduğu görülür. Bu durum, solunum işleminin yaprak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır. Transpirasyon hızı doğrudan net radyasyonun fonksiyonu olarak tanımlanmasına karşın, fotosentez hızı için bu doğru bir yaklaşım olmaz. Çünkü, transpirasyon olayı önemli bir enerji tüketim işlemi olup; metabolik aktivitelerde çok az enerji kullanılır.

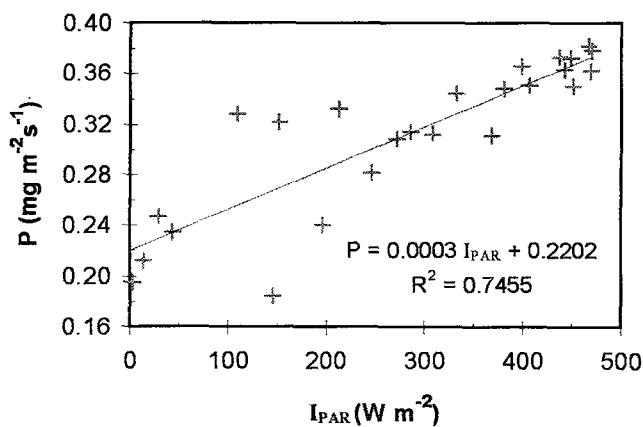
Şekil 5.73. P_N profili a) gündüz, b) gece

Çizelge 5.31. Net fotosentez ile ısı ve kütle transfer parametreleri arasındaki ilişkiler

Fonksiyonel ilişki	Belirtme katsayısı(R^2)
$P_N = 0.2686 \frac{\Delta C}{r_{AC}} - 3.65666$	0.5641
$P_N = -1.7305 \frac{\Delta C}{r_{AC}} + 0.0268 \frac{\Delta e}{r_{AW}} - 3.8627 \frac{\Delta T}{r_{AH}} + 0.0947$	0.7191
$P_N = -1.8064 \frac{\Delta C}{r_{AC}} + 0.01963 \frac{\Delta e}{r_{AW}} + 92.86 \frac{\Delta T}{r_{AH}} - 68.63 \frac{\Delta T}{r_R} + 0.1241$	0.8152
$P_N = 9.4406 \frac{\Delta C}{r_{AC} + r_{SC}} + 0.03536 \frac{\Delta e}{r_{AW}} + 1.324 \frac{\Delta T}{r_{AH}} - 0.2619$	0.7623
$P_N = 6.2936 \frac{\Delta C}{r_{AC} + r_{SC}} + 0.03323 \frac{\Delta e}{r_{AW}} + 64.885 \frac{\Delta T}{r_{AH}} - 45.456 \frac{\Delta T}{r_R} - 0.1765$	0.7945

Çizelge 5.32. CO_2 taşınım işlemleri ile I_{PAR} ve Q_R arasındaki ilişki

Fonksiyonel ilişki	Belirtme katsayısı(R^2)
$P = 0.0003 I_{\text{PAR}} + 0.2202$	0.7455
$R = 0.0006 Q_R + 0.0785$	0.8269
$P_N = 0.0009 Q_R - 0.0452$	0.6161
$P_N = 0.0005 I_{\text{PAR}} - 0.0426$	0.6777

Şekil 5.74. P ve I_{PAR} arasındaki ilişki

6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sera bitki mikroklimasını tanımlamak amacıyla zamanla değişen bir model geliştirilmiştir. Bitki mimarisi dikey ve yatay dağılım fonksiyonlarıyla tanımlanmıştır. Bitki örtüsüne ilişkin diferansiyel ve kümülatif radyasyon, ısı ve kütle transfer işlemleri modellenmiştir. Bitki örtüsü olarak hıyar bitki örtüsü kullanılmış olup; bitki mikro-çevresine ilişkin ayrıntılı fiziksel ve fizyolojik bulgulara ulaşılmıştır. Sera mikrokliması modeli kullanılarak, bitki büyümeyi etkileyen değişik çevresel parametrelere göre bitki tepkimeleri çözümlenmeye çalışılmıştır.

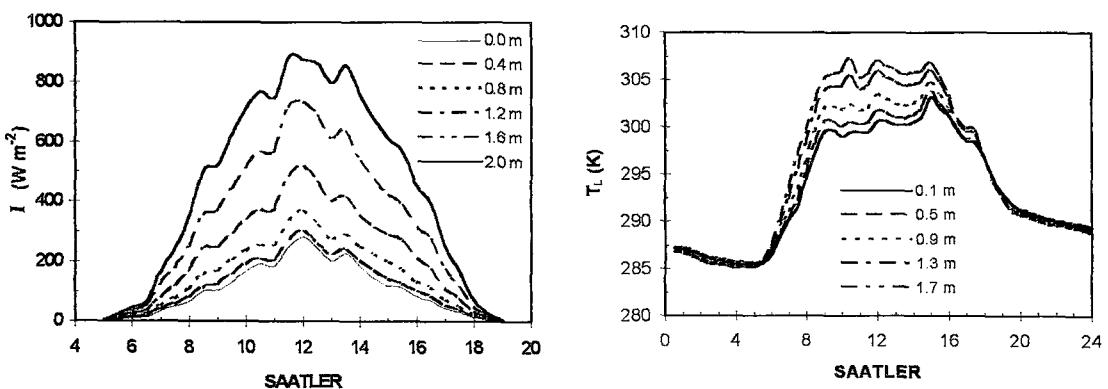
Araştırma bulgularına ilişkin değerlendirme birincil ve ikincil analiz sonuçları kapsamında yapılmıştır. Birincil analiz sonuçları hava/yaprak sıcaklıklarını, bağıl nem, CO_2 konsantrasyonunu ve hava hızının bitki standı içindeki değişimlerini içermektedir. Ikincil analiz sonuçları ise ısı ve kütle transfer işlemlerini kapsamaktadır. Araştırmada elde olunan bulguların değerlendirilmesi altı ana başlıkta yapılmıştır.

6. 1. Birincil analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Bitki standı içinde yaprak ve hava sıcaklıkları farklı yönelim göstermiştir. Dolayısıyla, hava ve yaprak sıcaklıklarını eşit olarak varsayılan "sıfır hipotezi" yaklaşımıyla uyuşmamaktadır. Simülasyon koşullarına göre, gece hava sıcaklığı yaprak sıcaklığından daha yüksektir. Gündüz ise, şekil 6.1'de görüldüğü gibi, özellikle standın üst seviyelerinde güneş radyasyonunun etkisi nedeniyle yaprak sıcaklığı hava sıcaklığından daha yüksektir.

Bitki standında hava ve yaprak sıcaklığı ölçümleri, model hesaplamalarını desteklediğini göstermiştir. Hava ve yaprak sıcaklıklarının dikey profilleri anlamlı bulunmuş olup; tahmini hesaplamalar ile ölçümler arasında oluşan küçük sapmalar güneş radyasyonu ile ısıl radyasyonun değişiminden kaynaklanmıştır. Maksimum sapma 3 K'ni aşmamıştır.

Bitki örtüsü üzerinde bağıl nem % 64.63 ya kadar düşmesine karşın % 98.01 oranına dek yükselmiştir. Gece süresince bağıl nem çok yüksek seviyelerde olmasına karşın, belirgin sapmalar göstermemiştir. Bağıl nem stand içinde önemli oranda değişmemiştir. Bağıl neme ilişkin ölçüm verileri model simülasyon sonuçlarını desteklemiştir.



Şekil 6.1. Bitki standında a) güneş radyasyonu rejimi, b) yaprak sıcaklığı rejimi

Bitki standı üstünde en yüksek CO₂ konsantrasyonu 262.5 ppm olarak ölçülmesine karşın, CO₂ konsantrasyonu gün boyunca çok düşük kalmıştır. Stand içinde CO₂ konsantrasyonunun sınır değerlere göre stand içinde fazla değişmediği gözlenmiştir. CO₂ konsantrasyonunun günlük değişimi, güneş radyasyonundan etkilenir; ancak, hava ve yaprak sıcaklığı ile bağıl neme oranla çok daha düzgündür. CO₂ konsantrasyonu rejiminin dikey profili gece az gündüz belirgin saptalar göstermiştir. Gündüz süresince bitki örtüsü içindeki CO₂ konsantrasyonunun azalması, üst tabakalarda görünür ışığın daha yoğun olmasından dolayı fotosentezde kullanılan CO₂ miktarının fazla olmasından kaynaklanmıştır. Model hesaplama sonuçları ölçüm verileri ile uyşmaktadır.

Stand üstünde ölçülen hava hızı gece 0.112 ms⁻¹ ye düşmesine karşın, gündüz 0.635 ms⁻¹ dek yükselmiştir. Hız profilinin alt tabakalardaki yönelimi, üst tabakalara benzer olup; tabana dek kararlı yönelimini sürdürmüştür. Ölçüm verileri simülasyon verilerini desteklemektedir.

