

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**BAĞIL NEMİ ATOMİZER NEMLENDİRİCİ İLE KONTROL
EDİLEN BİR KAMARADA DEPOLANAN BAZI
BAKLAGİLLERİN NEM SORPSİYON İZOTERMLERİ VE
TERMODİNAMİK YAKLAŞIM**

Mukaddes KARATAŞ

Doktora Tezi

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalı

MART 2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**BAĞIL NEMİ ATOMİZER NEMLENDİRİCİ İLE KONTROL EDİLEN
BİR KAMARADA DEPOLANAN BAZI BAKLAGİLLERİN NEM
SORPSİYON İZOTERMLERİ VE TERMODİNAMİK YAKLAŞIM**

Tez Yazarı
Mukaddes KARATAŞ

Danışman
Prof. Dr. Nurhan ARSLAN

MART 2020
ELAZIĞ

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı: Bağlı Nemi Atomizer Nemlendirici ile Kontrol Edilen Bir Kamarada Depolanan Bazı Baklagillerin Nem Sorpsiyon İzotermi ve Termodinamik Yaklaşım

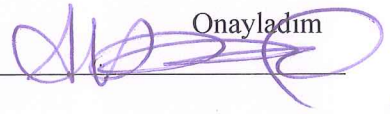
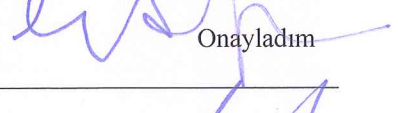
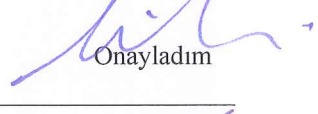
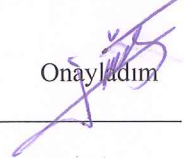
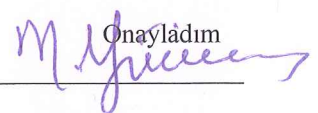
Yazarı: Mukaddes KARATAŞ

İlk Teslim Tarihi: 21.1.2020

Savunma Tarihi: 3.3.2020

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

		İmza
Danışman:	Prof. Dr. Nurhan ARSLAN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	 Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Nurhan ARSLAN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	 Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Ebru KAVAK AKPINAR Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	 Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Filiz KAR Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	 Onayladım
Üye:	Prof. Dr. İnci TÜRK TOĞRUL Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi	 Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Adıgüzel Mehmet YÜCEER İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	 Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Bağıl Nemi Atomizer Nemlendirici ile Kontrol Edilen Bir Kamarada Depolanan Bazı Baklagillerin Nem Sorpsiyon İzotermi ve Termodinamik Yaklaşım” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

3/3/2020

Mukaddes KARATAŞ



ÖNSÖZ

Baklagillerin nem içerikleri ortam nemine bağlı olarak değişmektedir. Baklagillerin mikrobiyal-fizikokimyasal kalitesini artırmak için, denge nem içeriği-su aktivitesi ilişkisinin bilinmesi gerekmektedir. Baklagiller ile ortam arasında nem alışverişinin önceden öngörülmesi, baklagillerin ileri aşamalarda raf ömrünü etkiledikleri için önem arz etmektedir ve bu durum teknolojik ve mikrobiyolojik açıdan da önemlidir. Baklagillerin hazırlanması ve uygun paketlenme malzemesinin seçimi, kurutma prosesinin tasarımı, ısı ve kütle transferi, depolama sırasında gıdaların stabilitesi ve raf ömrünün belirlenmesi, termodinamik ve yapısal özelliklerinin araştırılması gibi bazı mühendislik uygulamalarında sorpsiyon verilerine gereksinim duyulmaktadır.

Adsorpsiyon ve desorpsiyon verilerini elde etmek için, denge nem içeriği ve su aktivitesi arasındaki ilişkileri gösteren sorpsiyon izotermi kullanılmaktadır. İstenen bağıl nemi sağlamak için doygun tuz çözeltilerinin kullanıldığı yöntemde denge süresine ulaşmak uzun sürdüğü için sorpsiyon izotermi elde etmede bu yöntem kullanışlı değildir. Literatürde, bağıl nemi atomizer nemlendirici ile ayarlanan bir depolama kamarasında depolanan baklagillerin nem sorpsiyonu ve nem sorpsiyon termodinamiği ile ilgili çalışmalar bulunmamaktadır. Bu bakımdan; sıcaklık ve bağıl nem kontrollü bir nemlendirme kamarası kullanılarak fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla gibi bazı baklagillerin nem sorpsiyon izotermi ve nem sorpsiyon termodinamiğinin ayrıntılı olarak incelenmesi bu konudaki çalışmalara katkı sağlayacaktır.

Tez çalışmamın her aşamasında yakın ilgisini esirgemeyen, engin bilgi ve deneyimlerden yararlandığım tez danışman hocam sayın Prof. Dr. Nurhan ARSLAN' a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince manevi desteklerini gördüğüm üzerimde büyük emekleri olan aileme ve her konuda desteklerini esirgemeyen eşime şükranlarımı sunarım.

Bu tezimi, tez çalışmalarım sırasında dünyaya getirdiğim canım kızım Defne'ye ithaf ediyorum.

Mukaddes KARATAŞ

ELAZIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER	xiii
KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Baklagil Üretimi ve Baklagillerin Depolanması	5
2.2. Su Aktivitesi	6
2.3. Nem Sorpsiyon İzotermi.....	8
2.3.1. Nem Sorpsiyon İzoterm Tipleri.....	12
2.3.2. Nem Sorpsiyon İzotermi Belirleme Yöntemleri	13
2.3.3. Nem Sorpsiyon Modelleri	16
2.3.4. İstatistiksel Testler.....	18
2.4. Nem Sorpsiyon Termodinamiği	19
2.4.1. Sorpsiyon İzotermik Isısı	19
2.4.2. Sorpsiyon Entropisi ve Gibbs Serbest Enerjisi	21
2.4.3. Entalpi-Entropi Dengeleme Teorisi.....	22
2.4.4. Yüzey Potansiyeli.....	23
2.4.5. Net İntegral Entalpi ve Net İntegral Entropi	23
2.4.6. Konuyla İlgili Çalışmalar	24
3. MATERYAL VE METOT	29
3.1. Materyal.....	29
3.2. Metot	29
3.2.1. Nem ve Kül Tayini	29
3.2.2. Sorpsiyon İzotermi Belirleme için Atomizer Nemlendirme Sistemlerinin Kullanılması	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
4.1. Baklagillerin Sorpsiyon İzotermi Belirleme	39
4.2. Matematiksel Modelleme	54
4.3. Sorpsiyon İzotermik Isısı, Sorpsiyon Entropisi ve Gibbs Serbest Enerjisi	93
4.4. Entalpi-Entropi Dengeleme Teorisi	111
4.5. Net İntegral Entalpi ve Net İntegral Entropi.....	113
5. SONUÇLAR.....	124
KAYNAKLAR.....	126
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bağıl Nemi Atomizer Nemlendirici ile Kontrol Edilen Bir Kamarada Depolanan Bazı Baklagillerin Nem Sorpsiyon İzotermi ve Termodinamik Yaklaşım

Mukaddes KARATAŞ

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart 2020, Sayfa: xv + 133

Bağıl nemi atomizer nemlendirici ile ayarlanan bir kamarada depolanan fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla gibi bazı baklagillerin nem sorpsiyon özellikleri 0.1-0.9 aralığındaki su aktivitelerinde ve 25, 35 ve 45°C sıcaklıklarda incelendi. Baklagillerin sorpsiyon izotermi BET sınıflandırmasına göre J şekilli Tip-III davranış gösterdi. Tüm baklagillerin adsorpsiyon ve desorpsiyonunda belirli bir su aktivitesinde sıcaklığın artması ile denge nem içeriği değerlerinde azalma gözlemlendi. Baklagillerin sorpsiyon izotermi tüm su aktivitesi aralığında histeresis etki gösterdi. Deneysel sorpsiyon verileri GAB, BET, Henderson, Oswin, Peleg, Smith, Caurie, Halsey, Ferro-Fontan, Khun, Chung-Pfost, White-Eiring gibi çeşitli modellere uygulandı. Eşitliklerdeki sabitlerin belirlenmesi için non-lineer regresyon analizi kullanıldı. Modellerin deneysel verilere uyumunu değerlendirmek için r^2 , E, ortalama hata ve RMSE gibi istatistiksel testler uygulandı. Her baklagil için, incelenen tüm sıcaklık ve bağıl nem aralığında su aktivitesi ve denge nem içeriği arasındaki ilişkiyi tarif eden en uygun model bulundu. Sorpsiyon izosterik ısı, sorpsiyon entropisi, yüzey potansiyeli, net integral entalpi ve net integral entropi gibi termodinamik fonksiyonlar sorpsiyon izoterm verileri kullanılarak belirlendi. Sorpsiyon izosterik ısı deneysel verileri en iyi temsil eden eşitlikten elde edilen sorpsiyon izotermine Clausius-Clapeyron eşitliğinin uygulanması ile belirlendi. Sorpsiyon izosterik ısı ve sorpsiyon entropisi nem içeriğindeki artış ile azaldı ve saf suyun buharlaşma gizli ısı değerine yaklaştı. Gibbs serbest enerjisi nem içeriğindeki artış ile azaldı. Entalpi-entropi dengeleme teorisi, baklagillerin nem sorpsiyonunun entalpi kontrollü olduğunu gösterdi. Yüzey potansiyeli, su aktivitesindeki artış ile arttı. Net integral entalpi nem içeriğindeki artış ile azaldı. Net integral entropi değerleri negatif idi ve nem içeriğindeki artış ile arttı.

Anahtar Kelimeler: Baklagiller, Atomizer nemlendirme sistemi, Nem sorpsiyon izotermi, Termodinamik yaklaşım

ABSTRACT

Sorption Isotherms of Some Legumes Stored in a Chamber the Relative Humidity of Which is Controlled by Atomisier Humidifier and Thermodynamic Approach

Mukaddes KARATAŞ

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemical Engineering

March 2020, Pages: xv + 133

The moisture sorption properties of legumes such as bean, chickpea, green lentil, cowpea and fava bean stored in a chamber the relative humidity of which is regulated by an atomising humidifier were determined at 25, 35 and 45 °C and within the range of 0.1-0.9 water activity. The sorption isotherms of legumes exhibited J-shaped type III behavior. In sorption of all legumes, it was observed that the values of equilibrium moisture content decreased with an increase in temperature. The sorption isotherms of legumes exhibited the hysteresis effect. The experimental sorption data were applied to several isotherm equations such as GAB, BET, Henderson, Oswin, Peleg, Smith, Caurie, Halsey, Ferro-Fontan, Khun, Chung-Pfost and White-Eiring models. Nonlinear regression analysis was used for the determination of equation parameters. Statistical tests such as r^2 , E, average residual and RMSE were applied to evaluate the fitting performance of the models. The most suitable model describing the relationship between equilibrium moisture content and water activity was found. The thermodynamic functions such as sorption isosteric heat, sorption entropy, spreading pressure, net integral enthalpy and entropy were determined by using sorption isotherm data. The sorption isosteric heats were determined by the application of the Clausius-Clapeyron equation. The sorption isosteric heat and sorption entropy decreased with increasing moisture content. The enthalpy-entropy compensation theory showed that the moisture sorption of legumes was enthalpy-controlled. The net integral enthalpy decreased with increase in moisture content. The net integral entropy was negative in value and increased with an increase in moisture content.

Keywords: Legumes, Atomizing humidification system, Moisture sorption isotherms, Thermodynamic approach

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Gıdalardaki bozulma reaksiyonlarının su aktivitesi ile ilişkisi	8
Şekil 2.2. Sorpsiyon izotermi.....	10
Şekil 2.3. Sorpsiyon izotermi tipleri	13
Şekil 2.4. Gravimetrik yöntemle sorpsiyon izotermi belirlenmesinde kullanılan etüv	14
Şekil 3.1. Nemlendirme sisteminin şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.2. Nemlendirme sistemi	30
Şekil 3.3. Su arıtma sistemi (genel görünüm)	31
Şekil 3.4. Su arıtma sistemi.....	31
Şekil 3.5. Hava filtresi	32
Şekil 3.6. Soğutma sistemi	32
Şekil 3.7. Pülverize buhar oluşturma sistemi	33
Şekil 3.8. Selenoid valf	33
Şekil 3.9. Atomizer	34
Şekil 3.10. Atomizer nemlendirici	34
Şekil 3.11. Sıcaklık ve % bağıl nem kontrol paneli (genel görünüm).....	35
Şekil 3.12. Sıcaklık ve % bağıl nem kontrol paneli	35
Şekil 3.13. Kuru hava ısıtıcısı, sıcaklık ve % bağıl nem probu.....	36
Şekil 3.14. Sabit sıcaklık ve bağıl nem kamerası.....	36
Şekil 4.1. Fasulyenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	40
Şekil 4.2. Nohutun 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi.....	40
Şekil 4.3. Yeşil mercimeğin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	41
Şekil 4.4. Börülcenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	41
Şekil 4.5. Baklanın 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	42
Şekil 4.6. Fasulyenin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	42
Şekil 4.7. Nohutun 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi.....	43
Şekil 4.8. Yeşil mercimeğin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	43
Şekil 4.9. Börülcenin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	44
Şekil 4.10. Baklanın 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	44
Şekil 4.11. Fasulyenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	45
Şekil 4.12. Nohutun 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi.....	45
Şekil 4.13. Yeşil mercimeğin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	46

Şekil 4.14.	Börülcenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	46
Şekil 4.15.	Baklanın 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	47
Şekil 4.16.	Fasulyenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	49
Şekil 4.17.	Fasulyenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	49
Şekil 4.18.	Nohutun farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	50
Şekil 4.19.	Nohutun farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	50
Şekil 4.20.	Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	51
Şekil 4.21.	Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	51
Şekil 4.22.	Börülcenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	52
Şekil 4.23.	Börülcenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	52
Şekil 4.24.	Baklanın farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	53
Şekil 4.25.	Baklanın farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	53
Şekil 4.26.	Fasulyenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	69
Şekil 4.27.	Nohutun 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	69
Şekil 4.28.	Yeşil mercimeğin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	70
Şekil 4.29.	Börülcenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	70
Şekil 4.30.	Baklanın 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi)	71
Şekil 4.31.	Fasulyenin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	71
Şekil 4.32.	Nohutun 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	72
Şekil 4.33.	Yeşil mercimeğin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	72
Şekil 4.34.	Börülcenin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	73
Şekil 4.35.	Baklanın 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	73
Şekil 4.36.	Fasulyenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	74
Şekil 4.37.	Nohutun 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	74
Şekil 4.38.	Yeşil mercimeğin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	75
Şekil 4.39.	Börülcenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	75
Şekil 4.40.	Baklanın 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	76
Şekil 4.41.	Fasulyenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	77
Şekil 4.42.	Nohutun farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	77
Şekil 4.43.	Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	78
Şekil 4.44.	Börülcenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	78
Şekil 4.45.	Baklanın farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	79
Şekil 4.46.	Fasulyenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	79
Şekil 4.47.	Nohutun farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	80

Şekil 4.48.	Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	80
Şekil 4.49.	Börülcenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	81
Şekil 4.50.	Baklanın farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi	81
Şekil 4.51.	Fasulyenin adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	82
Şekil 4.52.	Fasulyenin desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	82
Şekil 4.53.	Nohutun adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	83
Şekil 4.54.	Nohutun desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	83
Şekil 4.55.	Yeşil mercimeğin adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	84
Şekil 4.56.	Yeşil mercimeğin desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	84
Şekil 4.57.	Börülcenin adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	85
Şekil 4.58.	Börülcenin desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	85
Şekil 4.59.	Baklanın adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	86
Şekil 4.60.	Baklanın desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon	86
Şekil 4.61.	Fasulye için standart hata grafiği	87
Şekil 4.62.	Nohut için standart hata grafiği	87
Şekil 4.63.	Yeşil mercimek için standart hata grafiği	88
Şekil 4.64.	Börülce için standart hata grafiği	88
Şekil 4.65.	Bakla için standart hata grafiği	89
Şekil 4.66.	Fasulyenin sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi	94
Şekil 4.67.	Nohutun sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi	94
Şekil 4.68.	Yeşil mercimeğin sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi	95
Şekil 4.69.	Börülcenin sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi	95
Şekil 4.70.	Baklanın sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi	96
Şekil 4.71.	Fasulyenin sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi	101
Şekil 4.72.	Nohutun sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi	101
Şekil 4.73.	Yeşil mercimeğin sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi	102
Şekil 4.74.	Börülcenin sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi	102

Şekil 4.75.	Baklanın sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi	103
Şekil 4.76.	Fasulyenin Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi	104
Şekil 4.77.	Fasulyenin Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi	104
Şekil 4.78.	Fasulyenin Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi	105
Şekil 4.79.	Nohutun Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi.....	105
Şekil 4.80.	Nohutun Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi.....	106
Şekil 4.81.	Nohutun Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi.....	106
Şekil 4.82.	Yeşil mercimeğin Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi	107
Şekil 4.83.	Yeşil mercimeğin Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi	107
Şekil 4.84.	Yeşil mercimeğin Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi	108
Şekil 4.85.	Börülcenin Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi.....	108
Şekil 4.86.	Börülcenin Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi.....	109
Şekil 4.87.	Börülcenin Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi.....	109
Şekil 4.88.	Baklanın Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi	110
Şekil 4.89.	Baklanın Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi	110
Şekil 4.90.	Baklanın Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi	111
Şekil 4.91.	Fasulyenin net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi.....	117
Şekil 4.92.	Nohutun net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi	117
Şekil 4.93.	Yeşil mercimeğin net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi.....	118
Şekil 4.94.	Börülcenin net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi	118
Şekil 4.95.	Baklanın net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi.....	119
Şekil 4.96.	Fasulyenin net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi	120
Şekil 4.97.	Nohutun net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi.....	120
Şekil 4.98.	Yeşil mercimeğin net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi	121
Şekil 4.99.	Börülcenin net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi	121
Şekil 4.100.	Baklanın net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi	122

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Türkiye’deki bazı baklagillerin üretimi (1000 ton) (http://www.tuik.gov.tr)	5
Tablo 2.2. Bazı doygun tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki su aktiviteleri (Cemeroğlu ve Özkan, 2004).....	15
Tablo 4.1. Baklagillerin bileşimleri	39
Tablo 4.2. Baklagillerin sorpsiyon izotermelerini tanımlamak için kullanılan modeller	55
Tablo 4.3. Fasulyenin sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları.....	56
Tablo 4.4. Nohutun sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları	58
Tablo 4.5. Yeşil mercimeğin sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları	60
Tablo 4.6. Börülcenin sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları.....	62
Tablo 4.7. Baklanın sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları.....	64
Tablo 4.8. Adsorpsiyon için GAB parametrelerinin ayrıntılı analizi ile bulunan sabitler	91
Tablo 4.9. Desorpsiyon için GAB parametrelerinin ayrıntılı analizi ile bulunan sabitler	91
Tablo 4.10. Adsorpsiyon ve desorpsiyon için farklı sıcaklıklardaki yüzey alanları.....	92
Tablo 4.11. Baklagillerin adsorpsiyon ve desorpsiyonu için A_0 , B_0 ve C katsayıları	92
Tablo 4.12. Baklagillerin adsorpsiyonu için K_a ve K_b sabitleri.....	112
Tablo 4.13. Baklagillerin desorpsiyonu için K_a ve K_b sabitleri.....	113
Tablo 4.14. b ve b_0 sabitlerinin farklı sıcaklıklardaki değerleri	113
Tablo 4.15. Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda fasulyenin yüzey potansiyeli	114
Tablo 4.16. Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda nohutun yüzey potansiyeli.....	114
Tablo 4.17. Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda yeşil mercimeğin yüzey potansiyeli	115
Tablo 4.18. Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda börülcenin yüzey potansiyeli.....	115
Tablo 4.19. Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda baklanın yüzey potansiyeli	116

SİMGELER

a, b	: Caurie, Halsey ve Khun model parametreleri
a_w	: Su aktivitesi
$(a_w)_x$	: Monotabaka nem içeriğine karşılık gelen su aktivitesi
$(a_w)^*$	: Sabit yüzey potansiyelinde geometrik ortalama su aktivitesi
A, B	: Henderson, Oswin, Ferro-Fonton, Chung-Pfost, White ve Eiring model parametreleri
A_m	: Bir su molekülünün alanı (1.06×10^{-19} m ² /molekül)
A_0, B_0	: Eşitlik 2.5'in sabitleri
b, b_0	: Adsorplanan suyun özellikleriyle ilgili Dent sorpsiyon izoterm sabitleri (boyutsuz)
c_1, c_2	: Smith model parametreleri
e_i	: Deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki fark (% KM)
e_{ort}	: Ortalama hata
C	: GAB, BET, Ferro-Fontan model parametreleri
C_0	: Eşitlik 2.2'nin sabiti (sıcaklığın etkisine göre ayarlanmış, boyutsuz)
E	: Ortalama bağıl yüzde sapma modülü (%)
ΔG	: Gibbs serbest enerjisi (kJ/mol)
H_1	: Monotabaka sorpsiyon ısısı (kJ/mol)
H_m	: Multitabaka sorpsiyon ısısı (kJ/mol)
H_L	: Saf suyun buharlaşma gizli ısısı (kJ/mol)
ΔH_c	: Monotabaka ve multitabaka sorpsiyon entalpileri arasındaki fark (J/mol)
ΔH_k	: Saf suyun buharlaşma gizli ısısı ve multitabaka sorpsiyon ısısı arasındaki fark (J/mol)
K	: GAB model parametresi, kül miktarının yaş temel üzerinden ağırlık yüzdesi
K_0	: Eşitlik 2.2'nin sabiti (sıcaklığın etkisine göre ayarlanmış, boyutsuz)
K_a, K_b	: Eşitlik 2.17'nin sabitleri
K_B	: Boltzmann sabiti (1.380×10^{-23} J/K)
m_0, m_1	: örneğin ilk ağırlığı (g) ve külün ağırlığı (g)
m_1, m_2	: Peleg model parametereleri
M_{su}	: Suyun molekül ağırlığı (18 kg/kgmol)
n_1, n_2	: Peleg model parametreleri
N	: Deneysel verilerin sayısı
N_A	: Avagadro sayısı (6×10^{26} molekül/kgmol)
P	: Gıdadaki suyun buhar basıncı
P_0	: Gıda ile aynı sıcaklık ve basınçtaki saf suyun buhar basıncı
q_{in}	: Net integral entalpi (kJ/mol)
q_{st}	: Net isosterik sorpsiyon ısısı (kJ/mol)
Q_{st}	: İsosterik sorpsiyon ısısı (kJ/mol)
R	: İdeal gaz sabiti (8.314 J/mol K) ve standart hata
r^2	: Regresyon katsayısı
S	: Katı yüzey alanı (m ² /g katı)
ΔS	: Sorpsiyon entropisi (J/mol K)

ΔS_{in}	: Net integral entropi (J/mol K)
t	: Sıcaklık (°C)
T	: Sıcaklık (K), geometrik ortalama sıcaklık (K)
T_{β}	: İzokinetik sıcaklık (K)
T_{hm}	: Harmonik ortalama sıcaklık (K)
X	: Denge nem içeriği (%KM)
X_{di}	: Denge nem içeriğinin deneysel değeri (% KM)
X_{hi}	: Denge nem içeriğinin hesaplanmış değeri (% KM)
X_m	: Monotabaka nem içeriği (% KM)
α	: Eşitlik 2.14'ün sabiti
ϕ	: Yüzey potansiyeli (J/m ²)
θ	: Nem oranı



KISALTMALAR

BET	: Brunauer-Emmett-Teller
GAB	: Guggenheim-Anderson-de Boer
KM	: Kuru madde
RMSE	: Hata karelerinin ortalama karekökü



1. GİRİŞ

Dünyada hızla artan nüfusun dengeli bir şekilde beslenebilmesi için, karbonhidratlı besinlerin yanında proteinli besinlerin de önemli miktarda tüketilmesi gerekmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde hayvansal ürünlerin maliyeti yüksek olduğundan protein ihtiyacının bitkilerden karşılanması son yıllarda önem kazanmıştır. Baklagiller; protein, karbonhidrat, bazı vitamin ve mineralleri önemli miktarlarda içerdiklerinden dolayı, insan beslenmesindeki katkıları büyüktür. Bitkisel kaynaklı proteinler protein ihtiyacının karşılanmasında bir alternatiftir. Lysin bakımından fakir olan tahıl proteinlerine kıyasla, lizin gibi esansiyel aminoasitleri yeterli miktarlarda içerdiklerinden dolayı baklagiller, tahıl bazlı diyetlerin besin değerini artırmakta ve protein kalitesini yükseltmektedir. Ayrıca, kuru baklagiller diyet lifi içeriği en yüksek gıdalar arasındadır. Dünyada protein gereksiniminin %70'i bitkisel kaynaklardan sağlanır. Bitkisel proteinlerin yaklaşık % 20'si de baklagillerden sağlanır. Gelişmekte olan ülkelerin beslenmesinde, % 22-25 oranında bitkisel protein içeren ve aynı zamanda fosfor, demir, kalsiyum, potasyum ve vitaminler bakımından zengin olan yemeklik tane baklagiller önemli yer tutar. Yüksek beslenme değeri, düşük maliyet ve uzun süre bozulmadan saklanabilme gibi nedenlerle, yemeklik tane baklagiller oldukça fazla talep görmektedir. İnsan beslenmesinin temel kaynağı olan baklagil sektörü birçok ülkede ekonominin temelini oluşturmaktadır. Bağırsak düzensizlikleri, kanser, kalp hastalığı, yüksek tansiyon, obezite ve diyabet gibi birçok hastalıklarda özellikle lifli yapıları nedeniyle baklagillerin olumlu etkileri vardır. Baklagiller ülkemizde de üretim yönünden büyük bir potansiyele sahiptir. İnsan beslenmesine ilave olarak, tane ve saplarındaki yüksek miktarda sindirilebilir proteinden dolayı, yemeklik tane baklagiller hayvan beslenmesinde de önemlidir (Erdemir, 2015).

İnsan beslenmesinde büyük rol oynayan yemeklik tane baklagiller, taksonomik olarak *Phanerogame* (tohumlu bitkiler) bölümü, *Angiospermae* (kapalı tohumlular) alt bölümü, *Dicotyledonae* (çift çenekliler) sınıfı, *Rosales* (gülgiller) takımı, *Leguminosae* (baklagiller) familyası ve *Papilioniodeae* (kelebek çiçekliler) alt familyasına ait bir bitki grubudur. *Leguminosae*, yaklaşık 18 000 cins ve 650 tür içermektedir ve dünyada ekimi yapılan bitkiler arasındaki en geniş familyalardan birisidir. Dünyada ve ülkemizde, üretim ve ekim alanı bakımından tahıllardan sonra kuru baklagiller gelmektedir. Yemeklik tane baklagiller, ülkemizde tarla bitkileri üretimi yapılan toplam alanın % 8.3'ünü oluşturmaktadır. Ülkemizde, baklagillerin yetiştirilmeleri için gerekli uygun iklim ve toprak koşulları bulunduğu için, Türkiye'de baklagillerin yetiştirilme potansiyeli yüksektir. Ülkemizde baklagil üretimi çok geniş bir alanda yapılmakta olup; Orta Anadolu, Marmara'nın güneyi ve Güneydoğu Anadolu bölgesi üretimin en yoğun yapıldığı bölgelerdir (MEB, 2016).

Bakliyat; yemeklik kuru baklagil olarak adlandırılan ve en çok üretilen ve tüketilen fasulye, nohut, mercimek, börülce, bakla ve bezelye gibi adlarla da tanınan yaş sebzelerin kurutularak

ayrılmış tohumlarına verilen isimdir. Fasulye tohumlarının kurutulması ile kuru fasulye adını alan fasulyenin boncuk, şeker, dermason, selanik, barbunya gibi birçok çeşidi vardır. Fasulye taneleri daha çok beyazdır, ayrıca kırmızı-kahverengi ve sarı renkli olan çeşitleri de vardır. Düz veya pürüzlü olabilen nohut taneleri beyaz, krem ve koyu renklidir ve koçbaşı, yuvarlak sarı ve kuşbaşı denilen leblebik çeşitleri vardır. Sarı, yeşil ve turuncu renkli çeşitleri olan mercimeğin disk şeklinde hafif bombeli bir şekli vardır. % 20-36 protein içeriği ile beslenmede büyük bir önemi olan kuru baklanın iri ve küçük taneli iki şekli vardır. Serin ve ılıman iklim bitkisi olan bezelye daneleri % 10-12'si karbonhidrat ve % 5-8'i ise protein olan % 18-20 arasında değişen oranlarda kuru madde içerirler. Fasulye familyasından olan börülce fasulyeye kıyasla daha küçüktür ve kuru börülce tanelerinin göbek kısmında mor veya menekşe rengini veren pigmentler bulunur (MEB, 2016).

Protein, yağ, selüloz ve karbonhidratça zengin bir baklagil olan fasulyenin bileşiminde madensel tuzlar ve B kompleksi vitaminler de bulunur. Nohut, protein ve mineral madde bakımından fasulyeden sonra gelen bir besin maddesidir. Mercimek, sindirimi daha kolay bir besin maddesidir. Börülce, protein, nişasta ve vitamin bakımından zengindir. Bakla, bileşiminde fazla miktarda protein ve fosfor bulunan bir baklagildir. İnsan sağlığı açısından besleyici bileşen içermeleri ve kuru baklagillerin bitkisel protein ve nişasta yönünden zengin olması nedeniyle, baklagillerin uygun koşullarda depolanması gerekir. Baklagillerin saklanması depolama koşulları son derece önemlidir ve uygun koşullarda uzun süre saklanabilir. Depolama sıcaklığı, gıda bileşimi, bağıl nem ve gıdaların iyi kurutulması depolamada önemli rol oynar ve bu değişkenler gıdaların nem sorpsiyon özelliklerini etkilerler (Iglesias ve Chirife, 1976a, Lasekan ve Lasekan, 2000). Baklagillerde bulunan su, depolama sırasında mikrobiyal, fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal olayların gelişimine etki eder. Baklagillerin mikrobiyal ve kimyasal olarak bozulmasını önlemek için nem içeriğinin kontrol edilmesi gerekir. Bazı gıdalar düşük nem içeriklerine sahip olmalarına rağmen, yüksek oranda nem içeren gıdalar daha çabuk bozulmakta ve kalite kaybına uğramaktadırlar. Yaygın olarak kullanılan paketlenme malzemeleri suya karşı geçirgen olduklarından dolayı çoğu gıdalar uzun süreli depolama sırasında nem alırlar.

Yüksek nem içeriklerinde baklagillerin nem içeriklerine bağlı olarak fiziksel ve kimyasal bozulmalar meydana gelmektedir. Baklagillerin mikrobiyal ve fizikokimyasal kalitesini sağlamak ve baklagillerin raf ömrünü uzatmak için, baklagillerin nem içeriğini azaltmak ve denge nem içeriği-su aktivitesi ilişkisini bilmek gerekmektedir. Sıcaklık, bileşim ve gıdanın fiziksel durumuna bağlı olan su aktivitesi (a_w) gıdadaki suyun kısmi buhar basıncı ve aynı sıcaklıktaki saf suyun kısmi buhar basıncının oranı olarak tarif edilir (Fabra, 2009). Suyun miktarı, nem-bozulma ilişkisini tek başına açıklamada yetersiz olduğundan, su aktivitesi ve sorpsiyon izotermi kavramları ortaya konulmuştur. Sabit bir sıcaklıkta denge nem içeriği ve su aktivitesi arasındaki doğrusal olmayan ilişki nem sorpsiyon izoterm eğrileri olarak bilinir. Baklagiller ile bulundukları ortam arasında nem

transferinin önceden tahmin edilmesi, baklagillerin ileri aşamalarındaki stabilitelelerini ve raf ömrünü etkiledikleri için son derece önemlidir. Baklagillerin nem kazanma ve nem kaybetme ortamlarının belirlenmesi ayrıca teknolojik ve mikrobiyolojik açıdan da önemlidir (Lagoudaki vd., 1993).

Sabit bir sıcaklıkta su aktivitesi ile denge nem içeriği arasındaki fonksiyonel ilişkiyi gösteren sorpsiyon izotermi gıdaların su tutma özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır. Sorpsiyon izotermi, belirli bir sıcaklık ve basınçta denge bağıl nem içeriği ile su aktivitesi yada bağıl nem arasındaki ilişkiyi gösterdiklerinden dolayı gıdaların higroskopik özelliklerinin tanımlamak için bir araç olarak kullanılmaktadır. Denge nem içeriği ve su aktivitesi arasındaki ilişkileri tarif eden sorpsiyon izotermi mühendislik problemlerinin çözümü için gereklidir. Baklagillerin hazırlanması ve uygun paketlenme malzemesinin seçimi, kurutma prosesinin tasarımı, depolama sırasında gıdaların stabilitesi ve raf ömrünün belirlenmesi, termodinamik ve yapısal özelliklerinin araştırılması gibi uygulamalarda sorpsiyon verilerine ihtiyaç vardır. Sorpsiyon izotermi, sorpsiyon mekanizması ve gıda polimerleri ile suyun karşılıklı etkileşimleri ile ilgili faydalı bilgiler sağlamaktadır (Johnson ve Brennan, 2000). Sorpsiyon izotermi bilmek; mikrobiyal gelişme, enzimatik tepkimeler, enzimatik olmayan esmerleşme tepkimeleri ve yağ oksidasyonu gibi su aktivitesine bağlı mekanizmaların açığa çıkmasını sağlamaktadır. Çeşitli koşullar altında depolama sırasında nem içeriğinin bilinmesi maliyeti azaltmak için çok önemlidir. Depolama sırasında gıdalar sıcaklığa maruz kaldıkları için, sorpsiyon izotermine sıcaklığın önemli bir etkisi vardır.

Sıcaklık; su moleküllerinin mobilitesini, adsorbent ve su buharı arasındaki dinamik dengeyi ve gıda içindeki su moleküllerinin hareketliliğini etkiler (Chirife ve Iglesias, 1978; Al-Muhtaseb vd., 2004a; Al-Muhtaseb vd., 2004b). Sıcaklık nedeniyle moleküllerin kazandığı ısı enerjisi sorpsiyonda aktif uçların sayısını azaltır ve böylece sıcaklığın artması sorpsiyon kapasitesini azaltır (Palipane ve Driscoll, 1992). Katı bir adsorbent ile nem sorpsiyonu sırasında, adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi arasında iki farklı yolun bulunduğu nem sorpsiyon histeresis olayı meydana gelir (Tscheuschner ve Mohsenin, 1986).

Sorpsiyon izotermi tahmin etmek, denge nemi, su aktivitesi ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla deneysel, yarı deneysel ve teorik birçok eşitlik geliştirilmiştir. Bu eşitliklere ait sabitleri ve eşitliklerin gıdalara uygunluğunu belirlemek amacıyla birçok araştırma yapılmıştır (Oswin, 1946; Halsey, 1948; Henderson, 1952; Chung ve Pfof, 1967, Pfof vd., 1976, Tolaba vd., 1997; Sun, 1998; Al-Muhtaseb vd., 2004a; Al-Muhtaseb vd., 2004b). Sorpsiyon izotermine ait eşitlikler gıda teknolojisinde oldukça önemlidir.

Biyolojik sistemlerdeki kütle ve enerji ihtiyaçlarını hesaplamak için termodinamik yaklaşımlar kullanılmaktadır (Fasina vd., 1999). Sorpsiyon izoterminden hesaplanan termodinamik fonksiyonlar, deneysel sonuçların yorumlanmasını sağlar. Sorpsiyon izoterm verileri; sorpsiyon izoterm ısı, sorpsiyon entropisi, yayılma basıncı (yüzey potansiyeli), net

integral entalpi ve net integral entropi gibi termodinamik fonksiyonları belirlemede kullanılmaktadır (Iglesias ve Chirife, 1976a; Rizvi, 1986; Fasina vd., 1997; Tolaba vd., 1997; McLaughlin ve Magee, 1998; Sun, 1998; Aviara vd., 2002; Mulet vd., 2002; Al-Muhtaseb vd., 2004b; Işıksal, 2006). Termodinamik fonksiyonlar dehidrasyon sırasındaki enerji gereksinimini, gıdanın mikro yapısını, gıda yüzeyindeki fiziksel olayları ve sorpsiyon kinetik parametrelerini anlamak için önemlidir. Termodinamik fonksiyonlar ayrıca gıda-su arayüzeyinde meydana gelen fiziksel olayların yorumlanmasını sağlar. (Iglesias vd., 1976; Rizvi ve Benado, 1983; Fasina vd., 1999; Viollaz ve Rovedo, 1999; Aviara ve Ajibola, 2002; Al-Muhtaseb vd., 2004b; Cladera-Olivera vd., 2011; Noshad vd., 2012; Goudjinou vd., 2017).

Farklı sıcaklıklardaki sorpsiyon izotermelerinin bilinmesi, adsorbent ve adsorplanan arasındaki etkileşimi belirleyen sorpsiyon ısısının değerlendirilmesini sağlar ve ekipman-proses tasarımında çok önemlidir. Çeşitli gıdaların sorpsiyon davranışları doymuş tuz çözeltisi yöntemi kullanılarak yaygın bir şekilde çalışılmıştır (Labuza vd., 1976; Gal, 1981; Roman vd., 1982; Lomauro vd., 1985; Wang ve Brennan, 1991; Yanniotis ve Zarmboutis, 1996; Johnson ve Brennan, 2000; Menkov, 2000; Aviara ve Ajibola, 2002; Debnath vd., 2002; Abebe ve Ronda 2015; Aviara vd., 2016; Simha vd., 2016; Sharma vd., 2018). Bu yöntemde, kapalı bir kaptaki sabit sıcaklık ve basınçta istenen bağıl nem sağlamak için doymuş tuz çözeltileri kullanılmaktadır (Kou ve Schmidt, 1999). Fakat bu yöntem uzun denge süresi nedeniyle kullanışlı değildir. Bağıl nem atomizer nemlendirici ile ayarlanan bir kamarada depolanan baklagillerin nem sorpsiyonu ve nem sorpsiyon termodinamiği ile ilgili çalışmalara rastlanılmamıştır. Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü bir nemlendirme kamarası kullanılarak; fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla gibi çeşitli baklagillerin nem sorpsiyon izotermelerinin ve nem sorpsiyon termodinamiğinin incelenmesi bu konuda yapılan ilk çalışma olacaktır.

Bu çalışmanın amacı: a) bağıl nem atomizer nemlendirici ile ayarlanan bir kamarada depolanan kuru haldeki fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla gibi çeşitli baklagillerin 25, 35 ve 45 °C sıcaklıklarda adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini belirlemek; b) çeşitli matematiksel modellerin izotermelere uyumunu değerlendirerek izotermeleri tarif eden en uygun modeli bulmak; c) monotabaka değerlerine uyan su aktivitelerini belirlemek; d) adsorbent yüzey alanını belirlemek; e) fasulye, nohut, mercimek, börülce ve bakla gibi çeşitli baklagiller için sorpsiyon izosterik ısı, net integral entalpi, sorpsiyon entropisi, Gibbs serbest enerjisi, net integral entropi ve yüzey potansiyeli gibi termodinamik fonksiyonları belirlemektir.

2. GENEL BİLGİLER

Ülkemiz dünya baklagil üretiminde önemli üretici ülkeler arasında yer almaktadır ve kuru baklagillerin muhafaza edilmesinde depolama koşulları son derece önemlidir.

2.1. Baklagil Üretimi ve Baklagillerin Depolanması

Türkiye’deki bazı baklagillerin 1995-2018 yılları arasındaki üretimi Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Türkiye’deki bazı baklagillerin üretimi (1000 ton) (<http://www.tuik.gov.tr>)

Yıllar	Nohut	Mercimek	Fasulye	Bakla	Bezelye	Börülce
1995	730	665	225	49	4	3
1996	732	645	230	46	4	3
1997	720	515	235	46	4	3
1998	625	540	236	43	3	3
1999	560	380	237	39	3	2
2000	548	353	230	37	3	3
2001	535	520	225	35	3	2
2002	650	565	250	32	4	2
2003	600	540	250	33	4	2
2004	620	540	250	30	4	2
2005	600	570	210	28	4	3
2006	551	622	196	21	4	3
2007	505	535	154	21	3	2
2008	518	131	154	20	4	3
2009	562	302	181	21	4	3
2010	530	437	212	19	3	2
2011	487	405	200	19	4	2
2012	518	438	200	18	2	2
2013	506	417	195	17	3	2
2014	450	345	215	14	3	2
2015	460	360	235	14	3	2
2016	455	365	235	15	3	2
2017	470	430	239	15	3	2
2018	630	353	220	13	3	1

Depolama sıcaklığı, bağıl nem ve baklagil tanelerinin iyi kurutulması depolamada önemli rol oynar. Depolama sıcaklığının her 5 °C düşmesi, baklagillerin depolama süresini iki kat daha

arttırır. Baklagillerin sıcakta ve güneşte kalması, baklagil tanelerinin dış zarlarının kalınlaşmasına, renginin bozulmasına ve daha uzun sürede pişmesine neden olmaktadır. Baklagiller oda sıcaklığında nemsiz ortamda ağzı kapalı olarak saklanmalıdır. Kuru baklagiller hasattan sonra en geç bir yıl içerisinde tüketilmelidir. Büyük işletmelerde kuru baklagillerin uzun süre depolanması için kimyasal işlemler uygulanmaktadır. Depolamada baklagil tanelerinin arasına silikajel ve nem önleyici paketler konulur. Kuru baklagilleri serin ve güneş görmeyen kuru bir depo ortamında, bez torba ve kavanozlarda saklamak en doğru yöntemdir. Baklagillerde böceklenme ve küflenmeyi önlemek için ortamdaki nemi çekmek amacıyla kaya tuzu kullanılmaktadır ve kuru baklagiller daha uzun süre dayanabilmektedirler. Hasatı yeni yapılmış kuru baklagil tanelerinin nem miktarı yüksektir ve kuru baklagiller ortalama % 14 oranında su içerirler. Su miktarının artması durumunda baklagil tanelerinde küflenme ve böceklenme oluşur. Hasat sırasında mikroorganizmaların baklagillere bulaşma olasılığından dolayı tanelerin yıkanarak kurutulması gerekmektedir. Aksi durumda kuru baklagillerin yapısındaki nişasta mikroorganizmalar için iyi bir besin kaynağı olduğundan dolayı, baklagil tanelerinin küflenerek böceklenmesine ve baklagilin yapısının bozulmasına neden olacaktır. Kırık ve bozuk tanelerin, yabancı maddelerden ayıklanarak depolanmadığı durumlarda, sağlam tanelerin bozulması da söz konusu olabilmektedir.

2.2. Su Aktivitesi

Gıdaların depolanması sırasında; materyalin nem içeriği, su aktivitesi ve depolama sıcaklığı fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimlerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Nem içeriği gıdalardaki bozulma reaksiyonlarını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Birçok gıda maddesinin yapısındaki bileşenler içerisinde önemli bir yer tutan su, mikroorganizmalar tarafından yararlanılabilir su olan serbest su veya bağlı su olarak bulunmaktadır. Mikrobiyal büyüme ya da bozulma hızı büyük ölçüde gıda malzemelerinin su içeriğine bağlıdır (Lahsasni vd., 2002). Bir kuru gıda maddesinin kimyasal bileşimi kısmen protein ve karbonhidrat gibi makro moleküllere bağlı suyun bağlı konsantrasyonu yardımıyla belirlenir. Halbuki bağlanmamış su ya da yığın-faz suyu gıdanın bazı duyuşsal özelliklerini önemli ölçüde etkiler (Arogba, 2000).

Gıda maddesinin su aktivitesi gıdadaki suyun buhar basıncının aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına oranı olarak tarif edilir:

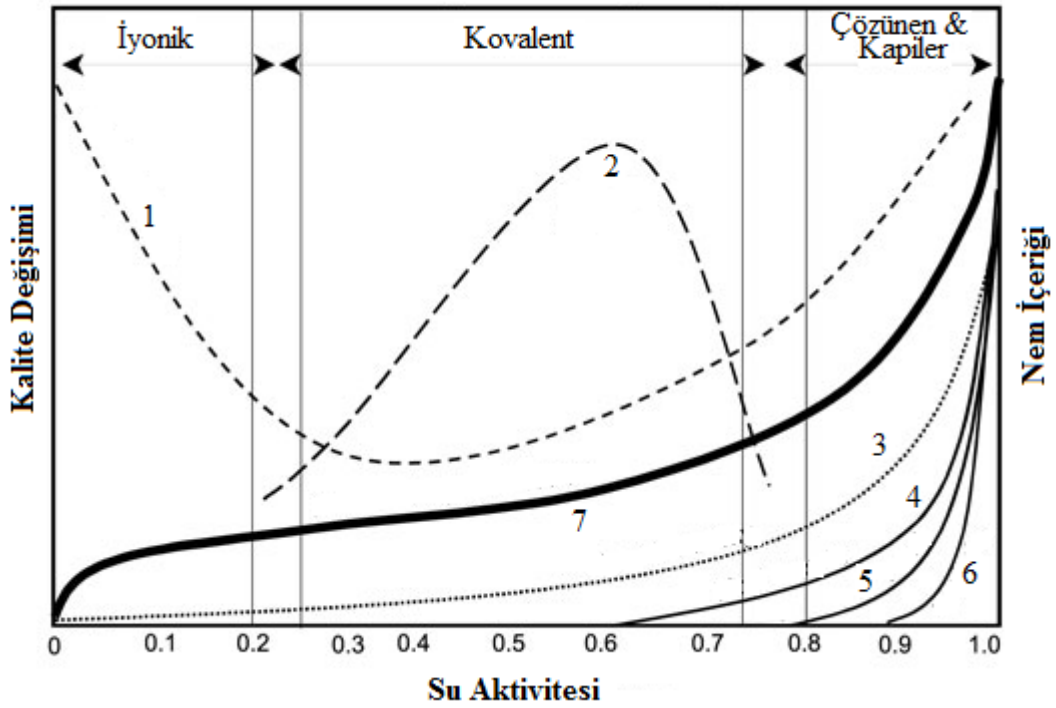
$$a_w = \left(\frac{P}{P_0}\right)_{T,P} = \frac{\% \text{bağlı nem}}{100} \quad (2.1)$$

Burada P gıdadaki suyun buhar basıncını, P₀ ise gıda ile aynı sıcaklık ve basınçtaki saf suyun buhar basıncını göstermektedir.

Bir gıdanın su aktivitesi gıdanın kimyasal, mikrobiyolojik ve biyokimyasal olarak bozulmasına ve gıdanın kalitesini kaybetmesine neden olan önemli bir etkidir. Çoğu gıda bozulma

reaksiyonları ve önemli mikroorganizmaların büyümesi gıdanın su aktivitesine bağlıdır ve bu yüzden su aktivitesi gıda stabilitesini tahmin etmek için önemli bir parametredir. Su aktivitesi, bir gıda maddesindeki bileşim unsurlarının kimyasal tepkimeye girme hızını ve bu gıda maddesinde gelişen mikrobiyal faaliyetleri kontrol eder ve mikrobiyal gelişim için kullanılabilir suyun alt sınırını tanımlar. Birçok bakteri 0.91'in altındaki su aktivitelerinde gelişemez. Su aktivitesinin 0.80'in altında olduğu durumda birçok mayanın gelişimi durur. Buna karşılık, 0.65 su aktivitesi değerinde bile gelişebilen kserofilik küfler bulunmaktadır. Ancak, genelde küflerin gelişebildiği su aktivitesi alt sınırı 0.70-0.75 olarak kabul edilmektedir. Besinsel yeterlilik, pH, oksijen, basınç ve sıcaklık gibi çevresel faktörler, mikrobiyal gelişim için gerekli su aktivitesi seviyesini etkilerler. Yüksek su aktivitesine sahip gıdalar birçok mikroorganizmanın gelişmesi için uygun ortam oluşturmaktadır.

