

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞAL TAŞINIMLI GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTMA
SİSTEMİ PERFORMANSININ DENEYSEL
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Naci AKCAN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hasan KÜÇÜK

Haziran 2022

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞAL TAŞINIMLI GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTMA
SİSTEMİ PERFORMANSININ DENEYSEL
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Naci AKCAN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 08/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

P Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Muhammet Naci AKCAN

08.06.2022

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında deneysel ve teorik bakış açımı geliştiren, deneysel hesaplamalarda ve tezin yazılmasında yapıcı tavsiye ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hasan KÜÇÜK'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmamın tüm aşamalarında beni sabırla destekleyen, değerli eşim Sena Baysal AKCAN'a teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Kurutmanın Tanımı	1
1.2. Kurutma Yöntemleri.....	2
1.3. Yapay Kurutma Yöntemleri	2
1.4. Doğal Kurutma Yöntemi	2
1.5. Doğrudan (Direkt) Entegreli Güneş Enerjili Kurutucular	6
1.6. Pasif Güneş Enerjili Kabin Kurutucu	6
1.7. Pasif Güneş Enerjili Sera Kurutucu	7
1.8. Dolaylı (Endirekt) Entegreli Güneş Enerjili Kurutucular.....	8

BÖLÜM 2.

KAYNAK ARAŞTIRMASI	12
--------------------------	----

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. Kırmızıbiber (Capsicum Annuum)	21
3.2. Güneş Enerjili Kurutma Sistemi.....	21

3.2.1. Güneş enerjili kurutma sisteminin tasarımı	22
3.2.2. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminde Kullanılan Malzemeler	25
3.2.2.1. Ahşap	25
3.2.2.2. Alüminyum panel.....	26
3.2.2.3. Isı yalıtımı	27
3.2.2.4. Saydam cam örtü.....	27
3.2.2.5. Dijital termometre	27
3.2.2.6. Lazer sıcaklık ölçüm cihazı.....	28
3.2.2.7. Dijital hassas terazi	28
3.2.2.8. Anemometre.....	29
3.2.3. Güneş enerjili kurutma sisteminin imalatı.....	29
3.2.4. Güneş enerjili kurutma sisteminde deneysel ölçümler	31
3.2.5. Güneş enerjili kurutma sisteminin ısı hesabı.....	32
3.2.5.1. Eğik yüzeye gelen güneş ışınımı.....	40
3.2.5.2. Kollektöre giren ısı güç.....	43
3.2.5.3. Kollektörden ısı kaybı	43
3.2.5.4. Faydalı ısı enerjisi.....	45
3.2.5.5. Kollektörün ısı verimi	46
3.2.6. Havanın sıcaklığına bağlı termofiziksel özellikleri	47
3.3. Kurutma İle İlgili Temel Tanımlar ve Hesaplar	49
3.3.1. Yaş ve kuru baza göre nem miktarı	50
3.3.2. Kuru madde miktarı ve belirleme yöntemi.....	50
3.3.3. Boyutsuz nem oranı	51
3.3.4. Kuruma hızı	52
3.3.5. Efektif difüzyon katsayısı	54
3.3.6. Kurutmada gerekli ısı enerjisi	54
3.3.7. Güneş enerjili kurutma sisteminin enerji verimi	55
3.3.8. Güneş enerjili kurutma sisteminin özgül enerji tüketimi.....	55
3.3.9. Güneş enerjili kurutma sisteminin özgül nem çekme oranı	56

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI	57
4.1. Güneş Enerjili Kurutma sisteminin Isıl Performansı.....	59
4.1.1. Deney-I ısı performans sonuçları	59
4.1.2. Deney-II ısı performans sonuçları	66
4.2. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin Kurutma Performansı.....	73
4.2.1. Deney-I kurutma sonuçları	73
4.2.2. Deney-II kurutma sonuçları.....	79
4.2.3. Kuruma hızının nem miktarıyla değişimi.....	84
4.2.4. Efektif difüzyon katsayısı sonuçları	85
4.2.5. Güneş enerjili kurutma sisteminin enerji verimi	87
4.2.6. Özgül enerji tüketimi ve özgül nem çekme oranları.....	87
4.3. Doğal Taşınımli Güneş Kollektörünün Isıl Performansı	88
4.3.1. Doğal taşınımli güneş kolektörünün ısı model hesap örneği	90
4.4. Belirsizlik Hesabı.....	97
4.4.1. Kütleli debinin belirsizliği.....	98
4.4.2. Eğik yüzeye gelen güneş ışınım akısının belirsizliği	98
4.4.3. Kollektör veriminin belirsizliği	99
4.5. Belirsizlik Hesabı Örneği	99
4.6. Kurutulan Kırmızıbiber Örnekleri	101
4.7. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin İmalat Maliyeti	102

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	104
5.1. Sonuçların Karşılaştırılması	105
5.2. Bulguların Özeti ve Öneriler	110
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	117

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\dot{m}$	: Kollektörde akan havanın kütleli debisi (kg/s)
MC_e	: Kurutma havası koşullarında ürünün denge nemi (g-su/g-kuru kütle)
$\dot{Q}_U$	: Faydalı ısı güç (W)
T_a	: Cam ve yutucu levhanın düzeltilmiş yutma-geçirme çarpanı
B_1	: Kollektördeki havanın ısı genleşme katsayısı (K^{-1})
A_c	: Yutucu levha alanı (m^2)
A_k	: Kollektör hava girişi kesit alanı (m^2)
cm	: Santimetre (cm)
c_p	: Özgül ısı (J/kgK)
D_{eff}	: Efektif difüzyon katsayısı (m^2/s)
DR	: Kuruma Hızı (kgnem/h)
DTGK	: Doğal taşınımli güneş kollektörü
E_y	: Üründeki nemin buharlaşması için gerekli ısı enerjisi (kJ)
ϵ_p	: Yutucu levhanın ısı ışınlım yayma katsayısı (0,95)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
GEKS	: Güneş enerjili kurutma sistemi
G_{sc}	: Güneş sabiti ($1367 W/m^2$)
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
h_{c1}	: Yutucu levhanın üstündeki akış kanalında ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{c2}	: Yutucu levhanın altındaki akış kanalında ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{fg}	: Suyun gizli buharlaşma ısısı (kJ/kg)
h_{r1}	: Cam örtü ile gökyüzü arasında ışınlımla ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)

h_{r2}	: Yutucu levha ile cam örtü arasında ışınlımla ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{r3}	: Yutucu levha ile alt duvar arasında ışınlımla ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{r4}	: Kollektör alt duvarındaki yalıtımdan iletimle ısı geçişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{r5}	: Kollektör alt duvarındaki kontrplaktan iletimle ısı geçişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_w	: Kollektörün dış yüzeylerinde (rüzgâr etkisiyle) ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
I	: Anlık güneş ışınlım akısı (W/m^2)
I_2	: 2 Ekim 2021 tarihinde güneş ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_b	: Yatay yüzeye gelen direkt ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_{bt}	: Eğik yüzeye gelen direkt ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_d	: Yatay düzleme gelen yayılı ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_{dt}	: Eğik yüzeye gelen yayılı ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_{I-II}	: Deney-I ve Deney-II’de ortalama güneş ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_o	: Atmosfer dışında yatay düzleme gelen güneş ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_{ref}	: Eğik yüzeye çevreden yansiyarak gelen güneş ışınlım akısı (MJ/m^2h)
I_T	: Eğik yüzeye gelen toplam güneş ışınlım akısı (MJ/m^2h)
k	: Kollektördeki havanın ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_b	: Kontrplağın ısı iletim katsayısı ($0,139 W/mK$)
k_i	: Yalıtım malzemesini ısı iletim katsayısı ($0,043 W/mK$)
k_t	: Anlık berraklık indeksi
L	: Yutucu levha ile cam örtü arasındaki mesafe; Kurutulan ürünün et kalınlığının yarısı (m)
L_b	: Kontrplağın kalınlığı (0,02 m)
L_i	: Yalıtım malzemesinin kalınlığı (0,02 m)
L_m	: Yutucu levha ile kollektör tabanı arasındaki mesafe (m)
MC_{kb}	: Kuru baza göre nem miktarı (g-su/g-kuru kütle)

MC_o	: Üründe başlangıçtaki nem miktarı (g-su/g-kuru kütle)
MC_t	: Üründe belirli bir andaki nem miktarı (g-su/g-kuru kütle)
$MC_{t1}-MC_{t2}$	: Üründe t_1 ve t_2 zamanlarındaki nem miktarı farkı (g-nem/g-kuru kütle)
MC_{yb}	: Yaş baza göre nem miktarı (g-su/g-kuru kütle)
m_k	: Kuru madde kütlesi (kg)
MR	: Boyutsuz nem oranı (%)
m_y	: Yaş madde kütlesi (kg)
n	: 1 ocaktan itibaren gün sayısı
Nu	: Nusselt sayısı
$\emptyset$	: Enlem açısı ($^{\circ}$)
Q_{AT}	: Kollektör tabanından taşınım ile ısı kaybı (W)
Q_{C1}	: Cam örtüden ışınlama ile ısı kaybı (W)
Q_{CT}	: Cam örtüden taşınım ile ısı kaybı (W)
Q_g	: Kollektöre giren ısı gücü (W)
Q_G	: Kollektöre güneşten gelen ısı gücü (W)
Q_I	: Güneşten gelen ısı enerjisi (kJ)
Q_k	: Kollektörden toplam ısı kaybı (W)
$Q_{N,DEN}$	: Deneysel faydalı ısı gücü (W)
$Q_{N,TEO}$	: Teorik faydalı ısı gücü (W)
$R_{1,2,3,4}$	: Isıl dirençler (m^2K/W)
R_a	: Rayleigh sayısı
R_b	: Geometrik faktör
SEC	: Özgül enerji tüketimi (kW-h/kg)
$SMER$	: Özgül nem çekme oranı (kg/kW-h)
T_a	: Dış ortam hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{a-2}	: 2 Ekim 2021 tarihinde dış ortam hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{a-I-II}	: Deney-I ve Deney-II'nin ortalama dış ortam hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{bi}	: Kollektör taban iç yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{bo}	: Kollektör taban dış yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_c	: Cam örtü sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_h	: Kurutma odası hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_{h-2}	: 2 Ekim 2021 tarihinde kurutma odası hava sıcaklığı (°C)
T_{h-I-II}	: Deney-I ve Deney-II'nin ortalama kurutma odası hava sıcaklığı (°C)
T_k	: Kollektörden çıkan hava sıcaklığı (°C)
T_{k-2}	: 2 Ekim 2021 tarihinde kollektörden çıkan hava sıcaklığı (°C)
T_{k-I-II}	: Deney-I ve Deney-II'nin ortalama kollektörden çıkan hava sıcaklığı (°C)
T_m	: Kollektörde ortalama hava sıcaklığı (°C)
T_s	: Yutucu yüzey sıcaklığı (°C)
T_{s-2}	: 2 Ekim 2021 tarihinde yutucu yüzey sıcaklığı (°C)
T_{s-I-II}	: Deney-I ve Deney-II'nin ortalama yutucu yüzey sıcaklığı (°C)
T_{sky}	: Gökyüzü sıcaklığı (°C)
U_b	: Kollektörün alt yüzeyinden ısı kayıpları için toplam ısı geçiş katsayısı (W/m ² K)
U_L	: Kollektörden ısı kayıpları için toplam ısı geçiş katsayısı (W/m ² K)
U_t	: Kollektörün üst yüzeyinden ısı kayıpları için toplam ısı geçiş katsayısı (W/m ² K)
v	: Rüzgar hızı (m/s)
w	: Saat açısı (°)
α	: Isıl yayılım katsayısı (m ² /s)
β	: Kollektörün yatay düzlemle yaptığı açı (°)
δ	: Deklinasyon açısı (°)
ΔT	: Sıcaklık farkı (°C)
ρ	: Çevrenin yansıtma oranı (-), yoğunluk (kg/m ³)
σ	: STEFAN BOLTZMAN sabiti (5,67×10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
ϵ_c	: Cam örtünün ısıl ışıınım yayma katsayısı (0,88)
ν	: Kinematik viskozite (m ² /s)
η_{DEN}	: Deneysel verilerle hesaplanan kollektör ısı verimi (%)
η_{dr}	: Güneş enerjili kurutma sisteminin enerji verimi (%)
η_{TEO}	: Teorik verilerle hesaplanan kollektör ısı verimi (%)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Tipik güneş enerjili kurutucu tasarımları	5
Şekil 1.2. Pasif güneş enerjili kabin kurutucu	7
Şekil 1.3. Pasif güneş enerjili sera tipi kurutucu	8
Şekil 1.4. Doğal endirekt entegreli güneş enerjili kurutucu	9
Şekil 1.5. Doğal endirekt entegreli pervaneli güneş enerjili kurutucu	10
Şekil 1.6. Doğal endirekt entegreli fanlı güneş enerjili kurutucu	10
Şekil 3.1. Güneş enerjili kurutma sisteminin bileşenleri	22
Şekil 3.2. Güneş enerjili kurutma sisteminin şematik ön görünüşü.	23
Şekil 3.3. Güneş enerjili kurutma sisteminin şematik yan görünüşü.	24
Şekil 3.4. Güneş enerjili kurutma sisteminin genel görünüşü	25
Şekil 3.5. Kontrplak (Plywood) ahşap malzeme	26
Şekil 3.6. Alüminyum panel	26
Şekil 3.7. Cam yünü ısı yalıtımı	27
Şekil 3.8. Dijital termometre	28
Şekil 3.9. Lazer sıcaklık ölçüm cihazı.	28
Şekil 3.10. Dijital hassas terazi.	29
Şekil 3.11. Anemometre	29
Şekil 3.12. Güneş enerjili kurutma sistemi.	30
Şekil 3.13. Kurutma tepsileri.	31
Şekil 3.14. Güneş enerjili kurutma sisteminde sıcaklık ölçümlerinin şematik gösterimi.	32
Şekil 3.15. Doğal taşınımlı güneş kolektörünün en-kesit resmi.	33
Şekil 3.16. Doğal taşınımlı güneş kolektörünün boyuna en-kesit görünüşü	34
Şekil 3.17. Doğal taşınımlı güneş kolektörünün ısıl direnç devre şeması.	35
Şekil 3.18. Türkiye’de yıllık ortalama rüzgar hızı ve hakim yönü dağılımı	37
Şekil 3.19. Havanın ısıl yayılım katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi	47
Şekil 3.20. Havanın kinematik viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişimi	48

Şekil 3.21. Havanın ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	48
Şekil 3.22. Kuruma hız eğrileri	52
Şekil 4.1. Deney-I için hazırlanan kırmızıbiberlerden örnekler.....	58
Şekil 4.2. Deney-II için hazırlanan kırmızıbiberlerden örnekler.	59
Şekil 4.3. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (7 Haziran 2021).....	61
Şekil 4.4. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (8 Haziran 2021).....	62
Şekil 4.5. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (9 Haziran 2021).....	62
Şekil 4.6. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (10 Haziran 2021).....	63
Şekil 4.7. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (7 Haziran 2021).	64
Şekil 4.8. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (8 Haziran 2021).	65
Şekil 4.9. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (9 Haziran 2021).	65
Şekil 4.10. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (10 Haziran 2021).	66
Şekil 4.11. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (14 Haziran 2021).....	68
Şekil 4.12. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (15 Haziran 2021).....	69
Şekil 4.13. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (16 Haziran 2021).....	69
Şekil 4.14. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (17 Haziran 2021).....	70
Şekil 4.15. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (14 Haziran 2021).	71
Şekil 4.16. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (15 Haziran 2021).	72

Şekil 4.17. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (16 Haziran 2021).	72
Şekil 4.18. Güneş ışıınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (17 Haziran 2021).	73
Şekil 4.19. Deney-I’de kütle değişim oranlarının zamanla değişimi.	76
Şekil 4.20. Deney-I’de kurutma hızlarının zamanla değişimi.	77
Şekil 4.21. Deney-I’de kırmızıbiberlerin yaş baza göre nem miktarının zamanla değişimi.	77
Şekil 4.22. Deney-I’de kırmızıbiberlerin kuru baza göre nem miktarının zamanla değişimi.	78
Şekil 4.23. Deney-I’de boyutsuz nem oranının zamanla değişimi.	78
Şekil 4.24. Deney-II’de kütle değişim oranlarının zamanla değişimi.	81
Şekil 4.25. Deney-II’de kurutma hızlarının zamanla değişimi.	82
Şekil 4.26. Deney-II’de kırmızıbiberlerin yaş baza göre nem miktarının zamanla değişimi.	83
Şekil 4.27. Deney-II’de kırmızıbiberlerin kuru baza göre nem miktarının zamanla değişimi.	83
Şekil 4.28. Deney-II’de boyutsuz nem oranının zamanla değişimi.	84
Şekil 4.29. Kuruma hızının nem miktarı ile değişimi.	84
Şekil 4.30. Efektif difüzyon katsayısının boyutsuz nem oranı ile değişimi.	86
Şekil 4.31. Efektif difüzyon katsayısının nem miktarı ile değişimi.	86
Şekil 4.32. GEKS’nin enerji verimliliği.	87
Şekil 4.33. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi	89
Şekil 4.34. Güneş ışıınım akısı, teorik ve deneysel verimlerin zamanla değişimi...	90
Şekil 4.35. Deney-I ve Deney-II’de kurutulan kırmızıbiber numuneleri.	102

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Bazı gıdaların nihai nem miktarları ve izin verilen en yüksek kurutma sıcaklıkları	49
Tablo 3.2. Kırmızıbiberlerin efektif difüzyon katsayıları.	50
Tablo 3.3. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yetişen kırmızıbiberlerin kuru madde miktarı	51
Tablo 3.4. Kırmızıbiberlerin kurutulmasında özgül enerji tüketimi	56
Tablo 3.5. Kırmızıbiberlerin kurutulmasında özgül nem çekme oranı	56
Tablo 4.1. Deney-I için günlük ortalama meteorolojik veriler.	60
Tablo 4.2. Deney-II için günlük ortalama meteorolojik veriler.	67
Tablo 4.3. Deney-I'de kırmızıbiberlerin yaş baza göre günlük nem miktarı değişimleri	74
Tablo 4.4. Deney-II'de kırmızıbiberlerin yaş baza göre günlük nem miktarı değişimleri.	79
Tablo 4.5. Kurutulan kırmızıbiberler için hesaplanan ortalama efektif difüzyon katsayıları.	85
Tablo 4.6. GEKS'nin özgül enerji tüketimi ve özgür nem çekme oranı.	87
Tablo 4.7. Deneysel ölçmelerdeki belirsizlikler.	98
Tablo 4.8. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin İmalat Maliyeti	103
Tablo 5.1. Meteorolojik verilerin karşılaştırılması.	105
Tablo 5.2. Doğal taşınımlı kollektör ısı performans sonuçlarının karşılaştırılması.	107
Tablo 5.3. Deney-I ve Deney-II'de GEKS sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması.	108
Tablo 5.4. Deney-I ve Deney-II'de GEKS kurutma performanslarının karşılaştırılması.....	110

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, doğal taşınım, havalı güneş kolektörü, kurutma, kırmızıbiber (*capsicum annuum*).

Bu çalışmada, Şanlıurfa bölgesinde bolca yetişen kırmızıbiberlerin, geleneksel kurutma yöntemlerine göre daha sağlıklı şartlarda ve daha kısa sürede kurutulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, doğal taşınımlı güneş kolektörü (DTGK) ile tümleşik kurutma odasından oluşan güneş enerjili kurutma sistemi (GEKS) tasarlanıp üretilmiştir. GEKS'nin tasarımı ve çalışmanın planlanmasında, bölgenin coğrafi yapısı ve güneşlenme süresi ile üretilen kırmızıbiberlerin bölge ekonomisine katkısı dikkate alınmıştır.

GEKS'nin kurutma performansı, 2021 yılı haziran ayında, günde 11 saat süreyle yapılan iki ayrı deneyle incelenmiştir. Karşılaştırma amacıyla, aynı tarihlerde açık havada (güneş altında) kurutma deneyleri de yapılmıştır. Deneylerde numunelerin günlük kütle (nem) kayıpları ölçülürken, GEKS'nin farklı noktalarındaki sıcaklıklar saatlik olarak ölçülmüştür. Ayrıca 2021 yılı Ekim ayında, GEKS'nin (DTGK) ısıtım performansı deneyi de yapılmıştır. Bu deneyde, önceki deneylere ek olarak DTGK girişindeki hava hızı da ölçülmüştür. DTGK'nın ısıtım hesaplarında kullanılan güneş ışıyım akıları ve rüzgâr hızları Şanlıurfa Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir.

GEKS'de kurtulan numunelerin nem miktarları, 4. günün sonunda, kırmızıbiberler için istenen son nem miktarlarına (kuru baza göre ortalama %7'nin altına, yaş baza göre %4,26'nın altına) düşmüştür. Açık havada kurutulan numunelerin nem miktarları ise ancak 7. günün sonunda, istenen son nem miktarına (kuru baza göre %8,1) düşürülebilmektedir. GEKS, açık havada kurutmaya göre, kırmızıbiberlerin hem kurutma süresini (yaklaşık 1/3 oranında) kısaltmış hem de nihai nem miktarını (yaş baza göre ~%2,5) düşürmüştür. GEKS'de kurutulan kırmızıbiberlerde, açık havada kurutulanlarda görülen bozulmalar (aşırı büzüşme ve renk değişimleri) ve istenmeyen yabancı maddelerin (toz, böcek, kuş tüyü gibi) etkisi görülmemiştir.

Kurutma deneylerinde; DTGK için teorik ısıtım verimleri, kırmızıbiberler için efektif difüzyon katsayıları, boyutsuz nem oranları, kurutma hızları, GEKS'nin enerji ve kurutma verimleri, özgül enerji tüketimleri ve özgül nem çekme oranları hesaplanmıştır. 2021 Ekim ayında yapılan deneyde, DTGK'nın ortalama teorik ve deneysel ısıtım verimleri sırasıyla %44 ve %40 olarak belirlenmiştir. Kurutma ve ısıtım performansı deneyleri neticesinde GEKS'de doğal hava akışını iyileştirecek tasarım değişikliklerinin, ısıtım verimi ve kurutma performansını iyileştireceği değerlendirilmiştir.

EXPERIMENTAL PERFORMANCE INVESTIGATION OF NATURAL CONVECTION SOLAR DRYING SYSTEM

SUMMARY

Keywords: Solar energy, natural convection, solar air collector, drying, red pepper (*capsicum annuum*).

The aim of this study is to dry red peppers grown abundantly in the Şanlıurfa province under sanitary conditions and in a shorter time compared to traditional drying methods. In order to achieve this a natural convection solar dryer (NCSD) consisting of a natural convection solar air collector (NCSAC), and an integrated drying cabinet has been designed and manufactured. In the design of the NCSD and the planning of the study, local insolation duration, the geographical conditions, and the contribution of the red peppers produced to the regional economy were taken into consideration. The drying performance of the NCSD was investigated in two separate experiments conducted for 11 hours in a day in June 2021. Open sun drying experiments were also carried out on the same dates for comparison. It was measured the daily mass (moisture) losses of the samples in the experiments, besides the temperatures at different points of the NCSD were measured hourly. Moreover, the thermal performance test of the NCSD (NCSAC) was carried out in October 2021. In addition to the previous experiments, the air velocity at the NCSAC inlet was also measured in this experiment. The solar radiation fluxes and wind speeds used in the thermal calculations of NCSAC were obtained from the Şanlıurfa Meteorology Regional Directorate. The moisture content of the samples dried in the NCSD decreased to the desired final moisture content (below 4.3% on a wet basis and 7% on a dry basis on average) for the red peppers at the end of the 4th day. The moisture content of the open sun-dried samples could only be reduced to the desired final moisture content (below 8.1% on a wet basis) at the end of the 7th day. NCSD both reduced the final moisture content (~2.5% on a wet basis) of the red peppers and shortened the drying time (about 1/3) compared to open sun drying. The effects of spoilage (extreme shrinkage and color changes) and undesirable foreign materials (such as dust, insects, feathers, etc.), which are seen in open sun dried red peppers, were not encountered in NCSD application. In the experiments, calculations were carried out for theoretical thermal efficiencies for NCSAC, effective diffusion coefficients of red peppers, dimensionless moisture ratios, drying rates, energy and drying efficiencies, specific energy consumption and specific moisture extraction rates of the NCSD. The average theoretical and experimental thermal efficiencies of NCSAC are %44 and %40, respectively based on the experiment conducted in October 2021. As a result of the performance experiments, it was evaluated that the design changes that would enhance the natural air flow in NCSD would improve the thermal efficiency and drying performance.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanlığın varlığından itibaren yaşanan doğal afetlerden biri de kıtlıktır. Kıtlığın engellenmesi ve gıdaların daha uzun süre korunabilmesi için çözüm yolları aranmıştır. Bunlardan bazıları; besinleri konserve şeklinde saklamak, kurutmak ve teknolojinin gelişmesiyle gıdaların dondurularak depolanmasıdır. Bu yöntemlerin tercih edilmesinin farklı gerekçeleri vardır. Bunlardan bazıları, gıdaların saklanırken tadının ve renginin değişmemesi, küflenmemesi ve besleyici özelliklerinin kaybolmaması olarak sayılabilir. Gıda saklama yöntemlerinden kurutmanın tercih edilmesinde en önemli etkenler, maliyetin düşük ve saklama alanı ihtiyacının az olmasıdır.

1.1. Kurutmanın Tanımı

Kurutmanın tarihine bakıldığında, aslında insanlığın varlığından itibaren uygulandığı ancak profesyonel olarak kullanılmaya 18. yüzyılda başlandığı ve sebzelerin en yaygın kurutulan gıdalar olduğu bilinmektedir. Gıdaların kurutulmasının ne derece önemli olduğu, ülkeler arasındaki savaşlarda anlaşılmıştır. Özellikle II. Dünya Savaşında, gıdaların cephelere nakliyesi ve daha uzun süreli saklama ihtiyacı ön plana çıkmıştır [1]. Kurutma; kurutulacak gıdaların içerisinde bulunan su miktarının, ısı enerjisi uygulanarak azaltılması şeklinde tanımlanabilir.

Kurutmadaki amaç, sebze ve meyve gibi yaş ürünlerde bulunan su miktarını azaltarak, mikroorganizmaların oluşup çoğalmasını ve meydana gelebilecek biyokimyasal reaksiyonları engelleyecek seviyeye indirip, bu ürünleri bozulmadan uzun süre depolamaktır. Kurutma işleminin maliyeti, diğer saklama yöntemlerine göre oldukça düşüktür. Ayrıca ürünlerin hacimsel olarak küçülmesi; ambalajlama, depolama ve lojistikte kolaylık ve ekonomi sağlar.

Kurutma, gıdaların üretiminde kullanıldığı gibi endüstriyel üretim süreçlerinde de kullanılmaktadır. Kimya, kereste, kağıt, seramik, tekstil gibi endüstrilerde uygulanan kurutma yöntemleriyle farklı ürünler kurutulur.

1.2. Kurutma Yöntemleri

Kurutma yöntemleri doğal kurutma ve yapay kurutma olmak üzere iki ana başlığa ayrılır [2].

1.3. Yapay Kurutma Yöntemleri

Yapay kurutma, ürünlerin hızlı kurutulması istendiğinde, ısı yalıtımı yapılmış kapalı bir ortamda ve yapay ısı kaynaklarıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemde, kurutulacak üründen nem alınabilmesi için gerekli ısı enerjisi, nemi düşürülmüş ve sıcaklığı arttırılmış hava veya diğer gazlarla ürüne verilir. Yapay kurutma yönteminde kurutulacak ürünler istenen son nem içeriğine kadar kurutulur. Endüstriyel üretim süreçleri ve zor kurtulan ürünlerde yapay kurutma tercih edilmektedir. Bu yöntem, doğal kurutmaya göre daha kısa sürede daha fazla ürünün kontrollü kurutulabilmesi nedeniyle, endüstride daha çok tercih edilmektedir. Fakat yapay kurutma yöntemleri, ısı kaynağı olarak kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar kullanıldığından, doğal kurutma yöntemine göre yüksek maliyetlidir.

1.4. Doğal Kurutma Yöntemi

Doğal kurutmada ısı kaynağı olarak güneş enerjisinden yararlanılmaktadır. Ülkemizde tarımsal ürünler, güneşli gün sayısı fazla ve ısıtıcı maliyeti olmadığından, tarlada veya açık alanlarda genellikle bu yöntemle kurutulur.

Birçok ülkede; sebze, bakliyat, meyve, kahve, pamuk gibi tarımsal ürünlerin kurutulması, güneş enerjisinden faydalanılarak ve tarlada ürün hasat olmadan önce başlayıp, ürün hasat edildikten sonra da devam etmektedir[2]. Doğal kurutma yöntemini en çok çiftçiler tercih etmektedir. Ülkemizde güneşli gün sayısının

farklılık göstermesinden dolayı bazı bölgelerde kurutma süreleri kısa olurken, bazı bölgelerde ise daha uzun kurutma süreleriyle karşılaşmaktayız.

Güneşle kurutmada iki ana yöntem vardır.

1. Güneşe açık kurutma
2. Güneş enerjili kurutucularla kurutma

Güneşe açık kurutmada ürün; tarladan alınmadan önce veya hasattan sonra, tarlaya, beton yüzeye veya branda üstüne serilerek, güneşin altında ve doğal hava akışında, belirli zaman aralıklarında karıştırılarak kurutulur [2]. Eski zamanlardan beri kullanılan bu yöntem, günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntem, işçilik maliyetinden başka bir maliyeti olmadığından tercih edilmektedir. Fakat güneşe açık kurutmanın da belirli sınırlamaları bulunmaktadır. Bunlar [3];

- a. Kurutulacak ürünün çevre şartlarından çabuk etkilenmesi.
- b. Uzun kurutma süreleri.
- c. Çevreden ürüne toz, böcek ve haşerelerin gelmesi.
- d. Kuşların ürünleri yemesi ve kirletmesi.
- e. Uzun kuruma süresi nedeniyle ürünlerde oluşan bozulmalar.

Ülkemizde geleneksel kurutma yöntemiyle birçok tarımsal gıda ürünü kurutulmaktadır. Doğal kurutma yöntemi, bölgenin şartlarına göre çeşitlilik göstermektedir. Bazı bölgelerde balkonda sebzelerin iplere dizilerek kurutulduğu, bazı bölgelerde ürünlerin çatılara serilerek kurutulduğu ve büyük miktarlardaki kurutmanın ise ürünler tarlalara serilerek yapıldığı gözlenmektedir.

Zamanla insan nüfusunun artması ve gıda talebindeki artışa bağlı olarak “Gıdaları daha fazla miktarda nasıl kurutabiliriz?” sorusunun cevabı aranmaya başlanmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle endüstriyel kurutma sistemleri devreye girmiş; gıdaların daha kısa sürede, daha sağlıklı ortamlarda ve zararlı maddelerin nüfuz etmesi

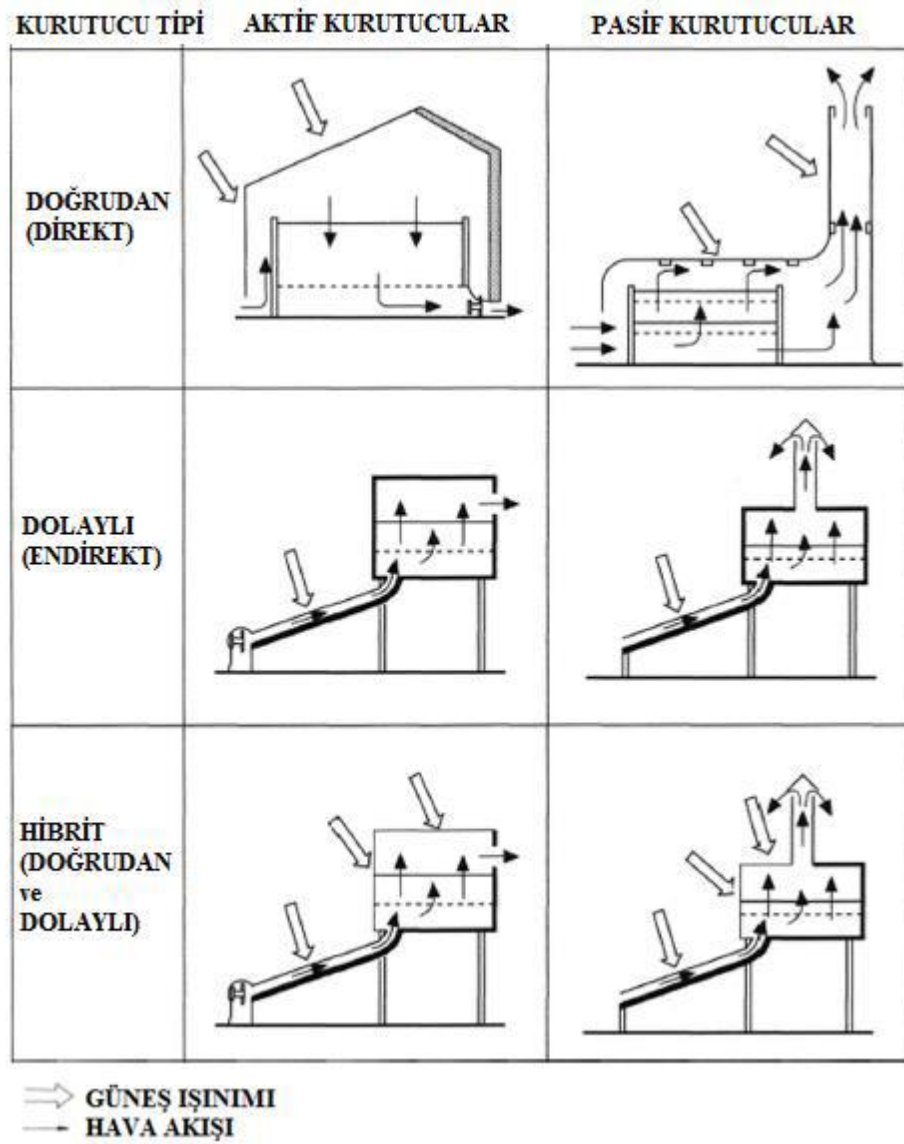
engellenerek kurutulması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak kurutulan ürün çeşitliliği artmıştır.

Güneş enerjili kurutucular, güneş enerjisinden faydalanma şekillerine göre genellikle iki ana başlığa ayrılırlar [2].

- Pasif güneş enerjili kurutma sistemleri
- Aktif güneş enerjili kurutma sistemleri

Bu iki ana başlık da üç alt başlığa ayrılırlar [2];

- Doğrudan (direkt) entegreli güneş enerjili kurutucu
- Dolaylı (endirekt) entegreli güneş enerjili kurutucu
- Hibrit (direkt ve endirekt) güneş enerjili kurutucu



Şekil 1.1. Tipik güneş enerjili kurutucu tasarımları [2].

Güneş enerjili kurutucuların doğal kurutmaya göre üstünlükleri [2];

- Güneş enerjili kurutucular daha az yer kaplar.
- Ani değişen hava şartlarından doğrudan etkilenmez.
- Kurutma süreleri daha kısadır.
- Ürün kalitesi daha yüksektir. Böcek, küf, nem gibi olumsuz etkenler bulunmaz.
- Ürünlerde renk değişimi daha azdır.
- Ürünler güneşin zararlı ışınlarından doğrudan etkilenmez.

- g. İşçilik maliyeti daha azdır.
- h. Ürünlerdeki nihai nem miktarı daha azdır.
- i. Kurutma daha sağlıklı bir ortamda gerçekleştirilir.
- j. Kurutma süreleri kısaldığı için ürün çeşitliği artar.

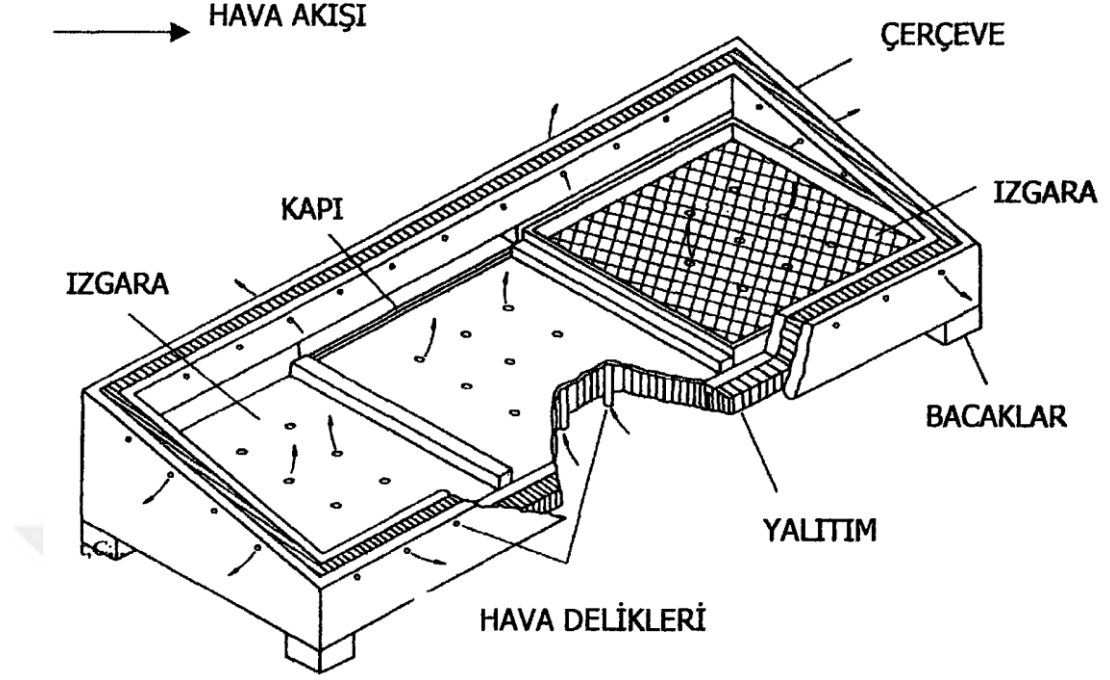
1.5. Doğrudan (Direkt) Entegreli Güneş Enerjili Kurutucular

Bu tip kurutucularda, güneş ışığı doğrudan kurutulacak gıdaya ulaşarak, gıdaların kurutulması sağlanır. Kurutma kabini, güneş ışığının gıdaya ulaşmasını engellemeyecek şeffaf yüzeylerle tasarlanır.

Güneş ışınlarının doğrudan teması nedeniyle, ürünlerde istenmeyen renk değişimleri olabilir. Bazı ürünlerde ise özellikle erken hasat yapılarak, üründe istenilen renk değişimi ve olgunlaşma doğrudan kurutma yöntemiyle sağlanır. Kurutma yeterince dikkatli takip edilmezse üründe aşırı kararmalar ve istenmeyen bozulmalar da meydana gelebilir.