Havanın yoğunluğu sıcaklıktan etkilenir; dolayısıyla, dikey sıcaklık gradiyentlerinin değişimi klimatolojide dikey hava hareketini yönlendirir. Konsantrasyon gradiyentlerindeki farklılıklar ısı ve kütle transferinin temel kaynağıdır. Bitki standında sınır tabaka sıcaklığına bağlı olarak havanın özgül ısısı, kinematik viskozitesi, ısı, su buharı ve CO₂ taşınımı difüzyon katsayıları ile suyun buharlaşma entalpisi değişir. Dolayısıyla, bitki klimasında etkili olan boyutsuz sayılar, bu ısı ve kütle transfer karakteristiklerinin değişiminden sorumludur ve aerodinamik dirençlerin ya da film katsayılarının hesaplanması gerektir.

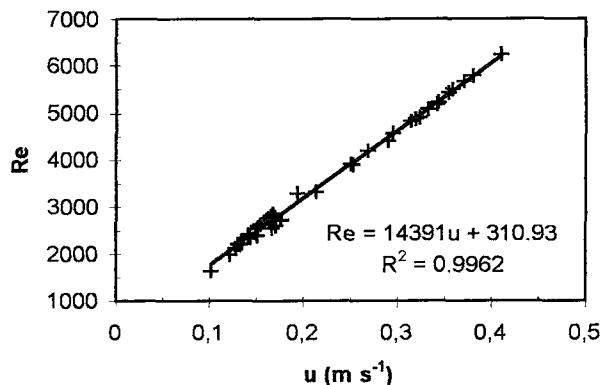
6. 2. Boyutsuz sayılar ve aerodinamik dirençlere ilişkin değerlendirmeler

Boyutsuz sayılar ısı ve kütle transferi akı yoğunlıklarının hesaplanmasında kullanılır. Bu akı yoğunlıklarını temelde hava sıcaklığı ve hava hızından etkilenir. Hesaplanan tüm boyutsuz sayılar beklenen aralıklar içerisinde değişmiştir. Reynolds sayısı, bitki standında her zaman hava hızıyla doğrusal olarak artmıştır. Ortalama büyüklükler kullanılarak hava hızına göre Re sayısının hesaplanması belirtme katsayısı (R^2) 0.9962 olan aşağıdaki pratik ilişki elde edilmiştir (Şekil 6.2):

$$Re = 14391 u + 310.93 \quad (6.1)$$

Hava hızı bitki standı içinde üssel olarak değiştiğinden, Re sayısı ile normalize bitki yüksekliği (z/h) arasında aşağıdaki ilişki elde olunmuştur:

$$\overline{Re} = 4215.2 \left(\frac{z}{h} \right)^{0.2711} \quad R^2 = 0.9988 \quad (6.2)$$



Şekil 6.2. Re sayısı ile hava arasındaki doğrusal ilişki

Aerodinamik dirençler havanın fiziksel özelliklerindeki değişimlerden etkilenir; ancak en önemli değişkenin hava hızı olduğu söyleyenebilir. Aerodinamik dirençler ile hava hızı arasında hesaplanan ortalama veriler kullanılarak çizelge 6.1'de verilen doğrusal ilişkiler türetilmiştir (şekil 6.3).

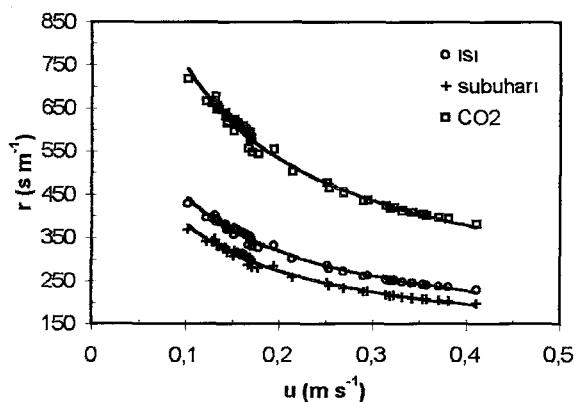
Pr , Sc ve Le sayıları yükseklikle hemen hiç değişmemiştir; bu nedenle doğrudan stand üstü hava sıcaklığına bağlı olarak hesaplanabilirler.

Bitki standı içindeki bağıl konveksiyon Ri sayısına göre tanımlanmış; gece periyodunda Ri sayısı nötr çizgi çevresinde salınım gösterirken; gündüz süresince çoğunlukla kararlı bölgede kalmıştır. Bitki kimasının kararlı ya da kararsız olmasında temel değişken $\partial T / \partial z$ potansiyel sıcaklık gradiyentidir. Bitki standında sıcaklık profili değişmiyorsa Ri sayısı sıfır eşittir. Stand içinde sıcaklık yükseklikle artıyorsa, Ri sayısı pozitif olup; bu durum atmosferik anlamda kararlı olarak değerlendirilir. Sıcak yüzey üzerinde (toplak ya da yaprak yüzeyi) hava tabakalarının sıcaklığı yükseklikle azalır ve Ri sayısı negatiftir; bitki kliması kararsızdır ve herhangi bir dış etkiyle her an değişebilir. Ri sayısı profili gündüz periyotlarında sürekli yön değiştirmesine karşın, gece nötr çizgiye yakın kalmıştır.

Gündüz periyotlarında, şekil 5.5 a'da görüldüğü gibi, radyasyon bitki örtüsünün üst tabakaları tarafından soğurulduğu için sıcak hava tabakası soğuk hava tabakasının üstüne çıkar ve sıcaklık yükseklikle artar. Gece periyodunda ise, şekil 5.5 b'de görüldüğü gibi, sıcaklık profili hemen hemen sabit kalmıştır.

Çizelge 6.1. Aerodinamik dirençler ile hava hızı arasındaki ilişkiler

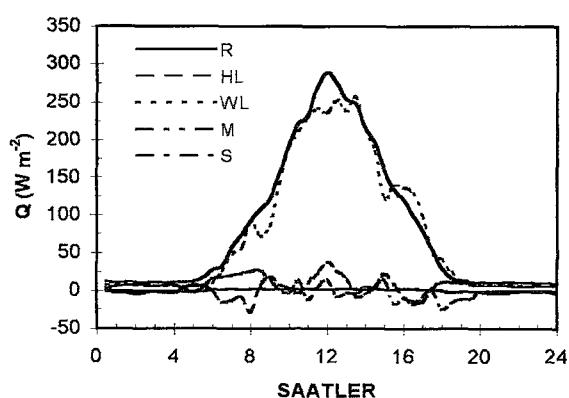
İlişkiler	Belirtme katsayısı (R^2)
$r_{AH} = 144 u^{-0.4895}$	0.9907
$r_{AW} = 124 u^{-0.4885}$	0.9910
$r_{AC} = 241 u^{-0.4904}$	0.9905



Şekil 6.3. Aerodinamik dirençler ile hava hızı arasındaki ilişkiler

6. 3. Isı transferi işlemlerinin değerlendirilmesi

Net radyasyon bitki örtüsünün ana enerji kaynağıdır. Net radyasyon konveksiyon, transpirasyon ve metabolik ısı bileşenlerinin toplamından daha fazla ise; eldeki enerji fazlası depolanır. Tüm bitki standında depolanan ısı akı yoğunlukları -23.9 ile 27.2 W m^{-2} arasında değişmiştir. Bitki standının enerji bileşenleri şekil 6.4'de aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Önce de üzerinde durulduğu gibi, transpirasyon önemli bir enerji tüketim işlemi olup; metabolik ısı olarak kullanılan enerji son derece düşüktür. Net radyasyonun üstündeki transpirasyon enerjisinin hemen hepsi yaprakları soğutmakta kullanılmaktadır. Genel olarak, bitki örtüsünde depolanan ısı gece süresince negatif, sabah saatlerinden öğlene kadar pozitif olup; öğleden sonra ve akşam çoğunlukla negatiftir. Klimatolojide metabolik ısı genellikle yok varsayılmıştır. Metabolik ısı transferi enerji dengesi açısından önemsiz olduğundan konveksiyonla ve transpirasyonla olan ısı transfer bileşenlerinin toplamı gece süresince çoğunlukla net radyasyon akı yoğunluğundan daha yüksektir. Transpirasyon akı yoğunluğu net radyasyon akı yoğunluğundan daha yüksek olduğunda konveksiyonla ısı transferi akı yoğunluğu negatif olmaktadır. Bu durum deneyel verilerle karşılaştırıldığında da gözlenmiştir.



