

# Havalı Güneş Kollektör Destekli Sera Gıda Kurutucu Sisteminin Performansının İncelenmesi

Ebru AKPINAR , Mehmet DAŞ 

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23100, Elazığ, Türkiye.

**Özet:** Kurutma katı maddelerden ısı yöntemleri su veya uçucu maddelerin giderilmesi işlemini tanımlamaktadır. Güneş enerjisi ile tarım ürünlerini kurutma, en eski gıda saklama yöntemlerinden birisi olarak bilinmektedir. Güneşte kurutmada çevresel faktörler nedeniyle gıdanın kalitesi ciddi olarak azalmaktadır. Bu nedenle kurutma işleminin özel amaçlı yapay kurutucular ile yapılması hem kuruma süresini kısaltmakta hem de uzun raf ömrüne sahip daha kaliteli ve temiz ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada gıda kurutma kalitesini ve performansını arttırmak için havalı güneş kolektör (HGK) destekli sera tipi bir kurutucu tasarlanmıştır. Deneysel, açık güneşli ortam şartlarında, Mayıs 2023 tarihinde, Elazığ ili iklim şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma deneyleri sonrası kurutulacak ürünün ısı ve kütle transferi analizleri yapılmıştır. Deneylerde nem içeriği, nem oranı, konvektif ısı transfer katsayısı parametreleri hesaplanmıştır. Deneyler süresince, sera ve HGK giriş ve çıkış sıcaklıkları, güneş ışınımı ve ürün ağırlık değerleri 15 dakikalık periyotlarla ölçülmüştür. HGK desteği ile sera kurutucunun ürün kurutma süresi %24 oranında azalmıştır. Böylelikle daha hızlı bir kurutma süreci elde edilmiştir. Ayrıca kurutma işlemlerinde önemli bir parametre olan konvektif ısı transfer katsayısı hesaplanmış ve bu parametre için makine öğrenmesi (MÖ) algoritmaları ile tahminsel modeller elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, sera tipi gıda kurutucuların performansını arttırmak için havalı güneş kolektörü kullanmak ve konvektif ısı transferi için MÖ algoritmaları kullanılarak faydalı modellerin üretilmesidir. Kısaca hem yapay zekâ hem de deneysel uygulamaların yapılacağı termodinamik bir sistem elde edilmiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları olarak yapay sinir ağı (YSA) ve karar ağacı (KA) algoritmaları seçilmiştir. MÖ algoritmaları ile elde edilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçları ile YSA sonuçları arasındaki hata %1 iken, KA sonuçları arasındaki hata %7'dir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş kolektörü, konvektif ısı transfer katsayısı, makine öğrenmesi, sera kurutucu.

## Investigation of Performance of Air Solar Collector Assisted Greenhouse Food Dryer System

**Abstract:** Drying refers to the process of removing water or volatile substances from solids by thermal methods. Drying agricultural products with solar energy is known as one of the oldest food storage methods. In solar drying, the quality of food is seriously reduced due to environmental factors. For this reason, drying with special purpose artificial dryers shortens the drying time and provides a better quality and cleaner product with a long shelf life. In this study, an air solar collector (ASC) supported greenhouse type dryer was designed to improve the quality and performance of food drying. The experiments were carried out under open sunny conditions in May 2023 in the climatic conditions of Elazığ province. After the drying experiments, heat and mass transfer analysis of the product to be dried were carried out. Moisture content, moisture ratio, convective heat transfer coefficient parameters were calculated in the experiments. During the experiments, greenhouse and ASC inlet and outlet temperatures, solar radiation and product weight values were measured at 15-minute intervals. With the support of the ASC, the product drying time of the greenhouse dryer was reduced by 24%. Thus, a faster drying process was achieved. In addition, convective heat transfer coefficient, which is an important parameter in drying processes, was calculated and predictive models were obtained with machine learning (ML) algorithms for this parameter. The aim of this study is to use air solar collectors to improve the performance of greenhouse type food dryers and to produce useful models for convective heat transfer using ML algorithms. In short, a thermodynamic system in which both artificial intelligence and experimental applications will be performed has been obtained. Artificial neural network (ANN) and decision tree (DTA) algorithms were selected as machine learning algorithms. Model results obtained with ML algorithms are compared with experimental results. The error rate between the experimental results and ANN results is 1%, while the error rate between KA results is 7%.

**Keywords:** Greenhouse dryer, solar collector, convective heat transfer coefficient, machine learning.

### Araştırma makalesi

Yazışma yazarı: Mehmet DAŞ E-mail: m.das@firat.edu.tr

**Referans:** Akpınar, E. & Das, M. (2024). Havalı güneş kolektör destekli sera gıda kurutucu sisteminin performansının incelenmesi. *ITU Journal of Food Science and Technology*, 2(2), 77-84.

Makale Gönderimi: 2 Şubat 2024

Online Kabul: 8 Haziran 2024

Online Basım: 30 Eylül 2024

## 1. Giriş

Türkiye coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından diğer birçok ülkeye göre nispeten şanslı durumdadır. Ülkemiz güneş kuşağı adı verilen ve güneş enerjisince zengin bir bölgede yer almasına karşın güneş enerjisinden sıcak hava elde etmek için yeteri kadar faydalanılamamaktadır.