1.6. Pasif Güneş Enerjili Kabin Kurutucu

En basit yapılı kurutucu modelleri olan kabin tipi kurutucular, küçük ölçekte gıda (sebze, meyve, balık, et gibi) kurutulmasında kullanılırlar. Kurutucunun üst yüzeyi eğimli cam örtüden, yan ve taban yüzeyleri ise ışıyı yutan siyaha boyanmış ahşap veya metal malzemelerden oluşur. Kurutucudaki hava sirkülasyonu; yan yüzeylere açılan deliklerden neme doymuş havanın atılması ve taze havanın tabanda bulunan deliklerden kabine girmesiyle sağlanır[3]. Kurutucudaki hava sıcaklığı, dış ortam sıcaklığına da bağlı olarak çok yüksek değerlere çıkabilir.



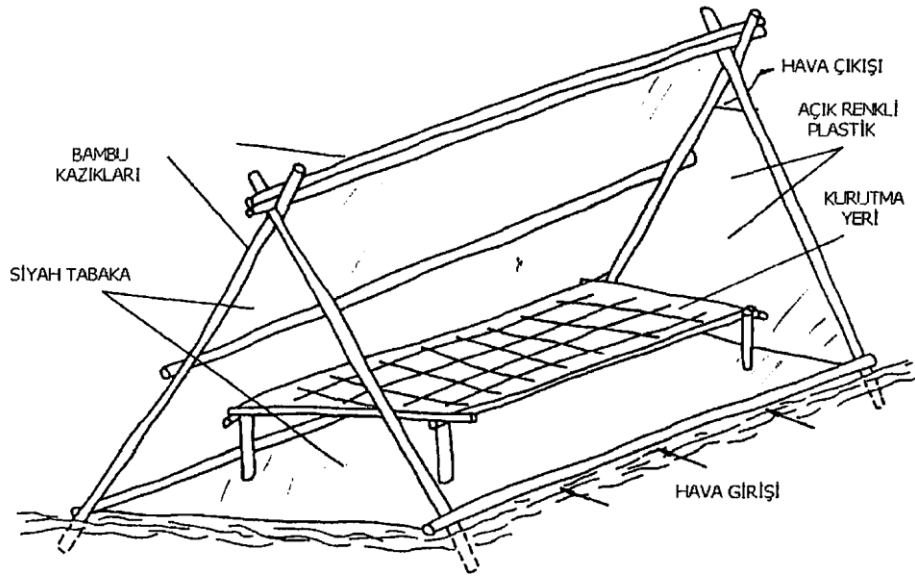
Şekil 1.2. Pasif güneş enerjili kabin kurutucu [2].

Pasif güneş enerjili kurutma sistemi (GEKS) ile ilgili en ayrıntılı araştırma, Brace Araştırma Enstitüsü’de yapılmıştır. Araştırmada, kabin kenarlarının kurutulacak ürünü gölgelememesi için kabin uzunluğunun, kenar uzunluğunun en az üç katı olması önerilmektedir. Kabin sıcaklığını arttırmak için kabinin siyaha boyanması ve güneş ışınlarının olabildiğince emilmesi sağlanmalıdır. Güneş ışınlarının kurutulacak ürünlere doğrudan temas edip zarar vermemesi için tasarımda kullanılacak saydam örtünün güneşin zararlı ışınlarını geçirmeyecek özellikte seçilmesi de önerilmektedir[2].

1.7. Pasif Güneş Enerjili Sera Kurutucu

Sera tipi kurutucuların kabin tipi kurutuculardan ayrılan yönü, sera tipinde güneş ışınlarının doğrudan kurutulacak gıdalara temas etmemesidir. Sera tipi kurutucularda kurutma, kabin tipi kurutuculara göre daha kısa sürede gerçekleşir. Sera tipi kurutucuların maliyeti, kabin tipi kurutuculardan düşüktür. Sera tipi kurutucularda; güneş gören yüzeyler açık renkli saydam örtü ile kaplanırken, güneş görmeyen

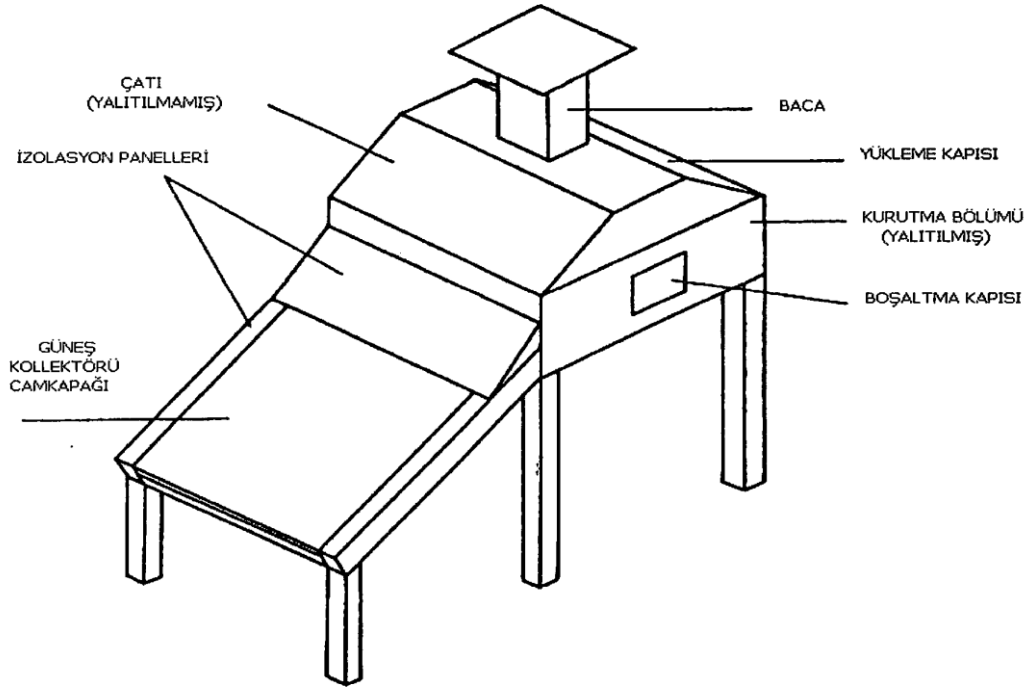
yüzeyler siyah renkli saç ile kaplanarak, güneş enerjisinin daha iyi tutulması sağlanır. Seranın üst ve alt kısımlarında bırakılan havalandırma açıklıkları sayesinde, neme doyan sıcak havanın üst kısımdan tahliyesi ve nemi daha az olan dış ortam havasının ise alt kısımdan içeri girmesi sağlanır. Sera tipi kurutucular, büyük miktarlardaki ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Şekil 1.3.'te basit yapılı bir sera tipi kurutucu modeli görülmektedir.



Şekil 1.3. Pasif güneş enerjili sera tipi kurutucu [2].

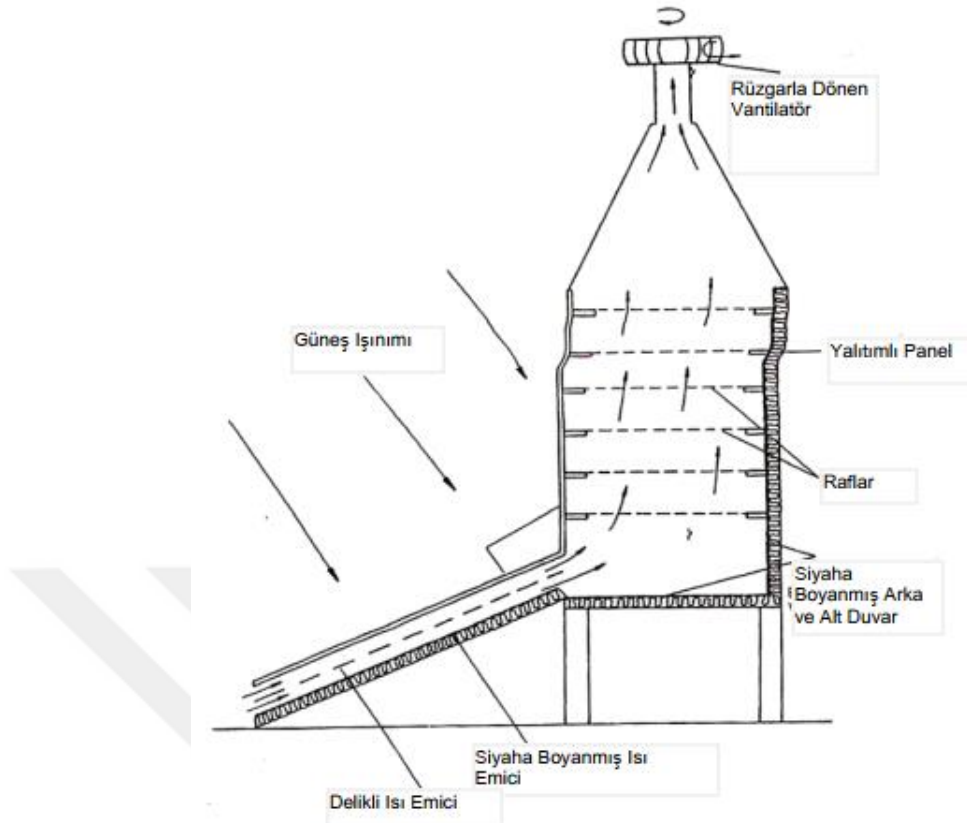
1.8. Dolaylı (Endirekt) Entegreli Güneş Enerjili Kurutucular

Bu tip kurutucularda, güneş ışınlarının ürünlere doğrudan ulaşması istenmez. Ürünler, havalı güneş kollektöründe ısıtılan, bağıl nemi düşük hava ile kurutulur. Bu yöntemde, ürünlerde oluşabilecek güneş ışınlarından kaynaklı aşırı renk değişimleri de engellenir. Dolaylı tip kurutucuların verimleri, direkt kurutuculara göre daha yüksek kurutma sıcaklıklarına çıkabildiğinden, oldukça yüksektir. Bu nedenle dolaylı tip kurutucular genelde derinlemesine kurutmada tercih edilir. Dolaylı tip kurutucular; hava ısıtıcısı (kollektör), bağlantı kanalı, kurutma odası ve bacadan oluşur. Kollektörde ısıtılan hava, kanalla kurutma odasına yönlendirilir. Gıdalardaki nem, sıcak havayla buharlaştırılır. Nemli havanın bacadan atılması ile döngü tamamlanır [2]. Şekil 1.4.'te basit yapılı dolaylı tip GEKS gösterilmektedir.



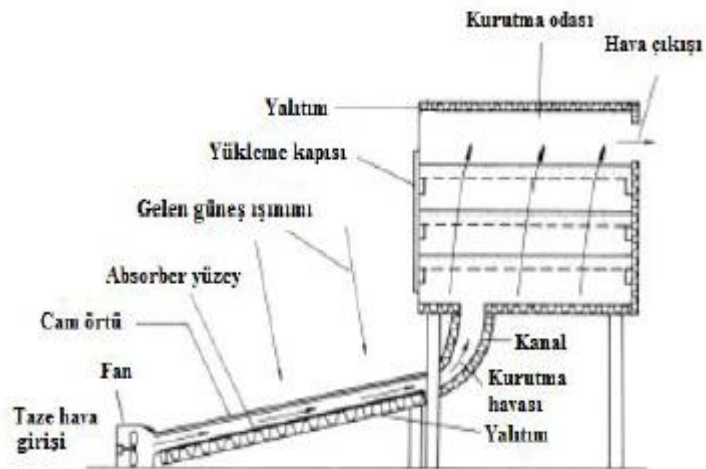
Şekil 1.4. Doğal indirekt entegreli güneş enerjili kurutucu [2].

Şekil 1.5.'te dolaylı tip GEKS'ye rüzgârgülü eklenerek kurutucu içerisindeki hava akışının artırılması hedeflenmiştir. Aynı zamanda, dış ortam havasının bacadan içeri girmesi de engellenmiştir. Bu tip kurutucular en yaygın kullanılan kurutucu modellerindendir.



Şekil 1.5. Doğal endirekt entegreli pervaneli güneş enerjili kurutucu [2].

Şekil 1.6.'da, kurutucudaki zayıf hava akışını iyileştirmek için sisteme fan eklenmiştir. Bu tip kurutucularda hava akış hızı, kurutulacak gıdaya ve/veya havanın sıcaklığına bağlı olarak değiştirilebilir.



Şekil 1.6. Doğal endirekt entegreli fanlı güneş enerjili kurutucu [2].

Havalı güneş kollektörünün verimini arttırmak için aşağıdaki uygulamalar yapılabilir:

1. Kollektörün kesit alanı artırılarak, kollektöre giren hava debisi artırılır.
2. Kollektöre giren hava debisi fan yardımıyla artırılır.
3. Kollektör içerisindeki hava kanalları, hava akışını engellemeyecek şekilde tasarlanır.
4. Kollektöre, güneş ışınlarını daha fazla yutacak malzemeler yerleştirilerek, hava sıcaklığı artırılır.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Şahin, dört farklı yöntemle (güneşe açık, kabin tipi kurutucuda, vakumlu kurutucuda ve dondurarak kurutma) domatesi kurutmuştur. Güneşe açık kurutmada hava sıcaklığı 28-34,8°C ve hızı 0,4-2,9 (m/s)'dir. Kabin tipi kurutucuda hava sıcaklığı 65-85°C ve hızı 1,5-2,5 (m/s)'dir. Vakumlu kurutmada (10 kPa) hava sıcaklığı 65-75°C olup, dondurarak kurutmada ise domatesler önce -40°C'de dondurulmuş sonra da 30°C sıcaklığında havayla kurutulmuştur. Kurutulan domateslerin parlaklığı bakımından en iyi sonucun dondurarak kurutmada alındığı ve kızarıklık açısından en iyi sonucu güneşte kurutmanın verdiği belirtilmiştir [1].

Ekechukwu ve Norton, GEKS'nin, çalışma prensiplerine ve yapısal özelliklerine göre sınıflandırdıkları ayrıntılı bir inceleme yapmışlardır. Güneşin kullanım şekline göre kurutucular; aktif ve pasif olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Bu iki ana grup da kendi içerisinde; direkt, endirekt ve hibrit olmak üzere üç alt gruba ayrılmıştır [2].

Parker, kolektör yutucu levhasının ısı enerjisini akışkana aktarma etkinliğini incelemiş ve havalı kolektörden çevreye ısı kayıplarının matematiksel modelini oluşturmuştur. Önerilen bağıntı, etkili geçirgenliğin ve kolektör ısı performansının hesabını kolaylaştırmıştır. Böylece, tasarımları farklı kolektörlerin performansı karşılaştırılabilmiş ve ortam parametreleri değiştirilerek ayrıntılı ısı incelenmeler yapılabilmiştir [4].

Ergüneş ve Özgöz yaptıkları deneysel çalışmada; önce sera tipi kurutucuda ve daha sonra da açık alanda, fasulye, biber ve soğanın kuruma karakteristiklerini incelemişler. Araştırmacılar fasulye ve biberleri bütün halde, soğanı ise doğranmış halde kurutmuşlardır. Doğranarak boyutları küçültülen sebzelerin bütün haldeki sebzelere göre daha kısa sürede kuruduğu bildirilmiştir [5].

Elustondo ve arkadaşları, farklı ebatlardaki 50-70 (mm) soğanın, değişken hava hızlarında (0,50, 0,75 ve 1.00 m/s), farklı hava sıcaklıklarında (60, 70 ve 80°C) ve farklı bağıl nem şartlarında kurutulmasını incelemişler. Kurutucudaki hava sıcaklığı ve hava akış hızının artmasıyla ve havanın mutlak neminin azalmasıyla, kurutma süresinin kısaldığı gösterilmiştir [6].

Aboul-Enein ve arkadaşları, dolaylı tip güneş enerjili bir kurutucu tasarlamışlar. Güneş ışınlarından olabildiğince fazla yararlanarak, kurutma sürelerinin kısaltması için en uygun kollektör boyutları ve ısı kayıplarının azaltılması için yeterli ısı yalıtım malzemesi kalınlığı belirlenmiştir. Deneysel çalışmanın yapıldığı koşullarda en uygun kollektör boyutlarının $2 \times 3 \text{ m}^2$ ve en uygun yalıtım kalınlığının ise 12 cm olması gerektiği bildirilmiştir [7].

Akpınar ve Biçer, siklon tipi kurutucuda kabağın kurutulmasını araştırmışlardır. Geleneksel kurutuculardan farklı olarak, ürünlerin ısıtılmış hava ile dönel akışlı ortamda buluşması sağlanmıştır. Kurutma havası dönel akışlı kurutucuya alt taraftan verilmiştir. Deneylerde, farklı ebatlardaki ürünlerin kurutma süreleri, 60-70 °C hava sıcaklıkları ve 1 m/s hızda karşılaştırılmıştır. Araştırmada dönel akışla kurutmanın, eksenel akışla kurutmaya göre daha kısa sürede gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Ayrıca daha küçük ebatlı örneklerin, dönel akış ortamında, daha hızlı kuruduğu da görülmüştür [8].

Krokida ve arkadaşları, biber, sarımsak, havuç gibi ürünlerin kurutulmasına, kurutma parametrelerinin etkilerini belirlemeye çalışmışlar. Araştırmacılar, farklı sıcaklıklar, farklı akış hızları ve farklı nem koşullarında kurutma karakteristiklerini incelenmiştir. Kurutmayı en çok etkileyen faktörün kurutma sıcaklığı olduğu, diğer parametrelerin etkisinin daha az olduğu belirtilmiştir [9].

Akpınar kırmızıbiberleri dilimleyerek, kurutmanın enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Çalışmada kurutucu sıcaklığı 55-70 °C arasında olup, hava akış hızı ise 1,5 m/s'dir. Çalışmada termodinamiğin I. kanunu kullanarak, kurutma için enerji analizi, termodinamiğin II. kanunu kullanarak ekserji analizini yapılmıştır [10].

Özler ve arkadaşları, farklı mısır çeşitlerine (at dişi mısır, sert mısır ve şeker mısırı) uygulanan ön işlemlerin, kurutmaya etkisini incelemişler. Mısır örnekleri, kurutma öncesinde, %2 etil oleat, %4 potasyum karbonat, %2 sodyum hidroksit çözeltilerinde, 10 dakika süreyle bekletilmiştir. Kurutma, 49,3°C hava sıcaklığı ve %21,5 bağıl nem şartlarında gerçekleştirilmiştir. Ön işlem uygulanan at dişi mısır ve şeker mısırı örneklerinde, %2 sodyum hidroksit çözeltisinin kurutma hızı üzerinde etkili kimyasal olduğu belirtilmiştir [11].

Wu ve arkadaşları, vakumlu ortamda, patlıcanın kurutma karakteristiğini incelemişler. Çalışmada 45×25×20mm boyutlarında ve dikdörtgen şeklinde dilimlenmiş patlıcanlar, üç farklı vakum basıncında (2.5, 5.0 ve 10 kPa) ve farklı hava sıcaklıklarında (30°C, 40°C ve 50°C) kurutulmuştur. Deneysel sonuçlar; vakum basıncının kurutmaya önemli bir etkisinin olmadığını, hava sıcaklığının ise kurutmaya etkisinin önemli olduğunu göstermiştir. Kurutucuda hava sıcaklığının artmasıyla, kurutma süresinin azaldığı bildirilmiştir [12].

Apaydın, tasarım ve imalatını yaptığı doğal hava akışlı kurutucuda deneyler yapmıştır. Deneyler, Muğla şartlarında, temmuz, ağustos ve eylül aylarında en iyi kurutma karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deneylerde, Muğla yöresinde yetişen incirlerin, istenilen kuruma seviyesine gelme süreleri belirlenmiştir. Çalışmada, kurutulan incirlerin kütleleri 2 saat arayla ölçülerek, su kaybı hesaplanmış ve böylelikle kurutmanın tüm aşamaları ayrıntılı gözlenmiştir [13].

Doymaz ve İsmail, etil oleat alkali emülsiyonuna daldırılmış tatlı kirazların sıcak hava ile kurutulmasını incelemişler. Ön işlem uygulanan kirazların, işlem görmemiş kirazlardan daha kısa sürede kurudukları belirlenmiştir. Araştırmacılar, kurutmanın sonunda ön işlem gören kirazlardan alınan nem miktarının, işlem görmemiş kirazlara göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [14].

Güngör ve Özbalta, sebze ve meyvelerin kurtulmasında yaygın kullanılan; tünel tipi, bantlı konveyörlü, kabinet (kompartıman), akışkan yataklı ve depo tipi kurutucuları

incelemişler. Ele alınan kurutucuların, kullanım alanları ve bazılarının enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, kurutulacak üründen istenilen özelliklere uygun kurutucunun seçimi ve kullanımıyla ilgili önerilerde bulunmuştur [15].

Atalay, GEKS'nin performansını etkileyen faktörleri araştırdığı çalışmada, güneş enerjisinden olabildiğince fazla yararlanabilmek için kurutucu tabanına çakıl taşları yerleştirmiştir. Ayrıca sisteme reküperatör ekleyerek, atık ısıyı %50-60 oranında geri kazanmıştır. Böylelikle sistemde depoladığı atık ısıdan yararlanarak, kurutma süresini kısaltmaya çalışmıştır. Golden tipi sarı ve yeşil elmaların dilimlenerek kurutulduğu deneylerde, kabindeki hava sıcaklığının 55-63°C arasında değiştiği ve kurutma süresinin 6 saat olduğu belirtilmiştir [16].

Elkhadraoui ve arkadaşları, sera tipi kurutucuda kırmızıbiber ve üzüm kurutmuşlardır. Araştırmacıların, kurutucunun performansını ve yatırım maliyetini incelediği çalışmada, kırmızıbiberin 7 saatte, üzümün ise 18 saatte kuruduğu belirtilmiştir. Çalışmada sera tipi kurutucunun ortalama kullanım ömrü, 20 yıl kabul edilmiştir [17].

Çay ve arkadaşları, Türkiye'de tarımın ve kurutulmuş gıdaların ülke ekonomisi için önemini araştırmışlardır. Son yıllarda kurutulmuş gıda tüketiminin ve dolayısıyla da üretimdeki çeşitliliğin arttığı bildirilmiştir. Araştırmacılar ayrıca, ülkemiz için en ideal kurutucu modellerini de değerlendirmiştir [18].

Akman ve arkadaşları, GEKS'nin tasarımını ve imalatını yapmıştır. Kurulan sistemde hava sıcaklığının 45°C'ye kadar çıktığı ve 6 saatlik kurutma süresinde üründen %58 oranında nemin ayrıldığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, kurutucunun verimini araştırmak için kurutucunun sayısal modelini oluşturup, akış analizleri yapmıştır [19].

Çayan, Muğla ili ve çevresi için tasarladığı kabin tipi kurutucuda kırmızıbiberlerin kurutulmasını incelemiştir. Kabin tipi kurutucunun eşdeğer ısı kayıp katsayısı 23,7

[W/m²°C] olarak hesaplanmıştır. Araştırmacı, kırmızıbiberlerin açık havada (doğal kurutma) 8 günde ve yaklaşık aynı dış ortam sıcaklıklarında kabin tipi kurutucuda ise 5 günde kurduğunu bildirmiştir. Çalışmada doğal taşınimli güneş kolektörünün (DTGK) verimi %25-33 olarak hesaplanmış ve kurutulan kırmızıbiberlerde %85-90 ağırlık azalması sağlanmıştır [20].

Mohana ve arkadaşları, güneş enerjili gıda kurutucularıyla ilgili yaptıkları kapsamlı değerlendirmede, güneş enerjili ve endüstriyel kurutucuları, imalat maliyeti, kurutma verimleri ve kurutma amaçlı enerji maliyetleri gibi parametrelerle karşılaştırmışlar [21].

Timurtaş, önerdiği kurutma sisteminde, hem hava sıcaklığını artırmak hem de ısıyı depolayarak güneş enerjisinden daha fazla yararlanmak amacıyla, kolektörün içine bazalt taşı yerleştirmiştir. Ayrıca, kurutma sistemine eklenen reküperatör sayesinde atık ısının bir kısmı da geri kazanılmıştır. Deneylerde, kalınlıkları 3 mm, 5 mm ve 10 mm olan şeftali dilimlerinin kurutma karakteristikleri incelenmiştir. Ölçülen kurutma kabini sıcaklıkları 33-48°C arasında olup, kurutma süreleri 6 ile 8 saat arasındadır. Kurutulan şeftali dilimlerinin son nemlerinin %17'nin altında olduğu ve kabul edilebilir sınırlarda kaldığı belirtilmiştir [22].

Onat, kendisinin imal ettiği güneş enerjili ve ısı depolamalı döner bantlı kurutucuda, hava sıcaklığını arttırmak amacıyla elektrikli ısıtıcı ve güneş enerjisini sisteme yansıtan paneller kullanmıştır. Ayrıca atık ısıyı geri kazanmak amacıyla iki farklı ısı geri kazanım yöntemi uygulamıştır. Bunlardan ilkinde, neme doymuş hava sistemden atılırken ısı depolayıcı malzemelerle teması sağlanarak, mevcut ısının belirli kısmının geri kazanılması hedeflemiştir. İkinci yöntemde ise paralel akışlı bir ısı değiştiricide, dışarı atılan neme doymuş havanın taşıdığı ısı enerjisi sisteme alınan taze havayla geri kazanılmaya çalışılmıştır. Kırmızıbiberlerin çalışmanın yapıldığı Ekim ayında; açık havada 15 günde, önerilen sistemde ise sadece 12 saatte kurduğu belirtilmiştir [23].

Korkutata ve Kavaz, Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yetişen kırmızıbiberlerin boy, ağırlık, tohum sayısı, meyve eti kalınlığı gibi karakteristik özelliklerini kapsamlı incelemişlerdir. Çalışma Şanlıurfa, Diyarbakır, Gaziantep, Kahramanmaraş ve Kilis illerinde yetişen kırmızıbiberleri kapsamaktadır. Çalışmada beş ile ait kırmızıbiberlerin kalite özellikleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır [25].

Scanlin, doğal taşınımlı GEKS'nin tasarımı ve veriminin arttırılmasıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. Doğal taşınımlı GEKS'de, ideal eğim açısının $26,5^{\circ}$ ve kollektör içerisindeki hava akış kanalın derinliğinin, kollektör uzunluğunun $1/20$ 'sine eşit olması gerektiği belirtilmiştir [26].

Tonui ve Tripanagnostopoulos, güneş enerjili kollektör tasarımı ve ısı hesaplarıyla ilgili yaptıkları çalışmada, güneş enerjisinin kollektör içerisinde daha fazla yutulmasına ve verimin arttırılmasına yoğunlaşmıştır. Isı hesaplamalarda, kollektör yan yüzeylerinden ısı kayıpları ihmal edilmiştir [28].

Aktaş ve arkadaşları, güneş enerjili ısı pompalı kurutucuda kırmızıbiber kurutmuşlar. Kurutma sistemi, 24 saat çalışacak şekilde ısı pompasıyla desteklenmiştir. 50°C kurutma havası sıcaklığı ve $0,4 \text{ (m/s)}$ hava hızında kırmızıbiberler 210 dakikada kurutulmuştur. Kırmızıbiberlerin başlangıçta $10,81 \text{ (g su/ g kuru madde)}$ olan nem miktarı, kurutma sonunda $0,16 \text{ (g su/ g kuru madde)}$ olarak ölçülmüştür [33].

Kılıç, farklı tipte üç yutucu levha ile hazırladığı düzlemsel zorlanmış taşınımlı havalı güneş kollektörleri ile tarımsal ürünlerin kurutulmasını deneysel incelemiştir. Çalışmada kullanılan trapez yutucu levhalara, kare ve dikdörtgen profilli kanatlar eklenmiştir. Kurutma deneylerinde, üç farklı hava debisiyle çalışılmış ve Konya bölgesinde yetiştirilen taze fasulyelerin kurutma karakteristikleri incelemiştir [36].

Güngör, sebze ve meyve kurutma amaçlı tasarlanan kurutucuları incelediği çalışmasında, en yaygın kullanılan kurutucu modellerini ele almış ve özel kurutucu tasarımlarını da incelemiştir. Çalışmada bazı sebze ve meyvelerin, maksimum

kurutma sıcaklıkları, ayrılabilir nem oranları ve nihai nem içerikleri gibi özellikleri verilmiştir [38].

Doymaz ve Pala, Kahramanmaraş ve çevresinde yetişen kırmızıbiberlerin farklı ön işlemler uygulanarak ve farklı kurutma koşullarında kurutulmasını deneysel incelemişler. Çalışmada, kırmızıbiberler farklı çözeltilere daldırıldıktan sonra kurutulmuştur. 50°C’de kurutulan kırmızıbiberlerde en iyi sonucu veren çözeltinin, %2 etil oleat ve %5 K^2CO^3 çözeltisi olduğu belirtilmiştir [39].

Yılmaz, brokolinin farklı mikrodalga güçlerinde (90, 180 ve 270 W) kurutulmasını incelemiştir. Brokolinin nem miktarının yüksek olmasından dolayı, direk mikrodalgada kurutulan brokolilerde pışmeler meydana geldiği gözlenmiştir. Bu nedenle brokolilerin nem miktarı önce tepsi kurutucuda azaltılmış, daha sonra mikrodalgada kurutma yapılmıştır. Mikrodalga gücü arttıkça, efektif difüzyon katsayısının da arttığı ve en hızlı kurutmanın 270 W güçte gerçekleştiği belirtilmiştir [40].

Gupta ve arkadaşları, Hindistan’da yıldız meyvesinin güneş altında açık havada, zorlanmış taşınımlı GEKS’de ve doğal taşınımlı GEKS’de kurutulmasını incelemişler. Zorlanmış taşınımlı ve doğal taşınımlı GEKS’de; her birine 0,5 kg yıldız meyvesi konulan dört tepside kurutma yapılmıştır. Aynı miktarda meyve konulan beşinci tepsi ise güneş altında bırakılmıştır. Zorlanmış ve doğal taşınımlı kurutucularda özgül enerji tüketimleri sırasıyla, 0,1787 kg/kW-h ve 0,6657 kg/kW-h hesaplanmıştır. Özgül nem çekme oranı zorlanmış taşınımda 12,37 kW-h/kg ve doğal taşınımda ise 3,57 kW-h/kg’dır [42].

Ramesh ve arkadaşları, öğütülmüş kırmızıbiberin kalitesinin içeriğine göre belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Öğütülmüş kırmızıbiberlerin doğal rengi, parçacık boyutu, karotenoid içeriği ve nem miktarı gibi parametrelerin kırmızıbiberlerin kalitesini arttıracaklarını ifade etmişlerdir. Dolayısıyla ısı stresi ve aşırı kurutma kırmızıbiberin bileşimini etkileyeceğinden, kurutma koşullarının önemi vurgulanmıştır. Çalışmada ürün kalitesinin bozulmaması amacıyla kırmızıbiberler,

saplarından ve çekirdeklerinden ayrılıp, boylamasına doğranmış halde kurutulmuştur. Kırmızıbiberlerin kurutulmasında efektif difüzyon katsayısı, $17,13 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır [44].

Ertekin ve Yıldız, patlıcanları 30 ile 70°C sıcaklıkta ve 0,5 ile 2 m/s hava hızında kurutmuşlardır. Kurutucudaki hava sıcaklığı, hava hızı ve patlıcanların et kalınlıklarının kurutmaya etkileri incelenmiştir. Hava sıcaklığı ve hava hızının artırılmasının, patlıcanlara ön işlem uygulanmasının ve dilim kalınlığının azaltılmasının, kurutma sürelerini etkilediği belirlenmiştir [45].

Scala ve Crapiste, kırmızıbiberlerin dış ortamda kurutulmasını modellemişlerdir. Kurulan matematiksel modelde ürünün nem miktarı, zamanın fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Kırmızıbiberlerin efektif difüzyon katsayısı $5,0 \times 10^{-10}$ ile $8,32 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Önerilen modelin, kurutmayı optimize etmek için kullanılabileceği, ayrıca ürün kalınlığı, ortam sıcaklığı, hava hızı gibi parametrelerin de incelenmesi gerektiği belirtilmiştir [46].

Kumar ve arkadaşları, Hindistan'da açık havada kurutulan kırmızıbiberleri sera tipi kurutucuda kurutarak, kurutma yöntemlerini, kurutma süreleri ve kurutma verimini gibi parametrelerle incelemiş ve karşılaştırmışlar. Kırmızıbiberler açık havada 124 saatte kururken, sera tipi kurutucuda 250 kg kırmızıbiber, 55 saate kurtulmuştur. Böylece kurutma süresinden %56 tasarruf sağlanmıştır. Kırmızıbiberlerin nem oranı ise %80'den %10'a kadar indirilmiştir. Kurutmada özgül enerji tüketimi 6,06 kW-h/kg olup, sera tipi kurutucunun ısı verimi %16,25'dir [47].

Mugi ve Chandramohan, yeşilbiberleri zorlanmış ve doğal taşınımlı GEKS'de kurutarak, iki yöntemi enerji ve ekserji analizleri ile karşılaştırmışlar. Zorlanmış taşınımlı GEKS'de hava hızını kontrol etmek amacıyla kollektör girişine fanlar yerleştirmiş ve fanları beslemek için de güneş panelleri kullanmıştır. Özgül nem çekme oranı (SMER); zorlanmış taşınımda 0,6526 kg/kW-h ve doğal taşınımda ise 0,5603 kg/kW-h olarak hesaplanmıştır [48].

Fudholi ve arkadaşları, Malezya’da yetiştirilen kırmızıbiberlerin kurutulmasında kullanılan kurutma sistemlerinin performansını incelemişler. Zorlanmış taşınımlı GEKS’de 33 saatlik kurutma sonunda, kırmızıbiberlerin nem içeriği %80’den %10’a düşmüştür. Zorlanmış taşınımlı GEKS, güneşe açık kurutmaya göre kurutma süresini 65 saat (%46 daha kısa) kısaltmıştır [49].



BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kırmızıbiber (*Capsicum Annuum*)

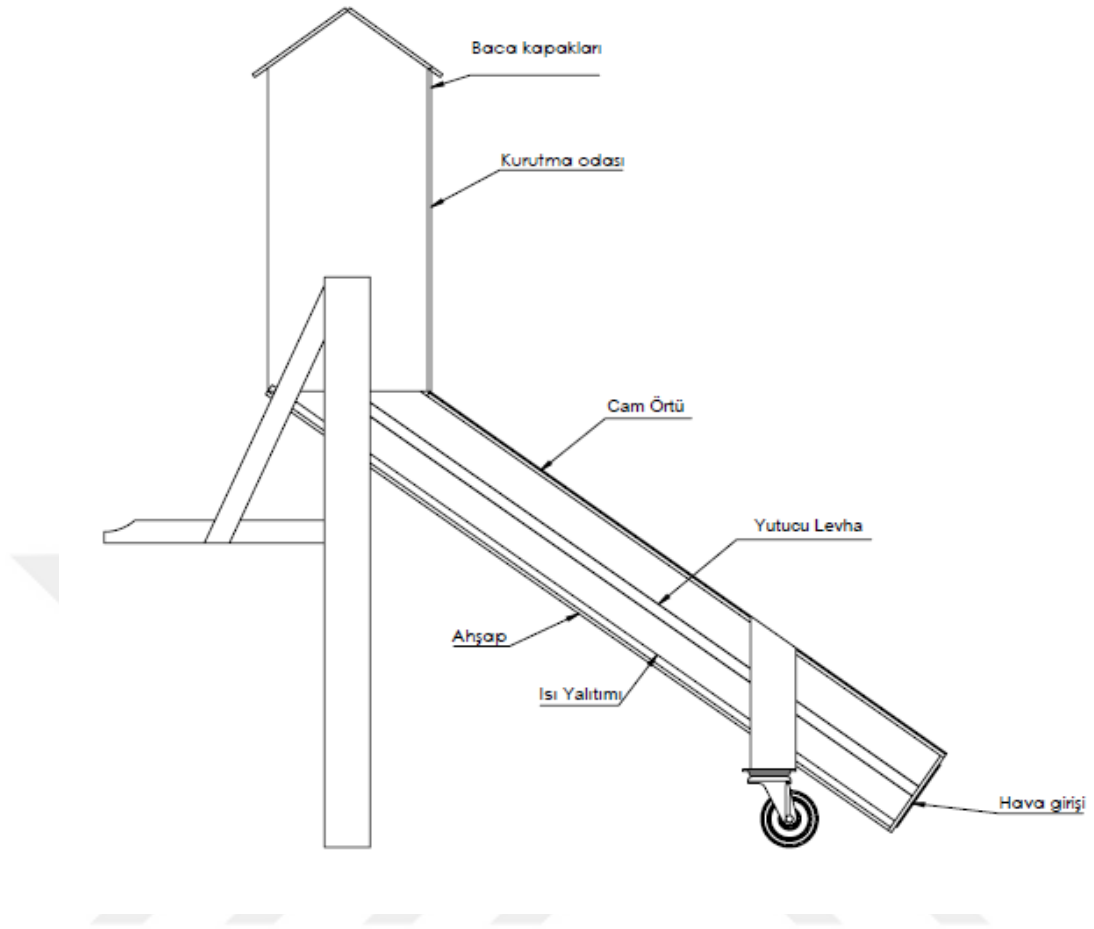
Biber, vitamin ve mineral açısından oldukça zengin bir sebzedir. Kırmızıbiber, patlıcangiller (*Solanaceae*) familyasının, *Capsicum* cinsine bağlıdır ve sıcak-ılık iklim şartlarında senelik yetiştirilir. Farklı tat özellikleri ve kolay yetişebilmesinden dolayı, diğer sebzelere göre üretimi dünyada daha geniş alana yayılmıştır.

Kırmızıbiber, ülkemizde de yaygın üretilen sebzelerdendir ve farklı şekillerde; olgunlaştırılmış, taze veya işlenmiş olarak tüketilir. Kırmızıbiberler, olgunlaştırılmış, taze veya işlenmiş olarak tüketilir. 2020 yılı verilerine göre ülkemizde yıllık kırmızıbiber üretimi 256.735 (ton)'dur. Bu üretimin de yaklaşık %40'ı (102,880 ton) Şanlıurfa'da gerçekleştirilmiştir [24].

Şanlıurfa ilinde yetiştirilen kırmızıbiberlerin fiziksel özellikleri incelendiğinde; boylarının 77,6-148,6 mm, ağırlıklarının 32,5-71,5 gram ve et kalınlıklarının 0,98-2,81 mm aralığında olduğu tespit edilmiştir [25].

3.2. Güneş Enerjili Kurutma Sistemi

GEKS iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; havanın ısıtıldığı DTGK ve üzerinde baca delikleri bulunan kurutma odasıdır. GEKS'nin şematik görünümü Şekil 3.1.'de verilmiştir.



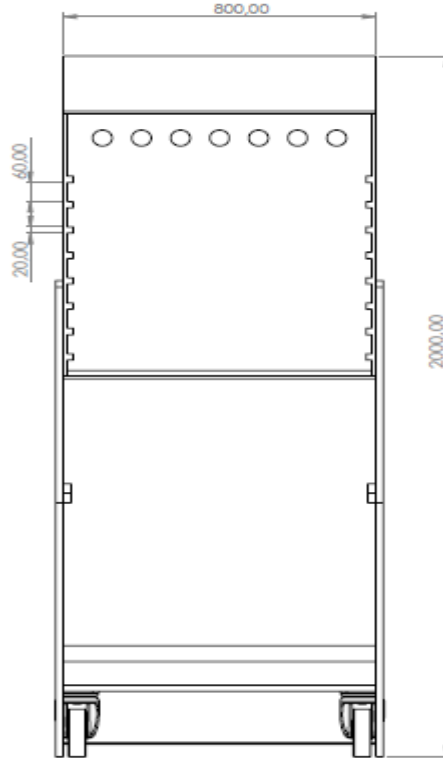
Şekil 3.1. Güneş enerjili kurutma sisteminin bileşenleri.