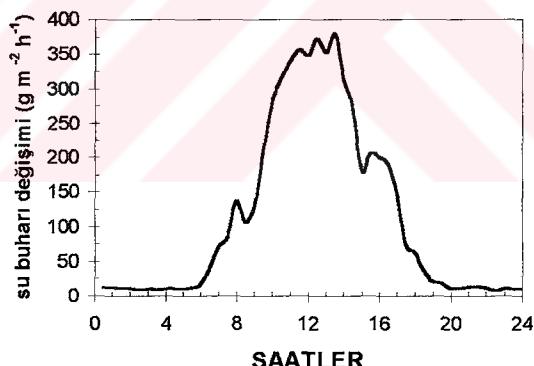
Şekil 6.4. Tüm bitki standında enerji bileşenleri

6. 4. Kütle transfer işlemlerinin değerlendirilmesi

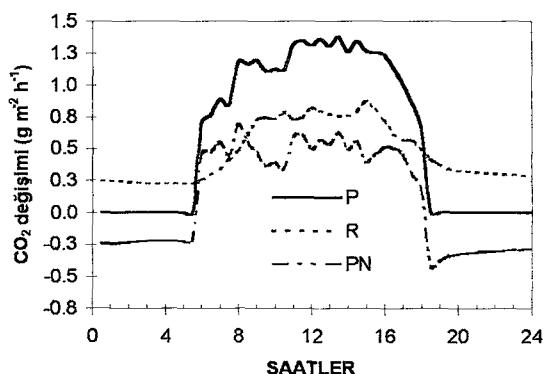
Bitki örtüsünde su buharı taşınımının, özellikle güneşlenme aralığında, güneş radyasyonundan etkilendiği bilinmektedir. Bu taşınım işlemi aynı zamanda bir enerji tüketim işlemi olduğundan sınırlanmalıdır. Ele alınan koşullar altında su buharı değişimi, şekil 6.5'de görüldüğü gibi $378.5 \text{ gm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 'e dek yükselmiştir.

Deneysel olarak ölçülen ve simüle edilen evapotranspirasyon hızları birbirine çok yakın olduğundan, geliştirilen model su kullanımının saptanmasında da etkilidir.

Tüm bitki standında oluşan günlük CO_2 değişimi fotosentez (P), solunum (R) ve net fotosentez (P_N) hızlarına dayalı olarak şekil 6.6'da verilmiştir. Karanlıkta solunumun etkili olduğu bilinmektedir. Maksimum fotosentez hızı yaklaşık $1.4 \text{ g h}^{-1}\text{m}^{-2}$ olarak gerçekleşmiştir. Yaprak sıcaklığının fonksiyonu olan solunum hızı profili yaprak alanı dikey dağılımına çok benzerdir. Solunumla ilişkili net CO_2 değişimi düşük kalmıştır. Bunun iki nedeni vardır. Birincisi sera klimasında potansiyel CO_2 konsantrasyonunun düşük kalması, diğer solunum hızının sıcaklığın yükselmesiyle artmasıdır. Radyasyonun düşük kaldığı koşullarda yaprak sıcaklığı yüksek ise, solunum hızı fotosentez hızına dek artabilir. Bitki örtüsü içindeki CO_2 konsantrasyonu artmadığı için net fotosentez hızı düşük kalmıştır. Fotosentez açısından bağlanan biyokütlenin maksimizasyonu, ancak modern sera işletmeciliğinde sağlanabilir. Optimum büyümeye stratejisi, fizyolojik, teknolojik ve ekonomik kısıtlara göre tanımlanmalıdır.



Şekil 6.5. Günlük su buharı değişim rejimi



Şekil 6.6. Günlük CO_2 değişim rejimi

6. 5. Karar Mekanizması Olarak Mikroklimatolojik Direncin Kullanılması

Üretimin garanti altına alındığı kapalı alanlardaki bitkisel üretim için çok önemli üç alt yapınının kurulmuş olması gereklidir:

1. Bioklimadaki fiziksel ve fizyolojik değişimlerin algılanması,
2. Bitki için uygun olan bioklimayı sağlayacak karar mekanizmalarının saptanması,
3. Bu karar mekanizmalarına göre; ısıtma, serinletme, sulama, havalandırma, gölgeleme sistemlerinin stratejik olarak çalıştırılması.

Yaprak yüzey sıcaklığı, fazla su kaybı nedeniyle hava sıcaklığından daha yüksek olabilir. Su kaybının önemli bölümü stomalar aracılığı ile olur. Dolayısıyla, bitki ile mikro çevresi arasında oluşan fiziksel ve/veya fizyolojik değişimleri değerlendirmek bitki tepkimeleri hakkında anlamlı yargılara ulaşılabilir.

Tam izotermal koşullarda, radyasyon soğurulduğunda $r_{AW} \rightarrow 0$ ise yaprak yüzeyinde terleme gözlenir. Çünkü serbest bırakılan konvesyonla olan ısı akışı, diğer enerji akılarını dengeye ulaştıracak biçimde etkir. Stangellini (1987) 'ye göre, $\partial(T_L - T_A)/\partial r_{AW}$ kısmi türevinden elde olunan sonuçlardan yüzeye ilişkin karar mekanizmaları türetiliblir. Bu amaçla bitki standına ilişkin "mikroklimatolojik direnç" tanımlanmış ve bu boyutsuz direncin değişimi araştırılmıştır.

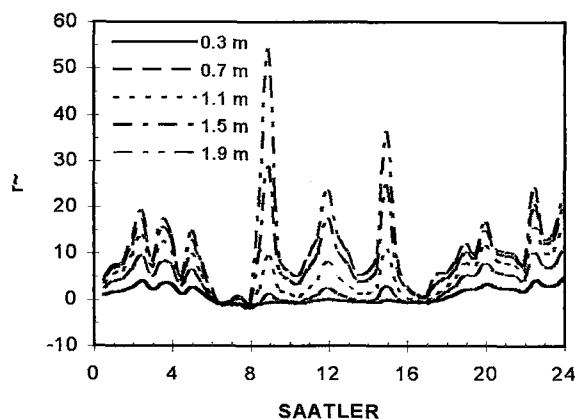
Bitki standının 10 ayrı düzleminde hesaplanan mikroklimatolojik direnç, şekil 6.7'deki gibi, -2.15 ile 54.04 aralığında değişmiştir. Mikroklimatolojik direnç profili şekil 6.8'de gündüz ve gece periyotları için çizilmiş olup; çizelge 6.2'de farklı düzlemler için özetlenmiştir.

$\partial(T_L - T_A)/\partial r_{AW}$ kısmi türevinin araştırılması bitkinin davranış mekanizmasının anlaşılması sırasında önemli olup; sonuçlar aşağıdaki koşullar bazında irdelenmiştir:

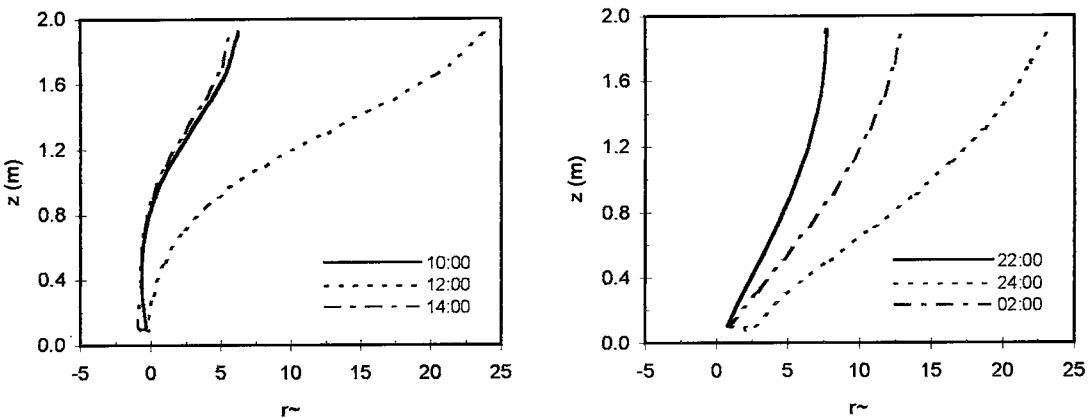
$$a) \tilde{r} \geq \frac{\Re}{\gamma} \frac{r_R}{r_{SW}} \quad (6.3)$$

$$b) \tilde{r} \leq -\frac{\Re}{\Re + \gamma} \quad (6.4)$$

$$c) -\frac{\Re}{\Re + \gamma} < \tilde{r} < \frac{\Re}{\gamma} \frac{r_R}{r_{SW}} \quad (6.5)$$