Dünyadaki enerji kaynaklarının sürekli azalması ve gün geçtikçe pahalılaşmasından dolayı, güneş enerjisi gibi yeni ve yenilebilir enerji kaynaklarına yönelim gerekmektedir. Güneş enerjisi ucuz yolla elde edilebilen, tükenmeyen, çevre kirliliğine yol açmayan bir enerji olduğundan çok fazla avantajlıdır. Güneş enerjisinden faydalanarak yapılan güneş enerjili kurutma tesisleri ne yazık ki Türkiye gibi tarım yönünden çok güçlü olan bir ülkede çok fazla ilgi görmemektedir. Oysa bu tesislerde kurutulan ürünler hem daha temiz bir ortamda daha çabuk kurutulmakta hem de hava şartlarından gelebilecek zararlardan korunmaktadır. Gıda kurutma sistemlerinin biri de sera kurutma sistemleridir. Sera tipi kurutucular direkt güneş enerjisiyle kurutulan sistemler kategorisinde ve bazen de kombine tipte (indirekt + direkt tipte) kurutma sistemleri kategorisinde değerlendirilmektedirler (Belessiotis ve Delyannis, 2011).

Sera tipi kurutucular basit bir tasarıma, kolay imalata ve düşük maliyete sahiptirler (Selimefendigil ve diğ., 2022). Sera tipi kurutucular ile alakalı birçok değerli çalışmalar mevcuttur. Kumar ve Tiwari (Jain ve Tiwari, 2004) ürünün kütlesinin ve hacminin konvektif kütle transfer katsayısı üzerine etkisini incelemek amacıyla sera tipi kurutucuda zorlanmış ve doğal taşınım içerisinde kurutma yapmışlardır. Bu çalışmada, araştırmacılar üç farklı boyuttaki tepeşilere toplam 0,75 kg ve 2,0 kg ağırlıktaki ürünü kurutmuşlardır. Elde ettikleri veriler yardımıyla da konvektif kütle transfer katsayılarını bulmuşlardır. Anwar ve Tiwari (2001) tarafından sera tipi kurutucu içerisinde kaju ürünü farklı ağırlıklarda kurutularak, kurutulan ürünün kütlesi için önemli bir işlev olan kütle transfer katsayısı hesapları yapılmıştır. Kumar ve Tiwari (2007) soğan dilimlerinde konvektif ısı transfer katsayısının kütle üzerindeki etkisini çalışmak için doğal taşınımında direkt güneş altında ve serada, zorlanmış taşınımında serada kurutma çalışmaları yapmışlardır. Araştırmacılar, soğanı 300 gr, 600 gr ve 900 gr olmak üzere üç farklı ağırlıkta kurutmuşlardır. Kurutma işlemi güneşte ve serada 33 saat sürmüştür. Güneş altında ve seradaki deneylerden elde edilen verilerle regresyon analizi yaparak konvektif ısı transfer katsayısını hesaplamışlardır.

Yapay zekâ yöntemleri çözümü zor olan birçok veriyi daha kolay işlemek için kullanılan popüler bir yöntemdir. Birçok alanda yapay zekâ uygulamaları olduğu gibi sera kurutma da bu yöntemler kullanılmaktadır. De Jesús Rubio ve diğ. (2019) çalışmalarında portakal kurutmak için sera güneş kurutucusu kullanmışlardır. Elde ettikleri kurutma verilerini makine öğrenmesi olan Kalman filtresi ile modellemişlerdir. Kurutma sıcaklık değerleri ve ürün nem değerleri için makine öğrenmesi modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Değerleri ortalama %5 hata ile modellemişlerdir. Janjai ve diğ (2018) bir sera güneş kurutucusunda et ürünü kurutmuş ve deneysel kurutma verilerini yapay sinir ağı ile modellemişlerdir. Litchi etinin kurutulması için kurutucunun performansını modellemek için bir yapay sinir ağı (YSA) yaklaşımı kullanmışlardır. YSA modeli için geri yayılım algoritmasını kullanmışlardır. Deneysel veriler ile YSA verilerinin birbirleri ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir (Janjai ve diğ., 2018). Chauhan ve diğ. (2018) acı kabak pullarını kurutmak için güneş enerjisi hava ısıtma sistemi eklenmiş bir sera kurutucuları kullanmışlardır. Doğrusal olmayan regresyon analizi ile ürünün sıcaklık ve nem değerlerini modellemişlerdir. Ortalama %3 hata ile deneysel verileri modellemişlerdir.

Kushwah ve diğ. (2022) Hindistan'ın Gwalior kentindeki MITS kampüsünün çatısında vakum tüplü güneş enerjili gıda

kurutucuda mantar kurutmuş ve kurutma süreci boyunca konvektif ısı transferi katsayısını hesaplamışlardır. Yapay sinir ağını, konvektif ısı transfer katsayısını tahmin etmek için geliştirmişlerdir. Geliştirilen yapay sinir ağı modeli, güneş ışını, bağıl nem, çevresel sıcaklık ve zaman gibi girdi faktörleri kullanılarak eğitildikten sonra ısı transfer katsayısını tahmin etmeye yardımcı olmuştur. Geliştirilen yapay sinir ağı modelinin  $R^2$  değeri 0,99'dur, bu da modelin hesaplanan ısı transfer katsayılarına çok yakın değerler tahmin ettiğini göstermişlerdir (Kushwah ve diğ., 2022). Rasooli ve diğ. (2021) konvektif bir kurutucuda elma dilimlerini 50, 60 ve 70 °C'de 1,0 m/s hava hızında kurutmuşlardır. Elma dilimlerinin nem oranı (MR) üzerindeki performansını YSA ile modellemişlerdir. YSA sonuçlarına göre, MR tahmininde  $R^2$  değerinin 0,9991 olduğunu hesaplamışlardır (Rasooli ve diğ., 2021). Zadhossein (2022) kavun dilimlerinin kurutulması için bir hibrit kütle-konvektif kurutucunun enerji ve ekserji analizini sunmuştur. Deneyleri üç sıcaklık seviyesinde (40, 55 ve 70°C), bir hava hızı seviyesinde (0,5 m/s) gerçekleştirmiştir. Giriş işlem parametreleri (IR gücü, giriş hava sıcaklığı ve kuruma süresi) ile kurutulmuş ürünün termodinamik özellikleri arasındaki ilişkileri, yapay sinir ağı (YSA) ve ANFIS uygulanarak modellemiştir. YSA ve ANFIS kullanılarak geliştirilen modellerin, ANFIS modelinin nem oranı, enerji verimliliği ve ekserji kaybını YSA modelinden daha iyi tahmin ettiğini gözlemlemiştir. Ayrıca kuruma hızı ve ekserji verimliliğini tahmin etme doğruluğu YSA modeli için ANFIS'ten daha iyi olduğunu saptamıştır (Zadhossein, 2022).