GEKS'nin çalışma prensibi; DTGK üzerine gelen güneş ışınları, yutucu levhada ısı enerjisine dönüşür. DTGK'nın alt kısmından giren hava, yutucu levhanın alt ve üst yüzeylerine temas ederek (akarken) ısınır. DTGK içerisinde sıcaklığı artan hava, oluşan doğal akışın etkisiyle kurutma odasına hareket eder. Kurutma odasına ulaşan sıcak hava, tel örgü tepsilerin üzerindeki ürünleri ısıtırken, nem havaya geçer ve kuruma gerçekleşir.

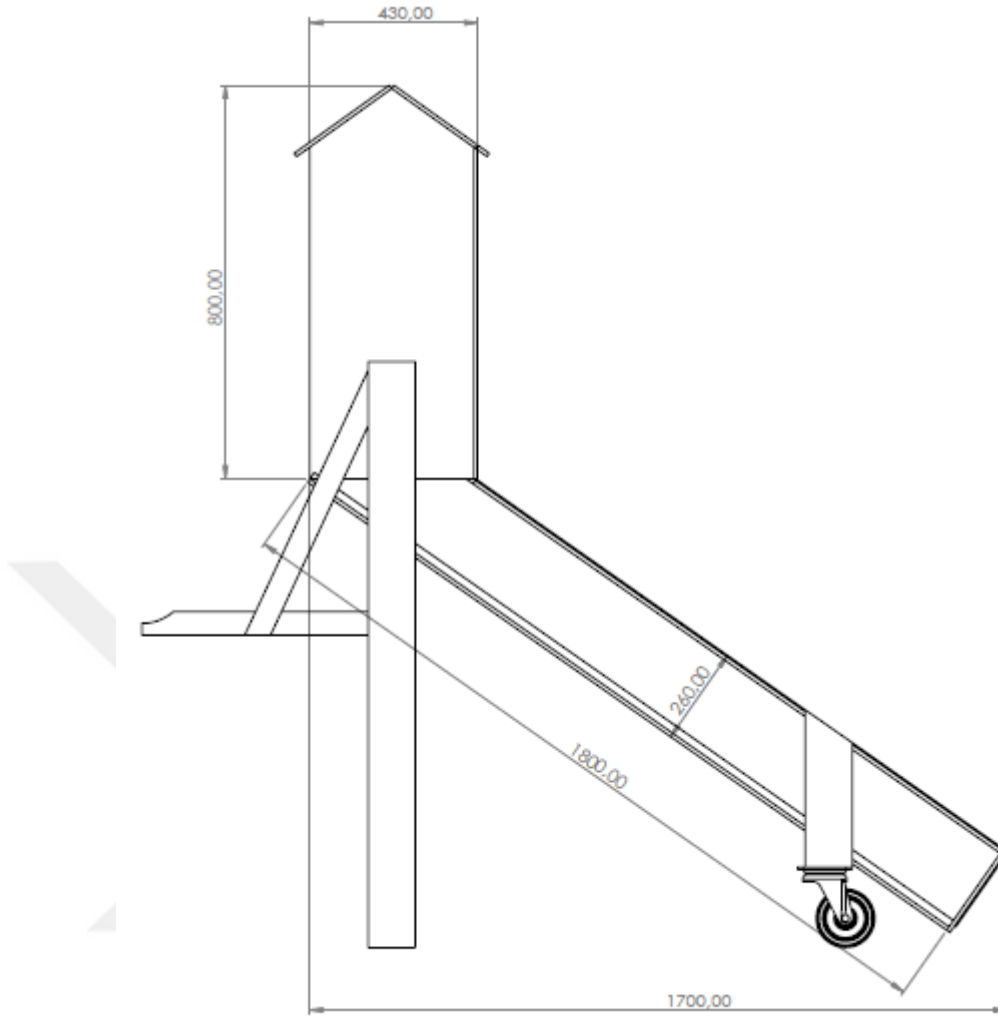
3.2.1. Güneş enerjili kurutma sisteminin tasarımı

GEKS'nin boyutlarının belirlenmesinde, Dennis Scanlin'in 1997 yılında yaptığı çalışmadan yararlanılmıştır [26]. GEKS'nin tasarım çizimleri Solidworks programında yapılmıştır. GEKS'nin imalatı, tasarıma uygun bir şekilde yerel

imkanlarla yapılmıştır. Tasarımın ön görünüşü Şekil 3.2.'de, yan görünüşü Şekil 3.3.'te ve genel görünüşü Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Güneş enerjili kurutma sisteminin şematik ön görünüşü.



Şekil 3.3. Güneş enerjili kurutma sisteminin şematik yan görünüşü.



Şekil 3.4. Güneş enerjili kurutma sisteminin genel görünüşü.

3.2.2. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminde Kullanılan Malzemeler

GEKS'nin imalatında kontrplak (plywood), tek tabaka saydam cam örtü, alüminyum panel yutucu levha ve ısı yalıtımı (cam yünü) kullanılmıştır.

3.2.2.1. Ahşap

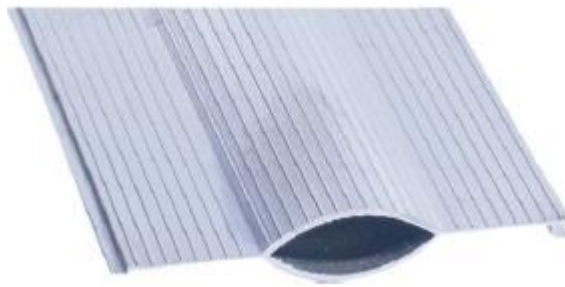
GEKS'nin ana gövdesi, kontrplaktan üretilmiştir. Kontrplak, diğer ahşap malzemelere göre doğal iklim şartlarına daha dayanıklıdır, endüstride ve inşaat sektöründe kullanımı oldukça yaygındır.



Şekil 3.5. Kontrplak (Plywood) ahşap malzeme.

3.2.2.2. Alüminyum panel

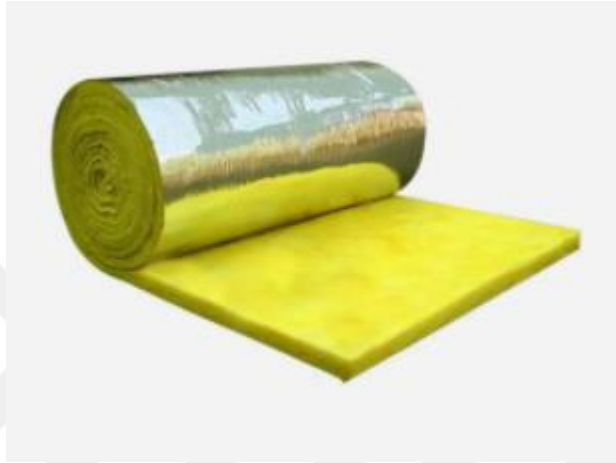
DTGK’de yutucu levha olarak alüminyum panel kullanılmıştır. Alüminyum panel siyah renge boyanarak, güneş ışınlarının daha fazla yutulması ve güneşten olabildiğince fazla yararlanılması hedeflenmiştir. Alüminyum panelin kalınlığı 1,5 mm olup, kolektörün uzun kenarı boyunca bütün halde kullanılmıştır. Yutucu levha, hava akışını engellemeyecek şekilde ve hava akışına paralel konumlandırılmıştır.



Şekil 3.6. Alüminyum panel.

3.2.2.3. Isı yalıtımı

GEKS’de ısı kayıplarını olabildiğince azaltmak amacıyla DTGK ve kurutma odasının iç kısımları 20 mm kalınlığında cam yünü ile kaplanmıştır. Cam yünü levhalar ölçülere uygun olarak kesilip, ahşap gövdeye sabitlenmiştir. Cam yünü yalıtımının ek kısımlarında, alüminyum folyo bant ile sızdırmazlık sağlanmıştır.



Şekil 3.7. Cam yünü ısı yalıtımı.

3.2.2.4. Saydam cam örtü

GEKS’de DTGK’nın üst kısmında, 4 mm kalınlığında tek tabaka cam örtü kullanılmıştır. Kullanılan camın ışık geçirgenliği normal pencere camına göre daha yüksek ve yansıtma oranı daha düşüktür. Cam örtünün darbe dayanımı da normal camlara göre daha yüksektir.

3.2.2.5. Dijital termometre

Sıcaklık ölçmelerinde kullanılan, AEC-TECH marka dijital termometrenin ölçüm aralığı -50°C ila 110°C , doğruluğu $\pm 1^{\circ}\text{C}$, çözünürlüğü $0,1^{\circ}\text{C}$ ’dir ve 1 metre uzunlukta kablolu ölçme ucu mevcuttur. Dijital termometre; kurutma odasının, DTGK’dan çıkan havanın ve dış ortam havasının sıcaklıklarının ölçülmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Dijital termometre.

3.2.2.6. Lazer sıcaklık ölçüm cihazı

Cam örtünün ve DTGK'nın alt (dış) yüzeyinin sıcaklıklarının ölçülmesinde, MASTECH BM380 marka kızıl ötesi lazer sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmıştır. Lazer sıcaklık ölçüm cihazının ölçüm aralığı -32°C ila 550°C olup, ölçüm doğruluğu $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, ölçüm tekrar edilebilirliği $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ ve çözünürlüğü $0,1^{\circ}\text{C}$ 'dir.



Şekil 3.9. Lazer sıcaklık ölçüm cihazı.

3.2.2.7. Dijital hassas terazi

Kurutulan ürünlerin tartılmasında, GOMAX marka LCD ekranlı hassas dijital terazi kullanılmıştır. Terazinin maksimum tartma kapasitesi 10 kg olup, ölçüm hassasiyeti 0,5 g'dır.



Şekil 3.10. Dijital hassas terazi.

3.2.2.8. Anemometre

DTGK giriş kesitindeki hava hızı ölçümlerinde, CEM 8880-DT marka dijital anemometre kullanılmıştır. Anemometrenin hava hızı ölçüm aralığı 0,1-25 m/s olup, düşük hızlarda ölçüm doğruluğu $\pm\%5$ ve ölçüm hassasiyeti 0,01 m/s'dir. Sıcaklık ölçüm aralığı 0-50°C'dir.



Şekil 3.11. Anemometre

3.2.3. Güneş enerjili kurutma sisteminin imalatı

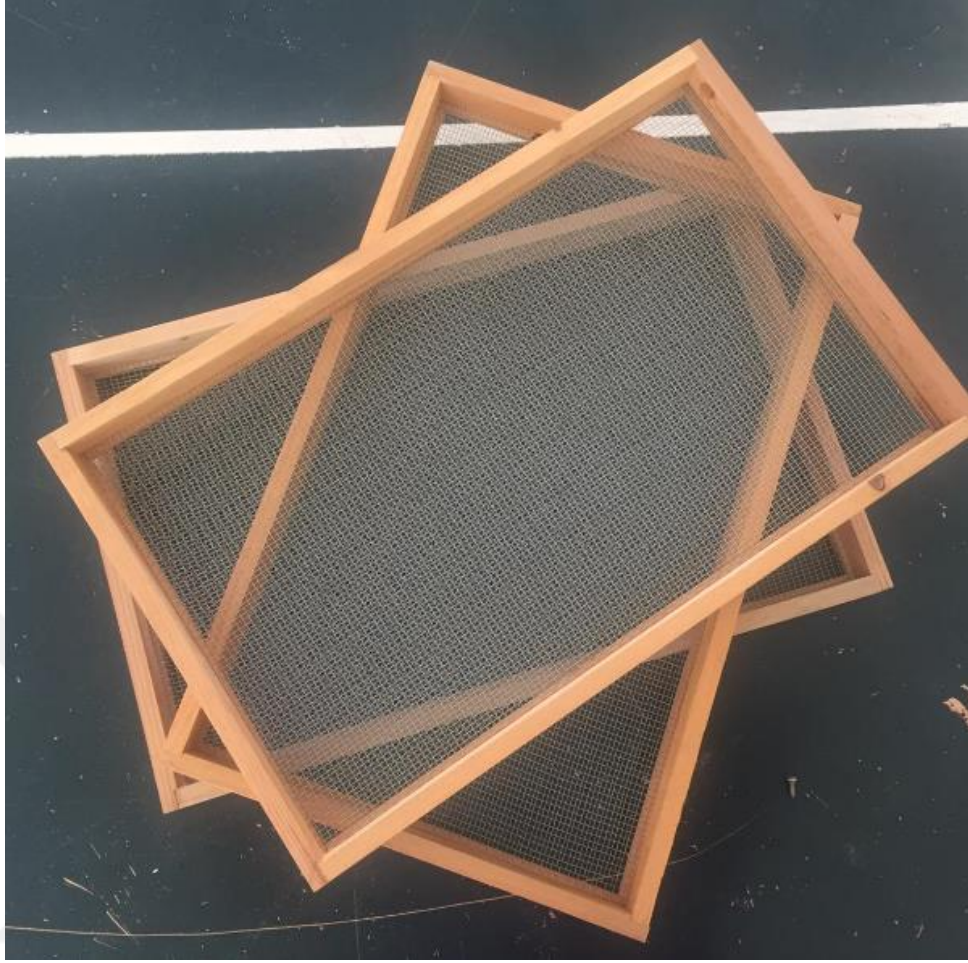
Tasarımı yapılan GEKS'nin imalatında, 1250×2500 mm ebatlarında bir tabaka kontrplak kullanılmıştır. GEKS'nin yan yüzeyleri tek parça olup, ön ve alt kısımlar yan yüzeylerle birleştirilmiştir. DTGK'nın ölçüleri 1800×800×260 mm'dir (Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'te gösterilmiştir).

DTGK'nın üst kısmına, 4 mm kalınlığında, tek tabaka saydam cam örtü yerleştirilmiştir. DTGK'nın, yan ve alt kısımları tek parça kontrplaktan üretilmiştir. DTGK'nın yan ve alt yüzeyleri, ısı kayıplarını azaltmak amacıyla iç taraftan, 20 mm kalınlığında cam yünü levhalarla kaplanmıştır. DTGK verimini artırmak için siyah renge boyanan alüminyum yutucu levha, kollektör akış kanalının tam ortasına yerleştirilmiştir. Alüminyum yutucu levha, hava akışını engellemeyecek şekilde, (üzerindeki oluklar) hava akışına paralel yerleştirilmiştir.

Kurutma odası ölçüleri 800×800×430 mm'dir. Kurutma odasının tüm iç yüzeyleri de 20 mm kalınlığında cam yünü ısı yalıtım levhaları ile kaplanmıştır. Kurutulacak ürünler, 550×350 mm ölçülerinde, ahşap çerçeveli çelik tel örgülü kurutma tepsilerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.13.). Kurutma odasının ön ve arka yüzeylerinin üst kısımlarına, çapları 80 mm olan beşer adet hava çıkış deliği açılmıştır. DTGK'den gelen ve ürünlerin nemini alan sıcak hava, kurutma odasını bu deliklerden terk etmektedir. Şekil 3.12.'de imalatı tamamlanmış GEKS görülmektedir.



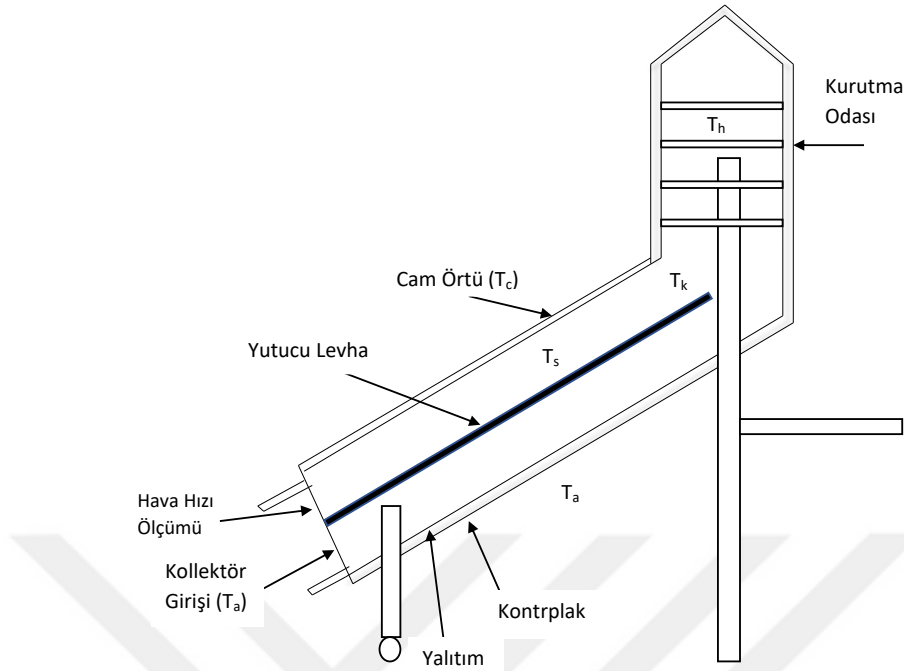
Şekil 3.12. Güneş enerjili kurutma sistemi.



Şekil 3.13. Kurutma tepsileri.

3.2.4. Güneş enerjili kurutma sisteminde deneysel ölçümler

Deneysel çalışmanın yapıldığı günlere ait saatlik güneş ışıyım akısı (I) verileri, Şanlıurfa Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'ne bağlı Bozova ölçüm istasyonunda, EPLAB 8-48 model piranometreyle ölçülmüştür. Deneylerde yutucu levha sıcaklığı, yutucu levhanın orta kısmından ölçülmüştür. Kollektöre giren kurutma havasının hızı, CEM 8880-DT model anemometre ile kollektör giriş kesitinden ölçülmüştür. Kurutma odasının sıcaklığı, kurutma odasının orta kısmından ölçülmüştür. Şekil 3.14.'de GEKS üzerindeki ölçümler şematik gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Güneş enerjili kurutma sisteminde sıcaklık ölçümlerinin şematik gösterimi.

3.2.5. Güneş enerjili kurutma sisteminin ısı hesabı

GEKS'nin (DTGK) ısı hesaplarında, Duffie ve Beckman'ın önerdikleri yöntem kullanılmıştır [27]. DTGK'de yutucu levhadan havaya aktarılan faydalı ısı gücün ($\dot{Q}_U$) hesabında Denklem 3.1 kullanılır:

$$\dot{Q}_U = A_C [I_T - U_L (T_s - T_a)] \text{ (W)} \quad (3.1)$$

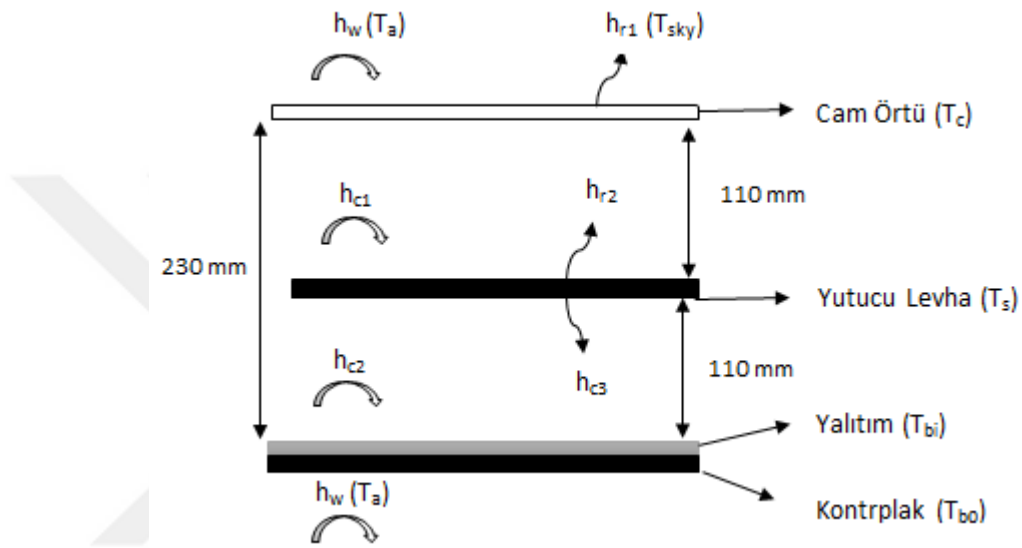
$A_C I_T$ = Yutucu levhaya gelen ısı gücü

$A_C U_L (T_s - T_a)$ = Kayıp ısı gücü

Burada A_C ; yutucu levhanın alanını (m^2), I_T ; eğik yüzeye gelen toplam güneş ışıınım akısını (W/m^2), U_L ; kollektörden ısı kayıpları için toplam ısı geçiş katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), T_s ; yutucu levha sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_a ; çevre sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) ifade

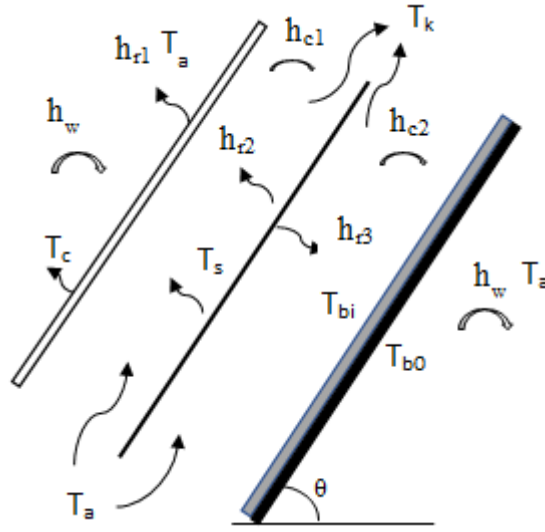
etmektedir. Şekil 3.14.'de GEKS üzerindeki sıcaklık ölçümleri şematik gösterilmiştir.

GEKS'de DTGK'nın en-kesiti Şekil 3.15.'de verilmiştir. Şekilden de anlaşılaçağı üzere, akış kanalının tam ortasına yerleştirilen yutucu levhanın altında ve üstünde doğal hava akışı vardır.



Şekil 3.15. Doğal taşınımlı güneş kolektörünün en-kesit resmi.

GEKS'de DTGK'nın boyuna en-kesiti Şekil 3.16.'da verilmiştir.



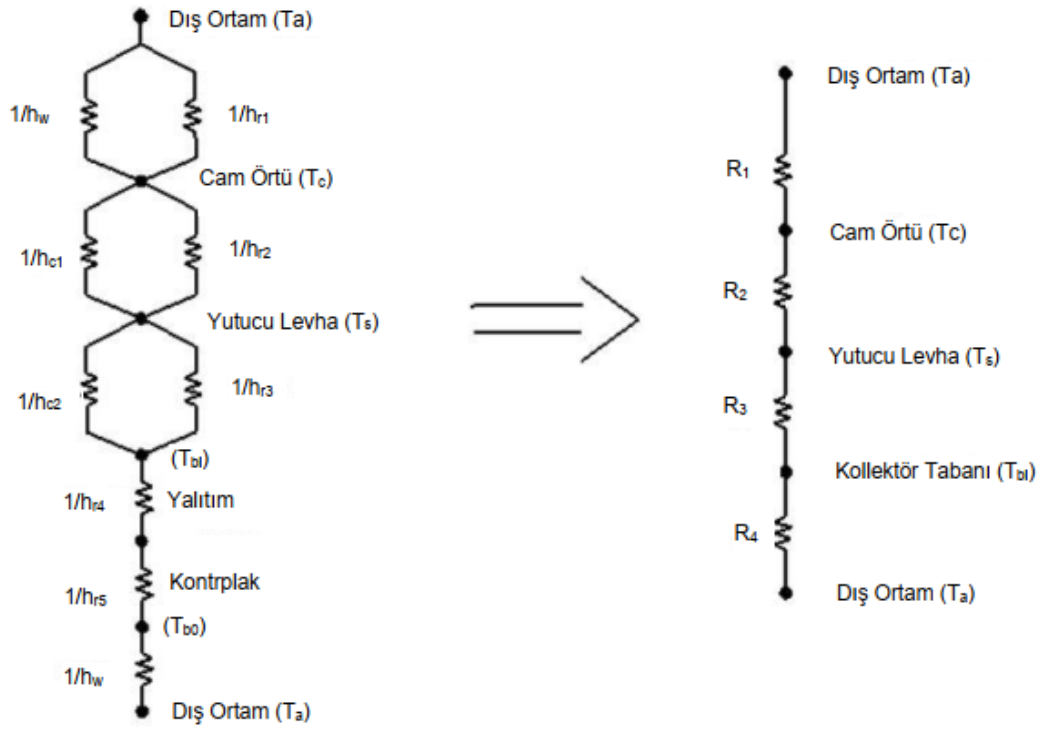
Şekil 3.16. Doğal taşınımlı güneş kolektörünün boyuna en-ketit görünüşü.

DTGK'den çevreye olan ısı kayıplarını belirleyebilmek için üst, alt ve yan yüzeylerden ısı kayıplarının ayrı ayrı hesaplanması gerekir. DTGK'nın yan yüzeylerden ısı kayıpları ihmal edilmiştir [28]. DTGK'nın farklı yüzeylerinden ısı kayıplarını hesaplamak için Denklem 3.2'de toplam ısı geçiş katsayıları verilmiştir.

$$U_L = U_t + U_b \text{ (W/m}^2\text{K)} \quad (3.2)$$

U_b ; kolektörün alt yüzeyinden ısı kayıpları için toplam ısı geçiş katsayısı (W/m²K),
 U_t ; kolektörün üst yüzeyinden ısı kayıpları için toplam ısı geçiş katsayısıdır (W/m²K).

DTGK'nın ısı direnç devre şeması Şekil 3.17.'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Doğal taşınımlı güneş kolektörünün ısı direnç devre şeması.

DTGK'nın üst yüzeyinden ısı kayıplarını belirleyebilmek için Denklem 3.3 kullanılır.

$$U_t = 1/(R_1 + R_2) \quad (3.3)$$

DTGK'nın alt yüzeyinden ısı kayıplarını belirleyebilmek için Denklem 3.4 kullanılır.

$$U_b = 1/(R_3 + R_4) \quad (3.4)$$

Burada R_1 ve R_2 yutucu levhanın üst tarafından ısı geçişi için ısı dirençleri, R_3 ve R_4 yutucu levhanın alt tarafından ısı geçişi için ısı dirençleri göstermektedir. Denklem (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)'i kullanılarak ısı dirençler ayrı ayrı hesaplanır.

$$R_1 = 1/(h_w + h_{r1}) \quad (3.5)$$

$$R_2 = 1/(h_{c1} + h_{r2}) \quad (3.6)$$

$$R_3 = 1/(h_{c2} + h_{r3}) \quad (3.7)$$

$$R_4 = 1/h_{r4} + 1/h_{r5} + 1/h_w \quad (3.8)$$

Denklemlerde kullanılan;

h_w ; kollektörün dış yüzeylerinde (rüzgâr etkisiyle) ısı taşınım katsayısı (W/m^2K),

h_{r1} ; cam örtü ile gökyüzü arasında ışınlı ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısını (W/m^2K),

h_{r2} ; yutucu levha ile cam örtü arasında ışınlı ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısını (W/m^2K),

h_{c1} ; yutucu levhanın üstündeki akış kanalında ısı taşınım katsayısı (W/m^2K),

h_{c2} ; yutucu levhanın altındaki akış kanalında ısı taşınım katsayısı (W/m^2K),

h_{r3} ; yutucu levha ile alt duvar arasında ışınlı ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısını (W/m^2K),

h_{r4} ; kollektör alt duvarındaki yalıtımdan iletimle ısı geçişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (W/m^2K),

h_{r5} ; kollektör alt duvarındaki kontrplaktan iletimle ısı geçişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (W/m^2K) belirtmektedir.

Denklem (3.5)'teki R_1 ısıl direncini hesaplamak için gerekli h_w ve h_{r1} ısı taşınım katsayılarının hesabında, Denklem (3.9) ve (3.10) ile Denklem (3.12) kullanılmıştır.

DTGK'nın dış yüzeyinde rüzgarın etkisiyle oluşan ısı taşınım katsayısını, gerçek koşullarda belirlemek oldukça zordur. McAdams 1954 yılında, rüzgar hızının belirli bir değerin altında veya üstünde olmasına göre ısı taşınım katsayısının hesabı için iki farklı eşitlik önermiştir [29].

$$h_w = 5,7 + 3,8V \quad (V < 5 \text{ m/s}) \quad (3.9)$$

$$h_w = 6,47V^{0,78} \quad (V < 5 \text{ m/s}) \quad (3.10)$$

Deneylerin yapıldığı ortamdaki ortalama rüzgar hızları, Şanlıurfa Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden alınmıştır.



Şekil 3.18. Türkiye’de yıllık ortalama rüzgar hızı ve hakim yönü dağılımı.

Meteoroloji istasyonlarında rüzgar hızı yerden yaklaşık 11 m yükseklikte ölçülmektedir. Gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi amacıyla, DTGK’nın ortalama yüksekliğindeki (1m) rüzgar hızı, rüzgar kesme gücü yasası (Denklem 3.11) ile hesaplanmıştır [30].

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de v ; istenilen yükseklikteki rüzgar hızı (m/s), v_0 ; ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızı (m/s), h ; rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik (m), h_0 ; bilinen rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik (m) ve α ; rüzgar kesme gücü yasası üssüdür. Çalışmada rüzgar kesme gücü yasası üssünün değeri, deneysel çalışmanın yapıldığı bölgenin yapısına (çalışmanın yapıldığı alan yerleşim yerlerinden uzakta) uygun olarak 0,3 alınmıştır [31].

Deneyler sırasında ortalama rüzgar hızları 5 m/s'den küçük kaldığından, h_w ısı taşınım katsayısının hesabında, Denklem 3.9 kullanılmıştır.

$$h_w = 5,7 + 3,8V$$

Eşitliklerde V , m/s biriminde rüzgar hızıdır.

Cam örtü ile gökyüzü arasında ışınlama ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı h_{r1} :

$$h_{r1} = 6 \epsilon_c (T_c^4 - T_{sky}^4) / (T_c - T_a) \quad (3.12)$$

σ = Stefan Boltzman sabitini ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ϵ_c ; camın ısı ışınlama yayma katsayısını (0,88), T_{sky} ; gökyüzü sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$, K), T_c ; cam örtünün sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$, K), T_a ; dış ortam hava sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$, K) göstermektedir.

Gökyüzü sıcaklığını belirleyebilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır [27].

$$T_{sky} = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (3.13)$$

Denklem 3.6'da R_2 ısı direncini hesaplamak için gereken h_{c1} ve h_{r2} ısı taşınım katsayıları Denklem 3.14 ve Denklem 3.17 ile hesaplanmıştır.

$$h_{c1} = Nu \frac{k}{L} \quad (3.14)$$

Denklemden Nu ; Nusselt sayısını, k ; doğal taşınım ile ısıtarak DTGK'de akan havanın ortalama sıcaklığındaki (T_m) ısı iletim katsayısını (W/mK), L ; yutucu levha ile cam örtü arasındaki mesafeyi (m) belirtmektedir.

Hollands, yaptığı deneysel çalışmada, $\theta = 0-75^{\circ}$ arasındaki eğimli kanallarda, doğal taşınım ile ısı geçişinde Nusselt sayısını hesaplamak için aşağıdaki eşitliği önermiştir [32].

$$N_u = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right]^+ \left(1 - \frac{1708(\sin \theta)^{1,6}}{Ra \cos \theta} \right) + \left[\left(\frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (3.15)$$

Denklemde parantez üzerindeki (+) işareti; parantez içerisindeki değerin pozitif olması durumunda hesaplama alınacağını, parantez içindeki değerin negatif olması halinde ise parantez içerisindeki sıfır kabul edileceğini belirtmektedir.

Denklemde Ra; Rayleigh sayısını, θ ; kolektörün yatay düzlem ile yaptığı açığı ($^\circ$) belirtmektedir. Rayleigh sayısını belirlemek için Denklem 3.16 kullanılır.

$$Ra = \frac{g \beta^1 \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (3.16)$$

Denklemde g; yerçekimi ivmesini (m^2/s), β^1 ; kolektörde akan havanın ısı genleşme katsayısını $\beta^1=1/T_m$ (K^{-1}), T_m ; kolektörde ortalama hava sıcaklığını $T_m=(T_k+T_s)/2$ (K), ΔT ; yutucu levha sıcaklığı ile cam örtü sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkını $\Delta T=T_s-T_c$ (K), L; yutucu levha ile cam örtü arasındaki mesafeyi yani üst akış kanalının yüksekliğini (m), ν ; kinematik viskoziteyi (m^2/s), α ; ısı yayılım (difüzyon) katsayısını ($\alpha=k/\rho c_p$) (m^2/s), belirtmektedir.

Yutucu levha ile cam örtü arasında ışınlama ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı (h_{r2}):

$$h_{r2} = 6(T_s^2 + T_c^2)(T_s + T_c)/(\epsilon_p^{-1} + \epsilon_c^{-1} - 1) \quad (3.17)$$

Denklemde ϵ_p ; yutucu levhanın ısı ışınlama yayma katsayısını (0,95) belirtmektedir.

Denklem (3.7)'de ki R_3 ısı direncini hesaplamak için gerekli h_{c2} ve h_{r3} ısı taşınım katsayıları, Denklem 3.18 ve Denklem 3.19 ile hesaplanır.

$$h_{c2} = N_u \frac{k}{L_m} \quad (3.18)$$

Denklemden k ; doğal taşınım ile ısıtarak DTGK'de akan havanın ortalama sıcaklığındaki (T_m) ısı iletim katsayısını (W/mK), L_m ; yutucu levha ile kollektör tabanı arasındaki mesafeyi (m) belirtmektedir. Yutucu levha, DTGK'de hava akış kanalının tam ortasına konumlandırıldığından ($L=L_m$) ve alüminyum yutucu levhanın üst ve alt yüzeyleri arasında önemli bir sıcaklık farkı olmadığından, h_{c1} ile h_{c2} birbirine eşit kabul edilmiştir.

$$h_{r3} = 6(T_s^2 + T_{bi}^2)(T_s + T_b)/(\epsilon_p^{-1} + \epsilon_c^{-1} - 1) \quad (3.19)$$

Denklemden kullanılan T_{bi} ; kollektör tabanındaki izolasyon malzemesinin iç yüzey sıcaklığını (K) belirtmektedir. Denklem (3.8)'deki R_4 ısı direncini hesaplamak için gerekli h_{r4} ve h_{r5} eşdeğer ısı taşınım katsayıları aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

$$h_{r4} = \frac{k_i}{L_i} \quad (3.20)$$

k_i ; cam yünü ısı yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısını ($0,043 W/mK$), L_i ; yalıtım malzemesinin kalınlığını ($0,02 m$) belirtmektedir.

$$h_{r5} = \frac{k_b}{L_b} \quad (3.21)$$

k_b ; kontrplağın ısı iletim katsayısını ($0,139 W/mK$), L_b ; kontrplağın kalınlığını ($0,02 m$) belirtmektedir.

3.2.5.1. Eğik yüzeye gelen güneş ışıması

Güneş enerjili sistemlerde güneş ışınlarından daha yüksek oranda yararlanabilmek için genellikle eğimli (güneş ışınlarına dik) yüzeyli toplayıcılar kullanılır. Eğimli bir yüzeye gelen anlık ve günlük güneş ışımasını hesaplamak için yatay yüzeye gelen anlık ve günlük toplam güneş ışıması ile direkt ve yayılı güneş ışımasını da hesaplamak gerekmektedir [33].

Çalışmanın yapıldığı zaman dilimlerinde yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınımı Şanlıurfa Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden alınmıştır. Deneysel çalışma, kuzey enlemi $\varphi=37,45^\circ$ olan Siverek ilçesinde gerçekleştirilmiştir.

Belirli zaman diliminde (saat aralığı), atmosfer dışında yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımı, Denklem 3.22 ile hesaplanır.

$$I_o = \frac{12 \times 3600 \times G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right] \left[\cos(\varphi) \cos(\theta) (\sin(w_2) - \sin(w_1)) + \left(\frac{2\pi(w_2 - w_1)}{360} \times \sin(\varphi) \sin(\theta) \right) \right] \quad (3.22)$$

Denklemde güneş sabiti G_{sc} : atmosfer dışında (bir metrekare alana bir saniyede) dik gelen güneş ışınım akısını, $1367 \text{ (W/m}^2\text{)}$, n : 1 Ocaktan itibaren yılın gün sayısını, φ : enlem açısını, θ : deklinasyon açısı, w_1 ve w_2 : saat açılarını ifade etmektedir.

Denklinasyon açısı $-23,45^\circ \leq \theta \leq 23,45^\circ$ aralığında değişmektedir. Denklinasyon açısı (θ) Denklem 3.23 ile hesaplanır.

$$\theta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (3.23)$$

Saat açısını (w) hesaplayabilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$w = 15(GS - 12) \quad (3.24)$$

Denklemde GS ; güneş saatini temsil etmektedir. Anlık berraklık indeksi k_t ; yatay yüzeye gelen anlık ışınımın (I), atmosfer dışında birim yatay düzleme gelen anlık toplam ışınımına (I_o) oranıdır. Yatay yüzeye gelen anlık güneş ışınım akısı I , piranometrelerle ölçülen güneş ışınımıdır.

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (3.25)$$

Yatay düzleme gelen anlık yayılı güneş ışıınının (I_d) hesaplanmasında kaynak [33]'de verilen bağıntılardan yararlanılır.

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,249k_t & k_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84k_t & 0,35 < k_t < 0,75 \\ 0,177 & 0,75 < k_t \end{cases} \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)'de verilen eşitlikler Kanada'da bulunan bir istasyonda yapılan çalışmalarda elde edilmiştir. 1984-1992 yılları arasında Gebze'de yapılan ölçümler kullanılarak da Denklem 3.27 elde edilmiştir [33].

$$\frac{I_d}{I} = \{0,788 - 0,802k_t \quad 0,265 < k_t < 0,6 \quad (3.27)$$

Yatay yüzeye gelen direkt güneş ışıının akısı I_b , aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$I_b = I - I_d \quad (3.28)$$

Geometrik faktör (R_b), eğik yüzeye gelen direkt ışıının akısının (I_{bt}), yatay yüzeye gelen direkt ışıının akısına (I_b) oranıdır (Denklem 3.29 ve Denklem 3.30).

$$R_b = \frac{I_{bt}}{I_b} \quad (3.29)$$

$$R_b = \frac{\cos(\theta - \beta) \cos(\theta) \cos(w) + \sin(\theta - \beta) \sin(\theta)}{\cos(\theta) \cos(\theta) \cos(w) + \sin(\theta) \sin(\theta)} \quad (3.30)$$

Eğik yüzeye gelen yayılı güneş ışıının akısı (I_{dt}) aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$I_{dt} = I_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (3.31)$$

Eğik yüzeye çevreden yansıyarak gelen güneş ışıının akısı (I_{ref}) Denklem 3.32 ile hesaplanır.

$$I_{ref} = I_p \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (3.32)$$

Denklemde ρ ; çevrenin yansıtma oranını ifade etmektedir. Yansıtma oranının değeri; çevrede kar olması durumunda 0,7, kar olmaması durumunda ise çevrenin topografik durumuna ve bitki örtüsüne bağlı olarak 0,2 alınabilir [33].

