

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞKAN YATAK KURUTMA SİSTEMİNDE  
HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper DOĞAN**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Senem ŞENTÜRK LÜLE**

**HAZİRAN 2020**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞKAN YATAK KURUTMA SİSTEMİNDE  
HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper DOĞAN  
(301171005)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Senem ŞENTÜRK LÜLE**

**HAZİRAN 2020**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301171005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alper DOĞAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AKIŞKAN YATAK KURUTMA SİSTEMİNDE HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ ANALİZLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı:** **Dr. Öğr. Üyesi Senem ŞENTÜRK LÜLE** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Murat KÖKSAL** .....  
Hacettepe Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 15 Haziran 2020  
**Savunma Tarihi** : 13 Temmuz 2020



## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hayata geçirilmesinde değerli bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren ve çalışmamın her aşamasına büyük bir titizlikle yaklaşıp değerli vaktini, ilgisini ve önerilerini paylaşmaktan kaçınmayan danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Senem ŞENTÜRK LÜLE' ye sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tezin geliştirilmesine katkılarından dolayı değerli jüri üyeleri Prof.Dr. Filiz BAYTAŞ ve Prof.Dr. Murat KÖKSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmanın hazırlanma sürecinde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili anneme, babama ve kız kardeşime teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2020

Alper Doğan  
(Makine Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

|                                                          | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| ÖNSÖZ.....                                               | v            |
| İÇİNDEKİLER .....                                        | vii          |
| KISALTMALAR .....                                        | ix           |
| SEMBOLLER .....                                          | xi           |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                     | xiii         |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                       | xv           |
| ÖZET.....                                                | xix          |
| SUMMARY .....                                            | xxiii        |
| 1. GİRİŞ.....                                            | 27           |
| 2. KURUMA TEORİSİ VE KURUTMA YÖNTEMLERİ .....            | 31           |
| 2.1 Kuruma Teorisi .....                                 | 31           |
| 2.1.1 Nemli tanecik .....                                | 31           |
| 2.1.2 Isı ve kütle transferi.....                        | 33           |
| 2.1.3 Karakteristik kuruma eğrisi.....                   | 35           |
| 2.1.4 Nem yayılımının modellenmesi .....                 | 37           |
| 2.1.5 Yarı teorik ve ampirik modeller.....               | 38           |
| 2.1.6 Model seçimi.....                                  | 39           |
| 2.2 Kurutma Yöntemleri .....                             | 40           |
| 2.2.1 Döner kurutucular .....                            | 42           |
| 2.2.2 Tünel/ konveyör kurutucular.....                   | 43           |
| 2.2.3 Akışkan yatak kurutucular .....                    | 44           |
| 2.2.4 Sprey kurutucular .....                            | 44           |
| 2.2.5 Dondurarak kurutma .....                           | 46           |
| 2.2.6 Tamburlu kurutucular.....                          | 46           |
| 2.2.7 Flaş/Pnömatik kurutucular .....                    | 47           |
| 2.2.8 Mikrodalga ve dielektrik kurutucular.....          | 48           |
| 2.2.9 Solar kurutucular .....                            | 49           |
| 3. AKIŞKAN YATAK KURUTMA.....                            | 53           |
| 3.1 Akışkanlaşma .....                                   | 54           |
| 3.2 Akışkan Yatakta Sıvı Benzeri Davranış.....           | 56           |
| 3.3 Akışkan Yatak Parçacık Karakterizasyonu .....        | 57           |
| 3.2.1 Minimum akışkanlaşma hızı ve basınç düşümü.....    | 57           |
| 3.2.2 Basınç düşümü ( $\Delta p$ ) ve hız ilişkisi.....  | 59           |
| 3.2.3 Geldart tanecik sınıflandırması .....              | 60           |
| 3.4 Akışkan Yatak Kurutucuda Isı ve Kütle Transferi..... | 62           |
| 3.5 Ampirik Model.....                                   | 63           |
| 3.6 Akışkan Yatak Kurutucu Tipleri.....                  | 64           |
| 3.6.1 Konvansiyonel akışkan yatak kurutucular .....      | 64           |
| 3.6.1.1 Sürekli olmayan kurutucular .....                | 64           |
| 3.6.1.2 Kısmen sürekli kurutucular .....                 | 64           |
| 3.6.1.3 Tıkaç akışlı sürekli kurutucular.....            | 65           |