Bu çalışmada; zorlanmış taşınım güneş enerjisi destekli sera tipi bir kurutma için HGK tasarımı yapılarak bütünlük bir gıda kurutma sistemi imal edilmiş, imal edilen kurutucuda Bayramiç beyazı (şeftali) ürünü kurutulmuş, kurutma parametreleri ve kurutulan ürünlerin konvektif ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen veri setleri kullanılarak makine öğrenmesi algoritmaları (yapay sinir ağı ve karar ağacı gibi) ile ürünün ısı ve kütle transferi modellemeleri yapılmış ve yapay zekâ yöntemleri ile sera kurutucuda kurulacak ürün için kullanılacak faydalı kurutma modelleri elde edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneysel kurulum

Çalışma hem deneysel hem de yapay zekâ yöntemsel uygulama ağırlıklıdır. Deneysel kurulumda kurutma ürünü 10 mm kalınlığında oval olarak kesilmiş şeftali ürünüdür. Kurutma deneylerinde 200 g şeftali ürünü kullanılmıştır. Şeftali ürünlerinin kurutma işleminde, sera tipi güneş enerjisi destekli bir kurutucu tasarlanıp imal edilmiştir. Kurutma sisteminde kullanılacak sıcak hava 1000x600 mm ebatlarındaki havalı kolektörden sağlanmıştır. Kolektörün en önemli elemanı olan güneş ışınımını absorbe eden yutucu yüzey siyaha boyanmış galvanizli çelikten yapılmıştır. Yutucu yüzey üzerinde havanın uzun süre dolaşmasını sağlamak ve dolayısıyla ısı transfer yüzeyini artırmak için farklı tip, konum ve açılarda kanatçıklar yerleştirilmiştir. Havalı kolektörden elde edilen sıcak hava sera etkisine sahip olan kurutma odasına gönderilmiştir. Güneş enerjili destekli bir kurutma sisteminin enerji ve ekserji analizinin yapıldığı ve kurutma parametrelerinin belirlendiği bu çalışmada öncelikle farklı hızlarda toplayıcıya ve sera etkili kurutma odasına havanın giriş ve çıkış sıcaklığı, çevre sıcaklığı, anlık ve istenen zaman aralığında toplam güneş ışınması ve rüzgar hızı ölçümleri periyodik aralıklarla yapılmıştır. Güneş ışınması ölçümlerinde anlık ve belirli zaman aralıkları ile ölçüm yapabilen bir piranometre ve onunla bağlantılı hale getirilecek solar integratör kullanılmıştır.

Sıcaklık ölçümleri demir-constantan ısı çiftleriyle ve dijital sıcaklık okuyucuyla, rüzgâr hızı ve kurutucudan çıkan havanın hızı anemometreyle, kurutulan ürünlerin kütle kaybı değerleri dijital hassas teraziyle, kurutma odası içinin ve çevrenin bağıl nem değerleri higrotermometreyle tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda belirli periyotlarda okunan sıcaklık, bağıl nem değerleri, kurutulan ürünün nem içeriği ve güneş ışınım şiddeti değerleri kullanılarak güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde kurutma parametreleri

belirlenmiş, kurutulan ürünlerin ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Tasarlanmış ve imal edilmiş olan deney setinin görseli Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. HGK destekli sera kurutma sistemi.  
Figure 1. ASC assisted greenhouse drying system.

Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve ölçüm belirsizlik değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm cihazları ve hata değerleri.  
Table 1. Measuring instruments and error values.

Cihaz	Model	Hata değeri
Işınım Ölçer	Mastech SM206	±10 W/m <sup>2</sup>
Isıl Çift	AEC-TECH	±0,1°C
Anemometre	Unit UT362	±(3%+0,5)
Hassas Terazı	Üniversal	±0,1g

## 2.2. Teorik hesaplamalar

### Kütle değişimi nemlilik ölçüsü

Gıda ürünlerinin ihtiva ettiği nem oranı, kendi bünyelerinde yer alan su miktarı olarak değerlendirilir. Gıda içerisindeki bu su miktarını ifade etmek için yüzdelik parametreler kullanılır. Nem miktarları belirlenirken yaş ve kuru baz esaslı tanımlar kullanılmaktadır. Gıda ürününün yaş baz (y.b.) ve kuru baz (k.b.) nem içeriğini hesaplamak için aşağıda sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) kullanılmıştır (Akpınar ve Toraman, 2016).

$$MC_{y.b} = \frac{W_s}{W_s + W_k} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\%MC_{k.b} = \frac{W_s}{W_k} \quad (2)$$

Eşitlik (1) ve (2) 'de;  $W_s$  yaş ağırlık ve  $W_k$  kuru ağırlıktır. Boyutsuz nem oranı (MR) değerleri Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanmıştır (Daş ve diğ., 2021).