Şekil 6.7. Bitki standında mikroklimatolojik direncin günlük değişimi



Şekil 6.8. Mikroklimatolojik direnç profili; a) gündüz, b) gece

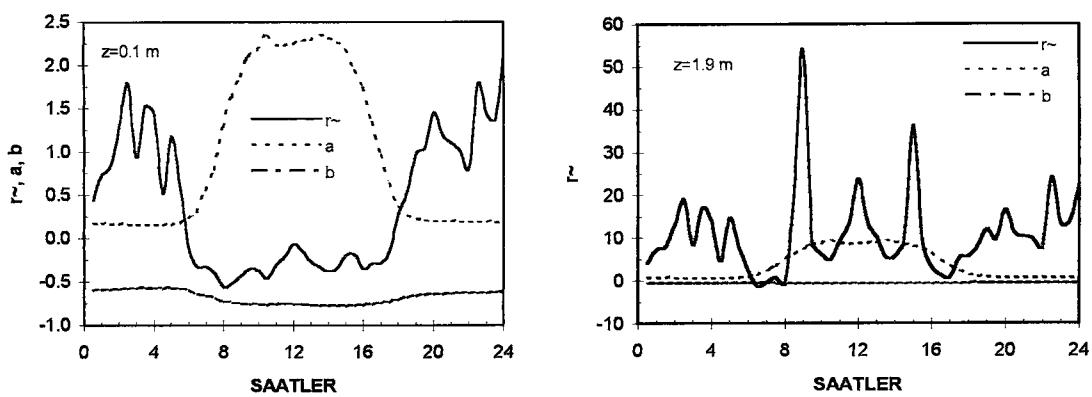
Çizelge 6.2. Bitki standında mikroklimatolojik direcenin değişimi

$$x = \mathfrak{R}r/\mathfrak{R}_{SW}\gamma, y = -\mathfrak{R}/(\mathfrak{R} + \gamma), a: r \sim >x, c: y <r \sim <x$$

saat	z=0.5m			z=1.0 m			z=1.5 m		
	r~	x	y	r~	x	y	r~	x	y
12:00	1.00 ^c	3.13	-0.77	6.46 ^a	4.88	-0.77	17.34 ^a	7.22	-0.78
24:00	7.95 ^a	0.25	-0.63	15.17 ^a	0.39	-0.62	20.57 ^a	3.00	-0.62

Çizelge 6.2'e göre, mikroklimatolojik direncin aldığı değerler ile bitki tepkimelerine ilişkin aralıklar işaretlenmiştir. Gündüz ve gece periyotunda genel olarak bitki örtüsünün klimaya tepki gösterdiği söylenebilir. Bitki örtüsünün özellikle üst seviyelerinde mikroklimatolojik direncin (a) koşulunu sağladığı; bitki klimasının ancak (c) koşuluna göre iyileştirilebileceği görülmektedir.

Sonuçlara ilişkin sayısal bulgular, z=0.1 m taban ve z=1.9 m tepe düzlemleri için şekil 6.9'daki grafiğe göre değerlendirilmiştir. Gündüz ve gece periyotlarında belirgin bitki tepkimeleri ortaya çıkmıştır. Bitki standının z=0.1m için, gece periyotunda, mikroklimatolojik direnç, (a) koşulunu gerçeklemekte olup; bu durumda yaprak yüzey sıcaklığı aerodinamik dirence monoton olarak artmıştır. $T_L - T_A$ farkı, bitki standının hemen tüm düzlemlerde pozitiftir. Su buharı taşınımı aerodinamik direnci yükseldikçe, yüzey daha sıcak olur. Gündüz periyodu aralığında, mikroklimatolojik direnç, çoğunlukla (c) koşulunu gerçeklemiş olup; ara bölgelerde değişim göstermiştir. Bu durumda, (c) koşulu yeterlidir; her zaman sıcaklık fazlasını minimize eden bir aerodinamik direnç değeri söz konusudur. Bitki standının alt düzlemlerde sıcaklık fazlasının bitki tarafından dengelenmeye çalışıldığı söylenebilir. Ancak, aynı durum z=1.9 m 'deki tepe düzlemi için söz konusu değildir. Çünkü, günün farklı saatlerinde mikroklimatolojik direnç, geceden farklı olmak üzere zaman zaman (a) koşulunu gerçeklemiştir. Özellikle saat 9:00'da $r^{\sim}=54.04$ düzeyine kadar çıkarken (a) koşulu 7.24'de kalmıştır. Dikkat edilirse bitki tarafından anlık denge cevapları oluşmakla birlikte, yüksek güneş radyasyonu aki yoğunluğunun doğrudan etkidiği üst düzlemlerde dengenin çoğunlukla bozulduğu söylenebilir.



Şekil 6.9. \hat{r} , a ve b koşullarının değişimi; a) $z=0.1$ m, b) $z=1.9$ m

$z=1.9$ m için gece periyodunda da taban düzlemindeki benzer davranışların olduğu vurgulanabilir. Ayrıca, çok kısa anlık bir dalgalamaya da olsa 6:30, 7:00 ve 8:00 saatlerinde (b) koşulu olmuş; aerodinamik direncin herhangi bir artışında yüzey sıcaklığı azalmıştır. Bu durumu aydınlatan ayrıntılı bilgi olmamakla birlikte, sabah saatlerinde güneş radyasyonuyla yüklenen yaprak yüzeyinin stomatal açılıp-kapanma etkisinde kaldığı vurgulanabilir.

6. 6. Model Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Hesaplanan ve ölçülen veri kümelerinin işlenmesi sonucunda elde edilen test parametreleri çizelge 6.3'de topluca verilmiştir. Tanımlanan parametreler regresyon ve hata analizi tekniklerine bağlı kalınarak verilmiştir. Bu çizelgede, a elde olunan doğrusal ilişkinin eğimi, b $x=0$ 'da y'nin kesişme değeri, R^2 belirtme katsayısı, STE standart hata, RMSE (Root Mean Square Error) kare ortalama karekök hatası, n örnek sayısıdır.

Test sonuçlarına göre, bu çalışmada geliştirilen sera mikrokliması modeli, farklı mikroklimatolojik değişkenleri doğru olarak tahmin edilmesini sağlayacak yetenektedir. Model, hem sera hem de tarla koşullarında bitki örtüsünden olan ısı ve kütle transferi işlemlerinin araştırmasında kullanılabilir.

Çizelge 6.3. Modelin test edilmesine ilişkin bazı istatistiksel parametreler

$S = a.\hat{O} + b$, R^2 : belirtme katsayısı, STE: standard hata,

RMSE: Kare ortalama karekök hatası, n : örnek sayısı,

* : stand ortalaması bazında.

Değişkenler	a	b	R^2	STE	RMSE	n
T_A (K)	1.0262	-7.5904	0.9865	0.8280	0.8511	245
T_L (K)	1.0916	-26.3800	0.9657	1.3296	1.5498	245
RH (%)*	0.9658	2.6920	0.9804	1.5490	1.1581	49
CO_2 (ppm)*	0.9042	24.3470	0.9869	1.7679	2.8681	49
u ($m s^{-1}$)*	0.6126	0.0461	0.9947	0.00654	0.0798	49
I ($W m^{-2}$)	0.9080	14.9630	0.8755	87.9	90.4	124

Sera mikroklimasında etkili olan ısı ve kütle transfer olaylarına ilişkin önemli noktalar aşağıda özetlenmiştir:

1. Bitki üzerinde etkili olan temel enerji kaynağı güneş radyasyonudur.
2. Hava ve yaprak sıcaklıkları arasında her zaman bir sıcaklık farkı vardır.
3. Güneş radyasyonu ile net radyasyonun bitki standı içindeki girişimi yaprak alan indeksiyle orantılıdır.
4. Bitki örtüsü gece ve gündüz net radyasyonun etkisi altındadır. Dolayısıyla, bitkinin kesintisiz enerji kaynağının net radyasyon olduğu açıktır.
5. Sera bitki örtüsüne ilişkin fiziksel ve fizyolojik işlemler, net radyasyonun fonksiyonu olarak kolaylıkla tanımlanabilir.
6. Konveksiyon ve transpirasyonla olan ısı transferi işlemleri birer enerji tüketim işlemidir.
7. En önemli enerji tüketim işlemi transpirasyonla gerçekleşir.
8. Metabolik aktivitelerde kullanılan enerji çok azdır.
9. Isı ve kütle transferi olayları aerodinamik sınır tabakada gelişir.
10. Fotosentez ve solunum işlemleri biyokütlesel üretimin temel mekanizmalarıdır.
11. Fotosentez hızı, fotosentez etkili radyasyonun fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Ancak en uygun yaklaşım foton akı yoğunluğuyla kurulmalıdır.
12. Solunum işlemi yaprak sıcaklığının fonksiyonudur.
13. Solunum işlemi ile net radyasyon arasında yeterince yüksek dereceli bir ilişki vardır.
14. Enerji fazlası bitki yapraklarında ve toprakta depolanır.
15. Bitki yapraklarında depolanan enerjinin havalandırma-sisleme-gölgeleme-serinleştirme sistemlerinin stratejik olarak çalıştırılmasıyla uzaklaştırılması gereklidir.
16. Enerji fazlası yaprakların ısınmasına neden olur. Dolayısıyla, bitkide depolanan güneş enerjisi biyokütlesel üretim yerine, çoğunlukla serinlemekte kullanılarak rasyonel üretim sağlanamaz.
17. Rasyonel üretim için seraların ve bitki bioklimasının özellikle bilgisayar tabanlı otomasyon sistemleriyle kontrol edilmesi gereklidir.
18. Otomatik kontrol sistemlerinin çalışma aralıkları bitki tepki cevaplarına göre düzenlenmelidir.
19. Bitki tepki cevapları aşağıda sıralanan anahtar parametre'lere göre oluşur:
 - Radyasyon transfer direnci (r_R),
 - Stomatal direnç (r_{sw}),
 - Doygun buhar basıncının eğimi (β),
 - Psikrometrik sabit (γ).
20. Bitki örtüsünün davranış mekanizmasının anlaşılmasında mikroklimatolojik direnç kavramı kullanılabilir.

