

Şerit biçiminde kesilmiş gıda maddeleri için basit bir kurutma modelinin geliştirilmesi

M. Azmi AKTACİR
Bülent YEŞİLATA

Özet

Endüstriyel katı maddelerin kurutulması, mühendisliğin en önemli uğraş alanlarından biridir. Detaylı bir kurutma analizi, kurutmadaki karmaşık transport işlemlerinden dolayı oldukça güçtür. Literatürde gıda maddeleri için, basit yaklaşımlar kullanılarak çeşitli modeller önerilmiştir. Ancak, kurutma işleminin modellenmesinde, verilen bir kurutma koşulunda bir malzemenin kurutma kinetiğinin tahmin edilmesi ve tanımlanmasında halen bazı yetersizlikler söz konusudur. Bu çalışmada, şerit geometrili gıda maddelerinin kurutulması sırasında gerçekleşen kütle transferi için yeni bir matematiksel model yaklaşımı önerilmektedir. Çalışmada önerilen model, kırmızı biberin kurutma deneyine ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Model ve deney sonuçları arasında büyük bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

1. GİRİŞ

Kurutma en eski, en kolay ve en ucuz gıda saklama yöntemlerinden birisidir. Bugün endüstriyel katı maddelerin kurutulması, mühendisliğin en önemli uğraş alanlarından biridir [1]. Güneydoğu Anadolu Projesi'nin (GAP) işlerlik kazanmasıyla birlikte, kurutma işlemi bu bölgede büyük bir potansiyel bulmuştur. Özellikle büyük bir kültürel mirasa sahip olan Şanlıurfa'da kırmızı biber kurutmanın ayrı bir önemi vardır. Halk arasında biber kurutma,, açık ve bol güneş alan ortamlarda geleneksel yöntemle gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yöntemin beraberinde getirdiği olumsuzluklar, kontrollü bir kurutma yapılmasını zorlu kılmaktadır.

Kurutma amacıyla, yeterli sıcaklığın bulunduğu bir ortama konulan nemli bir maddenin kuruma süreci içinde genel olarak üç periyot bulunur. Bunlar sırasıyla ısınma, sabit hız ve azalan hız peri-

yotlarıdır [2-6]. Bu periyotlarda, ısı ve kütle transferi prosesleri aynı anda görülür. Katı ile üzerinden geçen hava arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle, havadan ıslak katının yüzeyine büyük oranda taşınım ile duyulur ısı akımı olur. Bu ısı, gizli ısıya dönüşerek yüzeyde buharlaşmayı sağlar. Kurumanın başlarında; nem yüzeyden buharlaşmak yerine, katının iç kısımlarından difüzyon veya kapiler kuvvetle yüzeye gelerek, yüzeyin doymuş kalmasını sağlar. Kuruma sabit hızda olur ve bu periyot sabit hız periyodu olarak adlandırılır. Kurutma işlemi devam ederken, belli bir nem de- gerinde katı içinden yüzeye nem geçişi, yüzeyden olan buharlaşmayı sağlayamaz ve katı yüzeyi doymuş tutulamaz. Bu durumda kuruma hızı düşmeye başlar (azalan hız periyodu).

Detaylı bir kurutma analizi, kurutmadaki karmaşık transport işlemlerinden dolayı oldukça güçtür. Kurutma işlemini tanımlamak için farklı fizik-

*Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

nusudur [7-9]. Literatürde gıda maddeleri için, basit yaklaşımlar kullanılarak, çeşitli modeller önerilmiştir. Ancak bu modellerle kurutma kinetiğinin doğru tahmin edilmesinde halen zorluklar söz konusudur ve güvenilir bir model oluşturma konusunda arayışlar sürmektedir [7-17].