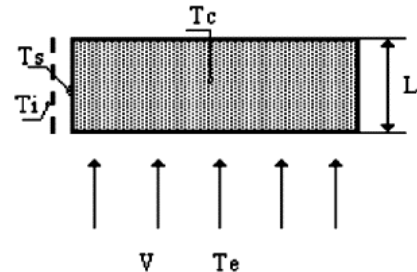
$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te  $M_e$ , kurutulan ürünün denge bağıl nem değeridir. Kurutulacak şeftali dilimlerinin denge nem içeriği 14,9 g su/g katı madde olarak Shimadzu MOC63u nem tayin cihazı ile belirlenmiştir.

### Isı transfer katsayısı

Gıda kurutma süreçlerinde ortaya çıkan ürün ile sıcak akışkan arasındaki ısı transferini ifade etmek için konvektif ısı transferi katsayısı kullanılır. Ürün yüzeyi düz plaka olarak tanımlanırsa, bu çalışmada ürün yüzeyi üzerindeki zorlanmış akışta oluşabilecek konvektif ısı transferi katsayısı üzerinde durulmuştur. Plaka üzerindeki akışkanın viskozitesi sayesinde plaka yüzeyinde akışkan hızının sıfır hızına sahip olması gerektiğinden, yani bir sınır tabaka mevcut olduğundan dolayı, plaka yüzeyindeki akış ile olarak laminer akış şeklinde değerlendirilecektir. Fakat akış rejiminden dolayı Reynolds sayısı yeterli miktarda yüksek olduğunda, akış türbülansa da dönüşebilir (Khanlari ve diğ., 2020).

Konvektif ısı transfer katsayısı hesaplamalarında, ürün yüzeyi olarak kabul ettiğimiz plakanın, sabit bir iç sıcaklığa ( $T_i$ ) sahip olduğu ve plakanın mevcut uzunluğunun ( $L$ ) kurutma bölgesinde bir türbülans akışı oluşturmayacak veya tetikleme kadar kısa olduğu hesaplama öncesi kabul edilmiştir. Ürün yüzeyi olarak belirtilen plaka üzerindeki zorlanmış akış şartlarında meydana gelebilecek olan konvektif ısı transferi Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Düz bir plaka üzerinde zorlanmış akış için konvektif ısı transferi.

Figure 2. Convective heat transfer for forced flow over a flat plate.

Ortalama ısı transfer katsayısı, laminer akış için Pohlhausen Eşitliği (Eşitlik 4) ve aşağıda verilen (Daş ve diğ., 2021) diğer Eşitlikler (Eşitlik 5-7) kullanarak hesaplanmıştır.

$$Nu_{lam} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$



$$(Re < 2 \times 10^5) \quad (4)$$

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{K_v} \quad (5)$$

$$Re = \frac{L \cdot V \cdot \rho_v}{\mu_v} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\mu_v \cdot C_v}{K_v} \quad (7)$$

Eşitliklerde belirtilen parametreler için, Re; Reynolds sayısını ve Pr; Prandtl sayısını hesaplamak için nemli havanın termofiziksel özellikleri kullanılmıştır. Bu Eşitlikler ( Eşitlik 8-12) aşağıda verilmiştir. Eşitliklerde yer alan havanın yoğunluğu ( $\rho_v$ ), özgül ısı değeri ( $C_v$ ), ısı iletkenlik değeri ( $K_v$ ) ve viskozite değeri ( $\mu_v$ ) kullanılmıştır. (S. I. Anwar ve Tiwari, 2001).

$$\rho_v = \frac{353.44}{(T_i + 273.15)} \quad (8)$$

$$K_v = 0.0244 + 0.6773 \times 10^{-4} T_i \quad (9)$$

$$C_v = 999.2 + 0.1434 T_i + 1.101 \times 10^{-4} T_i^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_i^3 \quad (10)$$

$$\mu_v = 1.718 \times 10^{-5} + 4.620 \times 10^{-8} T_i \quad (11)$$

$$T_i = \frac{(T_s + T_e)}{2} \quad (12)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde ifade edilen havanın termofiziksel özellikleri hesaplamaları için kullanılan  $T_i$  sıcaklık değeri, kurutma ortamı sıcaklık değerini ifade eden  $T_e$  sıcaklığı ile ürün yüzey sıcaklığını ifade eden  $T_s$  sıcaklık değerlerinin ortalaması ile belirlenmiştir.