Eğik yüzeye gelen toplam güneş ışıınım akısı (I_T); eğik yüzeye gelen direkt güneş ışıınım akısı (I_{bt}), eğik yüzeye gelen yayılı güneş ışıınım akısı (I_{dt}) ve eğik yüzeye çevreden yansıyarak gelen güneş ışıınım akısının (I_{ref}) toplamıdır.

$$I_T = I_{bt} + I_{dt} + I_{ref} \quad (3.33)$$

3.2.5.2. Kollektöre giren ısı güç

Kollektöre giren ısı güç Q_g , eğik yüzeye gelen anlık toplam güneş ışıınımına (I_T) bağlı olarak Denklem 3.34 ile hesaplanır.

$$Q_g = I_T (Ta) A_c \quad (3.34)$$

Denklemde kullanılan;

I_T : Eğik yüzeye gelen toplam güneş ışıınım akısı (MJ/m^2h),

Ta : Cam örtü ve yutucu levhanın düzeltilmiş yutma-geçirme çarpanı (-),

A_c : Yutucu levhanın alanıdır (m^2)

Cam örtü ve yutucu levhanın düzeltilmiş yutma geçirme çarpanı 0,80 alınmıştır [34].

3.2.5.3. Kollektörden ısı kaybı

Güneşten gelen ışıınımın bir kısmı cam örtüden geçerken, bir kısmı geri yansır. Cam örtüden geçerek yutucu levhaya ulaşan güneş ışıınları, ısı enerjisine dönüşerek yutucu levhayı ısıtır. Sıcaklığı artan yutucu levhada oluşan ısı enerjisinin bir kısmı

DTGK'de akan havaya aktarılırken, bir kısmını da kayıp ısı olarak DTGK'den çevreye yayılır. Kayıp ısı enerjisini hesaplayabilmek için Denklem 3.35'den yararlanılır.

$$Q_k = Q_{CT} + Q_{C1} + Q_{AT} \quad (3.35)$$

Burada,

Q_{CT} : Cam örtüden taşınım ile ısı kaybı (W),

Q_{C1} : Cam örtüden ışınlama ile ısı kaybı (W),

Q_{AT} : Kollektörün alt yüzeyinden taşınım ile ısı kaybı (W).

Cam örtüden taşınım ile kaybolan ısı güç aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$Q_{CT} = A_c h_w (T_c - T_a) \quad (3.36)$$

Burada,

A_c : Yutucu levhanın alanı (m^2),

h_w : kollektörün dış yüzeylerinde (rüzgâr etkisiyle) ısı taşınım katsayısı (W/m^2K),

T_c : Cam örtü sıcaklığı ($^{\circ}C$),

T_a : Dış ortam havasının sıcaklığı ($^{\circ}C$)'dır.

Cam örtüden ışınlama ile kaybolan ısı güç aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$Q_{C1} = A_c h_{r1} (T_c - T_a) \quad (3.37)$$

Burada,

A_c : Yutucu levhanın alanı (m^2),

h_{r1} : Cam örtü ile gökyüzü arasında ışınlama ile ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısını (W/m^2K),

T_c : Cam örtü sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

T_a : Dış ortam havasının sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)'dir.

DTGK tabanından taşınım ile kaybolan güç Denklem 3.38 ile hesaplanır.

$$Q_{AT} = A_c h_w (T_{bo} - T_a) \quad (3.38)$$

Burada,

A_c : Yutucu levhanın alanı (m^2),

h_w : kollektörün dış yüzeylerinde (rüzgâr etkisiyle) ısı taşınım katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$),

T_b : Kollektörün taban sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : Dış ortam havasının sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)'dir.

3.2.5.4. Faydalı ısı enerjisi

DTGK'ne güneşten gelen toplam enerji ile DTGK'den kaybolan enerji arasındaki fark, kollektörde havaya aktarılan faydalı enerjidir. Faydalı ısı enerjisi; yukarıda verilen teorik hesap yönteminden yararlanılarak ($Q_{N,TEO}$) Denklem 3.39 ile ve DTGK girişinde yapılan deneysel hız ölçümü ile kollektörün giriş ve çıkışında yapılan sıcaklık ölçümlerinden yararlanılarak da ($Q_{N,DEN}$) Denklem 3.40 ile hesaplanabilir.

$$Q_{N,TEO} = Q_g - Q_k \quad (3.39)$$

$$Q_{N,DEN} = \dot{m} c_p (T_k - T_a) \quad (3.40)$$

Burada;

$\dot{m}$: Havanın kütleli debisi (kg/s),

c_p : Havanın sabit basınçta özgül ısısı (J/kgK),

T_k : Kollektörden çıkan havanın sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

T_a : Dış ortam havasının sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)’dır.

Kollektörden geçen havanın kütleli debisi Denklem 3.41 ile hesaplanır.

$$\dot{m} = \rho v A_k \quad (3.41)$$

Burada,

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3),

v : Kollektör giriş kesitindeki ortalama hava hızı (m/s),

A_k : Kollektör hava girişinin en-kesit alanı (m^2)’dır.

3.2.5.5. Kollektörün ısı verimi

Düzlemsel bir güneş kollektörünün ısı verimi, birim zamanda akışkana aktarılan faydalı ısı enerjisinin, ışınlama kollektöre gelen ısı enerjisiye oranıdır. Bu verim, kollektöre ulaşan güneş ışınlamının ne kadarının faydalı ısı enerjisiye dönüştüğünü ifade etmektedir [34].

$$\eta_{\text{DEN}} = \frac{Q_{\text{N,DEN}}}{Q_G} 100 \quad (3.42)$$

$$Q_G = I_T A_c \quad (3.43)$$

Burada,

$Q_{\text{N,DEN}}$: Deneysel verilerle hesaplanan, kollektörde havaya aktarılan faydalı ısı güç (W)

Q_G : Kollektör yüzeyine güneş ışınlamıyla gelen ısı güç (W)

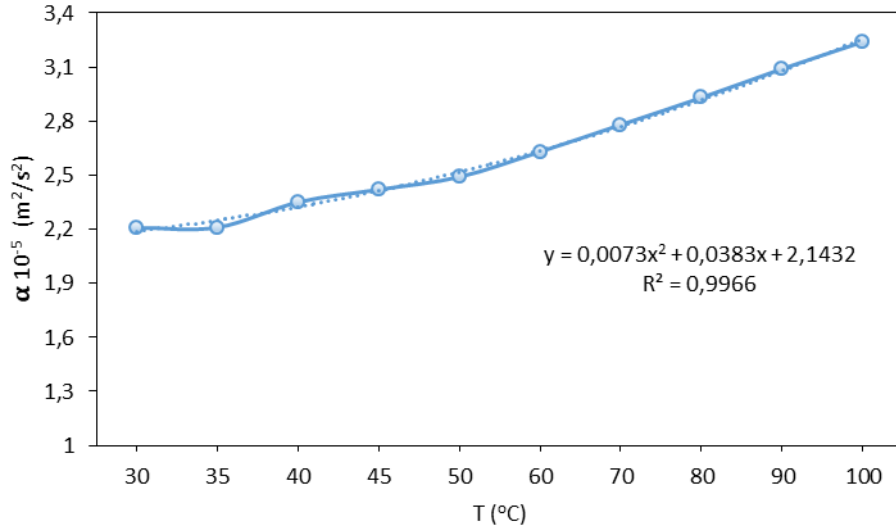
I_T : Eğik yüzeye gelen toplam güneş ışınlam akısı ($\text{MJ/m}^2\text{h}$),

A_c : Yutucu levhanın alanı (m^2)’dır.

3.2.6. Havanın sıcaklığına bağlı termofiziksel özellikleri

Isıl hesaplarda, DTGK akış kanallarından ısınarak akan havanın ortalama sıcaklığındaki (T_m) termofiziksel özellikleri kullanılmaktadır. Havanın termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı hesabı için kullanılan bağıntılar, termodinamik özellik tablolarından elde edilmiştir [35].

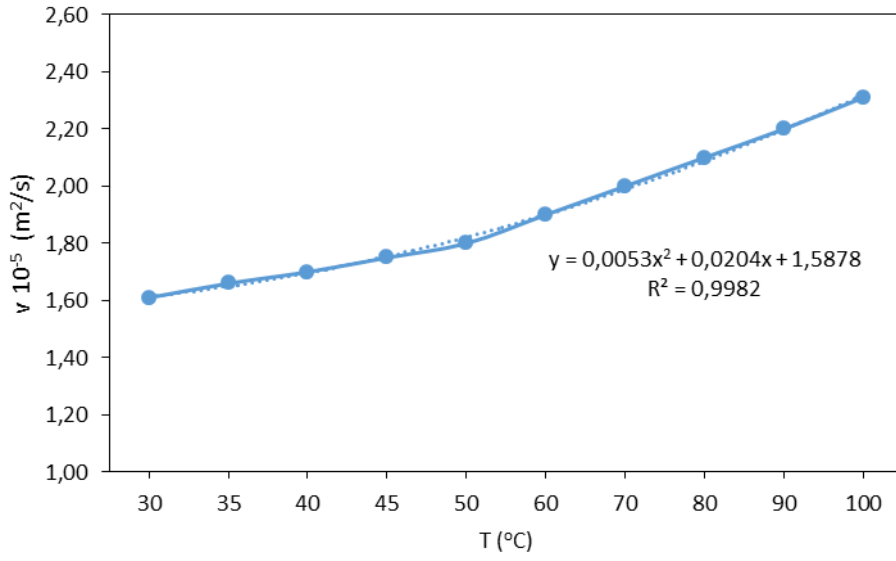
Havanın ısıl yayınım katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.19.'da görülmektedir. Isıl yayınım katsayısının, 30-100°C sıcaklık aralığında, sıcaklığa bağlı değişimi için Denklem 3.44 elde edilmiştir.



Şekil 3.19. Havanın ısıl yayınım katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi

$$\alpha (T_m) = (0,0073T_m^2 + 0,0383T_m + 2,1432) \times 10^{-5} \quad (3.44)$$

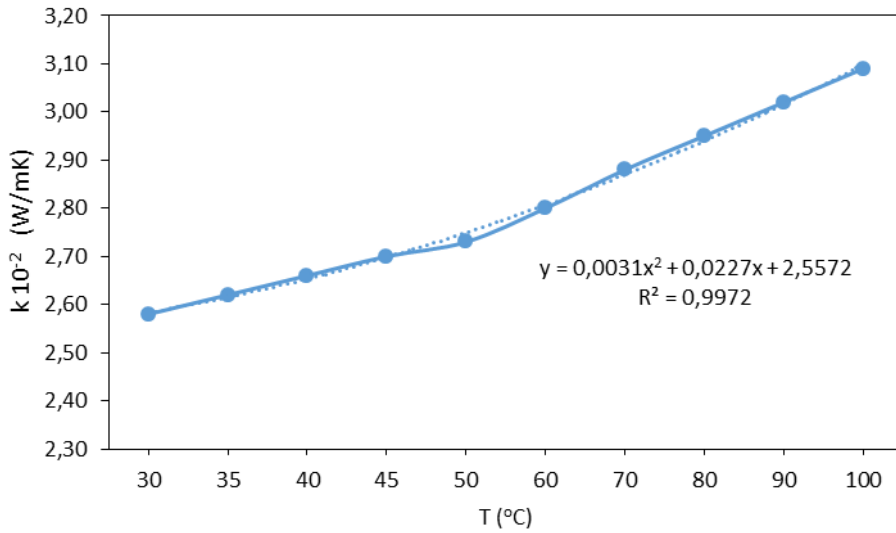
Havanın kinematik viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.20.'de görülmektedir. Kinematik viskozitenin, 30-100°C sıcaklık aralığında, sıcaklığa bağlı değişimi için Denklem 3.45 elde edilmiştir.



Şekil 3.20. Havanın kinematik viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişimi

$$v(T_m) = (0,0053T_m^2 + 0,0204T_m + 1,5878) \times 10^{-5} \quad (3.45)$$

Havanın ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.21.'de görülmektedir. Isı iletim katsayısının, 30-100°C sıcaklık aralığında, sıcaklığa bağlı değişimi için Denklem 3.46 elde edilmiştir.



Şekil 3.21. Havanın ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi

$$k(T_m) = (0,0031T_m^2 + 0,0227T_m + 2,5572) \times 10^{-2} \quad (3.46)$$

3.3. Kurutma İle İlgili Temel Tanımlar ve Hesaplar

Kurutulan tarım ürünlerinin sağlıklı bir şekilde uzun süre saklanabilmeleri için kurutma sonundaki nem miktarının belirli bir değerin altında olması gerekir. Farklı gıdalar için izin verilen nem değerleri, yapılan bilimsel çalışmalarla belirlenmiştir. Kurutulmuş kırmızıbiberlerde nihai nem miktarının yaş baza göre %3-11 aralığında olması gerektiği, bunun üzerindeki nem miktarlarında aflotoksine neden olan fungi mantarının çoğalabileceği belirtilmiştir [23].

Kurutulmuş gıdaların nihai nem miktarı kadar, kurutmada çıkılabilecek en yüksek sıcaklık da önemlidir ve gıdalara göre farklılık göstermektedir. Güngör, bazı gıdaların izin verilen en yüksek kurutma sıcaklıklarını ve son nem miktarlarını belirtmiştir [36].

Tablo 3.1. Bazı gıdaların nihai nem miktarları ve izin verilen en yüksek kurutma sıcaklıkları [36].

Ürün adı	Başlangıç nemi (yaş baza göre) (%)	Son nem (yaş baza göre) (%)	İzin verilen en yüksek kurutma sıcaklığı (°C)
Mısır	35	15	60
Buğday	20	16	45
Tahıl	24	14	50
Pirinç	24	11	50
Bakliyat	20-22	9-10	40-60
Yeşil bezelye	80	5	65
Karnabahar	80	6	65
Havuç	70	5	75
Yeşil fasulye	70	5	75
Soğan	80	4	55
Sarımsak	80	4	55
Lahana	80	4	55
Patates	75	13	75
Biber	80	5	65
Elma	80	24	70
Kayısı	85	18	65
Üzüm	80	15-20	70
Muz	80	15	70
Bamya	80	20	65
Ananas	80	10	65
Domates	96	10	60

Literatürde, farklı hava sıcaklıklarında kurutulan kırmızıbiberler için hesaplanan efektif difüzyon katsayıları verilmiştir [39,44,45,46].

Tablo 3.2. Kırmızıbiberlerin efektif difüzyon katsayıları.

Kaynak	De_{ff} ($\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)	Kurutma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Kurutucu hava hızı (m/s)	Çalışma koşulu
Ramesh ve ark., 2001, [44]	17,13	60	0,25-1,0	Zorlanmış taşınım
Ertekin, 2002, [45]	0,4-2,0	40-70	0,5-2,0	Zorlanmış taşınım
Doymaz ve Pala, 2002, [39]	225	60	-	Doğal taşınım
Scala ve Crapiste, 2008, [46]	5-8,3	20-50	0,2-1,2	Zorlanmış taşınım

3.3.1. Yaş ve kuru baza göre nem miktarı

Kurutulan ürünlerin nem miktarı, “Yaş baza” (yb) ve “Kuru baza” (kb) göre iki farklı şekilde ifade edilir. Yaş baza göre nem miktarı, üründe bulunan su kütlesinin, ürünün toplam kütlesine oranıdır [37].

$$MC_{yb}(\%) = \frac{m_y}{m_y + m_k} \times 100 \quad (3.47)$$

MC_{yb} : Yaş baza göre nem miktarı (%)

m_y : Üründeki su kütlesi (g)

m_k : Üründeki kuru madde kütlesi (g)

Kuru baza göre nem miktarı, üründeki su kütlesi, üründeki kuru madde kütlesine oranlanarak belirlenir [37].

$$MC_{kb}(\%) = \frac{m_y}{m_k} \times 100 \quad (3.48)$$

MC_{kb} : Kuru baza göre nem miktarı (%)

3.3.2. Kuru madde miktarı ve belirleme yöntemi

Üründeki kuru madde miktarı, yaş ürünün toplam kütlesinden, üründeki ayrılabilir su miktarının çıkarılmasıyla tespit edilir. Kuru madde miktarının belirlenmesinde, direkt ve indirekt olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır. Direkt yöntemde, gıdalar etüv fırını içerisinde yeterince yüksek bir sıcaklıkta (örneğin kırmızıbiber için $60-70^{\circ}\text{C}$) kurutulur [23,25]. Ürün, kurutma sırasında belirli aralıklarla, ağırlığı sabitleninceye

kadar tartılır. Ürünün son ağırlığı, kuru madde miktarıdır. Endirekt yöntemde ise nem ölçüm cihazı ile gıdanın içerisindeki nem miktarı ölçülüp, kuru madde miktarı belirlenir [37].

Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde üretilen kırmızıbiberlerin kalite parametrelerinin incelendiği çalışmada, farklı illerde yetiştirilen kırmızıbiberlerin kuru madde miktarları da belirlenmiştir (Tablo 3.3). Çalışmada en düşük kuru madde miktarı (%9,24), Şanlıurfa'da yetiştirilen kırmızıbiberlerde tespit edilmiştir [25].

Tablo 3.3. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yetişen kırmızıbiberlerin kuru madde miktarı [25].

İller	Kuru madde miktarı (%)
Diyarbakır	15,77
Gaziantep	19,28
Kahramanmaraş	17,17
Kilis	18,27
Şanlıurfa	9,24

3.3.3. Boyutsuz nem oranı

Boyutsuz nem oranı, kurutma süresi boyunca herhangi bir zaman diliminde üründe kalan buharlaşabilecek su miktarının, başlangıçta üründe bulunan buharlaşabilecek toplam su miktarına oranıdır.

$$MR = \frac{MC_t - MC_e}{MC_0 - MC_e} \quad (3.49)$$

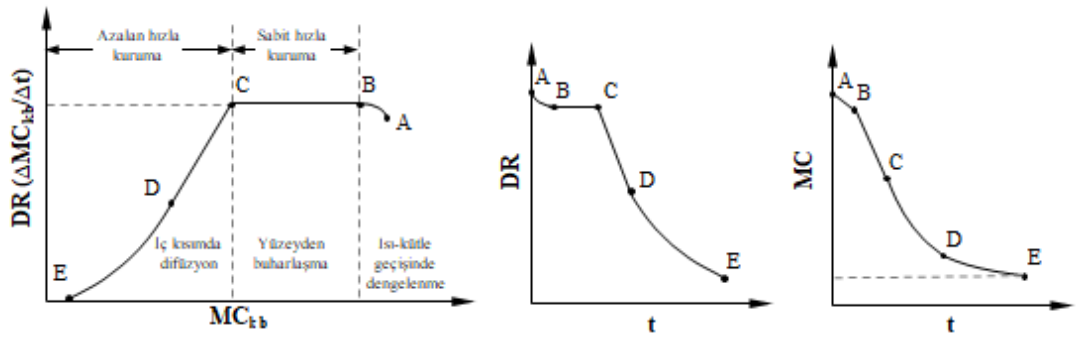
Denklemde MR; boyutsuz nem oranı, MC_t ; t anındaki nem miktarı ((g-nem/ g kuru-kütle), MC_e ; kurutma ortamındaki hava şartlarında ürünün denge nem miktarı (g-nem/ g kuru-kütle), MC_0 : Ürünün kurutma öncesindeki nem miktarıdır (g-nem/ g kuru kütle). MC_e 'nin değeri, MC_t ve MC_0 ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bundan dolayı Denklem 3.49 basitleştirilerek, Denklem 3.50 elde edilmiştir [38,39].

$$MR = \frac{MC_t}{MC_0} \quad (3.50)$$

3.3.4. Kuruma hızı

Kurutmada asıl amaç, ürün içerisindeki nemi buharlaştırmak ve oluşan buharı da ortamdan uzaklaştırmaktır. Kuruma hızı, belirli zaman diliminde ürünün nem miktarındaki değişim ya da üründen ayrılan su miktarıdır. Kuruma hızı, kurutulacak ürünün türüne ve yapısal özelliklerine bağlı değiştiği gibi, kurutma havasının özelliklerine (sıcaklık, hız ve bağıl nem gibi) de bağlıdır [38]. Kuruma hızı eğrileri ürünlerin kuruma davranışını açıklamak için önemli göstergelerdir.

Kurutmada, ürün ağırlığının zamanla değişimi (kuru baza göre nem miktarı), kuruma hızı hakkında bilgi verir. Şekil 3.22.'deki tipik kuruma hızı eğrilerinde, belli başlı kritik noktalar ve kurutmanın aşmaları gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Kuruma hızı eğrileri

A: Kurutmanın başlangıcıdır ve ürünün sıcak kurutma havasıyla ilk temasını gösterir.

A-B: Kurutma havası ile ürün arasındaki ısı ve kütle geçişinin dengeye ulaştığı (ürün sıcaklığının sabitlendiği) zaman dilimidir. Bu aşamada, üründeki (zayıf kuvvetlerle bağlı) serbest su buharlaşmaya başlar.

B-C: Kuruma hızının sabit kaldığı zaman dilimidir. Bu aşamada ürünün yüzeyi ıslaktır (su ile kaplıdır). Üründeki nem, difüzyonla ve kılcal kuvvetlerin etkisiyle yüzeye doğru ilerler. Ürünün yüzeyinden buharlaşan su miktarı (kuruma hızı), ürün içerisinden yüzeye ulaşan (difüzyonla taşınan) su miktarından azdır. Başka bir

ifadeyle, suyun yüzeyden buharlaşmasıyla ilgili (dıştaki) direnç, ürünündeki (içteki) kütle geçiş direncinden çok daha büyüktür ve belirleyicidir.

C: Sabit kuruma hızından, azalan kuruma hızına geçilen (ürünün) kritik nem miktarıdır. Kritik nem miktarı; ürünün içinden yüzeye serbest nem geçiş hızının, yüzeydeki maksimum buharlaşma hızına eşit olduğu en düşük nem miktarıdır. Bu nem miktarının altında, ürünündeki (içteki) kütle geçiş direnci, kurumanın seyrinde etkili olmaya başlar.

C-D: Birinci azalan kuruma hızlı zaman dilimidir. Bu aşamada, yüzeyden buharlaşan nem miktarı, ürün içerisinden difüzyonla yüzeye taşınan nem miktarından fazladır ve kuruma hızı düşer. Yüzeyden buharlaşmanın yavaşlaması, sıcaklığı artırır ve yüzey kurumaya başlar.

D: İkinci azalan kuruma hızına geçilen nem miktarıdır. Bu nem miktarından itibaren ürünün yüzeyindeki kuru bölgelerin alanı genişler ve ürün yüzeyinde kuru bir tabaka oluşmaya başlar.

D-E: İkinci azalan kuruma hızlı zaman dilimidir. Yüzeydeki buharlaşma (kuruma) hızı, ürünün içerisinden difüzyonla yüzeye ulaşan nem miktarına bağlıdır. Nem miktarının düşmesiyle ürünün sıcaklığı da artar.

E: Ürünün denge nemine ulaşılnca, kuruma (buharlaşma) durur.

Kuruma hızını hesaplamak için Denklem 3.51 kullanılır.

$$DR = \frac{\Delta MC}{\Delta t} = \frac{MC_{t1} - MC_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (3.51)$$

Denklemde t_1-t_2 : farklı zaman aralıklarındaki kurutma süresi (saat), $MC_{t1}-MC_{t2}$: t_1 ve t_2 zamanlarında ürünlerdeki nem kütlesinin değişimi (g-nem).

3.3.5. Efektif difüzyon katsayısı

Efektif difüzyon katsayısı, kurutulan üründen nemin uzaklaştırılmasında önemli bir parametredir. İnce tabaka kurutma modelinin kullanıldığı çalışmalarda efektif difüzyon katsayısı Fick eşitliğiyle belirlenir.

$$DR = \frac{\partial MC}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 M \quad (3.52)$$

Azalan kuruma hızı periyodunda da nem geçişi, Fick'in difüzyon eşitliği ile tanımlanabilir [40]. Crank belli kabullerle, efektif difüzyon katsayısının hesabı için bir çözüm yöntemi önermiştir [41]. Crank'ın kabulleri;

1. Nem geçişi sadece difüzyonla gerçekleşir.
2. Ürünlerdeki şekil değişimi ihmal edilir.
3. Kuruma süreleri yeterince uzundur.

Crank'ın kartezyen koordinatlarda yaptığı çözümün sonucu, Denklem 3.53 ile verilmiştir [41].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.53)$$

Denklemde D_{eff} : efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), L : kurutulan ürünün yarı kalınlığı (m), t : kurutma süresi (s)'dir. Uzun kurutma sürelerinde, sadece serinin ilk terimi alınarak efektif difüzyon katsayısı Denklem 3.54 ile belirlenir [41].

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} t \quad (3.54)$$

3.3.6. Kurutmada gerekli ısı enerjisi

Üründeki suyun buharlaşması için gerekli ısı enerjisi aşağıdaki denklemle hesaplanır [42].

$$E_y = h_{fg}m_y \quad (3.55)$$

Denklemde E_y ; üründeki nemin buharlaşması için gerekli ısı enerjisi (kJ), h_{fg} ; suyun gizli buharlaşma ısısı (kJ/kg), m_y ; üründen uzaklaştırılan nemin kütlesi (kg)'dir.

3.3.7. Güneş enerjili kurutma sisteminin enerji verimi

GEKS'nin enerji dönüştürme verimi; üründen nemin buharlaşması için gerekli ısı enerjisi, güneşten gelen ısı enerjisine oranlanarak hesaplanır. GEKS'nin enerji verimi, Denklem 3.56 ile belirlenir.

$$\eta_{dr} = \frac{E_y}{Q_i} \quad (3.56)$$

Denklemde η_{dr} ; kurutmada enerji verimi, E_y ; üründeki nemin buharlaşması için gerekli ısı enerjisi (kJ), Q_i ; güneşten gelen ısı enerjisi (kJ)'dir.

Kollektör yüzeyine güneşten ışınlama gelen ısı enerjisi aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$Q_i = \frac{3600 Q_{N,DEN}}{1000} \quad (3.57)$$

Denklemde Q_i ; güneşten gelen ısı enerjisi (kJ), $Q_{N,DEN}$; deneysel faydalı ısı gücü (Denklem 3.40) (W)'tür.

3.3.8. Güneş enerjili kurutma sisteminin özgül enerji tüketimi

Özgül enerji tüketimi (SEC), kurutulan nemli ürünlerden 1 kg suyu buharlaştırmak için gereken enerjidir. SEC aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$SEC = \frac{E_i}{m_y} \quad (3.58)$$

$$E_i = Q_g t \quad (3.59)$$

Denklemden E_i ; sisteme giren ısı enerjisi (kW-h), Q_g ; kollektöre giren ısı güç (W), t ; zaman (s)'dir.

Kırmızıbiberlerin kurutulduğu farklı deneysel çalışmalarda hesaplanan özgül enerji tüketimleri Tablo 3.4.'de verilmiştir [47,48].

Tablo 3.4. Kırmızıbiberlerin kurutulmasında özgül enerji tüketimi

Kaynak	SEC (kW-h/kg)	Kurutma sıcaklığı (°C)	Kurutucu hava debisi (kg/s)	Çalışma koşulu
Kumar ve ark.[47]	1,532	62,0	0,068	Zorlanmış taşınım
Kumar ve ark.[47]	1,784	50,3	0,043	Doğal taşınım
Mugi ve Chandramohan [48]	6,06	50,2	-	Sera tipi

3.3.9. Güneş enerjili kurutma sisteminin özgül nem çekme oranı

GEKS'de özgül nem çekme oranı (SMER), ürünlerden uzaklaştırılan su kütlesinin sisteme giren ısı enerjisine oranıdır.

$$SMER = \frac{m_y}{E_i} \quad (3.60)$$

Kırmızıbiberlerin kurutulduğu farklı deneysel çalışmalarda SMER sonuçları Tablo 3.5.'te verilmiştir [47,48,49].

Tablo 3.5. Kırmızıbiberlerin kurutulmasında özgül nem çekme oranı

Kaynak	SMER (kg/ kw-h)	Kurutma sıcaklığı (°C)	Çalışma koşulu
Kumar ve ark.[47]	0,6526	62	Zorlanmış taşınım
Kumar ve ark.[47]	0,5603	50,3	Doğal taşınım
Mugi ve Chandramohan [48]	0,6556	50,2	Sera tipi
Fudholi ve ark. [49]	0,19	44	Zorlanmış taşınım

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

GEKS ile yapılan deneyler, Şanlıurfa Siverek ilçe Tarım ve Orman Müdürlüğü'nün uygulama bahçesinde gerçekleştirilmiştir. Tarladan temin edilen kırmızıbiberler, çekirdeklerinden ve saplarından temizlenip, bıçak yardımıyla boylamasına ikiye bölünmüştür. Kırmızıbiberler, birbirlerine temas etmeyecek ve iç kısımları alta bakacak şekilde tepsilere dizilmiştir. Tepsilerdeki kırmızıbiberlerin yaş ağırlığı 600 ila 700 gram (Ortalama yükleme oranı $3,38 \text{ (kg/m}^2\text{)}$) arasındadır. Deneylerde, GEKS'nin kurutma odasındaki raflara, aralarında 8 cm boşluk kalacak şekilde, 4 adet tepsi (Ortalama yükleme oranı $13,5 \text{ (kg/m}^2\text{)}$) yerleştirilmiştir. Rafların numaralandırması alttan yukarıya doğru yapılmıştır.

Deneylerde beşinci tepsideki numuneler ise karşılaştırma amaçlı olarak, dış ortamda ve doğrudan güneş ışınlarına maruz bırakılarak kurutulmuştur.

Deneylerde tepsilerin yerleri değiştirilmemiştir. Numuneler, kurutma odasındaki sıcaklığın korunması için sabah ve akşam olmak üzere günde iki kez tartılmıştır. Sıcaklık ölçümleri ise saat başı yapılmıştır. Kurutma deneylerine sabah saat 08:00'de başlanmış ve deneyler akşam saat 19:30'da sonlandırılmıştır. Günlük kurutma süresinden sonra numuneler, kurutma odasında (DTGK'nin girişi ve GEKS'nin kurutma odasındaki tüm havalandırma delikleri kapalı vaziyette) tutulmuştur. GEKS'de kapalı bir depoda muhafaza edilmiştir.

Deneyisel çalışmalar, kurutma odasının ön ve arka kısmındaki beşer adet (toplam on adet) havalandırma deliğinin tamamının ve yarısının açık tutulduğu iki farklı koşulda yapılmıştır.

- Deney-I: Kurutma odasındaki havalandırma deliklerinin tamamı (10 adet) açık tutularak, 7-10 Haziran 2021 tarihleri arasında yapılan kurutma deneyi.
- Deney-II: Kurutma odasındaki havalandırma deliklerden öndekiler (5 adet) kapalı ve arkadakiler (5 adet) açık tutularak, 14-17 Haziran 2021 tarihleri arasında yapılan kurutma deneyi.

Her iki deneyde de kurutma odasına, dört adet tepside ve yaklaşık aynı miktarda kırmızıbiber konulmuştur. Deneylerde aynı ölçüm metotları uygulanmıştır. Deney-I için hazırlanan numunelerin bir kısmı Şekil 4.1.'de ve Deney-II için hazırlanan numunelerin bir kısmı Şekil 4.2.'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Deney-I için hazırlanan kırmızıbiberlerden örnekler.



Şekil 4.2. Deney-II için hazırlanan kırmızıbiberlerden örnekler.

4.1. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin Isıl Performansı

4.1.1. Deney-I ısı performans sonuçları

GEKS’de, kurutma odasının ön ve arka tarafındaki on adet havalandırma deliğinin tamamı açık tutularak, hazırlanan kırmızıbiber numuneleri, 7-10 Haziran 2021 tarihleri arasında dört gün boyunca kurutulmuştur.

GEKS’nin kurutma odasına, her birinde yaş ağırlığı 600-700 gram kırmızıbiber bulunan 4 adet tepsi konularak kurutma deneyleri yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla; beşinci tepside, aynı şekilde hazırlanan ve yaklaşık aynı ağırlıktaki kırmızıbiber numuneleri, aynı sürelerle, direk güneş ışınlarına maruz bırakılarak, dış ortamda (açık havada) kurutulmuştur.

Deney-I süresince, meteorolojiden alınan verilerle, kurutma yapılan saatler için hesaplanan, günlük ortalama dış hava sıcaklığı, ortalama bağıl nem ve ortalama rüzgâr hızı, Tablo 4.1.'de görülmektedir. Kurutma işleminin devam ettiği dört gün boyunca; ortalama hava sıcaklığı 29,8°C, ortalama bağıl nem %24,2 ve ortalama rüzgâr hızı 3,75 km/h (~1,0 m/s)'dir.

Tablo 4.1. Deney-I için günlük ortalama meteorolojik veriler.

Tarih	Hava sıcaklığı (T _a) (°C)	Bağıl Nem (%)	Rüzgar hızı (km/h)
07.06.2021	31,0	22	3
08.06.2021	29,5	19	4
09.06.2021	29,5	28	2
10.06.2021	29,5	27,5	6

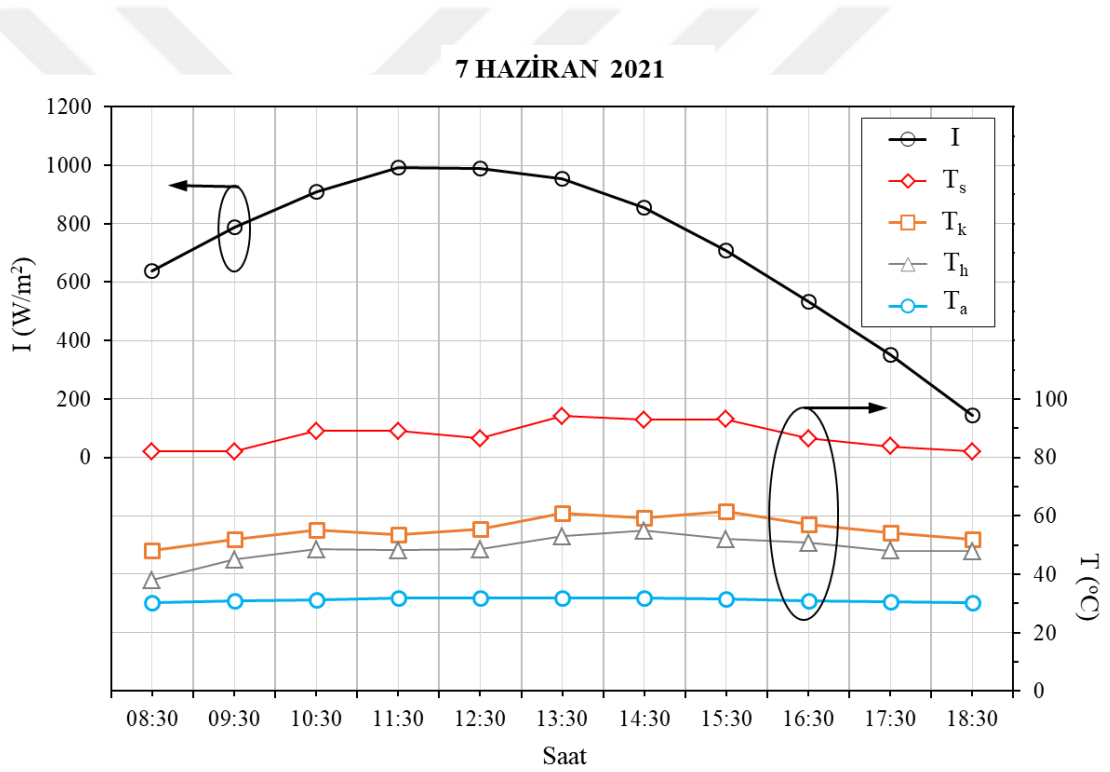
Şekil (4.3.-4.6.)'de Deney-I boyunca (7-10 Haziran 2021) GEKS'nin farklı noktalarında (T_s, yutucu levha; T_k, kollektör çıkışı; T_h, kurutma odası; T_a, dış ortam) saatlik sıcaklık ölçümlerinin ve yatay düzleme gelen güneş ışınım akısının (I) gün boyunca değişimleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, güneş ışınım akısının (I) saat 12-13 arasında en yüksek değerlere ulaştığı görülür. Ayrıca dış ortam sıcaklığı (T_a) gün boyunca çok fazla değişmemesine rağmen, yutucu yüzey sıcaklığının (T_s), kollektör çıkışında (T_k) ve kurutma odasındaki (T_h), hava sıcaklıklarının, güneş ışınım akısındaki (I) artışa bağlı olarak yükseldiği görülmektedir. Ancak sistemin ısıl ataleti nedeniyle, güneş ışınım akısındaki artış ile sıcaklık artışları arasında 1-2 saatlik bir faz farkı olduğu da gözlenmektedir.

Deney-I'de yatay düzleme gelen güneş ışınım akısı (I) ve hesaplanan eğik düzleme gelen toplam güneş ışınım akısı (I_T) saat 12.00'de maksimum değerine ulaşmıştır. Yatay düzleme gelen güneş ışınım akısının ve eğik düzleme gelen toplam güneş ışınım akısının maksimum değerlerinin dört günlük ortalamaları sırasıyla, I_{maks, ort} = 981,6 W/m² ve I_{T maks, ort} = 1233,8 W/m²'dir.

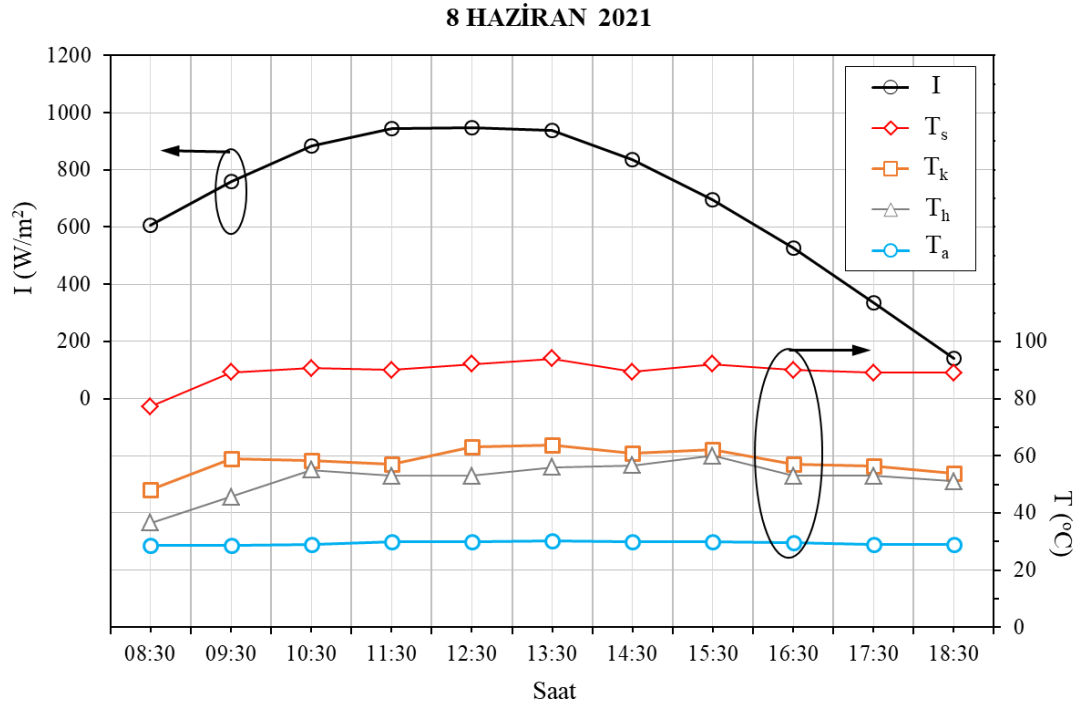
Deney-I süresince, aynı zamanda kollektöre giren havanın sıcaklığı olan dış ortam sıcaklığı (T_a), gün boyunca (her gün 08:30 ila 19:30 saatleri arasında) neredeyse sabit kalmıştır. Dört gün boyunca ortalama dış ortam sıcaklığı T_{a,ort}=29,9°C'dir.

