

# Bazı Buğday, Arpa, Çavdar, Yulaf ve Mısır Örneklerinde Değişik Sıcaklıklarda Elde Edilen Sorpsiyon Verilerine Farklı İzoterm Eşitliklerinin Uygunluğunun Belirlenmesi

Fatih ERTUGAY

Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Erzurum-TÜRKİYE

Muharrem CERTEL

Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Bilimi ve Teknoloji Bölümü, Antalya-TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 05.02.1998

**Özet:** Bu araştırmada, Kırık, Lancer, arpa, çavdar, yulaf ve mısırın 20, 25, 35, 50 ve 70 °C'de elde edilen sorpsiyon verilerine Halsey, Henderson, Harkins-Jura, BET, Smith ve Freundlich izoterm eşitliklerinin uygunluğu araştırılmıştır. Elde edilen sorpsiyon verilerine en iyi uygunluk gösteren eşitlikler tespit edilmiş ve kullanılan bu izoterm eşitliklerine lineer regresyon analizi uygulanarak, eşitlik sabitleri belirlenmiştir. En iyi uygunluğu Henderson izoterm eşitliği gösterirken, en düşük uyum BET izoterm eşitliğinde gözlenmiştir.

## The Determination of Fitness of Various Isotherm Equations to Moisture Sorption Data of Kırık, Lancer Barley, Rye, Oat and Corn

**Abstract:** In this research, the fitness of Halsey, Henderson, Harkins-Jura, BET, Smith and Freundlich isotherm equations to moisture sorption data at 20, 25, 35, 50 and 70°C of Kırık, Lancer, barley, rye, oat and corn were investigated. Isotherm equations, fitted quite well to obtained sorption data, were determined and parameter constants of the equations were calculated by regression using the linear form of the isotherm equation. The best fitness was seen in Henderson equation as low fitness was seen for BET equation.

### Giriş

Sabit sıcaklık ve basınçtaki bir gıdanın, denge su içeriği ve su aktivitesi arasında fonksiyonel bir ilişki çizen su buharı sorpsiyon izotermeleri, gıda maddelerinin su bağlama özellikleri ile ilgili yapılan birçok çalışmada oldukça sık olarak kullanılmaktadır (1).

Su buharı sorpsiyon izotermelerine ilaveten izotermelere ait eşitlikler de kurutulmuş gıda teknolojisinde büyük önem taşımaktadır. Hem izotermeler, hem de izoterm eşitliklerinden elde edilen bilgiler; çeşitli gıdaların kurutulması, kurutulmuş ürünlerin raf ömürlerinin belirlenmesi ve kurutma sürelerinin tahmininde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla, gıda teknolojisinde, nem sorpsiyon izotermelerinin bilinmesi ve izoterm eşitlik sabitleri gibi termodinamik parametrelerin elde edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Yapılan bir çalışmada, tatlı patates, mısır, patates, pirinç ve buğday nişastalarından elde edilen sorpsiyon

verilerine, Langmuir, Freundlich, BET, Harkins-Jura, Halsey, Smith, Henderson ve Chung-Pfost izoterm eşitlikleri uygulanmış ve en iyi uyumu Henderson ve Chung-Pfost eşitliği göstermiştir (2). Yabani pirinçlerle ilgili yapılan bir çalışmada da, işlenmiş ve işlenmemiş yabani pirinçlerin 10.0 ve 43.5°C'deki sorpsiyon izotermeleri incelenmiş ve elde edilen izotermeler Guggenheim-Anderson-De Boer (GAB), Day ve Nelson, Chen ve Clayton ve modifiye edilmiş Halsey eşitliklerine uygulanmıştır. Sonuçta, yabani pirinçlerden elde edilen sorpsiyon izotermelerine en iyi uyumu GAB eşitliğinin gösterdiğini bulmuşlardır (3).

Ayçiçeği ve ayçiçeğinin protein konsantratu ile protein izolatının nem sorpsiyonunun incelendiği bir araştırmada da elde edilen sorpsiyon verilerine en iyi uygunluğu GAB ve Chen-Clayton eşitlikleri göstermiştir (4). Ayrıca, soya fasulyesi, börülce ve yer fıstığı ile yapılan bir çalışmada da, Peleg eşitliği uygulanmış ve Peleg eşitliğinin elde edilen

\* M. Fatih Ertugay'ın doktora tezinden alınmıştır.

sorpsiyon verilerine oldukça iyi uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir (5). Başka bir çalışmada ise, kuru üzüm, kuş üzümü, incir, kuru erik ve kayısının nem sorpsiyon izotermi çalışılmış ve elde edilen sorpsiyon verilerine GAB eşitliği, 0-0.95 su aktivitesi aralığında iyi bir uygunluk göstermiştir (6).