Bu çalışmada, gıda maddeleri için bir-boyutlu kütle transfer teorisi kullanılarak, basit bir kurutma modeli elde edilmiştir. Model sonuçları ile kırmızı biber için gerçekleştirilen kuruma deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Gıda maddesi olarak kırmızı biberin seçilmesindeki en önemli etken, ülkemizdeki biber üretiminde GAP bölgesinin payının (1980'de %5.55 iken 2000'de %14'e) hızla artmasıdır [18]. Şanlıurfa ili sınırları içerisinde kırmızı biber üretim miktarındaki artış ise (2003'de 91298 ton iken, 2004'de 116825 ton) daha çarpıcı bir trend izlemektedir [19]. Bölgede, büyük miktarlarda kırmızı biberin kurutulması için endüstriyel kurutma sistemlerine olan ihtiyaç da artmaktadır. Bu nedenle, kırmızı biberin kurutma davranışının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

2. Bir-boyutlu kütle transferi için geliştirilen matematiksel model mantığı

Bu çalışmada kullanılan matematiksel model mantığının anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 1'de gösterilen katı madde içerisinde, sanal olarak iki farklı bölge oluşturulmuştur. Katı madde kurutma fırını içerisine alınırken içerisindeki nem miktarı w_{A0} ile ifade edilmektedir. $t=0$ anında üst yüzey ($z=0$) fırın içerisindeki yüksek sıcaklıktaki hava ile temas ettiğinden yüzeydeki nem miktarı, durgun hava içerisindeki denge nemine (w_S) kadar ani olarak düşer. Bu, katı madde içerisindeki nemin aradaki konsantrasyon farkı nedeniyle üst yüzeye transferine sebep olur. Katı maddenin diğer yüzeyine ($z=L$) yakın kısımlarda başlangıçtaki konsantrasyon değişmez. Ancak, $z(t)$ ile gösterilen ara yüzey, $v(t)$ hızıyla z yönünde hareket eder.

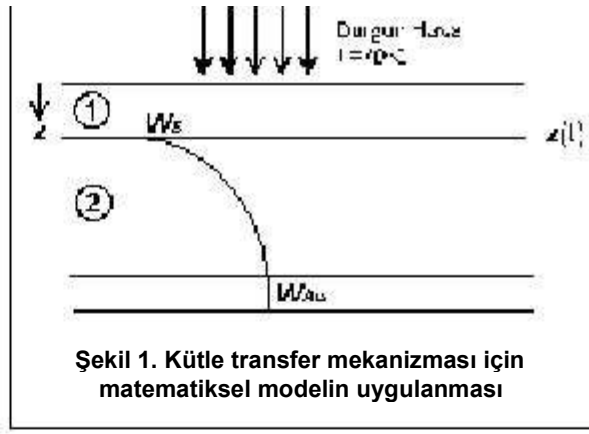
Modeldeki amaç, bu hareketli koordinatın, katı madde içerisinde herhangi bir andaki konumunu belirlemek suretiyle, katı madde içerisinden ortam havasına transfer edilen nemin hızını tespit etmektir. Kütle transferi genel denklemi,

$$\frac{\partial w_A}{\partial t} + (\rho_A v) = (\rho_A D_{AB} \frac{\partial w_A}{\partial z}) \quad (1)$$

denklemlerle verilebilir:

$$k_z = \frac{K_{12}}{2\rho_A^2(\omega_{A0} - \omega_e)^2} \quad (7)$$

ilerleme hızı $v(t)$ değerinin hesabı k_z değerinin



Şekil 1. Kütle transfer mekanizması için matematiksel modelin uygulanması

bir boyutlu, sabit r_A , r_B ve D_{AB} koşullarında,

$$\frac{\partial w_A}{\partial t} + (\rho_A v) = (\rho_A D_{AB} \frac{\partial w_A}{\partial z^2}) \quad (2)$$

denklemlerle ifade edilebilir. Denklemlerde, $v=v(t)$ olduğundan,

$$\frac{\partial w_A}{\partial t} + v \frac{\partial w_A}{\partial z} = D_{AB} \frac{\partial^2 w_A}{\partial z^2} \quad (3)$$