Deney-I süresince yutucu yüzey sıcaklığı T_s , gün içerisinde 11:00 ila 17:00 saatleri arasında nerdeyse sabit kalmıştır. Deney-I’de dört gün boyunca ortalama yutucu yüzey sıcaklığı $T_{s,ort} = 88,8^\circ\text{C}$ ve ölçülen maksimum yutucu yüzey sıcaklığı da $T_{s,maks} = 95,1^\circ\text{C}$ ’dir.

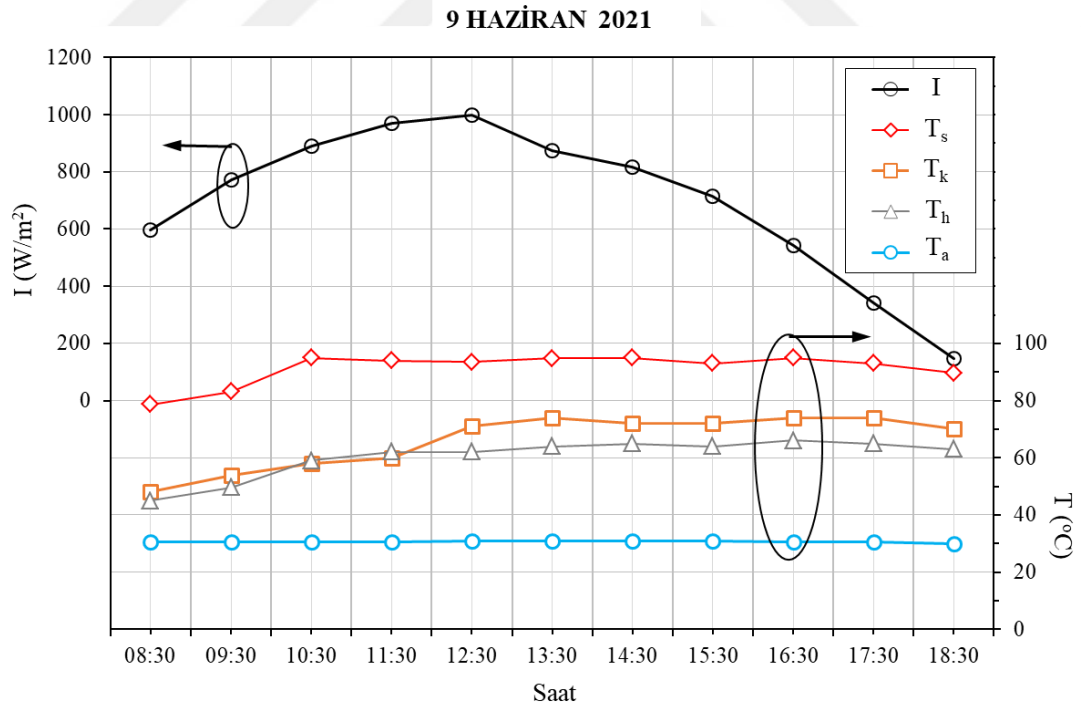
Kollektör çıkış sıcaklığı (T_k) ve kurutma odası sıcaklığı (T_h) da gün boyunca, yutucu yüzey sıcaklığını (T_s) izleyen değişimler göstermiştir. Kollektör çıkış sıcaklığı ve kurutma odası sıcaklığının dört günlük ortalamaları sırasıyla, $T_{k,ort} = 60,7^\circ\text{C}$ ve $T_{h,ort} = 54,1^\circ\text{C}$ ’dir. Bu iki sıcaklığın dört gün boyunca ölçülen maksimum değerleri de sırasıyla $T_{k,maks} = 75^\circ\text{C}$ ve $T_{h,maks} = 66^\circ\text{C}$ ’dir.



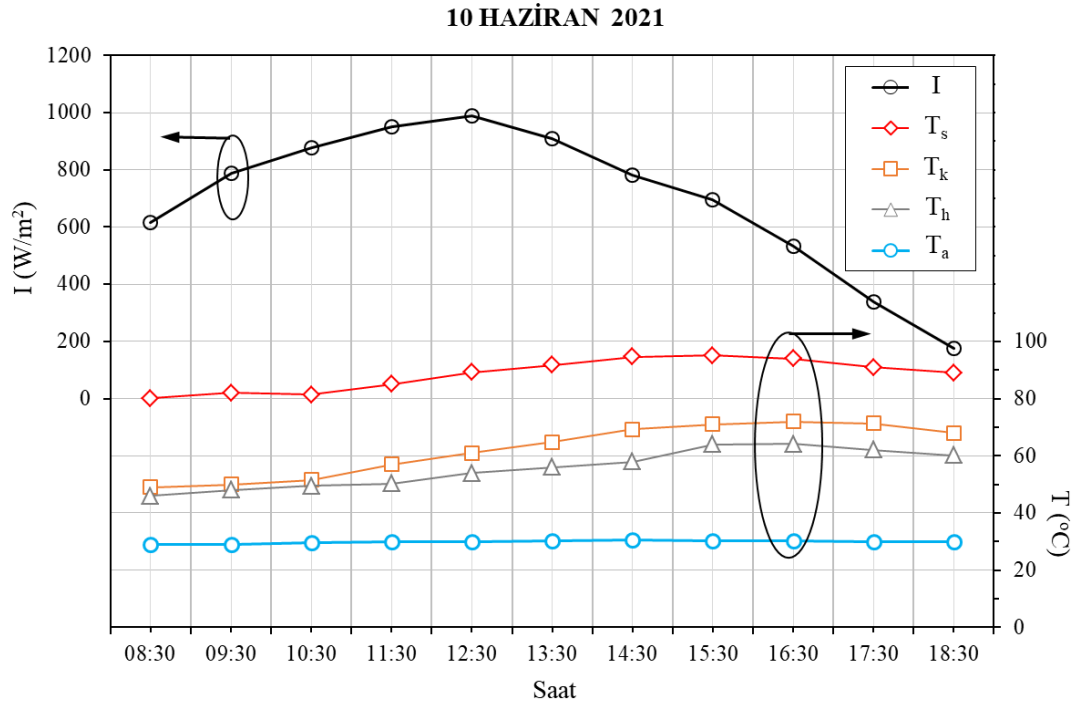
Şekil 4.3. Güneş ışınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (7 Haziran 2021).



Şekil 4.4. Güneş ışı nım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değ iş imi (8 Haziran 2021).



Şekil 4.5. Güneş ışı nım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değ iş imi (9 Haziran 2021).



Şekil 4.6. Güneş ışınlam akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (10 Haziran 2021).

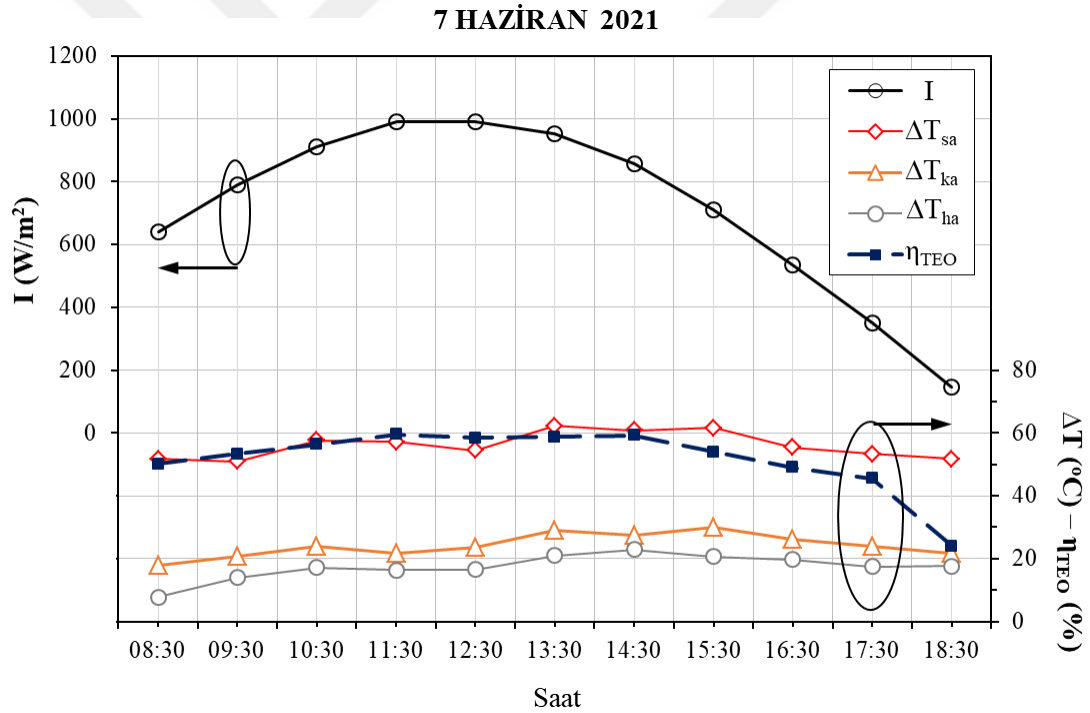
Deney-I’de, 7-10 Haziran 2021 tarihlerinde gün boyunca ölçülen güneş ışınlam akısının (I), DTGK için Bölüm 3’te önerilen ısıl model kullanılarak hesaplanan teorik ısıl verimin (η_{TEO}) ve ölçülen sıcaklık farklarının gün boyunca değişimi, Şekil (4.7.-4.10.)’da verilmiştir.

Deney-I’de yutucu yüzey sıcaklığı (T_s) ile dış ortam sıcaklığı (T_a) arasındaki fark (ΔT_{sa}) gün içerisinde 11:00 ila 17:00 saatleri arasında neredeyse sabit kalmıştır. Deney-I’de dört gün boyunca, yutucu yüzey ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkın ortalaması $\Delta T_{sa,ort} = 58,59$ °C ve maksimum değeri de $\Delta T_{sa,maks} = 60,6$ °C’dir.

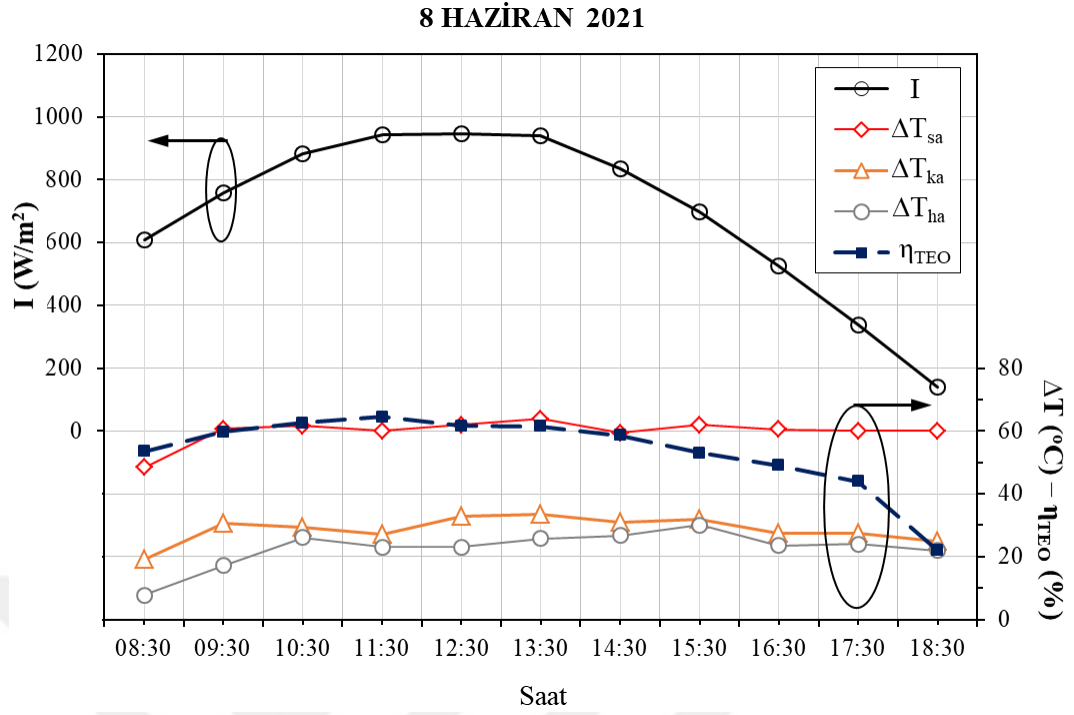
Deney-I’de, kollektör çıkış sıcaklığı (T_k) ile dış ortam sıcaklığı (T_a) arasındaki fark (ΔT_{ka}), gün boyunca 11:00 ila 17:00 saatleri arasında neredeyse sabit kalmıştır. Deney-I’de dört gün boyunca, kollektör çıkışı ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkın ortalaması $\Delta T_{ka,ort} = 28,8$ °C ve maksimum değeri de $\Delta T_{ka,maks} = 37,1$ °C’dir. Bu sonuçlara göre, GEKS’deki DTGK’nın, kurutma havası sıcaklığını ~ 29 °C artırdığı söylenebilir.

Deney-I’de kurutma odası sıcaklığı (T_h) ile dış ortam sıcaklığı (T_a) arasındaki fark (ΔT_{ha}), gün içerisinde 11:00 ila 17:00 saatleri arasında neredeyse sabit kalmıştır. Deney-I’de dört gün boyunca, kurutma odası ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkın ortalaması $\Delta T_{ha,ort} = 23,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ve maksimum değeri de $\Delta T_{ha,maks} = 30,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ’dir.

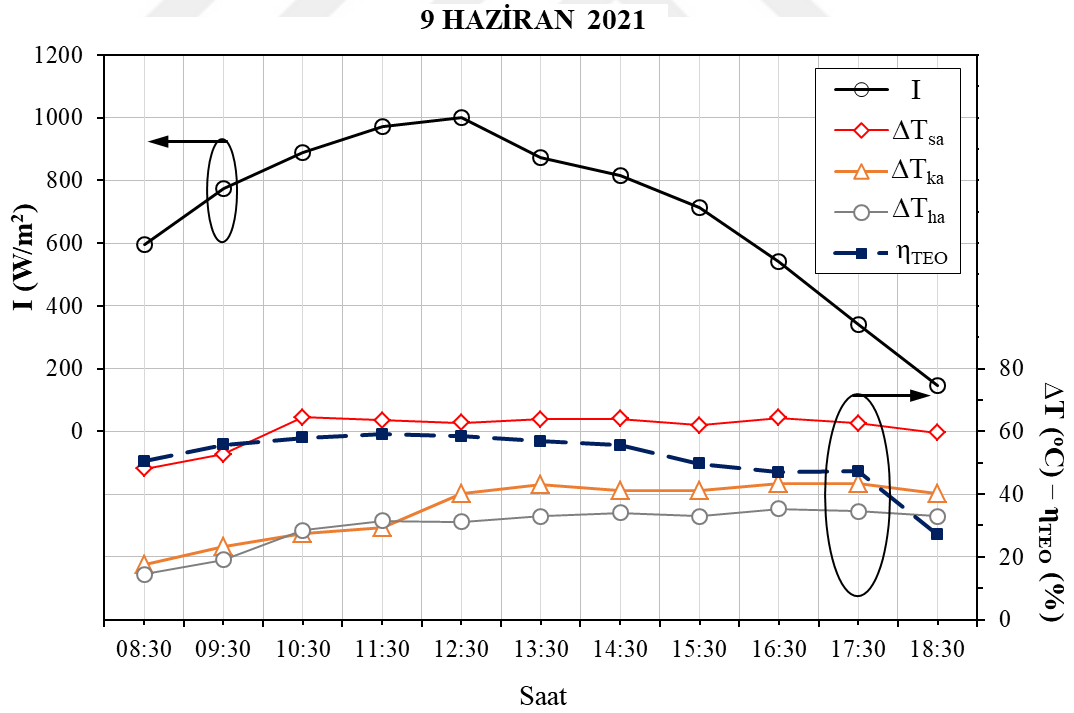
Bölüm 3’te önerilen kollektör ısı modeli ve meteorolojiden alınan güneş ışıyım akıları ve DTGK için hesaplanan teorik verim (η_{TEO}), Deney-I süresince her gün yaklaşık saat 11:00’den 16:00’ya kadar %56,8’in üzerindedir. Saat 16:00’dan sonra, azalan güneş ışıyım akısı nedeniyle kollektör verimi de hızla düşmektedir. Deney-I’de, dört gün boyunca, hesaplanan teorik kollektör verimlerinin ortalaması $\eta_{TEO,ort} = \%52,02$ ve maksimum teorik kollektör verimi de $\eta_{TEO,maks} = \%64,6$ ’dır.



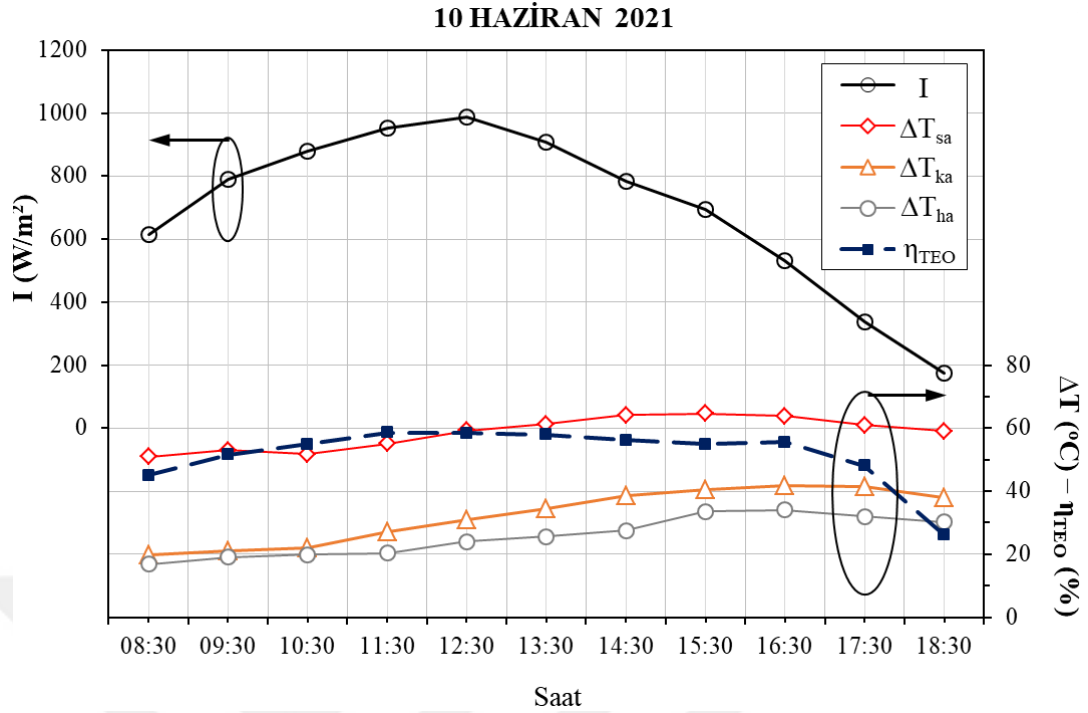
Şekil 4.7. Güneş ışıyım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (7 Haziran 2021).



Şekil 4.8. Güneş ışınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (8 Haziran 2021).



Şekil 4.9. Güneş ışınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (9 Haziran 2021).



Şekil 4.10. Güneş ışınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (10 Haziran 2021).

4.1.2. Deney-II ısı performans sonuçları

GEKS’de, kurutma odasındaki on adet havalandırma deliğinden, ön taraftaki beş havalandırma deliği kapalı ve arka taraftaki beş havalandırma deliği açık tutularak, hazırlanan kırmızıbiber numuneleri, 14-17 Haziran 2021 tarihleri arasında dört gün boyunca kurutulmuştur.

Deney-I’de olduğu gibi, Deney-II’de de GEKS’nin kurutma odasına, her birinde yaklaşık yaş ağırlığı 600-700 gram kırmızıbiber bulunan 4 adet tepsi konularak, kurutma deneyleri yapılmıştır. Deney-II’de, beşinci tepside aynı şekilde hazırlanan ve yaklaşık aynı ağırlıktaki kırmızıbiber numuneleri de, karşılaştırma amacıyla dış ortamda, direk güneş ışınlarına maruz bırakılarak kurutulmuştur.

Deney-II süresince meteorolojiden temin edilen verilerle, kurutma yapılan saatler için hesaplanan, günlük ortalama dış hava sıcaklığı, ortalama bağıl nem ve ortalama rüzgâr hızı, Tablo 4.2.’de görülmektedir. Dört günlük kurutma işlemi boyunca;

ortalama hava sıcaklığı 33,2°C, ortalama bağıl nem %15,5 ve ortalama rüzgâr hızı 5,33 km/h (~1,5 m/s) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.2. Deney-II için günlük ortalama meteorolojik veriler.

Tarih	Hava sıcaklığı (T_a) (°C)	Bağıl Nem (%)	Rüzgar hızı (km/h)
14.06.2021	33,6	15	7
15.06.2021	33	10	5
16.06.2021	32	16	4
17.06.2021	34	21	5

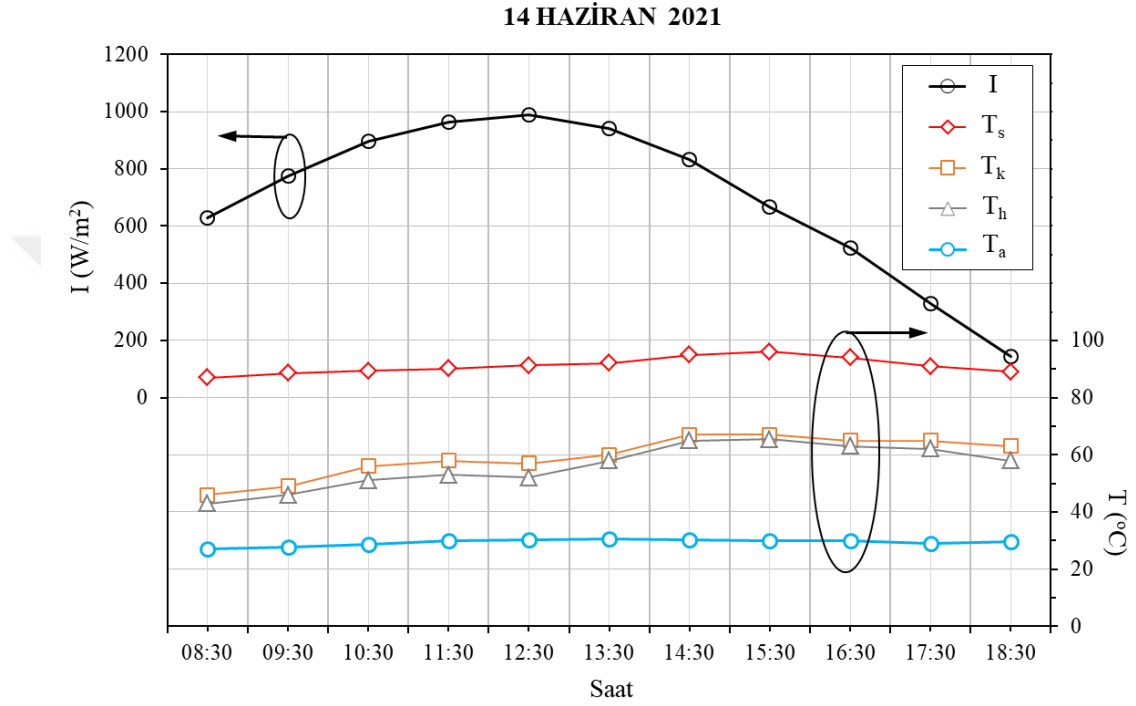
Şekil (4.11.-4.14.)’de Deney-II boyunca 14-18 Haziran 2021’de GEKS’nin farklı noktalarında (T_s , yutucu levha; T_h , kurutma odası; T_k , kollektör çıkışı; T_a , dış ortam) saatlik sıcaklık ölçümlerinin ve yatay düzleme gelen ışıınım akısının (I) gün boyunca değişimleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, Deney-I’e benzer şekilde, güneş ışıınım akısının (I) saat 12-13 arasında en yüksek değere ulaştığı ve dış ortam sıcaklığı (T_a) gün boyunca çok fazla değişmezken, yutucu yüzey sıcaklığı (T_s), kollektör çıkışı (T_k) ve kurutma odasındaki (T_h), hava sıcaklıklarının güneş ışıınım akısındaki artışa bağlı olarak yükseldiği görülmektedir.

Deney-II’de yatay düzleme gelen güneş ışıınım akısı (I) ve hesaplanan eğik düzleme gelen toplam güneş ışıınım akısı (I_T) saat 12.00’de maksimum değerine ulaşmıştır. Yatay düzleme gelen güneş ışıınım akısı ve eğik düzleme gelen toplam güneş ışıınım akısının maksimum değerlerinin dört günlük ortalamaları sırasıyla, $I_{maks, ort} = 1011 \text{ W/m}^2$ ve $I_{T maks, ort} = 1271,3 \text{ W/m}^2$ ’dir.

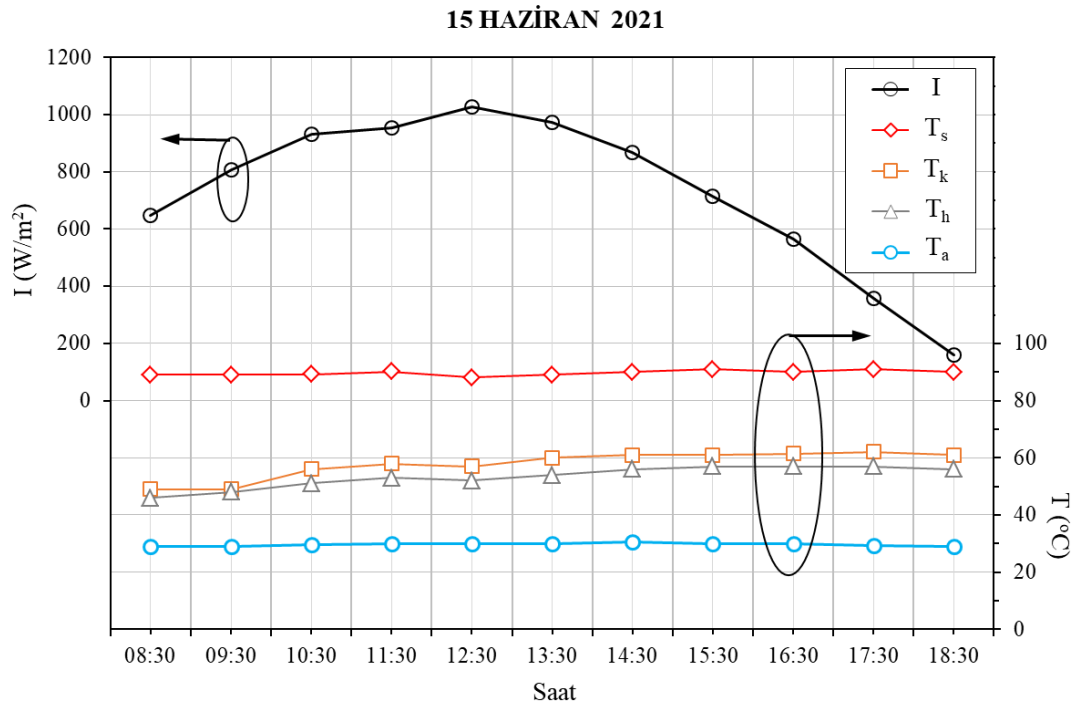
Deney-II süresince, aynı zamanda kollektör girişindeki hava sıcaklığı da olan dış ortam sıcaklığı (T_a), gün boyunca neredeyse sabit kalmıştır. Dört gün boyunca ortalama dış ortam sıcaklığı $T_{a,ort} = 30,3^\circ\text{C}$ ’dir.

Deney-II süresince yutucu yüzey sıcaklığı T_s , Deney-I’e göre daha fazla değişim göstermiştir. Özellikle 1., 3. ve 4. günlerde (14, 16 ve 17 Haziran) 13:30’dan sonra artış ~8,4 °C olmuştur. Deney-II’de dört gün boyunca ortalama yutucu yüzey sıcaklığı $T_{s,ort} = 89,1^\circ\text{C}$ ve ölçülen maksimum yutucu yüzey sıcaklığı da $T_{s,maks} = 97^\circ\text{C}$ ’dir.

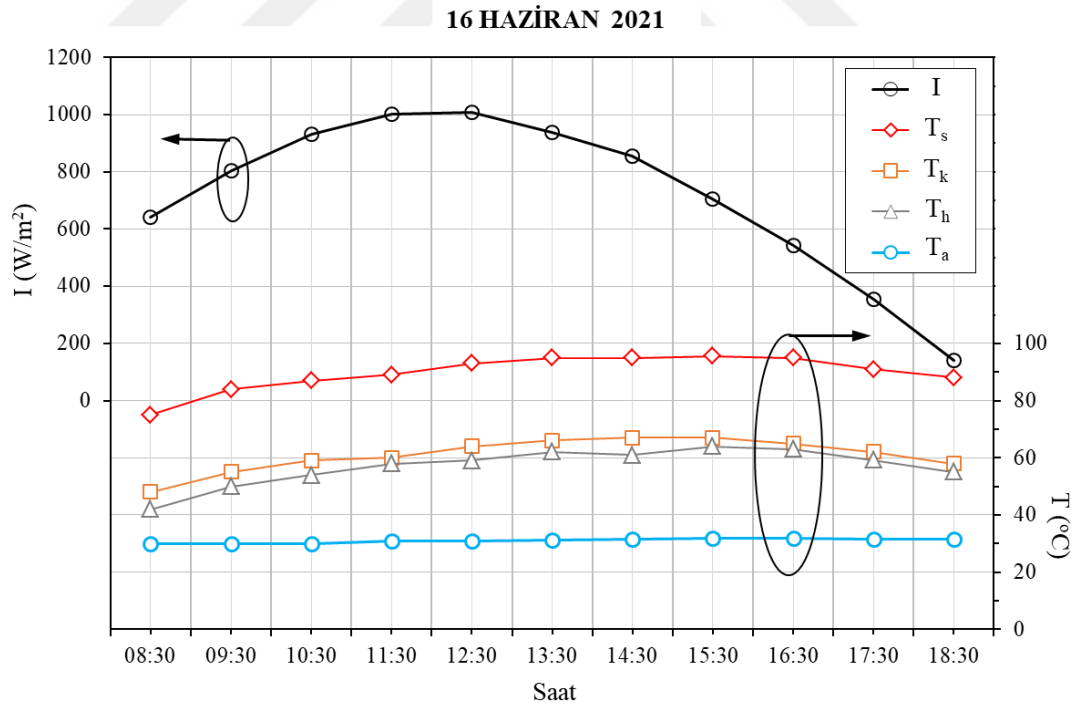
Kollektör çıkış sıcaklığı (T_k) ve kurutma odası sıcaklığı (T_h), Deney-I’de olduğu gibi, gün boyunca yutucu yüzey sıcaklığını (T_s) izleyen değişimler göstermiştir. Kollektör çıkış sıcaklığı ve kurutma odası sıcaklığının dört günlük ortalamaları sırasıyla, $T_{k,ort}=59,6$ °C ve $T_{h,ort}=55,6$ °C’dir. Bu iki sıcaklığın dört gün boyunca ölçülen maksimum değerleri de sırasıyla $T_{k,maks}= 71$ °C ve $T_{h,maks}= 65$ °C’dir.



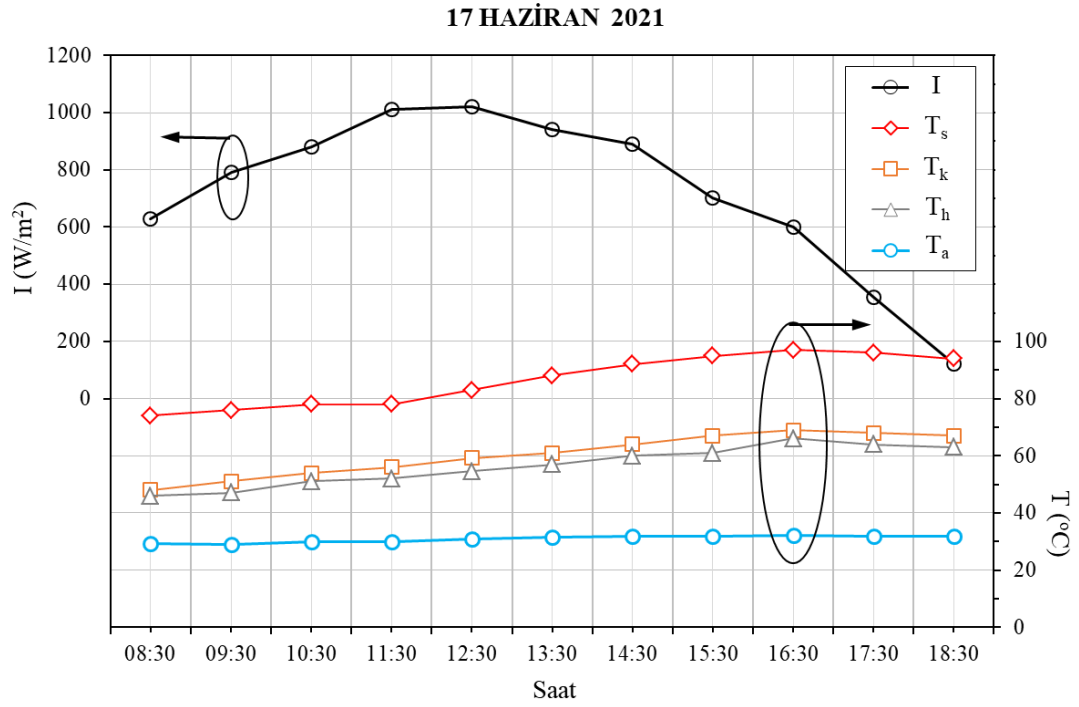
Şekil 4.11.Güneş ışınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (14 Haziran 2021).



Şekil 4.12. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değışimi (15 Haziran 2021).



Şekil 4.13. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değışimi (16 Haziran 2021).



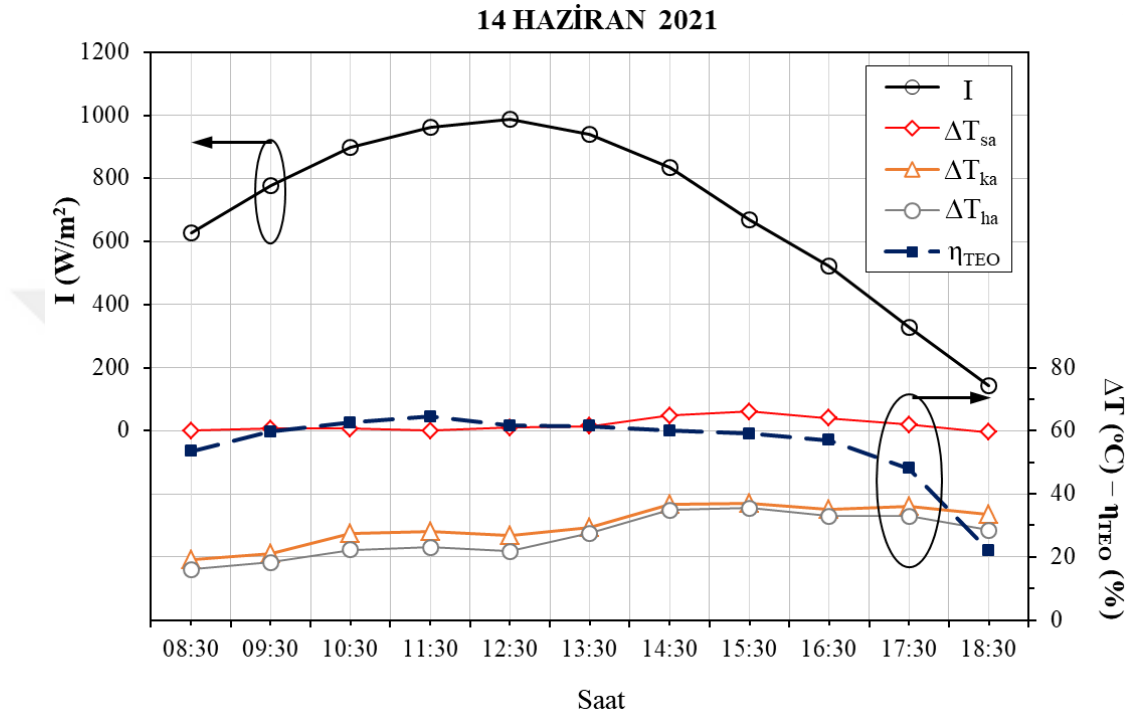
Şekil 4.14. Güneş ışınlam akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi (17 Haziran 2021).

Deney-II’de, gün boyunca ölçülen güneş ışınlam akısının (I), Bölüm 3’te önerilen kollektör ısıl modeli kullanılarak hesaplanan teorik ısı veriminin (η_{TEO}) ve kollektörde ölçülen sıcaklık farklarının gün boyunca değişimi Şekil (4.15.-4.18.)’de verilmiştir.