21. Mikroklimatolojik direncin hesaplanmasında şu parametrelere kullanılır:

- Izotermal net radyasyon akı yoğunluğu ($Q_{R,A}$),
- Depolanan ısı akı yoğunluğu (Q_S),
- Havanın buhar basıncı açığı ($e_A^* - e_A$),
- Havanın yoğunluğu (ρ_A),
- Havanın özgül ısısı (c_{pA}),
- Radyasyon transfer direnci (r_R).

22. Sera mikroklimasının etkin olarak yönetilmesi, uzman otomasyon sistemlerinin çizelge 6.4'de verilen parametrelere göre çalıştırılmasına bağlıdır. Parametrelere, bitki standının farklı yüksekliklerinde gece ve gündüz olmak üzere iki ekstrem koşul için verilmiştir. Mikroklimatolojik direnç aynı bitki standında dahi değişim göstermektedir. Toplam güneş radyasyonunun 313.5 Wm^{-2} olduğu $z=0.5 \text{ m}$ 'de (c) koşulu sağlanmış olup; sıcaklık fazlasını minimize eden bir aerodinamik direnç vardır. Ancak gece, mikroklimatolojik direnç çok yüksektir ve (a) koşulu geçerlidir. Bunun nedeni bağıl nemin yüksek, hava hızının düşük olmasıdır. Havalandırma sisteminin açılması gereklidir. Benzer şekilde gündüz bitki standının üst seviyelerine doğru radyasyon akı yoğunluğu arttığından gölgeleme sistemi devreye girmelidir.

23. Güneşlenmenin etkili olduğu periyotlarda üst tabakalarda radyasyon yükü fazla olduğundan mikroklimatolojik direncin istenen ara bölgeye çekilmesi, gölgeleme/havalandırma/sisleme /serinleştirme sistemlerinin çalıştırılmasıyla sağlanabilir.

24. Gece süresince mikroklimatolojik direncin sıfır düzeyinde tutulması bitki tarafından gereksiz enerji tüketiminin minimize edilmesinde yeterlidir. Bağıl nemin aşırı yükselmesi mantar hastalıklarının yayılması endişesinden dolayı istenmez. Bu nedenle, modern seralarda nemi dışarıya pompalayan (dehumidifikasyon) sistemlerine de gereksinim duyulabilir.

25. Mikroklimatolojik direnç gibi bitki tepki fonksiyonları aracılığıyla modern seralar rasyonel olarak kullanılabilir.

26. Stratejik sulama, havalandırma ve gölgeleme rejimleri düzenlenebilir.

27. Bitki türlerine göre, ısı ve kütle transfer karakteristikleri kullanılarak sulama, havalandırma ve gölgeleme aralıkları saptanabilir.

28. Rasyonel bitkisel üretim için, sera otomasyonu aşağıda sıralanan parametrelere göre yapılmalıdır:

- enerji kullanım indeksi,
- su tüketim indeksi,
- gölgeleme indeksi,
- havalandırma indeksi,

29. Mikroklimatolojik bir model sera ısıtma ve soğutma yüklerinin saptanmasında kullanılamaz; bir seranın ısıtma ve soğutma yükünün belirlenmesinde sera yapısal özelliklerinin de dikkate alınması gereklidir.

Çizelge 6.4. Sera mikrokliması karar parametreleri

a, b, c : eşitlik 6.3, 6.4, 6.5 'deki koşullar

	$z = 0.5 \text{ m}$		$z = 1.0 \text{ m}$		$z = 1.5 \text{ m}$	
$I (\text{Wm}^{-2})$	313.5	0	428.5	0	677.6	0
$P (\%)$	35.8	0	49.0	0	77.4	0
$I_{\text{PAR}} (\text{Wm}^{-2})$	138.1	0	210.0	0	352.7	0
$P_{\text{PAR}} (\%)$	29.4	0	44.7	0	75.2	0
$Q_R (\text{Wm}^{-2})$	23.0	2.4	104.6	6.4	239.8	9.3
$Q_{WL} (\text{Wm}^{-2})$	20.1	1.06	87.1	3.47	196.0	5.7
$W_L (\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1})$	8.22	0.43	35.65	1.42	80.25	2.33
$RH(\%)$	80.6	97.32	81.91	97.39	82.96	97.43
$u (\text{ms}^{-1})$	0.268	0.134	0.349	0.147	0.411	0.155
$r_R (\text{sm}^{-1})$	187.0	223.0	185.5	223.1	183.7	223.4
$r_{SW} (\text{sm}^{-1})$	198.6	1473.6	129.9	963.7	87.7	651.1
\bar{r}	0.998 ^c	7.95 ^a	6.46 ^a	15.17 ^a	17.34 ^a	20.57 ^a
$-\mathfrak{R}/(\mathfrak{R} + \gamma)$	-0.77	-0.63	-0.77	-0.62	-0.78	-0.62
$\mathfrak{R}r_R / (\gamma r_{SW})$	3.13	0.25	4.88	0.39	7.22	0.57

Bu çalışmada geliştirilen mikroklimatolojik modeli kullanılarak, gelecekte yapılması önerilen bazı araştırma çalışmaları aşağıda sıralanmıştır:

- Seralarda bitki yetişirme ortamıyla ilişkili farklı parametrelerin etkilerini ortaya koymak,
- Bitki gelişimi ve finansal boyutuyla birlikte enerji kullanımı ve su gereksinimi konusunda serayı kontrol eden bir çok faktörün etkilerinin saptanması,
- Üretimi artırmak için, stratejik işletme yönetimi ve enerji gereksinimi arasındaki bazı ilişkilerin araştırılması,
- İstenen bioklimanın oluşturulmasında bitkilerin sensör olarak kullanıldığı teknolojik alt yapının kurulması.

KAYNAKLAR

1. AKTAŞ, Z., ÖNCÜL, H. ve ORAL, S., 1984. Sayısal Çözümleme. Cilt 1, s 413, O.D.T.Ü., Ankara.
2. AL-FARAJ, A., MEYER, G.E. and FITZGERALD, J.B., 1994. Simulated water use and canopy resistance of new Guinea Impatiens (*Impatiens X hb.*) in single pots using infrared heating. Transaction of the ASAE, **37(6)**: 1973-1980, Michigan.
3. ALLEN, L. H., 1974. Model of light penetration into a wide-row crop. Agronomy Journal, **66**: 41-47, New York.
4. ARINZE, E.A., SCHOENAU, G.J. and BESANT, R.W., 1986. Prediction of incident and transmitted solar irradiance or irradiation for a tilted surface with double-layer plastic covers. Solar Energy, **36 (2)**: 191-195, Pergamon Press Ltd., London.
5. ASAE Standards, 1993. Psychrometric Data, ASAE D271.2 DEC92. Standards Engineering Practices Data, pp. 48-55, Michigan.
6. ASAEDA,T. and VU, T. C., 1993. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: A numerical model. Boundary - Layer Meteorology, **65**: 159-179, Amsterdam.
7. AUBINET, M., DELTOUR, J., DE HALLEUX, D. and NIJSKENS, J., 1989. Stomatal regulation in greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, **48**: 21-44, Amsterdam.
8. AVISSAR, R., AVISSAR, P., MAHRER, Y. and BRAVDO, B.A., 1985. A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. Agricultural and Forest Meteorology, **34**: 21-29, Amsterdam.
9. AYBAK, H. Ç., 1992. Türkiye'de seracılık ve seracılıkta teşvikler. Antalya Bölgesinde Seracılık Konulu Uzmanlar Danışma Grubu Toplantısı, p.33-38, Antalya.
10. BAILEY, B.J., MONTERO, J.I., BIEL, C., WILKINSON, D.J., ANTON, A. and JOLLIET, O., 1993. Transpiration of *Ficus benjamina*: comparison of measurements with predictions of the Penman-Monteith model and a simplified version. Agricultural and Forest Meteorology, **65**: 229-243, Amsterdam.
11. BALDOCCHI, D.D., VERMA, S.B., ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L. and SPECTH, J.E., 1985. Microclimate - Plant Architectural Interactions: Influence of leaf width on the mass and energy exchange of a soybean canopy. Agricultural and Forest Meteorology, **35**: 1-20, Amsterdam.
12. BALDOCCHI, D.D., 1992. A Langrangian random-walk model for simulating water vapor, CO₂ and sensible heat flux densities and scalar profiles over and within a soybean canopy. Boundary-Layer Meteorology, **61**: 113-144, Amsterdam.
13. BELL, D., MORREY, I. and PUGH, J., 1992. Software Engineering: A Programming Approach. Prentice Hall Int., p. 1-338, London.
14. BOT, G.P.A., 1983. Greenhouse Climate:from Physical Processes to a Dynamic Model. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, p. 1-240, Wageningen.