Çoğu gıdaların nem içeriği su aktivitesi ile sigmoidal bir şekilde artar. Bir gıda maddesinin, % 80 bağıl nemli bir ortamda % 20 nem içeriğinde dengede kalması durumunda; % 20 nem içeren gıdanın su aktivitesi değeri 0.80'dir (Cemeroğlu ve Özkan 2004). Bir gıdanın su aktivitesi değeri, gıdayı çevreleyen ortamın yüzde bağıl neminin 100'e oranıdır. Buna göre, herhangi bir gıdanın farklı su içeriklerinde gösterdiği su aktivitesi değerleri, o gıdaya ait sorpsiyon izoterm eğrisinden bulunabilir. Bağıl nemin düşük olduğu bir ortamda depolanan gıdadan nem kaybı meydana gelmektedir. Su aktivitesi 0.9-1.0 arasında olan gıdalar sulu gıdalar, su aktivitesi 0.7-0.9 arasında olan gıdalar ise orta nemli gıdalardır. Bu tip gıdalar % 20-50 oranında su içerirler. Su aktivitesi 0.6'nın altında bulunan gıdalar kurutma işleminden geçen gıdalardır. Süt tozu ve kurutulmuş sebzelerin, kurutulmuş patates ve krakerin, kakaonun, çikolata ve balın, kurutulmuş meyvelerin, reçel, marmelat ve kahvenin % 60 su içeren taze etin ve % 30 su içeren salamın su aktiviteleri sırasıyla 0.2, 0.3, 0.4, 0.5-0.6, 0.6-0.7, 0.7-0.8, 0.99 ve 0.83 değerlerindedir. Su aktivitesi; gıdalarda Maillard reaksiyonu ve lipit oksidasyonu gibi kimyasal değişimler, enzimatik reaksiyonlar ve mikrobiyal bozulmalar üzerinde önemli etkiye sahiptir (Karel, 1975). Şekil 2.1'de, su aktivitesinin lipit oksidasyonu, esmerleşme reaksiyonları, enzim aktivitesi ve mikrobiyal gelişme üzerine etkisi gösterilmiştir. Gıdaların işlenmesi ve depolanması sırasında gıdada görülen bozulmalar ve kalite kayıpları arasındaki ilişkiler su aktivitesi ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.1. Gıdalardaki bozulma reaksiyonlarının su aktivitesi ile ilişkisi 1) yağ oksidasyonu, 2) enzimatik olmayan esmerleşme, 3) enzim aktivitesi, 4) küf gelişmesi, 5) maya gelişimi, 6) bakteri gelişmesi, 7) nem sorpsiyon izotermi (Karel, 1975)

2.3. Nem Sorpsiyon İzotermi

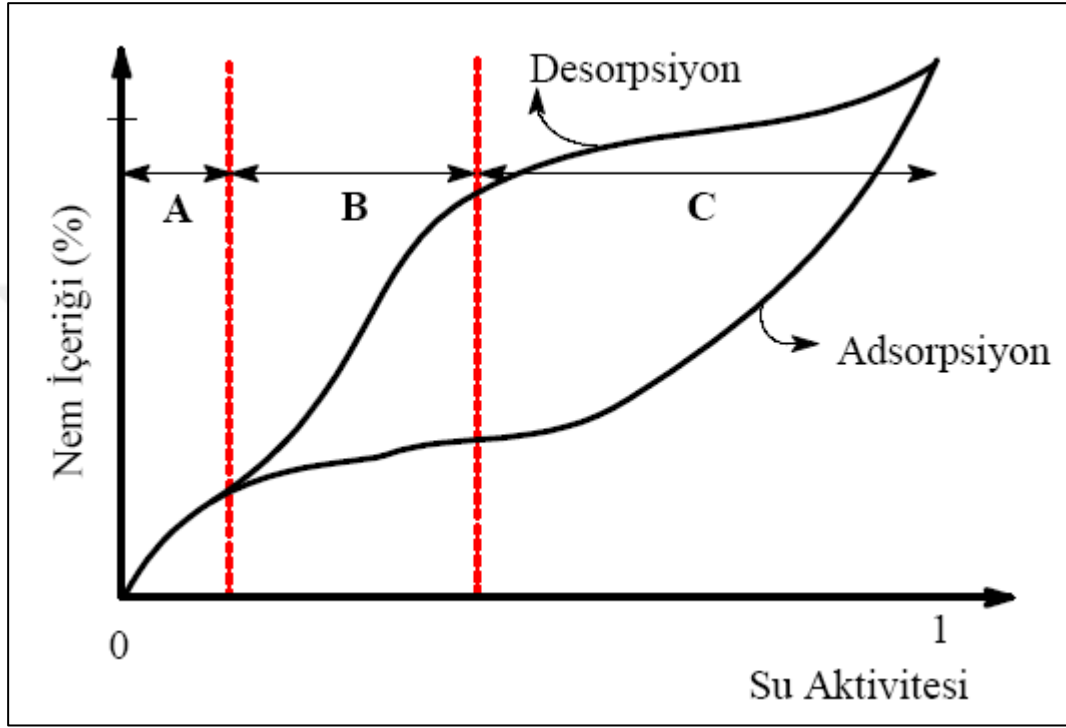
Çoğu gıdanın temel bileşeni sudur ve bir gıda maddesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri sudan önemli ölçüde etkilenmektedir. Suyun gıdadan çevreye ya da çevreden gıdaya transferi hem gıdanın nem içeriği ve bileşimine hem de sıcaklık ve nem miktarı gibi ortam koşullarına bağlıdır. Sabit sıcaklıkta gıdanın nem içeriği, kendini çevreleyen su buharı ile dengeye geldiğinde nem transferi sona erer. Bir süre sonra gıda maddeleri, nem içerikleri bakımından bulundukları ortam ile bir dengeye ulaşırlar ve gıdanın nem kaybetme hızı ile ortamdan nem kazanma hızı birbirine eşit olur. Bu durumda gıdanın nem içeriği sabit kalır. Bu koşullardaki gıdanın nem içeriğine denge nem içeriği, çevrenin ya da ortamın bağıl nemine de denge bağıl nemi denir. Denge nem içeriği değerlerinin bilinmesiyle; kurutma, depolama ve ambalajlama gibi işlemlerin optimizasyonu mümkün olabilmektedir. Gıdanın su içeriği ile ortamın bağıl nemi arasındaki ilişkinin bilinmesi, olgunlaşma süresini ve enerji ihtiyacını azaltmakta, böylece zaman kaybı ve ekonomik kayıp önlenebilmektedir. Gıda maddelerinin nem sorpsiyon izotermi bilinenmesi; raf ömrünün tahmin edilmesi, ekipman tasarımı, kurutma, karıştırma, deriştirme, paketlenme ve depolama işlemleri gibi gıda işleme ve mühendislik problemlerinin çözümünde oldukça önemlidir (Şahbaz, 1998; Arogba, 2001).

Isıtma, soğutma, dondurma, olgunlaştırma, tuzlama, şeker ilavesi, asitlendirme, fermantasyon, dumanlama, oksijeni uzaklaştırma, ışınlama, dondurarak kurutma ve kurutma gibi çeşitli koruma yöntemleri, sağlıklı ve güvenli gıda üretmek, kalite kayıplarını en aza indirmek ve gıdanın dayanma sürelerini arttırabilmek için gıda işlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurutma teknolojisinin, hem etkin bir koruma yöntemi olması, hem de ambalajlama, depolama ve taşıma masraflarını düşürmesi nedeniyle birçok gıdanın korunmasında geniş bir kullanım alanı vardır. Gıdanın nem alması nedeniyle gıdada oluşabilecek değişiklikleri önlemek amacıyla suyu uzaklaştırmak için kurutma yöntemi kullanılmakta ve kurutma ile gıdaların bileşimindeki su oranı azaltılarak, fiziksel ve kimyasal değişimler ile mikrobiyolojik bozulmaların önlenmesi ya da en aza indirilmesi sağlanmaktadır. Kurutma işlemi; tarımsal kaynaklı ürünlerin çok uzun süre bozulmadan korunmasını sağlamak, depolama sırasında küf ve bakteri oluşumunu önlemek, enzimlerin neden olduğu ürünlerdeki kalite kayıplarını önlemek ve ürünün nem miktarını kısa sürede istenilen değere düşürmek esaslarına dayanan bir koruma yöntemidir.

Ortamin sıcaklık ve bağıl nemine bağlı olarak denge nem içeriği değişmektedir. Sabit sıcaklıkta farklı bağıl nem değerleri içeren ortamlardaki gıdaların denge nem miktarları, ortamın bağıl nemine bağlı olarak değişmektedir. Depolama koşullarını belirlemek için gıdadaki denge nem içeriği ve belirli bir sıcaklıktaki havanın denge bağıl nemi arasındaki ilişkinin bilinmesi gereklidir. Bu ilişki sorpsiyon izoterm eşitlikleri ile tanımlanır (Sun ve Woods, 1998).

Gıdalardaki suyun hangi formda bulunduğunu belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar, donmayan suyu tanımlayan DTA (diferansiyel termal analiz) yöntemi ve bağıl su içeriğini tanımlayan NMR (nükleer manyetik rezonans) yöntemidir. Ayrıca, dielektrik ölçümleriyle de protein gibi polimerler tarafından bağlanan su tanımlanmaktadır (Karel, 1975). Ancak, gıdalardaki suyun özelliklerini belirlemede en yaygın olarak kullanılan yöntem, nem sorpsiyon izotermelerinin belirlenmesidir. Nem sorpsiyon izotermeleri, sabit sıcaklıkta bir gıdanın su aktivitesi ile denge nem içeriği arasındaki ilişkiyi gösterirler. Sorpsiyon izotermeleri, su aktivitesine veya ortamın bağıl nemine karşı denge nem içeriğinin grafiğe geçirilmesiyle elde edilmektedir (Sun ve Woods, 1993). Gıdaların nem sorpsiyon izotermeleri yapılarında bulunan fonksiyonel gruplara, gıdanın kristal ve amorf yapıya sahip olmasına, gıdadaki bileşenlerin birbirleri ile etkileşimine bağlı olarak değişmektedir. Kuru bir maddenin nem kazanarak dengeye ulaşması sonucu çizilen izoterme adsorpsiyon, nemli bir maddenin nem kaybederek dengeye ulaşması sonucu çizilen izoterme desorpsiyon izotermi denir. Her gıdanın farklı sıcaklıklarda kendine özgü bir sorpsiyon izotermi vardır. Aynı oranda içerik maddeleri bulunduran gıdalarda benzer su sorpsiyon izotermeleri elde edilir. Sorpsiyon izotermeleri ile, kurutulmuş gıdalar için uygun ambalaj malzemesi ve depolama koşulları seçilmekte, gıdanın aroma, renk, yapı ve besin elemanları korunmakta ve gıdanın mikrobiyal olarak bozulması önlenmektedir. Gıdaların kurutulması, depolanması, ambalajlanması ve karıştırılması gibi birçok alanda sorpsiyon izotermelerinden yararlanılmaktadır. Bir gıdanın

sorpsiyon izotermi, gıdanın spesifik yüzey alanı, gözenek hacmi, gözenek büyüklüğü dağılımı ve kristalite gibi yapısal özelliklerini belirlemede de önemlidir. Sorpsiyon izotermlerinin şekli gıdanın fiziksel yapısına, kimyasal bileşimine ve suyu bağlama miktarına bağlı olarak değişmektedir. Ancak, tüm sorpsiyon izotermlerinin karakteristik bir şekli vardır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Sorpsiyon izotermi (Cemeroğlu ve Özkan 2004)

Neme karşı daha duyarlı olan higroskopik nitelikli gıdalar daha dik eğimli adsorpsiyon izotermi verirler. Fakat, neme karşı daha az duyarlı olan higroskopik olmayan gıdalar daha az eğimli adsorpsiyon izotermi verirler. Gıdadaki suyun farklı durumları sorpsiyon izotermilerindeki A, B ve C bölgeleri ile gösterilir. Ancak, bölgeleri birbirinden ayıran kesin bir sınır yoktur. Gıda maddesi tarafından adsorbe edilen su; monomoleküler, multimoleküler ve kılcallarda yoğunlaşmış serbest su olarak sınıflandırılabilir. A bölgesindeki su, gıdanın kuru yüzeyinde yan yana ve tek sıra halindeki su moleküllerinden oluşmuştur ve gıdanın yüzeyini tek katmanlı su moleküllerinden oluşan bir örtü gibi sarmaktadır. Su molekülleri karboksil ve amino grupları gibi polar uçlara, su-iyon veya su-dipol etkileşimi ile adsorplanmaktadır. A bölgesindeki suya monomoleküler ya da tek tabakalı su denir. Monomoleküler su filmi düzeyinde su içeren bir gıda maddesi, optimum kararlılığa sahip bir özelliğe sahiptir. Monomoleküler su, gıdalarda kuru temel üzerinden % 5-10 oranlarında bulunmaktadır ve polisakkaritlerin hidroksil grupları, proteinlerin karbonil ve amino grupları gibi gruplara kuvvetli bir şekilde bağlanmışlardır. Su molekülleri, polar uçlara su-iyon

veya su-dipol etkileşimi ile bağlanırlar. Monomoleküler su çok kararlıdır, donmaz ve kurutma ile buharlaştırılmazlar. Kurutma sırasında monomoleküler su filminin uzaklaştırılması olanaksızdır ve bu su filmi gıdayı oksidasyondan koruduğu için uzaklaştırılması istenmeyen bir durumdur. Bu bölgedeki su aktivitesi 0.2–0.4 aralığındadır. Gıdalardaki monomoleküler su miktarını hesaplamak için geliştirilen ilk eşitlik BET (Brunauer, Emet ve Teller) izoterm eşitliğidir. Ayrıca gıdalardaki monomoleküler su miktarını hesaplamak için BET eşitliği yanında GAB eşitliği de yaygın olarak kullanılmaktadır (Karel, 1975).

Monomoleküler su filmi üzerindeki üst üste çok sıralı su molekülleri tabakasını gösteren B bölgesindeki su, birinci tabakada doldurulmayan uçlar ile katıya ait hidrofilik gruplar etrafında oluşan pek çok ek tabakayı da içermektedir. Su ile komşu moleküller arasındaki ilişki su-su, su-çözünen arasında ve hidrojen bağı vasıtasıyla olur. Bu bölgedeki suyun buharlaşma entalpisi saf suyun buharlaşma entalpisine kıyasla çok az yüksektir. Bu tabakadaki su, gittikçe azalan bir adsorpsiyon gücüyle bağlı olduklarından tek tabakalı suya kıyasla gevşek durumdadır ve çözücü özellikleri göstermektedir. Sorpsiyon izotermine düz kısmını gösteren B bölgesinde, gıdanın su içeriğindeki meydana gelen çok az bir değişme denge bağılı neminde önemli bir değişmeye neden olur ve su aktivitesi 0.3-0.7 aralığındadır.

Su aktivitesinin 0.6-0.7'den büyük olduğu C bölgesi, kapiler yapıda veya gıda hücrelerinde yoğunlaşmış çok zayıf güçlerle tutulan ve kurutma ile kolayca uzaklaştırılabilen serbest suyu gösterir. Bu bölgedeki su (bağlanmamış serbest su), dokular arası gözeneklerde ve kılcallarda yoğunlaşan ve yığın fazdaki suyun özelliklerine sahiptir. Buharlaşma entalpisi saf suyun buharlaşma entalpisi ile aynı olup bu su donabilir. Bu bölgedeki serbest suyun gıda maddelerinin kararlılığı üzerine büyük bir etkisi vardır. Sorpsiyon izoterm eğrisinin (C) bölgesinde, gıdanın bozulmasına neden olan enzimatik reaksiyonlar meydana gelmektedir ve bu bölgede yüksek bağıl nem değerlerinde mikrobiyal gelişim artmaktadır. Yüksek nem içerikli gıdalarda toplam suyun % 95'inden fazlasını bu bölümdeki su oluşturmaktadır ve serbest suyun, suda çözünebilir maddeler için çözücü özelliği vardır.

Sorpsiyon izotermi adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi olarak ikiye ayrılmaktadır. Adsorpsiyon izotermi çevre bağılı neminin artmasıyla gıdadaki nem oranının arttığı durumları, desorpsiyon izotermi ise çevredeki bağıl nemin giderek azalmasıyla gıdadaki suyun azaldığı durumları gösterir. Belirli bir su aktivitesinde bir gıdanın desorpsiyon sırasındaki su içeriği adsorpsiyon sırasındaki su içeriğinden yüksektir. Bu duruma histeresis denir (Cemeroğlu ve Özkan, 2004).

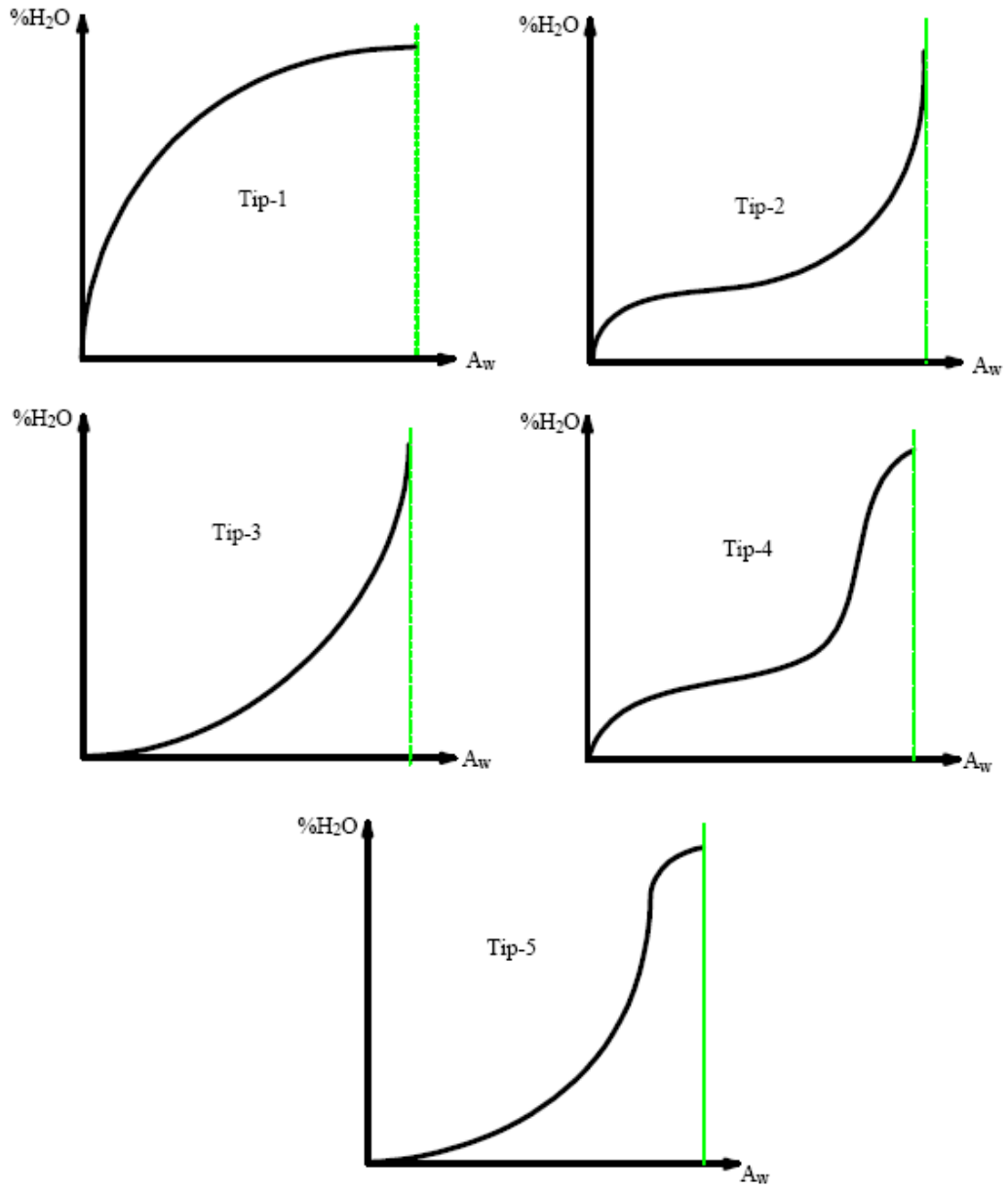
Gıdanın fiziksel yapısı, kimyasal bileşimi ve suyu bağlama miktarına göre sorpsiyon izotermi şeklini değiştirmektedir. Maddelerin su bağlama özellikleri; maddelerin kristal, amorf veya farklı yapıda olmalarına göre değişiklik göstermektedir. Gıdalarda aynı hidrofilik gruplar farklı bileşenlerde bulunurlar. Bu nedenle, suyun yapıya bağlanması, bileşenlerden ziyade, bu

bileşenlerdeki fonksiyonel gruplarla ilgilidir. Nişasta ve selüloz oranı fazla, fakat protein ve suda çözünür kuru madde oranı az olan pirinç veya kepek gibi maddelerin izotermelerinde ikinci bölüm en geniş bölümdür. Halbuki protein ve suda çözünür kuru maddece zengin olan, fakat nişasta ve selüloz miktarı az olan gıdalarda bu bölüm minimum düzeydedir. Yüksek oranda suda çözünür kuru madde içeren kurutulmuş meyvelerin izotermine ise, üçüncü bölüm diğerlerine kıyasla daha geniştir (Kaymak-Ertekin ve Gedik 2004).

Belirli bir su aktivitesi ya da bağıl nemde sıcaklığın artması ile denge nem içeriği azalır. Bu durum, yüksek sıcaklıkta meydana gelen fiziksel değişikliklerden dolayı suyun bağlanması için gerekli aktif uçların sayısındaki azalmadan kaynaklanmaktadır ve yüksek sıcaklıkta gıda maddesinin daha az higroskopik olduğunu göstermektedir.

2.3.1. Nem Sorpsiyon İzoterm Tipleri

Sorpsiyon izotermelerinin çok farklı şekilleri bulunmaktadır (Şekil 2.3). Gazların gözenekli katıların boşluklarına sınırlı düzeyde monomoleküler adsorpsiyonu Tip-I izotermeler ile gösterilmektedir. Gıda maddeleri gözeneksiz katılar gibi davranırlar ve gıda maddelerine ait izotermelerin çoğu sigmoidal eğriler olup Tip-2 izoterm uyarlar. Meyve, şekerleme, kahve ekstraktı ve diğer küçük çözünür moleküller bakımından zengin, fakat polimer maddeler bakımından fakir gıdaların sorpsiyon izotermeleri Tip-3 izoterm uyarlar. Birçok gıda Tip-2 izoterm tipine uygun izoterm verirken, yağ ve şeker içeriği yüksek gıdalar Tip-3 izoterm tipine uygun izoterm vermektedir. Çünkü yüksek su aktivitesi değerlerinde şekerin –OH gruplarına suyun bağlanması nedeniyle şeker daha fazla su adsorbe etmekte ve şekerin çözünmesine bağlı olarak şekerin kristal yapısının kırılmasıyla suyun bağlanabileceği adsorpsiyon uçlarının sayısı artmaktadır. Şişme özelliği gösteren hidrofilik katıların özel gruplarının maksimum hidrasyona ulaşana kadar adsorpsiyonu Tip-4 izotermeler ile temsil edilirler. BET izotermi de denilen Tip-5 izotermi, kömürün su buharı adsorpsiyonu ile elde edilmektedir. Gıdalar genellikle Tip-2, Tip3 ve Tip-4 izoterm şekline uymaktadırlar (Dinçer ve Esin, 1995; Sun, 1998; Işıksal, 2006).

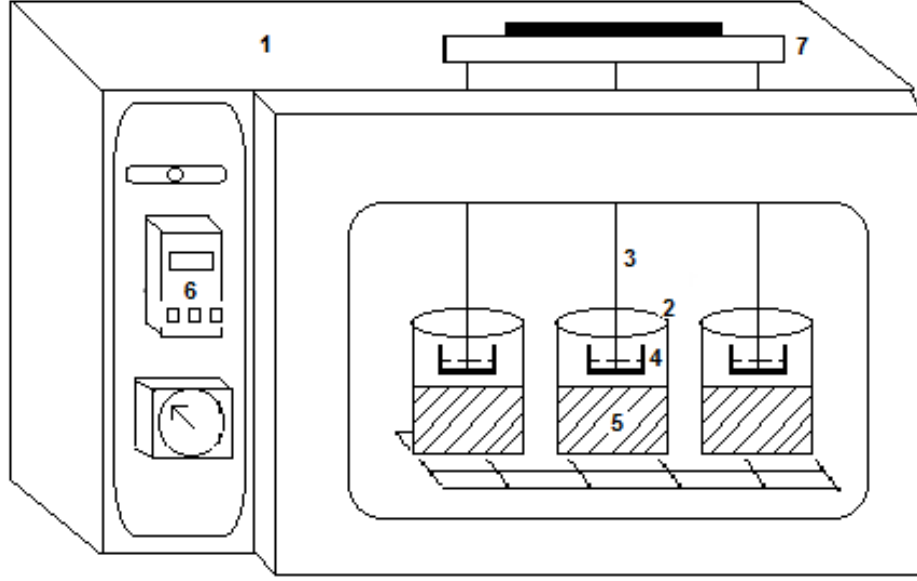


Şekil 2.3. Sorpsiyon izotermelerinin tipleri (Dinçer ve Esin, 1995; Işıksal, 2006)

2.3.2. Nem Sorpsiyon İzotermelerini Belirleme Yöntemleri

Gıdalarda sorpsiyon izotermelerinin belirlenmesinde higrometrik ve gravimetrik yöntem kullanılmaktadır. Higrometrik yöntemin ilkesi, su aktivitesi ölçülecek olan ve içerdiği su miktarı bilinen gıda örneği ile ortam arasında bir dengenin oluşmasından sonra ortam bağıl neminin ölçülmesine dayanır. Bu yöntemde denge oluşumu, önceden belirlenmiş bağıl nem atmosferinde değil, gıda örneğinin çevresinde kendiliğinden oluşan bağıl nemin sabit bir düzeye erişmesiyle izlenmektedir (Cemeroğlu ve Özkan, 2004). Gravimetrik ya da izopiastik yöntemle sorpsiyon

izotermelerinin belirlenmesinde gıdanın bulunduğu atmosferin bağıl nemi sabit tutulur. Örnekler belirli bir sıcaklıkta hava sirkülasyonlu kurutma dolabında kurutulduktan sonra belirli bir süre istenilen bağıl nem ortamını sağlayan bir hafta önceden hazırlanmış ve her gün karıştırılmak suretiyle kararlılık kazandırılmış doygun tuz çözeltilerini içeren kapların bulunduğu ortamda bekletilerek örneklerin bulundukları ortam ile nem dengesine gelmeleri sağlanır ve daha sonra örnekler tartılarak ağırlık artışları belirlenir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Gravimetrik yöntemle sorpsiyon izotermelerinin belirlenmesinde kullanılan etüv 1-Etüv, 2-Tuz çözeltisi içeren cam kavanoz, 3-Örnek tutucu, 4-Örnek, 5-Doygun tuz çözeltisi, 6-Sıcaklık göstergesi, 7-Terazi

Adsorpsiyon izotermi için sabit tartıma kadar kurutulmuş, desorpsiyon izotermi için sabit tartıma kadar nem kazandırılmış olan gıdalar su aktiviteleri bilinen doygun tuz çözeltilerinin üzerinde sabit sıcaklıkta dengeye ulaşınca kadar bekletilir. Dengeye gelen örneklerin nem içerikleri belirlendikten sonra su aktivitesine karşı örneklerin denge nem içerikleri grafiğe geçirilerek adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermeleri elde edilir. Doymuş tuz çözeltilerinin üzerinde oluşan su buharı basıncı dolayısıyla bağıl nemi ilgili sıcaklık ve basınçta literatürden bulunabilir. Sabit bağıl nemli bir ortam oluşturmak amacıyla kullanılan bazı tuzlardan hazırlanmış doygun çözeltilerin farklı sıcaklıklardaki su aktiviteleri Tablo 2.1’de verilmiştir. Kullanılan tuzların saf olmaları gerekmektedir. Sodyum nitrit ve sodyum bromid gibi bazı tuzlar toksik etki göstermektedir.

Tablo 2.2. Bazı doygun tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki su aktiviteleri (Cemeroğlu ve Özkan, 2004)

Tuz	a _w değeri (25 °C)	a _w değeri (40 °C)
Lityum klorür (LiCl)	0.1130	0.1116
Potasyum asetat (CH ₃ COOK)	0.2260	0.2300
Magnezyum klorür (MgCl ₂)	0.3278	0.3159
Potasyum karbonat (K ₂ CO ₃)	0.4320	0.4230
Magnezyum nitrat (Mg(NO ₃) ₂)	0.5289	0.4842
Sodyum bromür (NaBr)	0.5757	0.5317
Potasyum iyodür (KI)	0.6886	0.6609
Stronsiyum klorür (SrCl ₂)	0.7090	0.7100
Sodyum klorür (NaCl)	0.7529	0.7501
Potasyum bromür (KBr)	0.8089	0.7942
Potasyum klorür (KCl)	0.8434	0.8232
Baryum klorür (BaCl ₂)	0.9030	0.8910
Potasyum nitrat (KNO ₃)	0.9358	0.9627
Potasyum sülfat (K ₂ SO ₄)	0.9730	0.9541

Statik bir sistem kullanarak (genellikle sabit bir denge bağıl nemi sağlayan doymuş tuz çözeltisi içeren kapalı bir cam kavanoz) örneklerin nem içeriği değişimlerini elde etmek mümkündür. Doymuş tuz çözeltileri yöntemi gıda ile dengedeki havanın nemini kontrol eder. Statik sistemde tuz çözeltisinin konsantrasyonu oldukça higroskopik maddelerde değişebilir. Ancak, nemin kademeli olarak daha yüksek değerlere yükseltildiği dinamik bir sistemde (sabit bir akış hızı olan sirküle ettirilen hava) örneğin etrafındaki havanın akışı nemlendirme ve kurutma işlemlerini hızlandırır. Statik sistemde özellikle yüksek su aktivitelerinde dengeye ulaşmak oldukça uzun sürdüğünden bozulma ve mikrobiyal faaliyet ortaya çıkmaktadır. Gerçek depolama koşullarını sağladığından dolayı, dinamik sistem statik yöntemle kıyasla daha avantajlıdır. Üstelik, dinamik sistem katmanlı malzemelerde daha iyi sonuçlar verir (Labuza vd., 1976). Dinamik bir sistem olan ve bağıl nemi bir atomizer nemlendirme sistemi ile kontrol edilen bir kamarada depolanan gıdaların dengedeki nem içeriklerinin belirlenmesiyle de nem sorpsiyon verileri elde edilebilir ve bu veriler ile sorpsiyon izotermi modeli modellenir.

Sorpsiyon izotermi yeni bir gıda ve proses geliştirmede, gıda mühendisliğinde ve endüstriyel ölçekte kalite kontrolünde önemlidir. Sorpsiyon izotermi sayesinde;

- özgül yüzey alanı ile bağlanan su arasında bir ilişki olduğundan, değişik gıdaların özgül yüzey alanları ve bileşimindeki aktif grup sayısı belirlenebilmekte,
- nem oranı birbirinden farklı gıdalar birbirleriyle karıştırıldığında elde edilecek karışımın su aktivitesi önceden belirlenebilmekte,

- gıdaların belirli koşullarda ne kadar su bağlayacağı ve bozulup bozulmayacağı önceden değerlendirilmekte,
- gıdaların işlenmesi ve depolanması sırasında olması muhtemel değişimler önceden tahmin edilebilmekte,
- gıdalara sorbe edilmiş suyun termodinamik özellikleri değerlendirilmekte,
- belirli bir ambalaj materyali içerisinde kuru gıdanın raf ömrü tahmin edilebilmektedir.

2.3.3. Nem Sorpsiyon Modelleri

Gıdaların sorpsiyon izotermelerini (bağıl nem-denge nem içeriği ilişkisi) matematiksel olarak tanımlamak amacıyla deneysel, yarı-deneysel ve sorpsiyon mekanizmalarının teorilerine dayanan birçok model tanımlanmıştır (Chirife ve Iglesias, 1978; Sanni vd., 1997; Tolaba vd., 2003). Gıdaların yapısına ve kompleks bileşimine bağlı olarak sorpsiyon davranışlarının matematiksel tahmini zordur. Sorpsiyon izotermeleri, fiziksel ve kimyasal değişmelerin bir sonucu olarak farklılık göstermektedir. Bu nedenle, farklı gıdalarda ve farklı a_w aralıklarında kuramsal ya da deneysel tek bir matematiksel model uygulamak zordur. Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) (Cadden, 1988), Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Brunauer vd., 1938), Henderson (Henderson, 1952), Oswin (Oswin, 1946), Peleg (Peleg, 1993), Smith (Smith, 1947), Caurie (Caurie, 1970), Halsey (Halsey, 1948), Ferro-Fontan (Ferro Fontan vd., 1982), Khun (Khun, 1967), Chung-Pfost (Chung ve Pfost, 1967), White-Eiring (Castillo vd., 2003) eşitlikleri gıdaların sorpsiyon izotermelerini tanımlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gıda sorpsiyon izotermelerinin modellenmesinde geniş uygulama alanı bulan BET eşitliğinin türetilmesinde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Sorpsiyon yalnızca özel uçlarda ve homojen yüzeyde oluşmaktadır.
- Birinci tabakadaki su moleküllerinin sorpsiyon ısısı sabittir ve suyun buharlaşma ısısı ile uçlarla etkileşime bağlı ısının toplamına eşittir.
- Tek tabaka dışındaki tüm tabakalarda sorpsiyon ısısı suyun buharlaşma ısısına eşittir.

Gıdalardaki suyun bir kısmı serbest olarak bulunur, bir kısmı da polisakkaritlerin hidroksil grupları ile proteinlerin amino ve karbonil grupları gibi bazı gıda bileşenlerine hidrojen ve iyon-dipol bağlarıyla bağlanmışlardır. Gıda bileşenlerine çok güçlü olarak bağlanan bu suya monomoleküler su denir ve kurutulmuş gıdaların fiziksel ve kimyasal stabilitesi açısından çok önemli olan monomoleküler su, genellikle 0.05-0.45 su aktivitesi değerlerinde geçerli olan BET eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Monomoleküler su düzeyinde ($a_w=0.2-0.3$) su içeren bir gıda maddesi, optimum kararlılığa sahiptir. Enzimatik reaksiyonlar, enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonları, flavor bileşenleri ve lipidlerin oksidasyon reaksiyonları monomoleküler su düzeyinde ya çok yavaşlamakta veya tamamen durmaktadır. Monomoleküler su içeriği, özellikle kurutulmuş

ürünlerin depolanmasında önemlidir ve bu ürünlerin depolanması sırasındaki minimum güvenli nem içeriğini vermektedir. Monomoleküler su içeriğinin üzerinde, su aktivitesi değerinde her 0.1'lik artış reaksiyon hızını %50-100 oranında artırmaktadır. BET eşitliği ile hesaplanan monotabaka su içeriği, gıdalarda özel polar gruplara bağlı su miktarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. BET eşitliğindeki monotabaka değeri adsorbentin sorpsiyon kapasitesi ve su buharı için polar bölgelerin kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. BET yöntemi ile gıdaların monomoleküler su içeriklerine ilaveten adsorpsiyon ısısının hesaplanmasında kullanılan C sabiti de hesaplanmaktadır. Gıdaların işlenmesi ve depolanması sırasında önemli olan adsorpsiyon ısısı çoğu gıdalar için 8.4-41.9 kJ/mol arasında değişmektedir. Bu durum, monomoleküler su içeriğinin uzaklaştırılması için gıdalara önemli miktarda ısı verilmesi gerektiğini göstermektedir. Birçok gıda için adsorpsiyon ısısı sabit değildir ve kurutma işlemi süresince sürekli olarak değişmekte ve düşük su içeriklerinde en yüksek düzeye erişmektedir (Labuza 1968). Gıdaları oksidasyondan koruyan bir örtü görevi gören monomoleküler su tabakasının uzaklaştırılması çok zordur ve bu monomoleküler su tabakasının uzaklaştırılması doğru değildir. Ancak yine de, monomoleküler su tabakasının uzaklaştırılması istenirse buharlaşma gizli ısısına ilaveten adsorpsiyon ısısının da verilmesi gerekmektedir. Kurutma işlemi sırasında, gıdalardaki serbest suyun uzaklaştırılması için suyun buharlaşma gizli ısısı kadar ısı verilmesi yeterli olmaktadır (Labuza vd., 1985; Cemeroğlu ve Özkan 2004).

GAB izotermi BET eşitliğinin geliştirilmiş şekli olup çoklu tabakada adsorbe edilen maddenin özellikleri de dikkate alınarak türetilmiştir. Bu eşitlik 0.9 su aktivitesi değerine kadar uyum sağlamaktadır. GAB eşitliği “European COST-Project 90” projesinde sorpsiyon mekanizmasını karakterize eden temel eşitlik olarak önerilmiştir (Wolf vd., 1985; Ertugay ve Certel, 1999).

$X = X_m C K a_w / [(1 - K a_w) (1 - K a_w + C K a_w)]$ şeklinde ifade edilen GAB modelinde, C mono tabaka sorpsiyon ısısı ile ilgili bir sabit ve K multi tabakalı sorpsiyonun ısısı ile ilgili bir faktördür. GAB parametreleri C ve K üzerine sıcaklığın etkisi Arrhenius tipi bir eşitlikle ifade edilir (Kim ve Bhowmik, 1994):

$$C = C_0 \exp \left[\frac{H_1 - H_m}{RT} \right] \quad (2.2)$$

$$K = K_0 \exp \left[\frac{H_L - H_m}{RT} \right] \quad (2.3)$$

Burada: C_0 ve K_0 sabitler; H_1 mono tabaka sorpsiyon ısısı (kJ/mol); H_m multi tabaka sorpsiyon ısısı (kJ/mol); H_L incelenen sıcaklık aralığındaki ortalama sıcaklıktaki su buharının yoğunlaşma ısısı, R gaz sabiti (kJ/molK); T (K) sıcaklıktır.

Eşitlik (2.2) ve (2.3)'ün GAB eşitliğinde yerine konulmasıyla elde edilen GAB eşitliğindeki C_o , K_o , H_L , H_m sabitleri ve monotabaka nem içeriği X_m non-lineer regresyon analizi ile bulunur ve su aktivitesi ile denge nem içeriği arasında bir eşitlik türetilir.

BET eşitliğini kullanarak belirlenen monotabaka nem içeriği kullanılarak örneklerin katı yüzey alanı aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir (Mazza ve Le Maguer, 1978).

$$S = \frac{X_m N_A A_M}{M_{su}} = 35.3 X_M \quad (2.4)$$

Burada: S katı yüzey alanı (m^2/g kuru katı); X_m monotabaka nem içeriği (% KM); M_{su} suyun molekül ağırlığı (18 kg/kgmol); N_A avagadro sayısı (6×10^{26} molekül/kgmol) ve A_m bir su molekülünün alanıdır ($1.06 \times 10^{-19} m^2/molekül$).

Birçok gıda için, monotabaka nem içeriği ve sıcaklık arasındaki bağıntı doğrusal bir eşitlik ile tarif edilir (Menkov vd.,1999).

$$X_M = A_0 + B_0 t \quad (2.5)$$

$X = X_m C_{aw} / [(1-a_w)(1-a_w + C_{aw})]$ şeklinde ifade edilen BET eşitliğindeki X_m yerine Eşitlik (2.5)' deki değerinin konulmasıyla elde edilen modifiye BET eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$X = \frac{(A_0 + B_0 t) C_{aw}}{[(1-a_w)(1-a_w + C_{aw})]} \quad (2.6)$$

Burada: t sıcaklık ($^{\circ}C$); X denge nem içeriği (% KM); a_w su aktivitesi; A_o , B_o ve C katsayıları sıcaklıktan bağımsız katsayılardır.

Modifiye BET modelindeki A_o , B_o ve C katsayıları $a_w \leq 0.4$ ' deki deneysel veriler kullanılarak non-lineer regrasyon analizi ile belirlenir ve denge nem içeriğine sıcaklık ve su aktivitesinin birlikte etkisini ifade eden bir eşitlik türetilir.

Monotabaka su aktivitesi $(a_w)_x$ 'nin bilinmesi gıdanın depolama koşullarını belirlemede önemlidir. Çünkü, fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik bozulmaları minimuma indirmek için gıdaların monotabaka su aktivitesinin altındaki koşullarda depolanmaları gerekmektedir. Mono tabaka su aktivitesi $(a_w)_x$, Eşitlik (2.6)'da $X = X_m$ alınarak sıcaklıktan bağımsız katsayı olan C'ye bağlı olarak ifade edilebilir ve aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla bulunur:

$$(a_w)_X = \frac{\sqrt{C}-1}{C-1} \quad (2.7)$$

2.3.4. İstatistiksel Testler

Sorpsiyon izotermlerine ait deneysel verileri temsil etmede modellerin ne derece doğru olduğunu değerlendirmek amacıyla; 0-0.9 su aktivitesi aralığındaki deneysel veriler kullanılarak non-lineer regresyon analizi (Statistica, 1995) ile belirlenen model katsayıları yardımıyla modelden

hesaplanmış değerler ve deneysel değerler yardımıyla bulunan % olarak E (ortalama bağıl yüzde sapma modülü), e_{ort} (ortalama hata) ve RMSE (hata karelerinin ortalama karekökü) gibi bazı istatistiksel testler ile modellerin deneysel verilere uygunluğu yani deneysel ve hesaplanan sorpsiyon verileri arasındaki uyum araştırılır ve en uygun sorpsiyon modeli belirlenir (Boquet vd., 1978; Lomauro vd., 1985):

$$E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{di} - X_{hi}|}{X_{di}} \quad (2.8)$$

$$e_{ort} = \sum_{i=1}^N \frac{X_{di} - X_{hi}}{N} \quad (2.9)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{di} - X_{hi})^2 \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

Burada; X_{di} deneysel değer, X_{hi} modelden hesaplanmış değer, N ölçüm sayısıdır.

% 10'un altındaki E değerleri, çoğu pratik amaçlar için deneysel değerlerin modellerden hesaplanan değerlerle iyi bir uyum içinde olduğunun göstergesidir (Lomauro vd., 1985).

Nem sorpsiyon izotermelerini tanımlayan eşitliklerden uygulamada birçok alanda yararlanılmaktadır. Sorpsiyon verileri elde edilen deneysel verileri tanımlayan uygun bir eşitliğin seçilmesi amacıyla değerlendirilmektedir. Sorpsiyon izotermelerinden; gıdaların kurutma süresinin belirlenmesinde, ambalaj içindeki kurutulmuş bir ürünün raf ömrünün belirlenmesinde ve farklı su aktivitelerine sahip ingredientlerin denge koşullarının tahmin edilmesinde yararlanılmaktadır. Sorpsiyon izotermeleri, özellikle bir gıda için uygulanacak kurutma prosesinin tasarlanmasında ve mikrobiyal güvenliğinin sağlandığı kurutma son noktasının belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Gıdaların kalitesini etkileyen fiziksel, biyokimyasal ve mikrobiyolojik reaksiyonların hangisinin gıdaların depolanması sırasında gerçekleşeceği, sorpsiyon izotermelerinden elde edilen verilerle kolaylıkla ortaya konabilmektedir. Sorpsiyon izotermeleri ayrıca, gıdanın bileşiminde bulunan polimerler ile su arasındaki etkileşim hakkında da önemli bilgiler verirler (McLaughlin ve Magee 1998).

2.4. Nem Sorpsiyon Termodinamiği

2.4.1. Sorpsiyon İzosterik Isısı

Gıdaların sorpsiyon izotermelerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğinin bilinmesi, sistemin termodinamik özelliklerinde meydana gelebilecek değişiklikler ile ilgili faydalı bilgiler verir (Rizvi, 1995). Tüm su aktivitesi değerlerinde sıcaklık arttıkça gıdaların adsorbe ettiği su miktarı azalmaktadır. Sorpsiyon izotermelerinin sıcaklığa bağlı olarak değişiminden türetilen ve kısmi molar bir özellik olarak tanımlanan sorpsiyon izosterik ısı, sabit basınçta belirli bir sıcaklık ve

bağıl nemde nemli gıdadan 1 kg suyun buharlaştırılabilmesi için ihtiyaç duyulan ısı enerjisidir. Su molekülleri ile suyun adsorplandığı yüzeyler arasındaki bağlanmanın ve enerjinin ölçüsüdür. Sorpsiyon izosterik ısı, adsorplanan su molekülleri ile su buharı molekülleri arasındaki ve adsorbent yüzeyi ile adsorban molekülleri arasındaki bağ enerjilerinin veya moleküller arası kuvvetlerin büyüklüğünü göstermektedir. Ayrıca, sorpsiyon izosterik ısı su buharı ve adsorbent arasındaki etkileşimin bir ölçüsüdür. Sorpsiyon izosterik ısı farklı sıcaklıklarda ve bağıl nem değerlerinde belirlenen sorpsiyon izotermine Clausius-Clapeyron eşitliğinin uygulanmasıyla hesaplanabilmektedir. Sorpsiyon izosterik ısının hesaplanmasında kalorimetrik ölçümler de kullanılmaktadır. Ancak, kalorimetrik tekniklerin kullanımıyla sorpsiyon izosterik ısının belirlenmesinde termal analiz termogravimetrisi ve diferansiyel taramalı kalorimetre gibi pahalı ölçüm cihazlarına gerek duyulması nedeniyle bu yöntem nadir olarak uygulanmaktadır. Düşük nem içeriklerinde sorpsiyon izosterik ısı yüksek, yüksek nem içeriklerinde ise düşüktür. Sorpsiyon en aktif uçlarda gerçekleşir. Yüksek nem içeriklerinde aktif uçlar engellendiğinden dolayı sorpsiyon daha az aktif uçlarda meydana gelmekte, böylece sorpsiyon ısı düşmekte ve belirli bir nem içeriğinden sonra asimptotik olarak suyun buharlaşma gizli ısına yakın değerler almaktadır. Yüksek nem içeriklerinde su bağlama kuvveti azalmıştır. Düşük nem içeriklerinde katı yüzeyinde daha fazla aktif polar gruplar vardır ve bağ enerjisi yüksektir. Düşük nem içeriklerinde adsorpsiyon, sorpsiyon yerlerinin daha aktif olduğu monomoleküler tabakada meydana gelmektedir. Düşük nem içeriklerinde su molekülleri ve sorpsiyon uçları arasındaki bağ enerjisi saf su moleküllerini sıvı fazda bir arada tutan enerjiden daha yüksektir (Ayrancı vd., 1990; Kıröğlu Zorlugenç, 2010). Düşük ve yüksek nem içeriklerinde desorpsiyon izosterik ısı adsorpsiyon işlemininkinden daha büyüktür. Bu durum düşük ve yüksek nem içeriklerinde adsorpsiyon prosesi için gerekli enerjinin desorpsiyon prosesi için gerekli enerjiden büyük olduğunu göstermektedir.

Net sorpsiyon izosterik ısı, sorpsiyon izosterik ısı ile sistemle aynı sıcaklıktaki suyun buharlaşma ısı arasındaki fark olarak tanımlanır (Tolaba vd., 2003). Spesifik bir nem içeriği için net sorpsiyon izosterik ısı Clausius-Clapeyron eşitliğinden elde edilir (Cadden, 1988).

$$q_{st} = -R \left[\frac{d(\ln a_w)}{d(1/T)} \right]_x \quad (2.11)$$

$$Q_{st} = q_{st} + H_L \quad (2.12)$$

Burada: q_{st} net sorpsiyon izosterik ısı (kJ/mol); a_w su aktivitesi; R ideal gaz sabiti (8.314 J/molK); T sıcaklık (K); Q_{st} sorpsiyon izosterik ısı (kJ/mol) ve H_L saf suyun buharlaşma gizli ısıdır (kJ/mol su).

Net sorpsiyon izosterik ısı (q_{st}), $1/T$ 'ye karşı $\ln a_w$ 'nin grafiğe geçirilmesiyle elde edilen doğrunun eğiminden hesaplanır. Hesaplanan eğim değeri $-q_{st}/R$ 'ye eşittir. Sorpsiyon izosterik ısı (Q_{st}), net sorpsiyon izosterik ısına (q_{st}) suyun buharlaşma ısı eklenerek hesaplanır. Bu yöntemin

kullanılabilmesi için sorpsiyon izotermlerinin en az üç farklı sıcaklıkta belirlenmiş olması gerekmektedir (Rizvi, 1995). Sorpsiyon izotermlerinden yararlanılarak elde edilen sorpsiyon ısıları gıdaların termodinamik bakımdan analiz edilmesinde kullanılan önemli bir termodinamik parametredir. İzosterik ısı gibi bir termodinamik parametre çoğu zaman farklı sıcaklıklarda denge verilerinden hesaplanır (Iglesias ve Chirife, 1976b). Sorpsiyon izosterik ısı ya da sorpsiyon diferansiyel entalpisi su-katı bağ kuvvetinin bir ölçüsüdür (McMinn ve Magee, 2003). Gıda düşük nem seviyelerine dehidrate olurken sorbe edilen suyun buharlaşma ısısı saf suyun buharlaşma ısının üzerindeki değerlere artar (King, 1968; Rizvi, 1986). Kurutma ve pişirme gibi gıda işlem proseslerinde sorpsiyon ısının bilinmesi bu işlemler sırasında oluşan ısı ve kütle transferi ile depolama sırasındaki nem değişikliklerinin kontrol edilebilmesi bakımından son derece önemlidir. Sorpsiyon diferansiyel ısının bilinmesi dehidrasyon proseslerinde ekipman tasarlamak ve gıda yüzeyindeki suyun durumunu kalitatif olarak anlamak için büyük bir öneme sahiptir (Tolaba vd., 2003). Sorpsiyon olaylarının analizi için; sorpsiyon izosterik ısısı yanında sorpsiyon entropisi, net integral entalpi ve net integral entropi gibi termodinamik fonksiyonlar da kullanılır (Rizvi ve Benado, 1984). Net integral entalpi ve net integral entropi de gıdaların nem sorpsiyon şeklini açıklamak için kullanılır.

2.4.2. Sorpsiyon Entropisi ve Gibbs Serbest Enerjisi

Bir gıdanın diferansiyel entropisi (sorpsiyon entropisi) belirli bir enerji seviyesinde uygun sorpsiyon merkezlerinin sayısı ile orantılıdır. Her nem içeriğinde suyun adsorpsiyon ve desorpsiyonunun diferansiyel entropisi ΔS aşağıdaki eşitliği deneysel verilere ya da deneysel verilere en iyi uyan modelden hesaplanan verilere uydurularak belirlenir (Madamha vd., 1996).

$$-\ln a_w = \frac{Q_{st}}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (2.13)$$

Belirli bir nem içeriği için $1/T$ 'ye karşı $-\ln a_w$ 'nin grafiğe geçirilmesiyle elde edilen doğrunun kaymasından $(-\Delta S/R)$ sorpsiyon entropisi ΔS bulunur.

Nem içeriğindeki değişme nedeniyle Gibbs serbest enerjisindeki değişimi belirlemek için, $(-RT \ln a_w)$ olarak verilen Gibbs serbest enerjisi (ΔG) her bir sıcaklık için deneysel verileri en iyi temsil eden eşitlik kullanılarak elde edilen su aktivitesi verileri ile hesaplanır (Taitano vd., 2012).

2.4.3. Entalpi-Entropi Dengeleme Teorisi

Sorpsiyon izosterik ısısı ve sorpsiyon entropisi arasında doğrusal bir ilişki vardır. Sorpsiyon izosterik ısısı ve sorpsiyon entropisi arasındaki doğrusal ilişki dengelenme teorisini doğrular (McLaughlin ve Magee, 1998):

$$Q_{st} = T_{\beta} \Delta S + \alpha \quad (2.14)$$

İzokinetik sıcaklık T_{β} ve α sabiti regresyon analizi ile bulunur. İzokinetik sıcaklık T_{β} , boyutu mutlak sıcaklık olan gıda yüzeyinin karakteristik bir özelliğidir (Aguerre vd., 1986).

Harmonik ortalama sıcaklık T_{hm} aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Krug vd., 1976).

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (1/T)} \quad (2.15)$$

Sorpsiyon izosterik ısısı ve sorpsiyon entropisi arasında doğrusal ilişki $T_{\beta} \neq T_{hm}$ durumunda geçerlidir. T_{β} ve T_{hm} arasındaki ilişki sorpsiyon prosesinin entalpi ya da entropi kontrollü olup olmadığını belirler. Eğer $T_{\beta} > T_{hm}$ ise prosesin entalpi kontrollü, $T_{\beta} < T_{hm}$ ise prosesin entropi kontrollü olduğu söylenir (Leffer ve Grunwald, 1963). Eşitlik (2.13)'deki ΔS yerine Eşitlik 2.(14)'deki ΔS değerinin konulmasıyla Eşitlik (2.16) elde edilir. α parametresi entalpi değişimine katkısı çok az olduğu için ihmal edilir. Entalpi-entropi teorisi, bu eşitliği uygulayarak sorpsiyon özelliklerine sıcaklığın etkisini dikkate almak için kullanılır (Aguerre vd., 1986):

$$-\ln a_w = \frac{Q_{st}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\beta}} \right) \quad (2.16)$$

Denge nem içeriği, sıcaklık ve su aktivitesini ilişkilendirmek için çeşitli eşitlikler ileri sürülmüştür (Tolaba vd., 2003). Eşitlik (2.16) sorpsiyon özelliklerine sıcaklığın etkisini dikkate almak için tekrar düzenlenirse aşağıdaki denge nem içeriği, sıcaklık ve su aktivitesi arasında üç parametrelili bir eşitlik elde edilir (Aguerre vd., 1986):

$$\frac{\ln a_w}{(1/T_{\beta} - 1/T)} = K_a K_b^X \quad (2.17)$$

Burada: K_a ve K_b sabitler, T mutlak sıcaklık (K) ve $(1/T_{\beta} - 1/T)$ izotermdeki sıcaklık düzeltme faktörüdür.

Entalpi-entropi dengeleme teorisi, Eşitlik (2.17)'yi kullanarak sorpsiyonun sıcaklık etkisini modellemek için kullanılır. K_a ve K_b sabitleri X 'e karşı $\ln[\ln a_w / (1/T_{\beta} - 1/T)]$ 'nin grafiğe geçirilmesi ile elde edilir.