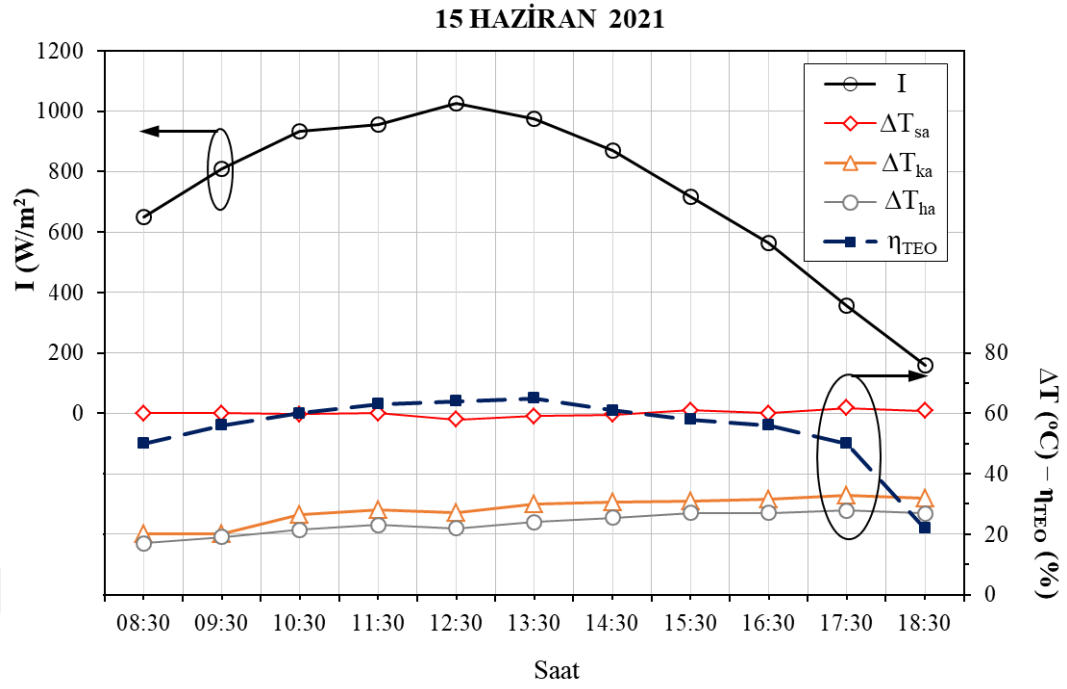
Deney-II’de, yutucu yüzey sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki fark ΔT_{sa} , 1., 3. ve 4. günlerde, 13:30’dan sonra $\sim 4,84$ °C artış göstermiştir. Deney-II süresince dört gün boyunca, yutucu yüzey ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkın ortalaması $\Delta T_{sa,ort} = 58,8$ °C ve maksimum değeri de $\Delta T_{sa,maks} = 61,3$ °C’dir.

Deney-II’de, kollektör çıkış sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki fark ΔT_{ka} , gün içerisinde ΔT_{sa} sıcaklık farkını izleyen bir değişim göstermiştir. Deney-II’de, dört gün boyunca, kollektör çıkışı ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkın ortalaması $\Delta T_{ka,ort} = 29,3$ °C ve maksimum değeri de $\Delta T_{ka,maks} = 33,1$ °C’dir. Bu sonuçlara göre Deney-I ve Deney-II’de, DTGK’da kurutma havası sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki farkın ortalama değerleri (Deney-I’de $\Delta T_{ka,ort} = 28,8$ °C ve Deney-II’de $\Delta T_{ka,ort} = 29,3$ °C) arasında sadece 0,5 °C’lik bir fark oluşmuştur.

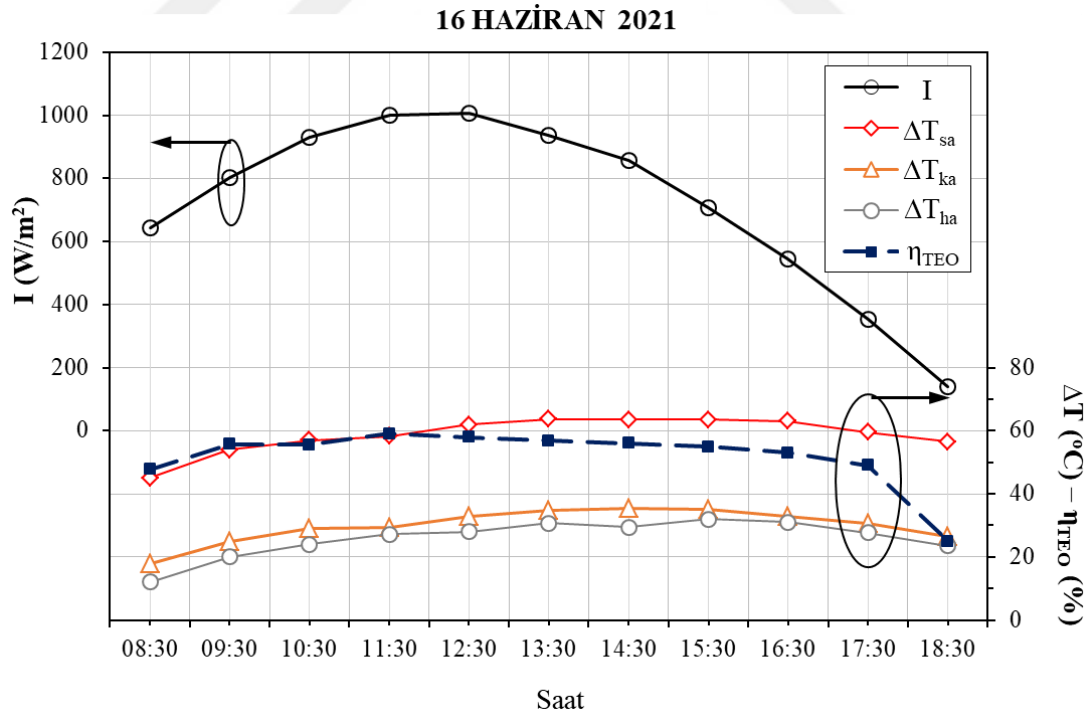
Deney-II’de kurutma odası sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki fark ΔT_{ha} , gün içerisinde ΔT_{sa} sıcaklık farkını izleyen bir değişim göstermiştir. Deney-II’de, dört gün boyunca, kurutma odası ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkın ortalaması $\Delta T_{ha,ort} = 25,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ve maksimum değeri de $\Delta T_{ha,maks} = 26,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ’dir.



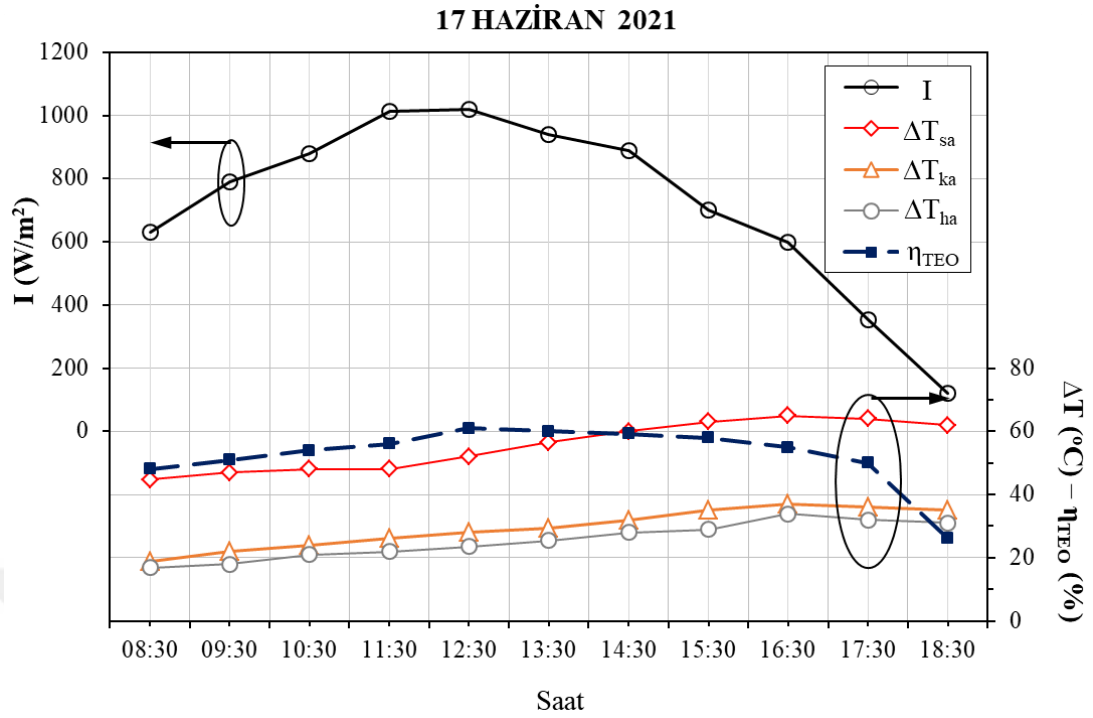
Şekil 4.15. Güneş ışınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (14 Haziran 2021).



Şekil 4.16. Güneş ışınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (15 Haziran 2021).



Şekil 4.17. Güneş ışınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (16 Haziran 2021).



Şekil 4.18. Güneş ışınım akısı, sıcaklık farkları ve teorik verimin zamanla değişimi (17 Haziran 2021).

4.2. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin Kurutma Performansı

4.2.1. Deney-I kurutma sonuçları

Bölüm 3.3.2’de belirtildiği gibi, gıdaların kuru madde miktarını belirlemek için gıdalar etüv fırınında, 70 °C hava sıcaklığında kurutulurlar [50]. Deney-I’in 3. ve 4. günleri olan 9 ve 10 Haziran 2021’de, kollektör çıkışında, 90°C’nin üzerinde hava sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu nedenle, kollektörden çıkan sıcak kurutma havasının ilk temas ettiği bir numaralı tepsideki kırmızıbiberlerin 4. günün sonundaki ağırlıkları, kırmızıbiberlerin kuru madde miktarı kabul edilmiştir. Bu kabule göre kırmızıbiberlerin kuru madde miktarı, %6,41’dir. Dolayısıyla Deney-I için yapılan tüm hesaplarda, literatürle uyumlu olarak, kırmızıbiberlerin kuru madde miktarı %6,41’e eşit alınmıştır [23, 25, 37].

Kurutma odasındaki tüm tepsilerde (tepsi 1-4) ve açık havada kurutulan kırmızıbiber numunelerinin (tepsi 5), her günün sonunda yaş baza göre hesaplanan nem miktarı Tablo 4.3.’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Deney-I’de kırmızıbiberlerin yaş baza göre günlük nem miktarı değişimleri

YAŞ BAZA GÖRE NEM MİKTARI - MC_{vb} (%)				
Tepsi no	07.06.2021	08.06.2021	09.06.2021	10.06.2021
1	68,81	19,10	0,90	0,15
2	54,18	24,93	1,94	0,32
3	44,48	29,25	3,58	0,32
4	52,99	29,40	8,96	0,45
Ortalama	55,11	25,67	3,84	0,31
5	51,56	23,13	9,53	1,09
Tepsi no	11.06.2021	12.06.2021	13.06.2021	
5	0,31	0,31	0,16	

Tablo 4.3. incelendiğinde, kurutma odasında en altta bulunan ve kollektörden gelen sıcak-kuru hava ile doğrudan temas eden, tepsi1’deki numunelerin ilk gün sonundaki nem miktarının, tüm numunelerin ortalama neminden ~%13 fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç, başlangıçtaki hızlı kuruma neticesinde, tepsi1’deki numunelerin dışında, nem geçirgenliği düşük ince bir tabakanın hızla oluşmasıyla açıklanabilir[51]. İkinci günün sonunda, tepsi 1’deki numunelerin nem miktarı, tüm numunelerin ortalama nemine göre ~%7 daha düşüktür. 2. günün sonunda en alttaki tepsi 1 ve en üstteki tepsi 4’deki numunelerin nem miktarları arasındaki fark ~%10’dur.

Tablo 4.3.’den, Deney-I’in üçüncü gününün sonunda, GEKS’nin kırmızıbiberlerin ortalama kuru baza göre nem miktarının (%6,46), literatürde kuru kırmızıbiberler için önerilen kuru baza göre nem miktarının (%7-10,6) altına düştüğü görülmektedir [23, 25, 37]. Başka bir ifadeyle GEKS’de kırmızıbiberlerin nemi, 3. günün sonunda istenen seviyelere düşmektedir ve kurutma sonlandırılmalıdır. Ancak, GEKS ile numunelerde elde edilebilecek en düşük nem miktarının tespiti amacıyla, kurutmaya 4. günde de devam edilmiştir. Dördüncü günün sonunda tüm tepsilerdeki numunelerin nem miktarları ile ortalama nem miktarı (%0,30) arasındaki fark azalmış ve tüm tepsilerdeki numunelerde nem miktarları dengelenmiştir.

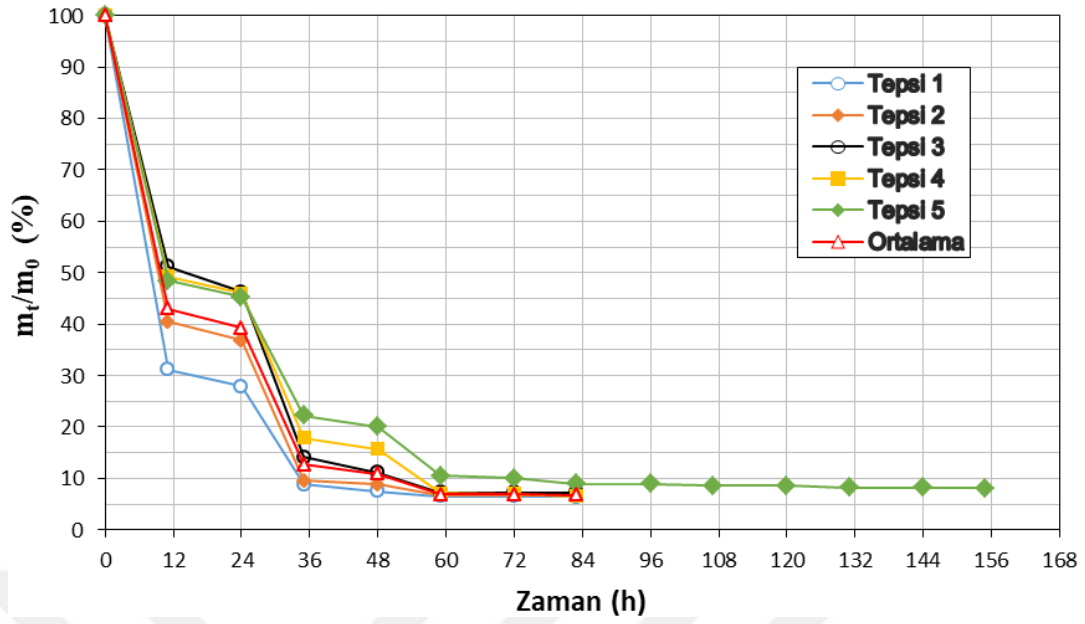
GEKS’deki numunelerin istenilen nem miktarına ulaştığı üçüncü günün sonunda, açıkta kurutulan (tepsi5) numunelerin nem miktarı (%9,53), kurutma sisteminde kurutulan numunelerin ortalama neminden (%3,84) ~%2,5 daha fazladır. Bu sonuç, GEKS’nin, açıkta kurutmaya göre kurutma süresini kısalttığını göstermektedir.

Benzer şekilde dördüncü günün sonunda, açıkta kurutulan numunelerin nem miktarı (%1,09), kurutma sisteminde kurutulan numunelerin ortalama neminden (%0,15) yaklaşık %0,8 daha fazladır. Bu da, ürünlerde düşük nem miktarının hedeflendiği derin kurutma uygulamalarında, GEKS'nin daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Açıkta kurutulan kırmızıbiberlerde (tepsi5) ulaşılabilecek en düşük nem miktarının tespiti amacıyla, bu numunelerin kurutulmasına üç gün daha devam edilmiştir. Açıkta kurutulan numunelerin son nem miktarının %0,16'nın altına düşmediği belirlenmiştir. Dolayısıyla, nem miktarındaki değişimin, kurutmanın ilk gününde hızlı olduğu (ortalama %57 kütle kaybı; sabit hızla kuruma) görülmektedir.

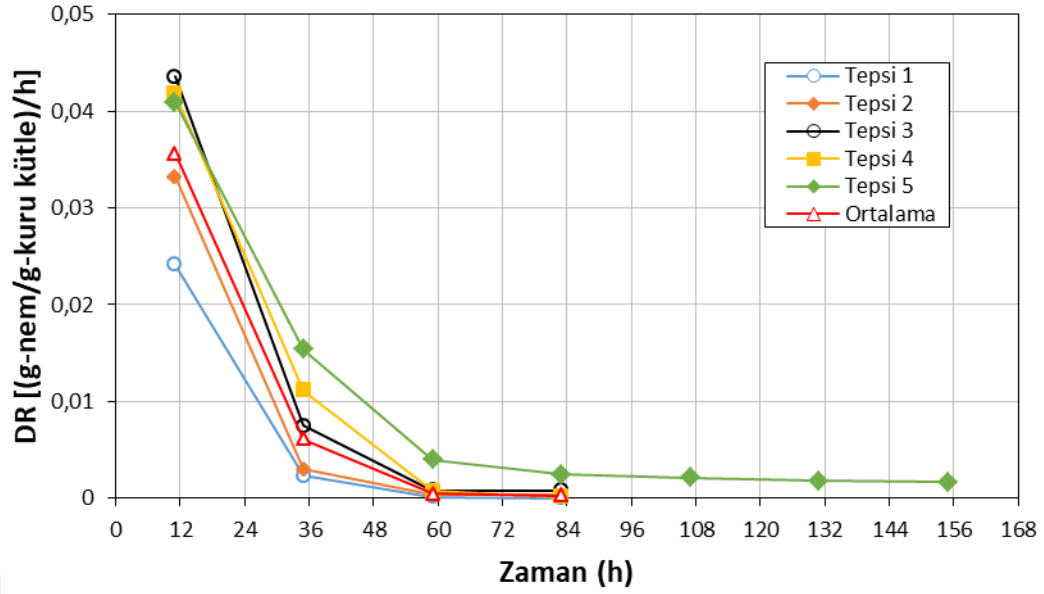
Deney-I'de kırmızıbiberlerin kütledeki değişim ($\% m_t/m_0$) Şekil 4.19.'da verilmiştir. Kurutmanın ilk gününde (0-12 saat), kırmızıbiberlerin kütle değişim oranı %43 olmuştur. İkinci kurutma gününde (24-36h) kütle değişim oranı %12,7'ye düşmüştür (ortalama %30,3 kütle kaybı). Hızlı kurumanın kısmen devam ettiği üçüncü günde (48-60h), kurumanın yavaşladığı ve kütle değişim oranının %6,9'a düştüğü (ortalama %5,8 kütle kaybı) anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, Deney-I'in ikinci ve üçüncü günlerinde, azalan hızlı kurumanın görüldüğü söylenebilir. Dördüncü günde ise, nem miktarı ile ilgili yapılan değerlendirmeye benzer şekilde, kuru GEKS'deki numunelerde kurumanın sona erdiği ve kütle değişim %6,7'ye düştüğü (ortalama %0,2 kütle kaybı) anlaşılmaktadır.

Şekil 4.19.'dan, GEKS'de tüm hava giriş ve çıkış delikleri kapalı olmasına rağmen, gece saatlerinde (1. gün 12-24h) de kurumanın devam ettiğini (ortalama %3,8 kütle kaybı) görülmektedir. İlk günün gecesi kadar olmasa da, ikinci günün gece saatlerinde (36-48h) de kırmızıbiberlerde kütle kaybı (ortalama %1,8) azalarak devam etmiştir. Bu durumun, gündüz saatlerinde ısınan GEKS'nin ısıl ataletinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



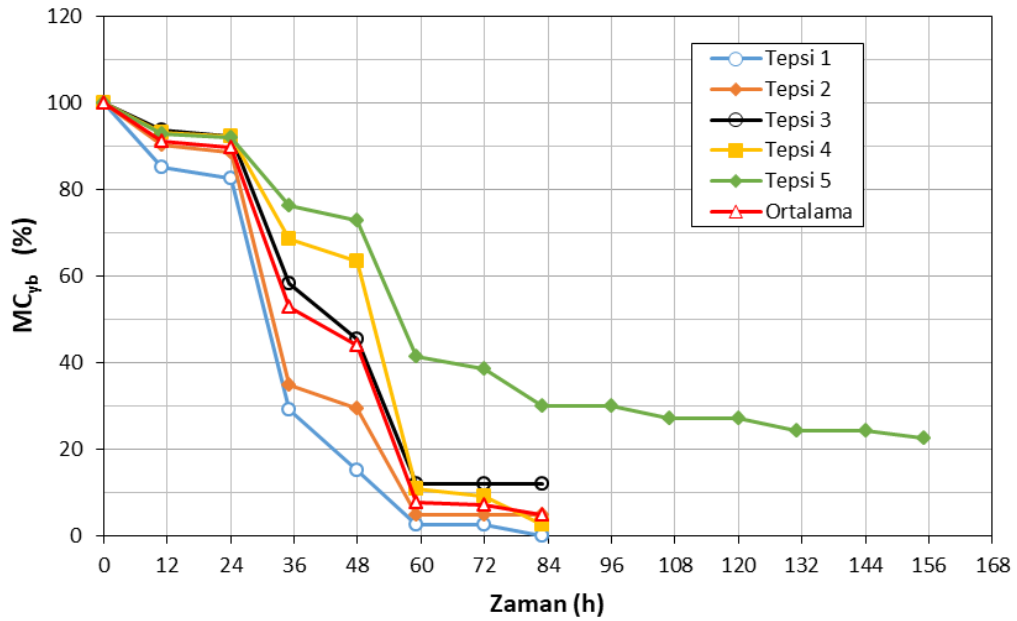
Şekil 4.19. Deney-I’de kütle değişim oranlarının zamanla değişimi.

Şekil 4.20.’de Deney-I’de kırmızıbiberlerin kuruma hızlarının (DR) zamanla değişimi gösterilmektedir. Kurutmanın ilk iki gününde (ilk 48 saatte) kırmızıbiberlerin çok hızlı (ortalama 0,006 (g-nem/g-kuru kütle)/h) kuruduğu, üçüncü günde (48-72h) ise kuruma hızının düştüğü (ortalama 0,0005 (g-nem/g-kuru kütle)/h) belirlenmiştir. Dördüncü günde ise kurumanın sona erdiği (ortalama 0,0003 (g-nem/g-kuru kütle)/h) görülmektedir. Bu sonuçlardan, deneylerin ilk gününde kırmızıbiberlerdeki serbest suyun hızla buharlaştığı (sabit hızla kuruma), sonrasında ise hücrelerdeki bağlı suyun daha yavaş (azalan hızlı kuruma) buharlaştığı değerlendirilebilir.



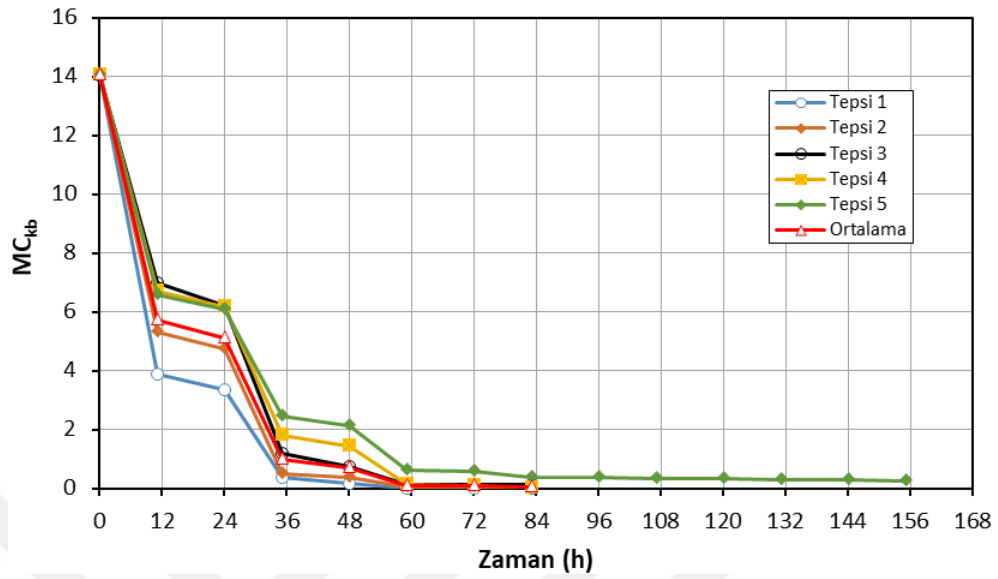
Şekil 4.20. Deney-I'de kurutma hızlarının zamanla değişimi.

Deney-I'de GEKS'de ve açıkta kurutulan kırmızıbiberlerin yaş baza nem miktarının (MC_{yb}) zamanla değişimi Şekil 4.21.'de verilmiştir. Numunelerin nem miktarındaki değişim, üçüncü günün sonunda (60h), GEKS'de istenen seviyede kurumanın gerçekleştiğini ve ortalama MC_{yb} 'nin %7,25'e düştüğünü göstermektedir. Açıkta kurutulan numunelerde üçüncü günün sonunda (60h) MC_{yb} sadece %38,77'e düşmüş ve yedinci günün sonunda ancak %21,11'e düşmüştür.



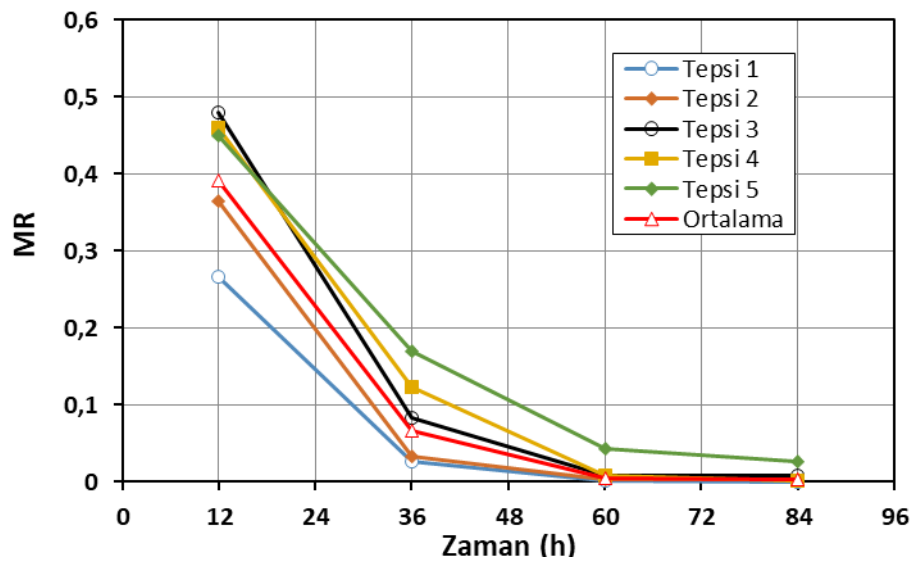
Şekil 4.21. Deney-I'de kırmızıbiberlerin yaş baza göre nem miktarının zamanla değişimi.

Şekil 4.22.'de kırmızıbiberlerin MC_{kb} 'nın zamanla değişimi verilmiştir.



Şekil 4.22. Deney-I'de kırmızıbiberlerin kuru baza göre nem miktarının zamanla değişimi.

Deney-I'de kırmızıbiberlerin kuru baza göre boyutsuz nem oranının (MR) zamanla değişimi Şekil 4.23.'de verilmiştir. Kurutmanın ilk gününde (0-12 saat), ortalama MR, 0,39 hesaplanmıştır. İkinci kurutma gününde (24-36 saat) ortalama MR 0,07'ye düşmüştür (%82 azalma). Üçüncü günde (48-60h), kurumanın daha da yavaşladığı ve ortalama MR'nin 0,005'e düştüğü belirlenmiştir (%92 azalma). Dördüncü günde ise, ortalama MR 0,003'e düşmüş (%40 azalma) ve kuruma sona ermiştir.



Şekil 4.23. Deney-I'de boyutsuz nem oranının zamanla değişimi.

4.2.2. Deney-II kurutma sonuçları

Deney-II’de yapılan tüm hesaplarda, kırmızıbiberlerin kuru madde miktarı; Deney-I’e olduğu gibi tepsi 1’deki numunelerin dördüncü günün sonundaki kuru madde miktarı olan %7,72’ye eşit alınmıştır.

Kurutma odasındaki tüm tepsilerde (tepsi 1-4) ve açık havada kurutulan (tepsi 5) kırmızıbiberlerin, her günün sonunda yaş baza göre hesaplanan nem miktarı Tablo 4.4.’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Deney-II’de kırmızıbiberlerin yaş baza göre günlük nem miktarı değişimleri.

Yaş Ağırlığa Göre Nem Miktarı MC_{vb} (%)				
Tepsi No	14.06.2021	15.06.2021	16.06.2021	17.06.2021
1	68,6	18,8	0,9	0,1
2	59,3	27,3	1,4	0,2
3	54,6	32,1	1,5	0
4	51,5	34,0	2,3	0
Ortalama	58,5	28,0	1,52	0,15
5	53,0	25,7	6,3	0,3
Tepsi No	18.06.2021	19.06.2021	20.06.2021	
5	0,1	0,1	0	

Tablo 4.4. incelendiğinde, Deney-I’e benzer şekilde, kurutma odasında en altta bulunan tepsi 1’deki numunelerin ilk gün sonundaki nem miktarının, tüm numunelerin ortalama neminden ~%12 fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun, başlangıçta yüksek sıcaklıktaki kuru havanın etkisiyle görülen hızlı kuruma neticesinde, tepsi 1’deki numunelerin dışında hızla oluşan, nem geçirgenliği düşük ince bir tabakadan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. İkinci günün sonunda, tepsi 1’deki numunelerin nem miktarı, tüm numunelerin ortalama nemine göre ~%9 daha düşüktür. 2. günün sonunda en alttaki tepsi 1 ve en üstteki tepsi 4’deki numuneler arasındaki nem farkı ~%15’dir.

Deney-II’in üçüncü gününün sonunda, GEKS’deki kırmızıbiberlerin ortalama kuru baza göre nem miktarının (%7,76), literatürde kuru kırmızıbiberler için önerilen kuru baza göre nem miktarı (%7-10,6) aralığında olduğu görülmektedir [23, 25, 37]. Başka bir ifadeyle GEKS’de, 3. gün içerisinde, kırmızıbiberlerin nemi istenen seviyelere düşmektedir. Ancak, GEKS ile numunelerde elde edilebilecek en düşük

nem miktarının tespiti amacıyla, kurutma işlemine Deney-I’de olduğu gibi 4. günde de devam edilmiştir. Dördüncü günün sonunda tüm tepsilerdeki numunelerin nem miktarı ile ortalama nem (%0,11) arasındaki fark azalmış ve tüm tepsilerdeki numunelerde nem miktarları dengelenmiştir.

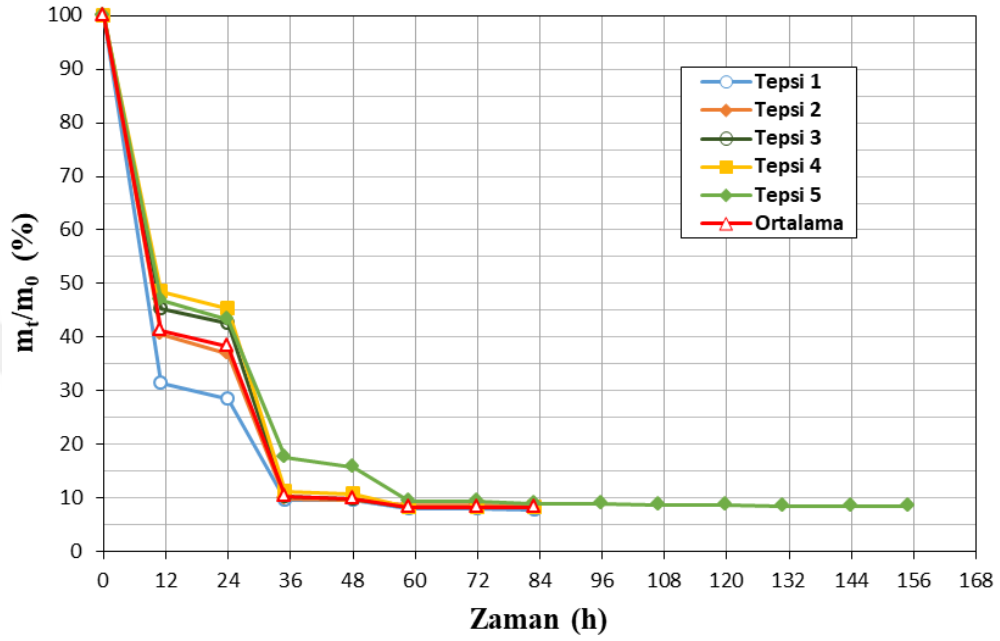
Kurutma sistemindeki numunelerin istenilen nem miktarına ulaştığı üçüncü günün sonunda, açıkta kurutulan (tepsi 5’deki) numunelerin nem miktarı (%6,3), GEKS’de kurutulan numunelerin ortalama neminden (%1,52) ~%4,8 daha fazladır. Bu sonuç, kurutma sisteminin, açıkta kurutmaya göre kurutma süresini kısalttığını göstermektedir.

Benzer şekilde dördüncü günün sonunda, açıkta kurutulan numunelerin nem miktarı (%0,46), GEKS’de kurutulan numunelerin ortalama neminden (%0,11) yaklaşık ~%4,6 daha fazladır.

Açıkta kurutulan kırmızıbiberlerde ulaşılacak en düşük nem miktarının tespiti amacıyla, tepsi 5’deki numunelerin kurutulmasına üç gün daha devam edilmiştir. Açıkta kurutulan numunelerin son nem miktarının %0,15’in altına düşmediği belirlenmiştir.

Deney-II’de kırmızıbiberlerin kütledeki değişim ($\%m_t/m_o$) Şekil 4.23’te verilmiştir. Deney-I’e benzer şekilde, kurutmanın ilk gününde (0-12 saat), kırmızıbiberlerin kütle değişim oranı %41,3 olmuştur. Dolayısıyla nem miktarlarındaki değişimin hızlı olduğu (ortalama %58,7 kütle kaybı) görülmektedir. İkinci kurutma gününde (24-36h) de kütle değişim oranı %10,2’ye düşmüştür (ortalama %31,1 kütle kaybı). Hızlı kurutmanın kısmen devam ettiği üçüncü günde (48-60h), kurutmanın yavaşladığı ve kütle değişim oranının %8,3’e düştüğü (ortalama %1,9 kütle kaybı) anlaşılmaktadır. Dördüncü günde ise, nem miktarları ile ilgili yapılan değerlendirmeye benzer şekilde, GEKS’deki numunelerde kurutmanın sona erdiği ve kütle değişim oranının %8,1’e düştüğü (ortalama %0,2 kütle kaybı) anlaşılmaktadır.

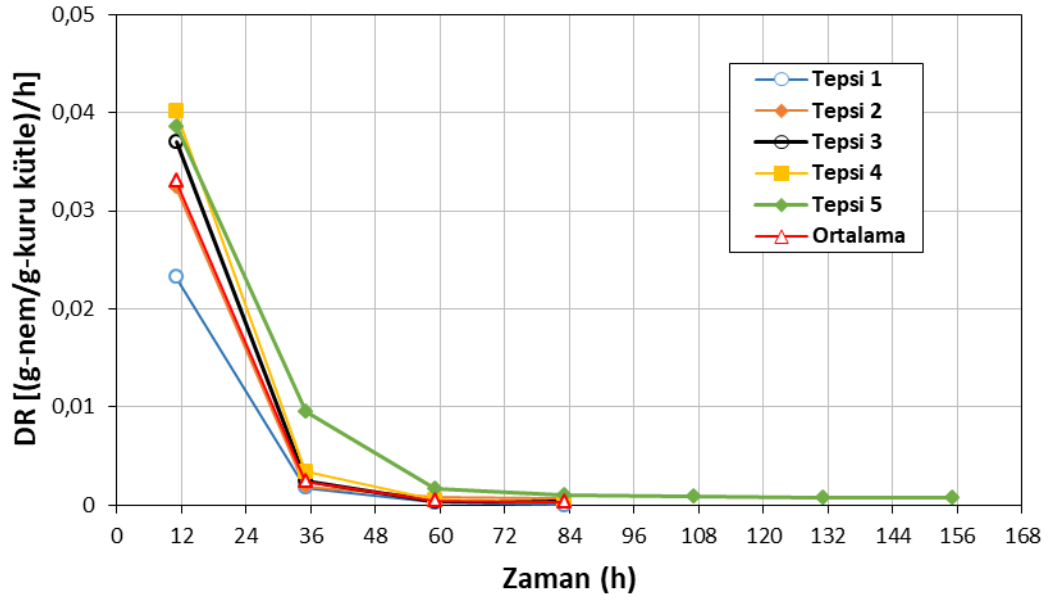
Deney-I’de olduğu gibi, Şekil 4.24.’de, GEKS’deki tüm hava giriş ve çıkış deliklerinin kapalı olduğu, gece saatlerinde (1. gün 12-24h) de kurumanın devam ettiği (ortalama %3,2 kütle kaybı) anlaşılmaktadır. Gece saatlerindeki kurumanın, GEKS’nin ısıtılma ortamından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.24. Deney-II’de kütle değişim oranlarının zamanla değişimi

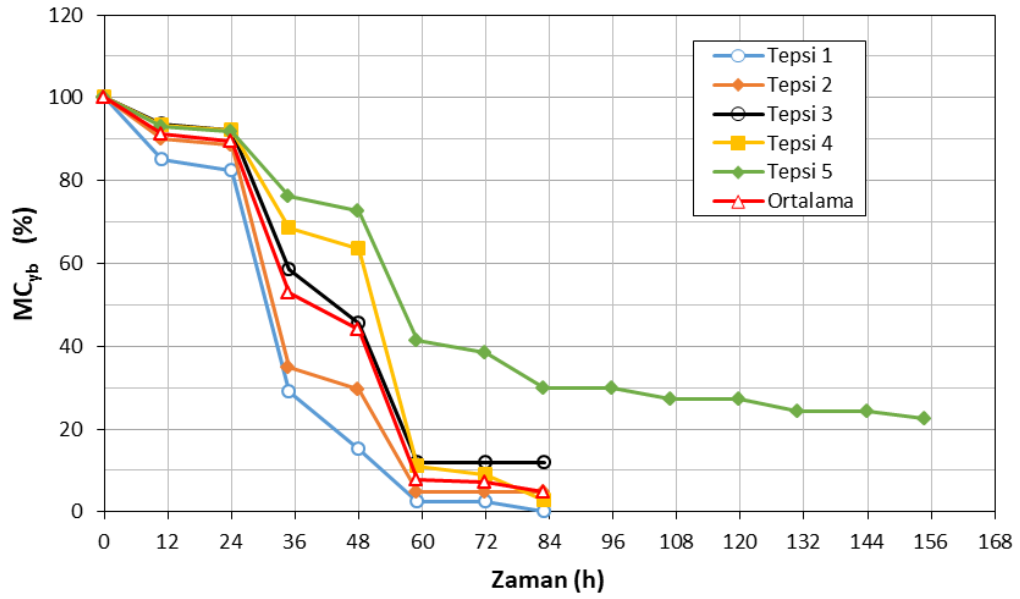
Deney-I’de olduğu gibi, Deney-II’de de ilk iki günde kurutma hızlarının (ortalama 0,0023 (g-nem/g-kuru kütle)/h) yüksek olduğu Şekil 4.25.’de görülmektedir. Üçüncü günde (48-72h) kuruma hızı oldukça yavaşlamış (ortalama 0,0005 (g-nem/g-kuru kütle)/h) ve dördüncü günde ise kuruma tamamen durmuştur (ortalama 0,0003 (g-nem/g-kuru kütle)/h).

Bu sonuçlar, birinci günde serbest suyun yüzeyden hızla buharlaştığını (sabit hızla kuruma) göstermektedir. İkinci günden itibaren azalan kuruma hızı, üçüncü günde daha da yavaşlamıştır. Başka bir ifadeyle, ikinci ve üçüncü günlerde, difüzyon kontrollü (azalan hızlı) kurumanın devam ettiği söylenebilir.