### Belirsizlik analizi

Yapılacak olan sıcaklık, hava hızı, nem ve ışınım parametrelerinin ölçülmesi sırasında ortaya çıkacak belirsizlikler için imalat hatalarının, sabit hataların ve rastgele oluşabilecek hataların etkili olduğu düşünülecektir. Belirsizlik oluşturabilecek bu etkenlerin toplam ölçüm belirsizliğine olan etkilerini belirlemek gerekir. Ölçülen değerleri dikkate alarak bu etkilerden kaynaklanan toplam hataların hesabı için Eşitlik 13 kullanılacaktır (Akpınar ve Koçyiğit, 2010).

$$W_R = \left[ \left( \frac{\delta R}{\delta x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\delta R}{\delta x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\delta R}{\delta x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

### 2.3. Hesapsal zekâ yöntemleri

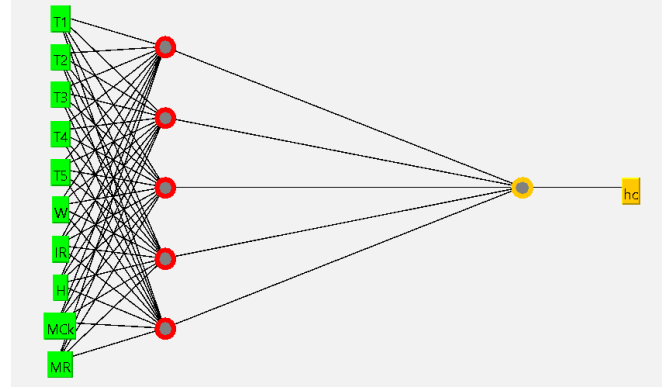
Makine öğrenmesi yöntemleri, yapay zeka metotları arasında en çok kullanılan yöntemlerdir. Makine öğrenmesi algoritmalarını tanımlamak gerekirse, veriler üzerinde yapısal öğrenme yapabilen, sınıflandırma kuralları üretebilen ve belirtilen parametreyi tahmin edebilen metotlar olarak ifade edilebilir. Makine öğrenmesinde örnek veri setleri kullanılarak tahminsel modeller elde edilir. Bazı bilimsel çalışmalar sonucu ortaya çıkan büyük miktardaki verilerin işlenmesi oldukça zahmetli bir süreçtir. Bu sebeple çalışmadaki ana amaca ulaşmak için çözülmesi gereken problem için bu probleme ait verilerden elde edilen setler, makine öğrenmesi ile modellenerek çözüme ulaşmak hedeflenmektedir (Das ve Akpınar, 2018).

Konvektif ısı transferi değerleri, birer yapay zeka yöntemi olan yapay sinir ağı ve karar ağacı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modellenmiştir. Yapay zeka ile model oluşturmak için MATLAB 2021a yazılımı kullanılmıştır. Kurutma deneyi sonucunda elde edilen veri setinden, 250 adet giriş ve 25 adet

çıkış verisi kullanılmıştır. Toplam 275 verinin 190 tanesi eğitim işleminde kullanılmıştır. 85 tanesi ise test işleminde kullanılmıştır. Öğrenme algoritması olarak Feed Forward Back Propagation (ileri doğru beslemeli ve geriye yayılım) algoritması kullanılmıştır. Eğitim için Levenberg Marquardt algoritması kullanılmıştır.

### Yapay sinir ağları

İnsan beyni çalışma prensibini benimseyen bir yöntem olan yapay sinir ağları, herhangi bir veri seti içerisindeki istenilen parametreyi, aynı veri seti içerisindeki diğer parametrelere bağlı olarak tahmin edebilen bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Modellemeyi gerçekleştirirken adaptasyon, öğrenme, transfer ve test fonksiyonlarını kullanır. Yapay sinir ağları ile görüntü işleme, veri tahmin etme, veri kümelere veya sınıflandırma yapılabilir. Yapay sinir ağları tıpkı insanlardaki gibi öğrenme dürtüsüne ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden modellenecek olan veri seti kümesini, eğitim ve test kümesi olarak iki farklı guruba ayırır (Ghritlahre ve diğ., 2020). Sunulan bu çalışmada kullanılan yapay sinir ağı model yapısı Şekil 3'te verilmiştir.

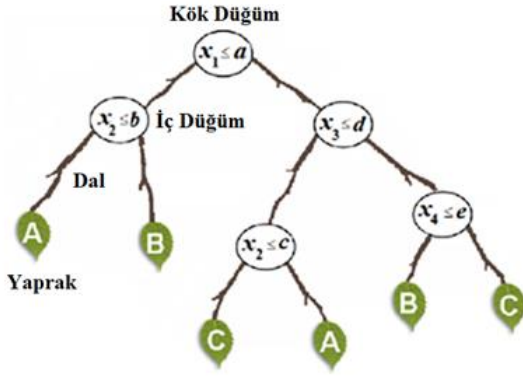


Şekil 3. YSA ağ yapısı.  
Figure 3. ANN network structure.

Şekil 3'te  $T_1$ ,  $T_2$  kolektör giriş çıkış sıcaklığı,  $T_3$ ,  $T_4$ , sera giriş çıkış sıcaklığı,  $T_5$  sera iç ortam sıcaklığı,  $W$  ürün ağırlık değeri,  $IR$  güneş ışınım değeri,  $H$  nem,  $MCK$  kuru baz nem içeriğini ve  $MR$  nem oranı değerini ifade etmektedir.