yazılabilir. Son denklemlerdeki $v(t)$ değeri, hareketli koordinatın ilerleme hızı olup, katı maddeden transfer edilen nem miktarıyla direkt ilişkilidir. İlerleme hızının tespiti için; deneysel olarak tespit edilen kütle değişim oranının, parabolik bir fonksiyonla ifade edilebileceği gerçeğinden hareketle,

$$k_m = \frac{1}{\tau} \frac{\Delta \mu(\tau)}{A} \quad (4)$$

katsayısı tanımlanmıştır. k_m parabolik kütle hız sabiti (g^2/cm^4s), A katı maddenin difüzyon yüzey alanı (cm^2), t ise zamanı göstermektedir. Benzer şekilde ara yüzeyin ilerleme hızı için,

$$\Delta \mu(\tau) = \rho_A A v(\tau) (\omega_{A0} - \omega_e) \quad (5)$$

ilişkisi dikkate alınır, ve $z(t)$ için benzer şekilde bir parabolik sabit tanımlanırsa;

$$z(t) = \sqrt{2k_z t} \quad (6)$$

elde edilir. Denklemlerde, k_z sabiti, parabolik ilerleme hızını (cm^2/s) göstermektedir. Tanımlanan sabitler (k_m ile k_z) arasındaki ilişki aşağıdaki

denklemlerle belirlenir:

$$\Delta \mu(\tau) = \mu(\tau=0) - \mu(\tau) = A \sqrt{k_m \tau} \quad (15)$$

Bu çalışmada; (14) denklemi ile hesaplanan değerlerin deneysel ölçümlerde elde edilen değer

denklemleri $v(t)$ değerini hesaplar, λz değerini bulunmasıyla,

$$v(t) = \frac{\delta(\zeta)}{\delta\tau} = \sqrt{\frac{k_\zeta}{2\tau}} \quad (8)$$

denklemleri yardımıyla kolaylıkla yapılabilir. (3) no'lu denklemin çözümü için ise,

$$w(z) = \frac{\omega_{A0} - \omega_A(z)}{\omega_{A0} - \omega_s}; \quad \zeta(\zeta, \tau) = \frac{\zeta}{\sqrt{4\Delta_{AB}\tau}} \quad (9)$$

boyutsuz parametreleri tanımlanır ve $w(z=0)=1$, $w(z=L)=0$ sınır şartları uygulanırsa;

$$w(z) = \frac{1 - \varepsilon\rho\phi(\zeta - \psi)}{1 + \varepsilon\rho\phi(\psi)} \quad (10)$$

elde edilir. Denklemlerde gösterilen ψ katsayısı,

$$\psi = \frac{k_\zeta}{2\Delta_{AB}} \quad (11)$$

olarak tanımlanmıştır. (10) denklemleri z ekseninde boyunca belli bir t anında katı madde içerisindeki konsantrasyon dağılımını tespit etme imkanı verir. Böylece, birim zamanda transfer edilen nem miktarının (g/s olarak) bulunabilmesi için,

$$J_A|_{z=0} = -\rho_A \Delta_{AB} \frac{dw_A}{dz} \Big|_{z=0} \quad (12)$$

deşitliği kullanılarak,

$$J_A = \rho_A A \varepsilon \xi \pi (\psi^2) \frac{\omega_{A0} - \omega_s}{1 + \varepsilon\rho\phi(\psi)} \sqrt{\frac{\Delta_{AB}}{\pi\tau}} \quad (13)$$

analitik çözümü elde edilir. Literatürde de mevcut bu denklemlerde, tek bilinmeyen Δ_{AB} dir ve modelin temel amacı da bu değerini tespitidir (Bkz. [20]). Bu amaçla, katı maddeden transfer edilen anlık kütle miktarının (gr olarak),

$$m_A = J_A \tau \quad (14)$$

formülüyle hesaplanması daha uygundur. Bu sayede, deneysel ölçümlerle bulunan kütle değişim değerlerinden yararlanılarak, katı maddeden transfer edilen anlık kütle miktarı aşağıdaki basit

genellenir, deneysel ölçümlerde elde edilen değerlerle, uyuşması gerektiği prensibinden hareket edilmiştir. Son iki denkleme ait eğriler arasındaki farkın minimum olduğu durumu temsil eden DAB değeri, basit grafiksel bir yaklaşım yardımıyla belirlenmiştir. Bu yaklaşıma ait detaylar, gerçek deneysel datalar kullanılarak aşağıda açıklanmıştır.