2.4.4. Yüzey Potansiyeli

Yüzey fazla serbest enerjisi olan yayılma basıncı (yüzey potansiyeli) Φ (J/m²), sorplanan molekül nedeniyle boş sorpsiyon merkezlerinin yüzey gerilimindeki artışın bir göstergesini verir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir (Iglesias vd., 1976):

$$\phi = \frac{K_B T}{A_m} \int_0^{a_w} \frac{\theta}{a_w} da_w \quad (2.18)$$

Burada: K_B Boltmann sabiti (1.38×10^{-23} J/K); T sıcaklık (K) ve A_m bir su molekülünün alanıdır (1.06×10^{-19} m²/molekül).

Nem oranı θ ise aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\theta = X/X_m \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.18)'de $a_w=0$ 'da yüzey potansiyelinin değeri sonsuz olduğundan, su aktivitesi ve nem içeriği arasındaki ampirik bir eşitlik olan Dent modeli (Dent,1977) yüzey potansiyelini belirlemek için kullanılabilir:

$$\frac{a_w}{X} = \frac{1}{b_0 X_m} + \frac{b_0 - 2b}{b_0 X_m} a_w + \frac{b(b_0 - b)}{b_0 X_m} a_w^2 \quad (2.20)$$

Burada: b ve b_0 adsorplanan suyun özellikleriyle ilgili Dent sorpsiyon izoterm sabitleridir (boyutsuz) ve bu sabitler 0-0.4 su aktivitesi aralığında denge nem içeriği verilerine BET eşitliğini uygulayarak elde edilen monotabaka nem içeriği ve incelenen su aktivitesi aralığındaki deneysel denge nem içeriği değerleri kullanılarak nonlineer regresyon analizi ile belirlenebilir.

Eşitlik (2.19) ve Eşitlik (2.20)'nin, Eşitlik (2.18)'de yerine konulup, yeniden düzenlenip integralinin alınmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilir ve bu eşitlik ile farklı sıcaklıklarda ve su aktivitelerinde her bir sorpsiyon ucundaki bir su molekülü başına adsorbe edilen suyun yüzey potansiyeli değerleri hesaplanabilir:

$$\phi = \frac{K_B T}{A_m} \ln \left[\frac{1 + b_0 a_w - b a_w}{1 - b a_w} \right] \quad (2.21)$$

2.4.5. Net İntegral Entalpi ve Net İntegral Entropi

İntegral entalpisi, iş yapmak için mevcut toplam enerjiyi gösterir, su moleküllerinin gıdaya bağlanma kuvvetinin bir göstergesidir ve kurutma-dondurma işlemlerinin enerji dengeleriyle ilgilidir (Gal, 1975).

Net integral entalpiyi (q_{in}) hesaplamak için termodinamiğin birinci yasasından türetilen aşağıdaki eşitlik kullanılır (Rizvi, 1986).

$$q_{in} = -R \left[\frac{d(\ln a_w)}{d(1/T)} \right]_{\phi} \quad (2.22)$$

Net integral entalpi, sabit yüzey potansiyelinde $1/T$ 'ye karşı $\ln a_w$ 'nin grafiğe geçirilmesiyle elde edilen doğrunun eğiminden hesaplanır. Net integral entalpinin nem içeriği ile değişmesi; su-katı etkileşiminin su molekülleri arasındaki etkileşimden daha büyük olduğu seviyeleri gösterir. Net integral entalpi denge nem içeriğinin artması ile azalır.

Düzensizliğin derecesini ve su moleküllerinin gelişigüzel hareketlerini tarif eden net integral entropi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır ve net integral entropi denge nem içeriğinin artması ile artar (Mazza ve Le Maguer, 1978):

$$\Delta S_{in} = -\frac{q_{in}}{T} - R \ln(a_w)^* \quad (2.23)$$

$(a_w)^*$ ve T , sırasıyla farklı sıcaklıklarda sabit yüzey potansiyelinde elde edilen geometrik ortalama su aktivitesi ve geometrik ortalama sıcaklıktır.

2.4.6. Konuyla İlgili Çalışmalar

Gıdaların su sorpsiyon özellikleri (Rizvi ve Benado, 1984; Madamha vd., 1996; Basunia ve Abe, 2001; McMinn ve Magee, 2003, Ramesh, 2003), sorpsiyon ısı ve izotermilerin sıcaklığa bağımlılığı (Rizvi ve Benado, 1984; McMinn ve Magee, 2003; Lago vd., 2013; Heras vd., 2014, Garvin vd., 2017) ve matematiksel modeller (Banaszek ve Siebenmorgen, 1990; Muthukumarappan vd., 1992; Bianco vd., 1997; Sun, 1999; Basunia ve Abe, 2001; Ramesh, 2003; Lago vd., 2013; Majd vd., 2014) ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Üzüm, incir, erik ve kayısı (Maroulis vd., 1988), kuru kayısı, kuru incir ve kuru üzüm (Ayrancı vd., 1990), yağlı ve yağsız kepek (Shatadal ve Jayas 1990), mısır taneleri (Tolaba ve Suarez 1990), soğan, yeşil fasulye ve kayısı (Samaniego-Esquerre vd., 1991), patates, havuç, domates, yeşil biber ve soğan (Kiranoudis vd., 1993), peynir (Kaya ve Öner, 1996), hububat (Ertugay ve Certel, 1999), fındık (Ermin, 1998), patates (McLaughlin ve Magee, 1998), tarhana (İbanoğlu vd., 1999), elma ve mango (Falade ve Aworth 2004), ilaç endüstrisinde kullanılan acı portakal yaprakları (Ait Mohamed vd., 2005), pul biber (Arslan ve Toğrul, 2005a), makarna (Arslan ve Toğrul, 2005b), meyve ve sebze (Zhang vd., 1996), sucuk ve pastırma (Işıksal, 2006), çay (Arslan ve Toğrul, 2006), pirinç (Toğrul ve Arslan, 2006), ceviz (Toğrul ve Arslan, 2007), leblebi, mantı ve kurutulmuş sebze (Koroş, 2007), hurma (Kıroğlu Zorlugenç, 2010), darı (Raji ve Ojediran, 2011), kazein (Sawhney vd., 2011), portakal kabuğu ve yaprakları (Bejar vd., 2012), badem (Taitano vd., 2012), limon yaprağı (Argyropoulos vd., 2012), hindistan cevizi (Lavoyer vd., 2013), patates (Lago vd., 2013), kahve (Goneli vd., 2013), üzüm çekirdeği (Majd vd., 2014), karabiber (Yogendrarajah vd., 2015), kavunağacı meyvesi (Kurozawa, 2015), kına yaprakları (Bennaceur vd., 2015), kitosan filmleri (Aguirre-Ldredd vd.,

2017), karpuz (Khma vd., 2017), tahıl unu (Sharma vd., 2018), kaktüs (Munoz ve Segura, 2018), hint baharatı (Sahu vd., 2018), nişasta (Hoyos-Leyva, 2018), nar kabuğu ekstraktı mikrokapsülleri (Kaderides ve Goula, 2019), kırmızı mantar (Kien vd., 2019), muz (Susilo vd., 2019), argan ağacı ürünleri (Moussaoui) ve ayçiçeği tohumu (Munder vd., 2019) gibi gıdaların sorpsiyon izotermeleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Ajibola vd. (2003), börülcenin sorpsiyon dengesini ve termodinamik özelliklerini 40, 50, 60, 70 ve 80 °C’de buhar basıncı manometrik yöntemini kullanarak incelemişler ve modifiye Henderson modelinin en uygun model olduğunu ifade etmişlerdir.

Aviara vd. (2004), soya fasulyesinin sorpsiyon dengesini ve termodinamik özelliklerini 0.07-0.98 su aktivitesi aralığında ve 40, 50, 60 ve 70 °C’de statik gravimetrik yöntemle incelemişler ve Oswin modelinin soya fasulyesinin denge nem içeriğini tahmin etmek için en uygun model olduğunu ve soya fasulyesinin nem sorpsiyon izotermelerinin sigmoidal şekilli olduğunu ifade etmişlerdir.

Ayrancı ve Duman (2005), toz haline getirilmiş börülcenin ve 10, 20, 30 °C’de protein izolatlarının nem sorpsiyon izotermelerini incelemişler ve deneysel verileri temsil etmede GAB modelinin en uygun model olduğunu bulmuşlardır.

Moraes vd. (2008), elma ve sarımsağın nem denge izotermelerini 50, 60 ve 70 °C’de statik gravimetrik yöntemle incelemişler, elma ve sarımsağın izosterik ısısının sırasıyla 48-100 kJ/mol ve 43-68 kJ/mol aralığında olduklarını bulmuşlardır.

Raji ve Ojediran (2011), iki tür darının nem sorpsiyonunu 0.07-0.98 su aktivitesi aralığında ve 30-70 °C’de statik gravimetrik yöntemle inceledikleri bir çalışmada sorpsiyon izotermelerinin Tip-II davranış sergilediklerini ve artan sıcaklıkla artan bir histeresis etki gözlemlendiği ve modifiye Oswin modelinin deneysel verileri en iyi temsil eden eşitlik olduğu bulunmuştur.

Argyropoulos vd. (2012), oğulotu sapının ve yapraklarının nem sorpsiyon izotermelerini ve sorpsiyon izosterik ısısını 25, 35 ve 45 °C’de gravimetrik yöntemle incelemişler ve çoğu bağıl nem değerlerinde dengeye 6 saat içinde ulaşıldığını ve modifiye Oswin eşitliğinin en iyi model olduğunu ifade etmişlerdir.

Bejar vd. (2012), portakal kabuğu ve yapraklarının nem sorpsiyon izotermelerini 0.109-0.891 su aktivitesi aralığında ve 40, 50 ve 60 °C’de statik gravimetrik yöntemle incelemişler, desorpsiyon net izosterik ısısının adsorpsiyon net izosterik ısısından daha yüksek olduğunu ve hem adsorpsiyon net izosterik ısısının hem de desorpsiyon net izosterik ısısının denge nem içeriğindeki artış ile azaldığını belirtmişlerdir.

Bingöl vd. (2012), farklı pirinç türlerinin dinamik su buharı sorpsiyon izotermelerini 0-0.98 su aktivitesi aralığında ve 25 °C’de incelemişler ve sorpsiyon izotermelerinin Tip-II davranış sergilediklerini ve tüm pirinç türlerinde histeresis etkinin gözlemlendiğini ifade etmişlerdir.

ve net desorpsiyon izosterik ısısını bulmak için Clausius-Clapeyron eşitliğinin kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Yogendrarajah vd. (2015), siyah tane karabiberin nem sorpsiyon izotermi ve termodinamik özelliklerini 22, 30 ve 37 °C’de standart statik gravimetrik yöntemi kullanarak incelemişler ve sorpsiyon izotermi Tip-III davranış sergilediklerini ve adsorpsiyon için monotabaka nem içeriklerinin 22, 30 ve 37 °C’de sırasıyla 4.78, 3.56 ve 3.49 g/100 g olduğunu ifade etmişlerdir.

Ayala-Aponte (2016), ekvatoryal bölgelerde yetişen yeşil yapraklı bir bitki olan manyokun nem sorpsiyonunun termodinamik özelliklerini 25, 30 ve 35°C’de incelemiş, Peleg modelinin deneysel verilere en iyi uyumu verdiğini ifade etmiş, net integral entalpinin artan nem içeriği ile azaldığını, % 33.4’lük bir nem içeriği için 0.292 kJ/mol değerini aldığını, net integral entropinin % 29.2’lik bir nem içeriği için 0.1687 kJ/mol K değerini aldığını ifade etmiştir.

Li vd. (2016), kurutulmuş eriştenin sorpsiyon denge nemini ve adsorpsiyon izosterik ısısını 0.11-0.96 su aktivitesi aralığında ve 15, 20, 25, 30 ve 35 °C’de gravimetrik yöntemle incelemişler, en uygun modelin modifiye GAB modeli olduğunu, artan sıcaklıkla denge nem içeriğinin azaldığını ve izosterik ısısının hesaplanması için Clausius-Clapeyron eşitliğinin kullanıldığını ifade etmişlerdir.

Lin vd. (2016), bazı tarımsal biyokütlenin nem sorpsiyonunu modellemişler, adsorpsiyon kinetiğini incelemişler ve biyokütlenin adsorpsiyon prosesinin hızlı ve yavaş adsorpsiyon olmak üzere iki aşamada meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Khama vd. (2017), karpuzun nem sorpsiyonunu 0.05-0.45 su aktivitesi aralığında gravimetrik yöntemle incelemişler, en uygun modelin modifiye Henderson modeli olduğunu ve sorpsiyon izotermi Tip-III davranış sergilediklerini ifade etmişlerdir. Ayrıca izosterik ısısının 65.02-113.25 kJ/mol aralığında olduğunu ifade etmişlerdir.

Sharma vd. (2018) tahıl ununun nem sorpsiyonunu 10, 25 ve 40 °C’de incelemişler ve en uygun modelin GAB modeli olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca monotabaka nem içeriği, sorpsiyon izosterik ısısı ve sorpsiyon integral entropisi gibi termodinamik özellikleri de incelemişlerdir.

Munoz ve Segura (2018) mor kaktüs meyvesinin nem sorpsiyonunu 0.112-0.976 su aktivitesi aralığında ve 15, 20 ve 30 °C’de incelemişler, en uygun modellerin Smith, Kuhn ve Oswin modellerinin olduğunu ve izosterik ısısının artan nem içeriğiyle azaldığını ifade etmişlerdir.

Sahu vd. (2018) hint baharatı chironjinin nem sorpsiyonunu 0.11-0.93 su aktivitesi aralığında ve 25, 35 ve 45 °C’de incelemişler, en uygun modellerin GAB ve Caurie modellerinin olduğunu ve sorpsiyon izotermi Tip-II davranış sergilediklerini ifade etmişlerdir.

Hoyos-Leyva vd. (2018) nişastanın nem sorpsiyonunu incelemişler, en uygun modelin GAB modeli olduğunu ve sorpsiyon izotermi Tip-II davranış sergilediklerini ifade etmişlerdir.

Seth vd. (2018) kurutulmuş yogurt tozunun adsorpsiyon izotermi 20, 30, 40 ve 50 °C’de statik gravimetrik yöntemle belirlemişler ve Peleg modelinin deneysel verileri temsil etmek için en

uyumlu model olduğunu ifade etmişler ve 20, 30, 40 ve 50 °C için GAB modelinden monotabaka nem içeriklerini sırasıyla % 4.88, 4.54, 3.86 ve 3.52 olarak bulmuşlardır. Ayrıca Gibbs serbest enerjisinin 3436.19-303.91 J/mol aralığında olduğunu ifade etmişlerdir.

Kien vd. (2019), kırmızı mantarın % 11.1-% 93.58 bağıl nem aralığında ve 30, 40 ve 50 °C’de gravimetrik yöntemle nem sorpsiyonunu incelemişler ve Chung-Pfost modelinin deneysel verileri temsil etmek için en uyumlu model olduğunu ifade etmişlerdir.

Susilo vd. (2019), Endonezya Kepok muzunun 0.05-0.90 su aktivitesi aralığında bağıl nem aralığında ve 30, 40 ve 50 °C’de statik gravimetrik yöntemle nem sorpsiyonunu incelemişler, Clausius-Clapeyron eşitliğini kullanarak izosterik ısıyı hesaplamışlar ve desorpsiyon izosterik ısısının adsorpsiyon izosterik ısısından daha yüksek olduğunu, GAB modelinin deneysel verileri temsil etmek için en uyumlu model olduğunu, sorpsiyon izotermelerinin Tip-II davranış sergilediklerini ifade etmişlerdir.

Moussaoui vd. (2019), argan ağacı ürünlerinin (yaprak, pulp ve meyve) sorpsiyon davranışları ile net izosterik ısı ve diferansiyel entropi gibi termodinamik özellikleri incelemişler ve GAB modelinin deneysel verileri temsil etmek için uygun model olmadığını ifade etmişlerdir.

Munder vd. (2019), ayçiçeği tohumunun 0.10-0.95 su aktivitesi aralığında ve 25-50 °C sıcaklık aralığında nem sorpsiyonu ve kuruma davranışlarını modellemişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü bir kamarada depolanan çeşitli baklagillerin farklı sıcaklıklardaki sorpsiyon izotermelerini belirlemek amacıyla bir atomizer nemlendirme sistemi kullanılmıştır.

3.1. Materyal

Fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.), nohut (*Cicer arietinum* L.), yeşil mercimek (*Lens culinaris* Medic.), börülce (*Vigna unguiculate* L. Walp) ve bakla (*Vicia faba* L.) gibi kuru haldeki iç baklagiller yerel bir satıcıdan temin edilmiştir. Fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve baklanın çeşidi sırasıyla Dermason, Koçbaşı, Sultani, Karnıkara ve Seville idi.

3.2. Metot

Baklagillerin karbonhidrat, protein ve yağ gibi bileşim değerleri üretici firmadan temin edilmiş, nem ve kül içeriği analizle belirlenmiş, selüloz içeriği ise farktan bulunmuştur.

3.2.1. Nem ve Kül Tayini

Baklagillerin başlangıç nem içerikleri gravimetrik yöntemle belirlendi (AOAC, 1980). Kurutulmuş ve darası kaydedilmiş bir porselen kroze konulan yaklaşık 10 g ağırlığındaki baklagil örneği etüvde 105 °C sıcaklıkta sabit tartıma gelene kadar bekletildi ve sorpsiyon deneylerinde bu kurutulmuş örnekler kullanıldı.

Darası alınmış porselen kapsüldeki 2 g civarındaki kurutulmuş örnek, 600 °C' de sabit tartıma gelene kadar bir fırında bekletildi ve örneğin kül miktarı aşağıdaki bağıntıdan hesaplandı.

$$K = (m_1/m_0)100 \quad (3.1)$$

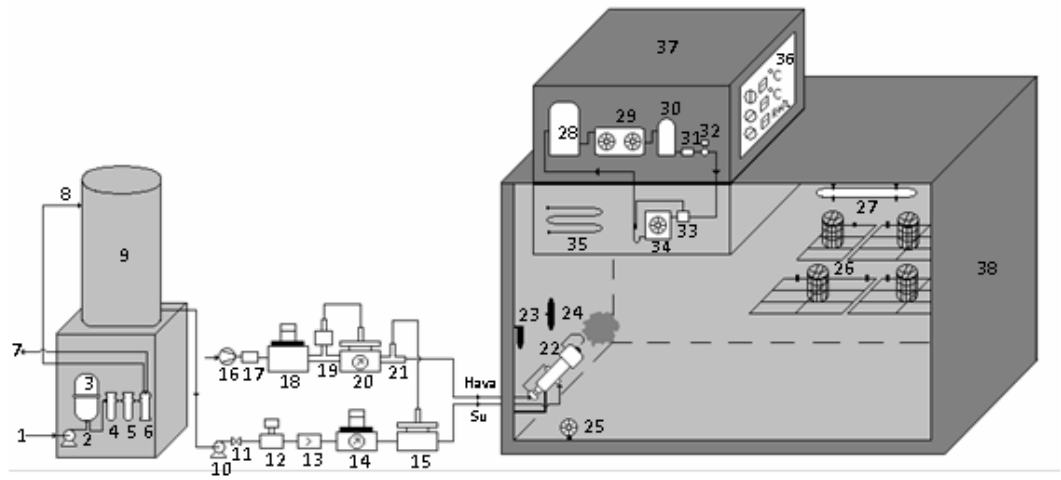
K= Kül miktarının yaş temel üzerinden ağırlık yüzdesi

m₀ = Örneğin ilk ağırlığı (g)

m₁ = Külün ağırlığı (g)

3.2.2. Sorpsiyon İzotermlerinin Belirlenmesi için Atomizer Nemlendirme Sistemlerinin Kullanılması

Sorpsiyon izotermlerinin belirlenmesinde sabit bir sıcaklık ve sabit nemli bir ortam oluşturmak için kullanılan atomizer nemlendirme sisteminin şematik olarak gösterimi ve sistemin parçalarının ayrıntılı görünümü Şekil 3.1-3.14'de verilmiştir.



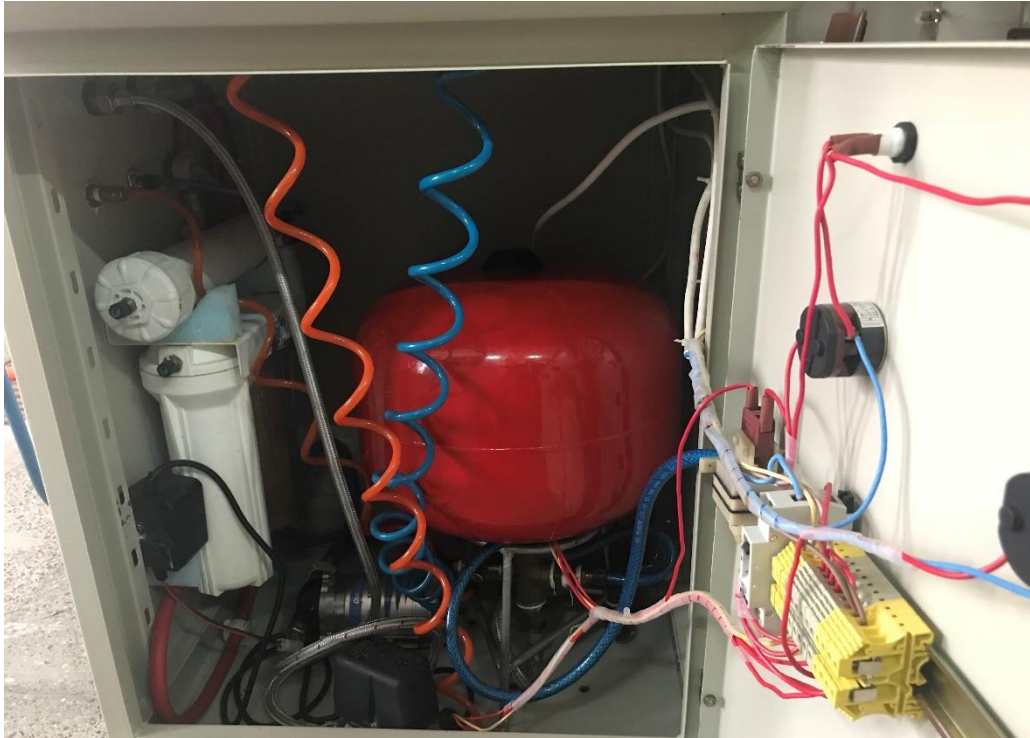
Şekil 3.1. Nemlendirme sisteminin şematik gösterimi (1, su girişi; 2, pompa; 3, hava basınç tankı; 4, filtre; 5, iyon değıştirici; 6, membran; 7, drenaj; 8, arıtılmış su; 9, su tankı; 10, pompa; 11, vana; 12, su vanası; 13, su geri dönüşünü önleyici; 14, su basınç regülatörü; 15, hava basıncı ile açılan su vanası; 16, kompresör; 17, hava filtresi; 18, hava basınç regülatörü; 19, elektrik valfi; 20, hava vanası; 21, bağlantı elemanı; 22, atomizer nemlendirici; 23, sıcaklık probu; 24, % bağıl nem probu; 25, üfleç; 26, örnek kapları; 27, UV lamba; 28, tam sızdırmaz kompresör; 29, yoğunlaştırıcı; 30, sıvı tankı; 31, filtre kurutucu; 32, manyetik ventili; 33, kısma vanası; 34, buharlaştırıcı; 35, kuru hava ısıtıcısı; 36, sıcaklık ve % bağıl nem kontrol paneli; 37, soğutma ünitesi; 38, sabit sıcaklık ve bağıl nem kamarası)



Şekil 3.2. Nemlendirme sistemi



Şekil 3.4. Su arıtma sistemi (genel görünüm)



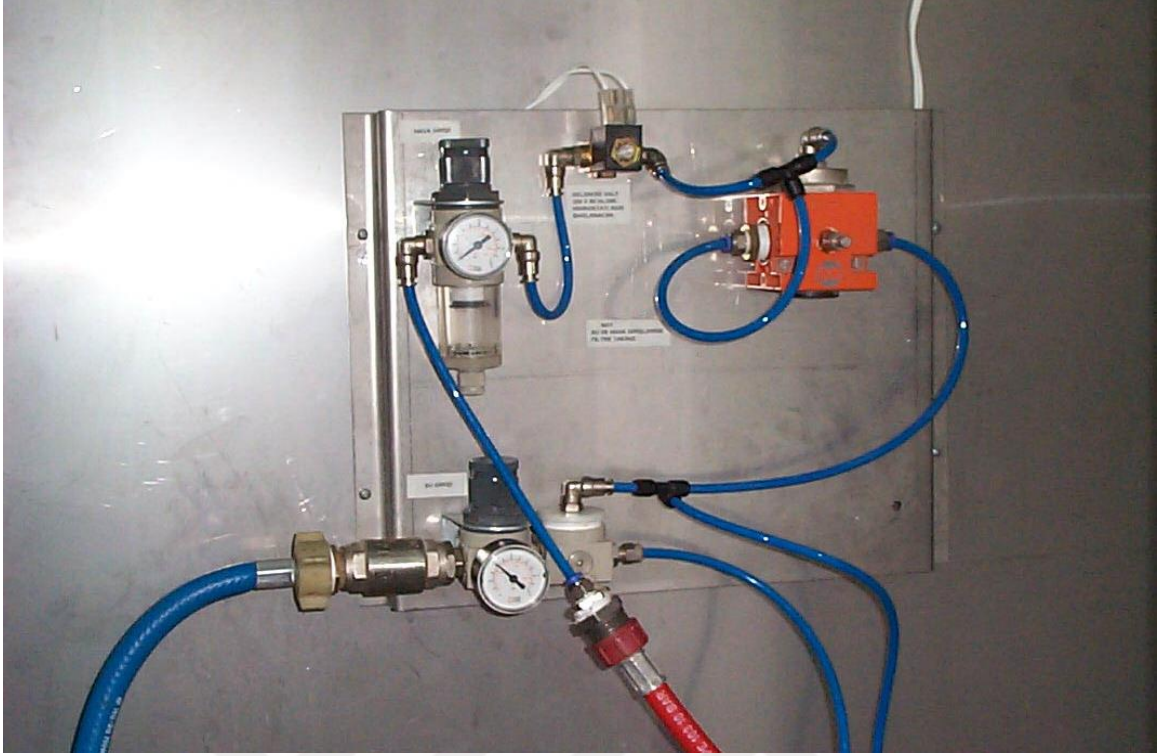
Şekil 3.3. Su arıtma sistemi



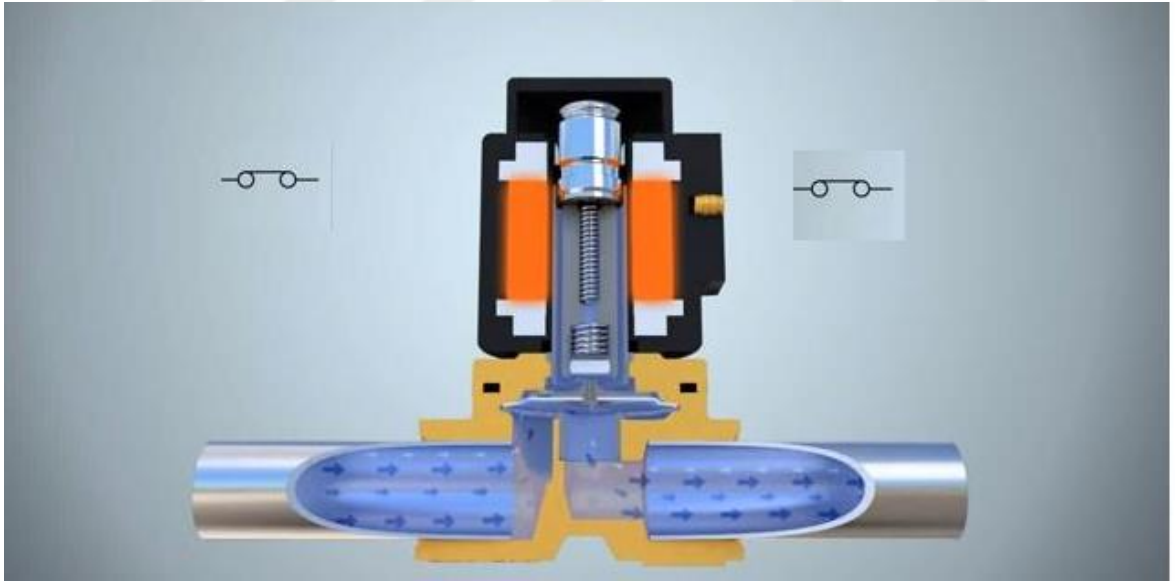
Şekil 3.5. Hava filtresi



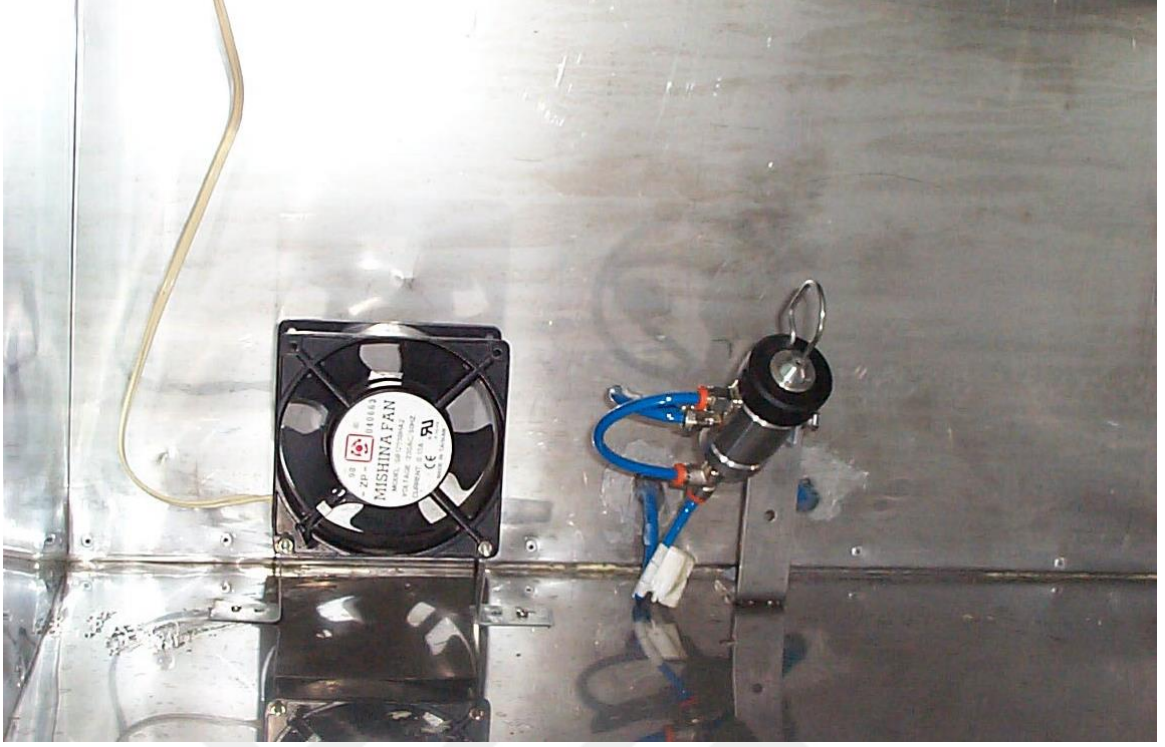
Şekil 3.6. Soğutma sistemi



Şekil 3.7. Pülverize buhar oluşturma sistemi



Şekil 3.8. Selenoid valf



Şekil 3.9. Atomizer



Şekil 3.10. Atomizer nemlendirici



Şekil 3.11. Sıcaklık ve % bağıl nem kontrol paneli (genel görünüm)



Şekil 3.12. Sıcaklık ve % bağıl nem kontrol paneli



Şekil 3.13. Kuru hava ısıtıcısı, sıcaklık ve % bağıl nem probu



Şekil 3.14. Sabit sıcaklık ve bağıl nem kamarası

Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kamara, (0.95 m)x(1.24 m)x(2.0 m) ebatlarında Cr-Ni paslanmaz çelik tabakalardan imal edildi. Başlangıçta, nemlendirme kamarasında % 10'luk bağıl nemi sağlamak için silikajel (Crosfield Chemicals, UK) kullanıldı. Bağıl nemi bir atomizer nemlendirme sistemi ile kontrol edilen 2 m³ iç hacmindeki bir nemlendirme kamarasında depolanan gıdaların incelenen sıcaklık ve bağıl nemdeki adsorpsiyon çalışmaları için; belirli bir miktardaki kurutulmuş baklagil örneği (10 ± 0.001 g), delikli bir sepet içerisinde su aktivitesi silikajel kullanılarak 0.1'e kadar düşürülen bir depolama kamarası içerisine yerleştirildi.

Bir iyon değiştirici ve ters osmoz sisteminden ibaret olan su arıtma sistemi ile arıtılmış şebeke suyu 200 L kapasiteli bir tankta depolandı. Su ve bir filtreden geçirilen hava, nemlendirme kamarası girişinde basınç regülatörü ile 4 bar basınca düşürülerek karıştırıldı ve nemlendirme kamarasına bir atomizer vasıtasıyla gönderilerek pülverize buhar elde edildi. Pülverize buhar; % 10 ile % 90 arasında farklı bağıl nem değerleri sağlamak amacıyla otomatik olarak ayarlanarak bir atomizer nemlendirici vasıtasıyla belirli miktarlarda depolama kamarasına verildi, kamaranın ayarlanan bağıl nem ve sıcaklıkta kararlı hale gelmesi beklendi, örnekler incelenen % bağıl nem ve sıcaklık değerlerinde sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletildi, örnekleri içeren sepetler düzenli zaman aralıklarında 0.001 g duyarlılıkta elektronik terazide (Shimadzu Şirketi, BX 300, Japonya) tartılarak ağırlık değişimi izlendi ve gıda örneğinin ağırlığındaki değişim dengeye ulaşıncaya kadar kaydedilerek denge nem içeriği belirlendi. Örneklerin sabit tartıma gelmesi için iki tartım arasındaki farkın 1mg/1g katı madde'den az olması gerekmektedir (Labuza vd., 1970). Yapılan son iki tartım arasındaki fark bu değerlere eriştiği anda tartıma son verilmiş ve örneğin artık denge nemine ulaştığı kabul edilmiştir. Kuru ağırlık temeli üzerinden gösterilen ağırlıktaki değişim ardışık iki ölçümde % 0.1'i aşmadığında dengeye ulaşıldığı anlaşıldı. Örneğin hassas terazide tartılıp tekrar kamaraya konulması için geçen süre 30 s olarak önerilmiştir (Koroş, 2007). Tartım yapılırken bu süre dikkate alınarak tartım esnasında meydana gelebilecek atmosferik nem sorpsiyonu önlenmeye çalışılmıştır. Kamaradaki numuneleri çıkarma, tartma ve değiştirme için gerekli toplam süre 15 saniyeden daha azdı. Bu tartma boyunca atmosferik nem sorpsiyon derecesini minimize etti. Ağırlık artışından hesaplanan denge nem içeriği % kuru madde olarak ifade edildi. Su aktivitesi, % bağıl nem/100 eşitliğinden hesaplandı. Nemlendirme kamarasındaki sıcaklık ve bağıl nem sırasıyla 25-45 °C ve % 10-90 aralığında tutuldu. Kamaranın bağıl nemi % 10 bağıl nemden daha yüksek bağıl nemlerde püskürtmeli nemlendirme sistemi ile kontrol altında tutuldu. Adsorpsiyon süreçleri %10-90 aralığında artan değerlerde bağıl nemler için 25, 35, 45 °C ±1 sıcaklık değerlerinde tekrarlandı.

3 kW'lık kuru hava ısıtıcıları ve ısı pompası içeren bir soğutma ünitesi sırasıyla kamarayı ısıtmak ya da soğutmak için kullanıldı. % bağıl nem ve sıcaklık sırasıyla bir bağıl nem probu ve sıcaklık sensörü aracılığıyla ölçüldü. Kamara içinde pülverize buharı sirküle etmek için radyal fan kullanıldı. Mikrobiyal bozulmayı önlemek için kamara içerisine 30 W'lık UV lamba (Philips, TUV

G30T8, Hollanda) yerleştirildi. Voltaj değişimlerinden kaynaklanan çok kısa süreli elektrik kesintilerinden etkilenmemek için 3000 VA'lık kesintisiz güç kaynağı (Inform, Guard 1600, Türkiye) kullanıldı.

Desorpsiyon alışmaları için; baklagiller sabit ağırlığa gelinceye kadar % 97 bağıl nemde tutuldu ve sonra kamaradaki nem silikajel vasıtasıyla adsorplanarak, kamaranın su aktivitesi çalışılan bağıl nem değerlerine düşürüldü. Desorpsiyon çalışmalarında ağırlık kayıplarını belirlemek için, iki ardışık tartımda ağırlık kayıpları arasındaki fark % 0.1'i gemeyinceye kadar numuneler tartıldı. Sorpsiyon prosesleri 25, 35, 45 °C $\pm$ 1 sıcaklık değerleri için tekrarlandı. Her deney için iki paralel örnek kullanıldı ve ortalama değerler alındı. Ortalama değerlerden sapmalar $\pm$ 0.003 g idi.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Baklagillerin üretici firmadan temin edilen karbonhidrat, protein, yağ gibi bileşim değerleri, örnekleri sabit tartıma getirerek bulunan nem ve kül içerikleri ve farktan hesaplanan selüloz içerikleri yaş temel üzerinden % olarak Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Baklagillerin bileşimleri

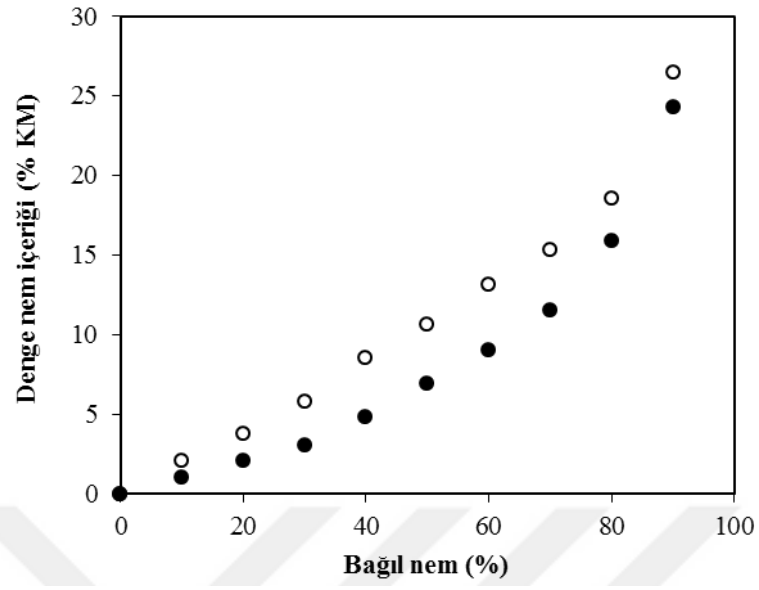
Baklagil	Karbonhidrat	Protein	Yağ	Selüloz	Kül	Nem
Fasulye	57.4	22.6	1.6	4.2	3.7	10.5
Nohut	57.9	19.2	5.5	5.6	2.9	8.9
Yeşil Mercimek	57.4	23.7	1.3	5.1	2.4	10.1
Börülce	56.5	22.8	1.0	5.9	2.8	11.0
Bakla	53.7	27.7	1.8	2.9	3.0	10.9

4.1. Baklagillerin Sorpsiyon İzotermlerinin Belirlenmesi

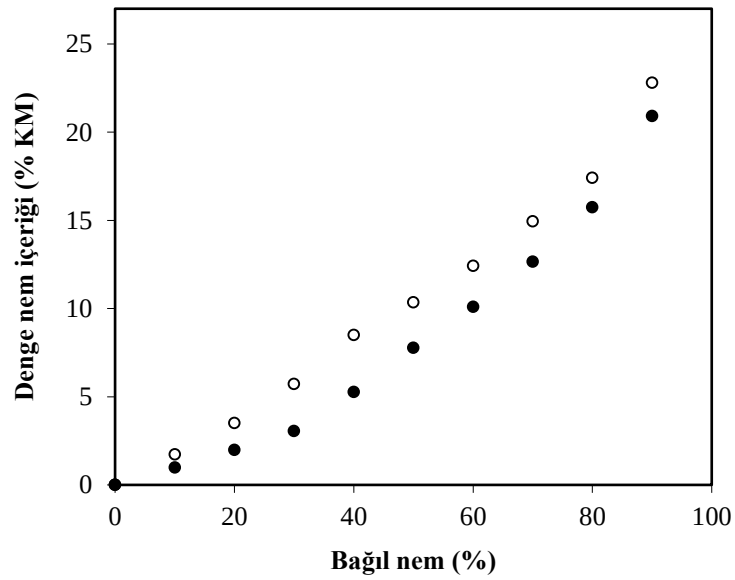
Deneyler sırasında hiçbir mikrobiyal bozulma gözlenmemiştir. Gıda maddesinin adsorpsiyonun ardından desorpsiyona uğraması ardıl adsorpsiyon sırasında numunenin su tutma kapasitesini azaltacağından (Mohsenin, 1986), her bir sıcaklık için sorpsiyon işlemine uğramamış ayrı bir gıda maddesi örneği kullanılmıştır.

Sıcaklık ve % bağıl neme bağlı olarak denge nemini sağlamak için geçen sürenin fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla için en düşük ve en yüksek bağıl nemlerde sırasıyla 2-17, 2-12, 2-14, 2-10 ve 2-9 gün aralığında olduğu gözlenmiştir. Daha düşük sıcaklık ve daha yüksek % bağıl nem değerlerinde örnekleri dengelemek daha uzun zaman almıştır. % bağıl nem değerlerine karşı farklı bağıl nemli ortamlarda dengeye erişen baklagillerin denge nem içeriği değerleri grafiğe geçirilerek sorpsiyon izotermi çizilmiştir.

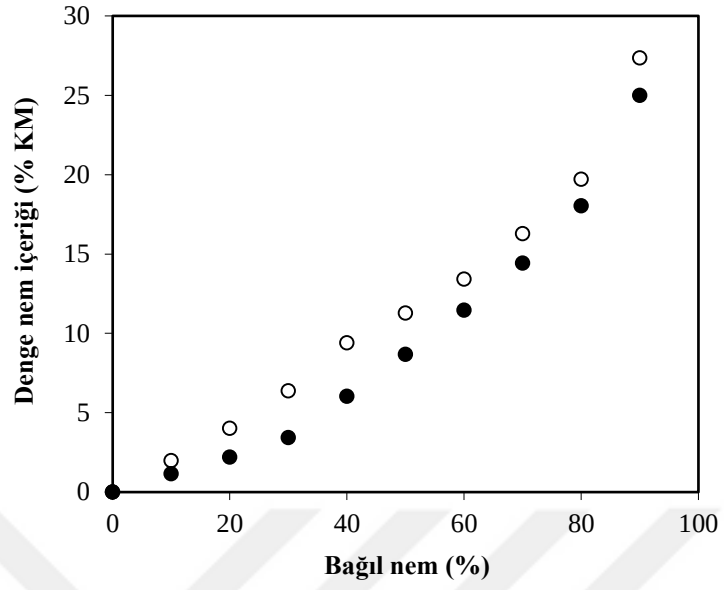
Fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve baklanın farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi sırasıyla Şekil 4.1-Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



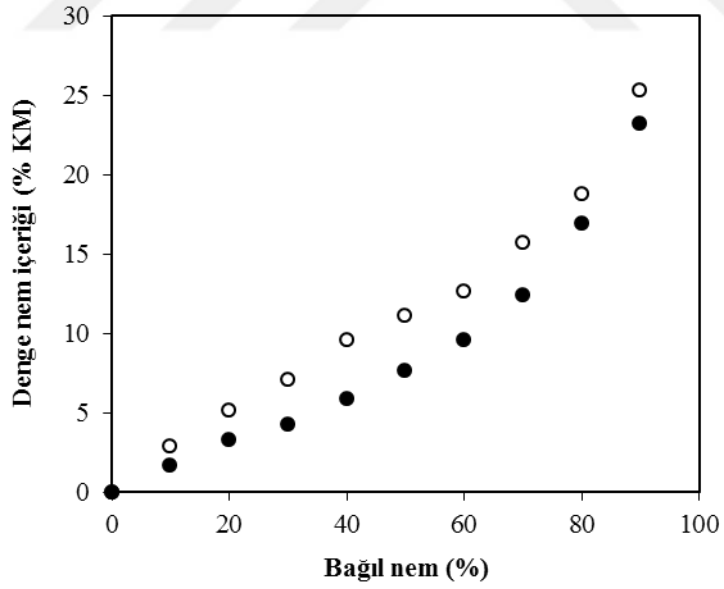
Şekil 4.1. Fasulyenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



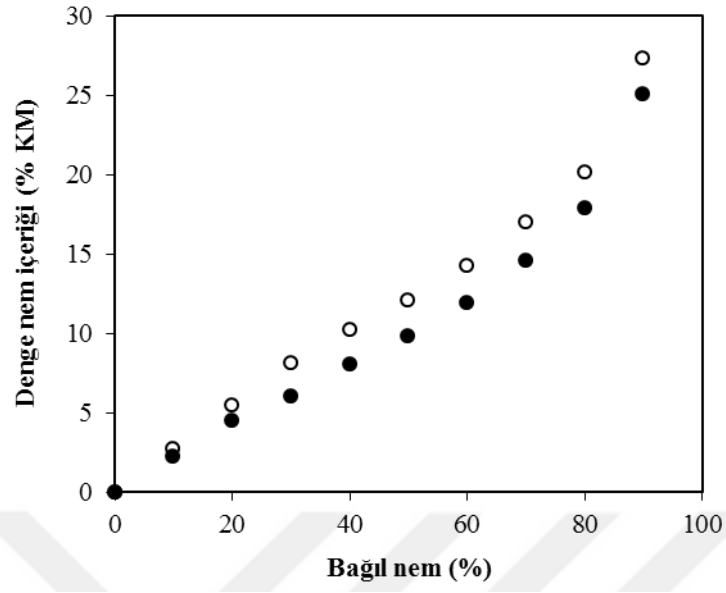
Şekil 4.2. Nohutun 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



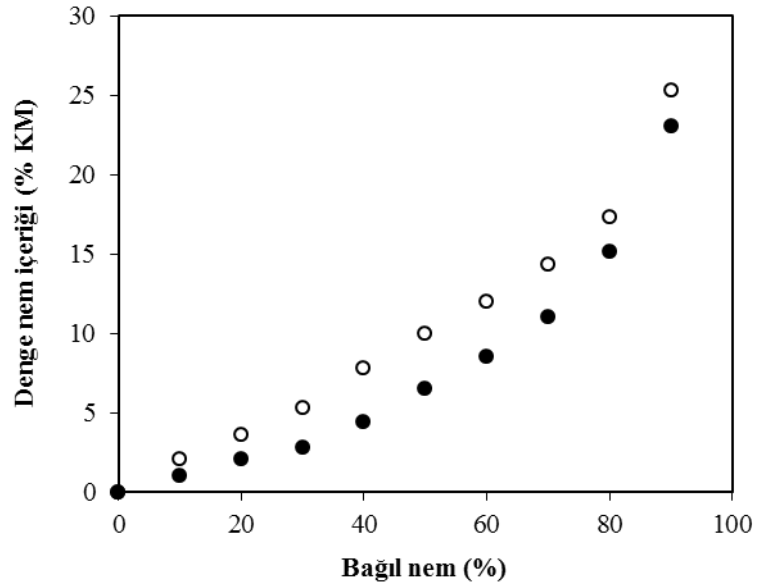
Şekil 4.3. Yeşil mercimeğin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



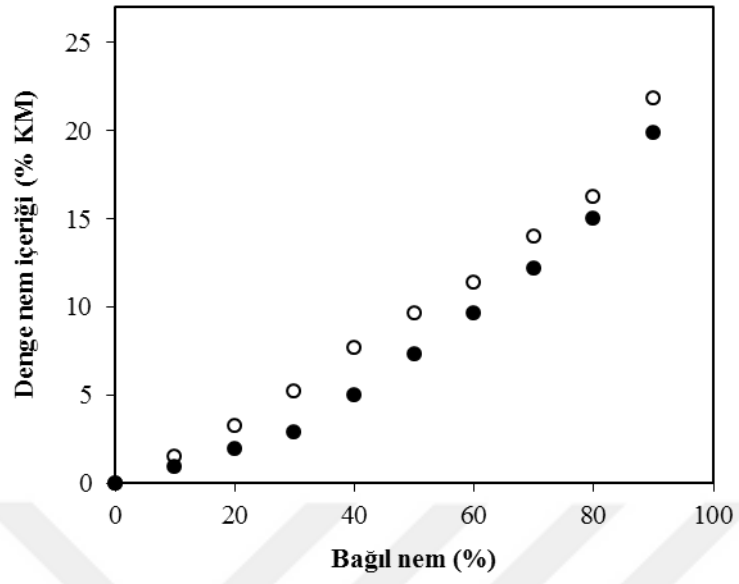
Şekil 4.4. Börülcenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



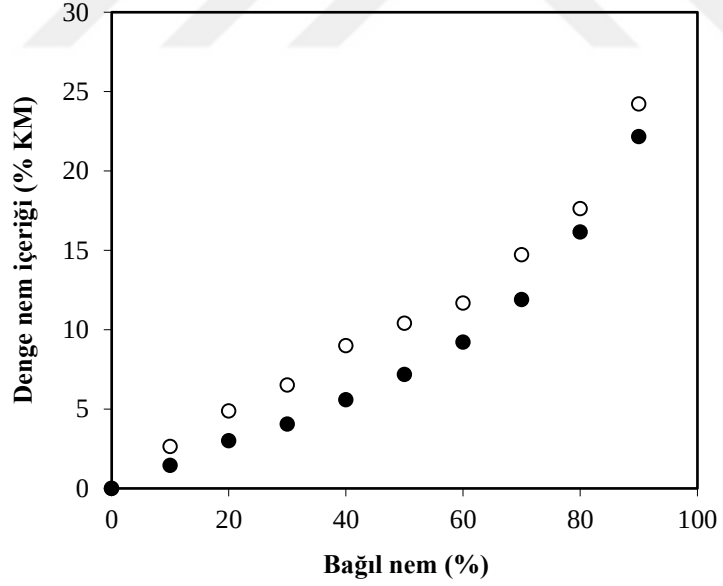
Şekil 4.5. Baklanın 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



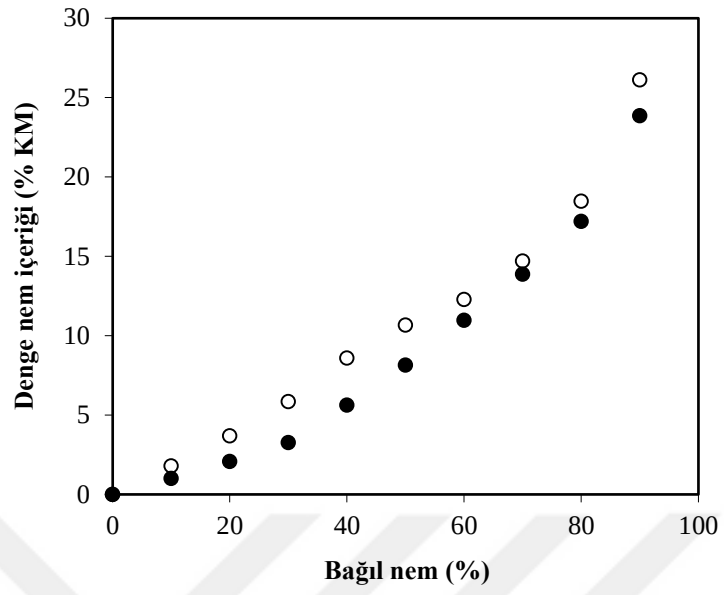
Şekil 4.6. Fasülyenin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