### Karar ağacı

Literatürde son zamanlarda popülerliği giderek artan bir makine öğrenmesi yöntemi de karar ağaçları algoritmalarıdır. Karar ağaçlarının yaygın olarak kullanılmasındaki nedenlerden en önemli olanı, veri setlerini farklı kurallara göre ayırarak bir ağaç yapısına benzer bir yapı oluşturmasıdır. Tıpkı bir ağaç gibi kök, gövde ve dalları ifade eden veri kuralları ve eşitlikler üreterek yaprak olarak ifade edilen model parametreye ulaşırlar. Karar ağacının yapısal anlatımı Şekil 4'de verilmiştir. Şekilde verilen ağaçta her bir nitelik (nem, sıcaklık, hız v.b.) bir kök düğüm tarafından ifade edilir. Ağaç yapısından hedef, en üstte bulunan ve kök olarak ifade edilen parametreyi gövde ve dallardaki kurallara göre modelleyebilmektir (Çerçi ve Daş, 2019). Ağaç yapısını daha detaylı anlatacak olursak, veri setlerini içeren kök düğümü, diğer iç düğümler olarak ifade edilen dallar ve uç düğüm olarak ifade edilen yapraklar oluşturur. Düğümler ve dallar oluşturulurken karar ağacı algoritması sınıflandırma kurallarını rastgele belirler. Daha sonra bu kurallara göre veri setleri içerisinde aldıkları cevaplara göre en kısa sürece cevaba gidecek olan modeli ifade eden ağaç yapısını oluştururlar. Karar ağaçları algoritmaları içerisinde yaygın olarak kullanılan algoritma M5P algoritmasıdır. (Alic ve diğ., 2019).



Şekil 4. Karar ağacını temsilen üç sınıftan oluşan karar ağacı yapısı (Alic ve diğ., 2019).

Figure 4. Decision tree structure with three classes representing the decision tree (Alic et al., 2019).

Deney sonuçları ile makine öğrenmesi sonuçlarını karşılaştırmak için Tablo 2’de ki hata analiz yöntemleri kullanılmıştır. Ortalama bağıl hata (MAE) ve kök ortalama karesel hata (RMSE) istatistiksel hata analizleri kullanılmıştır.

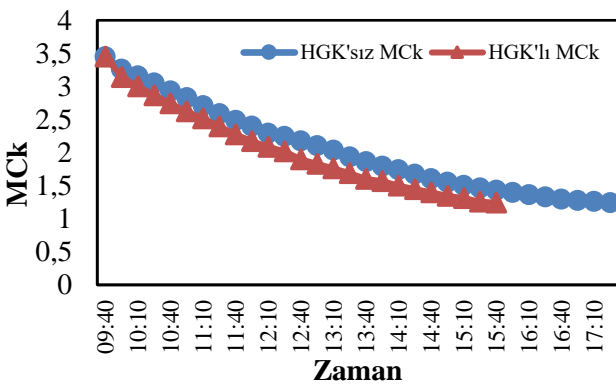
Tablo 2. Hata analizleri.

Table 2. Error analysis.

Hata analizi	Formülü	Parametreler
MAE	$\frac{ P_1 - A_1  + \dots +  P_n - A_n }{n}$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer n: Toplam Hata Değeri
R <sup>2</sup>	$1 - \frac{\sum (A - P)^2}{\sum (P - A)^2}$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer
RMSE	$\sqrt{\frac{(P_1 - A_1)^2 + \dots + (P_n - A_n)^2}{n}}$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer n: Toplam Hata Değeri

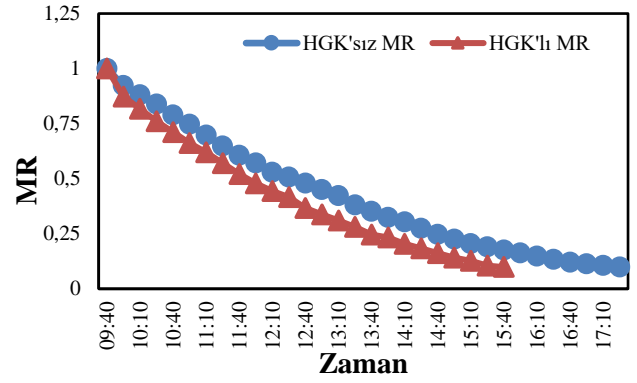
### 3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan deneyler sonucu HGK’lı ve HGK’sız yapılan kurutma işlemlerinde ürün kuru baz nem içeriği (Mck) değerleri ve nem oranı (MR) değerleri sırası ile Şekil 5 ve 6 da verilmiştir.



Şekil 5. Kuru baz nem içeriği değerlerinin kuruma zamanına göre değişimi.

Figure 5. Variation of dry base moisture content values according to drying time.

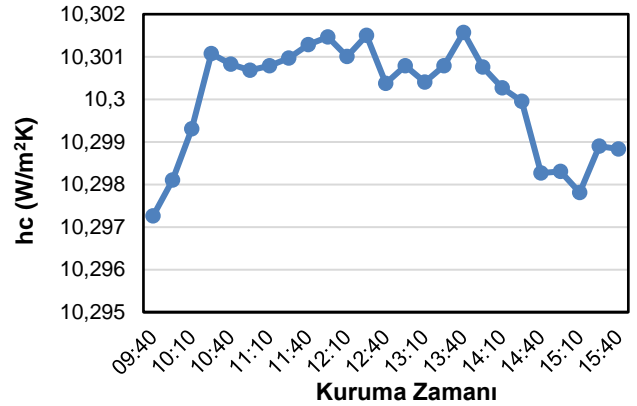


Şekil 6. Nem oranı değerlerinin kuruma zamanına göre değişimi.

Figure 6. Variation of moisture content values according to drying time.

Şekil 5 ve Şekil 6’da açıkça görüldüğü gibi, HGK’lı sera kurutmada ürün kuruma davranışları daha kısa sürmüş ve denge ağırlığına daha erken sürede ulaşılmıştır.