Yapılan bir çok çalışmada da değişik izoterm eşitliklerinin uygunlukları tesbit edilmiştir (7, 8, 9, 10).

Bu çalışmada, Kırık, Lancer buğdayları, biralık arpa, çavdar, yulav ve yemeklik tatlı mısırın farklı sıcaklıklardaki (20, 25, 35, 50 ve 70°C) elde edilen nem sorpsiyon verilerine, bilinen 6 izoterm eşitliklerinin uygunluğu araştırılmıştır.

## Materyal ve Metot

### Materyal

Araştırma materyali olarak Erzurum Toprak Mahsülleri Ofisi'nden temin edilen 1994 yılı ürünü buğday (Lancer ve Kırık), çavdar, yemeklik tatlı mısır, biralık arpa ve yulaf kullanılmıştır. Tüm örnekler analizlere başlamadan önce silindirik eleklerle temizlenerek taş, toprak, saman vb. yabancı maddelerden ayrılmıştır. Sorpsiyon analizlerinde örnekler, 800 mikron elek altına tüm materyal geçecek şekilde kırılarak kullanılmıştır.

### Metot

Sorpsiyon izotermelerinin belirlenmesi için izopiestik metot uygulanmıştır (11, 12). Sorpsiyon izotermi, 20, 25, 35, 50 ve 70°C sıcaklıklarındaki klima dolabı ve 0.2'den 0.9'a kadar su aktivitesi sağlayan çeşitli doymuş tuz çözeltileri içeren desikatörler yardımıyla belirlenmiştir. Sorpsiyon için tüm örnekler, 35°C'de 72 saat hava sirkülasyonlu kurutma dolabında, %4-5 su içeriğine kurutulduktan sonra, 4 paralel olarak ağız tıraşlı cam şişeciklere 50'şer mg tartılarak, 5 gün süreyle istenilen nispi nem ortamını sağlayan çeşitli tuz çözeltileri içeren desikatörlerde şişeciklerin ağızı yarı açık vaziyette bekletilerek, örneklerin buldukları ortamla nem dengesine gelmesi sağlanmış ve daha sonra örnekler klima dolabından çıkarılarak, ağızları kapalı vaziyette 0.01 mg hassasiyetle tartılarak ağırlık artışı belirlenmiştir (13, 14). Örneklerin buldukları ortamla, su içeriklerinin dengeye getirilmesinde bir hafta önceden hazırlanmış ve her gün karıştırılmak suretiyle kararlılık kazandırılmış doymuş tuz çözeltileri kullanılmıştır. Hazırlanan doymuş tuz çözeltileriyle tabanı doldurulan

desikatörlerde, elektrohidrometrik yöntemle, 20°C sıcaklıktaki nispi nem miktarları belirlenmiş ve bunlar sorpsiyon özelliklerinin saptandığı denge nispi nem ortamları olarak kabul edilmiştir. Kullanılan doymuş çözeltiler ve nispi nem ortamları (20°C) şöyledir: Potasyum asetat %23.11, Magnezyum klorür %33.07, Potasyum karbonat %43.16, Magnezyum nitrat %54.38, Sodyum bromür %59.14, Sodyum klorür %75.47, Potasyum klorür %85.11 ve Baryum klorür %90.69 (14).

## Sonuçlar ve Tartışma

Çeşitli izoterm eşitliklerinin kullanılabilirliğinin testinde, BET, Halsey, Henderson, Smith, Freundlich ve Harkins-Jura eşitlikleri kullanılmış ve elde edilen sorpsiyon verilerine en iyi uygunluk gösteren eşitlikler tespit edilmiştir. Ayrıca, kullanılan bu izoterm eşitliklerine lineer regresyon analizi uygulanarak (2), elde edilen doğruların eğim ve kesim noktalarından eşitlik sabitleri belirlenmiştir.