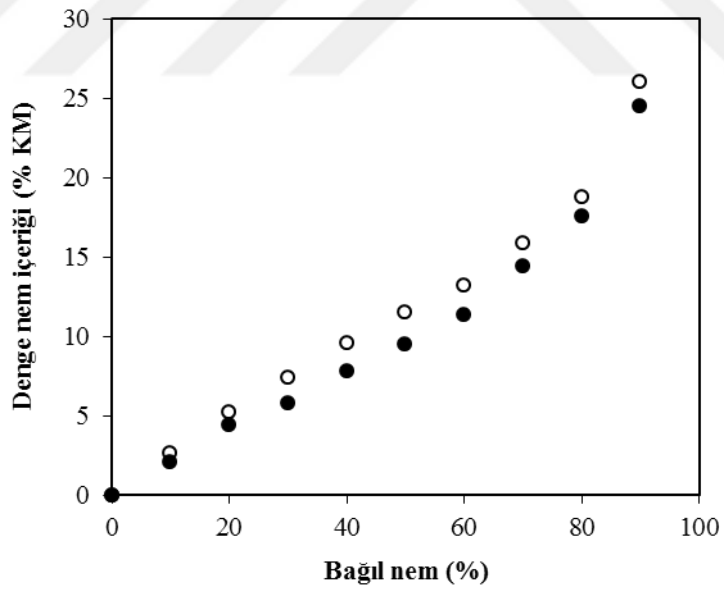
Şekil 4.7. Nohutun 35 °C’deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); ○, deneysel (desorpsiyon))



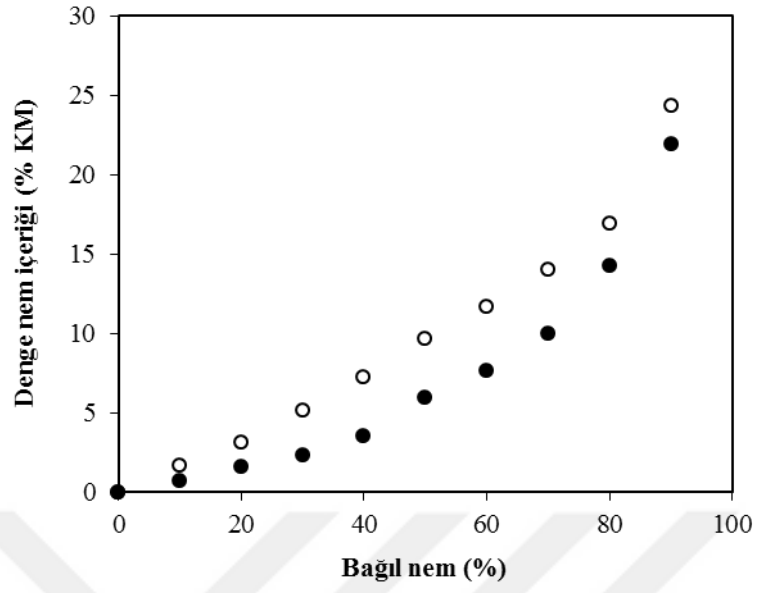
Şekil 4.8. Yeşil mercimeğin 35 °C’deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); ○, deneysel (desorpsiyon))



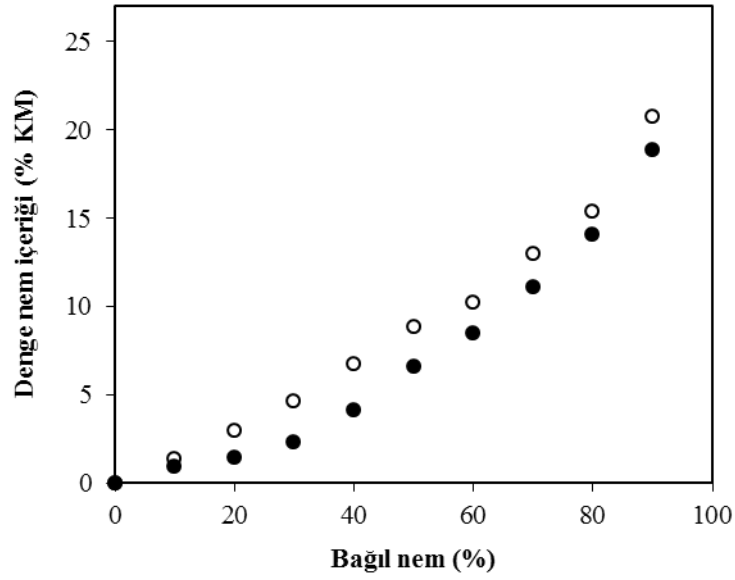
Şekil 4.9. Börülcenin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (•, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



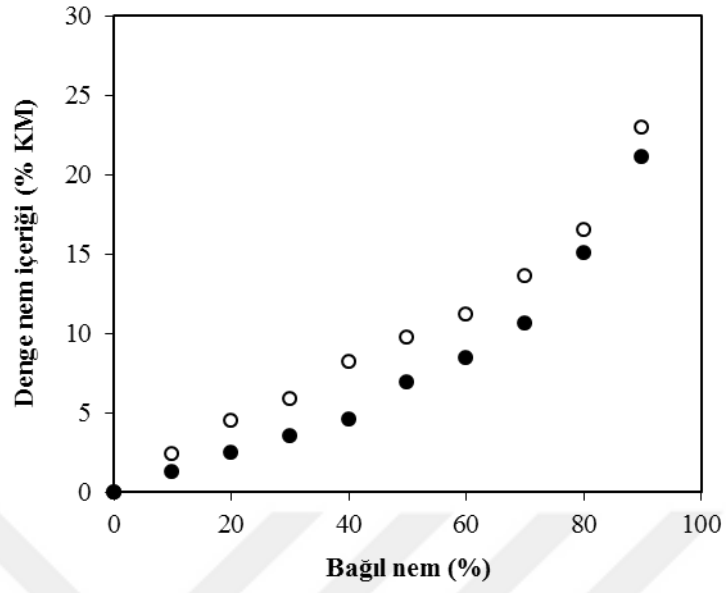
Şekil 4.10. Baklanının 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (•, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



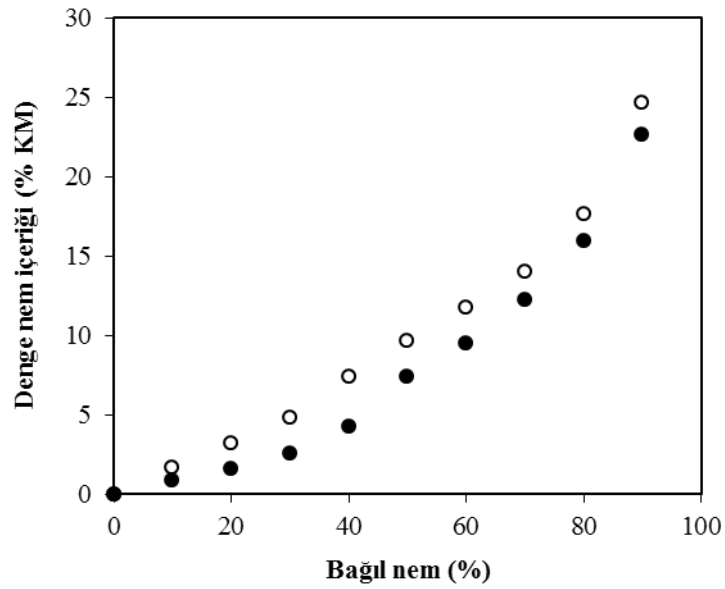
Şekil 4.11. Fasylenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (•, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



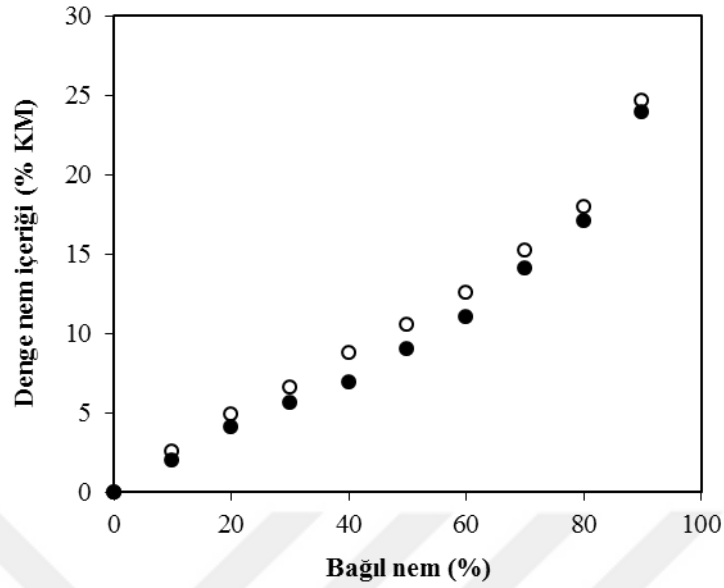
Şekil 4.12. Nohutun 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (•, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



Şekil 4.13. Yeşil mercimeğin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



Şekil 4.14. Börülcenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon))



Şekil 4.15. Baklanın 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi (●, deneysel (adsorpsiyon); ○, deneysel (desorpsiyon))

Adsorpsiyon ve desorpsiyon sırasında bazı termodinamik olarak tersinmez prosesler meydana gelir. Aynı sıcaklıkta su aktivitesinin artmasıyla denge nem içeriği artmıştır. Düşük su aktivitelerinde su sadece yüzey –OH uçlarına adsorplanabilir (Labuza, 1984). Nem içeriğinin artması durumunda, gıda maddesinin moleküler yapısındaki polar uçlar adsorbe edilen su ile tamamen işgal edilir. Yüksek su aktivitesi değerlerinde sorpsiyon uçlarının sayısındaki artıştan dolayı denge nem içeriği artar. Bazı araştırmacılar tarafından benzer davranışlar rapor edilmiştir (Maskan ve Göğüş, 1997; Sanni vd., 1997; Pezzutti ve Crapiste, 1997; Cadden, 1988; McLaughlin ve Magee, 1998; Coupland vd., 2000; Lasekan ve Lasekan, 2000; Hossain vd., 2002; Arslan ve Toğrul, 2005a; Arslan ve Toğrul, 2005b; Arslan ve Toğrul, 2006; Toğrul ve Arslan, 2006; Toğrul ve Arslan, 2007). Denge nem içeriği artarken gıdadaki nem, daha yüksek buhar basıncı göstermeye eğilimlidir. Gıdadaki buhar basıncındaki bu değişimler su aktivitesindeki değişim ile denge nem içeriğinin değişimine yol açan üstel şekilli bir eğri şeklinde ortaya çıkmıştır. Bu durum, izotermin Brunauer sınıflandırmasına göre J şekilli Tip III izoterm olduğunu göstermektedir (Brunauer vd., 1938). Eğer gıda çözünabilir bileşenler bakımından zengin ise, J şekilli Tip III izoterm ortaya çıkmaktadır. BET teorisine göre, Tip III izoterm birinci tabakanın bağ enerjisi su molekülleri arasındaki bağ enerjisinden daha düşük olduğu zaman ortaya çıkmaktadır (Labuza, 1984). GAB modelindeki C sabitinin değeri sorpsiyon izotermi karakterize etmeye yarar. Medeiros vd. (2006), eğer $C \leq 10$ ise izotermin Tip III, $C \geq 10$ ise izotermin Tip II olduğunu ifade etmişlerdir. Tüm baklagiller için C sabitinin değeri tüm sıcaklıklarda 10'dan küçük olduğundan, baklagillerin

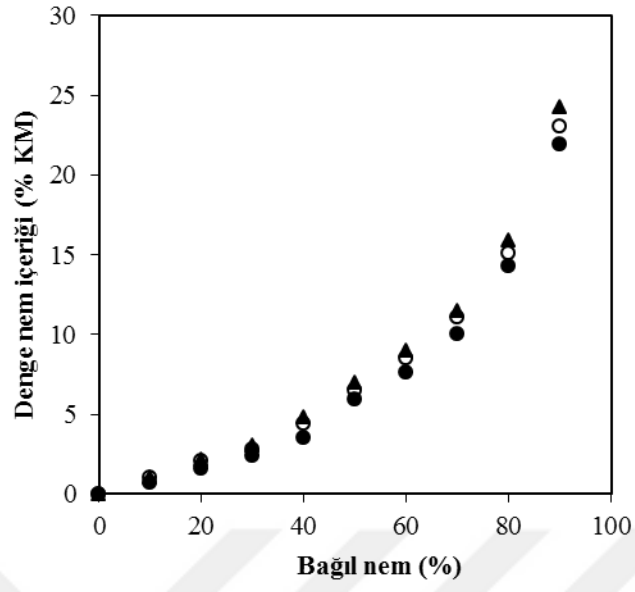
sorpsiyon izotermlerinin tipik J şekilli Tip III sorpsiyon izotermi olduğu söylenebilir. GAB eşitliğindeki C sabitinin değeri ne kadar yüksek ise, gıdadaki bağlanma bölgeleri ve monotabakadaki su molekülleri arasındaki bağlar o kadar kuvvetlidir.

I. bölgede ($a_w=0.2-0.3$) monotabaka su, II. bölgede ($a_w=0.3-0.7$) ise multitabaka su bulunmaktadır. III. bölgede ($a_w>0.7$) boşluk ve kapilerlerde tutulan serbest su bulunmaktadır (Hossain vd., 2002). Çoğu gıda maddeleri için tip III izoterme uyan üstel şekilli sorpsiyon izotermi rapor edilmiştir (Al-Muhtaseb vd., 2002; Bejar vd., 2012; Hassini vd., 2015, Yogendrarajah vd., 2015).

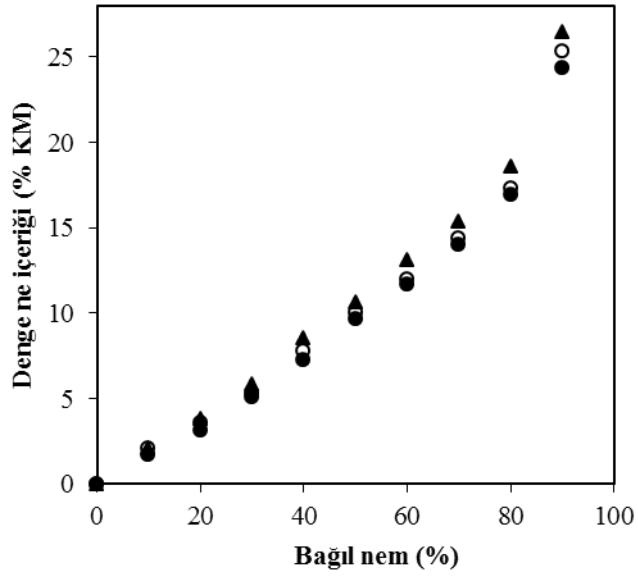
Şekil 4.1-4.15'den desorpsiyon için denge nem içeriğinin adsorpsiyon için denge nem içeriğinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Dehidratasyon sırasında baklagillerin maruz kaldığı yapısal ve fizikokimyasal değişiklikler nedeniyle desorpsiyon sırasında baklagiller daha higroskopik olduğundan adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi arasında tüm su aktivitesi aralığında histeresis etki gözlenmiştir. Literatürde bazı gıdalar için benzer sonuçlara rastlanmıştır (Kachru ve Matthes, 1976; Palou vd., 1997; McLaughlin ve Magee, 1998; Sun, 1999; Johnson ve Brennan, 2000; Menkov, 2000; McMin ve Magee, 2003, Al-Muhtaseb vd., 2004a).

Histeresis etki, diğer su aktivitelerindeki histeresis etkiye kıyasla genellikle 0.3-0.7 su aktivitesi aralığında daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Histeresis etkinin durumu gıda maddesindeki bileşenlerin yapısı, sıcaklık, depolama zamanı ve adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsünün sayısı ile ilgilidir (Benado ve Rizvi, 1985). Histeresis etkinin, ıslak koşullarda üzerinde suyun sorplandığı polar uçların tamamen doyurulmamasından ileri geldiği ve bu durumun adsorpsiyon sırasında su tutma kapasitesinin azalmasına yol açtığı ifade edilmiştir (Mohsenin, 1986).

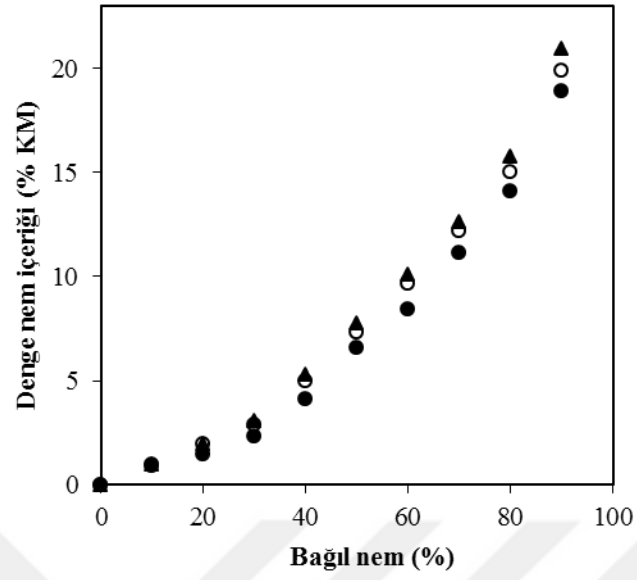
Fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve baklanın farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermine sıcaklığın etkisi sırasıyla Şekil 4.16-4.25'de gösterilmiştir.



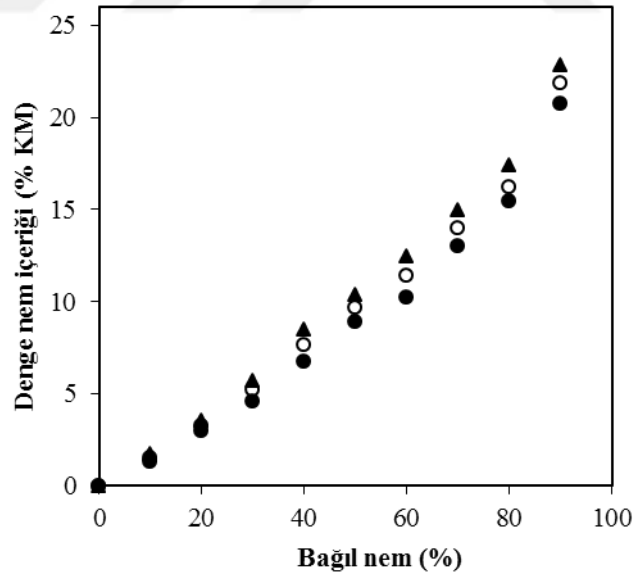
Şekil 4.16. Fasulyenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



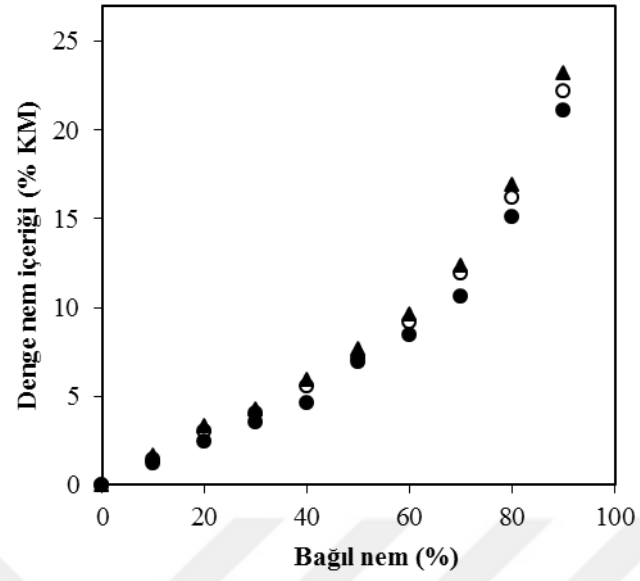
Şekil 4.17. Fasulyenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



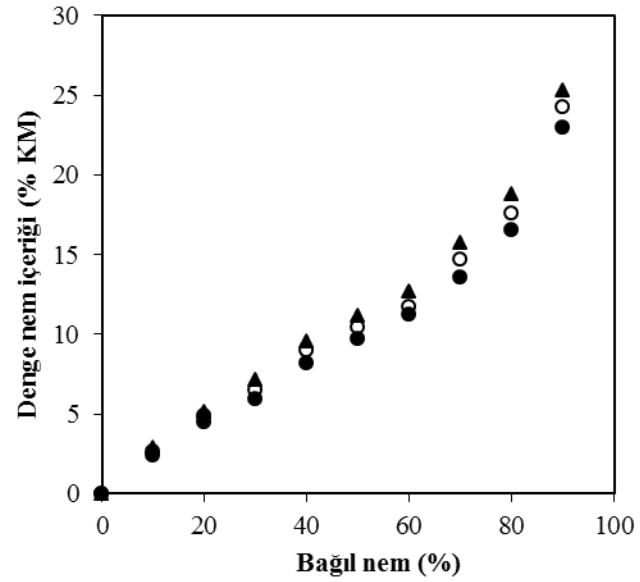
Şekil 4.18. Nohutun farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



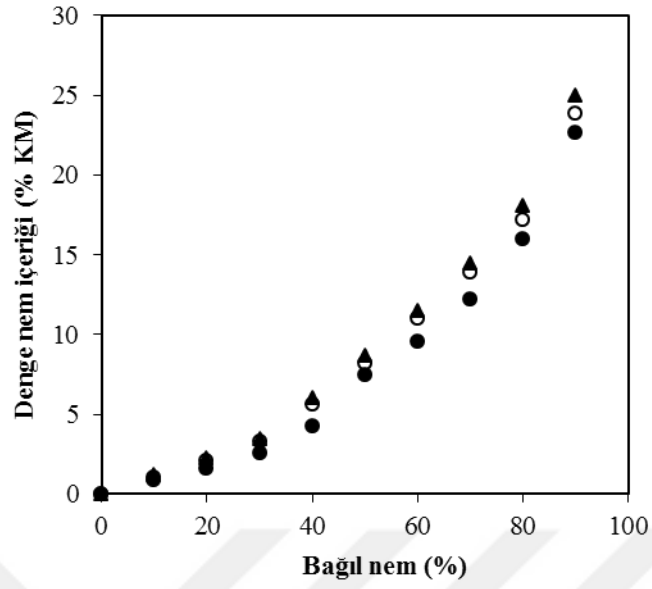
Şekil 4.19. Nohutun farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



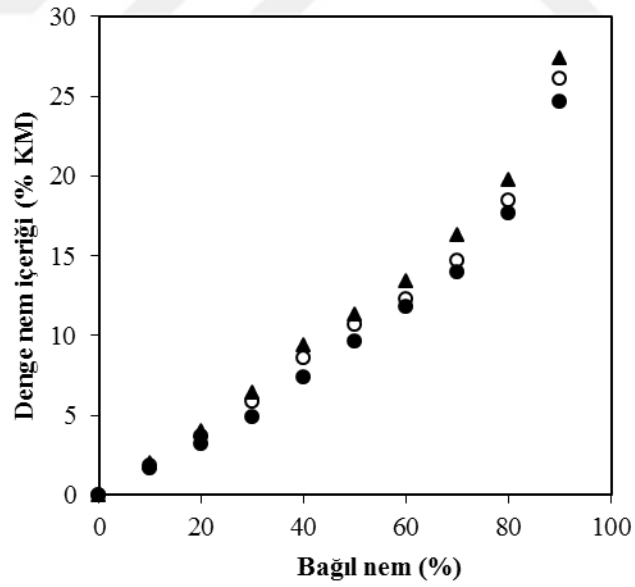
Şekil 4.20. Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



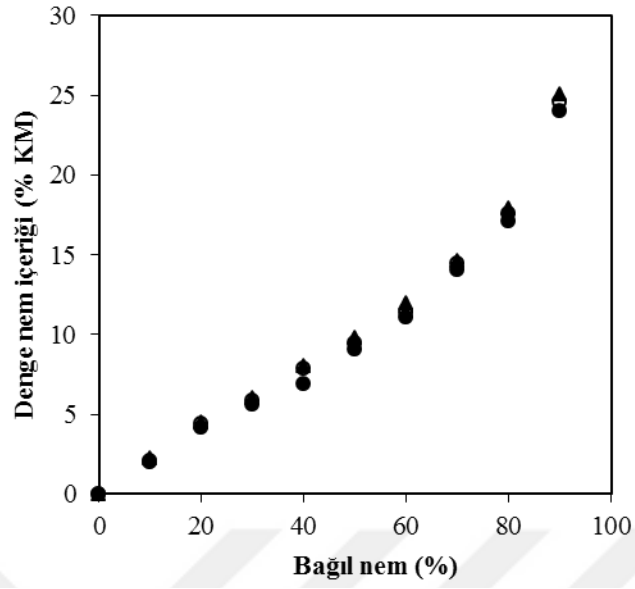
Şekil 4.21. Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



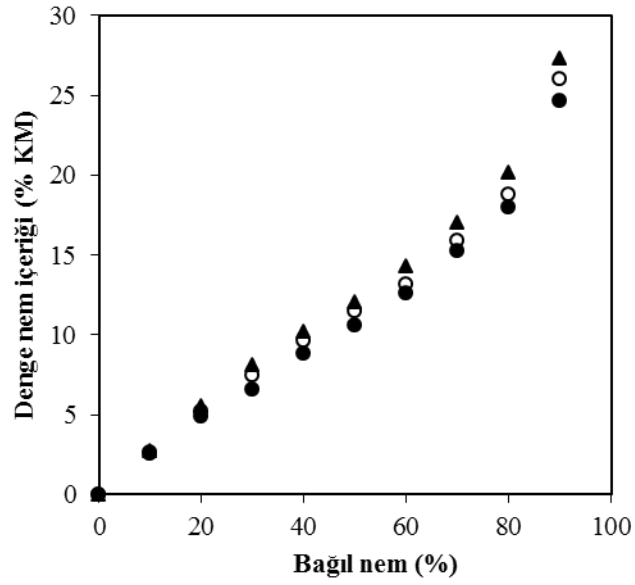
Şekil 4.22. Börülcenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



Şekil 4.23. Börülcenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



Şekil 4.24. Baklanın farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)



Şekil 4.25. Baklanın farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C)

Gıdaların depolanması sırasında, gıdalar farklı sıcaklık aralıklarına maruz kaldıkları için, sorpsiyon izotermlerine sıcaklığın etkisinin bilinmesinin büyük önemi vardır. Sabit su aktivitesi değerlerinde, sıcaklıktaki artıştan dolayı gıda maddesindeki fiziksel değişimlerin bir sonucu olarak su moleküllerinin mobilitesi değiştiğinden ve suyun bağlanacağı aktif uçların toplam sayısında bir azalma meydana geldiğinden sorpsiyon kapasitesi azalmıştır. Bu durum, moleküllerin uyarılma durumlarını göz önünde bulundurarak açıklanabilir. Artan sıcaklıklarda, moleküller artan bir uyarılma halindedir. Bu yüzden moleküllerin birbirlerine olan uzaklıkları artar ve moleküllerarası çekim kuvvetleri azalır ve belirli bir su aktivitesinde artan sıcaklık ile su sorpsiyon derecesinde bir azalma meydana gelir (McLaughlin ve Magee, 1998; Al-Muhtaseb vd., 2004a). Sıcaklıktaki bir artış, suyun bağlandıkları uçlardan uzaklaşmasına neden olur ve böylece denge nem içeriği azalır (Palipane ve Driscoll, 1992). Ancak sıcaklıktaki artma ile sorbe edilen suyun miktarlarında çok fazla olmayan bir azalış meydana gelmiştir ve bu etki çoğu gıda maddesinde olduğu gibi kayda değer değildir (Raji ve Ojediran, 2011; Kumar vd., 2012). Baklagillerin denge nem içeriğine sıcaklığın etkisiyle ilgili sonuçlar, bazı gıda maddeleri ile ilgili bulunan sonuçlar ile uyum içerisindedir (Temple ve van Boxtel, 1999; Basunia ve Abe, 2001; Bingol vd., 2012; McMinn ve Magee, 2003; Mousa vd., 2014). Varyans analizi (ANOVA) ile yapılan istatistiksel değerlendirmede, nem içeriğine sıcaklığın etkisinin istatistiksel olarak anlamsız ($p>0.05$) olduğu bulunmuştur.

4.2. Matematiksel Modelleme

Deneysel sorpsiyon denge nem içeriği verilerine farklı model eşitliklerin uyumunu belirlemek ve sorpsiyon izotermelerini tanımlamak için kullanılan matematiksel modeller Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Baklagillerin sorpsiyon izotermelerini tanımlamak için kullanılan modeller

Model	Matematiksel ifade
Sıcaklık terimi içermeyen eşitlikler	
GAB (Van den Berg ve Bruin, 1981)	$X = X_m C K a_w / [(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)]$
BET (Brunauer vd., 1938)	$X = X_m C a_w / [(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)]$
Henderson (Henderson, 1952)	$X = [-\ln(1 - a_w) / A]^{1/B}$
Oswin (Oswin, 1946)	$X = A [a_w / (1 - a_w)]^B$
Peleg (Peleg, 1993)	$X = m_1 a_w^{n_1} + m_2 a_w^{n_2}$
Smith (Smith, 1947)	$X = c_1 - c_2 \ln(1 - a_w)$
Caurie (Caurie, 1970)	$X = \exp(a + b a_w)$
Halsey (Halsey, 1948)	$X = [-a / (\ln a_w)]^{1/b}$
Ferro-Fontan (Ferro-Fontan vd., 1982)	$X = [A / \ln(B / a_w)]^{1/C}$
Khun (Khun, 1967)	$X = a + b(1 / \ln a_w)$
Chung-Pfost (Chung ve Phost, 1967)	$X = (\ln(\ln a_w / A)) / (-B)$
White-Eiring (Castillo vd., 2003)	$X = 1 / (A + B a_w)$

X , denge nem içeriği; X_m , tek tabaka nem içeriği; a_w , su aktivitesi; a , b , A , B , c_1 , c_2 , C , K , m_1 , m_2 , n_1 ve n_2 eşitliklere özgü katsayılar ve üslerdir.

DeneySEL sorpsiyon verilerine iyi bilinen 12 izoterm eşitliğin uygunluğu araştırılmış ve deneySEL verilere uydurulan farklı model eşitliklerin non-lineer regresyon analizi kullanılarak bulunan sabitleri, modelleri karşılaştırmak için kullanılan ve her bir modelin performansını gösteren r^2 , E , e_{ort} ve RMSE değerleri Tablo 4.3-4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Fasulyenin sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
GAB	X _m	5.883	5.839	5.990	8.478	7.346	4.544
	C	2.162	1.955	1.393	4.082	4.447	-1x10 ⁹
	K	0.871	0.865	0.859	0.784	0.808	0.909
	r ²	0.9989	0.9990	0.9986	0.9949	0.9945	0.9505
	E	3.921	3.359	5.472	6.331	8.683	37.64
	e _{ave}	-0.0120	-0.0290	-0.0377	-0.0096	-0.0125	-0.2978
	RMSE	0.2517	0.2326	0.2623	0.6561	0.4798	1.685
BET*	X _m	5.061	4.293	3.825	8.209	7.026	7.285
	C	1.912	2.279	1.847	2.411	2.840	2.206
	r ²	0.9959	0.9935	0.9988	0.9983	0.9975	0.9990
	E	4.743	4.997	2.955	3.606	3.895	2.896
	e _{ave}	0.0114	0.0081	-0.0013	0.0188	0.0175	0.0079
	RMSE	0.1181	0.1363	0.0481	0.1376	0.1494	0.0878
Henderson	A	0.112	0.121	0.160	0.036	0.041	0.049
	B	0.959	0.948	0.866	1.270	1.261	1.204
	r ²	0.9988	0.9984	0.9980	0.9968	0.9972	0.9966
	E	4.257	5.240	5.229	5.222	4.158	5.403
	e _{ave}	0.042	0.0390	0.0160	-0.182	-0.0400	-0.1392
	RMSE	0.3753	0.3177	0.2344	0.7822	0.5569	0.5295
Oswin	A	6.606	6.223	5.540	9.836	9.132	8.743
	B	0.602	0.605	0.638	0.461	0.472	0.477
	r ²	0.9935	0.9928	0.9908	0.9865	0.9891	0.9853
	E	17.72	18.04	25.17	16.52	14.64	18.63
	e _{ave}	-0.1340	-0.1340	-0.1546	-0.1340	-0.1130	-0.1362
	RMSE	0.7324	0.7371	0.6682	1.031	0.8768	0.9167
Peleg	m ₁	24.84	22.59	21.38	39.96	21.06	21.23
	n ₁	9.512	9.152	9.215	17.63	1.093	1.166
	m ₂	17.48	16.71	16.24	22.67	42.13	46.10
	n ₂	1.369	1.394	1.547	1.092	17.68	20.10
	r ²	0.9994	0.9992	0.9990	0.9996	0.9995	0.9997
	E	6.271	7.556	8.334	2.825	3.007	2.782
	e _{ave}	0.0270	0.0320	0.0231	0.0130	0.0190	0.0104
	RMSE	0.1996	0.2294	0.2212	0.1683	0.1811	0.1271
Smith	c ₁	-0.351	-0.377	-0.715	1.675	1.452	1.246
	c ₂	10.37	9.889	9.477	11.06	10.51	10.26
	r ²	0.9970	0.9971	0.9946	0.9840	0.9869	0.9870
	E	7.204	8.475	13.11	10.16	8.157	10.81
	e _{ave}	-0.0410	-0.0420	-0.0803	0.1820	0.1610	0.1366
	RMSE	0.4155	0.3882	0.4597	1.029	0.8863	0.7584
Caurie	a	0.091	0.024	-0.220	0.944	0.841	0.779
	b	3.418	3.438	3.656	2.572	2.658	2.663
	r ²	0.9919	0.9930	0.9940	0.9739	0.9751	0.9759
	E	9.885	9.327	12.02	13.48	11.95	15.27
	e _{ave}	0.0440	0.0430	0.0176	0.1040	0.1100	0.0693
	RMSE	0.5951	0.5198	0.4702	1.050	1.004	0.9233

Tablo 4.3. (Devamı)

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Halsey	a	9.121	8.379	6.380	36.75	29.67	26.56
	b	1.383	1.378	1.313	1.765	1.726	1.709
	r ²	0.9755	0.9743	0.9721	0.9552	0.9619	0.9540
	E	34.34	34.71	45.92	27.49	25.19	30.75
	e _{ave}	-0.2090	-0.2000	-0.2155	-0.1760	-0.1650	-0.1901
	RMSE	1.275	1.240	1.093	1.633	1.445	1.462
Ferro-Fontan	A	3.409	3.193	2.697	5.872	6.054	4.968
	B	1.351	1.386	1.449	1.686	1.476	1.758
	C	0.669	0.639	0.563	0.689	0.785	0.634
	r ²	0.9969	0.9974	0.9972	0.9887	0.9883	0.9888
	E	9.649	8.019	10.50	9.760	9.991	10.27
	e _{ave}	-0.0380	-0.0420	-0.0394	-0.0240	-0.0520	-0.0293
Khun	RMSE	0.4103	0.3687	0.3484	0.7799	0.7682	0.7203
	a	2.250	2.098	1.551	5.156	4.683	4.395
	b	-2.521	-2.405	-2.330	-2.502	-2.403	-2.339
	r ²	0.9382	0.9370	0.9414	0.8718	0.8866	0.9749
	E	46.34	46.34	56.08	42.80	40.07	46.63
	e _{ave}	0.0000	0.0000	0.0006	-0.0010	-0.0020	0.0005
Chung-Pfost	RMSE	1.763	1.699	1.585	2.615	2.341	2.410
	A	-2.328	-2.298	-2.168	-2.898	-2.887	-2.764
	B	0.167	0.174	0.185	0.136	0.148	0.147
	r ²	0.9724	0.9667	0.9614	0.9932	0.9925	0.9916
	E	20.62	22.17	29.32	6.593	7.393	8.301
	e _{ave}	0.7410	0.6860	0.7138	0.1640	0.3880	0.1625
White-Eiring	RMSE	3.037	2.839	2.050	0.9181	1.559	0.7803
	A	0.312	0.329	0.370	0.207	0.224	0.234
	B	-0.303	-0.319	-0.362	-0.189	-0.207	-0.215
	r ²	0.9423	0.9413	0.9396	0.9118	0.9189	0.9128
	E	47.79	48.33	65.51	31.63	29.64	35.99
	e _{ave}	-0.2670	-0.2070	-0.2425	0.095	-0.0550	0.0993
	RMSE	1.6940	1.5667	1.4560	1.8388	1.6490	1.7310

* BET eşitliği için a_w 0-0.4 aralığındadır.

Tablo 4.4. Nohutun sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
GAB	X _m	547.9	837.8	1066	11.61	9.792	4.216
	C	0.0409	0.0259	0.0147	2.860	2.992	-1x10 ⁹
	K	0.414	0.409	0.461	0.649	0.689	0.894
	r ²	0.9976	0.9978	0.9974	0.9961	0.9956	0.9398
	E	5.134	4.722	8.709	6.246	6.747	43.70
	e _{ave}	-0.0345	-0.0315	-0.0262	-0.0277	-0.0338	-0.2789
	RMSE	0.3394	0.3103	0.3210	0.4569	0.4589	1.623
BET*	X _m	8.668	7.647	6.940	9.811	8.569	7.290
	C	0.840	0.941	0.804	1.617	1.746	1.875
	r ²	0.9940	0.9927	0.9852	0.9999	1.000	0.9996
	E	7.735	8.137	11.20	1.139	0.3875	2.038
	e _{ave}	0.0294	0.0269	0.0422	0.0066	-0.0016	-0.0420
	RMSE	0.1572	0.1642	0.1905	0.0338	0.0108	0.0529
Henderson	A	0.105	0.109	0.141	0.035	0.041	0.053
	B	0.970	0.971	0.904	1.312	1.283	1.226
	r ²	0.9938	0.9940	0.9927	0.9929	0.9940	0.9957
	E	7.9582	7.609	10.95	9.603	9.140	7.525
	e _{ave}	-0.3187	-0.3621	-0.2858	-0.2313	-0.2665	-0.1249
	RMSE	1.186	1.192	1.120	0.7724	0.7000	0.5587
Oswin	A	7.192	6.863	6.096	9.462	8.747	7.980
	B	0.513	0.512	0.542	0.424	0.436	0.455
	r ²	0.9673	0.9664	0.9672	0.9710	0.9748	0.9780
	E	35.96	35.18	36.36	24.85	24.29	23.90
	e _{ave}	-0.2127	-0.2044	-0.2009	-0.1685	-0.1511	-0.1439
	RMSE	1.257	1.213	1.141	1.244	1.102	0.9803
Peleg	m ₁	22.07	21.27	20.30	86.28	20.81	18.96
	n ₁	1.545	1.562	1.693	31.70	1.129	15.38
	m ₂	33.45	4103	14.89	22.18	146.6	19.22
	n ₂	26.01	73.18	19.51	1.107	35.88	1.160
	r ²	0.9992	0.9992	0.9985	0.9994	0.9995	0.9992
	E	6.885	7.381	9.934	1.899	1.686	1.642
	e _{ave}	0.0255	0.0326	0.0399	-0.0061	-0.0036	0.0034
	RMSE	0.2001	0.1929	0.2418	0.1863	0.1609	0.1892
Smith	c ₁	0.386	0.377	0.018	1.990	1.694	1.320
	c ₂	9.416	8.965	8.560	9.776	9.324	8.930
	r ²	0.9881	0.9876	0.9915	0.9635	0.9706	0.9796
	E	13.97	13.46	11.24	17.90	15.79	14.69
	e _{ave}	0.0428	0.0416	0.0015	0.2216	0.4128	0.1471
	RMSE	0.7466	0.7258	0.5823	1.227	1.110	0.8353
Caurie	a	0.458	0.413	0.198	1.001	0.889	0.742
	b	2.897	2.892	3.072	2.382	2.448	2.554
	r ²	0.9813	0.9814	0.9852	0.9633	0.9670	0.9738
	E	24.34	23.51	22.09	19.79	19.53	18.36
	e _{ave}	-0.0573	-0.0501	-0.0638	0.0726	0.0630	0.0504
	RMSE	0.7902	0.7494	0.6504	1.064	0.9638	0.8097

Tablo 4.4. (Devamı)

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Halsey	a	15.57	14.54	10.43	47.73	36.64	26.67
	b	1.604	1.608	1.526	1.915	1.861	1.788
	r ²	0.9263	0.9250	0.9296	0.9220	0.9302	0.9377
	E	53.00	51.88	53.66	36.63	36.49	36.83
	e _{ave}	-0.2533	-0.2360	-0.2384	-0.1848	-0.1814	-0.1838
	RMSE	1.739	1.662	1.547	1.802	1.627	1.478
Ferro-Fontan	A	4.476	4.506	4.030	5.469	4.957	4.501
	B	9.110	10.18	7.725	7.303	4.166	2.966
	C	0.218	0.210	0.215	0.311	0.385	0.442
	r ²	0.9971	0.9975	0.9974	0.9919	0.9907	0.9926
	E	4.195	4.077	7.220	7.064	8.329	8.455
	e _{ave}	-0.0210	0.0212	0.0224	0.0215	-0.0374	-0.0165
	RMSE	0.3441	0.3073	0.2990	0.5835	0.5946	0.5080
Khun	a	3.188	3.052	2.452	5.349	4.811	4.204
	b	-2.149	-2.043	-1.983	-2.125	-2.052	-1.991
	r ²	0.8441	0.8419	0.8589	0.8060	0.8235	0.8402
	E	68.86	67.51	67.09	53.62	53.66	54.09
	e _{ave}	-0.0004	0.0012	0.0000	0.0000	-0.0014	0.0007
	RMSE	2.516	2.413	2.190	2.845	2.590	2.366
Chung-Pfost	A	-2.319	-2.315	-2.204	-2.950	-2.898	-2.787
	B	0.154	0.162	0.173	0.143	0.153	0.163
	r ²	0.9778	0.9772	0.9688	0.9934	0.9936	0.9927
	E	20.44	20.57	27.24	5.069	4.519	5.573
	e _{ave}	0.0717	0.1021	0.1524	-0.1767	-0.0692	0.0317
	RMSE	0.6982	0.6887	0.8580	0.4374	0.3517	0.3690
White-Eiring	A	0.281	0.294	0.332	0.210	0.229	0.253
	B	-0.262	-0.274	-0.313	-0.187	-0.206	-0.230
	r ²	0.8933	0.8924	0.8977	0.8804	0.8884	0.8975
	E	62.17	60.87	64.70	39.61	40.14	41.57
	e _{ave}	-0.1764	-0.1810	-0.1907	0.0490	0.0161	0.0082
	RMSE	1.933	1.850	1.748	1.964	1.804	1.659

* BET eşitliği için a_w 0-0.4 aralığındadır.

Tablo 4.5. Yeşil mercimeğin sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
GAB	X_m	6.255	6.205	5.749	8.088	7.267	6.723
	C	3.356	3.002	2.586	6.944	7.330	7.076
	K	0.839	0.832	0.842	0.773	0.791	0.799
	r^2	0.9995	0.9997	0.9986	0.9972	0.9964	0.9966
	E	2.122	1.579	2.893	3.960	4.596	4.425
	e_{ave}	0.0105	0.0086	0.0101	-0.0180	-0.0140	-0.0145
	RMSE	0.1655	0.1234	0.2472	0.4074	0.4397	0.4035
BET*	X_m	4.672	4.659	3.716	7.578	7.090	6.427
	C	4.545	3.821	4.306	4.631	4.587	4.692
	r^2	0.9971	0.9979	0.9978	0.9998	0.9987	0.9979
	E	3.775	3.595	3.288	0.7618	1.835	2.495
	e_{ave}	-0.0037	-0.0051	0.0134	0.0003	0.0005	-0.0060
	RMSE	0.1234	0.1002	0.0770	0.0572	0.1252	0.1466
Henderson	A	0.065	0.073	0.093	0.018	0.021	0.025
	B	1.151	1.128	1.064	1.520	1.503	1.473
	r^2	0.9981	0.9988	0.9979	0.9975	0.9966	0.9976
	E	4.393	3.180	4.589	3.678	3.914	3.965
	e_{ave}	0.1334	0.1413	0.1005	-0.0128	0.0985	0.0808
	RMSE	0.4604	0.3783	0.3764	0.4705	0.5910	0.5530
Oswin	A	7.622	7.230	6.510	10.536	9.826	9.135
	B	0.522	0.526	0.550	0.410	0.419	0.428
	r^2	0.9923	0.9914	0.9909	0.9911	0.9924	0.9932
	E	10.66	12.53	14.79	10.34	9.694	9.803
	e_{ave}	-0.1029	-0.1114	-0.1076	-0.0891	-0.0753	-0.0745
	RMSE	0.6365	0.6464	0.6368	0.7230	0.6380	0.5705
Peleg	m_1	19.93	18.58	12.92	19.70	18.34	11.68
	n_1	5.111	5.157	1.055	0.831	0.830	1.227
	m_2	12.72	12.54	18.09	18.71	19.65	11.68
	n_2	0.875	0.920	6.028	9.005	9.268	1.227
	r^2	0.9998	0.9999	0.9987	0.9992	0.9987	0.9653
	E	1.869	1.636	3.811	1.580	2.176	14.59
	e_{ave}	-0.0016	-0.0021	0.0044	-0.0045	-0.0047	0.1840
Smith	RMSE	0.1157	0.0768	0.2426	0.2215	0.2606	1.289
	c_1	0.639	0.535	0.218	2.663	2.383	2.108
	c_2	9.908	9.507	9.076	10.30	9.222	9.336
	r^2	0.9981	0.9985	0.9983	0.9715	0.9749	0.9782
	E	3.187	3.286	3.886	9.988	11.75	9.339
	e_{ave}	0.0708	0.0592	0.0248	0.2979	0.7929	0.2346
Caurie	RMSE	0.2316	0.1990	0.2682	0.9425	1.073	0.7414
	a	0.489	0.423	0.242	1.150	1.057	0.962
	b	2.944	2.967	3.111	2.301	2.346	2.390
	r^2	0.9914	0.9918	0.9916	0.9673	0.9679	0.9698
	E	8.329	9.032	8.959	9.921	10.35	10.60
	e_{ave}	0.0888	0.0797	0.0560	0.1922	0.1921	0.1736
Caurie	RMSE	0.3990	0.3730	0.4365	0.9015	0.8862	0.8287

Tablo 4.5. (Devamı)

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Halsey	a	16.29	14.69	11.09	66.42	52.73	42.34
	b	1.578	1.567	1.503	1.968	1.926	1.890
	r ²	0.9707	0.9685	0.9692	0.9605	0.9650	0.9672
	E	22.61	25.05	28.47	18.96	18.45	18.75
	e _{ave}	-0.1685	-0.1800	-0.1706	-0.1313	-0.1262	-0.1161
	RMSE	1.135	1.130	1.075	1.322	1.189	1.098
Ferro-Fontan	A	4.518	4.152	3.651	9.080	9.285	8.515
	B	1.410	1.461	1.436	1.497	1.381	1.358
	C	0.735	0.694	0.675	0.898	0.971	0.972
	r ²	0.9991	0.9991	0.9976	0.9910	0.9900	0.9905
	E	11.81	4.781	5.694	7.535	7.944	7.755
	e _{ave}	1.010	-0.0069	-0.0094	-0.0047	-0.0265	-0.0379
	RMSE	1.266	0.1889	0.3030	0.6305	0.6370	0.5925
Khun	a	3.459	3.231	2.692	6.196	5.680	5.190
	b	-2.321	-2.228	-2.153	-2.266	-2.182	-2.087
	r ²	0.9110	0.9076	0.9163	0.8620	0.8744	0.8807
	E	35.95	38.72	41.64	32.89	32.41	32.79
	e _{ave}	0.0002	-0.0011	0.0001	0.0008	-0.0008	0.0006
	RMSE	1.988	1.937	1.774	2.471	2.254	2.094
Chung-Pfost	A	-2.676	-2.625	-2.505	-3.520	-3.485	-3.401
	B	0.167	0.173	0.184	0.147	0.156	0.165
	r ²	0.9831	0.9829	0.9783	0.9971	0.9960	0.9966
	E	12.64	12.69	14.46	2.544	7.196	2.731
	e _{ave}	0.6013	0.5501	0.5765	0.1312	-0.6483	0.1706
	RMSE	1.510	1.407	1.5113	0.5328	0.8269	0.6723
White-Eiring	A	0.269	0.283	0.316	0.190	0.205	0.222
	B	-0.253	-0.267	-0.300	-0.169	-0.184	-0.199
	r ²	0.9352	0.9332	0.9351	0.9075	0.9128	0.9161
	E	28.69	31.86	36.86	20.72	20.51	21.17
	e _{ave}	-0.0673	-0.1412	-0.0620	0.1517	0.0910	0.2425
	RMSE	1.375	1.369	1.331	1.535	1.417	1.337

* BET eşitliği için a_w 0-0.4 aralığındadır.