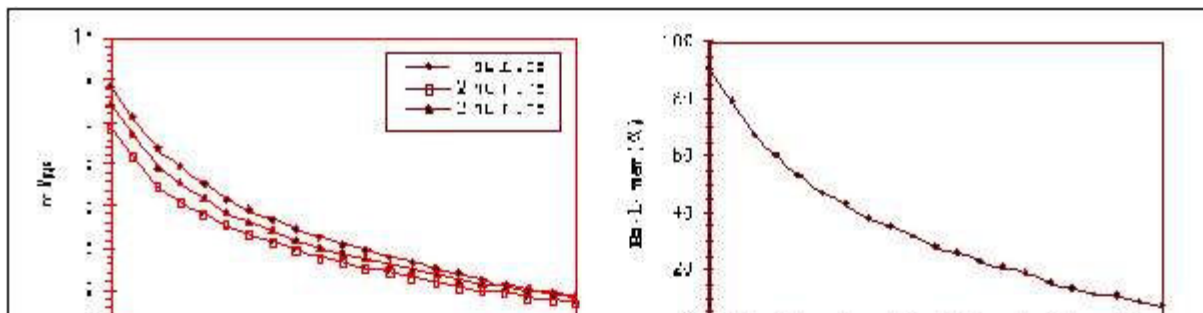
3. Deneysel Çalışma ve Model Sonuçları

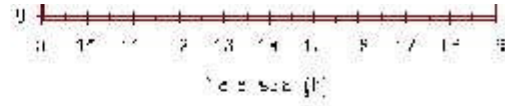
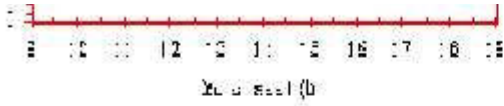
Deney düzeneği; elektrikle ısıtılan, termostatlı ve dijital göstergeli bir etüv ile dijital göstergeli (hasasiyeti: 0.01 g) bir teraziden oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan yaklaşık 0.2 cm kalınlığında ki kırmızı biber numuneleri; bir boyutlu kütle transfer modeline uygun olarak, şerit geometride (kütle transfer alanı $A=10 \text{ cm}^2$) hazırlanmıştır. Her bir deney için, yaklaşık aynı boyutlarda, üç numune kullanılarak, matematiksel modelin uygulanmasında bu üç numuneye ait ağırlık değişiminin aritmetik ortalaması alınmıştır. Numuneler; $70 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulmaya bırakılmıştır. Numunelerin ağırlıklarındaki değişim, yarım saat aralıklarla tespit edilmiştir. Biberlerin başlangıç nemi, ağırlık metoduna göre belirlenmiştir. Kuru ağırlığın bulunması için, biberlerden alınan numuneler, 110°C sıcaklığındaki etüve kullanılarak, zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Ölçümler; bir önceki ölçüm ile son ölçüm arasındaki fark 0.05g oluncaya kadar sürdürülerek, kuru ağırlık belirlenmiştir.

Numunelere ait ölçüm sonuçları Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2(a)'da gösterilen kuruma eğrilerinin davranışı (başlangıç ağırlıkları arasında ki küçük farklar dışında) birbirine benzer/paralel bir seyir izlemektedir. Üç numuneye ait aritmetik ortalamaların kullanılmasıyla, kuru ağırlık esasına göre, biberin bağıl nemi (w) aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