### BET Eşitliği

$$a_w \div m(1-a_w) = [1 \div (m_0 c)] + [c-1] \div (m_0 c) a_w$$

$a_w$  : su aktivitesi,  $m$  : su içeriği

$m_0$  : tek tabaka suyu,  $c$  : sabit

BET eşitliği, bütün tahıl çeşitlerinde, 20, 25, 35, 50 ve 70°C'de, 0.2-0.55 su aktivitesi aralığında yüksek bir uyum göstermiştir. BET eşitliği çok tabakalı adsorpsiyon modeline karşılık geldiği için, 0.20-0.55 su aktivitesi aralığında, Kırık, Lancer, arpa, çavdar, yulaf ve mısırdaki meydana gelen sorpsiyonun çok tabakalı bir adsorpsiyon olduğu söylenebilir. 0.55'lik su aktivitesinden sonra BET eşitliğindeki uyum giderek azalmaktadır. Bu durum bütün sıcaklıklarda aynı şekilde ortaya çıkmakta ve meydana gelen uyum kaybının (yani doğrulardaki kırılmanın) suyun bağlanma mekanizmasındaki değişikliklerle ilgili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 1'de BET eşitliğinden elde edilen sabitler ve korelasyon katsayıları verilmiştir. Korelasyon katsayılarından görüldüğü gibi, bütün tahıl örneklerinde en düşük uyumu BET eşitliği göstermiştir.

BEZ izoterm eşitlik sabitlerinden tek tabaka sorpsiyon ( $m_0$ ) değeri, Tablo 1'den görüldüğü gibi, bütün tahıl örneklerinde sıcaklık yükseldikçe azalmaktadır. Yapılan bütün çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (10, 15, 16, 17, 18).

Tablo 1. BET eşitlik sabitleri ve korelasyon katsayıları

| Örnek  | BET EŞİTLİĞİ  |                      |                      |                      |                      |
|--------|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|        | $a_w \div m(1-a_w) = [1 \div (m_0c)] + [(c-1) \div (m_0c)] a_w$ |                      |                      |                      |                      |
|        | 20°C  | 25°C                 | 35°C                 | 50°C                 | 70°C                 |
| Kırık  | c=-2.74   | c=-2.64              | c=-2.54              | c=-2.44              | c=2.43               |
|        | m <sub>0</sub> =2.77  | m <sub>0</sub> =2.53 | m <sub>0</sub> =2.19 | m <sub>0</sub> =2    | m <sub>0</sub> =1.9  |
|        | r=0.9214  | r=0.9044             | r=0.8988             | r=0.8854             | r=0.8775             |
| Lancer | c=-2.7  | c=-2.68              | c=-2.49              | c=-2.42              | c=-2.43              |
|        | m <sub>0</sub> =2.66  | m <sub>0</sub> =2.48 | m <sub>0</sub> =2.08 | m <sub>0</sub> =1.91 | m <sub>0</sub> =1.86 |
|        | r=0.9187  | r=0.9011             | r=0.8927             | r=0.8803             | r=0.8746             |
| Arpa   | c=-2.57   | c=-2.58              | c=-2.66              | c=-2.43              | c=-2.31              |
|        | m <sub>0</sub> =2.52  | m <sub>0</sub> =2.46 | m <sub>0</sub> =2.43 | m <sub>0</sub> =2.07 | m <sub>0</sub> =1.81 |
|        | r=0.9039  | r=0.9066             | r=0.9072             | r=0.8752             | r=0.8769             |
| Çavdar | c=-2.68   | c=-2.73              | c=-2.76              | c=-2.49              | c=-2.39              |
|        | m <sub>0</sub> =2.45  | m <sub>0</sub> =2.34 | m <sub>0</sub> =2.28 | m <sub>0</sub> =1.96 | m <sub>0</sub> =1.69 |
|        | r=0.9061  | r=0.9077             | r=0.9028             | r=0.8729             | r=0.8683             |
| Yulaf  | c=-3.06   | c=-3.17              | c=-2.87              | c=-2.76              | c=-2.84              |
|        | m <sub>0</sub> =2.24  | m <sub>0</sub> =2.16 | m <sub>0</sub> =1.99 | m <sub>0</sub> =1.75 | m <sub>0</sub> =1.72 |
|        | r=0.9192  | r=0.929              | r=0.905              | r=0.9011             | r=0.9033             |
| Mısır  | c=-2.98   | c=-3.03              | c=-2.91              | c=-2.75              | c=-2.79              |
|        | m <sub>0</sub> =2.29  | m <sub>0</sub> =2.19 | m <sub>0</sub> =2.01 | m <sub>0</sub> =1.82 | m <sub>0</sub> =1.79 |
|        | r=0.9236  | r=0.9338             | r=0.9083             | r=0.8949             | r=0.8972             |

a<sub>w</sub>: su aktivitesi; m: su içeriği; m<sub>0</sub>: tek tabaka suyu; c: sabit; r: korelasyon katsayısı

BET eşitliğindeki tek tabaka (m<sub>0</sub>) değeri, adsorbentin sorpsiyon kapasitesi ve su buharı için polar bölgelerin kullanılabilirliğinin bir göstergesi olarak dikkate alınmaktadır (19). Sıcaklığın yükselmesi ile birlikte, m<sub>0</sub> değerinin azalması, adsorbentin sorpsiyon kapasitesini artan sıcaklıkla azaldığını göstermektedir.