Tablo 4.6. B r lce nin sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 �C	35 �C	45 �C	25 �C	35 �C	45 �C
GAB	X _m	16.28	19.10	18.42	9.264	7.920	4.586
	C	1.001	0.817	0.624	3.978	4.342	-1x10 ⁹
	K	0.670	0.637	0.669	0.767	0.797	0.911
	r ²	0.9972	0.9972	0.9964	0.9954	0.9946	0.9511
	E	5.755	6.071	8.245	7.287	8.486	38.90
	e _{ave}	-0.0496	0.0064	-0.0549	-0.0302	-0.0324	-0.3186
	RMSE	0.4319	0.4180	0.4475	0.5757	0.5934	1.711
BET*	X _m	10.72	10.00	6.455	10.23	9.255	7.624
	C	0.746	0.749	0.961	1.835	1.874	2.016
	r ²	0.9929	0.9956	0.9951	0.9999	0.9999	0.9980
	E	8.749	6.931	6.751	1.131	0.6621	3.523
	e _{ave}	0.0407	0.0282	0.0247	0.0067	0.0039	0.0160
	RMSE	0.1960	0.1446	0.1146	0.0437	0.0260	0.1264
Henderson	A	0.095	0.103	0.140	0.032	0.035	0.051
	B	0.956	0.942	0.863	1.292	1.274	1.182
	r ²	0.9950	0.9953	0.9937	0.9954	0.9950	0.9971
	E	7.656	13.98	9.896	6.731	7.102	5.355
	e _{ave}	-0.3627	1.308	-0.3034	-0.1214	0.5288	-0.1598
	RMSE	1.180	1.605	1.142	0.5444	0.8440	0.4739
Oswin	A	8.149	7.739	6.710	10.432	9.600	8.823
	B	0.532	0.535	0.575	0.452	0.466	0.482
	r ²	0.9743	0.9730	0.9751	0.9844	0.9872	0.9857
	E	32.92	35.25	37.88	19.62	18.61	19.21
	e _{ave}	-0.2333	-0.2321	-0.2279	-0.1495	-0.1345	-0.1445
	RMSE	1.310	1.286	1.174	1.063	0.9126	0.9249
Peleg	m ₁	25.23	4957	25.25	23.50	27.88	21.18
	n ₁	1.559	70.07	18.52	1.063	13.09	1.164
	m ₂	43.35	24.58	22.88	28.88	21.33	24.40
	n ₂	23.67	1.599	1.729	14.38	1.049	13.40
	r ²	0.9993	0.9994	0.9984	0.9993	0.9991	0.9995
	E	6.820	6.696	10.13	2.077	3.088	3.010
	e _{ave}	0.0337	0.0333	0.0314	-0.0098	-0.0141	0.0079
	RMSE	0.2195	0.1851	0.2965	0.2206	0.2408	0.1752
Smith	c ₁	0.235	0.166	-0.317	1.874	1.575	1.173
	c ₂	11.12	10.65	10.13	11.50	10.91	10.50
	r ²	0.9934	0.9932	0.9956	0.9806	0.9842	0.9895
	E	10.73	11.13	11.67	13.39	12.11	9.419
	e _{ave}	0.0226	0.0142	-0.0394	0.2084	0.1749	0.1277
	RMSE	0.6581	0.6424	0.4850	1.007	0.8667	0.6895
Caurie	a	0.527	0.466	0.193	1.024	0.906	0.769
	b	3.002	3.020	3.261	2.559	2.598	2.697
	r ²	0.9850	0.9848	0.9880	0.9719	0.9726	0.9794
	E	22.02	23.72	22.97	16.34	16.52	14.13
	e _{ave}	-0.0475	-0.0582	-0.0704	0.1058	0.1018	0.0680
	RMSE	0.78288	0.8068	0.7058	1.085	1.050	0.8454

Tablo 4.6. (Devamı)

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Halsey	a	17.02	15.47	10.38	43.79	33.81	26.11
	b	1.549	1.542	1.443	1.796	1.747	1.694
	r ²	0.9389	0.9370	0.9438	0.9497	0.9568	0.9543
	E	50.07	53.40	57.77	31.35	30.70	31.62
	e _{ave}	-0.2932	-0.2758	-0.2862	-0.1975	-0.1730	-0.1913
	RMSE	1.862	1.813	1.643	1.701	1.500	1.492
Ferro-Fontan	A	3.875	3.877	3.323	5.867	6.054	4.825
	B	3.759	4.334	3.223	1.879	1.564	1.802
	C	0.312	0.286	0.309	0.633	0.739	0.609
	r ²	0.9959	0.9962	0.9954	0.9887	0.9870	0.9919
	E	6.155	5.683	6.729	10.98	12.89	9.758
	e _{ave}	-0.0018	-0.0583	0.0156	-0.0282	-0.0644	-0.0436
	RMSE	0.4808	0.4506	0.4748	0.8083	0.8231	0.6280
Khun	a	3.419	3.205	2.394	5.561	4.973	4.377
	b	-2.576	-2.468	-2.397	-2.581	-2.480	-2.396
	r ²	0.8681	0.8685	0.8885	0.8597	0.8765	0.8752
	E	65.05	68.81	70.50	47.71	47.09	47.49
	e _{ave}	-0.0012	-0.0005	-0.0011	0.0005	-0.0008	0.0012
	RMSE	2.736	2.639	2.314	2.842	2.537	2.466
Chung-Pfost	A	-2.301	-2.275	-2.148	-2.942	-2.920	-2.720
	B	0.135	0.140	0.152	0.130	0.140	0.144
	r ²	0.9767	0.9757	0.9650	0.9941	0.9932	0.9908
	E	21.73	22.90	30.92	4.710	5.482	8.514
	e _{ave}	0.2413	0.1815	0.3051	0.1331	0.1972	0.1897
	RMSE	1.039	0.9655	1.272	0.6623	0.8558	0.7931
White-Eiring	A	0.250	0.263	0.304	0.194	0.213	0.231
	B	-0.235	-0.247	-0.291	-0.177	-0.195	-0.214
	r ²	0.9048	0.9032	0.9104	0.9060	0.9135	0.9143
	E	60.17	64.50	72.72	35.49	35.46	37.26
	e _{ave}	-0.1598	-0.1240	-0.2688	-0.0433	0.1133	-0.1074
	RMSE	2.142	2.087	1.938	1.970	1.785	1.752

* BET eşitliği için a_w 0-0.4 aralığındadır.

Tablo 4.7. Baklanın sorpsiyon verilerine uydurulan farklı modellerin katsayıları

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
GAB	X _m	7.154	6.957	4.581	9.198	8.272	7.939
	C	5.674	5.563	-1x10 ⁹	6.304	6.798	6.086
	K	0.810	0.813	0.904	0.757	0.773	0.773
	r ²	0.9984	0.9985	0.9657	0.9963	0.9953	0.9975
	E	3.647	3.832	26.49	5.642	5.570	3.542
	e _{ave}	-0.0060	-0.0116	-0.2349	-0.0307	-0.0181	-0.0216
	RMSE	0.3088	0.2870	1.364	0.5043	0.5380	0.3783
BET*	X _m	6.417	6.358	5.442	8.501	7.863	6.941
	C	4.554	4.386	5.417	4.154	4.304	4.767
	r ²	0.9974	0.9970	0.9936	0.9963	0.9985	0.9989
	E	3.723	4.504	6.379	4.529	3.223	2.509
	e _{ave}	-0.0094	-0.0341	-0.0132	-0.0180	0.0114	-0.0064
	RMSE	0.1528	0.1692	0.2219	0.2482	0.1493	0.1162
Henderson	A	0.031	0.033	0.039	0.016	0.017	0.022
	B	1.374	1.351	1.302	1.528	1.526	1.467
	r ²	0.9990	0.9986	0.9986	0.9973	0.9972	0.9988
	E	3.069	33.98	3.593	5.666	15.59	3.206
	e _{ave}	0.1703	2.589	0.0680	0.2068	1.4343	-0.0089
	RMSE	0.5332	2.660	0.4079	0.6194	1.552	0.3927
Oswin	A	9.453	9.193	8.788	11.451	10.726	10.05
	B	0.454	0.457	0.468	0.407	0.412	0.420
	r ²	0.9935	0.9934	0.9929	0.9883	0.9900	0.9905
	E	10.38	10.71	10.85	12.70	11.83	11.23
	e _{ave}	-0.0564	-0.0910	-0.0925	-0.1089	-0.0927	-0.0933
	RMSE	0.6192	0.6112	0.6213	0.8987	0.7868	0.7330
Peleg	m ₁	18.80	19.26	18.08	13.91	13.16	12.66
	n ₁	0.926	8.017	7.133	1.144	1.158	1.204
	m ₂	20.65	17.85	16.94	13.91	13.16	12.66
	n ₂	9.033	0.908	0.921	1.144	1.158	1.204
	r ²	0.9996	0.9993	0.9988	0.9739	0.9691	0.9736
	E	1.583	2.352	2.365	11.38	12.29	12.84
	e _{ave}	0.0030	-0.0034	0.0048	0.1450	0.1526	0.1652
Smith	RMSE	0.1542	0.2009	0.2512	1.344	1.381	1.220
	c ₁	1.804	1.702	1.471	2.898	2.671	2.378
	c ₂	10.35	10.16	10.00	11.15	10.56	10.11
	r ²	0.9869	0.9879	0.9908	0.9674	0.9698	0.9751
	E	9.014	9.064	7.338	12.83	11.98	10.61
	e _{ave}	0.1989	0.1911	-0.1100	0.3209	0.2925	0.2655
Caurie	RMSE	0.6326	0.5984	0.4919	1.148	1.036	0.8790
	a	0.952	0.882	0.803	1.241	1.165	1.076
	b	2.534	2.557	2.622	2.286	2.308	2.353
	r ²	0.9777	0.9788	0.9822	0.9637	0.9636	0.9702
	E	11.15	11.12	10.54	11.82	12.38	10.84
	e _{ave}	0.1514	0.1440	0.1272	0.1953	0.1906	0.1770
Caurie	RMSE	0.7747	0.7379	0.6434	1.086	1.051	0.8519

Tablo 4.7. (Devamı)

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Halsey	a	36.44	33.70	28.72	70.12	66.72	54.94
	b	1.792	1.779	1.741	1.960	1.955	1.925
	r ²	0.9680	0.9681	0.9679	0.9610	0.9588	0.9593
	E	20.48	20.98	21.24	21.69	20.69	20.36
	e _{ave}	-0.1473	-0.1443	-0.1500	0.3996	-0.1419	-0.1388
	RMSE	1.213	1.191	1.180	1.660	1.388	1.324
Ferro-Fontan	A	7.254	6.951	6.157	8.654	7.540	7.731
	B	1.400	1.399	1.428	1.657	1.652	1.570
	C	0.873	0.866	0.819	0.808	0.760	0.827
	r ²	0.9939	0.9944	0.9958	0.9884	0.9882	0.9918
	E	7.410	7.510	6.767	9.507	10.40	7.014
	e _{ave}	-0.0369	-0.0154	-0.0179	-0.0424	-0.7805	-0.0198
	RMSE	0.5305	0.5014	0.4290	0.7776	1.350	0.5926
Khun	a	5.083	4.903	4.571	6.748	6.265	5.791
	b	-2.344	-2.306	-2.281	-2.443	-2.330	-2.236
	r ²	0.8876	0.8886	0.8909	0.8511	0.8678	0.8627
	E	35.31	35.73	35.35	36.75	35.23	34.67
	e _{ave}	-0.0008	-0.0001	-0.0006	-0.0004	-0.0014	-0.0016
	RMSE	2.273	2.225	2.175	2.784	2.531	2.431
Chung-Pfost	A	-3.127	-3.102	-2.980	-3.515	-3.519	-3.361
	B	0.151	0.154	0.157	0.134	0.144	0.149
	r ²	0.9957	0.9949	0.9926	0.9980	0.9976	0.9977
	E	3.778	4.316	6.234	3.779	3.467	1.700
	e _{ave}	0.3164	0.3018	0.3618	-0.0061	0.1168	0.1165
	RMSE	0.8943	0.9021	0.9732	0.4565	0.6041	0.4960
White-Eiring	A	0.215	0.222	0.232	0.175	0.187	0.200
	B	-0.196	-0.203	-0.213	-0.155	-0.167	-0.179
	r ²	0.9223	0.9233	0.9253	0.9007	0.9053	0.9086
	E	24.37	24.82	24.68	24.70	23.05	22.56
	e _{ave}	0.0809	0.0080	0.0540	0.2425	0.0992	0.1248
	RMSE	1.457	1.432	1.410	1.798	1.640	1.541

* BET eşitliği için a_w 0-0.4 aralığındadır.

Model eşitliklerdeki sabitler, bu çalışmada kullanılan sıcaklık ve su aktivitesi aralığında denge bağıl nemi değerlerinin hesaplanmasını sağlar. E, ortalama fark ve RMSE değerleri ne kadar düşük ve r² değerleri ne kadar 1'e yakın ise, deneysel verilerin modellere uyumu da o kadar iyi olacaktır. Eğer bir model % 10'dan daha büyük ortalama bağıl yüzde sapma modülüne (E) sahip ise iyi bir model olarak kabul edilmez (Lomauro vd., 1985).

BET eşitliğinin uygulanabilirliği eşitliğin türetilmesinde kullanılan varsayımlar nedeniyle genellikle 0.4'ün altındaki su aktivitesi değerleri ile sınırlıdır (Labuza, 1968). BET modeli; fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce, baklanın adsorpsiyon ve desorpsiyon için sırasıyla 4.232 ve 3.366, 9.024 ve 0.6793, 3.553 ve 5.092, 7,477 ve 1.772, 4.869 ve 3.420'lik düşük E değerleri (%) ve yüksek r² değerleri ile su aktivitesi ≤0.4 aralığında baklagillerin sorpsiyon izotermelerini iyi bir şekilde tarif etmiştir.

E, RMSE ve r^2 değerleri gözönüne alındığında, % 10-% 90 aralığındaki bağıl nem değerlerinde ve tüm sıcaklıklarda GAB, Henderson, ve Peleg modelleri fasulyenin adsorpsiyon izotermelerini, Henderson, Peleg ve Chung-Pfost modelleri fasulyenin desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmiştir. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller arasında fasulyenin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermine en iyi uyumu Peleg modelinin gösterdiği bulunmuştur. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki adsorpsiyon için sırasıyla 0.9994, 0.9992, 0.9990; 6.271, 7.556, 8.334; 0.1996, 0.2294, 0.2212'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile fasulyenin adsorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki desorpsiyon için sırasıyla 0.9996, 0.9995, 0.9997; 2.825, 3.007, 2.782; 0.1683, 0.1811, 0.1271'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile fasulyenin desorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Bu nedenle; Peleg modeli fasulyenin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini en iyi temsil eden model olarak kabul edildi ve adsorpsiyon ve desorpsiyon deneysel değerlerini modellemek için kullanılabilir. Diğer modeller % 10'un üzerindeki E değerleri ile fasulyenin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmemiştir ve incelenen bağıl nem ve sıcaklık aralığında fasulyenin nem sorpsiyonunun simülasyonu için kullanılamaz.

E, RMSE ve r^2 değerleri gözönüne alındığında, % 10-% 90 aralığındaki bağıl nem değerlerinde ve tüm sıcaklıklarda GAB, Henderson, Peleg ve Ferro-Fontan modelleri nohutun adsorpsiyon izotermelerini, Henderson, Peleg, Ferro-Fontan ve Chung-Pfost modelleri nohutun desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmiştir. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde nohutun adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermine en iyi uyumu Peleg modelinin gösterdiği bulunmuştur. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki adsorpsiyon için sırasıyla 0.9992, 0.9992, 0.9985; 6.885, 7.381, 9.934; 0.2001, 0.1929, 0.2418'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile nohutun adsorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki desorpsiyon için sırasıyla 0.9994, 0.9995, 0.9992; 1.899, 1.686, 1.642; 0.1863, 0.1609, 0.1892'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile nohutun desorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Bu nedenle Peleg modeli nohutun adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini en iyi temsil eden model olarak kabul edilmiştir ve Peleg modeli adsorpsiyon ve desorpsiyon deneysel değerlerini modellemek için kullanılabilir. Diğer modeller % 10'un üzerindeki E değerleri ile nohutun adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmemiştir ve incelenen bağıl nem ve sıcaklık aralığında nohutun nem sorpsiyonunun simülasyonu için kullanılamaz.

E, RMSE ve r^2 değerleri gözönüne alındığında, % 10-% 90 aralığındaki bağıl nem değerlerinde ve tüm sıcaklıklarda GAB, Henderson, Peleg, Smith, Caurie ve Ferro-Fontan modelleri yeşil mercimeğin adsorpsiyon izotermelerini, GAB, Henderson, Peleg, Ferro-Fontan ve Chung-Pfost modelleri yeşil mercimeğin desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmiştir.

Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde yeşil mercimeğin adsorpsiyon izotermlerine en iyi uyumu Peleg modelinin, yeşil mercimeğin desorpsiyon izotermlerine en iyi uyumu Henderson modelinin gösterdiği bulunmuştur. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki adsorpsiyon için sırasıyla 0.9998, 0.9999, 0.9987; 1.869, 1.636, 3.811; 0.1157, 0.0768, 0.2426'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile yeşil mercimeğin adsorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Henderson modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki desorpsiyon için sırasıyla 0.9975, 0.9966, 0.9976; 3.678, 3.914, 3.965; 0.4705, 0.5910, 0.5530'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile yeşil mercimeğin desorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Bu nedenle Peleg modeli yeşil mercimeğin adsorpsiyon izotermelerini en iyi temsil eden model, Henderson modeli yeşil mercimeğin desorpsiyon izotermelerini en iyi temsil eden model olarak kabul edilmiştir. Peleg modeli adsorpsiyon deneysel değerlerini, Henderson modeli desorpsiyon deneysel değerlerini modellemek için kullanılabilir. Diğer modeller % 10'un zerindeki E değerleri ile yeşil mercimeği adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmemiştir ve incelenen bağıl nem ve sıcaklık aralığında yeşil mercimeğin nem sorpsiyonunun simülasyonu için kullanılamaz.

E, RMSE ve r^2 değerleri gözönüne alındığında, % 10-% 90 aralığındaki bağıl nem değerlerinde ve tüm sıcaklıklarda GAB, Henderson, Peleg ve Ferro-Fontan modelleri börülcenin adsorpsiyon izotermelerini, Henderson, Peleg ve Chung-Pfost modelleri börülcenin desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmiştir. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde börülcenin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermine en iyi uyumu Peleg modelinin gösterdiği bulunmuştur. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki adsorpsiyon için sırasıyla 0.9993, 0.9994, 0.9984; 6.820, 6.696, 10.13; 0.2195, 0.1851, 0.2965'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile börülcenin adsorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki desorpsiyon için sırasıyla 0.9993, 0.9991, 0.9995; 2.077, 3.088, 3.010; 0.2206, 0.2408, 0.1752'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile börülcenin desorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Peleg modeli adsorpsiyon ve desorpsiyon deneysel değerlerini modellemek için kullanılabilir. Diğer modeller % 10'un zerindeki E değerleri ile börülcenin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmemiştir ve incelenen bağıl nem ve sıcaklık aralığında börülcenin nem sorpsiyonunun simülasyonu için kullanılamaz.

E, RMSE ve r^2 değerleri gözönüne alındığında, % 10-% 90 aralığındaki bağıl nem değerlerinde ve tüm sıcaklıklarda Peleg, Smith, Ferro-Fontan ve Chung-Pfost modelleri baklanın adsorpsiyon izotermelerini, GAB, Henderson ve Chung-Pfost modelleri baklanın desorpsiyon izotermelerini yeterince temsil etmiştir. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde baklanın adsorpsiyon izotermine en iyi uyumu Peleg modelinin, baklanın desorpsiyon izotermine en

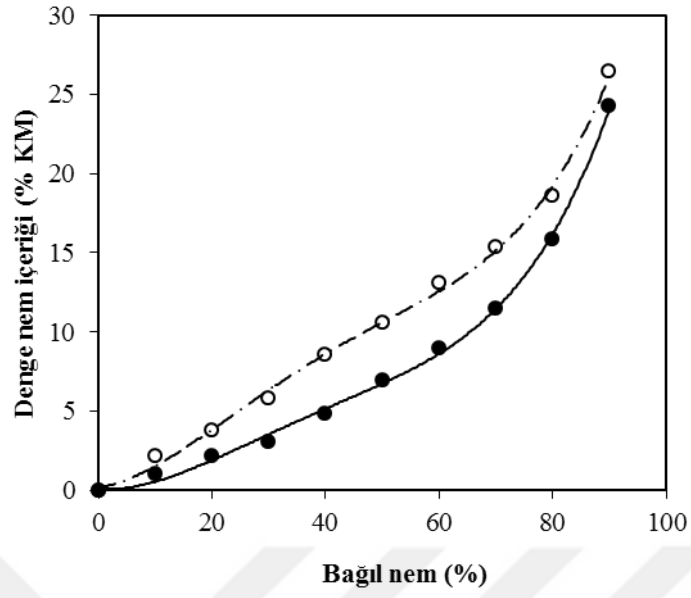
iyi uyumu Chung-Pfost modelinin gösterdiği bulunmuştur. Peleg modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki adsorpsiyon için sırasıyla 0.9996, 0.9993, 0.9988; 1.583, 2.352, 2.365; 0.1542, 0.2009, 0.2512'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile baklanın adsorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Chung-Pfost modeli, 25, 35 ve 45 °C'deki desorpsiyon için sırasıyla 0.9980, 0.9976, 0.9977; 3.779, 3.467, 1.700; 0.4565, 0.6041, 0.4960'lik r^2 , E, RMSE değerleri ile baklanın desorpsiyon izotermi için iyi bir uyum göstermiştir. Bu nedenle Peleg modeli baklanın adsorpsiyon izotermi en iyi temsil eden model, Chung-Pfost modeli baklanın desorpsiyon izotermi en iyi temsil eden model olarak kabul edilmiştir. Peleg modeli adsorpsiyon deneysel değerlerini, Chung-Pfost modeli desorpsiyon deneysel değerlerini modellemek için kullanılabilir. Diğer modeller % 10'un üzerindeki E değerleri ile baklanın adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi en iyi temsil etmemiştir ve incelenen bağıl nem ve sıcaklık aralığında baklanın nem sorpsiyonunun simülasyonu için kullanılamaz.

Peleg modelinin bazı gıdaların izotermi için deneysel verileri ile iyi bir uyum gösterdiği çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (Rahman vd., 1998; Al-Muhtasab vd., 2004a).

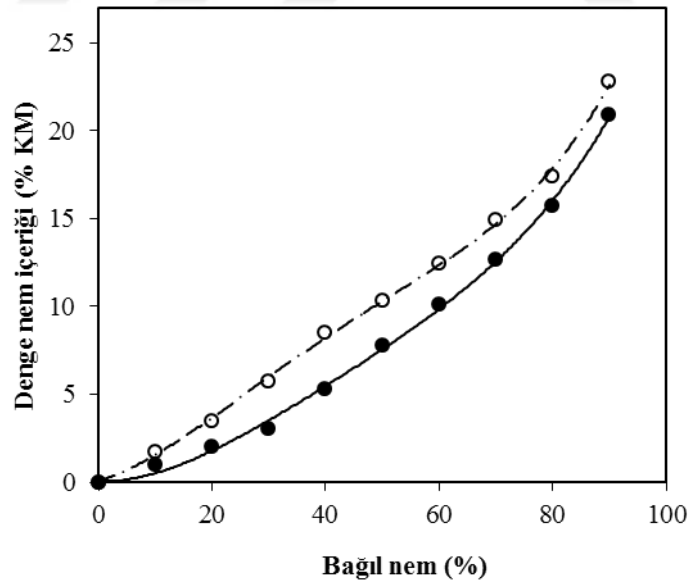
Aviara vd. (2004) soya fasulyesi için modifiye Oswin modelinin deneysel verileri iyi temsil ettiğini, ondan sonra da modifiye Chung-Pfost ve modifiye Halsey modellerinin geldiğini ifade etmişlerdir. Pollio vd., (1987) soya fasulyesinin denge nem içeriğini tahmin etmek için Halsey modelinin kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Börülçenin denge nem içeriğini tahmin etmek için Henderson ve Chung-Pfost modellerinin kullanılabileceği ifade edilmiştir (Chhinnan ve Beuchat, 1985; Pappas ve Rao, 1987). Ayrancı ve Duman (2005), börülçenin denge nem içeriğini tahmin etmek için GAB modelinin kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Nohutun adsorpsiyonu için GAB modelinden elde edilen monotabaka nem içeriği değerleri yüksek bulunmuştur. GAB modelinden elde edilen monotabaka nem içeriğinin yüksek değeri fiziksel olarak mümkün değildir. Bir sorpsiyon modelinin geçerliliği sadece deneysel değerlere uyma yeteneği ile değerlendirilemez. Ayrıca fizikokimyasal temel de gereklidir (Chirife vd., 1992).

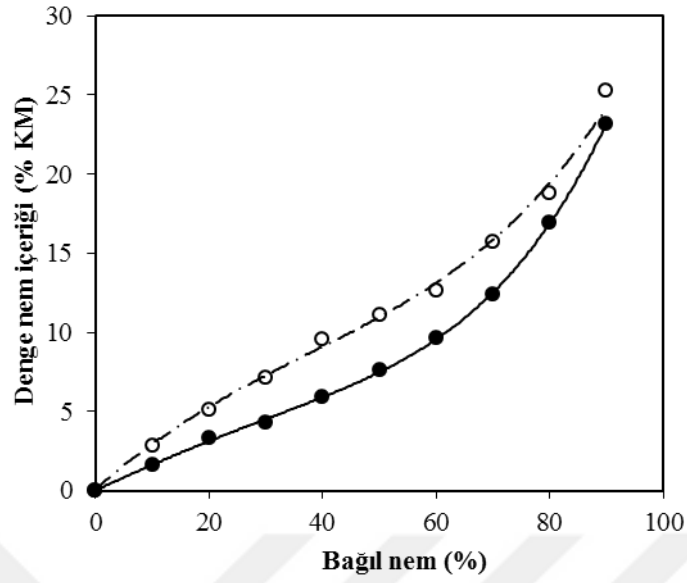
Tüm baklagillerde adsorpsiyon için Peleg modeli; fasulye, nohut ve börülçenin desorpsiyonu için Peleg modeli; yeşil mercimeğin desorpsiyonu için Henderson modeli; baklanın desorpsiyonu için Chung-Pfost modeli kullanılarak hesaplanan denge nem içerikleri değerleri kullanılarak çizilen adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi 25 °C, 35 °C ve 45 °C sıcaklıklar için deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.26-4.40'da gösterilmiştir. Şekil 4.26-4.40'daki eğrileri çizmek için deneysel verileri en iyi temsil eden modeller kullanılmıştır. Çizgiler hesaplanmış değerleri, noktalar deneysel değerleri göstermektedir.



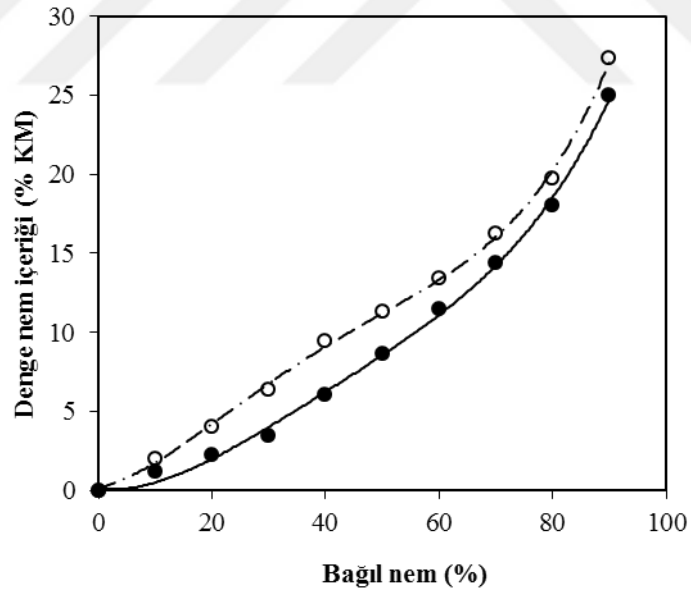
Şekil 4.26. Fasulyenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



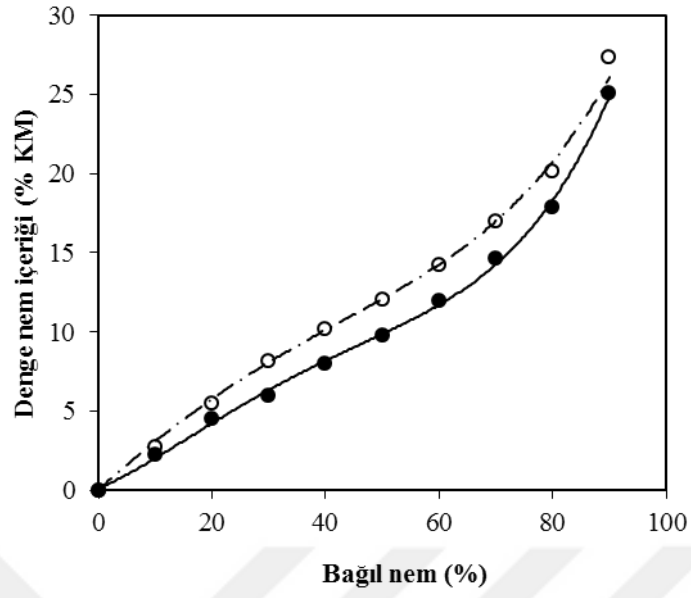
Şekil 4.27. Nohutun 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



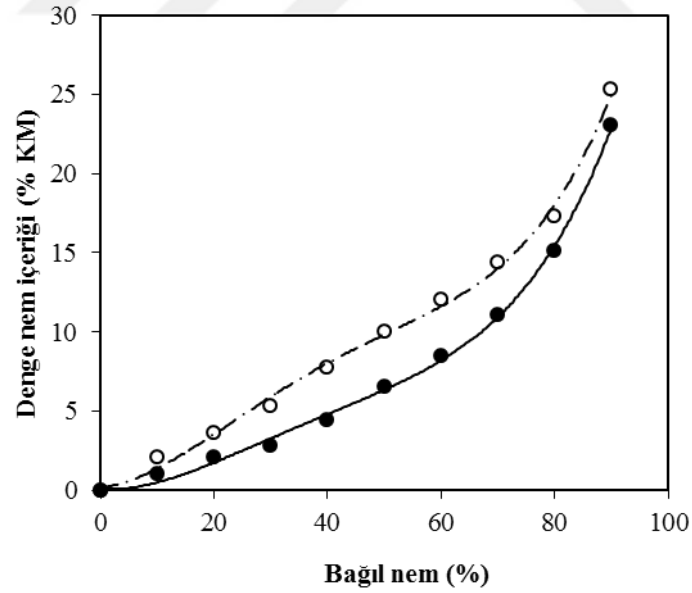
Şekil 4.28. Yeşil mercimeğin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



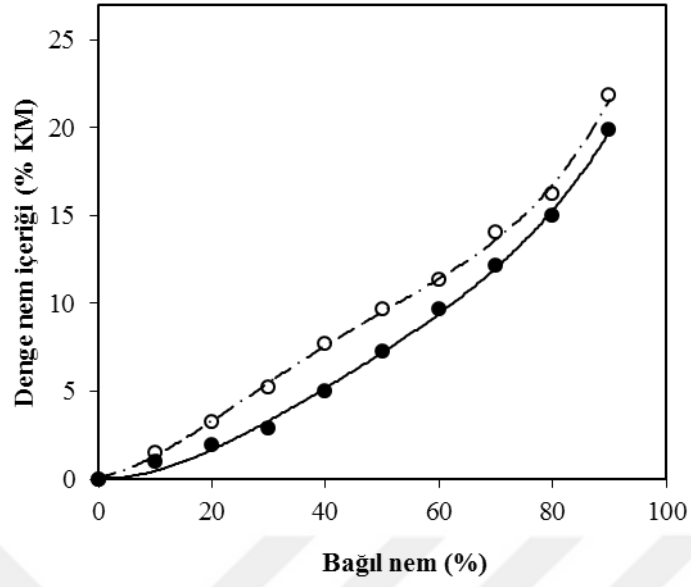
Şekil 4.29. Börülcenin 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



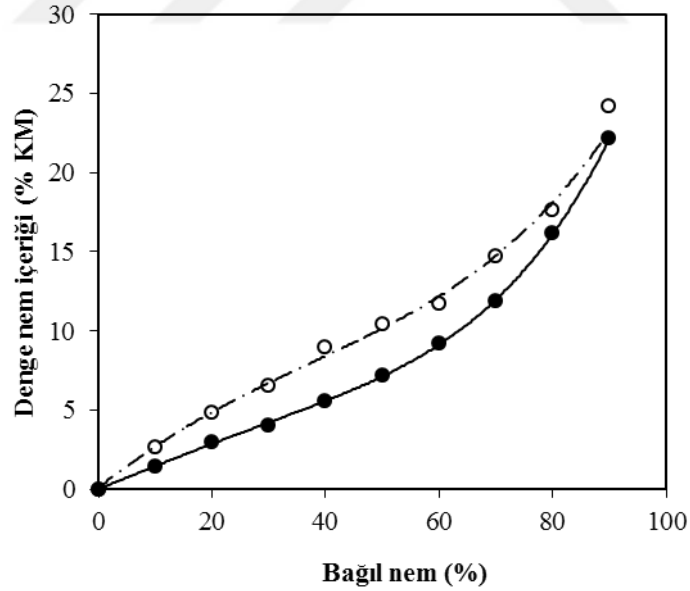
Şekil 4.30. Baklanın 25 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



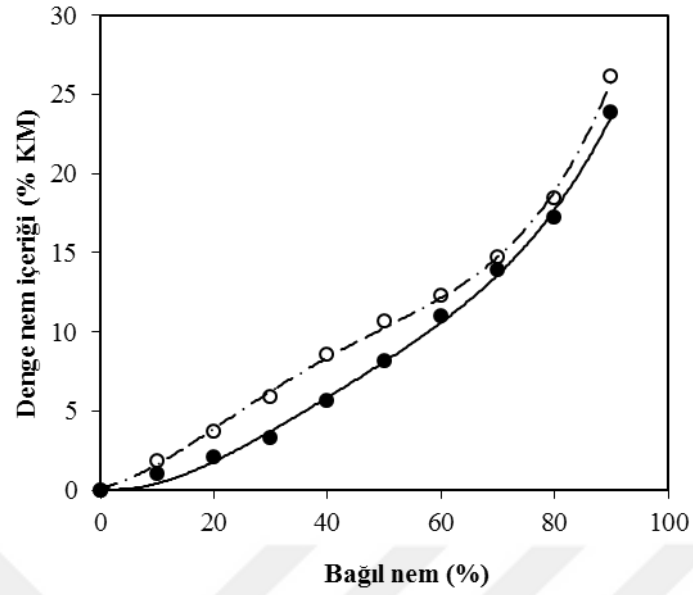
Şekil 4.31. Fasulyenin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



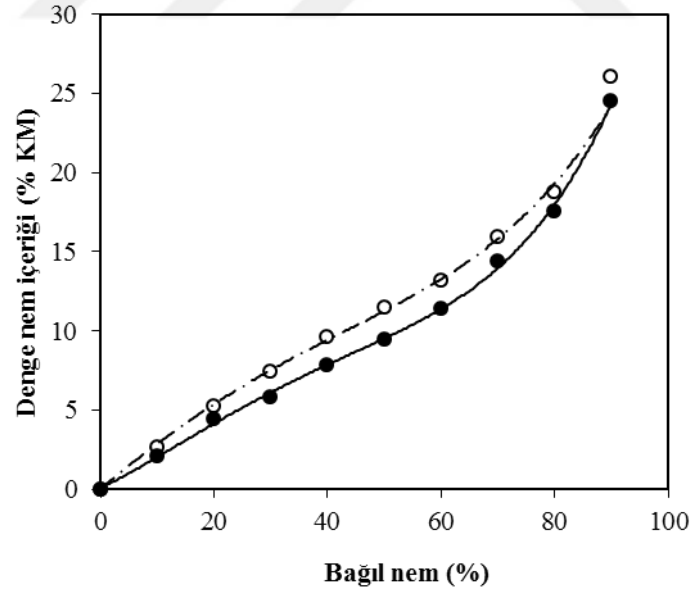
Şekil 4.32. Nohutun 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



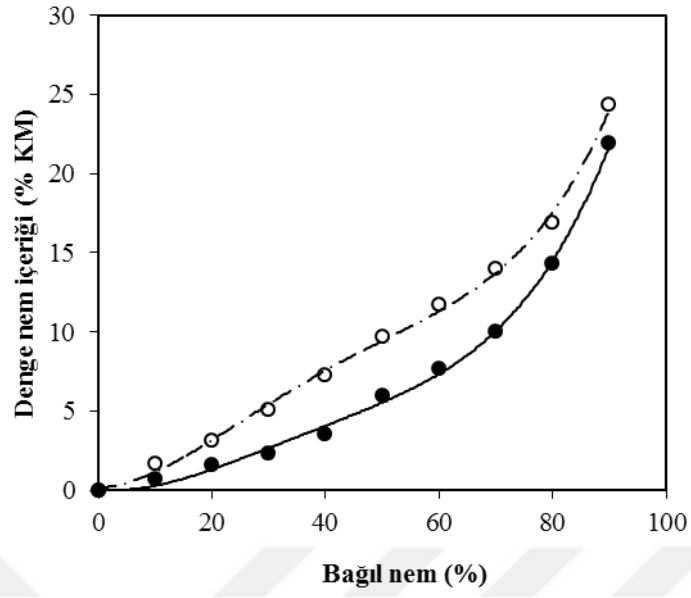
Şekil 4.33. Yeşil mercimeğin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



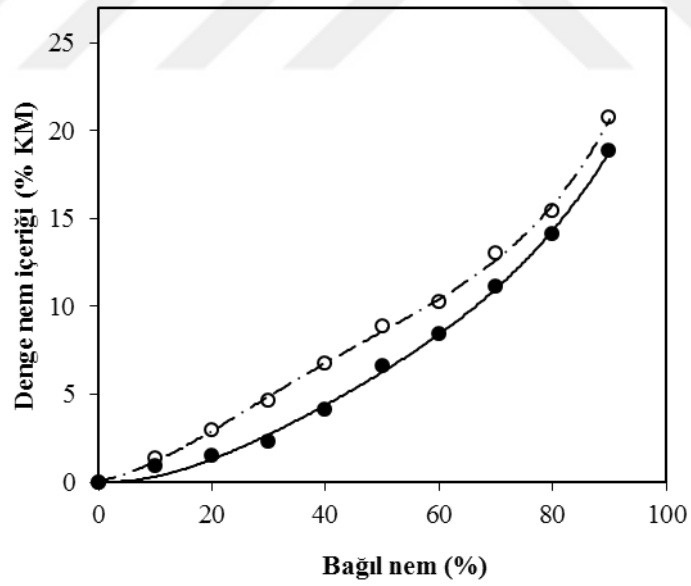
Şekil 4.34. Börülce'nin 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



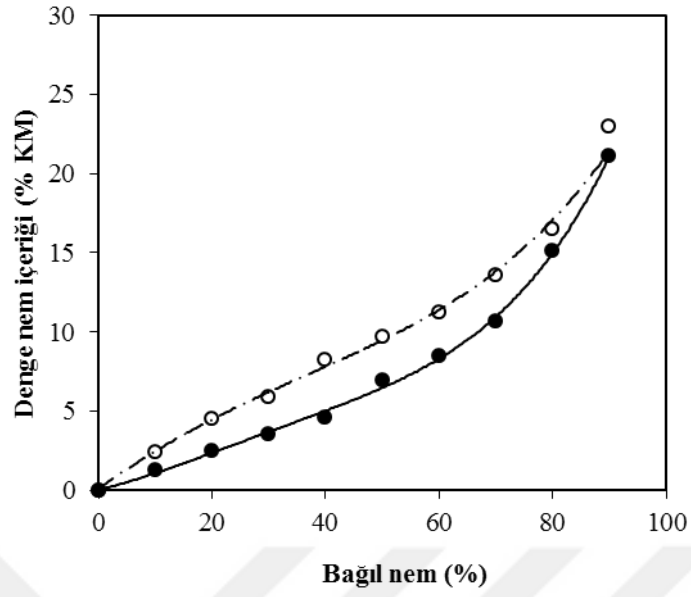
Şekil 4.35. Baklan'ın 35 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



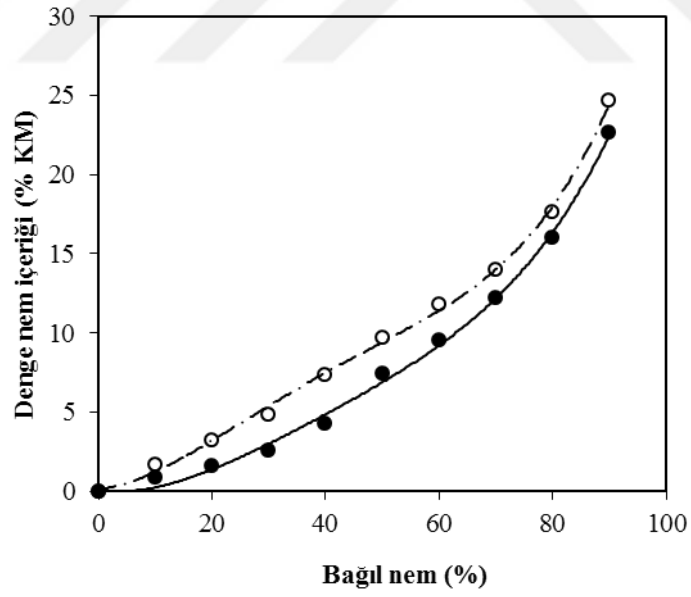
Şekil 4.36. Fasülyenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



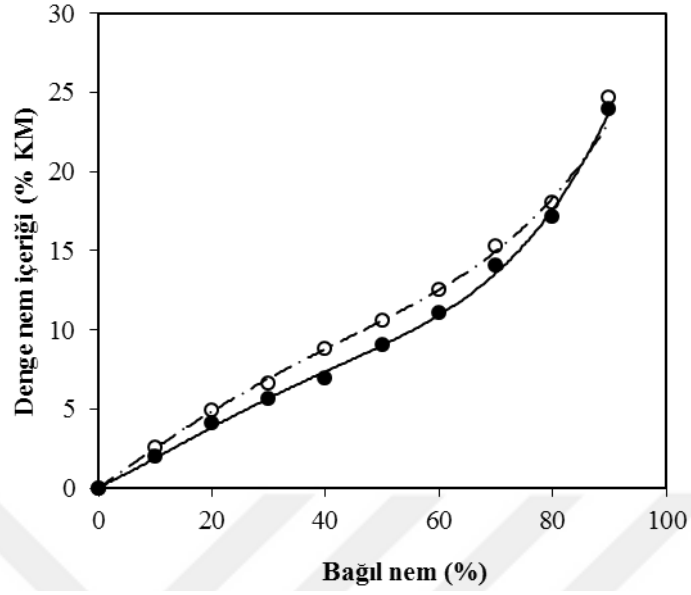
Şekil 4.37. Nohutun 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)



Şekil 4.38. Yeşil mercimeğin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)

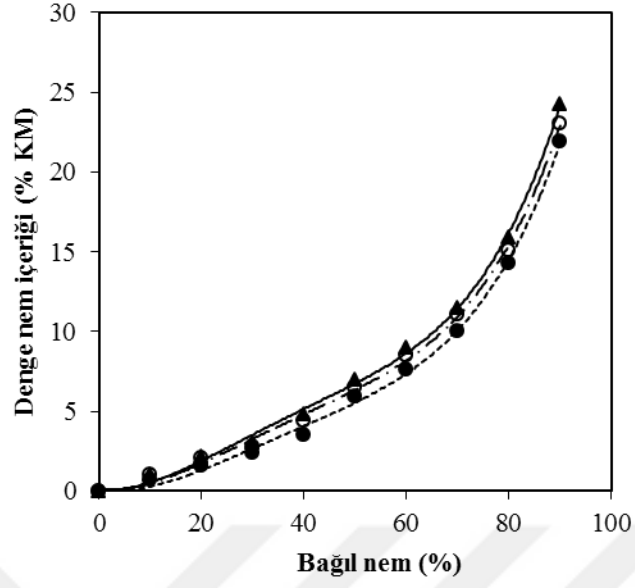


Şekil 4.39. Börülcenin 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)

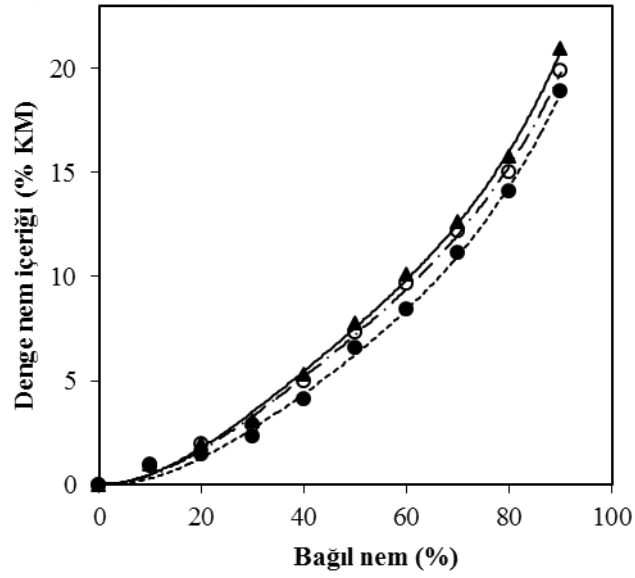


Şekil 4.40. Baklanın 45 °C'deki adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi •, deneysel (adsorpsiyon); o, deneysel (desorpsiyon); —, hesaplanmış (adsorpsiyon); ---, hesaplanmış (desorpsiyon)

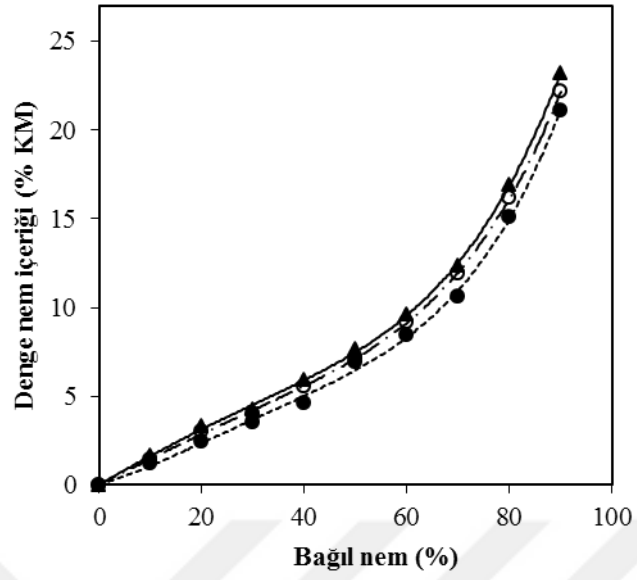
Tüm baklagillerde adsorpsiyon için Peleg modeli; fasulye, nohut ve börülcenin desorpsiyonu için Peleg modeli; yeşil mercimeğin desorpsiyonu için Henderson modeli; baklanın desorpsiyonu için Chung-Pfost modeli kullanılarak hesaplanan denge nem içerikleri değerleri kullanılarak çizilen adsorpsiyon izotermi farklı sıcaklıklar için deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.41-4.45'de, desorpsiyon izotermi farklı sıcaklıklar için deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.45-4.50'de, gösterilmiştir. Çizgiler hesaplanmış değerleri, noktalar deneysel değerleri göstermektedir.