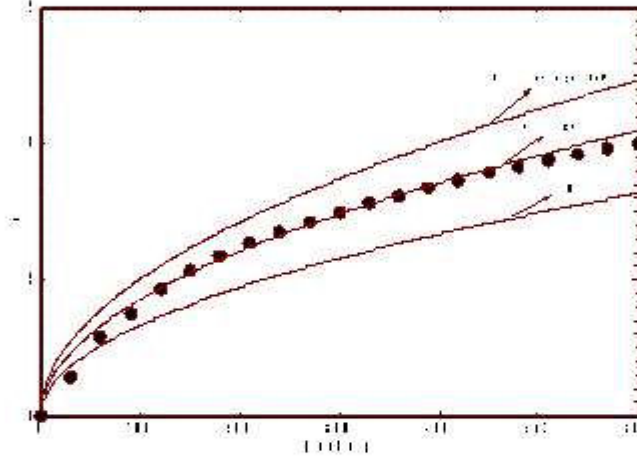
$$w = \frac{M_Y - M_K}{M_K} \quad (16)$$

Denklemlerde; M_Y numunenin yaş madde ağırlığını, M_K ise kuru madde ağırlığını göstermektedir. w , numunelerin (ortalama) bağıl nem değişimi

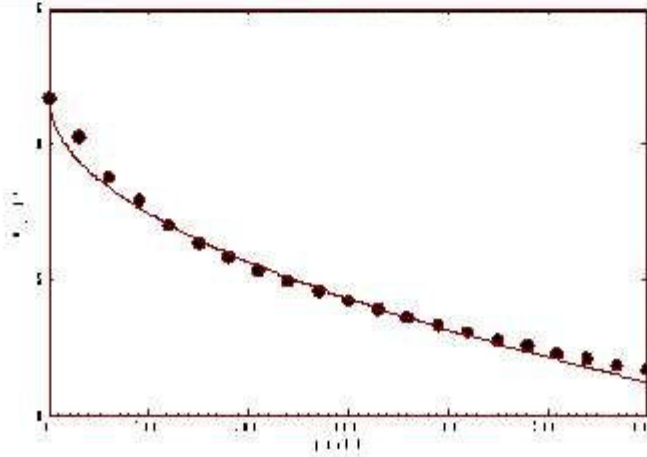




Şekil 2. Numunelerin zamana bağlı; (a) ağırlık değişimi, (b) bağıl nem (ortalama) değişimi



Şekil 3. Transfer edilen nem miktarı için deneysel (sembol) ve model (katı çizgi) sonuçlarının kıyaslanması. Model sonuçları üç farklı D_{AB} değeri için gösterilmiş olup, ortada gösterilen eğri (koyu katı çizgi) aranan D_{AB} değerini vermektedir.



Şekil 4. Kuruma eğrisi için deneysel (sembol) ve model (katı çizgi) sonuçlarının kıyaslanması

Şekil 2(b)'de gösterilmiştir.

Mevcut deneysel ölçümler sonucunda, (13) denklemi ile verilen nem miktarının hesabı için gerekli bağıl nem değerleri belirlenmiş olduğundan, farklı D_{AB} değerleri kullanılarak çözüm yapılmış ve deneysel datalara en uygun eğriyi veren D_{AB} değeri tespit edilmiştir. Örnek olmak üzere, üç farklı D_{AB} değeri kullanılarak elde edilen model eğrileri ve deneysel datalar Şekil 3'de gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere, kırmızı biberin deneylerin yapıldığı 70°C sıcaklıktaki nem transfer katsayısı, $D_{AB}=0.0264 \text{ cm}^2/\text{dak}$ (veya $0.44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) olarak tespit edilmiştir. Bulunan

ilk anda çok yüksek kuruma hızları öngörmektedir ve bu öngörü birçok gıda maddesi için uygundur. Ancak, deneysel gözlemlerimiz, kırmızı biber için ilk anlardaki kuruma hızı değerlerinin ve hız değişim oranının daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu nedenle deney başlangıcında model ile ölçümler arası sapmalar söz konusudur. Sabit hız periyoduna ulaşma aşamasında ise ölçüm ve model arasındaki uyum mükemmel yağıdır. Kuruma aşamasının sonlarına doğru ise, model $v(t)$ değerlerindeki sabit gidişatın devamını öngörmesine karşın, ölçülen nem transfer hızı düşüşe devam etmektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere, deneysel nem transferindeki bu