HGK’lı serada sabit fan devrinde kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sera çıkışından ölçülen hava hızı 2,59 m/s’dir. Ürün yüzeyinden ölçülen hava hızı 1,02 m/s’dir. Konvektif ısı transferi katsayısı hesaplamaları için ürün yüzeyindeki hız önemli olduğu için Reynolds hesaplamalarında ürün yüzey hızı kullanılmıştır. HGK’lı serada Eşitlik 6 ile ortalama Re sayısı 476,5 olarak belirlenmiştir. HGK’lı kurutma işleminde ürünün yüzeyi ile sera ortamındaki hava arasında meydana gelen konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin kuruma süresince değişimi Şekil 7’de verilmiştir. hc değerleri 10,29 ile 10,302 W/m<sup>2</sup>K arasında değişiklik göstermiştir.



Şekil 7. Konvektif ısı transferi değerlerinin kuruma zamanına göre değişimi.

Figure 7. Variation of convective heat transfer values according to drying time.

Yapılan deneylerde ürün kurutmak için HGK destekli bir sera kurutucu kullanılmıştır. Kullanılan HGK nın kurutma performansına etkisini göstermek için Şekil 8 eklenmiştir. Şekil 8’de aynı ağırlıktaki ürünler için HGK lı ve HGK sız serada ürünlerin kuruma zamanı gösterilmiştir. HGK lı serada aynı ürün 120 dakika daha erken kurumuştur.

Yapay sinir ağı ve karar ağacı (M5P) ile konvektif ısı transferi katsayısı tahminsel modellerinin değerleri ile deneysel değerler arasındaki benzeşim Şekil 9’da gösterilmiştir. YSA ile modellenen konvektif ısı transferi değerleri ile deneysel değerler birbirlerine daha yakındır.

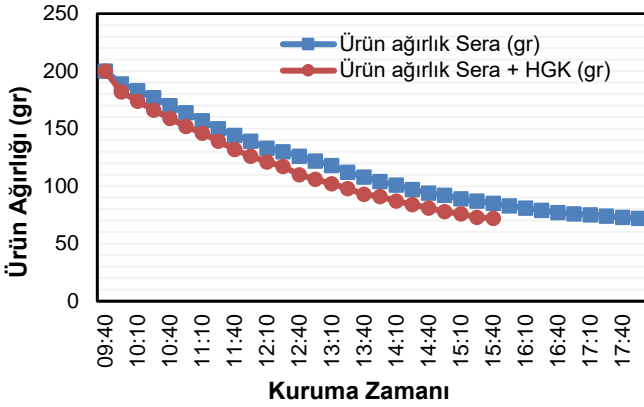
Makine öğrenmesi algoritmaları ile modellenen konvektif ısı transferi değerleri ile deneysel değerler arasındaki hata

analizleri sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Tabloya göre en az hata değeri her iki analize göre YSA modellerindedir.

Tablo 4. Literatürde kurutma parametreleri için yapılan yapay zekâ çalışmalarının hata değerleri.

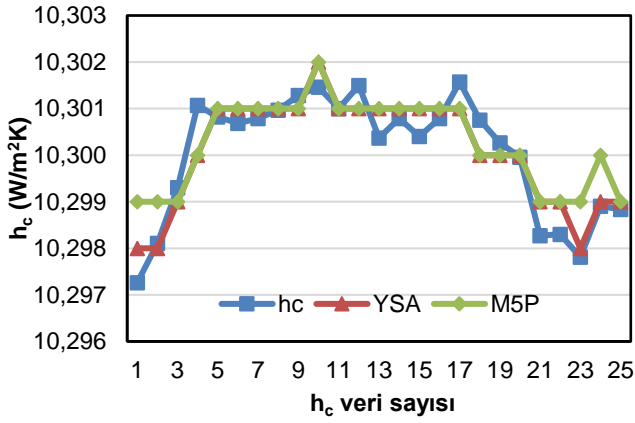
Table 4. Error values of artificial intelligence studies for drying parameters in the literature.

İncelenen parametre	Yapay zeka yöntemi	Hata değeri	Referans
Isı transfer katsayısı	YSA	0,972 R <sup>2</sup>	Kushwah ve diğ., 2022
MR	YSA	0,04 MAE	Rassoli ve diğ., 2021
Enerji verimi	ANFIS	0,98 R <sup>2</sup>	Zadhossein ve diğ., 2022
Kurutma sıcaklığı	Karar Ağacı	0,021 RMSE	Abdelkader ve diğ., 2024
Ürün ağırlığı	YSA	0,97 R <sup>2</sup>	Daliran ve diğ., 2023
Isı transfer katsayısı	YSA	0,971 R <sup>2</sup> 0,01 MAE 0,9 RMSE	Mevcut çalışma



Şekil 8. HGK destekli sera kurutucuda ve HGK sız sera kurutucuda ürün ağırlık değişimi.

Figure 8. Product weight change in greenhouse dryer with HGK and greenhouse dryer without HGK.



Şekil 9. HGK'lı sera kurutucu için deneysel ve tahminsel hc verileri karşılaştırılması.

Figure 9. Comparison of experimental and predicted hc data for greenhouse dryer with HGK.

Tablo 3. İstatistiksel hata değerleri.

Table 3. Statistical error values.

Hata analizi	YSA	M5P
MAE	0,01	0,07
R <sup>2</sup>	0,971	0,957
RMSE	0,09	0,011

Literatürde farklı kurutma proseslerindeki kurutma parametreleri için yapılan yapay zekâ çalışmaları incelendiğinde, elde edilen hata değerleri literatürde yapılan çalışmalara yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumu ifade etmek için Tablo 4 eklenmiştir. Tablo 4'de mevcut çalışma ile literatürde yapılan çalışmalardaki yapay zekâ modellerinin hata oranları karşılaştırılmıştır.