#### Freundlich Eşitliği

$$\ln m = \ln k + (1 \div n) \ln a_w$$

a<sub>w</sub>: su aktivitesi

m: su içeriği

k, n: sabit

Tablo 2'deki Freundlich eşitliğine ait korelasyon katsayılarından görüldüğü gibi, Freundlich eşitliğinin bütün tahıl örneklerinde ve tüm sıcaklık derecelerinde elde edilen sorpsiyon verilerine daha az uygunluk gösterdiği bulunmuştur.

Tablo 2'deki Freundlich eşitliğine ait sabitlerden k değeri de BET eşitliğindeki tek tabaka (m<sub>0</sub>) değerine

karşılık gelmektedir. Bu değer de adsorbentin sorpsiyon kapasitesi hakkında bilgi vermektedir. k değerleri, m<sub>0</sub> değerlerinde olduğu gibi, sıcaklığın yükselmesi ile birlikte sürekli olarak azalmaktadır. Bu durum, artan sıcaklığa paralel olarak, bütün tahıl örneklerinin sorpsiyon kapasitesinin düştüğünü göstermektedir.

#### Halsey Eşitliği

$$\ln m = [(1 \div n)(\ln C) - [(1 \div n) \ln (\ln 1 \div a_w)]]$$

m: su içeriği

n, C: sabit

a<sub>w</sub>: su aktivitesi

Tablo 3'deki korelasyon katsayılarından, Halsey eşitliğinin bütün tahıl örnekleri için uygulanabilir bir model olduğu görülmektedir. Bu eşitlik, bizim örneklerimizde olduğu gibi, değişik gıda çeşitlerine de yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (10, 18). Bu eşitlikteki n ve C sabitleri sıcaklık ve gıdanın tipine bağlı olarak değişkenlik arz etmektedir. Nitekim, Tablo 3'de,

Tablo 2. Freundlich eşitlik sabitleri ve korelasyon katsayıları

| FREUNDLICH EŞİTLİĞİ             |                               |                               |                               |                               |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $\ln m = \ln k + (1-n) \ln a_w$ |                               |                               |                               |                               |                               |
| Örnek                           | 20°C                          | 25°C                          | 35°C                          | 50°C                          | 70°C                          |
| Kırık                           | n=1.41<br>k=21.56<br>r=0.9607 | n=1.44<br>k=20.04<br>r=0.9762 | n=1.6<br>k=13.34<br>r=0.9721  | n=1.66<br>k=16.17<br>r=0.9828 | n=1.63<br>k=15.39<br>r=0.9854 |
|                                 | n=1.43<br>k=20.88<br>r=0.9654 | n=1.37<br>k=19.91<br>r=0.9762 | n=1.59<br>k=16.81<br>r=0.9859 | n=1.7<br>k=15.47<br>r=0.9777  | n=1.57<br>k=15.33<br>r=0.9899 |
| Arpa                            | n=1.52<br>k=20.02<br>r=0.9767 | n=1.52<br>k=19.45<br>r=0.9742 | n=1.39<br>k=19.34<br>r=0.9747 | n=1.6<br>k=16.98<br>r=0.9894  | n=1.89<br>k=14.83<br>r=0.994  |
|                                 | n=1.41<br>k=19.47<br>r=0.9747 | n=1.33<br>k=18.75<br>r=0.9772 | n=1.29<br>k=18.32<br>r=0.9803 | n=1.45<br>k=16.2<br>r=0.993   | n=1.63<br>k=13.98<br>r=0.992  |
| Çavdar                          | n=1.18<br>k=17.46<br>r=0.9576 | n=1.19<br>k=16.43<br>r=0.9487 | n=1.3<br>k=15.19<br>r=0.9747  | n=1.29<br>k=14.09<br>r=0.9803 | n=1.23<br>k=13.9<br>r=0.9783  |
|                                 | n=1.26<br>k=17.71<br>r=0.9471 | n=1.29<br>k=16.61<br>r=0.9268 | n=1.27<br>k=16.8<br>r=0.9602  | n=1.29<br>k=14.69<br>r=0.9783 | n=1.28<br>k=14.38<br>r=0.9747 |