bu değer kullanılarak elde edilen teorik kuruma eğrisinin, deneysel ölçümlerle kıyaslanması Şekil 4'de gösterilmiştir. Model ile deneysel datalar arasında, deney başlangıcındaki kısa bir aralık ile deney sonuna doğru olan bir süreç dışında, sapma yok denecek kadar azdır. Belirtilen bölgedeki sapmalar, tek bir kütle transfer sabiti kullanıldığından, beklenen bir sonuçtur. Buna karşın, kurutma başlangıcındaki sapma değerleri beklenden daha düşük seviyededir ve bu durum pratik uygulamalar açısından önemli bir avantajdır. Kurutma sonuna doğru oluşan sapmaların en önemli sebebi olarak, bu bölgede şerit halindeki numunelerin bükülmesi nedeniyle, tek-boyutlu kütle transfer yaklaşımının artık geçerli olması gösterilebilir.

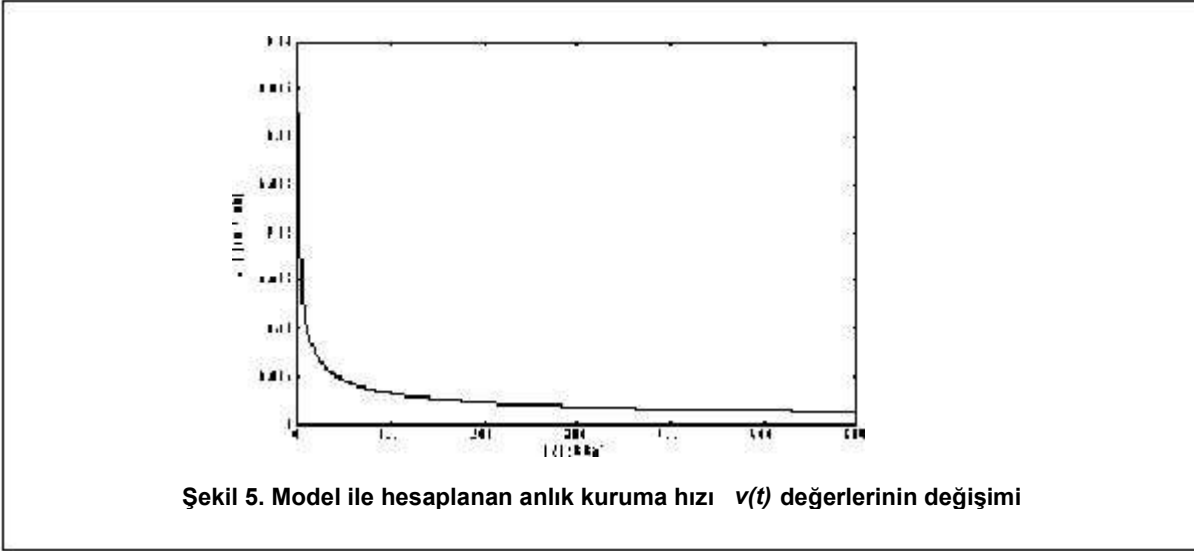
Kurutma eğrisi ile ilgili bu çalışmada sunulan modelin fiziksel önemini göstermek açısından; (8) no'lu denklemle verilen anlık kuruma hızı $v(t)$ değerlerine ait eğri, Şekil 5'te gösterilmiştir. Model

azalma, kuru biberin büzülmesi sonucu kütle transfer alanının gittikçe azalmasıdır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada gıda maddeleri için yeni bir kuruma modeli yaklaşımı geliştirilerek, model kırmızı bibere ait kuruma deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Sonuçlar arasında, deney başlangıcındaki kısa bir aralık ile deney sonuna doğru olan bir süreç dışında, sapma yok denecek kadar azdır. Deneysel ölçüm ve model arasındaki uyum mükemmel yakındır. Model ile elde edilen anlık kuruma hızlarında $v(t)$ ilk anda çok yüksek kuruma hızları öngörmekte ve giderek azalan bir hızda devam etmektedir. Bu öngörü gıda maddesi için uygun yaklaşımdır. Kırmızı biber için, 70°C kurutma sıcaklığındaki nem transfer katsayısı $D_{AB}=0.0264 \text{ cm}^2/\text{dak}$ (veya $0.44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR