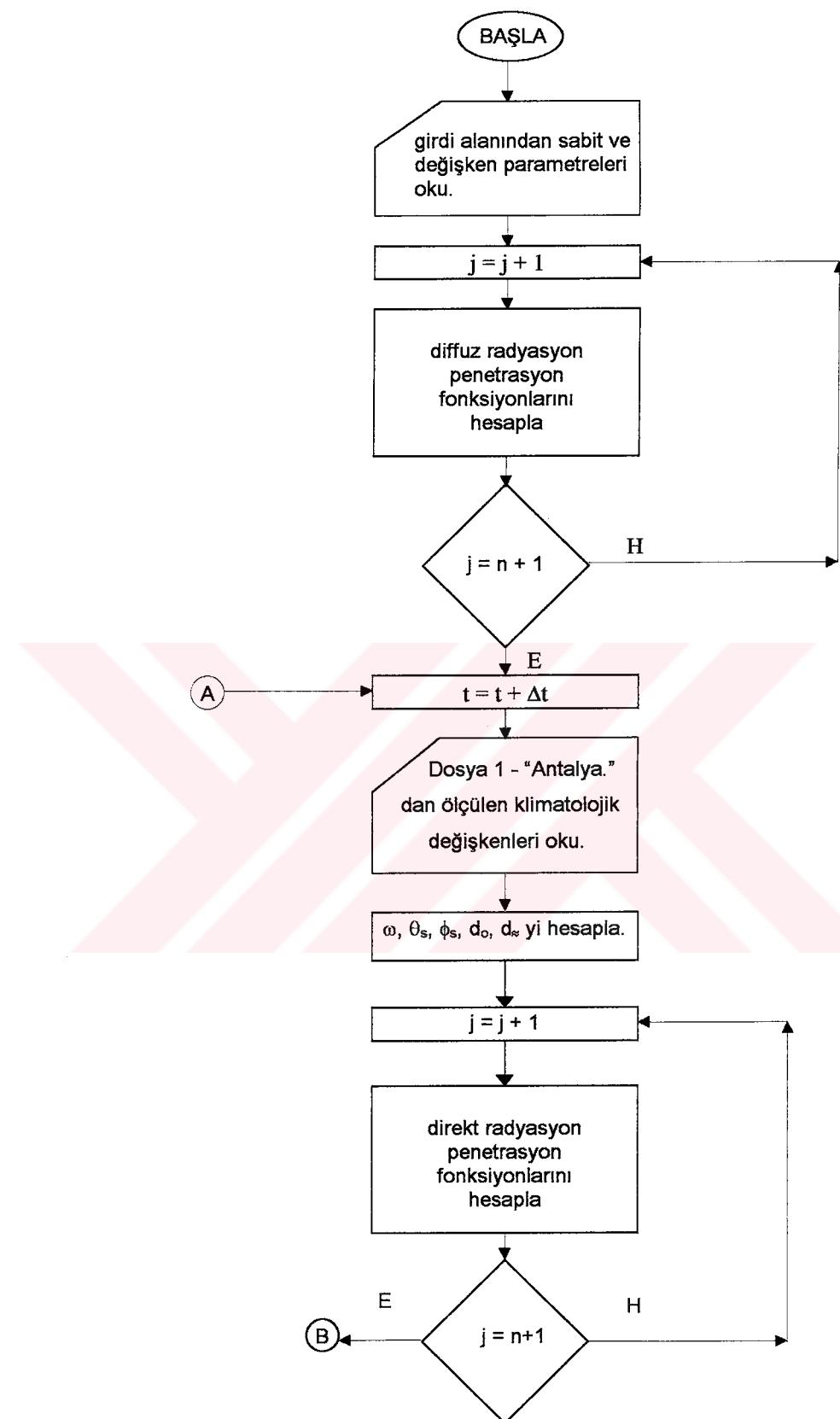
15. BOT, G.P.A., 1993. Physical modelling of greenhouse climate. The Computerized Greenhouse, 51-73, Amsterdam.
16. BRISTOW, K.L. and CAMPBELL, G.S., PAPENDICK, R.I. an ELLIOTT, L.F. 1986. Simulation of heat and moisture transfer through a surface residue-soil system. Agricultural and Forest Meteorology, **36**: 193-214, Amsterdam.
17. CHIA, E. and HUTCHINSON, M.F., 1991. The beta distribution as a probability model for daily cloud duration. Agricultural and Forest Meteorology, **56**:195-208, Amsterdam.
18. CHOUDHURY, B.J., 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. Remote Sensing of Environment, **22**: 209-233, New York.
19. COLLATZ, G.J., BALL, J.T., GRIVET, C. and BERRY, J.A., 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. Agricultural and Forest Meteorology, **54**: 107-136, Amsterdam.
20. DICKINSON, R.E., SELLERS, A. H., ROSENZWEIGH, C. and SELLERS, P.J., 1991. Evapotranspiration models with canopy resistance for use in climate models, a review. Agricultural and Forest Meteorology, **54**: 373-388, Amsterdam.
21. DIETER, G. E., 1991. Engineering Design: A Materials and Processing Approach. McGraw-Hill Inc., p.1-721, New York.
22. DOUGHERTY, R.L., BRADFORD, J.A., COYNE, P.I. and SIMS, P.L., 1994. Applying an empirical model of stomatal conductance to three C-4 grasses. Agricultural and Forest Meteorology, **67**: 269-290, Amsterdam.
23. FOUST, A. S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W., MAUS, L. and ANDERSEN, L.B. 1960. Principles of Unit Operations, John Wiley & Sons Inc., p.1-578, New York.
24. FYNN, R.P., AL-SHOOSHAN, A., SHORT, T.H. and McMAHON, R.W., 1993. Evapotranpiration measurement and modeling for potted chrysanthemum crop. Transaction of the ASAE, **36(6)**: 1907-1913, Michigan.
25. GOEL, N.S. and STREBEL, D.E., 1984. Simple beta distribution represantation of leaf orientation in vegetation canopies. Agronomy Journal, **76**: 800-802.
26. GOUDRIAAN, J. 1989. Simulation of micrometeorology of crops, some methods and their problems, and a few results. Agricultural and Forest Meteorology, **47**: 239-258, Amsterdam.
27. GUTSCHICK, V.P., 1984. Statistical penetration of diffuse light into vegetative canopies: Effect on photosynthetic rate and utility for canopy measurement. Agricultural Meteorology, **30**: 327-341, Amsterdam.
28. HALLDIN, S. and LINDROTH; A. 1986. Pine forest microclimate simulation using different diffusivities. Boundary -Layer Meteorology, **35**: 103:123, New York.
29. HOLMAN, J. P., 1984. Heat Transfer. McGraw-Hill International Book Company, Auckland.
30. HOPKINS, J. G., 1995. Introduction to Plant Physiology. John Wiley & Sons, p. 464, New York.