m: su içeriği; k,n: sabit; r: korelasyon katsayısı,  $a_w$ : su aktivitesi

Tablo 3. Halsey eşitlik sabitleri ve korelasyon katsayıları

| HALSEY EŞİTLİĞİ                                   |                                |                                |                                |                                |                                |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $\ln m = [(1-n) \ln C] - [(1-n) \ln (\ln 1/a_w)]$ |                                |                                |                                |                                |                                |
| Örnek   | 20°C                           | 25°C                           | 35°C                           | 50°C                           | 70°C                           |
| Kırık   | n=2.71<br>C=556.9<br>r=0.9915  | n=2.83<br>C=640.2<br>r=0.9874  | n=3.12<br>C=983<br>r=0.9869    | n=3.34<br>C=1404.6<br>r=0.97   | n=3.29<br>C=1021.1<br>r=0.9675 |
|   | n=2.77<br>C=604.5<br>r=0.9894  | n=2.71<br>C=430.5<br>r=0.9808  | n=3.2<br>C=1079.2<br>r=0.9742  | n=3.42<br>C=1513.1<br>r=0.9659 | n=3.24<br>C=849.2<br>r=0.9539  |
| Arpa  | n=2.99<br>C=1035.9<br>r=0.9879 | n=2.98<br>C=903.74<br>r=0.9849 | n=2.75<br>C=447.82<br>r=0.9844 | n=3.27<br>C=1312.6<br>r=0.9623 | n=3.92<br>C=4791.1<br>r=0.9508 |
|   | n=2.76<br>C=481.45<br>r=0.9889 | n=2.63<br>C=290.34<br>r=0.9772 | n=2.56<br>C=221.18<br>r=0.9823 | n=2.98<br>C=506.17<br>r=0.9581 | n=3.38<br>C=910.68<br>r=0.9503 |
| Yulaf   | n=2.27<br>C=88.9<br>r=0.9939   | n=2.26<br>C=76.25<br>r=0.9945  | n=2.41<br>C=94.02<br>r=0.9864  | n=2.56<br>C=115.44<br>r=0.9823 | n=2.44<br>C=80.74<br>r=0.9798  |
|   | n=2.8<br>C=129.6<br>r=0.9959   | n=2.38<br>C=113.7<br>r=0.9959  | n=2.43<br>C=111.37<br>r=0.9925 | n=2.56<br>C=126<br>r=0.9828    | n=2.52<br>C=188.05<br>r=0.9834 |

m: su içeriği, n, C: sabit;  $a_w$ : su aktivitesi; r: korelasyon katsayısı

sıcaklık arttıkça n ve C sabitleri de artmaktadır. Bu sabitlerin yüksek değerleri sorpsiyonun daha az meydana geldiğini göstermektedir.

#### Henderson Eşitliği

$$\ln [-\ln (1-a_w)] = \ln k + n \ln m$$

$a_w$ : su aktivitesi

k, n: sabit

m: su içeriği

Tablo 4'den görüldüğü gibi, Henderson eşitliği bütün tahıl örneklerinden elde edilen sorpsiyon verilerine, 0.2-0.9 su aktivitesi aralığında, tüm sıcaklık derecelerinde en iyi uygunluk gösteren izoterm eşitliğidir. Bu eşitlikteki n ve k sabitleri, nem sorpsiyonu için mikroporoz yapının kararlılığını göstermektedir. Sabitlerin değerleri ne kadar büyükse, adsorbentin mikroporoz yapısı o kadar kararlıdır (2). Bu sabitler, gıdanın yapısına ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Tablo 4'den görüldüğü gibi, bütün tahıl örneklerinde n ve k sabitlerinin değerleri, yüksek sıcaklıklarda, düşük sıcaklıklara göre daha küçük

bulunmuştur. Bu da, sıcaklığın artması ile birlikte tahıl örneklerinin mikroporoz yapısının stabilitesinin azaldığını göstermektedir. Bir başka ifadeyle, yüksek sıcaklık, adsorbentlerde geriye dönüşümsüz yapısal değişikliklere yol açtığı için, mikroporoz yapının stabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