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.2 Değiştirilmiş akışkan yatak kurutucular.....                 | 65         |
| 3.6.2.1 Çok aşamalı kurutucular.....                               | 65         |
| 3.6.2.2 Hibrit kurutucular.....                                    | 66         |
| 3.6.2.3 Atımlı kurutucular.....                                    | 67         |
| 3.6.3.1 Titreşimli kurutucular.....                                | 67         |
| 3.6.3.2 Karıştırıcı/girdaplı kurutucular .....                     | 68         |
| 3.6.3.3 Püskürtmeli kurutucular .....                              | 68         |
| 3.6.3.4 Kızgın buharlı kurutucular .....                           | 69         |
| <b>4. LİTERATÜR ÖZETİ.....</b>                                     | <b>71</b>  |
| <b>5. REFERANS ALINAN DENEY DÜZENİĞİ .....</b>                     | <b>81</b>  |
| <b>6. METODOLOJİ, SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER .....</b>              | <b>85</b>  |
| 6.1 Uygun Matematiksel Modelin Belirlenmesi .....                  | 85         |
| 6.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları .....           | 96         |
| 6.2.1 Deneysel çalışmadan alınan basınç düşümü eğrisi .....        | 99         |
| 6.2.2 Sürüklenme modelinin matematiksel ifadesi .....              | 100        |
| 6.2.3 Mesh (hesap ağı) bağımsızlık testi .....                     | 102        |
| 6.2.4 Sabit veya zamanla azalan yoğunluk kullanımının etkisi ..... | 103        |
| 6.2.5 Sürüklenme modelinin etkisi.....                             | 107        |
| 6.2.6 Restitüsyon katsayısının etkisi .....                        | 113        |
| 6.2.7 3D ve 2D geometrinin etkisi .....                            | 118        |
| 6.2.8 Hava sıcaklığının etkisi .....                               | 120        |
| <b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                  | <b>125</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                              | <b>129</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                  | <b>133</b> |
| EK A: Yoğunluk değişimi için yazılan UDF kodu .....                | 135        |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                               | <b>137</b> |

## KISALTMALAR

|             |                                        |
|-------------|----------------------------------------|
| <b>HAD</b>  | : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği      |
| <b>MR</b>   | : Nem oranı                            |
| <b>MBE</b>  | : Ortalama çapraz hata                 |
| <b>RMSE</b> | : Hatalar toplamının ortalama karekökü |
| <b>SSE</b>  | : Hatalar toplamının karesi            |