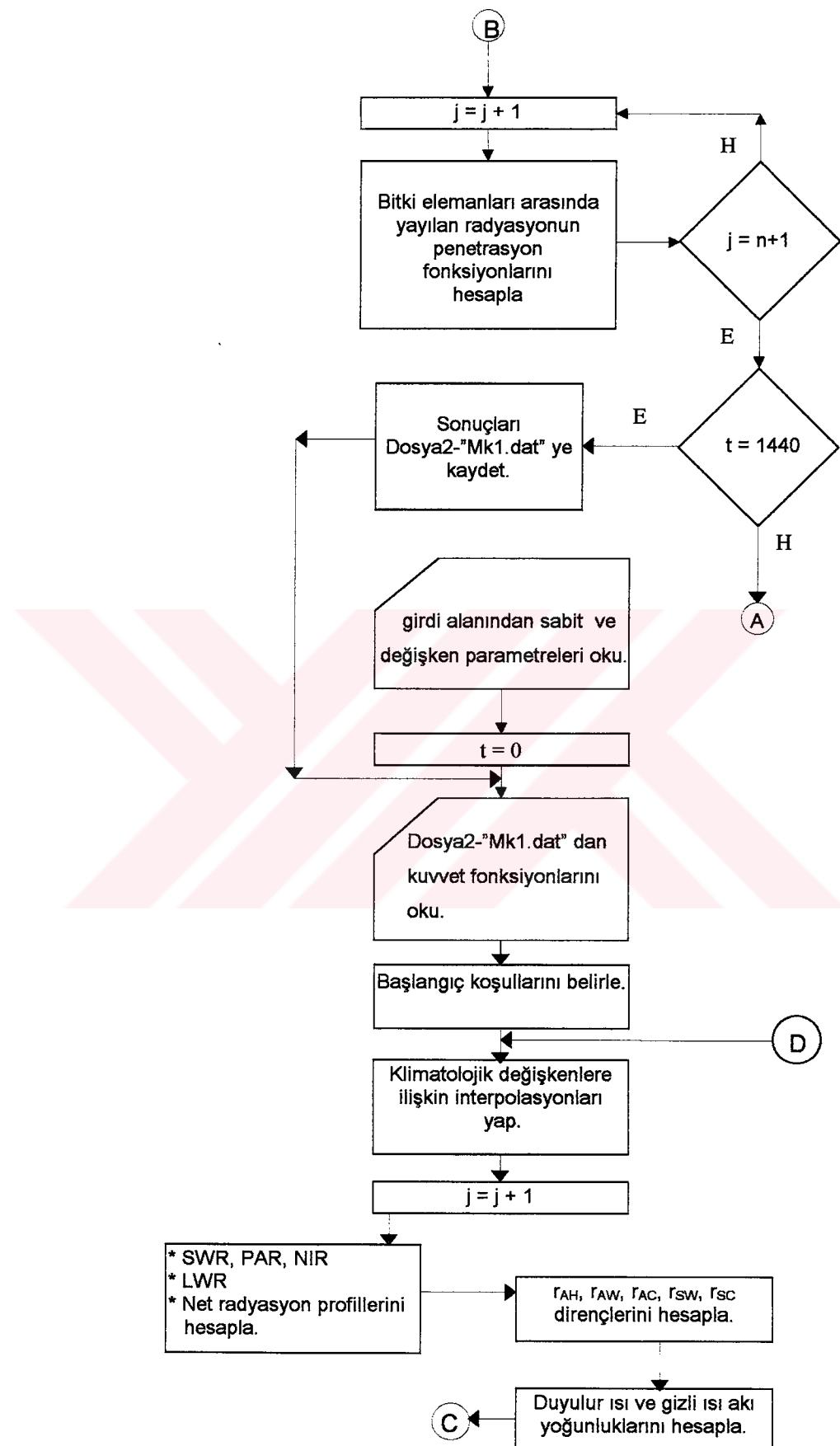
31. IOSLOVICH, I., SEGINER, I. GUTMAN, P.O. and BORSHCHEVSKY, M., 1995. Sub-optimal CO₂ enrichment of greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **60**: 117-136, Silsoe.
32. JACOBS, A.F.G., van Boxel, J.H. and SHAW, R.H., 1992. The dependence of canopy layer turbulence on within canopy thermal stratification. *Agricultural and Forest Meteorology*, **58**: 247-256, Amsterdam.
33. JACOBS, A.F.G., VAN BOXEL, J.H. and EL-KILANI, M.M., 1994. Nighttime free convection characteristics within a plant canopy. *Boundary -Layer Meteorology*, **71**: 375-391, Amsterdam.
34. JAMES, G., 1992. Modern Engineering Mathematics. Addison - Wesley Publishing Company, p. 1-904, Suffolk.
35. JOLLIET, O. and BAILEY, B.J., 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: Measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, **58**: 43-62, Amsterdam.
36. JOLLIET, O., 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **57**: 23-37, Silsoe.
37. KACAR, B., 1989. Bitki Fizyolojisi. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 1153, s. 1-424, Ankara.
38. KAKAÇ, S., 1982. Isı Transferine Giriş, Cilt 1, s. 315, O.D.T.Ü., Ankara.
39. KAKAÇ, S. and YENER, Y., 1995. Convective Heat Transfer. 2nd Edition, CRC Press, Inc., p.1-422, Florida.
40. KAMADA, R.F. and FLOCCHINI, R. G., 1986. Gaussian Solar Flux Model. *Solar Energy*, **36(1)**: 73-87, USA.
41. KAYE Instruments Digistrip II. User's guide, Bedford.
42. KAYS, W. M. and CRAWFORD, M. E., 1993. Convective Heat and Mass Transfer. 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc. p.1-601, New York.
43. KILIÇ, A. ve ÖZTÜRK, A., 1984. Güneş Işınımı ve Düz Toplayıcılar. SAGEM, s. 1 - 135, Ankara.
44. KIMBALL, B.A., 1986. A Modular Energy Balance Program Including Subroutines for Greenhouse and Other Latent Heat Devices, USDA, p.1-360, Phoenix.
45. KOTAKE, S., HIJIKATA, K. and FUSEGI, T., 1993. Numerical Simulations of Heat Transfer and Fluid Flow on a Personal Computer. Elsevier, p. 1- 341, Amsterdam.
46. KUSTAS, W., 1990. Estimates of evapotranspiration with a one-and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. *Journal of Applied Meteorology*, **29**: 704-715, New York.
47. KUUSK, A., 1992. Absorption profiles of shortwave radiation in a vegetation canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **62**: 191-204, Amsterdam.
48. LANG, A.R.G., YUEQIN, X. and NORMAN, J.M., 1985. Crop structure and the penetration of direct sunlight. *Agricultural and Forest Meteorology*, **35**: 83-101, Amsterdam.

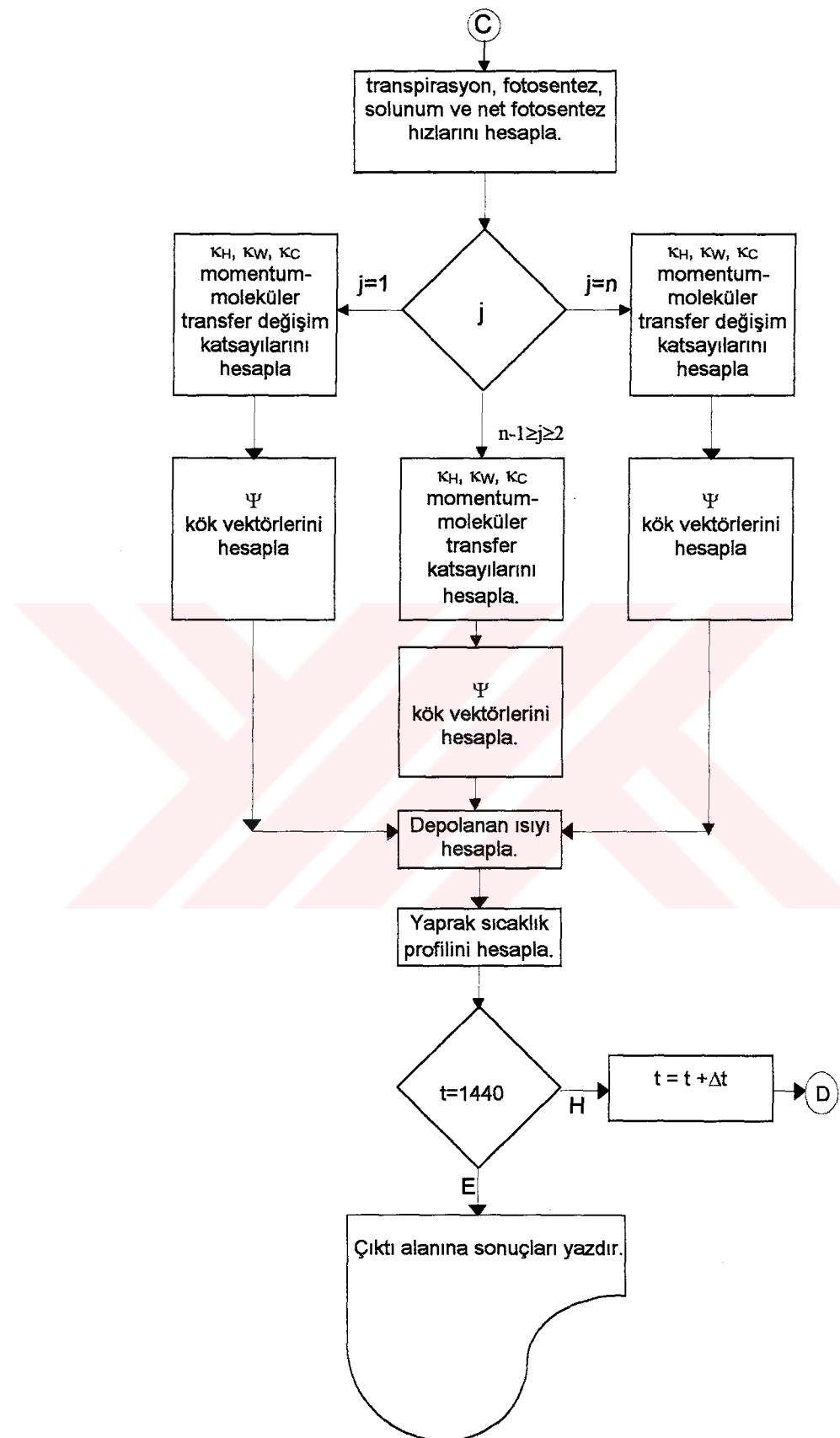
- 49. LAWLOR, D.W., 1987.** Photosynthesis: Metabolism, control and Physiology. Longman/Scientific & Technical Publishing, p. 1-262, London.
- 50. LHOMME, J.P., 1991.** The concept of canopy resistance: historical survey and comparison of different approaches. Agricultural and Forest Meteorology, **54**: 227-240, Amsterdam.
- 51. LONGUENESSE, J.J., GARY C. and TCHAMITCHIAN, M., 1993.** Modelling CO₂ exchanges of greenhouse crops : A matter of scales and boundaries. Acta Horticulturae **328**: 33-45, Bennekom.
- 52. MAHRER, Y. and AVISSAR, R., 1984.** A numerical simulation of the greenhouse Microclimate. Mathematics and Computers in Simulation, **26**: 218-228, Nort-Holland.
- 53. MEYERS,T.P. and PAW U, K.T., 1987.** Modelling the plant canopy micrometeorology with higher-order closure principles. Agricultural and Forest Meteorology, **41**: 143-163, Amsterdam.
- 54. MONTEITH, J. L., 1973.** Princiles of Environmental Physics. Edward Arnold, p. 241, London.
- 55. MYNENI, R.B., ROSS, J. and ASRAR, G., 1989.** A review on the theory of photon transport in leaf canopies. Agricultural and Forest Meteorology, **45**: 1-151, Amsterdam.
- 56. MYNENI, R. B., 1991.** Modeling radiative transfer and photosynthesis in three- dimensional vegetation canopies. Agricultural and Forest Meteorology. **55**: 323-344, Amsterdam.
- 57. OKE, T.R., 1978.** Boundary Layer Climates. Great Britain Press. p.1-356, London.
- 58. PAPADAKIS, G., FRANGOUDAKIS, A. and KYRITSIS, S., 1994.** Experimental Investigating and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment. Journal of Agricultural Engineering Research, **57**: 217-227, Silsoe.
- 59. PIETERS, J.G., DELTOUR, J.M. and DEBRUYCKERE, M.J., 1994.** Condensation and static heat transfer through greenhouse covers during night. Transaction of the ASAE, **37(6)**: 1965-1972, Michigan.
- 60. RAO, S. B. and SHANCHA, C.K., 1992.** Numerical Methods with Programs in Basics. Fortran and Pascal, Sangam Books Limited, p.1-446, London.
- 61. ROGERS, G.F.C. and MAYHEW, Y.R., 1992.** Engineering Thermodynamics: Work and Heat Transfer. 4th edition, ELBS with Longman, Hong Kong.
- 62. ROSENBERG, N.J., BLAD, B. L. and VERMA, S. B., 1983.** Microclimate: The Biological Environment. 2nd edition, John Wiley & Sons, p.495, New York.
- 63. ROSENBERG, N.J., MCKENNEY, M.S. and MARTIN, P.,1989.** Evapotranspiration in a greenhouse-warmed world: a review and a simulation. Agricultural and Forest Meteorology, **47**: 303-320, Amsterdam.
- 64. SALISBURY, F. B. and ROSS, C. W., 1992.** Plant Physiology. 4th edition, Wadsworth Pub., p. 682, California.
- 65. SCHETZ, J. A., 1993.** Boundary Layer Analysis. Prentice Hall, p. 1-586, New Jersey.