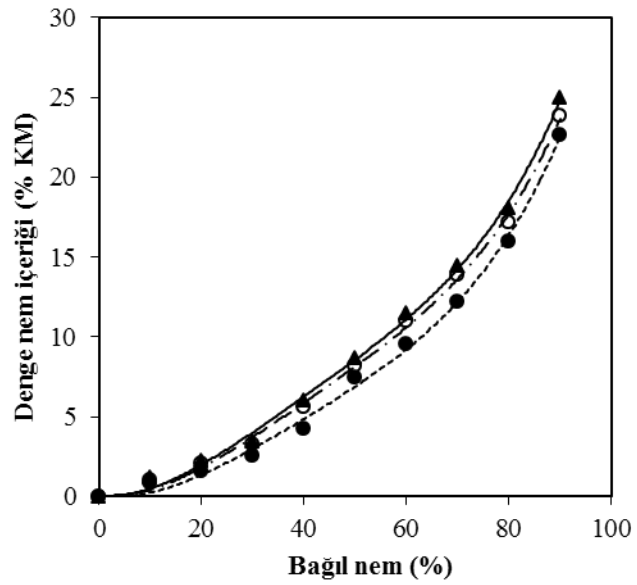
Şekil 4.41. Fasulyenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; ---, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C



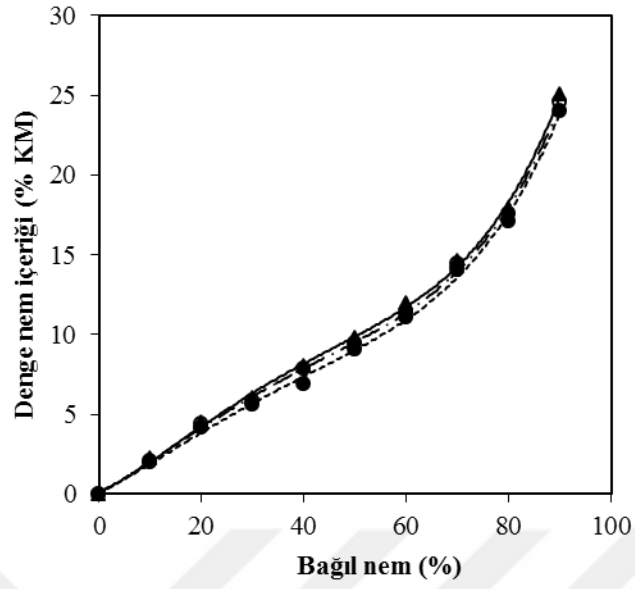
Şekil 4.42. Nohutun farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; ---, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C



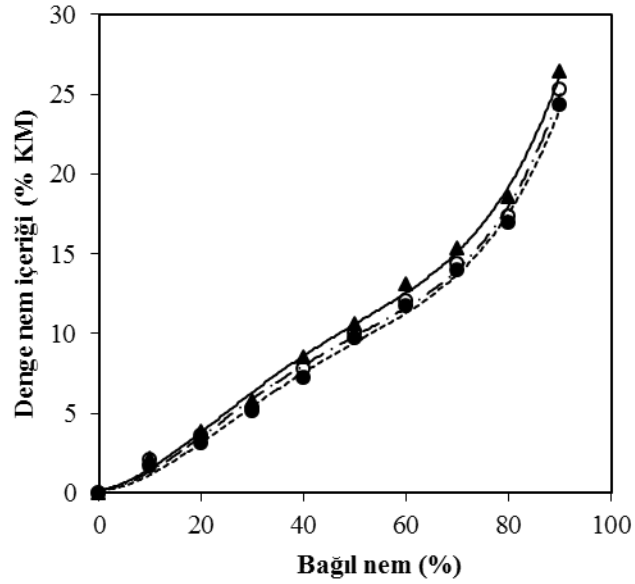
Şekil 4.43. Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; - - -, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C



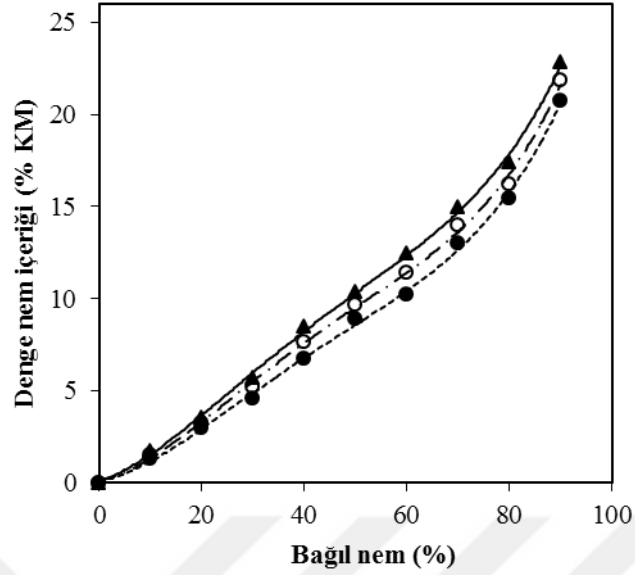
Şekil 4.44. Börülcenin farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; - - -, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C



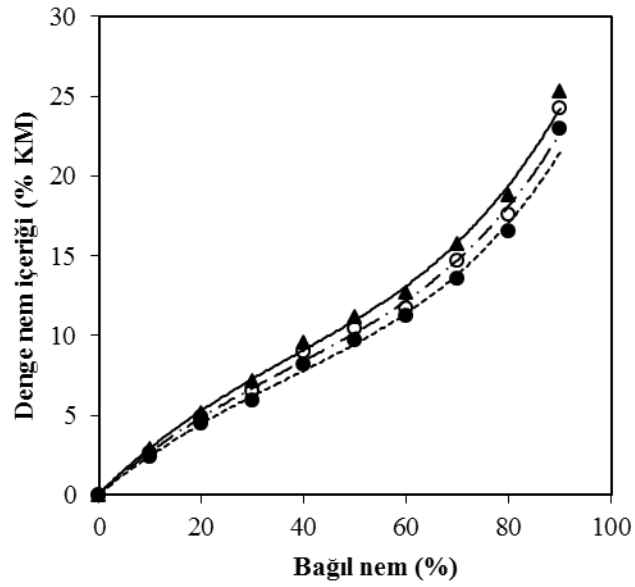
Şekil 4.45. Baklanın farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; - - -, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C



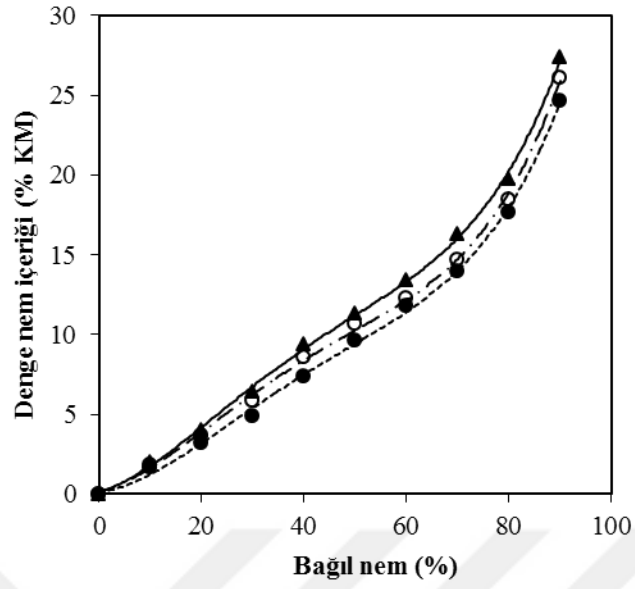
Şekil 4.46. Fasülyenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; ○, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; - - -, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C



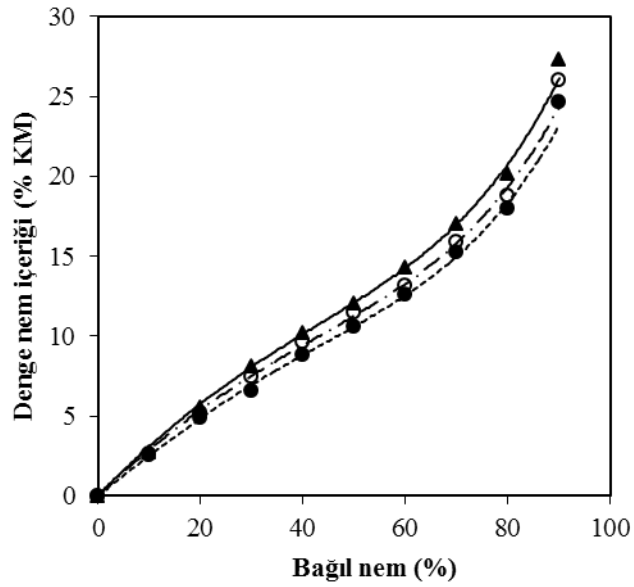
Şekil 4.47. Nohutun farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; - - -, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C



Şekil 4.48. Yeşil mercimeğin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; - - -, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C

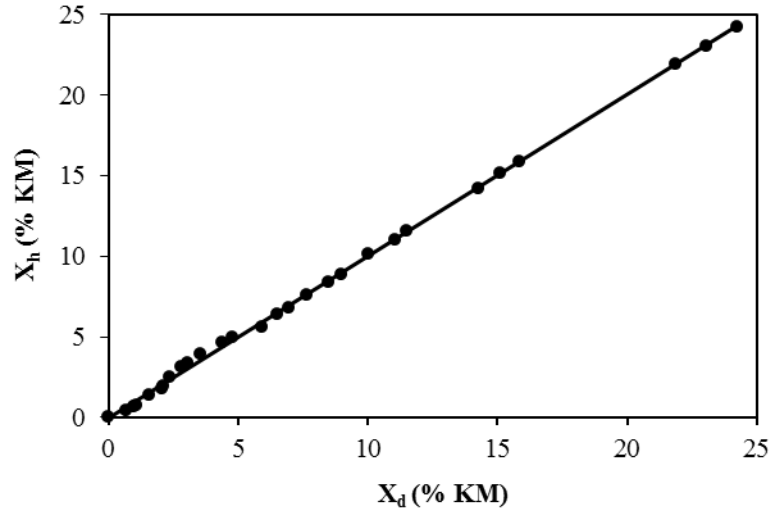


Şekil 4.49. Börülçenin farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; ---, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C

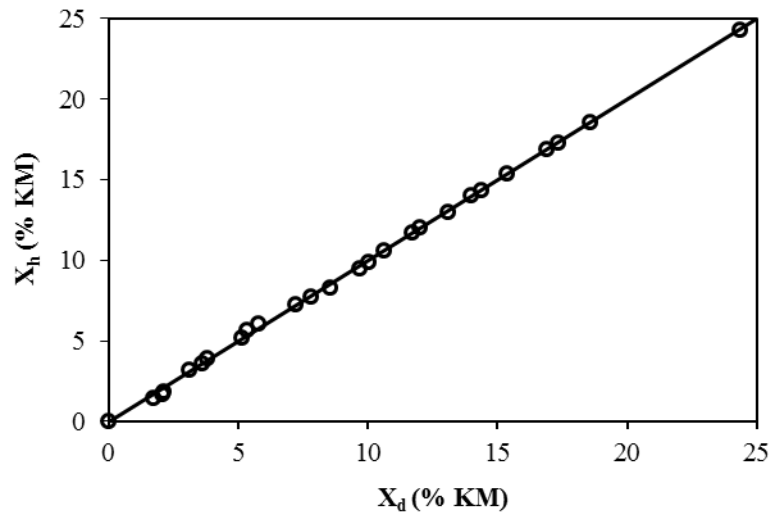


Şekil 4.50. Baklanın farklı sıcaklıklardaki desorpsiyon izotermi (▲, deneysel 25 °C; o, deneysel 35 °C; ●, deneysel 45 °C); —, hesaplanmış 25 °C; ---, hesaplanmış 35 °C; ---, hesaplanmış 45 °C

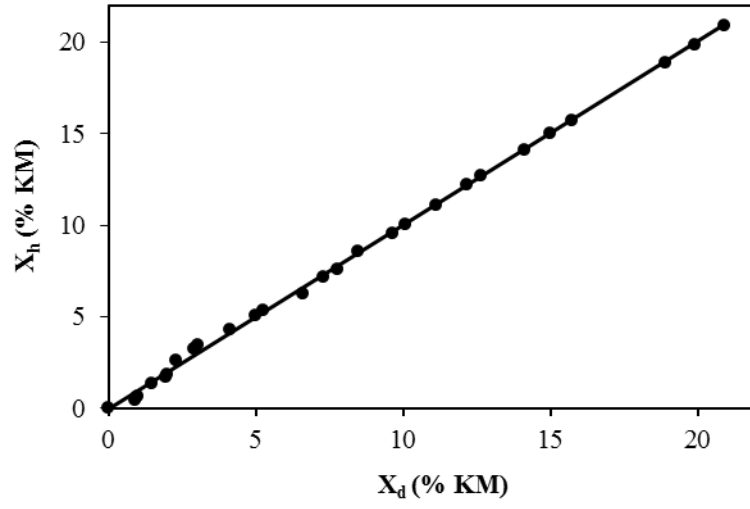
Her baklagil için deneysel verileri en iyi temsil eden en uygun model kullanılarak hesaplanan denge nem içeriği değerleri ve deneysel denge nem içeriği değerleri adsorpsiyon ve desorpsiyon için karşılaştırılmıştır (Şekil 4.51: $r^2=0.9992$; Şekil 4.52: $r^2=0.9996$; Şekil 4.53: $r^2=0.9989$; Şekil 4.54: $r^2=0.9992$; Şekil 4.55: $r^2=0.9994$; Şekil 4.56: $r^2=0.9946$; Şekil 4.57: $r^2=0.9900$; Şekil 4.58: $r^2=0.9992$; Şekil 4.59: $r^2=0.9991$; Şekil 4.60: $r^2=0.9966$).



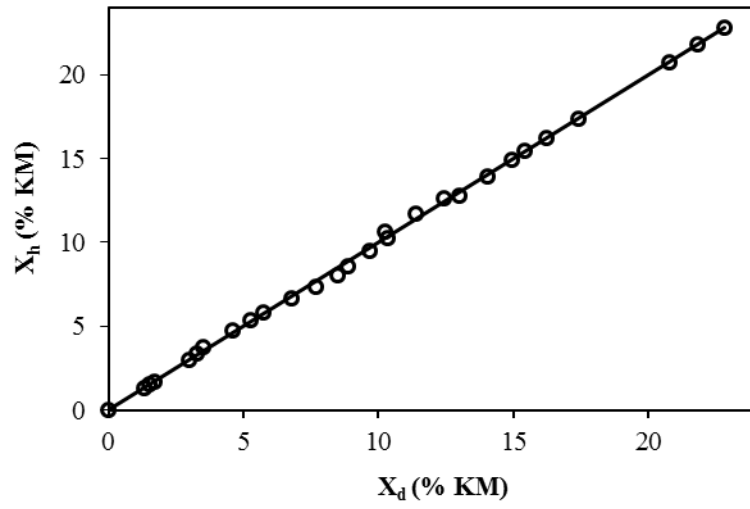
Şekil 4.51. Fasulyenin adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



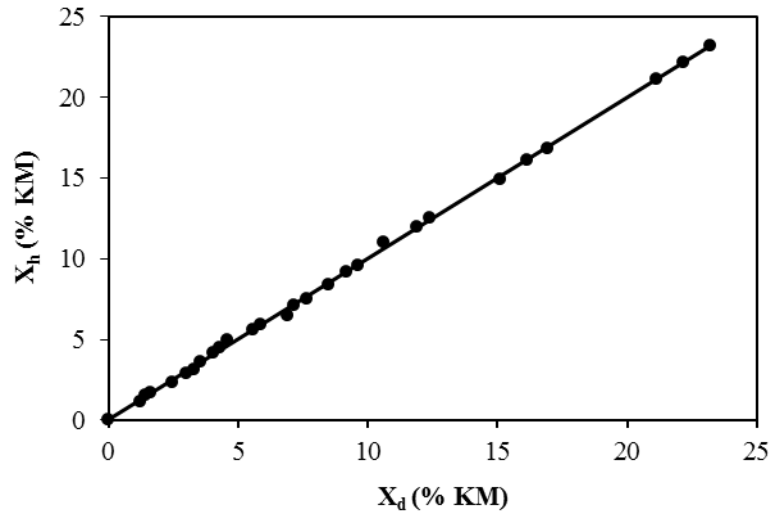
Şekil 4.52. Fasulyenin desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



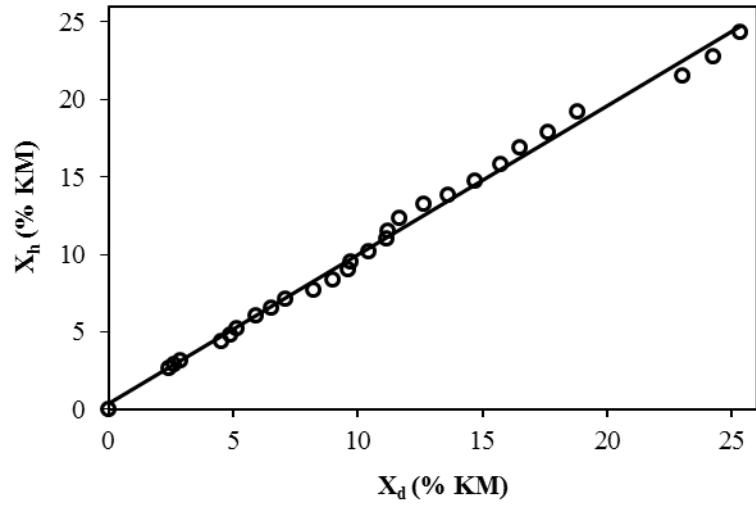
Şekil 4.53. Nohutun adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



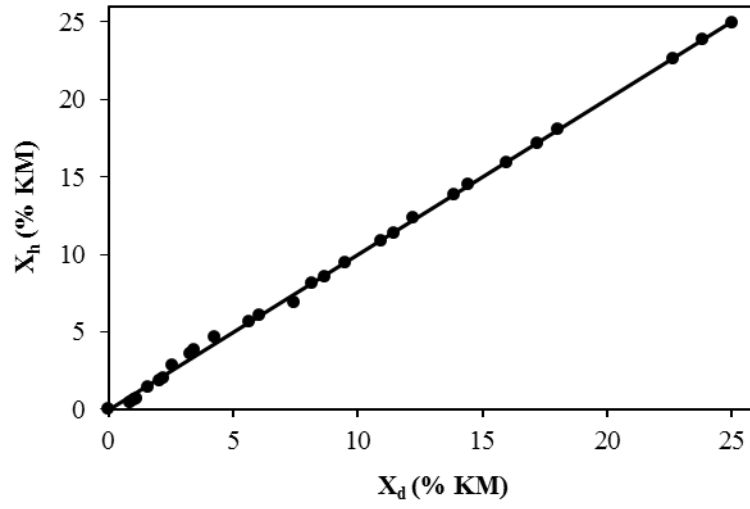
Şekil 4.54. Nohutun desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



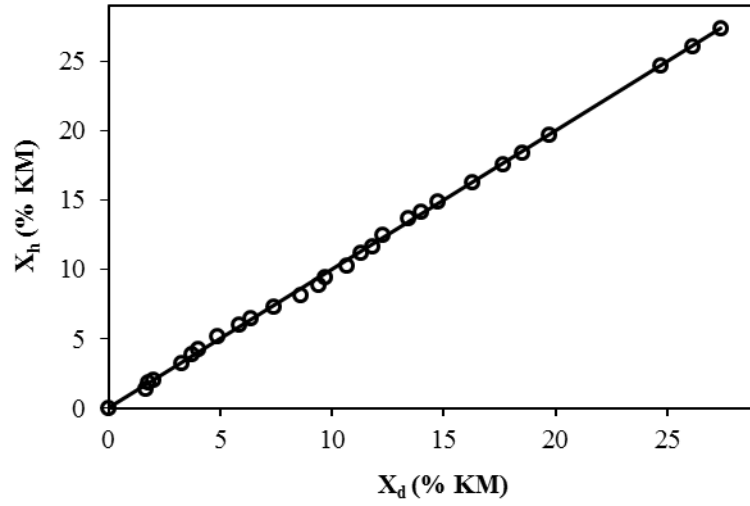
Şekil 4.55. Yeşil mercimeğin adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



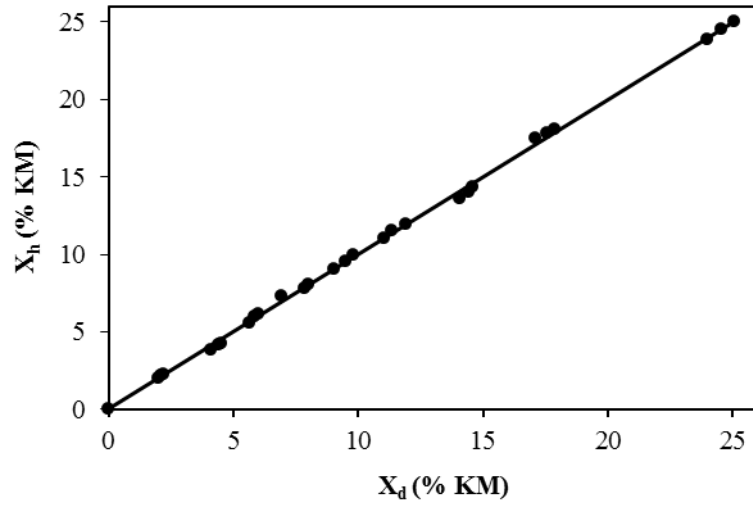
Şekil 4.56. Yeşil mercimeğin desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



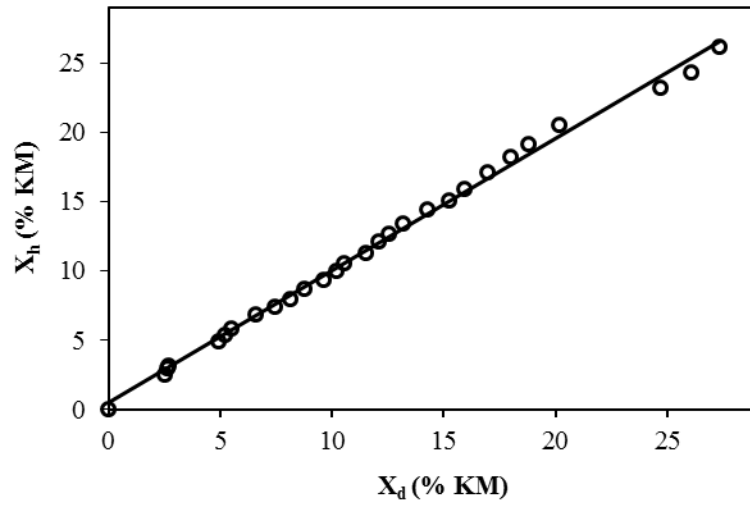
Şekil 4.57. Börülcenin adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



Şekil 4.58. Börülcenin desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



Şekil 4.59. Baklanın adsorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon



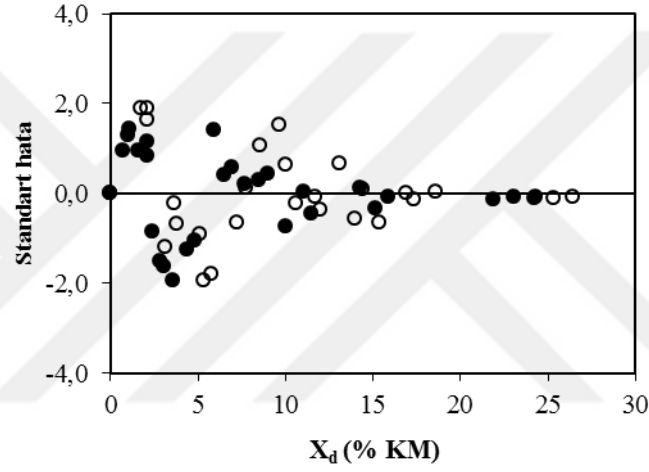
Şekil 4.60. Baklanın desorpsiyonu için deneysel ve hesaplanmış denge nem içerikleri arasındaki korelasyon

Deneyisel ve hesaplanmış değerler arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir. Bu uyum, deneyisel denge nem içeriği değerlerine karşı standart hata grafiğinde de görülmektedir (Şekil 4.61-4.65).

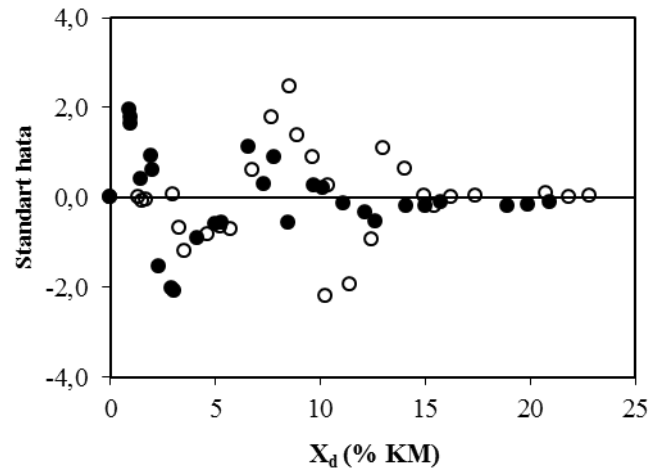
Standart hata aşağıdaki şekilde tarif edilir:

$$R = (e_i - e_{ort})/RMSE \quad (4.1)$$

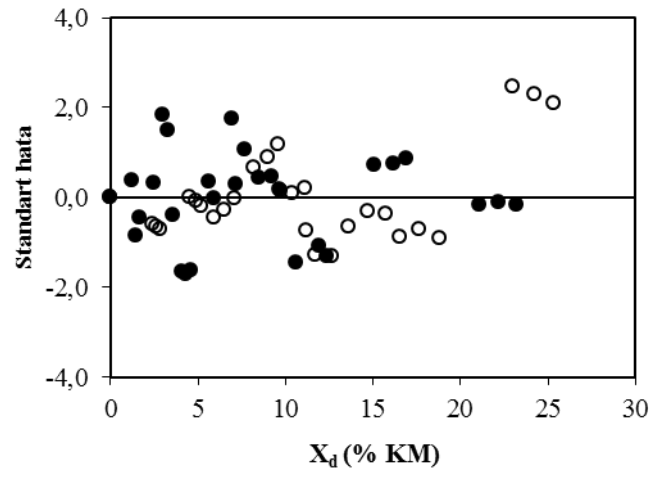
Burada; e_i deneyisel denge nem içerikleri (% KM) ve deneyisel verileri en iyi temsil eden model kullanılarak hesaplanmış denge nem içerikleri (% KM) arasındaki fark ($X_d - X_h$), e_{ort} ise farkların ortalamasıdır.



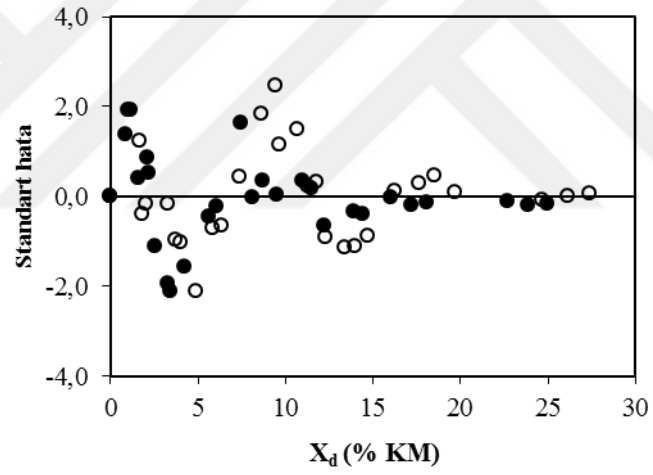
Şekil 4.61. Fasulye için standart hata grafiği (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



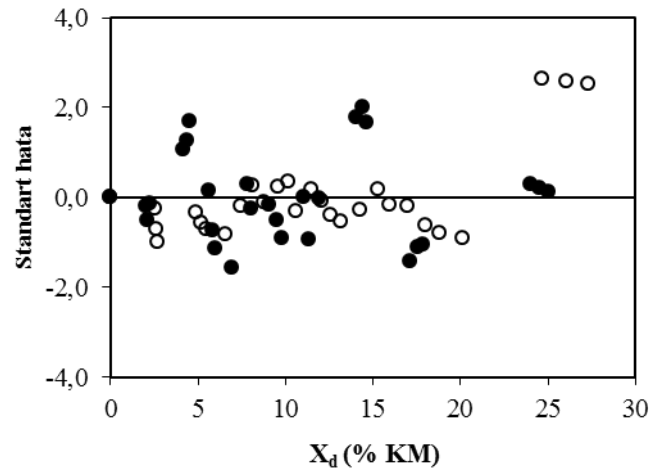
Şekil 4.62. Nohut için standart hata grafiği (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.63. Yeşil mercimek için standart hata grafiği (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.64. Börülce için standart hata grafiği (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.65. Bakla için standart hata grafiği (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)

Fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla için adsorpsiyon hata grafiğindeki standart hatanın minimum ve maksimum değerleri sırasıyla -1.94 ve +1.44, -2.08 ve +1.95, -1.64 ve +1.85, -2.10 ve +1.92, -1.56 ve +2.02 arasında değişmiştir. Fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla için desorpsiyon hata grafiğindeki standart hatanın minimum ve maksimum değerleri sırasıyla -1.94 ve +1.91, -2.19 ve +2.47, -1.27 ve +2.89, -2.11 ve +2.47, -0.98 ve +2.64 arasında değişmiştir. Deneysel verileri en iyi temsil eden modeller kullanılarak hesaplanmış denge nem içeriği değerleri ile elde edilen standart hatalar sıfır yatay ekseninin etrafında uniform bir şekilde gelişigüzel dağılmış idi. Sapmada hiçbir sistematik dağılım gözlenmemiştir. Deneysel verileri iyi bir şekilde temsil etmeyen modeller kullanılarak hesaplanmış denge nem içeriği değerleri ile elde edilen standart hatalar sıfır yatay ekseninin etrafında uniform bir şekilde gelişigüzel dağılmamıştır. Sapmada sistematik bir hata dağılımı gözlenmiştir (Şekiller gösterilmemiştir). Sıfır yatay ekseninin etrafında gelişigüzel bir dağılım olduğundan, tüm baklagillerde adsorpsiyon için Peleg modeli; fasulye, nohut ve börülcenin desorpsiyonu için Peleg modeli; yeşil mercimeğin desorpsiyonu için Henderson modeli; baklanın desorpsiyonu için Chung-Pfost modeli nem sorpsiyon davranışını değerlendirmek için kullanılabilir.

Sorpsiyon verilerinin GAB modeline uygulanması, sadece monotabaka nem içeriği değerinin bulunmasını değil, ayrıca monotabaka ve multitabaka sorpsiyon ısısı ile ilgili diğer faydalı bilgiler de sağlar (Ayrancı vd., 1990). GAB parametreleri X_m , C ve K, sıcaklığa bağımlı değildir. GAB eşitliğindeki C ve K sabitleri enerji sabitleridir. K sabitleri çoğu gıda maddesinde olduğu gibi 1'den daha düşük idi.

Monotabaka nem içeriği gıda maddesinin yüzeyi üzerinde sürekli adsorbe olmuş bir monotabaka oluşturmak için gerekli olan suyun miktarı ve gıda maddesinin maksimum sürede minimum kalite kaybı ile depolanması için gerekli olan optimum nem içeriğidir (Vagenas ve

Marinos-Kouris, 1992). Monotabaka nem içeriği, su buharı için polar uçların kullanılışlığının bir göstergesi olarak kabul edilir (Chung ve Pfof, 1967). Gıda maddesi belirli bir sıcaklıkta monotabaka nem içeriğinden daha düşük nem içeriklerinde kararlılığını sürdürebilir. Denge sorpsiyon izoterminden belirlenen ve gıdaların mikrobiyolojik-kimyasal reaksiyonlara karşı en kararlı olduğu nem içeriğini gösteren monotabaka nem içeriği, lipit oksidasyonu, enzim aktivitesi, enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonları, lezzet veren bileşenlerin korunması ve yapısal özellikler ile ilgili dehidrate olmuş maddelerin fiziksel ve kimyasal stabilitesi bakımından büyük öneme sahiptir (Menkov vd., 1999; Labuza vd., 1970). Başlangıç monotabaka bölgesindeki su, gıdanın polar uçlarındaki kuvvetli hidrofilik bağlar ile tutulur. Bu bölgedeki yüksek su alımı genellikle hidrofilik makromoleküllerin fazla miktarda bulunduğunu gösterir. İkinci bölgede su gözenekler ya da lifin matrix yapısı içerisinde hidrojen bağları ile daha gevşek bir şekilde tutulur. Bu multitabaka bölgenin izoterm başlangıç ve son bölgesi arasında bir geçiş fazı olduğu düşünülür. Su aktivitesi değeri 0.5'in üzerinde olduğu zaman, yeterince sıkı bir şekilde bağlı olmayan su meydana gelir. Bu bölgede, kondense su gıdanın boşlukları arasında mekanik olarak hapsolmuştur ve suyun özelliklerinin çoğuna sahiptir (Cadden, 1988).

Monotabaka nem içeriği (X_m) değeri nohut ve börölce hariç adsorpsiyon için daha düşük idi. Monotabaka nem içeriği değeri adsorpsiyon için daha düşük olması adsorpsiyon sırasında daha az sorpsiyon uçları olmasına rağmen bu uçların daha büyük bağ enerjisine sahip olduğunu gösterir (Van den Berg, 1984). GAB ve BET modellerinden bulunan monotabaka nem içeriği değeri aynı değildi. Bu durum daha önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Ramesh, 2003). Genel olarak, BET monotabaka su içeriği GAB monotabaka su içeriğinden düşük bulunmuştur. Bazı baklagillerde monotabaka nem içeriğinin sıcaklık ile azalmasının, sıcaklıktan dolayı fiziksel ve kimyasal yapıda meydana gelen değışiklikler nedeniyle aktif uçların sayısında meydana gelen bir azalmadan ileri geldiği öne sürölmüştür (Rizvi, 1986). Fasulye, nohut, yeşil mercimek, börölce, baklanın adsorpsiyonu ve desorpsiyonu için farklı sıcaklıklardaki BET monotabaka nem içeriği değeri standart sapmalarının sırasıyla 0.510 ve 0.508, 0.709 ve 1.029, 0.448 ve 0.472, 1.864 ve 1.075, 0.446 ve 0.640 olduğu bulunmuştur.

GAB parametrelerinin daha ayrıntılı bir analizi adsorpsiyon ve desorpsiyon hakkında daha fazla değeri bilgiler de sağlar. Eşitlik (2.2) ve Eşitlik (2.3)'deki C ve K'nın GAB eşitliğinde yerine konulması ile elde edilen eşitliğin sabitleri C_0 , K_0 , X_m (KM'de %), ΔH_c (H_1-H_m) (kJmol^{-1}) ve ΔH_k (H_L-H_m) (kJmol^{-1}) nonlinear regresyon analizi ile bulunmuştur. Adsorpsiyon ve desorpsiyon için nonlinear regresyon analizi ile bulunan sabitlerin değeri Tablo 4.8 ve Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.8. Adsorpsiyon için GAB parametrelerinin ayrıntılı analizi ile bulunan sabitler

Baklagil	C _o	K _o	X _m	ΔH _c	ΔH _k	r ²
Fasulye	0.0033	0.7330	5.891	16.12	43.91	0.9986
Nohut	0.0030	1.334	58.17	11.79	40.92	0.9970
Yeşil mercimek	-693.8	0.612	3.664	1.07	44.56	0.9559
Börülce	-13116	0.5578	3.925	32.39	44.80	0.9210
Bakla	0.0979	0.7043	6.992	10.24	43.85	0.9983

Tablo 4.9. Desorpsiyon için GAB parametrelerinin ayrıntılı analizi ile bulunan sabitler

Baklagil	C _o	K _o	X _m	ΔH _c	ΔH _k	r ²
Fasulye	0.0038	0.5649	7.915	11.87	44.35	0.9938
Nohut	0.0089	0.5267	10.31	14.68	44.13	0.9954
Yeşil mercimek	0.0071	0.4574	7.487	17.57	44.86	0.9956
Börülce	-33698	0.5026	5.053	88.55	44.98	0.9404
Bakla	0.0243	0.4341	8.591	14.18	44.93	0.9953

r² değerlerinin uygun olduğu görülmüştür. ΔH_c (H₁-H_m), monotabaka ve multitabaka sorpsiyon arasında entalpideki farkı gösterir (Van den Berg, 1984). ΔH_c değerleri beklendiği gibi pozitif değerlere sahip idi. Nem sorpsiyonunun ekzotermik doğası gereği ΔH_c için büyük pozitif değerlerin bulunması, baklagilin birincil sorpsiyon uçları ile su buharının kuvvetli ekzotermik etkileşiminden kaynaklanmaktadır ve katı-monotabaka su molekülleri arasındaki bağların monotabaka-multitabaka arasındaki bağlardan daha kuvvetli olduğunu göstermektedir. Fasulye hariç, desorpsiyon için ΔH_c değerleri adsorpsiyon için ΔH_c değerlerinden daha yüksektir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon için ΔH_c değerlerinin farklı olması, maddenin su bağlama özellikleri bakımından tersinmezlik derecesini belirtir (McMinn ve Magee, 1999).

ΔH_k (H_L-H_m), suyun yoğunlaşma ısısı ve multitabaka sorpsiyon ısısı arasındaki farkı göstermektedir (Van den Berg, 1984). Pozitif ΔH_k değerleri, materyal ile suyun endotermik etkileşimini gösterir. Daha düşük ΔH_k değerleri, monotabaka molekülleri ve yığın sıvı arasındaki ara enerji seviyelerinde daha az bir kuvvetle bağlı multitabaka moleküllerinin varlığını gösterir (Al-Muhtaseb vd., 2004a).

Monotabaka nem içeriği gıda maddesinin yüzeyi üzerinde sürekli bir adsorbe edilmiş monotabaka oluşturmak için gerekli suyun miktarıdır ve kurutulmuş gıda maddelerinin depolanması için optimum nem içeriğidir (Vagenas ve Marinos-Kouris, 1992). Gıda maddesinin su bağlama özelliklerinin belirlenmesinde fiziksel yapı ve katı yüzey alanı önemli bir rol oynar. BET

eşitliğinden elde edilen monotabaka nem içeriği değerleri kullanılarak ($a_w=0-0.4$) Eşitlik (2.4)'den hesaplanan yüzey alanı değerleri (m^2/g katı) farklı sıcaklıklar için Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Adsorpsiyon ve desorpsiyon için farklı sıcaklıklardaki yüzey alanları

Baklagil	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Fasulye	178.65	151.54	135.02	289.78	248.02	257.16
Nohut	305.98	269.94	244.98	346.33	302.49	257.34
Yeşil mercimek	164.92	164.46	131.18	267.50	250.28	226.87
Börülce	378.42	353.00	227.86	361.12	326.70	269.13
Bakla	226.52	224.44	192.10	300.09	277.56	245.02

Fasulyenin desorpsiyonu hariç tüm baklagillerde sıcaklığın artması ile BET eşitliğinden elde edilen ve polar bölgelerin kullanılabilirliğinin bir göstergesi olan monotabaka nem içeriği azaldığından dolayı hidrofilik bağlanmanın gerçekleştiği yüzeylerin alanı azalmıştır. Sıcaklığın artmasıyla monotabaka nem içeriğinin azalması, sorpsiyon kapasitesinin artan sıcaklıkla azalması anlamına gelmektedir. BET eşitliğinden elde edilen monotabaka nem içeriği ve sıcaklık arasında hiçbir korelasyon olmadığından dolayı, fasulyenin desorpsiyonu için yüzey alanı ve sıcaklık arasında hiçbir korelasyon gözlenmemiştir. Börülce hariç, adsorpsiyon için monotabaka nem içeriği değerleri desorpsiyona kıyasla daha düşük olduğundan dolayı, adsorpsiyon için yüzey alanı değerleri desorpsiyon için yüzey alanı değerlerinden daha düşük bulunmuştur. Birçok biopolimerik maddenin yüzey alanının büyük olması, bu maddelerdeki mikroporoz yapıdan ileri gelmektedir (Calzetta Resio vd., 2000). Kritik nem içeriğinin bilinmesi gıda maddelerinin maksimum fiziksel ve kimyasal stabilitesi ile aynı ana denk geldiği için pratik bir öneme sahiptir (Şahbaz vd., 1999).

Modifiye BET eşitliğindeki (Eşitlik 2.6) A_0 , B_0 ve C katsayılarının değerleri fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve baklanın adsorpsiyon ve desorpsiyon için Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11. Baklagillerin adsorpsiyon ve desorpsiyonu için A_0 , B_0 ve C katsayıları

Baklagil	Adsorpsiyon				Desorpsiyon			
	A_0	B_0	C	r^2	A_0	B_0	C	r^2
Fasulye	6.606	-0.0635	2.012	0.9913	9.593	-0.0602	2.480	0.9971
Nohut	11.05	-0.0949	0.8658	0.9854	11.83	-0.0932	1.757	0.9996
Yeşil mercimek	6.158	-0.0509	4.162	0.9940	8.999	-0.0562	4.633	0.9983
Börülce	14.18	-0.1458	0.7933	0.9874	12.90	-0.1100	1.892	0.9986
Bakla	9.002	-0.0640	3.220	0.9850	9.908	-0.0609	4.364	0.9964

Bu katsayılar kullanılarak denge nem içeriğine sıcaklık ve su aktivitesinin birlikte etkisini ifade eden Eşitlik (2.6) yardımıyla belirli bir sıcaklık ve $a_w \leq 0.4$ deki su aktivitesi değeri için denge nem içeriği bulunabilir.

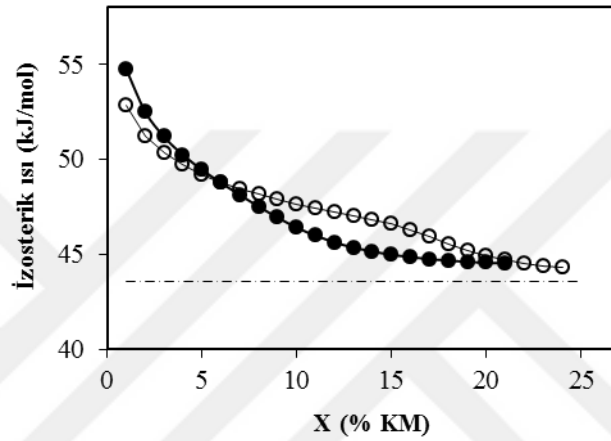
Histeresis etkiye rağmen, Eşitlik (2.7) kullanılarak hesaplanan monotabaka su içeriğine karşılık gelen su aktivitesi $(a_w)_x$ değerleri benzer idi: fasulyenin adsorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.414$; fasulyenin desorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.389$; nohutun adsorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.518$; nohutun desorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.432$; yeşil mercimeğin adsorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.329$; yeşil mercimeğin desorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.317$; börülcenin adsorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.529$; börülcenin desorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.421$; baklanın adsorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.358$; baklanın desorpsiyonu için $(a_w)_x = 0.324$.

Eşitlik (2.7) kullanılarak hesaplanan monotabaka su içeriğine karşılık gelen su aktivitesi $(a_w)_x$ sıcaklıktan bağımsız olduğundan (C katsayısı sıcaklıktan bağımsız), pratik uygulamalar için tek bir monotabaka değeri kabul edilir. Monotabaka su aktivitesi $(a_w)_x$, monotabakanın elde edildiği su aktivitesi değerini göstermektedir. Monotabaka su aktivitesi $(a_w)_x$ 'nin bilinmesi, monotabaka nem içeriğine sahip olması için ürünün depolama koşullarını belirlediğinden dolayı önemlidir (Menkov vd., 1999). Fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik bozulmaları asgariye indirmek için baklagillerin monotabaka su aktivitesinin altındaki koşullarda depolanmaları gerekmektedir. Baklagiller belirli bir sıcaklıkta monotabaka nem içeriklerinden daha düşük nem içeriklerinde stabilitelerini sürdürebilirler. Bu nedenle, $(a_w)_x$ 'de depolanan baklagiller, çalışma koşullarındaki tüm aralıklarda minimum bozunma ile birlikte raf ömrünü uzatmak için monotabaka nem içeriğine eşit bir nem içeriğine sahip olmaktadır.

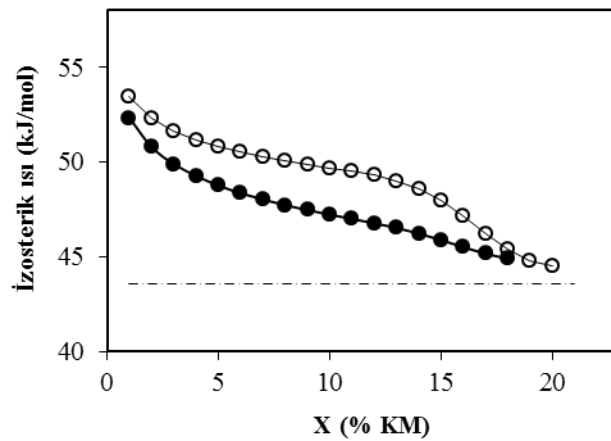
4.3. Sorpsiyon İzosterik Isısı, Sorpsiyon Entropisi ve Gibbs Serbest Enerjisi

Biyolojik sistemlerdeki ısı ve kütle transferinin enerji gereksinimleri termodinamik yaklaşımlar için çalışılmıştır (Rizvi ve Benado, 1984). Adsorpsiyon ısısı adsorpsiyonda salınan enerjinin bir ölçüsüdür. Desorpsiyon ısısı, su buharı molekülleri ve adsorbent yüzeyi arasındaki moleküllerarası kuvvetleri kırmak için gerekli olan enerjidir. Bu nedenle, sorpsiyon ısısı su buharı ve sorpsiyon uçları arasındaki moleküllerarası çekim kuvvetlerinin bir göstergesi olarak düşünülür (Wang ve Brennan, 1991). Sorpsiyon izosterik ısısı su buharı molekülleri ve adsorbent yüzeyi arasındaki etkileşim kuvvetleri hakkında ve su-su etkileşimi ile katı-su etkileşiminin derecesi hakkında bilgi verir. Maksimum izosterik ısı değeri en kuvvetli bağ bölgelerini ve en büyük katı-su etkileşimini gösterir. Belirli bir nem içeriğindeki sorpsiyon ısılarının değerleri, sorbe edilen suyun durumunun ve belirli depolama koşullarında gıda maddesinin fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik kararlılığının bir göstergesidir. Ayrıca sorpsiyon ısıları enerji tüketim hesaplamaları ve kurutma cihazlarının tasarımı için gerekli verileri sağlar (McMinn ve Magee, 2003).

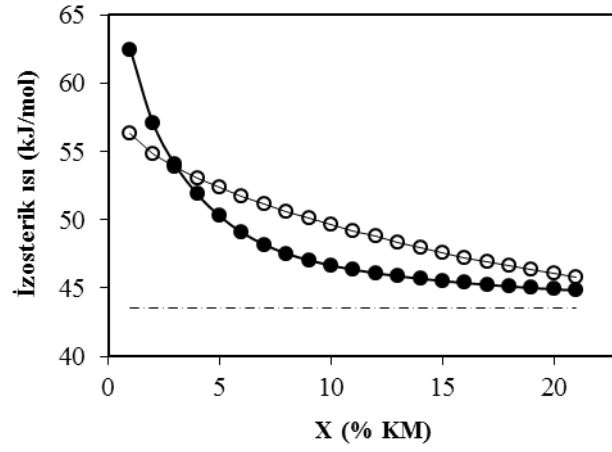
Keyfi olarak seçilen spesifik nem içeriklerinde baklagillerin su aktivitesini belirlemek için, deneysel verileri en iyi temsil eden model kullanıldı. Eşitlik (2.11)'in integrali alınarak düzenlenmesiyle elde edilen doğru denklemde $1/T$ 'ye karşı $\ln a_w$ 'nin grafiğe geçirilmesiyle elde edilen doğrunun eğiminden $(-q_{st}/R)$ net sorpsiyon izosterik ısısı (q_{st}), Eşitlik 2.12'den de sorpsiyon izosterik ısısı (Q_{st}) bulundu. Adsorpsiyon ve desorpsiyon izosterik ısıları (Q_{st}) denge nem içeriğinin (% KM) fonksiyonu olarak grafiğe geçirildi (Şekil 4.66-4.70). Bu yöntemin hesaplanabilmesi için sorpsiyon izotermelerinin en az üç farklı sıcaklıkta belirlenmesi gerekmektedir (Rizvi, 1995).



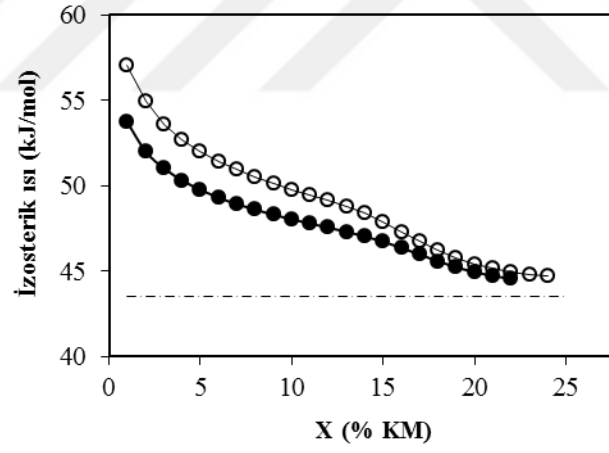
Şekil 4.66. Fasulyenin sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



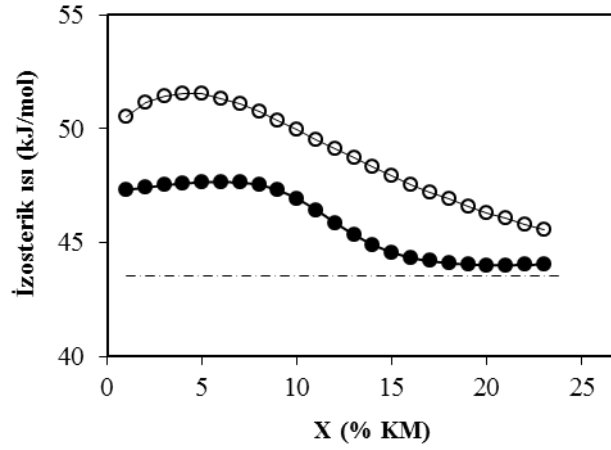
Şekil 4.67. Nohutun sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



Şekil 4.68. Yeşil mercimeğin sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.69. Börülcenin sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.70. Baklanın sorpsiyon izosterik ısısının nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)

Düşük nem içeriklerinde, sorpsiyon izosterik ısıları suyun buharlaşma gizli ısısından daha yüksek idi. Bu durum, su molekülleri ve sorpsiyon polar uçları arasındaki bağ enerjilerinin sıvı fazda saf su moleküllerini bir arada tutan enerjiden daha yüksek olduğunu gösterir (Al-Muhtaseb vd., 2004b).

Fasulye için, % 1 den % 21'e değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon izosterik ısısının 54.76 kJ/mol'den saf suyun buharlaşma gizli ısısına (ortalama sıcaklık 35°C'de 43.53 kJ/mol) yakın bir değer olan 44.51 kJ/mol'e azaldığı gözlenmiştir. Fasulye için, % 1 den % 24'e değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla desorpsiyon izosterik ısısının 52.86 kJ/mol'den saf suyun buharlaşma gizli ısısına yakın bir değer olan 44.28 kJ/mol'e azaldığı gözlenmiştir.

Nohut için, % 1 den % 18'ye değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon izosterik ısısının 52.33 kJ/mol'den saf suyun buharlaşma gizli ısısına (ortalama sıcaklık 35°C'de 43.53 kJ/mol) yakın bir değer olan 44.89 kJ/mol'e azaldığı gözlenmiştir. Nohut için, % 1 den % 20'e değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla desorpsiyon izosterik ısısının 53.42 kJ/mol'den saf suyun buharlaşma gizli ısısına yakın bir değer olan 44.50 kJ/mol'e azaldığı gözlenmiştir.

Yeşil mercimek için, % 1 den % 21'ye değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon izosterik ısısının 62.43 kJ/mol'den saf suyun buharlaşma gizli ısısına (ortalama sıcaklık 35°C'de 43.53 kJ/mol) yakın bir değer olan 44.82 kJ/mol'e azaldığı gözlenmiştir. Yeşil mercimek için, % 1 den % 21'e değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla desorpsiyon izosterik ısısının 56.33 kJ/mol'den saf suyun buharlaşma gizli ısısına yakın bir değer olan 45.79 kJ/mol'e azaldığı gözlenmiştir.

Börülce için, % 1 den % 22'ye değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon izosterik ısısının 53.71 kJ/mol'den saf suyun buharlaşma gizli ısısına (ortalama

sıcaklık 35°C’de 43.53 kJ/mol) yakın bir değer olan 44.55 kJ/mol’e azaldığı gözlenmiştir. Börülce için, % 1 den % 24’e değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla desorpsiyon izosterik ısısının 57.04 kJ/mol’den saf suyun buharlaşma gizli ısısına yakın bir değer olan 44.68 kJ/mol’e azaldığı gözlenmiştir.

Bakla için, % 1 den % 23’ye değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon izosterik ısısının 47.32 kJ/mol’den saf suyun buharlaşma gizli ısısına (ortalama sıcaklık 35°C’de 43.53 kJ/mol) yakın bir değer olan 44.03 kJ/mol’e azaldığı gözlenmiştir. Bakla için, % 1 den % 23’e değişen nem içeriklerinde nem içeriğinin artmasıyla desorpsiyon izosterik ısısının 50.51 kJ/mol’den saf suyun buharlaşma gizli ısısına yakın bir değer olan 45.59 kJ/mol’e azaldığı gözlenmiştir.

Gıdalardaki farklı polar gruplar, gıdaların boyut ve geometrisi nem içeriği-sorpsiyon izosterik ısısı ilişkisini belirlemektedir (McLaughlin ve Magee, 1998). Şekil 4.66-4.70’den görüldüğü gibi, nem içeriğindeki artma ile sorpsiyon izosterik ısısında belirgin bir azalma olmuştur. Bu durum, suyun bağlanma kuvvetinin daha yüksek nem seviyelerinde azaldığını doğrulamaktadır. Bu eğilim, Benado ve Rizvi (1985) ve Cenkowski vd. (1992)’nin yaptığı çalışmalar ile uyum içindedir. Benado ve Rizvi (1985)’ye göre, düşük nem içeriklerinde su, katının dış yüzeyi üzerindeki en kuvvetli bağlanma bölgelerinde sorplanır. Nem içeriği artarken, katı şişer ve suyun bağlanması için yeni yüksek enerji bölgeleri açılır ve böylece yüksek nem içeriklerinde sorpsiyon ısısı düşer. Sorpsiyon izosterik ısısı ne kadar yüksekse su da o kadar sıkı bir şekilde bağlanmıştır ve düşük denge nem içeriklerinde sorpsiyon için gerekli enerji daha yüksektir (Cadden, 1988). Düşük nem içeriklerindeki yüksek sorpsiyon ısısı, baklagillerdeki kuvvetli su-baklagil etkileşiminin bir göstergesidir. Daha düşük nem içeriklerinde sorpsiyon ısısın yüksek olması, ilk başlarda düşük nem içeriklerinde sorpsiyonun en aktif polar uçlarda meydana gelerek yüksek etkileşim enerjisine yol açmasıyla açıklanabilir. Düşük nem içeriklerinde, adsorpsiyon esas olarak sorpsiyon bölgelerinin genellikle aktif olduğu monomoleküler tabakalarda meydana gelmektedir (Iglesias ve Chirife, 1976b). Düşük nem içeriklerinde, monomoleküler bir tabaka oluşması için su molekülleri ile kaplanan baklagil yüzeyinde aşırı derecede aktif polar uçlar vardır. Daha yüksek nem içeriklerinde, polar uçlar işgal edildiğinden dolayı suyun sorpsiyonu için mevcut uçlar azalır, sorpsiyon daha az aktif uçlarda meydana gelir ve daha düşük sorpsiyon ısısı ortaya çıkar (Tsami vd., 1990; Wang ve Brennan, 1991). Yüksek nem içeriklerinde, sorpsiyon izosterik ısısı ve suyun buharlaşma gizli ısısı arasında önemli bir fark yok idi. Bazı gıdaların izosterik ısıları için benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Aviara ve Ajibola, 2002; Al-Muhtaseb vd., 2004b; Irzyniec ve Klimczak, 2003).