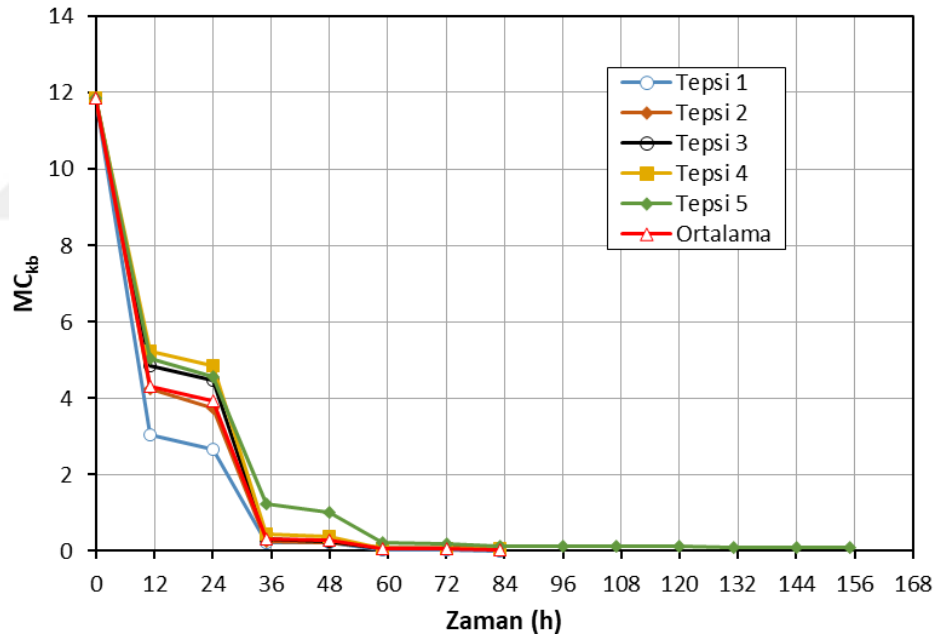


Şekil 4.25. Deney-II’de kurutma hızlarının zamanla değişimi.

Deney-II’de GEKS’de ve açıkta kurutulan kırmızıbiberlerin yaş baza göre nem miktarının (MC_{yb}) zamanla değişimi Şekil 4.26.’de verilmiştir. Numunelerdeki nem miktarının zamanla değişimi, Deney-I’de olduğu gibi, üçüncü günü sonunda (60h); GEKS’de istenen kurumunun gerçekleştiğini (ortalama $MC_{yb} \sim \%6,6$) göstermektedir. Açıkta kurutulan numunelerde üçüncü günün sonunda (60h) MC_{yb} sadece $\sim \%19$ ’a düşmüş ve yedinci günün sonunda ancak $\sim \%9,3$ ’e düşmüştür.

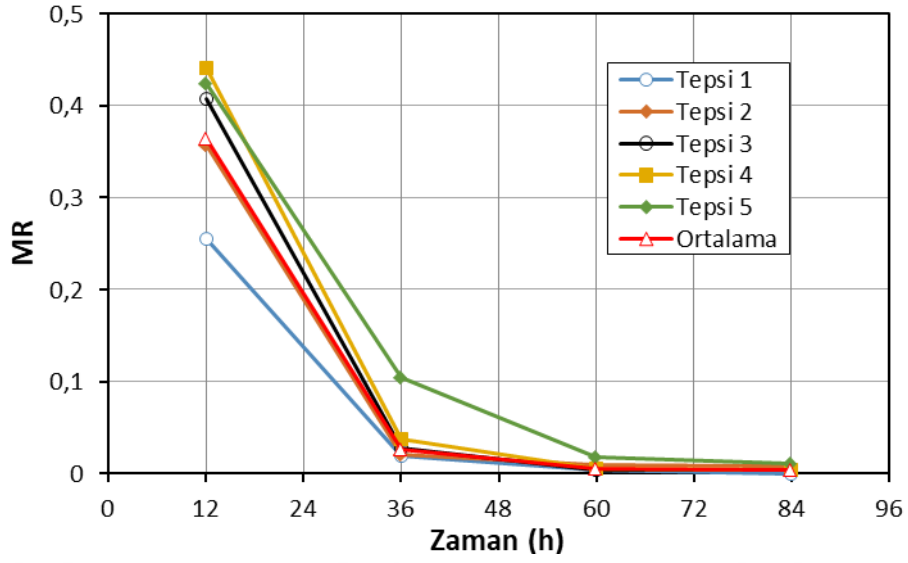


Şekil 4.26. Deney-II'de kırmızıbiberlerin yaş baza göre nem miktarının zamanla değişimi.



Şekil 4.27. Deney-II'de kırmızıbiberlerin kuru baza göre nem miktarının zamanla değişimi.

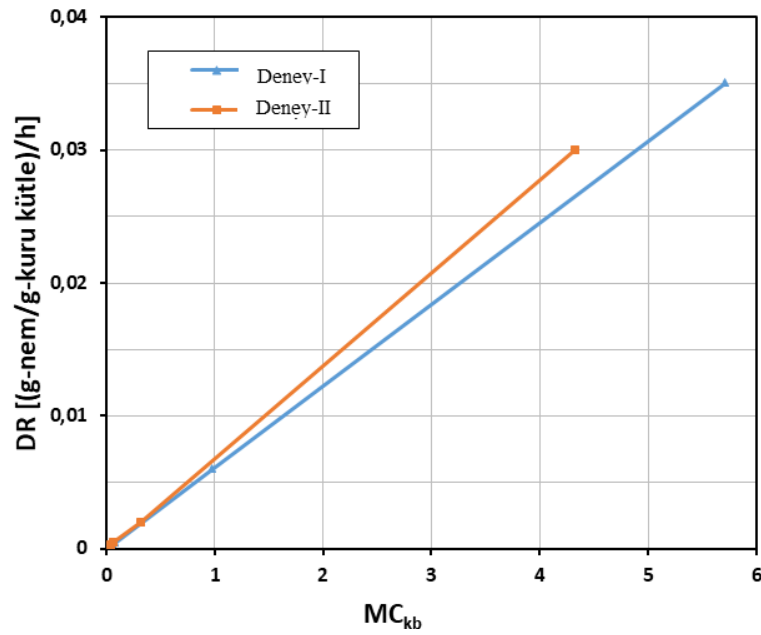
Deney-II'de kırmızıbiberlerin kuru baza göre boyutsuz nem oranının (MR) zamanla değişimi Şekil 4.28.'de verilmiştir. Kurutmanın ilk gününde (0-12 saat), ortalama MR 0,36'dır. İkinci günde (24-36h) ortalama MR 0,03'e düşmüştür (%91 azalma). Kurutmanın yavaşlayarak devam ettiği üçüncü günde (48-60h), ortalama MR'nin 0,005'e düştüğü belirlenmiştir (%83 azalma). Kurutmanın sona erdiği dördüncü günde ise, ortalama MR 0,003'e düşmüştür (%40 azalma).



Şekil 4.28. Deney-II'de boyutsuz nem oranının zamanla değişimi.

4.2.3. Kuruma hızının nem miktarıyla değişimi

Şekil 4.29.'da Deney-I ve Deney-II'de hesaplanan kurutma hızlarının (DR) kırımsız biberlerdeki nem miktarı (MC_{kb}) ile değişimini gösterilmektedir. Kurutmanın başlangıcında (yüksek MC_{kb}) kuruma hızının yüksek olduğu, nem miktarı düştükçe kuruma hızının da düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.29. Kuruma hızının nem miktarı ile değişimi.

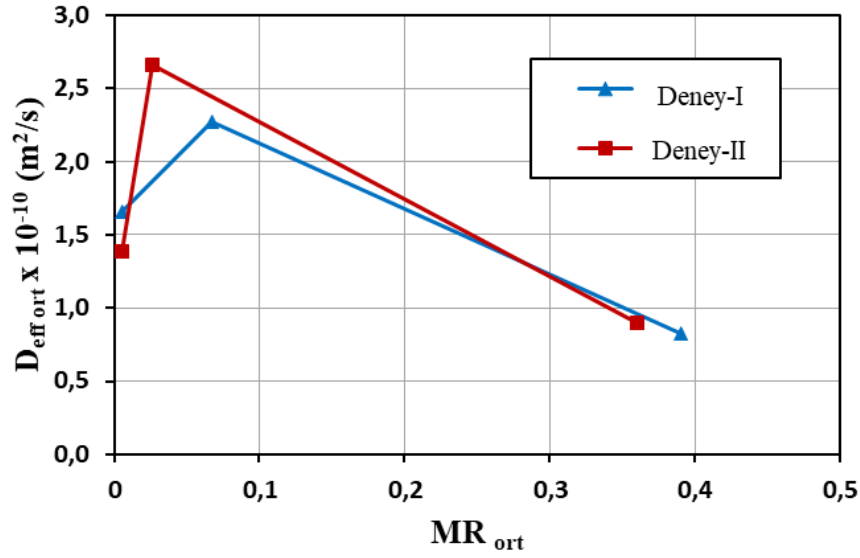
4.2.4. Efektif difüzyon katsayısı sonuçları

Deney-I ve Deney-II'nin sonuçlarıyla ve ince tabaka kurutma modeli kullanılarak hesaplanan efektif difüzyon katsayıları, Tablo 4.5.'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yaklaşık aynı kurutma sıcaklıklarında elde edilen literatür verileriyle kıyaslandığında, kabul edilebilir aralıktadır [45,46]. GEKS'de difüzyon katsayısının yüksekliği, kırmızıbiberlerden kütle geçişinin iyileştiğini göstermektedir.

Tablo 4.5. Kurutulan kırmızıbiberler için hesaplanan ortalama efektif difüzyon katsayıları.

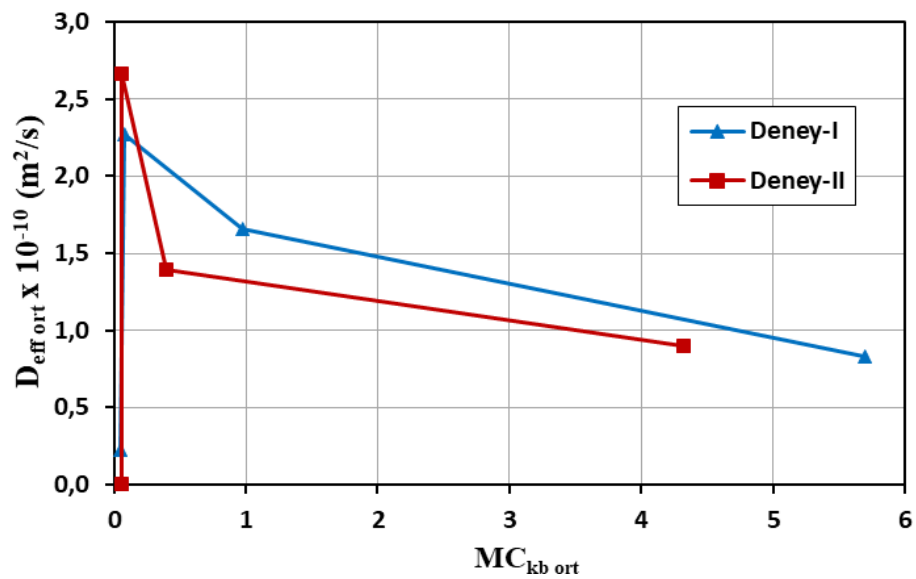
GEKS'de Kurutma			Dış Ortamda Kurutma		
	Deney tarihleri	Sıcaklık $T_{h,ort}$ (°C)	D_{eff} ($\times 10^{-10}$ m ² /s)	Sıcaklık $T_{a,ort}$ (°C)	D_{eff} ($\times 10^{-10}$ m ² /s)
Deney-I	07.06.2021	48,6	0,83	30,0	0,67
	08.06.2021	51,6	1,66	30,0	1,76
	09.06.2021	59,3	2,27	29,5	3,32
	10.06.2021	55,0	2,26	29,0	3,88
	14.06.2021	55,0	0,92	30,0	0,74
Deney-II	15.06.2021	53,0	3,93	29,0	2,34
	16.06.2021	56,0	5,74	29,5	4,30
	17.06.2021	56,0	6,16	30,0	4,91
		40-70	0,4-2,0	Ertekin, 2002, [45]	
		20-50	5-8,3	Scala ve Crapiste, 2008, [46]	

Deney-I ve Deney-II'de hesaplanan günlük ortalama efektif difüzyon katsayılarının boyutsuz nem oranıyla değişimi Şekil 4.30.'da verilmiştir. Boyutsuz nem oranı azaldıkça efektif difüzyon katsayısı artmaktadır. Nem oranının düşmesiyle numunelerin kalınlıkları azalırken, nemin difüzyonu ve yüzeye çıkması kolaylaşır.



Şekil 4.30. Efektif difüzyon katsayısının boyutsuz nem oranı ile değişimi.

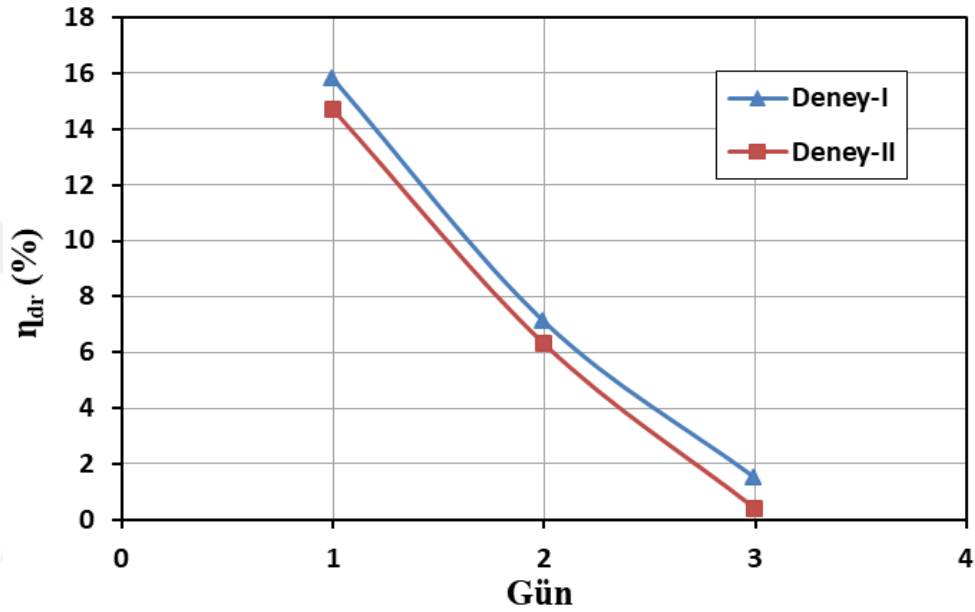
Deney-I ve Deney-II’de GEKS’de kurutulan kırmızıbiberler için hesaplanan günlük ortalama efektif difüzyon katsayılarının kuru baza göre nem miktarıyla (MC_{kb}) değişimi Şekil 4.31.’de verilmiştir. Kurutmanın birinci gününde, sıcak kurutma havası kırmızıbiberleri yeterince ısıtamadığından, ürünlerdeki nemin dış yüzeye hareketi ve buharlaşması yavaştır (düşük D_{eff} değerleri). İkinci günde numunelerin kütlesi ve hacmi (kalınlıkları) azaldıkça nemin yüzeye ulaşması ve buharlaşması hızlanmıştır. Üçüncü günde bu etkiler daha belirgindir. Dördüncü günde ise kırmızıbiberlerdeki nem miktarının düşmesiyle D_{eff} değerleri de hızla düşmüştür.



Şekil 4.31. Efektif difüzyon katsayısının nem miktarı ile değişimi.

4.2.5. Güneş enerjili kurutma sisteminin enerji verimi

Deney-I ve Deney-II’de birinci günde GEKS’nin enerji verimi sırasıyla ~%16 ve ~%15’tir. İkinci günde Deney-I için %7 olan enerji verimi, Deney-II için %6 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.32). Üçüncü günde Deney-I ve Deney-II için enerji verimleri sırasıyla %1 ve %0,4’tür.



Şekil 4.32. GEKS’nin enerji verimliliği

4.2.6. Özgül enerji tüketimi ve özgül nem çekme oranları

GEKS’de Deney-I ve Deney-II için DTGK’ya gelen günlük ortalama güneş ışıınım akısı ve kırmızıbiberlerden uzaklaştırılan günlük toplam nem kütlesi kullanılarak, ortalama özgül enerji tüketimi (SEC) ve özgül nem çekme oranları (SMER) hesaplanmıştır. Tablo 4.6.’da günlük ortalama SEC ve SMER sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.6. GEKS’nin özgül enerji tüketimi ve özgül nem çekme oranı.

Deney Günleri	Deney-I		Deney-II	
	SEC (kW-h/kg)	SMER (kg/kW-h)	SEC (kW-h/kg)	SMER (kg/kW-h)
1.Gün	3,77	0,26	4,25	0,23
2.Gün	8,28	0,12	10,08	0,099
3.Gün	54,06	0,108	171,18	0,0058
4.Gün	1291,9	0,0077	2580,51	0,00038
1-2. Gün ort.	6,02	0,19	7,13	0,167
	1,784	0,56	Kumar ve ark.[47]	

Hesaplanan SEC ve SMER sonuçları literatürle uyumludur. Üçüncü günden itibaren kırmızıbiberlerden ayrılan nem miktarının azalması nedeniyle, çok yüksek SEC ve çok düşük SMER değerleri hesaplanmıştır. Bu da kırmızıbiberlerin ikinci günün sonunda kuruduğunun diğer bir göstergesidir.

4.3. Doğal Taşınımli Güneş Kollektörünün Isıl Performansı

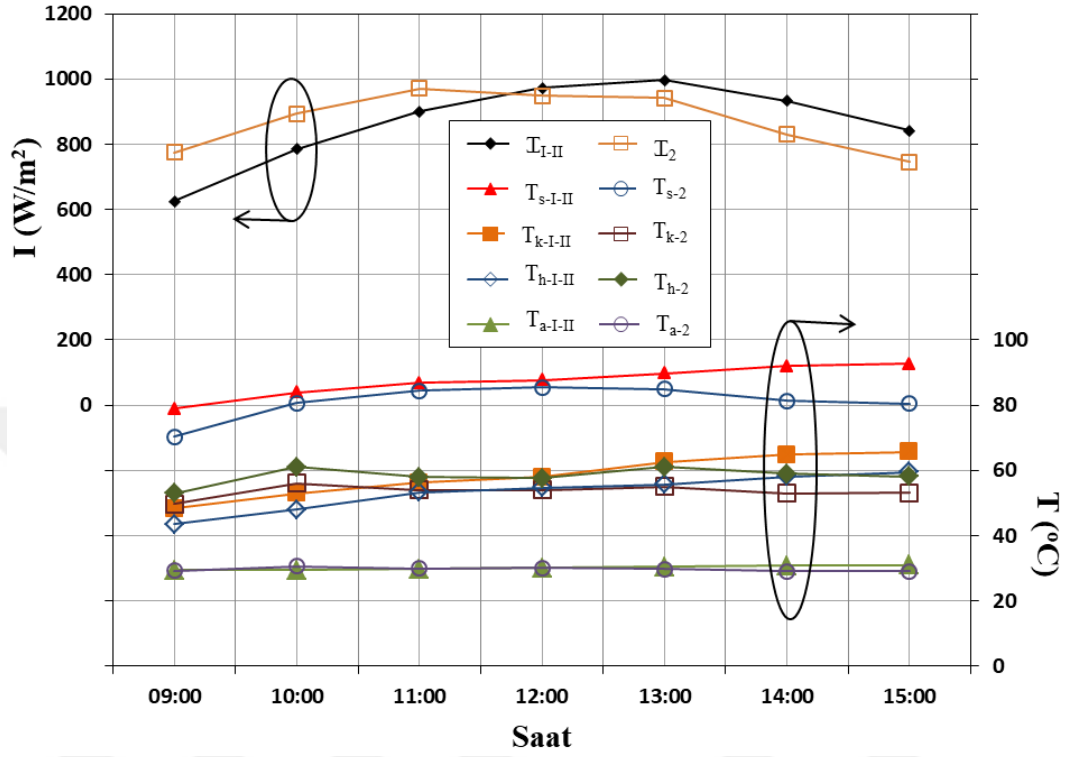
Deneylerde kullanılan GEKS'nin DTGK'nın, Bölüm 3'te önerilen ısı model ile hesaplanan teorik ve deneysel performans sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla, 2 Ekim 2021'de ek bir deney yapılmıştır. Bu deney; Deney-I ve Deney-II'e benzer şekilde, akışa karşı direnç oluşturmak amacıyla kurutma odasına dört adet boş tepsi yerleştirilerek ve Deney-I'deki gibi, on hava tahliye deliğinin tamamı açık tutularak yapılmıştır. Deney sırasında, kurutma deneylerinde yapılan sıcaklık ölçmelerine ek olarak, DTGK'nın giriş kesitindeki hava hızları da ölçülmüştür.

2 Ekim 2021 tarihinde elde edilen sonuçlar ile Deney-I ve Deney-II'nin günlük ortalama değerlerinden elde edilen (T_a ; dış ortam sıcaklığı, T_k ; kollektör çıkış sıcaklığı, T_h ; kurutma odası sıcaklığı, T_s ; yutucu yüzey sıcaklığı ve I ; güneş ışıyım akısı) sıcaklıklar ve güneş ışıyım akılarının değişimi Şekil 4.31.'de verilmiştir.

Deney-I ve Deney-II'de ortalama dış ortam hava sıcaklığı $T_{a-I-II} = 30,1$ °C, 2 Ekim 2021'de ortalama dış ortam hava sıcaklığı $T_{a-2} = 29,7$ °C'dir. Deney-I ve Deney-II'de ortalama güneş ışıyım akısı $I_{I-II} = 865,30$ W/m², 2 Ekim 2021'de ortalama güneş ışıyım akısı $I_2 = 872,30$ W/m²'dir. Deney-I ve Deney-II için günlük ortalama dış ortam hava sıcaklıkları ve güneş ışıyım akıları arasındaki fark önemsizdir. Deney-I ve Deney-II'nin yapıldığı sekiz günde ortalama rüzgar hızları 2-7 km/h arasında değişirken, 2 Ekim 2021 günü ortalama rüzgar hızı 5 km/h'dir.

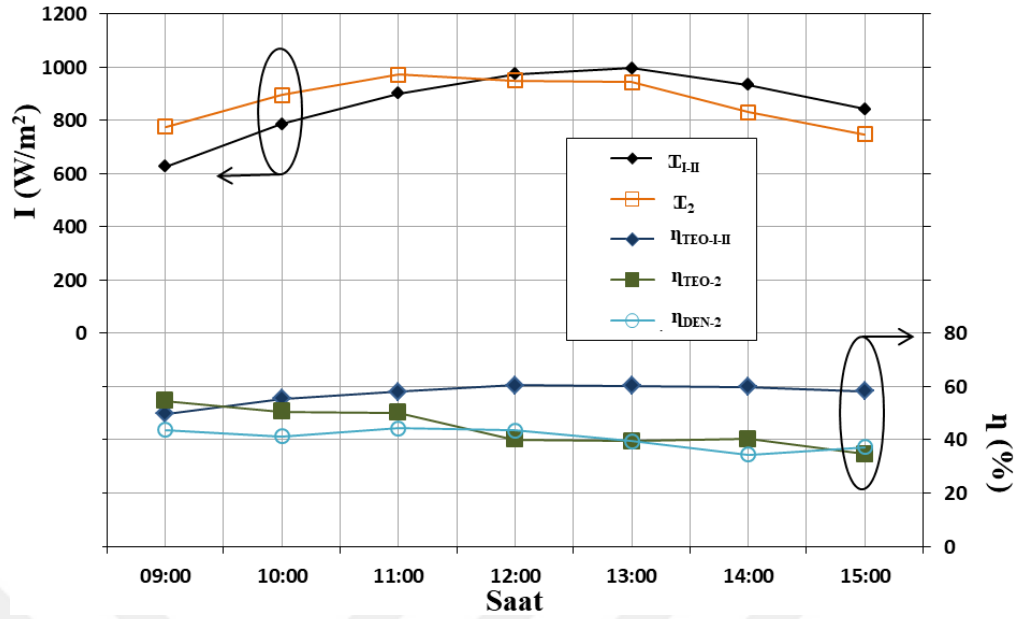
Deney-I ve Deney-II'de ortalama yutucu yüzey sıcaklığı $T_{s-I-II} = 87,4$ °C ve 2 Ekim 2021'de ortalama yutucu yüzey sıcaklığı $T_{s-2} = 81,1$ °C'dir. Deney-I ve Deney-II'de ortalama kollektör çıkış sıcaklığı $T_{k-I-II} = 58,4$ °C ve 2 Ekim 2021'de ortalama kollektör çıkış sıcaklığı $T_{k-2} = 53,5$ °C'dir. Yutucu yüzey sıcaklıkları ve kollektör

çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın günlük ortalama rüzgar hızları arasındaki farktan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.33. Güneş ışıınım akısı ve kurutma sisteminde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimi

Deney-I ve Deney-II’de DTGK’nın ortalama teorik verimi ve 2 Ekim 2021’de hesaplanan teorik ve deneysel verimler ile güneş ışıınım akılarının zamanla değişimi Şekil 4.34.’de verilmiştir.



Şekil 4.34. Güneş ışıınım akısı, teorik ve deneysel verimlerin zamanla değışimi

Deney-I ve Deney-II’de DTGK’nın ortalama teorik verimi $\eta_{TEO-I-II} = \%57,4$ ve 2 Ekim 2021’de ortalama teorik verim $\eta_{TEO-2} = \%44,3$ ’tür. 2 Ekim 2021’de hesaplanan ortalama deneysel verim ise $\eta_{DEN-2} = \%40,6$ ’dır ve teorik verimle uyumludur. Teorik ve deneysel verimlerin ortalama farkı ($\%3,7$), deneysel verim için hesaplanan ortalama belirsizlik ($\%3,7$) ile aynıdır.

4.3.1. Doğal taşınımli güneş kollektörünün ısıl model hesap örneği

Aşağıda ayrıntıları verilen örnek hesaplama, 2 Ekim 2021 tarihinde gerçekleştirilen deneyde saat 14:00 ile 15:00 aralığında elde edilen verilerle yapılmıştır.

Hesaplamanın yapılacağı gün sayısı, 1 Ocak’tan itibaren yıldaki gün sayısıdır. Deneylerin yapıldığı 2021 yılında Şubat ayının 28 gün olduğuna dikkate alınarak, gün sayısı (n) 275 alınmıştır. Gün sayısı (n) (Denklem 3.22) yerine yazılarak, deklinasyon açısının (θ) değeri hesaplanır.

$$\theta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right)$$

$$\theta = -4,61^\circ$$

Güneş saat açılarının hesabında aşağıdaki eşitlikten yararlanılır.

$$w = 15(GS - 12)$$

Saat 14:00 için güneş saat açısı (w_1);

$$w_1 = 15 \times (14 - 12) = 30^\circ$$

Saat 15:00 için güneş saat açısı (w_2);

$$w_2 = 15 \times (15 - 12) = 45^\circ$$

Saat açılarının ortalaması:

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{45 + 30}{2} = 37,5^\circ$$

14:00 ile 15:00 saatleri arasında atmosfer dışından yatay düzleme gelen ortalama güneş ışıyım akısı (I_o) Denklem 3.22 ile hesaplanır.

$$I_o = \frac{12 \times 3600 \times 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \times 275}{365} \right) \right] \left[\cos(37,75) \cos(-4,61) (\sin(45) - \sin(30)) + \left(\frac{2 \pi (45 - 30)}{360} \right) \sin(37,75) \sin(-4,61) \right]$$

$$I_o = 811,45 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Anlık berraklık indeksi k_t 'nin hesabı için Denklem 3.25 kullanılır.

$$k_t = \frac{I}{I_o} = \frac{846,63}{811,45} = 1,04$$

Yatay düzleme gelen yayılı güneş ışıyım akısı I_d , Denklem (3.27)'den yararlanılarak hesaplanır.

$$\frac{I_d}{I} = 0,177$$

$$I_d = 149,85 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Yatay yüzeye gelen direkt güneş ışıınım akısı I_b , Denklem 3.28 ile hesaplanır.

$$I_b = I - I_d$$

$$I_b = 696,77 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Geometrik faktör R_b , Denklem 3.29 ile hesaplanır. Bu hesaplamada kollektör eğim açısı $\beta=26,5^\circ$ ve enlem açısı $\varnothing=37,75^\circ$ alınmıştır.

$$R_b = \frac{\cos(\varnothing-\beta) \cos(\varnothing) \cos(w) + \sin(\varnothing-\beta) \sin(\varnothing)}{\cos(\varnothing) \cos(\varnothing) \cos(w) + \sin(\varnothing) \sin(\varnothing)}$$

Saat açılarının ortalaması:

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{45 + 30}{2} = 37,5^\circ$$

$$R_b = \frac{\cos(37,75-26,5) \cos(-4,61) \cos(37,5) + \sin(37,75-26,5) \sin(-4,61)}{\cos(37,75) \cos(-4,61) \cos(37,5) + \sin(37,75) \sin(-4,61)}$$

$$R_b = 1,32$$

Eğik yüzeye çevreden yansıyarak gelen yayılı güneş ışıınım akısı I_{bt} , Denklem 3.29 ile hesaplanır.

$$I_{bt} = R_b I_b = 919,18 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Eğik yüzeye gelen yayılı güneş ışıınım akısı I_{dt} , Denklem 3.31 ile hesaplanır.

$$I_{dt} = I_d \frac{1+\cos(\beta)}{2} = 141,98 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Eğik yüzeye çevreden yansıtılarak gelen güneş ışıınım akısı I_{ref} , Denklem 3.32 ile hesaplanır.

$$I_{ref} = I \rho \frac{1-\cos(\beta)}{2} = 8,89 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Denklemde kullanılan (ρ), çevrenin yansıtma oranını ifade etmektedir. Yansıtma oranının değeri; çevrede kar olması durumunda 0,7, kar olmaması durumunda ise çevrenin topografik yapısına ve bitki örtüsüne bağılı olarak 0,2 alınabilir [32]. Çalışmanın yapıldığı süre zarfında çevrenin yansıtma oranı 0,2 alınmıştır.

Eğik yüzeye gelen anlık toplam güneş ışıınım akısı I_T , Denklem 3.33 ile hesaplanır.

$$I_T = I_{bt} + I_{dt} + I_{ref}$$

$$I_T = 1070,06 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Kollektörde havaya aktarılan teorik ve deneysel faydalı ısııl güçler $Q_{N,TEO}$ ve $Q_{N,DEN}$ sırasıyla Denklem 3.39 ve Denklem 3.40 ile hesaplanabilir.

$$Q_{N,TEO} = Q_g - Q_k$$

$$Q_{N,DEN} = \dot{m}C_p(T_K - T_a)$$

Denklem (3.39)'de $Q_{N,TEO}$, gelen güneş ışıınımla kollektöre giren ısııl güçten, kollektörde oluşaın kayıp ısııl güç çıkarılarak hesaplanır. Kollektöre giren ısııl gücü hesaplamak için Denklem 3.34 kullanılır.

$$Q_g = I_T(T_a)A_C$$

Denklemden kullanılan Ta , saydam cam örtü ve yutucu levhanın düzelmiş yutma geçirme çarpanıdır ve $Ta = 0,80$ alınmıştır [35].

$$Q_g = 1070,06 \times 0,80 \times 1,1$$

$$Q_g = 941,65 \text{ W}$$

Kollektörden ısı kayıplarının hesabında, Denklem 3.35 kullanılır.

$$Q_k = Q_{CT} + Q_{C1} + Q_{AT}$$

Burada,

Q_{CT} : Cam örtüden taşınım ile kaybolan ısı gücü (W),

Q_{C1} : Cam örtüden ışıma ile kaybolan ısı gücü (W),

Q_{AT} : Kollektör tabanından taşınım ile kaybolan ısı gücü (W).

Cam örtüden taşınım ile kaybolan ısı gücü hesaplayabilmek için Denklem (3.36)'dan yararlanılır.

$$Q_{CT} = A_c h_w (T_c - T_a)$$

Rüzgâr etkisiyle kollektörün dış yüzeylerinde oluşan ısı taşınım katsayısı h_w Denklem 3.9 ile hesaplanır.

Ele alınan saat diliminde meteorolojiden alınan rüzgâr hızı (0,266 m/s) kullanılarak, rüzgâr kesme gücü yasası (Denklem 3.11) ile hesaplanan kollektör seviyesindeki rüzgâr hızı $v = 0,13 \text{ m/s}$ 'dir.

$$h_w = 5,7 + 3,8v$$

$$h_w = 5,7 + 3,8 \times 0,13 = 6,19 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

$$Q_{CT} = 1,1 \times 6,19 \times (36,3 - 29) = 49,73 \text{ W}$$

Cam örtüden ışınlımla kaybolan ısıl gücün hesabında Denklem 3.37 kullanılır.

$$Q_{C1} = A_C h_{r1} (T_C - T_a)$$

Cam örtü ile gökyüzü arasındaki ışınlımla ısı alış-verişi için eşdeğer ısı taşınım katsayısı h_{r1} Denklem 3.11 ile hesaplanır.

$$h_{r1} = 6 \epsilon_c (T_C^4 - T_{sky}^4) / (T_C - T_a)$$

Denklemde kullanılan σ ; Stefan Boltzman sabitini ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ϵ_c ; cam örtünün ısıl ışınlım yayma katsayısını (0,88), T_{sky} ; gökyüzü sıcaklığını ifade eder. Gökyüzü sıcaklığının hesabında ise Denklem 3.12 kullanılır.

$$T_{sky} = 0,0552 \times 29^{1,5} = 36,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{r1} = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,88 \times (309,3^4 - 281,62^4) / (36,3 - 29)$$

$$h_{r1} = 19,56 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q_{C1} = 1,1 \times 19,56 \times (36,3 - 29)$$

$$Q_{C1} = 157,08 \text{ W}$$

Kollektör tabanından taşınım ile kaybedilen ısıl gücü hesaplayabilmek için Denklem 3.38 kullanılır.

$$Q_{AT} = A_C h_w (T_{bo} - T_a)$$

$$Q_{AT} = 1,1 \times 6,19 \times (33,2 - 29) = 28,61 \text{ W}$$

Kollektörün toplam ısı kaybı,

$$Q_k = 235,43 \text{ W}$$

Kollektörde havaya aktarılan teorik faydalı güç,

$$Q_{N,TEO} = 706,21 \text{ W}$$

DTGK'de havaya aktarılabilen faydalı ısıl gücün deneysel ölçümlerle hesabı,

$$Q_{N,DEN} = \dot{m}c_p(T_K - T_a)$$

DTGK'de doğal hava akışının etkisiyle oluşan kütleli debinin hesabında, Denklem 3.41 kullanılır.

$$\dot{m} = \rho v A_k$$

Burada,

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3),

v : Kollektör giriş kesitindeki ortalama hava hızı (m/s),

A_k : Kollektör hava girişi en-kesitinin alanı (m^2)'dir.

Havanın yoğunluğu, kollektör içerisindeki havanın ortalama sıcaklığına bağlı olarak tablodan interpolasyonla hesaplanmıştır [35]. Kollektörün hava girişi en-kesitinin alanı $0,113 \text{ m}^2$ 'dir.

Kollektördeki ortalama hava sıcaklığı $T_m = (53+29)/2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Havanın bu sıcaklıktaki yoğunluğu:

$$\rho = 1,1234 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m} = 1,1234 \times 0,13 \times 0,113 = 0,0165 \text{ kg/s}$$

$$Q_{N,DEN} = 0,0165 \times 1007 \times (53 - 29) = 398,83 \text{ W}$$

Kollektörün anlık ısı verimi;

$$Q_G = 1070 \times 1,1 = 1177 \text{ (W)}$$

$$\eta_{DEN} = \frac{Q_{N,DEN}}{Q_G} = \frac{398,83}{1177} = 0,33$$

4.4. Belirsizlik Hesabı

Deneyssel ölçümlere dayalı hesaplamaların sonuçları; ölçüm cihazlarının hassasiyetlerinden, mekanik ve elektronik salınımlardan, ölçülen büyüklükte zamanla oluşabilecek küçük salınımlardan, varsa ölçümü yapan kişinin okuma hatalarından, tablo ve grafiklerden alınan ya da okunan büyüklüklerdeki belirsizliklerden etkilenir. Hesaplanan herhangi bir R değerinde, sayılan nedenlerle oluşabilecek belirsizliğin hesabında, Kline ve McClintock'un önerdiği Denklem 4.1 kullanılmıştır [43].

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

Burada,

R: Hesaplanan büyüklük

x_1, x_2, x_n : Bağımsız değişkenler

w_1, w_2, w_n : Bağımsız değişkenlerin belirsizlik oranları

n: Bağımsız değişkenlerin sayısı

W_R : Hesaplanan büyüklükteki toplam belirsizliktir.

Deneylerde kullanılan ölçme cihazlarının belirsizlikleri Tablo 4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Deneyisel ölçmelerdeki belirsizlikler.

Ölçülen büyüklük	Ölçme belirsizliği	Birim
Sıcaklık	$\pm 0,024$	$^{\circ}\text{C}$
Güneş ışıınım akısı	$\pm 0,02$	W/m^2
Hava hızı	$\pm 0,05$	m/s

4.4.1. Kütleli debinin belirsizliği

GEKS’de, DTGK’da oluşan doğal hava akımının kütleli debisindeki belirsizlik, Denklem 3.40 ve Denklem (4.1)’e göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$W_{\dot{m}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} W_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial v} W_v \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial A_c} W_{A_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2 gerekli işlemler yapıp yeniden düzenlendiğinde, Denklem 4.3 elde edilir.

$$W_{\dot{m}} = \left[(V A_c W_{\rho})^2 + (p A_c W_v)^2 + (p V W_{A_c})^2 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

4.4.2. Eğik yüzeye gelen güneş ışıınım akısının belirsizliği

GEKS’deki DTGK’nın yüzeyine gelen toplam güneş ışıınım akısındaki belirsizlik, Denklem 3.32 ve Denklem (4.1)’e göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$W_{I_T} = \left[\left(\frac{\partial I_T}{\partial I_b} W_{I_b} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_T}{\partial I_d} W_{I_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_T}{\partial R_b} W_{R_b} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_T}{\partial \beta} W_{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_T}{\partial \rho} W_{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

Denklem 4.4, gerekli işlemler yapıp yeniden düzenlendiğinde, Denklem 4.5 elde edilir.

$$W_{I_T} = \left[\left(R_b + \rho \frac{1-\cos\beta}{2} W_{I_b} \right)^2 + (I_b W_{R_b})^2 + \left[\left(\frac{1+\cos\beta}{2} + \rho \frac{1-\cos\beta}{2} \right) W_{I_d} \right]^2 + \left(\frac{I_d \sin\beta}{2} (\rho - 1) W_{\beta} \right)^2 + \left((I_b + I_d) \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) W_{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

4.4.3. Kollektör veriminin belirsizliği

GEKS’de kurutma havası güneş enerjisi ile ısıtıldığı, DTGK’nın ısı verimindeki belirsizlik, Denklem 3.41 ve Denklem (4.6)’ya göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$W_n = \left[\left(\frac{1}{Q_g} W_{Q_{DEN}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{DEN}}{Q_g^2} W_{Q_G} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

Kollektörün ısı verimindeki belirsizliği hesaplamak için deneysel faydalı ısı enerjisinin (Q_{DEN}) ve kollektöre güneşten gelen enerjisinin (Q_G) belirsizliklerini de hesaplamamız gerekmektedir. Deneysel çalışmada faydalı ısı enerjisinin (Q_{DEN}) belirsizliği, Denklem (3.39)’a göre Denklem 4.7 elde edilir.

$$W_{Q_{DEN}} = \left[(C_p \Delta T W_m)^2 + (m \Delta T W_{C_p})^2 + (m C_p W_{\Delta T})^2 \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

Kollektöre güneşten gelen enerjisinin (Q_G) belirsizliği, Denklem (3.42)’ye göre Denklem 4.8’den elde edilir.

$$W_{Q_G} = \left[(I_T W_{A_c})^2 + (A_c W_{I_T})^2 \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

4.5. Belirsizlik Hesabı Örneği

Aşağıda verilen örnek belirsizlik hesabı, 2 Ekim 2021 tarihinde saat 14:00’te alınan verilerle yapılmıştır.