#### Harkins-Jura Eşitliği

$$1 \div m^2 = (B \div A) - (1 \div A) \log a_w$$

m: su içeriği

B, A: sabit

$a_w$ : su aktivitesi

Tablo 5'deki korelasyon katsayılarından, tüm tahıl örneklerinin sorpsiyon verilerinin Harkins-Jura eşitliğine, 0.2-0.9 su aktivitesi aralığında yüksek bir uyum gösterdiği görülmektedir. Buna göre, düşük su aktivitelerinde BET eşitliğine uyumdan da anlaşıldığı gibi, tahıl örneklerinin çok tabakalı sorpsiyona son derece elverişli olduğu söylenebilir. Ayrıca, bu eşitliğin uygulanması ile elde edilmiş olan yüksek korelasyon

Tablo 4. Henderson eşitlik sabitleri ve korelasyon katsayıları

| Örnek  | HENDERSON EŞİTLİĞİ                       |          |          |          |          |
|--------|--|----------|----------|----------|----------|
|        | $\ln [-\ln (1 - a_w)] = \ln k + n \ln m$ |          |          |          |          |
|        | 20°C                                     | 25°C     | 35°C     | 50°C     | 70°C     |
| Kırık  | n=2.71                                   | n=0.444  | n=0.402  | n=0.381  | n=0.389  |
|        | k=14.83                                  | k=13.89  | k=12.44  | k=11.75  | k=11.11  |
|        | r=0.9889                                 | r=0.9965 | r=0.994  | r=0.993  | r=0.9935 |
| Lancer | n=0.45                                   | n=0.466  | n=0.398  | n=0.372  | n=0.399  |
|        | k=14.42                                  | k=13.52  | k=12.05  | k=11.34  | k=10.92  |
|        | r=0.9904                                 | r=0.9935 | r=0.996  | r=0.9884 | r=0.9904 |
| Arpa   | n=0.42                                   | n=0.422  | n=0.458  | n=0.393  | n=0.331  |
|        | k=14.14                                  | k=13.72  | k=13.24  | k=12.19  | k=11.19  |
|        | r=0.997                                  | r=0.994  | r=0.994  | r=0.994  | r=0.991  |
| Çavdar | n=0.434                                  | n=0.481  | n=0.494  | n=0.432  | n=0.384  |
|        | k=13.38                                  | k=12.57  | k=12.16  | k=11.23  | k=10.09  |
|        | r=0.996                                  | r=0.9925 | r=0.9965 | r=0.994  | r=0.9899 |
| Yulaf  | n=0.547                                  | n=0.545  | n=0.52   | n=0.492  | n=0.517  |
|        | k=11.18                                  | k=10.55  | k=9.88   | k=9.36   | k=9.04   |
|        | r=0.9889                                 | r=0.9839 | r=0.995  | r=0.997  | r=0.9939 |
| Mısır  | n=0.516                                  | n=0.51   | n=0.511  | n=0.493  | n=0.5    |
|        | k=11.66                                  | k=11.03  | k=10.4   | k=9.76   | k=9.51   |
|        | r=0.9834                                 | r=0.9716 | r=0.9899 | r=0.9959 | r=0.9945 |

$a_w$ : su aktivitesi; k,n: sabit; m: su içeriği; r: korelasyon katsayısı

Tablo 5. Harkins-Jura eşitlik sabitleri ve korelasyon katsayıları

| Örnek  | HARKINS-JURA EŞİTLİĞİ                           |          |          |          |          |
|--------|---|----------|----------|----------|----------|
|        | $1 \div m^2 = (B \div A) - (1 \div A) \log a_w$ |          |          |          |          |
|        | 20°C  | 25°C     | 35°C     | 50°C     | 70°C     |
| Kırık  | A=50  | A=41.67  | A=37.04  | A=32.26  | A=43.48  |
|        | B=42.5  | B=79.13  | B=80.6   | B=73.84  | B=42.39  |
|        | r=0.9869  | r=0.9925 | r=0.9864 | r=0.992  | r=0.992  |
| Lancer | A=47.62   | A=38.46  | A=37.04  | A=35.71  | A=29.41  |
|        | B=43.95   | B=28.96  | B=64.34  | B=90.85  | B=53.23  |
|        | r=0.9904  | r=0.9849 | r=0.9874 | r=0.9844 | r=0.9793 |
| Arpa   | A=50  | A=45.4   | A=38.5   | A=38.5   | A=38.5   |
|        | B=60.25   | B=55.9   | B=33.5   | B=66.6   | B=114.3  |
|        | r=0.9935  | r=0.9884 | r=0.9889 | r=0.9904 | r=0.9894 |
| Çavdar | A=40  | A=30.3   | A=27.78  | A=27.03  | A=26.32  |
|        | B=39.36   | B=8.61   | B=8.14   | B=28.19  | B=66.89  |
|        | r=0.9935  | r=0.9644 | r=0.9834 | r=0.9793 | r=0.9859 |
| Yulaf  | A=22.2  | A=20.47  | A=17.94  | A=16.96  | A=14.38  |
|        | B=7.82  | B=15.26  | B=3.48   | B=1.994  | B=-6.4   |
|        | r=0.9965  | r=0.9975 | r=0.9899 | r=0.9859 | r=0.9675 |
| Mısır  | A=27.03   | A=26.36  | A=21.27  | A=18.51  | A=17.24  |
|        | B=29.62   | B=47.96  | B=22.29  | B=14.41  | B=13.17  |
|        | r=0.9979  | r=0.9955 | r=0.9969 | r=0.9994 | r=0.9909 |