66. SHAW, DEN HARTOG, G. and THURTELL, G. W., 1974. Measurements of mean wind flow and three-dimensional turbulence intensity within a mature corn canopy. Agricultural Meteorology, **13**:419-425, Amsterdam.
67. SELLERS, P.J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. International of Journal Remote Sensing, **6**(8): 1335-1372, New York.
68. SINOQUET, H. and BOHOMME, R., 1992. Modeling radiative transfer in mixed and row intercropping systems. Agricultural and Forest Meteorology, **62**: 219-240, Amsterdam.
69. SMITH, G. D., 1986. Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods. 3th Edition, Clarendon Press, p. 337, Oxford.
70. SÖDERSTRÖM, M. and MAGNUSSON, B., 1995. Assesment of local agroclimatological conditions – a methodology. Agricultural and Forest Meteorology, **72**: 243-260, Amsterdam.
71. SPITTERS, C.J.T., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosyntesis: part 2. Calculation of canopy photosyntesis. Agricultural and Forest Meteorology, **38**: 231-242, Amsterdam.
72. SPITTERS, C.J.T., TOUSSAINT, H.A.J.M. and GOUDRIAAN, J. 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosyntesis: part 1. Components of incoming radiation. Agricultural and Forest Meteorology, **38**: 217-229, Amsterdam.
73. STANGHELLINI, C., 1987. Transpiration of Greenhouse Crops: an aid to climate management. Ph.D. Thesis, Agricultural University, p. 1-150, Wageningen.
74. STANGHELLINI, C., 1993. Mixed convection above greenhouse crop canopies. Agricultural and Forest Meteorology, **66**: 111-117, Amsterdam.
75. TANTAU, H.J., 1992. Estimation of the relative opening of leaf stomata using energy balances. Acta Horticulturae **304**: 167-171, Bennekom.
76. TAŞDEMİRÖĞLU, E., 1990. Solar Energy Utilization : Technical and Economic Aspects. METU, p.362, Ankara.
77. THEKAEKARA, M. P. , 1973. Solar energy outside the earth's atmosphere. Solar Energy, **14**: 109-127, GB.
78. TWIDELL, J. and WEIR, T., 1986. Renewable Energy Resouces. E & F.N. Spon Ltd., p. 1-439, New York.
79. ÜLTANIR, M.Ö., 1987. Termodinamik, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları 1023, s.1- 457, Ankara.
80. ÜLTANIR, M.Ö., 1992a. Isı Tekniği Yayımlanmamış Ders Notları, Ankara.
81. ÜLTANIR, M.Ö., 1992b. Sera Mekanizayonu Yayımlanmamış Ders Notları, Ankara.
82. VAN HENTEN, E.J. and VAN STRATEN, G., 1994. Sensitivity analysis of a dynamic Growth model of lettuce. Journal of Agricultural Engineering Research, **59**: 19-31, Silsoe.
83. VAZQUEZ, M., RUIZ, V. and PEREZ, R., 1991. The roles of Scattering, absorption and air mass on the diffuse to global correlations. Solar Energy, **47**(3): 181-188, USA.
84. VINEY, N.R., 1991. An empirical expression for aerodynamic resistance in the unstable boundary layer. Boundary -Layer Meteorology, **56**: 381-393, Amsterdam.

- 85. VOLLEBREGT, H.J.M. and van de BRAAK, N.J., 1995.** Analysis of radiative and convective heat exchange at greenhouse walls. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **60**: 99-106, Silsoe.
- 86. WELTY, J.R., WICKS, C., E. and WILSON, R.E., 1984.** Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons, Inc., p. 1-800, Corvallis, Oregon.
- 87. WONG, H. Y., 1977.** Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers. Longman, p. 1-236, London.
- 88. WOODWORD, F.I. and SHEEHY, J.E., 1983.** Principles and Measurements in Environmental Biology. Butterworths, p.1-263, London.
- 89. YANG, X. and ALBRIGHT, L.D., 1985.** Finite element analysis of the temperatures in a bottom-heated nursery container. *Acta Horticulturae*, **174**:155-165, Wageningen.
- 90. YANG, X., SHORT, T. H., FOX, R.D. and BAUERLE, W.L., 1989.** The Microclimate and transpiration of a greenhouse cucumber crop. *Transaction of the ASAE*, **32(6)**: 2143-2150, Michigan.
- 91. YANG, X., SHORT, T. H., FOX, R.D. and BAUERLE, W.L., 1990a.** A theoretical model of solar radiation transfer in a row-crop canopy. *Transaction of the ASAE*, **33(3)**: 917-924, Michigan.
- 92. YANG, X., SHORT, T. H., FOX, R.D. and BAUERLE, W.L., 1990b.** Dynamic modeling of the microclimate of a cucumber crop: Part 1. Theoretical model. *Transaction of ASAE*, **33(5)**: 1701-1709, Michigan.
- 93. YANG, X., SHORT, T. H., FOX, R.D. and BAUERLE, W.L., 1990c.** Dynamic modeling of the microclimate of a cucumber crop: Part 2. Validation and simulation. *Transaction of ASAE*, **33(5)**: 1710-1716. Michigan.
- 94. YANG, X., SHORT, T. H., FOX, R.D. and BAUERLE, W.L., 1990d.** Plant architectural parameters of a greenhouse cucumber row crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, **51**:93-105, Amsterdam.
- 95. YANG, X., SHORT, T. H., FOX, R.D. and BAUERLE, W.L., 1990e.** Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, **51**: 197-209, Amsterdam.
- 96. YANG, X., DUCHARME,K.M., McAVOY, R.J., ELLIOTT, G. and MILLER, D.R., 1995.** Effect of aerial conditions on heat and mass exchange between plants and air in greenhouses. *Transaction of the ASAE*, **38(1)**:225-229, Michigan.
- 97. YOUNG, J.H. and DAY, B. H., 1988.** Computer generation of Mollier - type psychrometric charts. *Transaction of the ASAE*, **31(4)**: 1224-1232, Michigan.
- 98. ZANG, L. and LEMEUR, R., 1992.** Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **58**: 209-228, Amsterdam.







ÖZGEÇMİŞ

1963 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 1984 yılında girdiği Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü'nden 1988 yılında Ziraat Mühendisi olarak mezun oldu. Ekim 1989 - Nisan 1991 yılları arasında Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

Ocak 1989'dan beri Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Y.C. YÖK GENEL DOKÜMANASYON MERKEZİ
DOKÜMANASYON MERKEZİ