Eğik yüzeye gelen güneş ışıının akısının belirsizliği, Denklem 4.5 ile hesaplanır.

Veriler;

$$R_b = 1.319 \quad (W_{R_b} = \pm 0,1 \times 1,319 = 0,1319)$$

$$\rho = 0,2$$

$$W_{\rho} = 0$$

Çevrenin yansıtma oranının (ρ) yerde kar olmaması durumunda 0,2 alınması kabul edilmiştir [33]. Bu kabul neticesinde çevrenin yansıtma oranının belirsizliği (W_{ρ}) sıfırdır.

$$\beta = 26,5^{\circ}$$

$$W_{\beta} = \pm 0,1^{\circ}$$

$$I_b = 696,77 \text{ W/m}^2 \quad (W_{I_b} = \pm \%2 \times 696,77 = 13,93 \text{ W/m}^2)$$

$$I_d = 149,85 \text{ W/m}^2 \quad (W_{I_d} = \pm \%2 \times 149,85 = 2,872 \text{ W/m}^2)$$

Veriler Denklem (4.5)'te yerlerine yazılır ve gerekli işlemler yapılırsa, eğik yüzeye gelen güneş ışıyım akısının belirsizliği hesaplanır.

$$I_T = 1070,06 \text{ W/m}^2 \quad (W_{I_T} = \pm \%1, \pm 10,10 \text{ W/m}^2)$$

Kütlesel debinin belirsizliği, Denklem 4.3 ile hesaplanır.

Veriler;

$$V = 0,13 \text{ m/s} \quad (W_V = \pm 0,05 \times 0,13 = 0,0065 \text{ m/s})$$

$$A_k = 0,113 \text{ m}^2 \quad (\pm \%1) \quad (W_{A_k} = 0,00062 \text{ m}^2)$$

$$\rho = 1,123 \text{ kg/m}^3 \quad (W_{\rho} = \pm \%0,1 \times 1,123 = 0,001123 \text{ kg/m}^3)$$

Veriler Denklem 4.3'te yerlerine yazılır ve gerekli işlemler yapılırsa, kütlesel debinin belirsizliği hesaplanır.

$$\dot{m} = 0,016721 \text{ kg/s} \quad (W_{\dot{m}} = \pm \%5, \pm 0,00083 \text{ kg/s})$$

Kollektör veriminin belirsizliği, Denklem (4.6) ile hesaplanır.

Veriler;

$$c_p = 1007 \text{ J/kgK } (\pm \%0,1) (W_{C_p} = 1,007 \text{ J/kgK})$$

$$T_k = 53^\circ\text{C} (W_{T_c} = 0,024^\circ\text{C})$$

$$T_a = 29^\circ\text{C} (W_{T_a} = 0,024^\circ\text{C})$$

$$A_c = 1,1 \text{ m}^2 (\pm \%0,1) (W_{A_c} = 0,001619 \text{ m}^2)$$

$$I_T = 937,16 \text{ W/m}^2 (\pm \%1) (W_{I_T} = 10,1 \text{ W/m}^2)$$

$$\dot{m} = 0,0165 \text{ kg/s } (\pm \%5) (W_{\dot{m}} = 0,00083 \text{ kg/s})$$

Kollektör verimindeki belirsizlik, yukarıdaki veriler Denklem (4.7)'de yerlerine yazılıp gerekli hesaplamalar yapılarak belirlenir.

$$\eta_{\text{DEN}} = \% 34,3 (\pm 0,0306) (W_{\eta_{\text{DEN}}} = \pm \% 3,1) \text{ bulunur.}$$

4.6. Kurutulan Kırmızıbiber Örnekleri

Deney-I ve Deney-II'de GEKS'de kurutulan kırmızıbiber numunelerinin deneylerden sonra çekilen fotoğrafları Şekil 4.35'de verilmiştir.

GEKS'de kurutulan kırmızıbiberlerin renklerinde ve tatlarında önemli bir değişim (bozulma) olmamıştır.



Şekil 4.35. Deney-I ve Deney-II’de kurutulan kırmızıbiber numuneleri

4.7. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin İmalat Maliyeti

Tablo 4.2’de GEKS’nin imalatı sırasında kullanılan malzemeler ve birim fiyatları bulunmaktadır. GEKS’nin yaklaşık maliyeti, 2022 Haziran ayı itibariyle, 2500 ₺ olarak hesaplanmıştır.

GES için kesin bir geri ödeme süresi öngörülemezle birlikte, sistemde kırmızıbiber dışında, hasat zamanları farklı diğer sebze ve meyveler de kurutulabilir. Dolayısıyla sistemin kurutma süresini kısaltması, ürünlerin kalitesini artırması (renk ve tatlarının korunması) ve kurutmanın daha sağlıklı şartlarda yapılması, işçilik maliyetlerini düşürecek, ürün kayıplarını azaltacak ve ürünlerin piyasa değerlerini yükseltecektir.

Tablo 4.8. Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin İmalat Maliyeti

Malzemeler	Ölçüler	Adet	Birim fiyat (\$)	Birim fiyat (€)	Fiyat (\$)	Fiyat (€)
Kontrplak	1250x2500x20 (mm)	1 tabaka	50	47	50	47
Tekerlek	-	2 adet	3	2,7	6	5,4
Çelik elek teli	1x1 (m)	1 adet	1	0,9	1	0,9
Alüminyum panel	1x2 (m)	1 adet	11,2	10,8	22,4	21,6
Saydam cam örtü	1x2 (m)	1 adet	2,5	2	5	4
Cam yünü	1x3 (m)	3 adet	1	0,9	3	2,7
Diğer malzemeler (ahşap, vida, alüminyum bant, silikon, boya gibi)	Muhtelif				8,7	8,2
	Toplam malzeme maliyeti				96,1	89,8
	İşçilik (%50)				48,1	44,9
	Genel toplam				144,2	134,6

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında, Şanlıurfa yöresinde yetiştirilen ve geleneksel yöntemlerle açıkta (güneş altında) kurutulan kırmızıbiberlerin, GEKS ile daha kısa sürede, kapalı ortamda ve daha sağlıklı şartlarda kurtulması için deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan GEKS, literatürde mevcut doğal taşınımlı kurutucu tasarımları arasından seçilmiştir. GEKS, tanımlı temel yapısal boyutlarına sadık kalınarak, Şanlıurfa'nın coğrafi konumuna uygun şekilde yeniden tasarlanmış ve yerel imkânlarla üretilmiştir. Ayrıca GEKS'deki doğal taşınımlı güneş kollektörünün (DTGK) ısı performansının hesabı için bir ısı model önerilmiştir.

2021 yılı Haziran ayında, GEKS kurutma odasının üst kısmındaki havalandırma deliklerinin (10 adet) tamamı açık (Deney-I, 7-10 Haziran) ve yarısı açık, diğer yarısı kapalı tutularak (Deney-II, 14-17 Haziran), iki ayrı kurutma deneyi yapılmıştır. Deneylerde kurutma odasına konulan 4 adet tepsinin her birine yaklaşık aynı ağırlıkta (600-700g) kırmızıbiber yerleştirilmiştir. Ayrıca deneylerde karşılaştırma amacıyla, ayrı bir tepsideki kırmızıbiberler, dış ortamda ve doğrudan güneş ışınlarına maruz bırakılarak kurutulmuştur. Deneylerde gerçek kurutma şartlarını sağlamak amacıyla, tepsideki numuneler günde iki defa (sabah ve akşam saatlerinde) tartılmıştır. Her tepsideki numunelerin, boyutsuz nem oranlarının (MR), kuruma hızlarının (DR), yaş (MC_{yb}) ve kuru (MC_{kb}) baza göre nem miktarlarının değişimi elde edilmiştir. Ayrıca ince tabaka kurutma modeli kullanılarak, kırmızıbiberlerin efektif difüzyon katsayıları (D_{eff}) hesaplanmıştır.

Deney-I ve Deney-II'de; dış ortam hava sıcaklığı (T_a), yutucu yüzey sıcaklığı (T_s), kollektör çıkış sıcaklığı (T_k), kurutma odası sıcaklığı (T_h), cam örtü sıcaklığı (T_c) ve kollektör taban (dış yüzey) sıcaklığı (T_b) birer saat aralıklarla ölçülmüştür. Ayrıca, Şanlıurfa Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden yatay düzleme gelen saatlik güneş

ışınım verileri alınmıştır. Tüm bu veriler ve DTGK için Bölüm 3’de önerilen ısı model kullanılarak, kollektörde kurutma havasına geçen faydalı ısı güç ($Q_{N,TEO}$), kayıp ısı güç (Q_k) ve teorik ısı verim (η_{TEO}) hesaplanmıştır. DTGK ısı modelinin sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması amacıyla 2 Ekim 2021’de ek bir ısı performans deneyi daha yapılmıştır.

5.1. Sonuçların Karşılaştırılması

Deney-I ve Deney-II’nin yapılmasının nedeni, daha önce de ifade edildiği gibi kurutma odasındaki havalandırma deliklerinin, GEKS’nin ısı performansına ve kurutma performansına etkilerini değerlendirmektir. Deney-I’de sistemdeki on havalandırma deliğinin tamamı açık ve Deney-II’de sadece arka taraftaki beş havalandırma deliği açık, ön taraftaki beş havalandırma deliği kapalı tutulmuştur. GEKS’nin Deney-I ve Deney-II’deki performanslarının, meteorolojik verilerin etkisi de dikkate alınarak, karşılaştırabilmesi amacıyla tablolar hazırlanmıştır.

Deney-I ve Deney-II, 2021 yılı Haziran ayında ancak farklı günlerde yapıldığı ve dört gün boyunca devam ettiğinden, günlük meteorolojik veriler ve güneş ışıınım akıları arasında farklar vardır. Bu farkların, az veya çok GEKS’nin ısı performansını, kurutmanın seyrini ve sistemin kurutma performansını etkilemesi doğaldır. Tablo 5.1.’de, Deney-I ve Deney-II’nin yapıldığı günlerde, meteorolojik verilerin günlük ve dört günlük ortalamaları verilmektedir.

Tablo 5.1. Meteorolojik verilerin karşılaştırılması.

		I (W/m²)	I_T (W/m²)	T_a (°C)	φ (%)	v (m/s)
Deney-I (7-10 Haz.)	1. gün	715,24	1008	31,0	22	3,65
	2. gün	697,54	905,7	29,5	19	4,38
	3. gün	696,56	903,67	29,5	28	5,23
	4. gün	695,54	901,24	29,5	27,5	5,23
	Ortalama	701,24	929,71	29,9	24,1 (+8,6)	4,62
Deney-II (14-17 Haz.)	1. gün	699,5	906,67	33,6	15	4,87
	2. gün	728,18	946,56	33	10	4,26
	3. gün	720,27	936,39	32	16	5,60
	4. gün	721,63	940	34	21	5,47
	Ortalama	717,24 (+16)	932,40 (+2,7)	33,2 (+3,3)	15,5	5,05 (+0,43)

Deney-II’de günlük ortalama güneş ışıyım akıları (I), Deney-I’e göre daha yüksektir. Deney-II’de dört günlük ortalama güneş ışıyım akısı, Deney-I’den 16 W/m^2 (+%2) daha yüksektir. Benzer durum kollektöre gelen toplam güneş ışıyım akıları (I_T) için de geçerlidir. Ancak Deney-II’de ortalama toplam güneş ışıyım akısı, Deney-I’e göre sadece $2,7 \text{ W/m}^2$ (+%0,3) daha yüksektir. Deney-II süresince günlük ortalama dış hava sıcaklıkları (T_a) Deney-I’e göre daha yüksektir, ancak dört günlük ortalama dış hava sıcaklığındaki fark $3,3^\circ\text{C}$ ’dir. GEKS’nin kurutma performansı bakımından önemli bir parametre olan dış ortam havasının günlük ortalama bağıl nemi (ϕ), Deney-I’in yapıldığı günlerde, Deney-II’ye göre daha yüksek seyretmiştir. Deney-I süresince dört günlük ortalama bağıl nem, Deney-II’ye göre %8,6 daha yüksektir. Deney-II’de GEKS’nin dış yüzeylerinden taşınım ile ısı kaybını etkileyen rüzgâr hızının (v) dört günlük ortalaması, Deney-I’e göre $\sim 0,4 \text{ m/s}$ (+%9,3) daha yüksektir.

GEKS’nin ısı ve kurutma performansında etkili tüm meteorolojik veriler karşılaştırıldığında, genel olarak koşullar kurutma odasındaki havalandırma deliklerinin yarısının kapalı olduğu Deney-II boyunca (daha yüksek ortalama güneş ışıyım akısı ve daha yüksek ortalama hava dış sıcaklığı, daha düşük ortalama bağıl nem) Deney-I’e göre daha elverişlidir. Deney-I ile karşılaştırıldığında, Deney-II’de GEKS performansı bakımından tek olumsuz meteorolojik etken, ortalama rüzgâr hızının (kollektör dış yüzeylerinden taşınım ile ısı kayıplarının artması) daha yüksek olmasıdır.

Deney-I ve Deney-II süresince GEKS’deki DTGK için oluşturulan ısı model kullanılarak hesaplanan ısı performans sonuçlarının günlük ve dört günlük ortalamaları, Tablo 5.2.’de verilmiştir. Kollektöre güneşten gelen direkt (I) ve toplam (I_T) güneş ışıyım akılarının daha yüksek olduğu Deney-II’de, kollektöre gelen (Q_G) ve giren (Q_g) toplam ısı güçlerin genel ortalaması, Deney-I’e göre sırasıyla 144 W (+%13,7) ve $103,1 \text{ W}$ (+%12,1) daha yüksektir.

Kollektörün dış yüzeylerinden ısı kayıplarını artıran ısı taşınım katsayısının (h_w) dört günlük ortalaması, Deney-II’de Deney-I’e göre $\sim 2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+%9,5) daha yüksektir. Buna rağmen, ortalama dış hava sıcaklığının (T_a) daha düşük ($\sim 3,3^\circ\text{C}$) olduğu

Deney-I’de, cam örtüden taşınım (Q_{CT}) ve ışınlı (Q_{CI}) ısı kayıpları, Deney-II’ye göre sırasıyla 23,7W (+%33,2) ve 8,8 W (+%6,6) daha yüksektir.

Direkt güneş ışınlı almayan kollektör tabanından taşınım ısı kaybı (Q_{AT}) ise; ortalama dış hava sıcaklığı daha yüksek olmasına rağmen, dış yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısının yüksek olduğu Deney-II’de, Deney-I’e göre 16,7W (+%31,9) daha yüksektir. Kollektörden taşınım ve ışınlı toplam ısı kayıplarının (Q_K) genel ortalaması; her ne kadar dış yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısı daha düşük olsa da, güneş ışınlı akısının ve dış ortam hava sıcaklığının daha düşük olduğu Deney-I’de, Deney-II’ye göre 12,5W (+%4,5) daha yüksektir. Dolayısıyla Deney-II’de kollektörde havaya aktarılan faydalı ısı gücü, Deney-I’e göre 115,4W (+%20,3) daha yüksektir. Deney-II süresince genel meteorolojik koşulların daha elverişli olması, ortalama kollektör veriminin (η_{TEO}) Deney-I’e göre %4,6 yükselmesini sağlamıştır.

Tablo 5.2. Doğal taşınımlı kollektör ısı performans sonuçlarının karşılaştırılması.

		Q _G (W)	Q _g (W)	h _w (W/m ² K)	Q _{CT} (W)	Q _{AT} (W)	Q _{CI} (W)	Q _K (W)	Q _{N,TEO} (W)	η_{TEO} (%)
Deney-I (7-10 Haz.)	1. gün	1048,75	887,26	18,46	93,28	33,61	149,50	280,00	608,14	51,21
	2. gün	1040,35	832,28	21,72	70,00	55,48	131,05	256,53	575,74	56,08
	3. gün	1060,21	848,17	24,00	89,65	56,88	139,21	285,75	562,42	53,86
	4. gün	1064,54	851,63	24,42	128,78	55,81	145,01	329,61	522,02	49,45
	Ortalama	1053,46	854,83	22,15	95,42 (+23,7)	50,44	141,20 (+8,8)	287,97 (+12,5)	567,08	52,65
Deney-II (14-17 Haz.)	1. gün	1062,8	850,23	22,50	66,11	62,28	128,83	257,22	593,01	56,22
	2. gün	1190	951,94	21,53	62,58	59,06	128,82	250,47	701,46	60,13
	3. gün	1226,80	981,44	26,36	83,85	71,72	137,41	299,00	682,45	56,10
	4. gün	1310,13	1048,105	26,62	74,04	86,34	134,68	295,07	753,03	56,68
	Ortalama	1197,43 (+144,0)	957,92 (+103,1)	24,24 (+2,1)	71,74	69,86 (+16,9)	132,43	275,44	682,48 (+115,4)	57,28 (+4,6)

Tablo 5.3.’de Deney-I ve Deney-II’de GEKS’de ölçülen sıcaklıkların (dış ortam havası-T_a, yutucu yüzey-T_s, kollektör çıkışı-T_k ve kurutma odası-T_h) ve bu sıcaklıklarla dış ortam havası sıcaklığı (T_a) arasındaki farkların (ΔT_{sa} , ΔT_{ka} ve ΔT_{ha}) günlük ve dört günlük genel ortalamaları verilmiştir. Ayrıca Tablo 5.3.’de her iki deneyde GEKS’de ölçülen maksimum sıcaklıklar da verilmiştir.

Tablo 5.1.’deki meteorolojik verilerle uyumlu olarak, Deney-I ve Deney-II’de ölçülen dış ortam havası (T_a) ve yutucu yüzey (T_s) sıcaklıklarının genel ortalamaları

arasındaki fark ($\Delta T_{sa} \sim 0,1^\circ\text{C}$) önemsizdir. Deney-I’de kollektör çıkış sıcaklığı (T_s) ve ilgili sıcaklık farkının (ΔT_{ka}) genel ortalaması, Deney-II’ye göre sırasıyla $0,9^\circ\text{C}$ ve $0,8^\circ\text{C}$ daha yüksektir. Ancak tam tersine, Deney-II’de kurutma odası sıcaklığı (T_h) ve ilgili sıcaklık farkının (ΔT_{ha}) genel ortalaması, Deney-I’e göre sırasıyla $1,3^\circ\text{C}$ ve $1,6^\circ\text{C}$ daha yüksektir.

Bu sonuçlar, Deney-I’de kurutma odasından sıcak ve nemli havanın tahliyesinin, Deney-II’ye göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, Deney-II’de kurutma odasındaki havalandırma deliklerinin yarısının kapalı tutulması, ilave direnç oluşturarak, GEKS’deki doğal hava akışını yavaşlatmıştır.

GEKS’de, Deney-I ve Deney-II’de kollektör çıkışında ölçülen hava sıcaklıklarının (T_k) günlük ve dört günlük ortalamaları ($55,4\text{-}64,9^\circ\text{C}$), kırmızıbiberlerin kurutulması için önerilen en yüksek sıcaklık olan 65°C ’nin altındadır [36]. Ancak Deney-I ve Deney-II’de kollektör çıkışında ölçülen maksimum sıcaklıklar, $69\text{-}74^\circ\text{C}$ gibi yüksek değerlere çıkmıştır. Bu ise tepsi 1’de (kurutma odasında en alttaki ve kollektör çıkışına en yakın tepsi) kurutulan numunelerin, kısa süreli de olsa, önerilen en yüksek kurutma sıcaklığının üzerinde hava sıcaklıklarına maruz kaldığını göstermektedir.

Tablo 5.3. Deney-I ve Deney-II’de GEKS sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması.

		$T_{a,ort}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{s,ort}$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T_{sa,ort}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{k,ort}$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T_{ka,ort}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{h,ort}$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T_{ha,ort}$ ($^\circ\text{C}$)
Deney-I (7-10 Haz.)	1. gün	31,2	87,3	56,1	55,4	24,1	48,8	17,4
	2. gün	29,5	88,6	59,9	58,1	28,6	51,7	22,6
	3. gün	30,5	90,5	60,7	64,9	35,4	59,3	29,8
	4. gün	29,5	87,8	58,5	61,3	32,3	55,0	25,7
	Ortalama	30,2	88,6 (+0,1)	58,8	59,9(+0,9)	30,1 (+0,8)	53,7	23,9
	Maksimum	32,0	95,1	64,7	74,0 (+5,0)	43,5 (+3,9)	66,0	35,4 (+1,5)
Deney-II (14-17 Haz.)	1. gün	29,0	90,0	61,8	59,0	30,0	55,0	26,7
	2. gün	30,0	89,0	60,0	57,0	28,1	53,0	23,7
	3. gün	31,0	89,0	58,7	60,0	29,9	56,0	25,9
	4. gün	31,0	86,0	55,4	60,0	29,4	56,0	25,5
	Ortalama	30,3 (+0,1)	88,5	59,0 (+0,2)	59,0	29,4	55,0 (+1,3)	25,5 (+1,6)
	Maksimum	32,0	97,0 (+1,9)	66,0 (+1,3)	69,0	36,9	66,0	33,9

Tablo 5.4.’de, Deney-I ve Deney-II’de GEKS’de ve dış ortamda kurutulan numuneler için hesaplanan kurutma performans sonuçları (boyutsuz nem oranı-MR,

kuruma hızı-DR, GEKS ve dış ortamdaki numunelerin nem miktarları- MC_{yb} , kurutma verimi- η_{dr} , özgül enerji tüketimi-SEC ve özgül nem çekme oranı-SMER) verilmiştir.

Deney-II için meteorolojik koşullar (Tablo 5.1.), ısı performans sonuçları (Tablo 5.2.) ve ölçülen sıcaklıklar (Tablo 5.3.) genel olarak kurutma için daha elverişlidir. Bu değerlendirmeye uygun olarak, Deney-II’de dış ortamda kurutulan numunelerin gün sonundaki nem miktarları (MC_{yb}), Deney-I’e göre daha düşüktür.

Ancak, Deney-I ve Deney-II’de GEKS’de kurutulan numuneler için hesaplanan kurutma hızlarında (DR) günden güne farklılıklar görülmekle birlikte, her iki deney için üç günlük (0,0005 (g-nem/g-kuru kütle)/h) ve dört günlük (0,0003 (g-nem/g-kuru kütle)/h) ortalama kurutma hızları yaklaşık eşittir. Diğer taraftan, Deney-II’de GEKS’deki numuneler için hesaplanan boyutsuz nem oranları (MR), kurutma verimleri (η_{dr}) ve özgül nem çekme oranları (SMER) Deney-I’den daha düşük; numunelerin nem miktarları (MC_{yb}) ve özgül enerji tüketimi (SEC) Deney-I’den daha yüksektir.

Uygulamadaki şartları deneylerde sağlamak amacıyla, günde sadece iki kez (sabah-akşam) yapılan ağırlık ölçümleri nedeniyle, kurumanın evreleri ve aralarındaki geçişlerle ilgili kesin bir değerlendirme yapılamamaktadır. Ancak, deneylerin birinci gününde, kırmızıbiberlerle kurutma havası arasında ısı-kütle geçişlerinin dengelendiği ve ürünlerdeki serbest suyun buharlaştığı (sabit kuruma hızlı zaman dilimi) anlaşılmaktadır. İkinci ve üçüncü günlerde ise, ürünlerdeki bağlı suyun (daha yavaş) buharlaştığı ve difüzyonla kütle geçişinin önem kazandığı, azalan kuruma hızlı zaman diliminin devam ettiği değerlendirilmektedir. Dördüncü günde ise, ürünler denge nem miktarına ulaşmış ve kuruma sonlanmıştır.

Tüm bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, Deney-II’de meteorolojik şartlar daha elverişli olmasına rağmen, kurutma odasındaki on adet havalandırma deliğinden yarısının kapalı tutulması, GEKS’nin kurutma performansını olumsuz etkilemiştir.

Tablo 5.4. Deney-I ve Deney-II’de GEKS kurutma performanslarının karşılaştırılması.

		MR (%)	DR (g-nem/g- kuru kütle)/h)	MC _{yb} (GEKS) (%)	MC _{yb} (Dış Ortam) (%)	η_{dr} (%)	SEC (kW-h/kg)	SMER (kg/kW-h)
Deney-I (7-10 Haz.)	1. gün	39 (+2,7)	33,6	91,14 (+2,2)	92,94	3,5 (+0,3)	3,77	0,26 (+0,03)
	2. gün	19	15,6	52,90	76,17 (+7,6)	1,5 (+0,1)	8,28	0,12 (+0,02)
	3. gün	11 (+2,7)	2,3 (+1,4)	7,77	41,53 (+6,9)			
	4. gün	6,4	0,009	4,91	30,02 (+0,6)			
Deney-II (14- 17 Haz.)	1. gün	36,3	34,5 (+0,9)	88,95	93,61 (+0,7)	3,2	4,25 (+0,48)	0,23
	2. gün	24,2 (+5,2)	16,5 (+0,9)	60,18 (+7,3)	68,57	1,4	10,08 (+1,8)	0,099
	3. gün	8,3	0,9	19,05 (+11,3)	34,59			
	4. gün	7,7 (+1,3)	0,006	12,77 (+7,9)	29,41			

5.2. Bulguların Özeti ve Öneriler

GEKS’de kurutulan kırmızıbiberlerin ortalama nem miktarı ($MC_{yb} \approx \%2,5$), deneylerin üçüncü gününde istenen son nem miktarının ($MC_{yb} = \%3-11$) da altına düşmüştür.

Kırmızıbiberler, deneylerin dördüncü gününde, neredeyse kuru madde miktarına ($MC_{yb} \approx \%0,14$) kadar kurutulmuştur.

Dış ortamda açık havada (güneş ışınlarına maruz) eşzamanlı kurutulan kırmızıbiberlerde, istenen son nem miktarına ($MC_{yb} = \%3-11$) ancak üçüncü günün sonunda ($MC_{yb} \approx \%8$) yaklaşmıştır.

GEKS, kırmızıbiberlerin kuruma süresini, açık havada kurutma süresinin 2/3’ne düşürmüştür.

Açık havada yedi gün süren kurutmanın sonunda, kırmızıbiberlerin nem miktarı $MC_{yb} \approx \%1,5$ ’in altına düşmemiştir.

GEKS’nin kurutma odasında en alttaki tepside bulunan kırmızıbiberler, üstteki diğer tepsilere göre daha hızlı kurumuştur.

GEKS’de ilk iki gününde kırmızıbiberlerin hızla kuruduğu (0,004 (g-nem/g-kuru kütle)/h), üçüncü günde kuruma hızının yavaşladığı (0,0005 (g-nem/g-kuru kütle)/h),

dördüncü günde kurutmanın sona erdiği belirlenmiştir (0,0003 (g-nem/g-kuru kütle)/h).

GEKS’de yapılan kurutma deneylerinde, ince tabaka kurutma modeliyle kırmızıbiberler için hesaplanan efektif difüzyon katsayıları ($0,83-6,16 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), literatür ($0,4-8,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) ile uyumludur [45,46].

Deney-I ve Deney-II’de GEKS’de kurutma için hesaplanan enerji verimleri (1.gün %16; 2.gün %7; 3.gün %1) yaklaşık aynıdır.

DTGK’nın deneysel ve teorik ısı performans sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla, 2 Ekim 2021’de ek bir deney yapılmıştır. Karşılaştırma deneyi, Deney-I ve Deney-II’ye benzer koşullarda (kurutma odasına dört adet boş tepsi ve havalandırma deliklerinin tamamı açık) yapılmıştır. DTGK’nın 2 Ekim 2021’de ortalama teorik verimi $\eta_{\text{TEO-2}} = \%44,3$ ve ortalama deneysel verimi ise $\eta_{\text{DEN-2}} = \%40,6$ ’dır.

Dış ortamda kurutulan kırmızıbiberlerde (doğrudan güneş ışınımına maruz kaldıklarından) oluşan büzüşmelerin, bu kısımlardaki nemin kurumasını zorlaştırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, dış ortamda kurutulan kırmızıbiberlerde kararmalar oluşmuştur. Açıkta kurutulan tepside istenmeyen yabancı maddeler (toz, böcek, kuş tüyü gibi) gözlenmiştir. Halbuki GEKS’de ürünlerin kalitesini bozacak herhangi bir yabancı madde ve kırmızıbiberlerde aşırı renk değişimleri görülmemiştir.

GEKS’nin DTGK çıkışındaki hava çıkış sıcaklıkları, gün içerisinde kısa süreli de olsa kırmızıbiberlerin kurutulmasında izin verilen sıcakların üzerine çıkabilmektedir.

Deney-I ve Deney-II’nin sonuçları, doğal hava akışı artırılarak GEKS’nin ısı ve kurutma performansının iyileştirilebileceğini göstermektedir. GEKS’deki ortalama hava akış hızı ve debisi artırılarak, kollektör çıkış sıcaklıkları da düşürülebilir.

Bu amaçla kurutma odasındaki tel örgü tepsilerin gözenek sıklığı (mesh sayısı) azaltılabilir, kurutma odasında bulunan havalandırma deliklerinin sayısı artırılabilir,

ve/veya çapları büyütülebilir. Kollektörde, yutucu yüzeyin (levhanın) altındaki ve üstündeki kanal yükseklikleri arttırılabilir. Kurutma odasının yüksekliği arttırılabilir ya da kurutma odasının üstüne uygun yükseklikte baca eklenebilir.

Kollektör yutucu yüzeyinde veya çıkışında ısı enerjisi (duyulur ve gizli) depolanarak, GEKS'nin verimi arttırılabilir, kurutma süresi kısaltılabilir. Aynı amaçla, yutucu yüzeyin (levhanın)  st ve alt kısmına kanatlar/kanatçıklar eklenebilir.

Deneyssel performansı incelenen GEKS, yıl boyunca farklı sebze ve meyvelerin kurutulmasında kullanılabilir. Kurutma süresinde ve işçilik maliyetlerinde azalma, ürün kalitesinde ve piyasa değerlerinde sağlanacak artış ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresi kısaltacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Şahin, H. F., Domates kurutmada farklı yöntemlerin karşılaştırılması, Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [2] Ekechukwu, O. V., Norton, B., Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management, 40(6):615-655, 1999.
- [3] Düzer, İ., Güneş enerjisi ile kurutma, Gebze Yüksek Teknolojisi Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2003.
- [4] Parker, BF, Derivation of efficiency and loss factors for solar air heaters, Solar Energy 26:27-32, 1981.
- [5] Ergünes, G., Özgöz, E., Bazı Sebzelerin Sera içinde Kuruma Karakteristikleri. Tarımsal Mekanizasyon 16. Ulusal Kong. Bursa, 461-470, 1995.
- [6] Elustondo, M.P., Pelegrina, A.H., Urbicain, M.J., A model for the dehydration rate of onions. Journal Of Food Engineering., 29:375-386, 1996.
- [7] Aboul-Enein, S., El-Sebaai, A.A., Ramadan, M.R.I., El-Gohary, H.G., Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications. Renewable Energy, 21:505-522, 2000.
- [8] Akpınar E.K., Biçer Y., Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Siklon Tipi Bir Kurutucunun Kullanılabilirliği. Mühendis ve Makine Aralık, Sayı: 515, 2002.
- [9] Krokida, M. K., Karathanos V. T., Maroulis Z. B., Marinou – Kouris D., Drying kinetics of some vegetables. Journal Of Food Engineering, 59:391-403, 2003.
- [10] Akpınar, E., K., Energy and exergy analyses of drying of red pepper plices in a convective type dryer, Int. Comm. Heat and Mass Transfer, 31(8):1165-1176, 2004.
- [11] Özler, S., Ergünes, G., Tarhan, S., Mısırdaki farklı ön işlemlerin kuruma hızına etkisi, OMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 21:160-166, 2006.

- [12] Wu, L., Orikasa, T., Ogawa, Y., Tagawa A., Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal Of Food Engineering*, 83:422 – 429, 2007.
- [13] Apaydın, N., Aydın yöresinde incir kurutmada kullanılacak olan doğal akımlı bir güneş enerjili kurutucunun modellenmesi. Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [14] Doymaz, İ., İsmail, O. Drying characteristics of sweet cherry, *Food and Bioproducts Processing* 6:31-38, 2011.
- [15] Güngör, A., Özbalta, N., Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri, II. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir 43-60, 2013.
- [16] Atalay, H., Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sisteminde elma kurutulması incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2015.
- [17] Elkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I., Farhat,A., Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable Energy*, 77:1-8, 2015.
- [18] Çay, V.V., Koçyiğit, F., Akyüz M.K., Koçyiğit, Ş., Güneş enerjisi destekli kurutma sistemleri ve tarımda kullanımı. *International Engineering Conference*. Antalya, 2017.
- [19] Akman, H., Çerçi, K. N., Hürdoğan, E., Büyükalaca, O., Güneş enerjisi destekli bir kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve ilk ölçme sonuçlarının değerlendirilmesi, *OKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1-9, 2018.
- [20] Çayan, O., Muğla koşullarında güneş enerjili bir kurutucuda biberin kurutulmasının deneysel olarak incelenmesi ve sonuçların klasik kurutma sonuçlarıyla karşılaştırılması, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, 2019.
- [21] Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C., Solar dryers for food applications, *Solar Energy* 20:321-344, 2020.
- [22] Timurtaş, Ö., Enerji depolama sistemli güneş enerjili gıda kurutma sistemlerinde kurutma performansının incelenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, 2020.
- [23] Onat, A., Kırmızıbiberin havalı güneş kollektörü sistemi ile kurutulması, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2002.
- [24] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı Tarımsal Yatırımcı Danışma Ofisi, Şanlıurfa Tarımsal Yatırım Rehberi, 2021.

- [25] Korkutata, N.F., Kavaz, A., Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yetistirilen kırmızı acı biber popülasyonlarının (*capsicum annum* l.) bazı kalite parametreleri, *Academic Food Journal*, 11 (1): 53-58, 2013.
- [26] Scanlin, D., The design, construction, and use of an indirect, through-pass, solar food dryer. *Home Power*, 57:62-72, 1997.
- [27] Duffie, J.A., Beckman, W.A., *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, 1-850, 1991.
- [28] Tonui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y., Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation, *Solar Energy*, 82:1-12, 2008.
- [29] Mcadams, W. H. *Heat Transmission*, 3d Ed. McGraw-Hill, 1954.
- [30] Letcher, T.M., *Wind energy engineering a handbook for onshore and offshore wind turbines*. İçinde: *Main Aspects Of A Wind Assessment Program*. Academic Press, London, 25-44, 2017.
- [31] Ruedas, F.B., Camacho, C.A., Marcuello, S.R., Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2383-2391, 2010.
- [32] Hollands, K.G.T., Unny T.E., Raithby G.D., Konicek L., Free convective heat transfer across inclined air layers. *Journal Heat Transfer*, 98:189–93, 1976.
- [33] Yiğit, A., Atmaca, İ., *Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları*. İçinde: *Yeryüzüne Ulaşan Güneş Işınımının Hesabı*. 2. Baskı, Dora Yayınları, 42-57, 2018.
- [34] Kılıç, A., Yeni bir havalı güneş kollektörünün geliştirilmesi, performans analizi ve tarım ürünlerinin kurutulmasında uygulanması. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Termodinamik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [35] Çengel, Y., Ghajar, A.J., *Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications*, 2015.
- [36] Güngör, A. Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 17-20, 2013.
- [37] Aktaş, M., Ceylan, İ., Doğan, H., Aktekeli, Z., Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı kırmızıbiber kurutucusunun tasarımı, imalatı ve performans deneyleri, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30(1):111-120, 2010.
- [38] Prakash, O., Kumar, A., *Solar drying technology*. İçinde: *Mathematical Modeling Of Solar Drying Systems*. 1. Baskı, Springer, Singapore, 265-271, 2017.

- [39] Doymaz I., Pala M., Hot-air drying characteristics of red pepper, *Journal Food Engineering*, 55: 331–335, 2002.
- [40] Yılmaz, S.N., Brokolinin mikrodalga kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi ve modellenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [41] Crank, J., *The mathematics of diffusion*, Oxford University Press, Oxford, 1975.
- [42] Gupta, A., Das, B., Biswas, A., Mondol, J. D., Sustainability and 4E analysis of novel solar photovoltaic-thermal solar dryer under forced and natural convection drying, *Renewable Energy*, 100: 1008-1021, 2022.
- [43] Kline, S.J., McClintock, F.A., Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, 75: 3-8, 1953.
- [44] Ramesh, M.N., Wolf, W., Tevini, D., Jung, G., Influence of processing parameters on the drying of spice paprika, *Journal Food Engineering*, 49: 63–72, 2001.
- [45] Ertekin, C., Yaldiz , O., Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *Journal Food Engineering*, 63: 349-359, 2004.
- [46] Scala, D.K., Carliste, G., Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper, *LWT*, 41: 789–795, 2008.
- [47] Kumar, R. K., Natarajan, M., Natarajan, K., Natarajan, A. S., Analysis of solar tunnel dryer performance with red chili drying in two intervals, *Research Journal of Chemistry and Environment*, 24, 2020.
- [48] Mugi, V.R., Chandramohan, V.P., Energy, exergy and economic analysis of an indirect type solar dryer using green chilli: A comparative assessment of forced and natural convection, *Thermal Science and Engineering Progress*, 24, 2021.
- [49] Fudholi, A., Ruslan, M.H., Othman, M. Y., Sopian, K. B., Drying of malaysian capsicum annuum l. (red chili) dried by open and solar drying, *International Journal of Photoenergy*, 2013.
- [50] Karakaya, H., Güneş enerjisi destekli doğal taşınımli kurutma sisteminde kurutma parametrelerinin incelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [51] Çakmak, G., Çekirdekli üzüm kurutmada güneş enerjisi destekli dönel akışlı kurutucu tasarımı, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Muhammet Naci AKCAN

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ Makine Mühendisliği	2014
Lise	Kadıköy Kemal Atatürk Anadolu Lisesi	2009

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2014	Sem Hidrolik A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
2016	GVD Elektrik	Ar-Ge Mühendisi
2017	Makro Aero	Ar-Ge Mühendisi
2019-halen	T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı	Mühendis