m: su içeriği; B, A: sabit;  $a_w$ : su aktivitesi; r: korelasyon katsayısı

Tablo 6. Smith eşitlik sabitleri ve korelasyon katsayıları

| Örnek  | SMITH EŞİTLİĞİ              |             |             |             |             |
|--------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|        | $m = W_b - W \ln (1 - a_w)$ |             |             |             |             |
|        | 20°C                        | 25°C        | 35°C        | 50°C        | 70°C        |
| Kırık  | W=6.98                      | W=6.08      | W=4.93      | W=4.22      | W=4.04      |
|        | $W_b=7.03$                  | $W_b=7.04$  | $W_b=6.84$  | $W_b=6.91$  | $W_b=6.49$  |
|        | r=0.9935                    | r=0.9945    | r=0.9925    | r=0.9772    | r=0.97      |
| Lancer | W=6.6                       | W=6.13      | W=4.54      | W=3.98      | W=3.96      |
|        | $W_b=7.03$                  | $W_b=6.64$  | $W_b=6.85$  | $W_b=6.77$  | $W_b=6.39$  |
|        | r=0.9915                    | r=0.991     | r=0.9834    | r=0.969     | r=0.9612    |
| Arpa   | W=5.85                      | W=5.716     | W=5.978     | W=4.411     | W=3.348     |
|        | $W_b=7.519$                 | $W_b=7.26$  | $W_b=6.527$ | $W_b=7.139$ | $W_b=7.295$ |
|        | r=0.994                     | r=0.991     | r=0.9915    | r=0.9649    | r=0.9513    |
| Çavdar | W=6.023                     | W=5.884     | W=5.843     | W=4.423     | W=3.484     |
|        | $W_b=6.617$                 | $W_b=5.988$ | $W_b=5.64$  | $W_b=6.207$ | $W_b=6.083$ |
|        | r=0.995                     | r=0.9894    | r=0.9915    | r=0.9659    | r=0.9524    |
| Yulaf  | W=6.32                      | W=6.06      | W=5.09      | W=4.48      | W=4.55      |
|        | $W_b=4.26$                  | $W_b=3.94$  | $W_b=4.25$  | $W_b=4.37$  | $W_b=3.99$  |
|        | r=0.9959                    | r=0.9939    | r=0.9929    | r=0.9909    | r=0.9955    |
| Mısır  | W=6.34                      | W=6.17      | W=5.42      | W=4.68      | W=4.66      |
|        | $W_b=4.69$                  | $W_b=4.28$  | $W_b=4.42$  | $W_b=4.54$  | $W_b=4.33$  |
|        | r=0.9949                    | r=0.9899    | r=0.9955    | r=0.9899    | r=0.9864    |

m: su içeriği;  $W_b$ , W: sabit;  $a_w$ : su aktivitesi; r: korelasyon katsayısı

katsayıları, incelenen tahıl örnekleri üzerindeki sorpsiyon izotermlerinin Tip II izotermlerinin özelliklerini taşıdığını göstermektedir (21).

#### Smith Eşitliği

$$m = W_b - W \ln (1-a_w)$$

m : su içeriği

$W_b$ , W: sabit

$a_w$  : su aktivitesi

Tablo 6'dan görüldüğü gibi, ilgili eşitlikten elde edilen, sorpsiyonun sıcaklığa bağımlılığının bir ölçüsü olan W değerlerinin tüm tahıl örneklerinde sıcaklık artışıyla düzenli olarak azaldığı bulunmuştur. Bu sonuç, BET,

Freundlich ve Henderson eşitliklerinden elde edilen, sıcaklığın sorpsiyon üzerine olumsuz etkisini destekler niteliktedir.