Şekil 5. Model ile hesaplanan anlık kuruma hızı $v(t)$ değerlerinin değişimi

- Demirtaş C., Karabay H., Ayhan B., Ayhan T., 1996. "Şartlandırılmış Hava ile Fındık Kurutma Deney Düzenliği", 4. Ulusal Soğutma ve İklimlendirme Tekniği Kongresi Çukurova Üniversitesi, ADANA.
- Treybal, R.E., 1981. "Mass Transfer Operations", Third Edition, McGraw Hill, New York, USA.
- Hallström B., Skjöldebrand C., Tragardh C., 1988. "Heat Transfer and Food Products", Elsevier Applied Science Publishers, New York, USA.
- Atagündüz G., 1989. "Güneş enerjisi temelleri ve uygulamaları", Ege Üniversitesi Basımevi, İZMİR.
- Güner M., 1991. "Kurutmanın bilimsel temelleri, kurutma modelleri ve güneşli kurutucular", Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi yayınları 1205. ANKARA.
- Patankar S.V., 2001. "Analysis and Design of a Drying Model for Use in the Design of Starch-Coated Cottonseed Dryers", The Journal of Cotton Science 5:234-242 (2001)
- Hernandez J.A., Pavon G., and Garcia M.A., 2000. "Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics", Journal of Food Engineering 45 (2000) 1-10
- Srivastava V.K., and John J., 2002. "Deep bed grain drying modeling" Energy Conversion and Management 43 (2002) 1689-1708.
- Lim L.C., Tasirin S.M., and Wan Daud W.R., 2004. "Derivation of new drying model from theoretical diffusion controlled drying period", Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. A, pp. 430-435

6. Balkan F., 1992. "Kurutucularda geri döngülü hava kullanımının enerji tasarrufuna katkısı", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi Cilt 15, Sayı 2, Sayfa 13-19, Haziran 1992.
7. Maria Aversa, Stefano Curcio, Vincenza Calabro, Gabriele Iorio, 2006. "An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process" Journal of Food Engineering, (Article in press)
8. Coumans W.J., 2000. "Models for drying kinetics based on drying curves of slabs", Chemical Engineering and Processing 39 (2000) 53-68
9. Dincer I., 2000. "Moisture transfer models for solids drying", IDS'2000, Proceedings of the 12th International Drying Symposium (by Elsevier), EFCE Event No. 613, Paper No. 17, 4 p., 28-31 August 2000, The Hague, The Netherlands.
10. Thorvaldsson K. and Janestad H., 1999. "A model for simultaneous heat, water and vapor diffusion", Journal of Food Engineering 40 (1999) 167-172
11. Pelletier M.G., Laird J.W., Barker G.L., and Iguaz A., Esnoz A., Martinez G., Lopez A., and Virseda P., 2003. "Mathematical modeling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer", Journal of Food Engineering 59 (2003) 151-160
12. Wang Z.H., and Chen G., 1999. "Heat and mass transfer during low intensity convection drying", Chemical Engineering Science 54 (1999) 3899-3908.
13. Praveen Kumar D.G., Umesh Hebbar H., and Ramesh M.N., 2006 "Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slice", LWT (public in press).
14. Devlet İstatistik Enstitüsü (DİE) Tarımsal Yayımları (Üretim, Fiyat, Değer) 1999, 2000.
15. www.sanliurfa.gov.tr, Tarım istatistikleri (13 şubat 2006'da erişildi).
16. Yesilata B., "Analytical modeling of unsteady aluminum depletion in thermal barrier coatings." Turkish J Engineering and Environmental Science 25 (2001) 675-680.