#### 4. Sonuç

Yapılan çalışma sonucunda bir sera kurutucusunun performansını arttırmak için kullanılan HGK'nın etkilerinin ve konvektif ısı transfer katsayısı modellerinin sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 1- Sera ile kurutulan ürün 495 dakikada kuru ağırlığa ulaşırken, benzer deneysel şartlarda ve aynı ürün ağırlığında HGK destekli kurutucuda 360 dakikada kuruma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu durumda HGK desteği ile aynı ürün, HGK desteği olmadan yapılan sera kurutmada %28 daha hızlı sürede kurumuştur.
- 2- HGK destekli sera kurutucusunda hesaplanan konvektif ısı transferi değerleri 10,29 ile 10,302 W/m<sup>2</sup>K arasında değişiklik göstermiştir.
- 3- Konvektif ısı transferi değeri makine öğrenmesi algoritmaları ile modellenmiş, en iyi model sonucu %1 hata ile YSA tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada farklı ürünler kurutularak, daha fazla veri setleri elde edilebilir ve farklı makine öğrenmesi algoritmaları ile daha az hata değerine sahip modeller ortaya sunulabilir. Bu çalışmanın gelecekteki planlamasında sera içerisindeki ısı ve sıcaklık dağılımını ifade edebilen sayısal modeller elde etmek ve en uygun sera geometri tasarımı ortaya koymak vardır.

#### 5. Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir

#### 6. Kaynaklar

- Abdelkader, T. K., Sayed, H. A., Refai, M., Ali, M. M., Zhang, Y., Wan, Q., Abdelhamid, M. A. (2024). Machine learning, mathematical modeling and 4E (energy, exergy, environmental, and economic) analysis of an indirect solar dryer for drying sweet potato. *Renewable Energy*, 227, 120535.
- Akpınar, E. K. & Koçyiğit, F. (2010). Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Applied Energy*, 87(11), 3438–3450.
- Akpınar, E. K. & Toraman, S. (2016). Determination of drying kinetics and convective heat transfer coefficients of ginger slices. *Heat and Mass Transfer*, 52, 2271–2281.
- Alic, E., Das, M., & Kaska, O. (2019). Heat flux estimation at pool boiling processes with computational intelligence methods. *Processes*, 7(5), 293.

- Anwar, S. I., & Tiwari, G. N. (2001). Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions. *Energy Conversion and Management*, 42(5), 627-637.
- Anwar, S. I., & Tiwari, G. N. (2001). Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying—an experimental study. *Energy Conversion and Management*, 42(14), 1687-1698.
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665-1691.
- Çerçi, K. N., & Daş, M. (2019). Modeling of heat transfer coefficient in solar greenhouse type drying systems. *Sustainability*, 11(18), 5127.
- Chauhan, P. S., Kumar, A., Nuntadusit, C., & Banout, J. (2018). Thermal modeling and drying kinetics of bitter gourd flakes drying in modified greenhouse dryer. *Renewable Energy*, 118, 799-813.
- Daliran, A., Taki, M., Marzban, A., Rahnama, M., & Farhadi, R. (2023). Experimental evaluation and modeling the mass and temperature of dried mint in greenhouse solar dryer; Application of machine learning method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 47, 103048.
- Das, M., & Akpınar, E. K. (2018). Investigation of pear drying performance by different methods and regression of convective heat transfer coefficient with support vector machine. *Applied Sciences*, 8(2), 215.
- Daş, M., Aliç, E., & Akpınar, E. K. (2021). Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 236-246.
- de Jesús Rubio, J., Garcia, E., Ochoa, G., Elias, I., Cruz, D. R., Balcazar, R., ... & Novoa, J. F. (2019). Unscented Kalman filter for learning of a solar dryer and a greenhouse. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(5), 6731-6741.
- Ghritlahre, H. K., Chandrakar, P., & Ahmad, A. (2020). Application of ANN model to predict the performance of solar air heater using relevant input parameters. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100764.
- Jain, D., & Tiwari, G. N. (2004). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 765-783.
- Janjai, S., Tohsing, K., Lamlert, N., Mundpookhier, T., Chanalert, W., & Bala, B. K. (2018). Experimental performance and artificial neural network modeling of solar drying of litchi in the parabolic greenhouse dryer. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 13(1), 1-12.
- Khanlari, A., Sözen, A., Afshari, F., Şirin, C., Tuncer, A. D., & Gungor, A. (2020). Drying municipal sewage sludge with v-groove triple-pass and quadruple-pass solar air heaters along with testing of a solar absorber drying chamber. *Science of The Total Environment*, 709, 136198.
- Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2007). Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1337-1350.
- Kushwah, A., Gaur, M. K., Kumar, A., & Singh, P. (2022). Application of ANN and prediction of drying behavior of mushroom drying in side hybrid greenhouse solar dryer: An experimental validation. *Journal of Thermal Engineering*, 8(2), 221-234.
- Rasooli Sharabiani, V., Kaveh, M., Abdi, R., Szymanek, M., & Tanaś, W. (2021). Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. *Scientific Reports*, 11(1), 9155.
- Selimefendigil, F., Şirin, C., & Öztop, H. F. (2022). Improving the performance of an active greenhouse dryer by integrating a solar absorber north wall coated with graphene nanoplatelet-embedded black paint. *Solar Energy*, 231, 140-148.
- Zadhossein, S., Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M., Kalantari, D., & Khalife, E. (2022). Comparison of two artificial intelligence methods (ANNs and ANFIS) for estimating the energy and exergy of drying cantaloupe in a hybrid infrared-convective dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16836.