## SEMBOLLER

|                                |                                                             |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $A_t$                          | : Tanecik kesit alanı, ( $m^2$ )                            |
| $Bi$                           | : Biot sayısı                                               |
| $C_d$                          | : Sürüklenme katsayısı                                      |
| $D_{eff}$                      | : Efektif difüzyon katsayısı, ( $m^2/s$ )                   |
| $d_p$                          | : Tanecik çapı, (m)                                         |
| $d_t$                          | : Sütun çapı, (m)                                           |
| $D_0$                          | : Difüzyon sabiti                                           |
| $e_b$                          | : Yatağın yayınım katsayısı, ( $m^2/s$ )                    |
| $e_w$                          | : Duvarın yayınım katsayısı, ( $m^2/s$ )                    |
| $e_{ss}$                       | : Restitüsyon katsayısı                                     |
| $h_t$                          | : Tanecik ısı transfer katsayısı, ( $W/m^2K$ )              |
| $h_c$                          | : Taşınım ısı transfer katsayısı, ( $W/m^2K$ )              |
| $h_w$                          | : Duvardan yatağa olan ısı transfer katsayısı, ( $W/m^2K$ ) |
| $h_r$                          | : Işınım ısı transfer katsayısı                             |
| $k_g$                          | : Gazın ısı iletkenlik katsayısı, ( $W/mK$ )                |
| $K_{gs}$                       | : Momentum değişim katsayısı                                |
| $L_{mf}$                       | : Minimum kaynamadaki yatak yüksekliği, (m)                 |
| $L_p$                          | : Levha kalınlığı, (m)                                      |
| $M_0, MR_0$                    | : Başlangıçtaki nem oranı                                   |
| $M^*, M_e$                     | : Denge halinde nem oranı                                   |
| $MR_{kb}$                      | : Kuru bazda nem oranı                                      |
| $MR_{pre}$                     | : Model de hesaplanan nem oranı                             |
| $MR_{exp}$                     | : Deneydeki nem oranı                                       |
| $MR_i$                         | : $i$ anındaki nem oranı                                    |
| $m_{su}$                       | : Taneciğin sahip olduğu su ağırlığı, (kg)                  |
| $m_{kurumadde}$                | : Taneciğin kuru ağırlığı, (kg)                             |
| $Nu_t$                         | : Tanecik Nusselt sayısı                                    |
| $Pr_g$                         | : Gaz Prandtl sayısı                                        |
| $R$                            | : Universal gaz sabiti, ( $kJ/kgK$ )                        |
| $Re_d$                         | : Sütunun Reynolds sayısı                                   |
| $Re_s, Re_p$                   | : Katı faz Reynolds sayısı                                  |
| $r_{sph}$                      | : Küresel tanecik yarıçapı, (m)                             |
| $T_t$                          | : Tanecik sıcaklığı, (K)                                    |
| $T_g$                          | : Gaz sıcaklığı, (K)                                        |
| $T_b$                          | : Yatak sıcaklığı, (K)                                      |
| $T_w$                          | : Duvar sıcaklığı, (K)                                      |
| $U_0$                          | : Gaz hızı, (m/s)                                           |
| $U_{mf}$                       | : Minimum akışkanlaşma hızı, (m/s)                          |
| $\Delta E_a$                   | : Aktivasyon enerjisi, ( $kJ/kmol$ )                        |
| $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ | : $x, y$ ve $z$ yönünde yer değiştirme, (m)                 |
| $k, a, b, n, c, g$             | : Kuruma sabiti                                             |
| $a_w$                          | : Su aktivitesi                                             |
| $\alpha_g$                     | : Gaz fazı hacimsel oranı                                   |
| $\alpha_s$                     | : Katının hacimsel oranı                                    |
| $\chi^2$                       | : Ki-kare                                                   |
| $\Delta p_b$                   | : Yataktaki basınç düşümü, (Pa)                             |
| $\Delta p_{fr}$                | : Sürtünme ile olan basınç düşümü, (Pa)                     |