Fasulye için, adsorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 15’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 15’lik nem içeriğinin altında adsorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu

gözlenmiştir. Fasulye için, desorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 21’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 21’lik nem içeriğinin altında desorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir.

Nohut için, adsorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 18’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 18’lik nem içeriğinin altında adsorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir. Nohut için, desorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 20’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 20’lik nem içeriğinin altında desorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir.

Yeşil mercimek için, adsorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 17’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 17’lik nem içeriğinin altında adsorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir. Yeşil mercimek için, desorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 21’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 21’lik nem içeriğinin altında desorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir.

Börülce için, adsorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 21’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 21’lik nem içeriğinin altında adsorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir. Börülce için, desorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 20’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 20’lik nem içeriğinin altında desorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir.

Bakla için, adsorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 15’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 15’lik nem içeriğinin altında adsorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir. Bakla için, desorpsiyon izosterik ısısının nem içeriğindeki artış ile azalma eğiliminin % 21’lik nem içeriğine ulaşıldığında asimptotik olduğu ve % 21’lik nem içeriğinin altında desorpsiyon izosterik ısısının saf suyun buharlaşma gizli ısısından önemli ölçüde farklı olduğu gözlenmiştir.

Kavun tohumu, manyok, yonca küspesi ve bakla tohumunda saf suyun sorpsiyon ısısı değerine sırasıyla yaklaşık % 13, % 36, % 16, ve % 15’lik nem içeriği değerlerinde ulaşılmıştır (Aviara ve Ajibola, 2002).

Sorpsiyon ısının saf suyun buharlaşma gizli ısından daha yüksek olması, su molekülleri ve sorpsiyon uçları arasında bağlanma enerjisinin su moleküllerini sıvı fazda bir arada tutan enerjiden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Iglesias ve Chirife (1976b) sorpsiyon ısının suyun buharlaşma ısısına yaklaştığı nem içeriğinin suyun bir üründe serbest şekilde bulunduğ u noktanın bir göstergesi olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu nem seviyesi serbest su noktası olarak adlandırılır.

Fasulyede, tüm nem içeriklerinde genel olarak adsorpsiyon ve desorpsiyon izosterik ısıları arasında hiçbir önemli fark olmadığı gözlenmiştir. Ancak, fasulyede belirli bir nem içeriğinde adsorpsiyon ve desorpsiyon verilerinin karşılaştırılması, % 7'lik nem içeriğinin üzerinde desorpsiyon izosterik ısının adsorpsiyon izosterik ısından daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu muhtemelen suyun uzaklaştırılmasını daha da kolaylaştıran dehidrasyon sırasında üründe meydana gelen yapısal değişimlerin bir göstergesidir (Yanniotis ve Zarmboutis, 1996). Gıda maddesini dehidrate etmek için sağlanması gereken enerjinin bir ölçüsü olan desorpsiyon ısı ve adsorpsiyon ısı arasındaki fark % 7'lik nem içeriğinin altında azalmıştır.

Nohut, börölce ve baklada, tüm nem içeriklerinde desorpsiyon izosterik ısının adsorpsiyon izosterik ısından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, katının yüzeyi üzerinde daha polar uçların var olduğunu ve su molekülleri ile yüzey arasındaki bağ enerjisinin daha yüksek olduğunu gösterir (Tsami, 1991). Desorpsiyon izosterik ısının adsorpsiyon izosterik ısından daha yüksek olması, desorpsiyon işleminde gerekli enerjinin adsorpsiyon işleminde gerekli olan enerjiden daha büyük olduğunu gösterir. Nohutta, % 4 ve % 16 (% KM) arasındaki nem içeriklerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon izosterik ısıları oldukça farklı idi.

Yeş il mercimekte, % 4 ve % 21 (% KM) arasındaki nem içeriklerinde desorpsiyon izosterik ısının adsorpsiyon izosterik ısından daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Fasulyede % 1 ve % 5, yeş il mercimek için % 1 ve % 3'lük nem içerikleri arasında adsorpsiyon izosterik ısı desorpsiyon izosterik ısından daha büyük idi. Bu durum bağı lı suyun konumunu ve katı-su etkileşiminin su molekülleri arasındaki etkileşimden daha büyük olduğunu gösterir.

Börölcede % 17'lik nem içeriğinden itibaren nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri için izosterik ısı değerleri arasındaki farkların azaldığı gözlenmiştir.

Baklada, tüm nem içeriklerinde desorpsiyon izosterik ısının adsorpsiyon izosterik ısından oldukça yüksek olması ve desorpsiyon için artan enerji ihtiyacı yüzeydeki daha polar bölgelerin ve su moleküllerinin daha az hareketliliğ inin bir göstergesidir (McMinn ve Magee, 2003). Bu durum sorpsiyon işlemi sırasında histeresis olayının varlığını kanıtlar. Ancak histeresinin derecesi ve sorpsiyon izosterik ısındaki değişim arasında hiçbir ilişki yoktur (Al-Muhtaseb vd., 2004b).

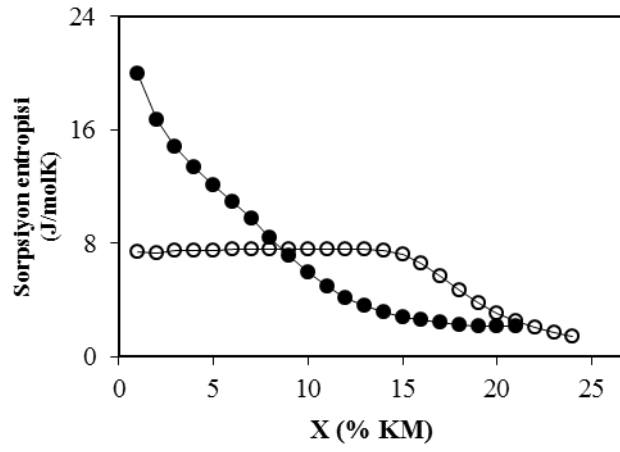
Bazı gıdalar için, nem içeriğinin sorpsiyon izosterik ısısına benzer etkileri rapor edilmiştir (Mazza ve LeMaguer, 1978; Palou vd., 1997; Myhara vd., 1998; Vazquez vd., 1999; Lasekan ve

Lasekan, 2000; Aviara ve Ajibola, 2002; Aviara vd., 2002; McMinm ve Magee, 2003; Kumar vd., 2012; Martinez-Las Heras vd., 2014; Silva vd., 2014).

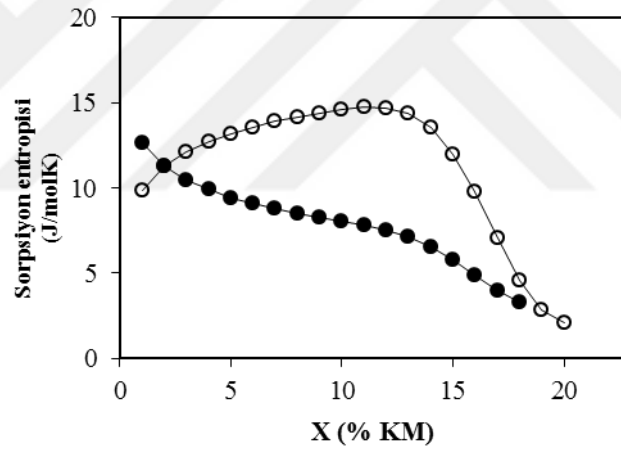
Aynı denge nem içeriği değerinde desorpsiyon ve desorpsiyon izosterik ısıları arasında farklılıkları açıklamak için çeşitli teoriler ileri sürülmüştür. Her bir gıda çeşitli bileşenlerin kompleks bir karışımı olduğundan dolayı gıdalardaki bu olay için tek bir açıklama yapmak mümkün değildir. Bu bileşenler sadece suyu sorbe etmez, ayrıca kendi aralarında da etkileşirler. Bu durum farklı su sorplama kapasitesinin ortaya çıkmasına neden olur (Telis vd., 2000).

Eşitlik (2.2) ve Eşitlik (2.3)'ün $X=X_mCKa_w/[(1-Ka_w)(1-Ka_w+CKa_w)]$ şeklindeki GAB eşitliğinde yerine konulması ile elde edilen monotabaka nem içeriklerine (Fasulye: adsorpsiyon için % 5.891, desorpsiyon için % 7.915; Nohut: adsorpsiyon için % 58.17, desorpsiyon için % 10.31; Yeşil mercimek: adsorpsiyon için % 3.664, desorpsiyon için % 7.487; Börülce: adsorpsiyon için % 3.925, desorpsiyon için % 5.053; Bakla: adsorpsiyon için % 6.992, desorpsiyon için % 8.591) karşılık gelen ve onunla aynı değerdeki sıcaklıktan bağımsız olan denge nem içeriklerinde nohut için desorpsiyon izosterik ısısı 49.62 kJ/mol; fasulye, yeşil mercimek, börülce ve bakla için adsorpsiyon ve desorpsiyon izosterik ısıları sırasıyla 48.83 kJ/mol ve 48.17 kJ/mol; 52.73 kJ/mol ve 50.91 kJ/mol; 50.36 kJ/mol ve 51.96 kJ/mol; 47.64 kJ/mol ve 50.51 kJ/mol olarak bulunmuştur. Nohutun adsorpsiyonu için monotabaka nem içeriği yüksek olduğundan, nohutun adsorpsiyonu için monotabaka nem içeriğine karşılık gelen adsorpsiyon izosterik ısısı hesaplanmamıştır. Bu değerler Eşitlik (2.2) ve (2.3) kullanılarak bulunan $H_1 (\Delta H_c - \Delta H_k + H_L)$ monotabaka sorpsiyon ısısı değerleriyle benzer değildir. Bu durum, tüm baklagillerde deneysel verileri en iyi temsil eden eşitliğin GAB modeli olmadığını göstermektedir. Nohutun adsorpsiyonu için bulunan monotabaka nem içeriği değeri incelenen nem içeriği aralığının dışında kaldığı için nohut için adsorpsiyon izosterik ısı değeri hesaplanmamıştır.

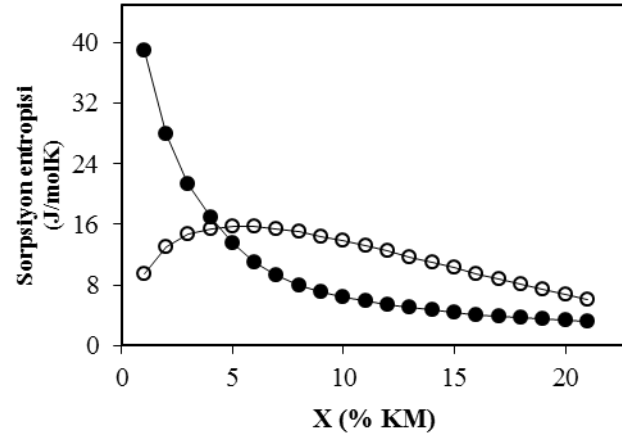
Sorpsiyon entropisi Eşitlik (2.13) yardımıyla bulundu. Keyfi olarak seçilen spesifik nem içeriklerinde baklagillerin su aktivitesini belirlemek için, deneysel verileri en iyi temsil eden model kullanıldı. $1/T'$ 'ye karşı $-\ln a_w$ değerlerinin grafiğe geçirilmesiyle elde edilen doğrunun kaymasından $(-\Delta S/R)$ sorpsiyon entropisi bulundu. Şekil 4.71-4.75, nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak baklagillerin sorpsiyon entropisini göstermektedir.



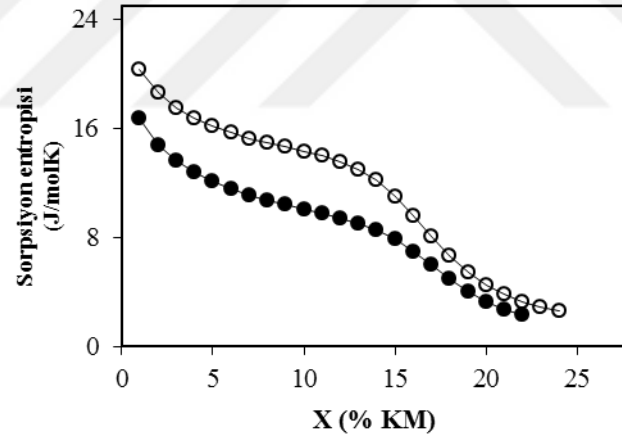
Şekil 4.71. Fasulyenin sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



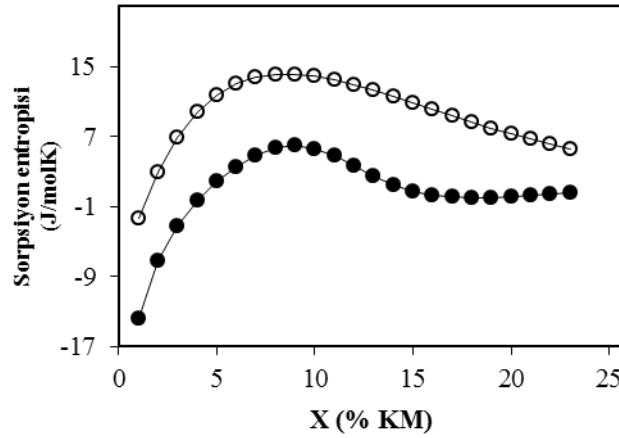
Şekil 4.72. Nohutun sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



Şekil 4.73. Yeşil mercimeğin sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



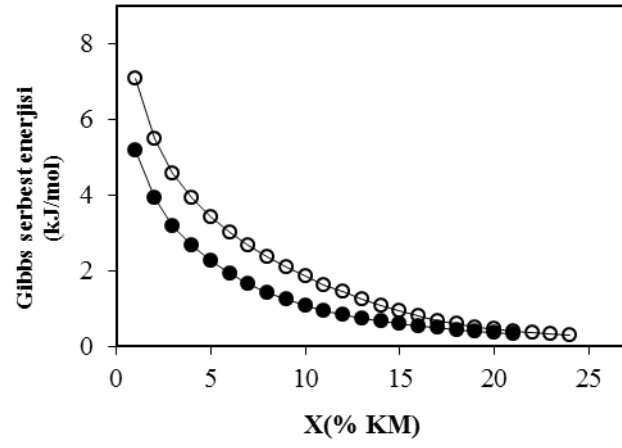
Şekil 4.74. Börülcenin sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



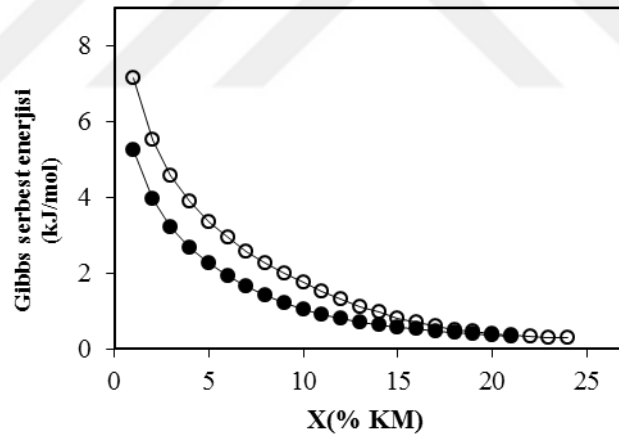
Şekil 4.75. Baklanın sorpsiyon entropisinin nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)

Sorpsiyon entropisi, belirli bir enerji seviyesinde mevcut sorpsiyon bölgelerinin sayısı ile orantılıdır. Nohut, börülce ve baklada desorpsiyon entropisi adsorpsiyon entropisinden daha yüksektir. Bu davranış, su moleküllerinin desorpsiyon sırasında adsorpsiyondan daha hareketli olduğunu göstermektedir. Börülcede sorpsiyon entropisi nem içeriğindeki artma ile azalmıştır. Baklada, özellikle düşük nem içeriklerinde sorpsiyon entropisi nem içeriğine kuvvetli bir bağımlılık göstermiştir. Baklada, sorpsiyon entropisi % 10 nem içeriğine kadar artmış, daha sonra nem içeriğindeki artış ile azalmıştır. Baklada, düşük nem içeriklerinde adsorpsiyon entropisi negatif idi. Iglesias vd. (1976) negatif adsorpsiyon entropi değerlerinin kimyasal adsorpsiyonun varlığından ve/veya adsorbentteki yapısal değişikliklerden ileri gelebileceğini ifade etmişlerdir. Bakla hariç tüm baklagillerde nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon entropisi azalmıştır. Börülcede nem içeriğinin artmasıyla adsorpsiyon ve desorpsiyon entropilerinde benzer bir değişim gözlenmiştir. Fasulyenin desorpsiyon entropisi %15'lik nem içeriğine kadar sabit kalmış, daha sonra nem içeriğinin artmasıyla azalmıştır. Fasulye ve yeşil mercimekte, düşük nem içeriklerinde desorpsiyonun sorpsiyon entropisi adsorpsiyon sorpsiyon entropisinden daha düşük değerler göstermiştir. Bu sonuçlar, nişasta tozlarının desorpsiyon entropisi için Al-Muhtaseb vd. (2004b) tarafından rapor edilen sonuçlar ile sarımsağın desorpsiyon entropisi için Madamba vd. (1996) tarafından rapor edilen sonuçlara benzerdir.

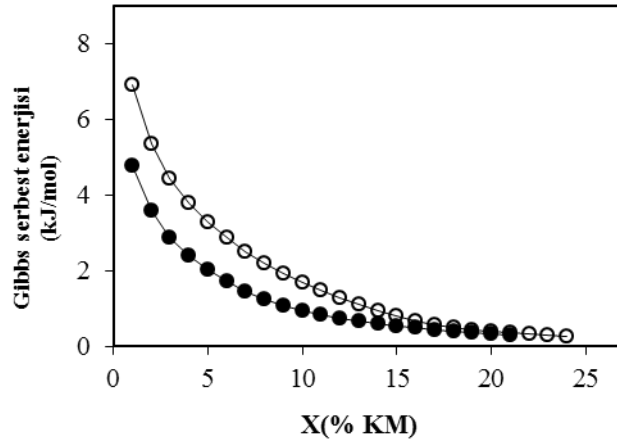
Şekil 4.76-4.90'da fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve baklanın Gibbs serbest enerjisinin 25°C'de, 35°C'de ve 45°C'de nem içeriği ile değişimi gösterilmiştir.



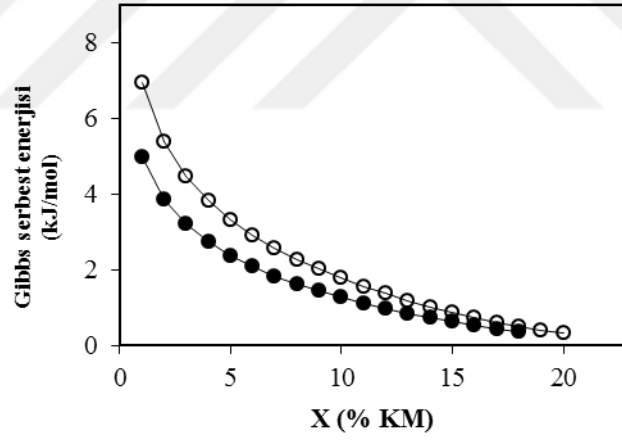
Şekil 4.76. Fasulyenin Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



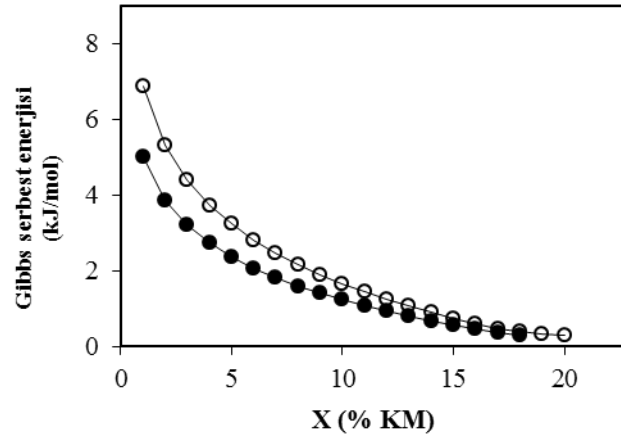
Şekil 4.77. Fasulyenin Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



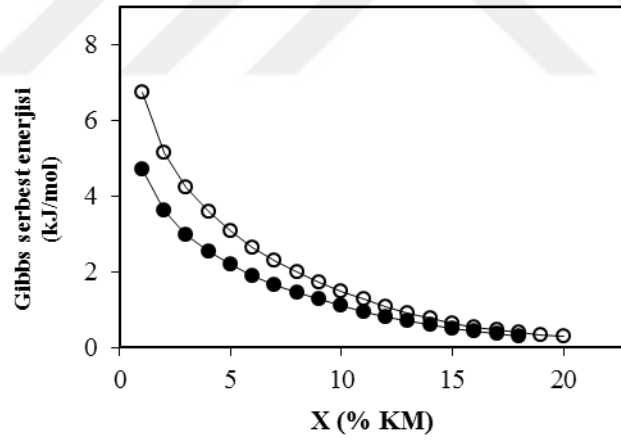
Şekil 4.78. Fasulyenin Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



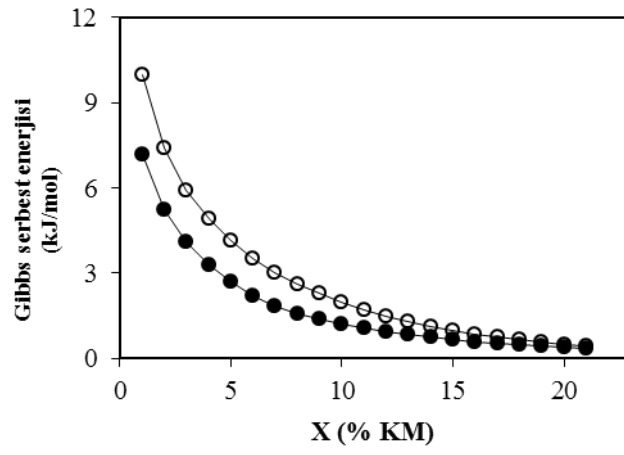
Şekil 4.79. Nohutun Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



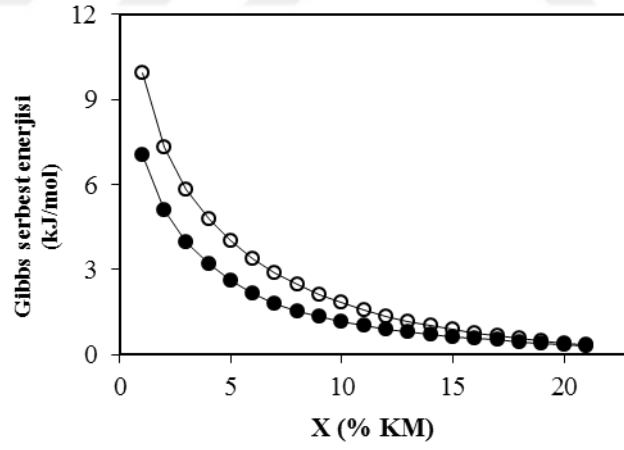
Şekil 4.80. Nohutun Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



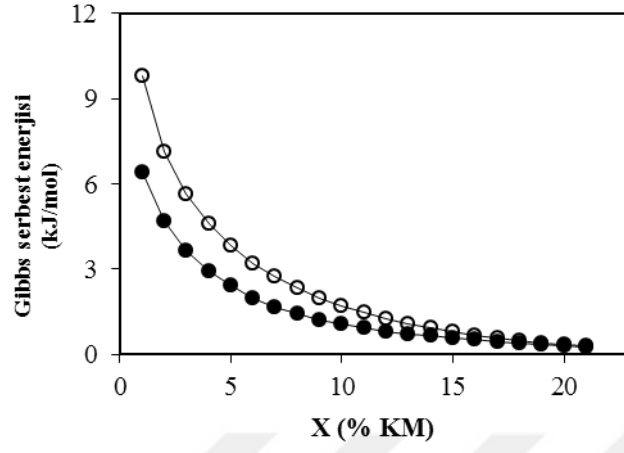
Şekil 4.81. Nohutun Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



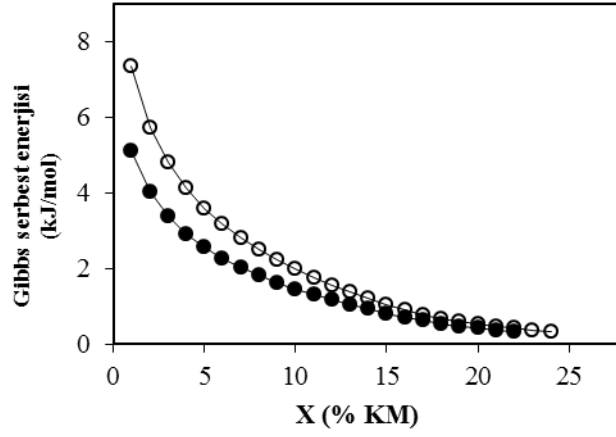
Şekil 4.82. Yeşil mercimeğin Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



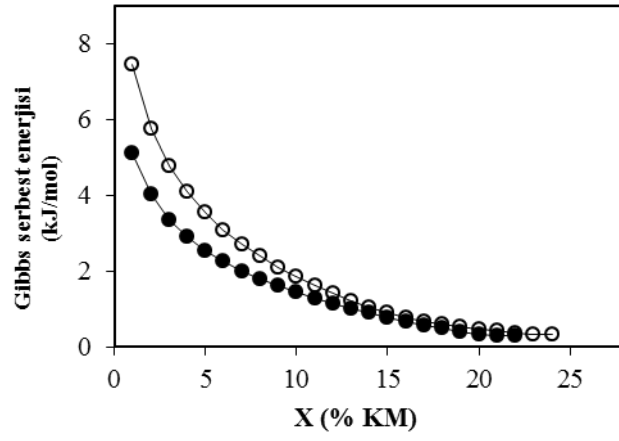
Şekil 4.83. Yeşil mercimeğin Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



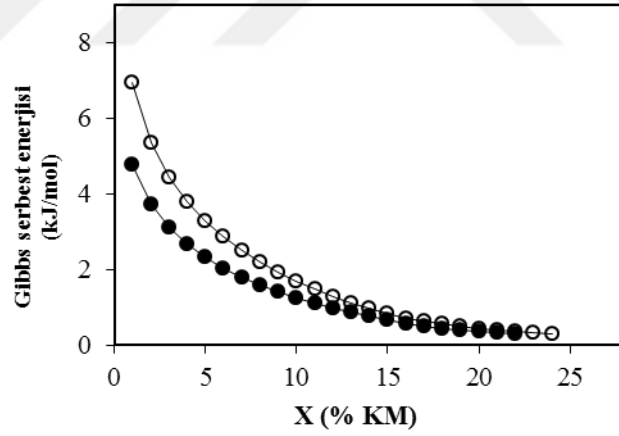
Şekil 4.84. Yeşil mercimeğin Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



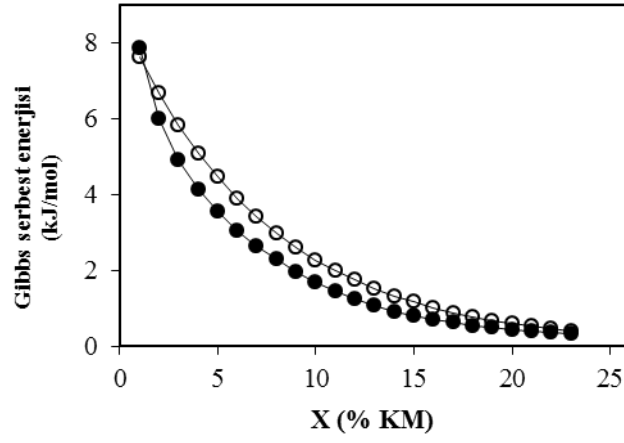
Şekil 4.85. Börülcenin Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



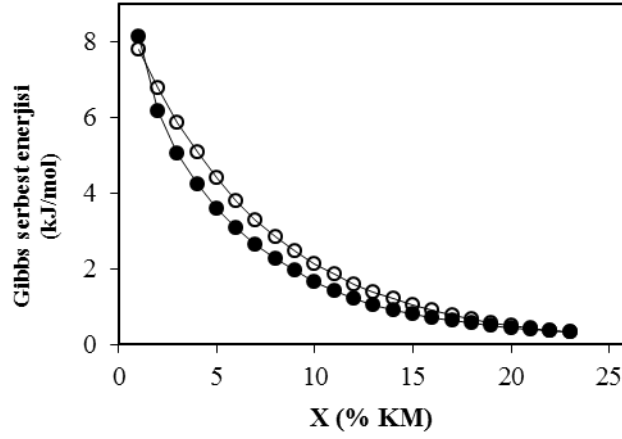
Şekil 4.86. Börülcenin Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



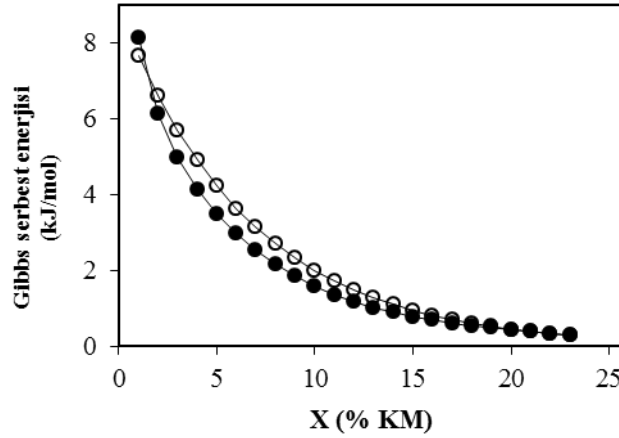
Şekil 4.87. Börülcenin Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



Şekil 4.88. Baklanın Gibbs serbest enerjisinin 25 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.89. Baklanın Gibbs serbest enerjisinin 35 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.90. Baklanın Gibbs serbest enerjisinin 45 °C'de nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)

Şekil 4.76-4.90'dan görüldüğü gibi, tüm baklagillerde nem içeriğinin artmasıyla Gibbs serbest enerjisi üstel bir şekilde azalmıştır. Tüm baklagillerde, desorpsiyon için Gibbs serbest enerjisi değerleri adsorpsiyon için Gibbs serbest enerjisi değerlerinden büyüktür.

Gibbs serbest enerjisi sorpsiyonun gerçekleşeceği polar uçları meydana getirmek için gerekli enerjiyle ilgilidir. Bu nedenle denge nem içeriğindeki artış ile azalır. Düşük nem içeriklerinde, Gibbs serbest enerjisindeki değişim daha fazla olmuştur. Nem içeriği artarken sorpsiyon yapacak boş uçlar daha zayıf olduğundan dolayı sorpsiyon enerji yüzeyi azalır ve sorpsiyon daha zor olur, böylece yüksek nem içeriklerinde Gibbs serbest enerjisi giderek sıfıra yaklaşır ve sorpsiyon neredeyse imkansız olur (Taitano vd., 2012). Çeşitli gıda maddeleri için benzer sonuçlar elde edilmiştir (Aouaini vd., 2015; Yogendrarajah vd., 2015).

4.4. Entalpi-Entropi Dengeleme Teorisi

Farklı nem içeriklerinde, ΔS 'ye karşı Q_{st} 'nin grafiğe geçirilmesiyle doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Bu durum, dengeleme teorisinin incelenen nem içeriği aralıklarında uygulanabileceğini gösterir.

İzokinetik sıcaklık deneni T_β ve α değerleri lineer regresyon analizi ile bulunmuştur. Adsorpsiyon ve desorpsiyon için Eşitlik (2.16)'daki izokinetik sıcaklık ve α parametreleri sırasıyla fasulye, nohut, yeşil mercimek ve börülce için 535.8 K, 43.32 kJ/mol ($r^2=0.9918$) ve 770.2 K, 42.67 kJ/mol ($r^2=0.5709$); 785.5 K, 41.39 kJ/mol ($r^2=0.9371$) ve 435.4 K, 44.20 kJ/mol ($r^2=0.5060$); 493.2 K, 43.42 kJ/mol ($r^2=0.9992$) ve 623.5 K, 42.37 kJ/mol ($r^2=0.4211$); 602.0 K, 42.45 kJ/mol ($r^2=0.9564$) ve 593.87 K, 42.26 kJ/mol ($r^2=0.9155$) olarak bulunmuştur. Sonuçlar, sorpsiyon entalpisi ve sorpsiyon entropisi arasındaki doğrusal ilişkinin tüm baklagillerde desorpsiyona kıyasla adsorpsiyonda daha yüksek regresyon katsayıları ile sağlandığını göstermiştir. Baklada sorpsiyon

entropisi ve sorpsiyon izosterik ısısı ilişkisinin doğrusal olmadığı gözlemlendiğinden T_β ve α değerleri hesaplanmamıştır.

Dengeleme teorisinin uygulanmasının geçerliliği harmonik ortalama sıcaklık değerinin hesaplanması ile sağlandı. Eşitlik (2.15)'deki harmonik ortalama sıcaklık tüm T_β değerlerinden oldukça farklı bir değer (307.8 K) olarak hesaplandı. Bu durum, bakla hariç tüm baklagillerin nem sorpsiyonu için izokinetik teorisinin uygun olduğunu doğrular. Sorpsiyon izosterik ısısı ve entropisi arasında doğrusal ilişki $T_\beta \neq T_{hm}$ olduğu durumunda geçerlidir. Hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon için T_β değerleri T_{hm} değerlerinden farklı bulunmuştur. $T_\beta > T_{hm}$ olduğundan prosesin entalpi kontrollü olduğu söylenebilir. Sonuçlar, entalpi-entropi dengeleme teorisi yada izokinetik teorisinin baklagillerin su sorpsiyonuna başarılı bir şekilde uygulanabileceğini ve bu prosesin entalpi kontrollü mekanizma ile meydana geldiğini göstermiştir.

Dengeleme teorisi ayrıca Eşitlik (2.17) kullanılarak sorpsiyon davranışının sıcaklık etkisini modellemek için kullanıldı. X ile $[\ln a_w/(1/T_\beta - 1/T)]$ bağımlılığının üstel olduğu Aguerre vd. (1986) tarafından ifade edilmiştir. Eşitlik (2.17)'nin geçerliliğini test etmek için, farklı sıcaklıklardaki denge verileri X'e karşı $\ln[\ln a_w/(1/T_\beta - 1/T)]$ olarak düz bir doğru verecek şekilde grafiğe geçirildi ve hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon için bakla hariç iyi bir uyum gözlenmiştir. Bakla için T_β değerleri hesaplanmadığından, Eşitlik (2.17) kullanılarak sorpsiyon davranışının sıcaklık etkisi modellenmemiş ve K_a ile K_b değerleri hesaplanmamıştır. Bakla hariç tüm baklagillerin adsorpsiyonu ve desorpsiyonu için Eşitlik (2.17)'nin sabitleri K_a (K) ve K_b 'nin değerleri Tablo 4.12 ve Tablo 4.13'de gösterilmiştir.

Tablo 4.12.Baklagillerin adsorpsiyonu için K_a ve K_b sabitleri

Baklagil	Adsorpsiyon					
	25 °C		35 °C		45 °C	
	K_a	K_b	K_a	K_b	K_a	K_b
Fasulye	1205.3	0.8782	1275.4	0.8713	1185.0	0.8777
Nohut	953.1	0.8734	1061.9	0.8596	989.7	0.8599
Y.Mercimek	1740.8	0.8684	1817.8	0.8661	1775.6	0.8649
Börülce	1198.1	0.8850	1291.7	0.8777	1177.3	0.8801

Tablo 4.13.Baklagillerin desorpsiyonu için K_a ve K_b sabitleri

Baklagil	Desorpsiyon					
	25 °C		35 °C		45 °C	
	K_a	K_b	K_a	K_b	K_a	K_b
Fasulye	1373.8	0.8748	1390.8	0.8704	1398.0	0.8699
Nohut	1461.9	0.8625	1519.1	0.8537	1462.1	0.8574
Y.Mercimek	2794.8	0.8622	2968.8	0.8547	3113.5	0.8487
Börülce	1744.5	0.8792	1793.8	0.8740	1718.0	0.8740

McMinn ve Magee (1998), patatesin adsorpsiyonu ve desorpsiyonu için K_a ve K_b değerlerini sırasıyla 3695 K, 4453 K ve 0.882, 0.877 olarak rapor etmişlerdir. Aguerre vd. (1986), pirincin adsorpsiyonu için K_a ve K_b değerlerini sırasıyla 8957 K, 0.842 olarak bulmuşlardır.

4.5. Net İntegral Entalpi ve Net İntegral Entropi

Eşitlik (2.20)'deki b ve b_0 sabitleri, BET eşitliğinden elde edilen monotabaka nem içeriği ve deneysel denge nem içeriği değerleri kullanılarak nonlineer regresyon analizi ile belirlendi. Eşitlik (2.20)'deki b ve b_0 sabitlerinin farklı sıcaklıklardaki değerleri adsorpsiyon ve desorpsiyon için Tablo 4.14'de verilmiştir.

Tablo 4.14. b ve b_0 sabitlerinin farklı sıcaklıklardaki değerleri

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Fasulye	b	0.8973	0.9173	0.9304	0.7906	0.8193	0.8035
	b_0	2.679	3.582	3.224	3.402	4.032	3.203
	r^2	0.9982	0.9958	0.9938	0.9949	0.9944	0.9946
Nohut	b	0.7488	0.7651	0.7853	0.6975	0.7262	0.7629
	b_0	1.392	1.579	1.394	2.472	2.626	2.800
	r^2	0.9955	0.9946	0.9940	0.9957	0.9953	0.9961
Yeşil mercimek	b	0.8998	0.8917	0.9261	0.7921	0.7979	0.8113
	b_0	6.879	5.592	7.967	6.532	6.257	6.515
	r^2	0.9939	0.9953	0.9871	0.9968	0.9963	0.9946
Börülce	b	0.7475	0.7535	0.8409	0.7407	0.7569	0.7987
	b_0	1.156	1.178	1.716	2.485	2.458	2.877
	r^2	0.9968	0.9965	0.9931	0.9951	0.9937	0.9965
Bakla	b	0.8384	0.8361	0.8698	0.7806	0.7880	0.8113
	b_0	6.429	5.947	8.305	5.941	6.092	7.030
	r^2	0.9973	0.9979	0.9943	0.9958	0.9951	0.9959

Eşitlik (2.21) kullanılarak hesaplanan farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda baklagillerin yüzey potansiyeli (yayılma basıncı) değerleri Tablo 4.15-4.19'de verilmiştir.

Tablo 4.15.Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda fasulyenin yüzey potansiyeli

	a_w	Yüzey potansiyeli (J/m ²)		
		25 °C	35 °C	45 °C
Adsorpsiyon	0.1	0.0100	0.0133	0.0126
	0.2	0.0195	0.0253	0.0242
	0.3	0.0288	0.0365	0.0352
	0.4	0.0381	0.0475	0.0462
	0.5	0.0478	0.0586	0.0576
	0.6	0.0582	0.0704	0.0697
	0.7	0.0698	0.0835	0.0833
	0.8	0.0835	0.0989	0.0997
	0.9	0.1011	0.1190	0.1216
Desorpsiyon	0.1	0.0122	0.0146	0.0124
	0.2	0.0230	0.0271	0.0235
	0.3	0.0330	0.0384	0.0339
	0.4	0.0425	0.0491	0.0439
	0.5	0.0520	0.0596	0.0539
	0.6	0.0616	0.0702	0.0642
	0.7	0.0716	0.0815	0.0751
	0.8	0.0826	0.0938	0.0870
	0.9	0.0952	0.1082	0.1009

Tablo 4.16.Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda nohutun yüzey potansiyeli

	a_w	Yüzey potansiyeli (J/m ²)		
		25 °C	35 °C	45 °C
Adsorpsiyon	0.1	0.0054	0.0063	0.0058
	0.2	0.0110	0.0127	0.0118
	0.3	0.0167	0.0192	0.0181
	0.4	0.0227	0.0260	0.0246
	0.5	0.0290	0.0330	0.0317
	0.6	0.0358	0.0406	0.0393
	0.7	0.0433	0.0489	0.0478
	0.8	0.0516	0.0581	0.0574
	0.9	0.0612	0.0689	0.0689
Desorpsiyon	0.1	0.0092	0.0100	0.0110
	0.2	0.0176	0.0192	0.0210
	0.3	0.0257	0.0280	0.0305
	0.4	0.0335	0.0364	0.0398
	0.5	0.0413	0.0449	0.0490
	0.6	0.0492	0.0535	0.0584
	0.7	0.0573	0.0624	0.0683
	0.8	0.0660	0.0720	0.0791
	0.9	0.0754	0.0825	0.0912

Tablo 4.17.Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda yeşil mercimeğin yüzey potansiyeli

	a_w	Yüzey potansiyeli (J/m ²)		
		25 °C	35 °C	45 °C
Adsorpsiyon	0.1	0.0219	0.0192	0.0261
	0.2	0.0382	0.0345	0.0449
	0.3	0.0521	0.0478	0.0605
	0.4	0.0647	0.0601	0.0746
	0.5	0.0769	0.0722	0.0882
	0.6	0.0893	0.0845	0.1021
	0.7	0.1025	0.0977	0.1170
	0.8	0.1175	0.1127	0.1343
	0.9	0.1364	0.1315	0.1568
Desorpsiyon	0.1	0.0208	0.0208	0.0222
	0.2	0.0364	0.0366	0.0389
	0.3	0.0494	0.0499	0.0529
	0.4	0.0611	0.0619	0.0655
	0.5	0.0721	0.0732	0.0774
	0.6	0.0829	0.0844	0.0892
	0.7	0.0940	0.0959	0.1014
	0.8	0.1058	0.1082	0.1145
	0.9	0.1191	0.1221	0.1294

Tablo 4.18.Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda börülcenin yüzey potansiyeli

	a_w	Yüzey potansiyeli (J/m ²)		
		25 °C	35 °C	45 °C
Adsorpsiyon	0.1	0.0046	0.0048	0.0071
	0.2	0.0093	0.0098	0.0143
	0.3	0.0143	0.0151	0.0217
	0.4	0.0197	0.0207	0.0294
	0.5	0.0254	0.0267	0.0376
	0.6	0.0316	0.0332	0.0466
	0.7	0.0385	0.0405	0.0566
	0.8	0.0463	0.0488	0.0682
	0.9	0.0555	0.0585	0.0826
Desorpsiyon	0.1	0.0092	0.0095	0.0113
	0.2	0.0178	0.0183	0.0216
	0.3	0.0261	0.0269	0.0314
	0.4	0.0342	0.0353	0.0410
	0.5	0.0423	0.0438	0.0506
	0.6	0.0506	0.0525	0.0606
	0.7	0.0593	0.0617	0.0711
	0.8	0.0688	0.0718	0.0828
	0.9	0.0793	0.0831	0.0962

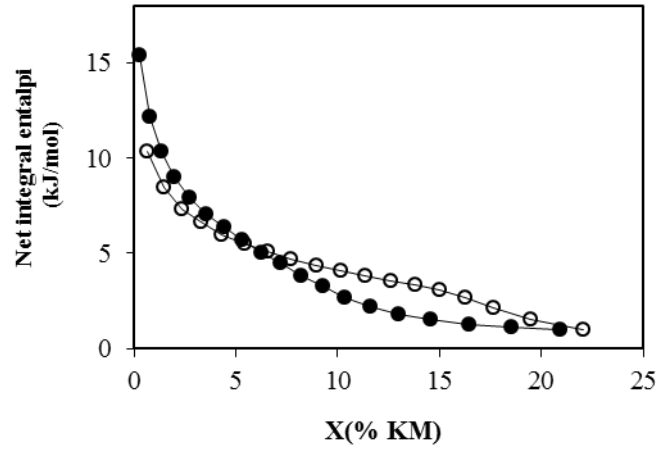
Tablo 4.19.Farklı su aktivitesi ve sıcaklıklarda baklanın yüzey potansiyeli

	a_w	Yüzey potansiyeli (J/m ²)		
		25 °C	35 °C	45 °C
Adsorpsiyon	0.1	0.0206	0.0201	0.0268
	0.2	0.0363	0.0356	0.0457
	0.3	0.0495	0.0489	0.0611
	0.4	0.0614	0.0610	0.0749
	0.5	0.0729	0.0726	0.0879
	0.6	0.0843	0.0842	0.1009
	0.7	0.0961	0.0963	0.1145
	0.8	0.1091	0.1096	0.1296
	0.9	0.1243	0.1251	0.1478
Desorpsiyon	0.1	0.0193	0.0204	0.0235
	0.2	0.0341	0.0359	0.0408
	0.3	0.0467	0.0490	0.0552
	0.4	0.0580	0.0609	0.0680
	0.5	0.0687	0.0721	0.0801
	0.6	0.0793	0.0831	0.0920
	0.7	0.0900	0.0944	0.1042
	0.8	0.1015	0.1064	0.1174
	0.9	0.1142	0.1199	0.1324

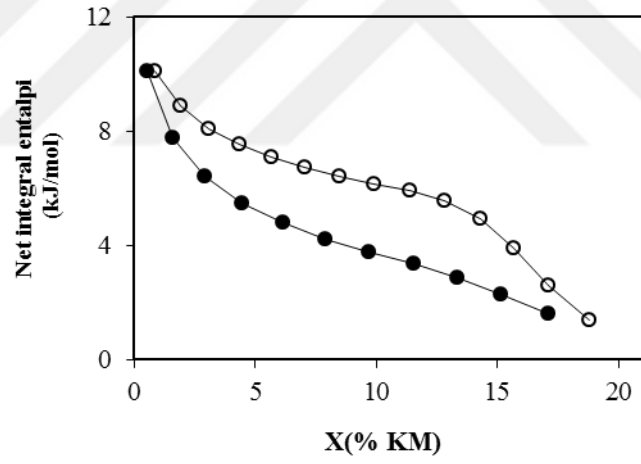
Tüm baklagillerde yüzey potansiyeli tüm sıcaklıklarda su aktivitesinin artması ile su aktivitesinin daha yüksek değerlerinde daha fazla olacak şekilde artmıştır. Tüm baklagillerde belirli bir su aktivitesinde yüzey potansiyeline sıcaklığın çok fazla bir etkisi olmamıştır. Fasina vd. (1999) fasulye için, Aviara ve Ajibola (2002) kavun tohumu için, Al-Muhtaseb vd. (2004b) nişasta tozu ve McMinn ve Magee (2003) patates için, Arslan ve Toğrul (2005) pul biber için ve Arslan ve Toğrul (2006) çay için benzer sonuçlar rapor etmişlerdir.

Keyfi olarak seçilen spesifik yüzey potansiyelindeki net integral sorpsiyon entalpisi q_{in} , deneysel verileri en iyi temsil eden modelden elde edilen denge verilerine Eşitlik (2.22)'nin uygulanmasıyla elde edildi. Eşitlik (2.22)'nin doğrusallaştırılmasıyla elde edilen doğru denkleminde $1/T$ 'ye karşı $\ln a_w$ 'nin grafiğe geçirilmesiyle elde edilen doğrunun eğiminden ($-q_{in}/R$) net integral sorpsiyon entalpisi q_{in} hesaplandı. Nem içeriği-net integral entalpisi değişimini veren grafikte, net integral sorpsiyon entalpisi (q_{in}) değerleri, integral sorpsiyon entalpisi (Q_{in}) değerlerine dönüştürülmeden doğrudan kullanılmıştır.

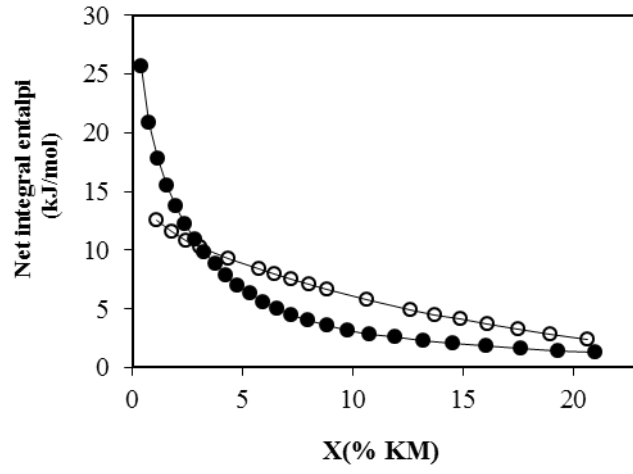
Nem içeriği ile net integral entalpideki değişim Şekil 4.91-95'de gösterilmiştir.



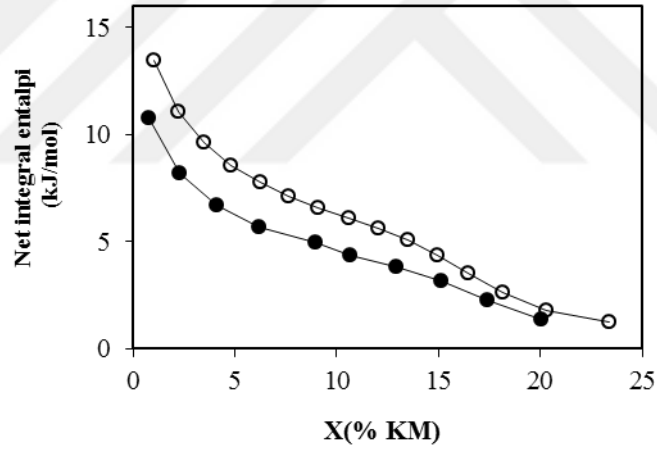
Şekil 4.91. Fasulyenin net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon, desorpsiyon)



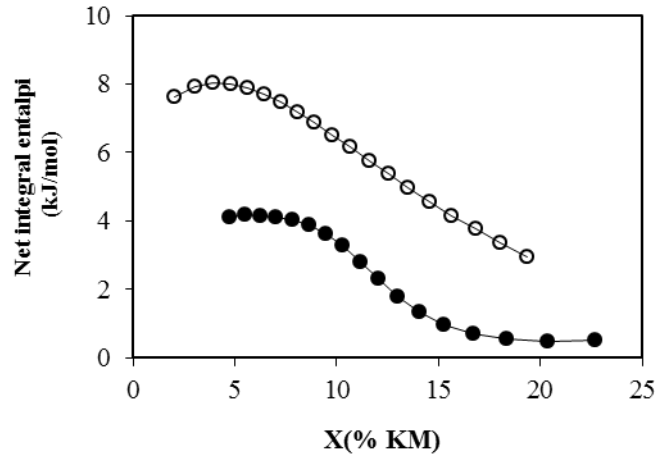
Şekil 4.92. Nohutun net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.93. Yeşil mercimeğin net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



Şekil 4.94. Börülcenin net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; ○, desorpsiyon)



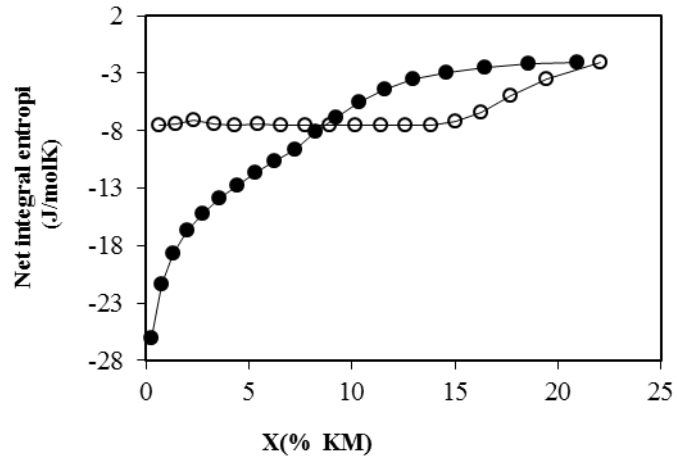
Şekil 4.95. Baklanın net integral entalpisinin nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)

Hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon için nem içeriğindeki artış ile net integral entalpi azalmıştır. Nem içeriğinin artmasıyla net integral entalpinin değişmesi; su-baklagil etkileşiminin su molekülleri arasındaki etkileşimden daha büyük olduğunu gösterir. Bu termodinamik davranış, gıda maddelerinin monotabakasından ileri gelebilir (Fasina vd., 1999). Düşük nem içeriklerinde, su katının dış yüzeyi üzerindeki en erişilebilir yerlerde adsorplanır. Daha sonra, multitableka oluştuğundan dolayı net integral entalpi azalmaya başlar. Susam tohumu (Aviara vd., 2002), börülce (Ajibola vd., 2003), soya fasulyesi (Aviara vd., 2004), nişasta tozu (Al-Muhtaseb vd., 2004b), pirinç (Benado ve Rizvi., 1985), yonca (Fasina vd.,1997), şeker pancarı kökü (Iglesias vd.,1976), soğan (Mazza ve LeMaguer., 1978) için net integral entalpilerinde benzer eğilimler gözlenmiştir.