#### Tartışma ve Öneriler

Yapılan bu çalışmada, buğday çeşitlerinden Kırık ve Lancer ile biralık arpa, çavdar, yulaf ve yemeklik tatlı mısırın nem sorpsiyon verilerine Halsey, Henderson, Harkins-Jura, BET, Smith ve Freundlich izoterm eşitliklerinin uygunlukları araştırılmıştır. Sonuç olarak, en iyi uyumu Henderson eşitliği gösterirken en düşük uyumu ise BET eşitliği göstermiştir. Başka bir ifadeyle araştırmada kullanılan tahıl örneklerinin nem sorpsiyon hali Henderson modeli ile tanımlanabilir.

#### Kaynaklar

1. Cadden, A.M., Moisture sorption characteristics of several food fibers, J. Food Sci., 53, 1150-1155, 1988.
2. Boki, K., Ohno, S., Equilibrium isotherm equations to represent moisture sorption on starch, J. Food Sci., 56, 1106-1107, 1991.
3. Gençtürk, M. B., Bakshi, A. S., Hong, Y.C., Labuza, T.P., Moisture transfer properties of wild rice, J. Food Process Eng., 8, 243-261, 1986.
4. Mok, C., Hettiarachchy, N.S., Moisture sorption characteristics of ground Sunflower nutmeat and its products, J. of Food Sci., 56, 1102-1106, 1991.
5. Sopade, P.A., Obekpa, J.A., Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg's equation, J. Food Sci., 55, 1084-1087, 1990.
6. Tsami, E., Marinou-Kouris, D., Maroulis, Z.B., Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. J. Food Sci., 55, 1594-1597, 1990.
7. Achoba, I. I., Elephede, J.A., Agbaji, A.S., Agbaji, E.B., Moisture isotherms of cornchips at three temperature, Int. J. Food Sci. and Tech., 26, 547-552, 1991.
8. Hageman, M. J., Possert, P.L., Bauer, J.M., Prediction and characterisation of the water sorption isotherm for bovine somatotropin, J. Agric. Food Chem., 40, 342-347, 1992.
9. Mok, C., Dick, W. J., Moisture adsorption damaged wheat starch, Cereal Chem., 68, 405-409, 1991.
10. Certel, M., Ertugay, M.F., Tarhanın nem adsorpsiyon izotermi, Tr. J. of Agriculture and Forestry, 21, 475-479, 1996.
11. Gal, S., Recent advances in techniques for the determination of sorption isotherms, In water relations of foods, R.B. Duckworth (ed.), p. 139. Academic Press, New York, 1975.
12. Labuza, T.P., Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use, American Association of Cereal Chemist, Minneapolis, MN, 1984.
13. Münzing, K., Wasser, ein wichtiger physikalischer Qualitätsfaktor bei Getreide, Getreide Mehl und Brot., 41, 362-365, 1987.
14. Certel, M., Makarnalık (Tr.Durum) ve ekmeçlik (Tr.Aestivum) buğdaylardan farklı ısı işlem uygulamalarıyla üretilen bulgur ve ürünlerinin fiziksel, kimyasal ve duyuşal özellikleri, Doktora tezi, Atatürk Üni. Ziraat Fak. Erzurum, 1990.
15. Iglesias, H.A., Chirife, J., Technical note: Correlation of BET monolayer moisture content in foods with temperature, J. Food Tech., 19, 503-506, 1984.
16. Andrieu, J., Stamatopoulos, A., Zafiroopoulos, M., Equation for fitting desorption isotherms of durum wheat pasta, J. Food Tech., 20, 651-657, 1985.
17. Labuza, T.P., Kaanane, A., Chen, J.Y., Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods, J. Food Sci., 50, 385-391, 1985.
18. Ayrancı, E., Ayrancı, G., Doğantan, Z., Moisture sorption isotherms of dried apricot, fig and raisin at 20°C and 36°C, J. Food Sci., 55, 1591-1593, 1990.
19. Chung, D.S., Pfost, H.B., Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products, Part I: Heat and free energy changes of adsorption and desorption, Trans. of the ASAE, 549-555, 1967 a.
20. Adamson, A.W., Physical Chemistry of Surfaces, Fifth Edition, Department of Chemistry, University of Southern California, Los Angeles, California. A Wiley-Interscience publication, New York, p. 609-1990.
21. Lowell, S., Shields, J. E., Powder Surface Area and Porosity, Third Edition, Chapman and Hall, London, p. 53, 1991.