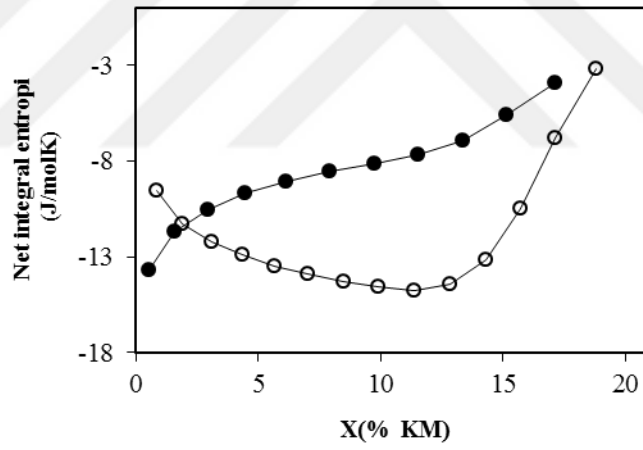
Fasulye ve yeşil mercimeğin düşük nem içerikleri hariç, desorpsiyon için net integral entalpi değerleri, adsorpsiyon için net integral entalpi değerlerinden daha büyük idi. Fasulye ve yeşil mercimekte, adsorpsiyon için net integral entalpi değerleri başlangıçta desorpsiyonun net integral entalpi değerlerinden daha büyük idi, ancak fasulyede % 5'lik, yeşil mercimekte % 3'lük nem içeriğinin üzerinde desorpsiyon için net integral entalpi değerleri adsorpsiyonun net integral entalpi değerlerinden daha büyük idi. Bu durum, katı-sıvı etkileşiminin su molekülleri arasındaki etkileşimden daha büyük olduğunu gösterir. Benzer eğilimler, susam tohumu (Aviara vd., 2002), börülce (Ajibola vd., 2003) ve soya fasulyesinde (Aviara vd., 2004) gözlenmiştir.

Tüm baklagillerde genellikle nem içeriğindeki artma ile adsorpsiyon ve desorpsiyon net integral entalpilerindeki değişimler fonksiyonelliklerine göre benzer idi.

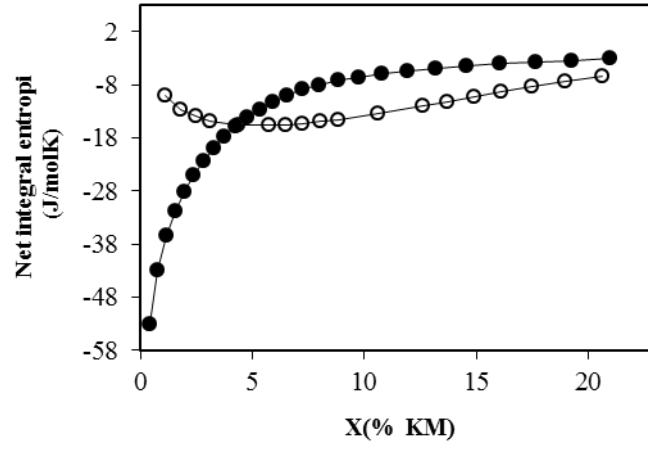
Su moleküllerinin gelişigüzel hareketlerini tanımlayan net integral entropi Eşitlik (2.23) yardımıyla hesaplandı. Adsorpsiyon ve desorpsiyon net integral entropileri nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.96-100'de gösterilmiştir.



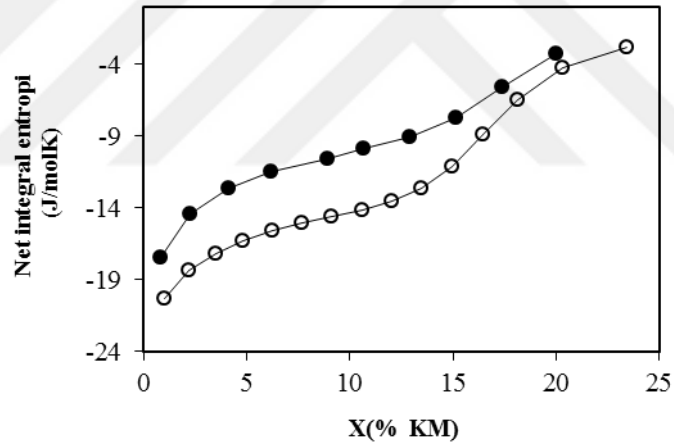
Şekil 4.96. Fesulyenin net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



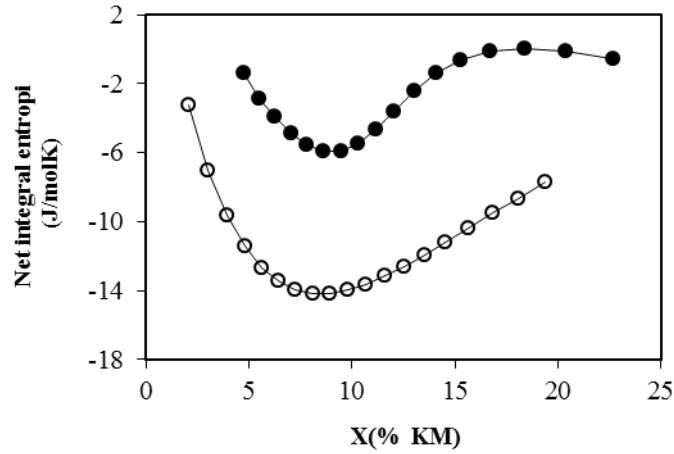
Şekil 4.97. Nohutun net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi (•, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.98. Yeşil mercimeğin net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.99. Börülcenin net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)



Şekil 4.100. Baklanın net integral entropisinin nem içeriği ile değişimi (●, adsorpsiyon; o, desorpsiyon)

Rizvi ve Benado (1983) gıdalarda suyun lokalleşmesi nedeniyle entropi kaybı ve çözünürleştirme ve şişme nedeniyle ortaya çıkan yapısal değişim nedeniyle entropideki artış gibi nem adsorpsiyonuna iki zıt entropik katkının var olduğunu açıklamıştır.

Net integral entropi değerleri negatif idi. Rizvi (1986), bu negatif entropi değerlerini ürünün suyu daha kuvvetli bir şekilde bağlayan daha fazla polar grup içermesine bağlamıştır. Halbuki, Iglesias vd. (1976) bu durumun kimyasal adsorpsiyondan ve/veya adsorbentte meydana gelen yapısal değişikliklerden ileri gelebileceğini ifade etmişlerdir.

Bakla hariç tüm baklagillerde adsorpsiyon net integral entropisi nem içeriğinin artmasıyla artmıştır. Baklada adsorpsiyon net integral entropisi nem içeriğinin artmasıyla % 8'lik nem içeriğine kadar azalmış daha sonra nem içeriğinin artmasıyla artmıştır. Fasulyenin desorpsiyon net integral entropisi nem içeriğinin artmasıyla % 15'lik nem içeriğine kadar sabit kalmış, daha sonra nem içeriğinin artmasıyla artmıştır. Nohutun desorpsiyon net integral entropisi nem içeriğinin artmasıyla % 12'lik nem içeriğine kadar azalmış, daha sonra nem içeriğinin artmasıyla artmıştır. Yeşil mercimeğin desorpsiyon net integral entropisi nem içeriğinin artmasıyla çok fazla değişmemiştir. Börülcenin desorpsiyon net integral entropisi nem içeriğinin artmasıyla artmıştır. Baklanın desorpsiyon net integral entropisi nem içeriğinin artmasıyla % 8'lik nem içeriğine kadar azalmış, daha sonra nem içeriğinin artmasıyla artmıştır. Bakla için, % 8'lik nem içeriğinde adsorpsiyon ve desorpsiyon minimum net integral entropi değeri gözlenmiştir.

Fasulyede % 8'lik, nohutta % 2'lik, yeşil mercimekte % 4'lük nem içeriklerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrilerinin çakıştığı gözlenmiştir. Adsorpsiyon net integral entropi değerleri desorpsiyonun net integral entropi değerlerinden daha büyük idi, ancak fasulye için % 8'lik, nohut için % 2'lik, yeşil mercimek için % 4'lük nem içeriklerinden düşük nem içeriklerinde desorpsiyon net integral entropi değerleri adsorpsiyonun net integral entropi değerlerinden daha büyük idi.

Nohutun desorpsiyonu ve baklanın adsorpsiyon ve desorpsiyonunda olduğu gibi düşük nem içeriklerindeki yüksek negatif net integral entropi değeriinin gözleendiği durumları, suyun başlangıçta düşük bir yüzdesinin çok sıkı bir şekilde bağlı olmasıyla açıklanmıştır (Rizvi, 1986).

Fasulyede % 8'lik, nohutta % 2'lik, yeşil mercimekte % 4'lük nem içeriğinin üzerinde, börölce ve baklada ise tüm nem içeriklerinde adsorpsiyon net integral entropisi, desorpsiyon net integral entropisinden daha yüksek idi. Rizvi ve Benado (1983), bu durumu desorpsiyon sırasında suyun mikrokapillerlerde hapsedilmesi ile açıklamışlardır. Net integral entropi için bulunan sonuçlar; şeker pancarı kökü (Iglesias vd., 1976), süpürge darısı (Rizvi ve Benado., 1983), pirinç (Benado ve Rizvi, 1985), kavun tohumu (Aviara ve Ajibola, 2002), susam tohumu (Aviara vd., 2002), börölce (Ajibola vd., 2003), soya fasulyesi (Aviara vd., 2004) ve patates nişastası (Al-Muhtaseb vd., 2004b) için rapor edilen sonuçlara benzerdir.



5. SONUÇLAR

Fasulye, nohut, yeşil mercimek, börülce ve bakla gibi baklagillere ait deneysel sorpsiyon verilerinden BET sınıflandırmasına göre tipik J şekilli Tip III sorpsiyon eğrileri elde edilmiştir.

Denge nem içeriği; sabit bir sıcaklıkta su aktivitesindeki artış ile artmış, sabit su aktivitesinde ise sıcaklıktaki artış ile azalmıştır. Bu durum daha yüksek sıcaklıklarda baklagillerin daha az higroskopik olduğunu göstermektedir.

Tüm sıcaklıklarda, baklagillerin adsorpsiyon ve desorpsiyon davranışının farklı olduğu belirlenmiş ve tüm su aktivitesi aralığında histeresis gözlenmiştir.

25, 35 ve 45 °C sıcaklıklar ve % 10-% 90 aralığındaki bağıl nemlerde; fasulyenin adsorpsiyon izotermelerini tarif etmek için GAB, Henderson, ve Peleg modellerinin, fasulyenin desorpsiyon izotermelerini tarif etmek için ise Henderson, Peleg ve Chung-Pfost modellerinin uygun olduğu bulunmuştur. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde fasulyenin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermlerine en iyi uyumu Peleg modelinin gösterdiği bulunmuştur.

25, 35 ve 45 °C sıcaklıklar ve % 10-% 90 aralığındaki bağıl nemlerde; nohutun adsorpsiyon izotermelerini tarif etmek için GAB, Henderson, Peleg ve Ferro-Fontan modellerinin, nohutun desorpsiyon izotermelerini tarif etmek için ise Henderson, Peleg, Ferro-Fontan ve Chung-Pfost modellerinin uygun olduğu bulunmuştur. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde nohutun adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermlerine en iyi uyumu Peleg modelinin gösterdiği bulunmuştur.

25, 35 ve 45 °C sıcaklıklar ve % 10-% 90 aralığındaki bağıl nemlerde; yeşil mercimeğin adsorpsiyon izotermelerini tarif etmek için GAB, Henderson, Peleg, Smith, Caurie ve Ferro-Fontan modellerinin, yeşil mercimeğin desorpsiyon izotermelerini tarif etmek için ise GAB, Henderson, Peleg, Ferro-Fontan ve Chung-Pfost modellerinin uygun olduğu bulunmuştur. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde yeşil mercimeğin adsorpsiyon izotermlerine en iyi uyumu Peleg modelinin, desorpsiyon izotermlerine en iyi uyumu Henderson modelinin gösterdiği bulunmuştur.

25, 35 ve 45 °C sıcaklıklar ve % 10-% 90 aralığındaki bağıl nemlerde; börülcenin adsorpsiyon izotermelerini tarif etmek için GAB, Henderson, Peleg ve Ferro-Fontan modellerinin, börülcenin desorpsiyon izotermelerini tarif etmek için ise Henderson, Peleg ve Chung-Pfost modellerinin uygun olduğu bulunmuştur. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde börülcenin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermlerine en iyi uyumu Peleg modelinin gösterdiği bulunmuştur.

25, 35 ve 45 °C sıcaklıklar ve % 10-% 90 aralığındaki bağıl nemlerde; baklanın adsorpsiyon izotermelerini tarif etmek için Peleg, Smith, Ferro-Fontan ve Chung-Pfost modellerinin, baklanın

desorpsiyon izotermelerini tarif etmek için ise GAB, Henderson ve Chung-Pfost modelleri modellerinin uygun olduğu bulunmuştur. Sorpsiyon modellerinin E, RMSE ve r^2 değerleri incelendiğinde tüm bağıl nem değerlerinde ve sıcaklıklarda bu modeller içinde baklanın adsorpsiyon izotermine en iyi uyumu Peleg modelinin, desorpsiyon izotermine en iyi uyumu Chung-Pfost modelinin gösterdiği bulunmuştur.

Branauer-Emmett-Teller (BET) eşitliği $a_w=0-0.4$ su aktivitesi aralığındaki deneysel verilere uygulanmış ve tüm baklagiller için sorpsiyon verileri, 0-0.4 su aktivitesi aralığında BET eşitliği ile ifade edilmiştir.

Tüm baklagillerde, Clausius-Clapeyron eşitliğini kullanarak hesaplanan ve baklagillerin kurutulması ve depolanması ile ilgili hesaplamalar için faydalı bilgiler veren sorpsiyon izosterik ısısı, nem içeriğinin artması ile azalmıştır. Tüm baklagillerde, desorpsiyon izosterik ısısı adsorpsiyon izosterik ısısından daha yüksek bulunmuştur.

Entropide meydana gelen değişim, adsorpsiyon ve desorpsiyon işlemlerinin tersinmez olduğunu göstermektedir. Entalpi-entropi dengeleme teorisi yada izokinetik teori baklagillerin nem sorpsiyonuna başarılı bir şekilde uygulanmış ve bu prosesin entalpi kontrollü bir mekanizma ile meydana geldiği görülmüştür.

Tüm baklagillerde nem içeriğinin artmasıyla Gibbs serbest enerjisi azalmıştır. Tüm baklagiller için, desorpsiyon Gibbs serbest enerjisi değerleri adsorpsiyon Gibbs serbest enerjisi değerlerinden büyük bulunmuştur.

Tüm baklagillerde, tüm sıcaklıklarda su aktivitesindeki artış ile yüzey potansiyeli artmıştır.

Tüm baklagillerde genellikle desorpsiyon için net integral entalpi değerlerinin adsorpsiyon için net integral entalpi değerlerinden daha büyük olduğu bulunmuştur.

Belirli bir nem içeriğinde tüm baklagillerde, fasulye ve yeşil mercimeğin düşük nem içerikleri hariç, adsorpsiyon için net integral entropi değerlerinin desorpsiyon için net integral entropi değerlerinden daha büyük olduğu bulunmuştur.

Baklagiller monotabaka nem içeriklerinden daha düşük nem içeriklerinde stabilitelerini sürdürebildiğinden baklagillerin bozulmalarını minimuma indirmek için monotabaka su aktivitesinin altındaki koşullarda depolanmaları önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abebe, W., Ronda, F. (2015). Flowability, moisture sorption and thermal properties of tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] grain flours, *Journal of Cereal Science*, 63, 14–20
- Aguerre, R.J., Suarez, C., Viollaz, P.E. (1986). Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms, *Journal of Food Science*, 51, 1547-1549
- Aguirre-Ldredd R.Y., Rddriguez-Hernandez A.I., Velazquez G. (2017). Modelling the effect of temperature on the water sorption isotherms of chitosan films, *Food Science and Technology*, 37(1), 112-118
- Ajibola, O.O., Aviara, N.A., Ajetumobi, O.E. (2003). Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*), *Journal of Food Engineering*, 58, 317-324
- Ait Mohamed, L., Kouhila, M., Jamali, A., Lahsasni, S. and Mahrouz, M. (2005). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of bitter orange leaves (*Citrus aurantium*), *Journal of Food Engineering*, 67, 491-498
- Al-Muhtaseb, A.H., McMin, W.A.M., Magee, T.R.A. (2004a). Water sorption isotherms of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data, *Journal of Food Engineering*, 61, 297-307
- Al-Muhtaseb, A.H., McMin, W.A.M., Magee, T.R.A. (2004b). Water sorption isotherms of starch powders Part 2: thermodynamic characteristics, *Journal of Food Engineering*, 62, 135-142
- AOAC (1980). Official methods of analysis, *Association of Official Analytical Chemists Inc.*, Washington.
- Aouaini, F., Knani, S., Ben Yahia, M., Ben Lamine, A. (2015). Statistical physics studies of multilayer adsorption isotherm in food materials and pore size distribution, *Physica A*, 432, 373-390
- Ayala-Aponte, A.A. (2016). Thermodynamic properties of moisture sorption in cassava flour, *DYNA*, 83(197), 139-145
- Argyropoulos, D., Alex, R., Kohler, R., & Müller, J. (2012). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of leaves and stems of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) established by dynamic vapor sorption, *LWT-Food Science and Technology*, 47, 324-331
- Arogba, S.S. (2000). Comparative analyses of the moisture isotherms, proximate compositions, physical and functional properties of dried cola nitida and garcinia kola kernels, *Journal of Food Composition and Analysis*, 13, 139-148
- Arogba, S.S. (2001). Effect of temperature on the moisture sorption isotherm of a biscuit containing processed mango (*Mangifera indica*) kernel flour, *Journal of Food Engineering*, 48, 121-125
- Arslan, N., Toğrul H. (2005a). Moisture Sorption Isotherms for Crushed Chillies, *Biosystems Engineering*, 90(1), 47-61
- Arslan, N., Toğrul H. (2005b). Modelling of water sorption isotherms of macaroni stored in a chamber under controlled humidity and thermodynamic approach, *Journal of Food Engineering*, 69(2), 133-145
- Arslan, N., Toğrul, H. (2006). The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity, *Journal of Stored Products Research*, 42, 112-135
- Aviara, N.A., Ajibola, O.O. (2002). Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava, *Journal of Food Engineering*, 55, 107-113
- Aviara, N.A., Ajibola, O.O., Dairo, U.O. (2002). Thermodynamics of moisture sorption in sesame seed, *Biosystems Engineering*, 83(4), 423-431
- Aviara, N.A., Ajibola, O.O., Oni, S.A. (2004). Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean, *Biosystems Engineering*, 87(2), 179-190
- Aviara, N. A., Ojediran, J.O., Marwan, S. U., Raji, A. O. (2016). Effect of moisture sorption hysteresis on thermodynamic properties of two millet varieties, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(1), 363–383
- Ayrancı, E., Ayrancı, G., Doğantan, Z. (1990). Moisture sorption isotherms of dried apricot, fig and raisin at 20 °C and 36 °C, *Journal of Food Science*, 55(6), 1591-1593
- Ayrancı, E., Duman, O. (2005). Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isolate at 10, 20 and 30 °C, *Journal of Food Engineering*, 70, 183-91

- Banaszek, M.M., Siebenmorgen, T.J. (1990). Moisture adsorption rates of rough rice, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33(4), 1257-1262
- Basunia, M.A., Abe, T. (2001). Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice, *Journal of Stored Products Research*, 37, 205-219
- Bejar, A.K., Mihoubi, N.B., Kechaou, N. (2012). Moisture sorption isotherms-Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves, *Food Chemistry*, 132, 1728-1735
- Benado, A.L., Rizvi, S.S.H. (1985). Thermodynamic properties of water in rice as calculated from reversible and irreversible isotherms, *Journal of Food Science*, 50, 101-105
- Bennaceur, S., Draoui, B., Touati, B., Benseddik, A., Saad, A., Bennamoun, L. (2015). Determination of the moisture-sorption isotherms and isosteric heat of henna leaves, *Journal of Engineering Physics and Thermodynamics*, 88(1), 53-62
- Bernstein, A., Norena, C.P.Z. (2015). Thermodynamic sorption of red cabbage extract (*Brassicaoleracea* L. var. capitata L. f. rubra) encapsulated by spray drying, *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8180–8187
- Bianco, A.M., Pollio, M.L., Resnik, S.L., Boente, G., Larumbe, A. (1997). Comparison of water sorption behaviour of three rice varieties under different temperatures, *Journal of Food Engineering*, 33, 395-403
- Bingöl, G., Prakash, B., Pan, Z. (2012). Dynamic vapor sorption isotherms of medium grain rice varieties, *LWT-Food Science and Technology*, 48, 156-163
- Boquet, R., Chirife, J., Iglesias, H.A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods. II. Evaluation of various two-parameter models, *Journal of Food Technology*, 13, 319-327
- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers, *Journal of the American Chemical Society*, 60, 309
- Cadden, A.N. (1988). Moisture sorption characteristics of several food fibers, *Journal of Food Science*, 53, 1150-1155
- Calzetta Resio, A.N., Tolaba, M.P., Suarez, C. (2000). Some physical and thermal characteristics of amaranth starch, *Food Science and Technology International*, 6, 371-378
- Castillo, E., Ruiz, T. E., Stuart, R., Galindo, J., Hernandez, J. L., Diaz, H. (2003). Effect of the protein-energetic supplementation on the performance of male bovines grazing natural pastures associated with a mixture of creeping legumes, *Cuban Journal of Agricultural Science*, 37 (2), 143-147
- Caurie, M. (1970). A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods, *Journal of Food Technology*, 5, 301-307
- Cemeroğlu, B., Özkan, M. (2004). *Kurutma Teknolojisi: Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi*. Cemeroğlu, B. (ed.) 2. Baskı, Başkent Kiliş Matbaacılık, Ankara
- Cenkowski, S., Jayas, D.S., Hao, D. (1992). Latent heat of vaporization for selected foods and crops, *Canadian Agricultural Engineering*, 34, 281-286
- Chhinnan, M.S., Beuchat, L.R. (1985). Sorption isotherms of whole cowpeas and flours, *LWT-Food Science and Technology*, 18, 83-88
- Chirife, J., Iglesias, H.A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1- A review, *Journal of Food Technology*, 13, 159-174
- Chirife, J., Timmermann, E.O., Iglesias, H.A., Boquet, R. (1992). Some features of the parameter k of the GAB equation as applied to sorption isotherms of selected food materials, *Journal of Food Engineering*, 15, 75-82
- Chung, D.S., Pfost, H.B. (1967). Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. Part II: development of the general isotherm equation, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 10, 552-555
- Cladera-Olivera, F., Marczak, L.D.F., Norena, C.P.Z., Pettermann, A.C. (2011). Modeling water adsorption isotherms of pinhao (*Araucaria angustifolia* seeds) flour and thermodynamic analysis of the adsorption process, *Journal of Food Processing and Engineering*, 34, 826-843
- Coupland, J.N., Shaw N.B., Monahan F.J., O’Riordan E.D., O’Sullivan, M. (2000). Modeling the effect of glycerol on the moisture sorption behaviour of whey protein edible films, *Journal of Food Engineering*, 43(1), 25-30

- Debnath, S., Hemavathy, J., Bhat, K.K. (2002). Moisture sorption studies on onion powder, *Food Chemistry*, 78, 479-482
- Dent, R.W. (1977). A multilayer theory for gas sorption. Part 1: Sorption of a single gas, *Textile Research Journal*, 47, 145-152
- Dinçer, T.D., Esin, A. (1995). Sorption isotherms for macaroni, *Journal of Food Engineering*, 27, 211-228.
- Erdemir, Z.Ş. (2015). *Isıl işlem görmüş bakla ezme tozunun ekmek yapımında kullanımı ve kalite kriterleri üzerine etkisinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim dalı
- Ermin, B. R. (1998). *Water sorption and desorption isotherms of hazelnuts*, Msc Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, The Department of Food Engineering
- Ertugay, F., Certel, M. (1999). Bazı buğday, arpa, çavdar, yulaf ve mısır örneklerinde değişik sıcaklıklarda elde edilen sorpsiyon verilerine farklı izoterm eşitliklerinin uygunluğunun belirlenmesi, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23(5), 1079-1085.
- Fabra, M.J, Talens, P., Moraga, G., Martinez-Navarrete, N. (2009). Sorption isotherm and state diagram of grapefruit as a tool to improve product processing and stability, *Journal of Food Engineering*, 93, 52-58
- Falade, K.O., Aworh, O.C. (2004). Adsorption isotherms of osmo-oven dried African atar apple (*Chrysophyllum albidum*) and African mango (*Irvingia gabonensis*) slices, *European Food Research and Technology*, 218, 278-283
- Fasina, O., Ajibola, O.O., Tyler, R. (1999). Thermodynamics of moisture sorption in winged bean seed and gari, *Journal of Food Process Engineering*, 22, 405-418
- Fasina, O., Sokhansanj, S., Tyler, R. (1997). Thermodynamics of moisture sorption in alfalfa pellets, *Drying technology*, 15, 1553-1570
- Ferro-Fontan, C., Chirife, J., Sancho, E., Iglesias, H.A. (1982) Analysis of a model for water sorption phenomena in foods, *Journal of Food Science*, 47, 1590-1594
- Gal, S. (1975). *Recent advances in techniques for the determination of sorption isotherms*. In: R.B. Duckworth (Ed.), *Water relations of foods*, Academic Press, London
- Gal, S. (1981). *Recent developments in techniques for obtaining complete sorption isotherms*. In: Rockland, L.B. and Stewart, G.F. (Eds.), *Water activity: Influence on Food Quality*, Academic Press, New York
- Garwin, A., Ibarz, R., Ibarz, A. (2017). Kinetic and thermodynamic compensation. A current and practical review for foods, *Food Research International*, 96, 132-153
- Goneli, A.L.D., Correa, P.C., Oliveira, G.H.H., Afonso Junior, P.C. (2013). Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee, *LWT-Food Science and Technology*, 50, 386-391
- Goudjinou, C., Ahouannou, C., Chaffa, G., Soumanou, M.M. (2017). Optimization of the drying of *Moringa oleifera* leaves by determination of thermophysical parameters, *International Journal of Biological Chemistry Science*, 11(4), 1627-1645
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces, *Journal of Chemical Physics*, 16, 931-937
- Hassini, L., Bettaieb, E., Desmorieux, H., Torres, S.S., Touil, A. (2015). Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds, *Industrial Crops and Products*, 67, 457-465
- Henderson, S.M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture, *Agricultural Engineering*, 33, 29-32
- Heras, R.M. L., Heredia, A., Castello, M.L., Andres, A. (2014). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of dry permisson leaves, *Food Bioscience*, 7, 88-94
- Hossain, S.A., Pal, P.K., Sarkar, P.K., Patil, G.R. (2002). Moisture sorption characteristics of dudh churpi, a traditional milk product in India, *Nahrung/Food*, 46(3), 136-140
- Hoyos-Leyva, J.D., Bello-Peraz, L.A., Ramirez, A. (2018). Thermodynamic criteria analysis for the use of taro starch spherical aggregates as microencapsulant matrix, *Food Chemistry*, 259, 175-180
- <http://www.tuik.gov.tr> , Erişim: 22 Kasım 2018
- Iglesias, H.A., Chirife, J. (1976a). Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherm of food materials, *Journal of Food Technology*, 11, 109-112
- Iglesias, H.A., Chirife, J. (1976b). Isosteric heats of water vapour sorption in dehydrated foods. Part 1. Analysis of differential heat curve, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 9, 116-122

- Iglesias, H.A., Chirife, J., Viollaz, P. (1976). Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root, *Journal of Food Technology*, 11, 91-101
- Irzyniec, Z., Klimczak, J. (2003). Effect of temperature on sorption isotherms of Brussels sprout, *Nahrung/Food*, 47(1), 24-27
- Işıksal, S. (2006). *Sucuk ve pasturmanın sorpsiyon izotermelerinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı
- İbanoğlu, S., Kaya, S., Kaya, A. (1999). Evaluation of sorption properties of Turkish tarhana powder, *Nahrung*, 43(2), 122-125
- Johnson, P.-N.T., Brennan, J.G. (2000). Moisture sorption isotherm characteristics of plantain (Musa, AAB), *Journal of Food Engineering*, 44, 79-84
- Kachru, R.P., Matthes, R.K. (1976). The behaviour of rough rice in sorption, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 21, 405-416
- Kaderides, K., Goula, A.M. (2019). Encapsulation of pomegranate peel extract with a new carrier material from orange juice by-products, *Journal of Food Engineering*, 253, 1-13
- Kaya, S., Öner, M. D. (1996). Water activity and moisture sorption isotherms of Gaziantep cheese, *Journal of Food Quality*, 19, 121-132
- Karel, M. (1975). *Water activity and food preservation*. In: *Principles of Food Science, Part 2*, O. R. Fennema (ed.), Marcel Dekker, New York
- Kaymak-Ertekin, F., Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 37, 429-438
- Khama, R., Aissani, F., Alkama, R., Fraikin, L., Leonard, A. (2017). Isotherms and isosteric heat of desorption of watermelon fruit, *EuroDrying '2017-6th European Drying Conference Liège*, Belgium
- Khun, I. (1967). Generalized potential theory of adsorption, *Journal of Colloid Interface Science*, 23, 563
- Kıroğlu Zorlugenç, F. (2010). *Ozmotik dehidrasyon uygulamasının Trabzon hurması meyvelerinin kuruma davranışı ve ürün kalitesi üzerine etkileri*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı
- Kien P.V., Hay, N., Duc, L.A. (2019). Equilibrium moisture content of ganoderma lucidum", *Applied Mechanics and Materials*, 889, 266-274, 2019
- Kim, S.S. ve Bhowmik, S.R. (1994). Moisture sorption isotherms of concentrated yogurt and microwave vacuum dried yogurt powder, *Journal of Food Engineering*, 21, 157-175
- King, C.J. (1968). Rate of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs, *Food Technology*, 22, 509-514
- Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Tsami, E., Marinou-Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat desorption of some vegetables, *Journal of Food Engineering*, 20(1), 55-74
- Koroş, B. (2007). *Geleneksel Türk Gıdalarının Adsorpsiyon İzotermelerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı
- Kou, Y., Schmidt, S.J. (1999). Vapor pressure and water activity measurements of saturated salt solutions made with D₂O at 20 °C, *Food Chemistry*, 66, 253-255
- Krug, R.R., Hunter, W.G., Grieger, R.A. (1976). Enthalpy-entropy compensation. 1-Some fundamental statistical problems associated with the analysis of Van't Hoff and Arrhenius data, *Journal of Physical Chemistry*, 80, 2335-2340
- Kumar, A., Jha, A., Jain, P., Sahu, J.K., Arora, S. (2012). Moisture sorption characteristics of lal peda at different storage temperatures, *Food Research International*, 49, 373-378
- Kurozawa, L.E., de Oliveira, R.A., Hubinger, M.D., Park, K.L. (2015). water desorption thermodynamic properties of papaya, *Journal of Food Processing and Preservation*,
- Labuza, T.P. (1968). Sorption phenomena in foods, *Food Technology*, 22 (3), 15-24
- Labuza T.P. (1984). *Moisture sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use*, American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN
- Labuza, T.P., Acott, K., Tatini, S.R., Lee, R.Y., Flink, J.M. (1976). Water activity determination: A collaborative study of different methods, *Journal of Food Science*, 41, 911-915
- Labuza, T.P., Kaanane, A., Chen, J.Y. (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods, *Journal of Food Science*, 50, 385-391

- Labuza, T.P., Tannenbaum, S.R. Karel, M. (1970). Water content and stability of low-moisture and intermediate-moisture foods, *Food Technology*, 24, 543-549
- Labuza, T.P., Accott, K., Tatini, S.R., Lee, R.Y. (1976). Water activity determination: a collaborative study of different methods, *Journal of Food Science*, 41, 910-917
- Lago, C.C., Cardenas, M.L., Norena, C.P.Z. (2013) Thermodynamic sorption properties of potato and sweet potato flakes, *Food and Bioprocess Processing*, 91, 389-395
- Lagoudaki, M., Demertzis, P.G., Kontominas, M.G. (1993). Moisture adsorption behavior of pasta products, *LWT-Food Science and Technology*, 26(6), 512–516
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Kechaou, N. (2002). Experimental study and modelling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*), *Journal of Food Engineering*, 55, 201-207
- Lasekan O.O., Lasekan W.O. (2000). Moisture sorption and the degree of starch polymer degradation on flours of popped and malted sorghum (sorghum bicolor), *Journal of Cereal Science*, 31(1), 55-61
- Lavoyer, F.C.G., Gabas, A.L., Oliveira, W. P., Telis-Romero, J. (2013). Study of adsorption isotherms of green coconut pulp, *Food Science and Technology*, 33(1), 68-74
- Leffer, J.E., Grunwald, E. (1963). *Rates and equilibria of organic reactions*, Wiley, New York.
- Li, Y., Wang, X., Jiang, P., Li, X.J. (2016). Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of adsorption of Chinese dried wheat noodles, *Journal of Stored Products Research*, 67, 19-27
- Lin, G., Yang, H., Wang, X., Mei, Y., Li, Pan., Shao, J., Chen, H. (2016). The moisture sorption characteristics and modelling of agricultural biomass, *Biosystems Engineering*, 150, 191-200
- Lomauro, C.J., Bakshi, A.S., Labuza, T.P. (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part II: milk, coffee, tea, nuts, oilseeds, spices and starchy foods, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 18, 118-124
- Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A. (1996). Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic, *Journal of Food Engineering*, 28, 109-119
- Majd, K.M., Karparvarfard, S.H., Farahnaky, A., Ansari, S. (2014) Thermodynamic properties of water sorption isotherms of grape seed, *International Agrophysics*, 28, 63-71
- Maroulis, Z.B., Tsami, E., Marinou-Kouris, D. (1988). Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits, *Journal of Food Engineering*, 7(1), 63-78
- Martinez-Las Heras, R., Heredia, A., Castello, M.L., Andres, A. (2014). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of dry persimmon leaves, *Food Bioscience*, 7, 88-94
- Maskan, M., Göğüş, F. (1997). The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nut paste, *Journal of Food Engineering*, 33(3-4), 227-237
- Mazza, G., Le Maguer, M. (1978). Water sorption properties of yellow globe onion, *Canadian Institute of Food Science and Technology*, 11, 189-193
- McLaughlin, C.P., Magee, T.R.A. (1998). The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes, *Journal of Food Engineering*, 35(3), 267-280
- McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. (1999). Studies on the effect of temperature on the moisture sorption characteristics of potatoes, *Journal of Food Engineering*, 22, 113-128
- McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of potato, *Journal of Food Engineering*, 60, 157-165
- MEB, 2016, *Tarım Yemeklik Tane Baklagil Bitkileri*, Ankara
- Medeiros, M.L., Ayrosa, A.M.I.B., Pitombo, R.N.M., Lannes, S.C.S. (2006). Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products, *Journal of Food Engineering*, 7, 402-406
- Menkov, N.D. (2000). Moisture sorption isotherms of chickpea seeds at several temperatures, *Journal of Food Engineering*, 45, 189-194
- Menkov, N.D., Paskalev, H.M., Galyazkov, D.I., Kerezieva-Rakova, M. (1999). Applying the linear equation of correlation of Branauer-Emmet-Teller (BET)-monolayer moisture content with temperature, *Nahrung/Food*, 43, 118-121
- Mohsenin, N., 1986, *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach, New York
- Moraes, M.A., Pinto, L.A.A. (2012). Desorption isotherms and thermodynamic properties of anchovy in natura and enzymatic modified paste, *Journal of Food Engineering*, 110, 507-513

- Moraes, M.A., Rosa, G.S., Pinto, L.A.A. (2008). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of apple Fuji and garlic, *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 1824-1831
- Mousa, W., Ghazali, F.M., Jinap, S., Ghazali, H.M., Radu, S. (2014). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of Malaysian paddy, *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2656–2663
- Moussaoui, H., bahammou, Y., Idlimam, A., Lamharrar, A., Abdenouri, N. (2019). Investigation of hygroscopic equilibrium and modeling sorption isotherms of the argan products: A comparative study of leaves, pulps, and fruits, *Food and Bioproducts Processing*, 114, 12-22
- Mulet, A., Garcia-Pascual, P., Sanjuan, N., Garcia-Reverter, J. (2002). Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*), *Journal of Food Engineering*, 53, 75-81
- Munder, S., Argyropoulos, D., Müller, J. (2019). Acquisition of sorption and drying data with embedded devices: Improving standard models for high oleic sunflower seeds by continuous measurements in dynamic systems, *Agriculture*, 9(1), 1-14
- Munoz, R.C., Segura, N.N. (2018). Sorption isotherms and isosteric heat estimation of purplecactus pear (*Opuntia stricta*) juice embedded in gelatin–maltodextrin matrix, *Journal of Food Process Engineering*, 41(7), 1-7
- Muthukumarappan, K., Jindal, V.K., Gunasekaran, S. (1992). Volumetric changes in rice kernels during desorption and adsorption, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 35(1), 235-241
- Myhara, R.M., Taylor, M.S., Slominski B.A., Al-Bulushi, I. (1998). Moisture sorption isotherms and chemical composition of Omani dates, *Journal of Food Engineering*, 37(4), 471-479
- Noshad, M., Shahidi, F., Mohebbi, M., Mortazavi, S. (2012). Desorption isotherms and thermodynamic properties of fresh and osmotic-ultrasonic dehydrated quince, *Journal of Food Processing and Preservation*, 37, 1-12
- Oswin, C.R. (1946). The kinetics of package life III. The isotherm, *Journal of Chemical Industry*, 65, 419-421
- Palipane, K.B., Driscoll, R.H. (1992). Moisture sorption characteristics of inshell macadamia nuts, *Journal of Food Engineering*, 18, 63-76
- Palou, E., Lopez-Malo, A., Argai, A. (1997). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms of some cookies and corn snacks, *Journal of Food Engineering*, 31(1), 85-93
- Pappas, G., Rao, V.N.M. (1987). Sorption isotherms of cowpeas from 25 °C to 70 °C, *Transactions ASAE*, 30(5), 1478-1483
- Peleg, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms, *Journal of Food Process Engineering*, 16, 21-37
- Pezzutti, A., Crapiste, G.H. (1997). Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic, *Journal of Food Engineering*, 31, 113-123
- Pfost, H. B., Maurer, S. G., Chung, D. S., Milliken, G. A. (1976). *Summarising and reporting equilibrium moisture data for grains*, ASAE Paper No. 76- 3520, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA
- Pollio, M.L., Resnick, S.L., Chirife, J. (1987). Water sorption isotherms of soya bean varieties grown in Argentina, *Journal of Food Science and Technology*, 22, 335-358
- Prakotmak, P., Wongsuwan, H., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. (2014). Modeling isosteric heat banana foam mat using neural network approach, *American Journal of Applied Sciences* 11 (8), 1279-1291
- Rahman, M.S., Perera, C.O., Thebaud, C. (1998). Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of pea, *Food Research International*, 30, 485-491
- Raji, A.O., Ojadiran, J. O. (2011). Moisture sorption isotherms of two varieties millet, *Food and Bioproducts Processing*, 89, 178-184
- Ramesh, M.N. (2003). Moisture transfer properties of cooked rice during drying, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 36, 245-255
- Rizvi, S.S.H. (1995). *Thermodynamic properties of foods in dehydration*. In: *Engineering properties of foods (2nd. ed.)*, M. A. Rao and S. S. H. Rizvi (Eds.), Marcel Dekker, New York
- Rizvi, S.S.H. (1986). *Thermodynamics of foods in dehydration*. In: *Engineering properties of foods*, M.A. Rao and S.S.H. Rizvi (Eds.), Marcel Dekker, New York
- Rizvi, S.S.H., Benado, A.L. (1983). Thermodynamic analysis of drying foods, *Food Technology* 2, 471-502

- Rizvi, R.R.H., Benado, A.L. (1984). Thermodynamic properties of dehydrated foods, *Food Technology*, 38, 83-92
- Roman, G.N., Urbicain, M.J., Rotstein, E. (1982). Moisture equilibrium in apples at several temperatures: experimental data and theoretical considerations, *Journal of Food Science* 47, 1484-1488, 1507
- Sahu, S.N., Tiwari, A., Sahu, J.K., Naik, S.N., Baitharu, I., Kariali, E. (2018). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of sorbed water of chironji (*Buchanania lanzan* Spreng.) kernels at different storage conditions, *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(4), 2626-2635
- Samaniego-Esguerra, M., Boag, F.I., Robertson, L.G. (1991). Comparison of regression methods for fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables, *Journal of Food Engineering*, 13(2), 133-155
- Sanni, L.O., Atere, C., Kuye, A. (1997). Moisture sorption Isotherms of fufu and topica at different temperatures, *Journal of Food Engineering*, 34, 203-212
- Sawhney, I.K., Sarkar, B.C., Patil, G.R. (2011). Moisture sorption characteristics of dried acid casein from buffalo skim milk, *LWT-Food Science and Technology*, 44(2), 502-510
- Seth, D., Dash, K.K., Mishra, H.N., Deka, S.C. (2018). Thermodynamics of sorption isotherms and storage stability of spray dried sweetened yoghurt powder, *Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 4139-4147
- Sharma, N., Goyal, S.K., Alam, T., Fatma, S., Niranjana, K. (2018). Effect of germination on the functional and moisture sorption properties of high-pressure-processed foxtail millet grain flour, *Food Bioprocess Technology*, 11, 209-222
- Shatadal, P., Jayas, D. (1990). Moisture sorption isotherms of grain and oilseeds, *Postharvest News and Information*, 1(6), 447-451
- Silva, E.K., Fernandes, R.B.V., Borges, S.V., Botrel, D.A., Queiroz, F. (2014). Water adsorption in rosemary essential oil microparticles: Kinetics, thermodynamics and storage conditions, *Journal of Food Engineering*, 140, 39-45
- Simha, H. V., Pushpadass, H. A., Franklin, M. E. E., Kumar, P. A., Manimala, K. (2016). Soft computing modelling of moisture sorption isotherms of milk-foxtail millet powder and determination of thermodynamic properties, *Journal of Food Science and Technology* 53(6), 2705-2714
- Smith, S.E. (1947). The sorption of water vapour by high polymers, *Journal of the American Chemical Society*, 69, 646-651
- Statistica for Windows 5.0. (1995). Computer program manual. StatSoft Inc., Tulsa
- Sun, DW. (1998). Selection of EMC/ERH isotherm equations for shelled corn based on fitting to available data, *Drying Technology*, 16(3/5), 779-797
- Sun, DW. (1999). Comparison and selection of EMC/ERH isotherm equations for rice, *Journal of Stored Products Research*, 35, 249-264
- Sun, DW., Woods, J.L. (1993). The moisture content/relative humidity equilibrium relationship of wheat-A review, *Drying Technology*, 11(7), 1523-1551
- Sun, DW., Woods, J. L. (1998). Deep bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: a test bed for ventilation control strategies, *Journal of Stored Products Research*, 33, 299-312
- Susilo, B., Maharani, D.M., Hawa, L.C., Fitri, D.N.K. (2019). Study of sorption isotherm and isosteric heat of Kepok banana (*Musa paradisiaca* F.) slice, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 230, 1-11
- Şahbaz, F. (1998). *Su ve Buz (İ. Saldamlı editör) Gıda Kimyası*, Hacettepe Üniversitesi Basımevi, Ankara
- Şahbaz, F., Palazoğlu, T.K., Uzman, D. (1999). Moisture sorption and the applicability of the Brunauer-Emmett-Teller (BET) equation for blanched and unblanched mushrooms, *Nahrung/Food*, 43(5), 325-329
- Taitano, L.A., Singh, R.P., Lee, J.H., Kong, F. (2012). Thermodynamic analysis of moisture adsorption isotherms of raw and blanched almonds, *Journal of Food Process Engineering*, 35(6), 840-850
- Telis, V.R.N., Gabas, A.L., Menegalli, F.C., Telis-Romero, J. (2000). Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp, *Thermochimica Acta*, 343, 49-56
- Temple, S.J., van Boxtel, A.J.B. (1999). Equilibrium moisture content of tea, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74, 83-89

- Toğrul, H., Arslan, N. (2006). Moisture sorption behaviour and thermodynamic characteristics of rice stored in a chamber under controlled humidity, *Biosystems Engineering*, 95(2), 181-195
- Toğrul, H., Arslan, N. (2007). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels, *Journal of Stored Products Research*, 43(3), 252-264.
- Tolaba, M.P., Suarez, C., Viollaz, P. (1997). Heats and entropies of sorption of cereal grains: A comparison between integral and differential quantities, *Drying Technology* 15, 137-150
- Tolaba, M.P., Peltzer, M., Enriquez, N., Pollio, M. L. (2003). Grain sorption equilibria of quinoa grains, *Journal of Food Engineering*, 61, 365-371
- Tolaba, M.P., Suarez, C. (1990). Desorption isotherms of shelled maize: whole dehulled and hulls, *International Journal of Food Science and Technology*, 25, 435-441
- Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits, *Journal of Food Engineering* 14, 327-335
- Tsami, E., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., Saravacos, G.D. (1990). Heat of sorption of water in dried fruits, *International Journal of Food Science and Technology*, 25, 350-359
- Tscheuschner, H.D., Mohsenin, N.N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*, Gordon and Breach Science Publishers, New York
- Vagenas, G.K., Marinos-Kouris, D. (1992). Use of the Wilson equation for the prediction of the sorptional equilibrium of sugar-based foodstuffs, *Fluid Phase Equilibria*, 78, 191-207
- Van den Berg, C. (1984). *Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption*. In: *Engineering and Foods*, McKenna, B.M. (Ed.), Elsevier Applied Science, New York.
- Van den Berg, C., Bruin, S. (1981). *Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects*. In: *Water activity: Influences on food quality*, L.B. Rockland and G.F. Stewart (Eds.), Academic Press, New York
- Vazquez, G., Chenlo, F., Moreira, R., Carballo, L. (1999). Desorption isotherms of muscatel and aledo grapes, and the influence of pretreatments on muscatel isotherms, *Journal of Food Engineering*, 39(4), 409-414
- Viollaz, P.E., Rovedo, C.O. (1999). Equilibrium isotherms and thermodynamic properties of starch and gluten, *Journal of Food Engineering*, 40, 287-292
- Wang, N., Brennan, J.G. (1991). Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures, *Journal of Food Engineering* 14, 269-282
- Yogendrarajah, P., Samapundo, S., Devlieghere, F., De Sager, S., De Meulenaer, B. (2015). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of whole black peppercorns (*Piper nigrum* L.), *LWT-Food Science and Technology*, 64, 177-188
- Wolf, W., Spiess, W.E.L., Jung, G. (1985). *Standardization of isotherm measurements (CostProject 90 and 90 Bis)*, In *Properties of Water in Foods*. Simatos, D. and Multon, J.L. (eds), Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- Yanniotis, S., Zarmboutis, I. (1996). Water sorption isotherms of pistachio nuts, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 29(4), 372-375
- Yogendrarajah, P., Samapundo, S., Devlieghere, F., De Saeger, S., De Meulenaer, B. (2015). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of whole black peppercorns (*Piper nigrum* L.), *LWT-Food Science and Technology*, 64, 177-188
- Zhang, X, W., Liu, X., Gu, D. X., Zhou, W., Wang, R. L., Liu, P. (1996). Desorption isotherms of some vegetables, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 70, 303-306

ÖZGEÇMİŞ

Mukaddes KARATAŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Sivas
Doğum Yılı : 1987
Uyruğu : TC.
Adres : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ELAZIĞ
E-posta : mkozturk@firat.edu.tr
Yabancı Diller : İngilizce (ÜDS: 72.5)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : “Greyfurt Kabuğu Selülozu ve Karboksimetil Selülozunun Akış Davranışları”
Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı,
2014
Danışman: Prof. Dr. Nurhan ARSLAN
Lisans : Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü,
2009
Lise : Sivas Kongre Lisesi, Sivas, 2005

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Kullanılabilinen Teknik Cihazlar : Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS), BET yüzey alanı ölçüm cihazı, öğrenci deney sistemleri
- ✓ Programlama Dilleri : C++, Visual Basic
- ✓ Paket Programlar : Statistica 5.0, CHEMCAD, NCSS statistical software, Office software

İŞ DENEYİMİ

2009 – ... : Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi
2009 – 2009 : Türkiye Eğitim Gönüllüleri Vakfı (TEGV) Sivas Eğitim Birimi Sorumlusu

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Karataş, M. ve Arslan, N. (2016). Flow behaviours of cellulose and carboxymethyl cellulose from grapefruit peel, *Journal of Food Hydrocolloids*, 58, 235-245

Bildiriler:

1. Karataş, M. ve Arslan, N. (2018). Moisture sorption isotherms and thermodynamic functions of chickpea (*Cicer arietinum* L.) stored in a chamber under controlled humidity, *3rd International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences (CMES2018)*, CYPRUS
2. Karataş, M. ve Arslan, N. (2018). Moisture sorption isotherms of green lentil (*Lens culinaris Medic.*) stored in a chamber under controlled humidity: Modelling and thermodynamic functions, *International Conference On Life And Engineering Sciences (ICOLES2018)*, CYPRUS

3. Kaya, A., Karataş, M., Arslan, N., Kar, F., (Poster Sunum) (2014). Ksantan Gum Katkılı Stropor Agregalı Betonların Isıl ve Mekanik Özellikleri, *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK11)*, ESKİŞEHİR
4. Karataş, M., Kaya, A., Arslan, N., Kar, F., (Poster Sunum) (2014). Polietilen Glikolün Viskozitesinin Sıcaklık ve Konsantrasyon İle Değişimi, *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK11)*, ESKİŞEHİR