|                 |                                                                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| $\epsilon_{mf}$ | : Minimum kaynama koşullarındaki boşluk oranı                  |
| $\epsilon_m$    | : Katı madde boşluk oranı                                      |
| $\dot{m}_{sg}$  | : Katıdan gaza olan kütle transferi, (kg/s)                    |
| $\dot{m}_{gs}$  | : Gazdan katıya olan kütle transferi, (kg/s)                   |
| $\mu$           | : Dinamik viskozite, (kg/ms)                                   |
| $\phi_s$        | : Küresellik katsayısı                                         |
| $\rho_g$        | : Gaz yoğunluğu, (kg/m <sup>3</sup> )                          |
| $\rho_s$        | : Katı madde yoğunluğu, (kg/m <sup>3</sup> )                   |
| $\mu_g$         | : Gazın viskozitesi, (kg/ms)                                   |
| $\vec{v}_g$     | : Gaz hızı, (m/s)                                              |
| $\bar{\tau}_g$  | : Gaz gerilme tensörü                                          |
| $\bar{I}$       | : Birim tensörü                                                |
| $\vec{v}_s$     | : Katı hızı, (m/s)                                             |
| $\bar{\tau}_s$  | : Katı fazı gerilme tensörü                                    |
| $v_{r,s}$       | : Katı fazı için terminal hız, (m/s)                           |
| $\sigma$        | : Stefan Boltzman sabiti, (W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )) |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                                         | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Tablo 2.1 :</b> İnce tabaka kurutma matematiksel modelleri [12].                                     | 39                  |
| <b>Tablo 2.2 :</b> Model Seçim Parametreleri [13].                                                      | 40                  |
| <b>Tablo 3.1:</b> K1 ve K2 katsayıları için belirlenmiş değerler [5].                                   | 58                  |
| <b>Tablo 6.1 :</b> Referans deneysel çalışmada kullanılan parametreler [9].                             | 85                  |
| <b>Tablo 6.2 :</b> Regresyon analizinde değerlendirilen matematiksel modeller.                          | 87                  |
| <b>Tablo 6.3 :</b> H=0,1 m ve V=1,88 m/s için elde edilen model katsayıları.                            | 88                  |
| <b>Tablo 6.4 :</b> H=0,1 m ve V=2,3 m/s için elde edilen model katsayıları.                             | 88                  |
| <b>Tablo 6.5 :</b> H=0,1 m ve V=3 m/s için elde edilen model katsayıları.                               | 88                  |
| <b>Tablo 6.6 :</b> H=0,2 m ve V=2,4 m/s için elde edilen model katsayıları.                             | 89                  |
| <b>Tablo 6.7 :</b> H=0,2 m ve V=3,2 m/s için elde edilen model katsayıları.                             | 89                  |
| <b>Tablo 6.8 :</b> H=0,3 m ve V=2,5 m/s için elde edilen model katsayıları.                             | 89                  |
| <b>Tablo 6.9 :</b> H=0,3 m ve V=3,2 m/s için elde edilen model katsayıları.                             | 90                  |
| <b>Tablo 6.10 :</b> Tüm durumlar için “Logarithmic” model matematiksel ifadeleri.                       | 91                  |
| <b>Tablo 6.11 :</b> Regresyon çalışması sonucunda tüm modeller için elde edilen $R^2$ ve SSE değerleri. | 92                  |
| <b>Tablo 6.12 :</b> Alternatif regresyon çalışması sonuçları.                                           | 95                  |
| <b>Tablo 6.13 :</b> HAD modelinin parametreleri.                                                        | 98                  |
| <b>Tablo 6.14 :</b> 70 °C sıcaklıktaki havanın özellikleri.                                             | 122                 |



## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 2.1 : Nemli tanecik sınıflandırması [3] [11].                                                                                             | 32           |
| Şekil 2.2 : Kuruma fazları. (a) Nem zaman grafiği (b) Kuruma hızının zamana bağlı değişimi (c) Kuruma hızının, nem miktarına göre değişimi [2]. | 36           |
| Şekil 2.3 : Kurutma sistemlerinin sınıflandırılması.                                                                                            | 41           |
| Şekil 2.4 : Döner kurutucu şematik gösterimi [10].                                                                                              | 42           |
| Şekil 2.5 : Çift tamburlu kurutucu şematik gösterimi [10].                                                                                      | 47           |
| Şekil 2.6 : Tipik bir hibrit kurutucu sistemi [14].                                                                                             | 50           |
| Şekil 3.1 : Basit bir akışkan yatak kurutucu düzeneği [10].                                                                                     | 54           |
| Şekil 3.2 : Akışkanlaşma fazları [15].                                                                                                          | 55           |
| Şekil 3.3 : Akışkan yatağın sıvı benzeri davranışları [15].                                                                                     | 56           |
| Şekil 3.4 : Tanecik boyutu sabit yatağın $\Delta p$ -hız grafiği [15].                                                                          | 59           |
| Şekil 3.5: Farklı taneciklere sahip akışkan yatağın $\Delta p$ -hız grafiği [15].                                                               | 60           |
| Şekil 3.6 : Geldart tanecik sınıflandırması [16].                                                                                               | 61           |
| Şekil 3.7 : Sürekli olmayan akışkan yatak kurutucu [1].                                                                                         | 64           |
| Şekil 3.8 : Yarı-sürekli akışkan yatak kurutucu [10].                                                                                           | 64           |
| Şekil 3.9 : Tıkaç akışlı akışkan yatak kurutucu [10].                                                                                           | 65           |
| Şekil 3.10 : a) Sprey akışkan yatak kurutucu b) Akışkan yatak kömür kurutma ve sınıflandırma sistemi [10].                                      | 66           |
| Şekil 3.11 : Siklon kurutuculu hibrit akışkan yatak kurutma sistemi [10].                                                                       | 66           |
| Şekil 3.12 : Atımlı akışkan yatak kurutucu [10].                                                                                                | 67           |
| Şekil 3.13 : Titreşimli akışkan yatak kurutucu [10].                                                                                            | 67           |
| Şekil 3.14 : Karıştırıcılı akışkan yatak kurutucu [10].                                                                                         | 68           |
| Şekil 3.15 : Püskürtmeli akışkan yatak kurutucu [10].                                                                                           | 69           |
| Şekil 3.16 : Kızgın buharlı akışkan yatak kurutucu [10].                                                                                        | 69           |
| Şekil 4.1 : M. Kalender ve arkadaşları çalışma sonucu grafiği [5].                                                                              | 71           |
| Şekil 4.2 : A. Cihan ve arkadaşları çalışma sonucu grafiği [18].                                                                                | 72           |
| Şekil 4.3 : D. Mohapatra, çalışma sonucu grafiği [22].                                                                                          | 74           |
| Şekil 4.4 : C. Srinivasakannan ve arkadaşları çalışma sonucu grafiği [24].                                                                      | 76           |
| Şekil 5.1 : Referans alınan deney düzeneği [9].                                                                                                 | 82           |
| Şekil 6.1 : 0,1 m yatak yüksekliğinde 1,88, 2,3 ve 3 m/s hızlarda deneysel kuruma eğrileri [9].                                                 | 86           |
| Şekil 6.2 : 0,2 m yatak yüksekliğinde 2, 4 ve 3,2 m/s hızlarda deneysel kuruma eğrileri [9].                                                    | 86           |
| Şekil 6.3 : 0,3 m yatak yüksekliğinde 2,5 ve 3,2 m/s hızlarda deneysel kuruma eğrileri [9].                                                     | 86           |
| Şekil 6.4 : H= 0,1 m ve V= 1,88 m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.                                                       | 91           |
| Şekil 6.5 : H= 0,1 m ve V= 2,3 m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.                                                        | 93           |
| Şekil 6.6 : H= 0,1 m ve V= 3 m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.                                                          | 93           |

|                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 6.7 :</b> $H= 0.2$ m ve $V= 2,4$ m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri. ....                                                                                                  | 93  |
| <b>Şekil 6.8 :</b> $H= 0,2$ m ve $V= 3,2$ m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri. ....                                                                                                  | 94  |
| <b>Şekil 6.9 :</b> $H= 0,3$ m ve $V= 2,5$ m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri. ....                                                                                                  | 94  |
| <b>Şekil 6.10 :</b> $H= 0,3$ m ve $V= 3,2$ m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri. ....                                                                                                 | 94  |
| <b>Şekil 6.11 :</b> $H= 0,1$ m ve $V= 3$ m/s için alternatif regresyondan elde edilen kuruma eğrisi karşılaştırması. ....                                                                                 | 95  |
| <b>Şekil 6.12 :</b> Mesh (hesap ağı) ve akışkan yatak geometrisi detayları. ....                                                                                                                          | 97  |
| <b>Şekil 6.13 :</b> Deneysel çalışmada yatak boyunca 778. ve 2238. saniyedeki basınç düşümü. ....                                                                                                         | 99  |
| <b>Şekil 6.14 :</b> 0,05 m yükseklikte tanecik hızının radyal değişimi (15-25 s arası ortalama değerler, sabit yoğunluk, Syamlal-O’Brien modeli, 3m/s gaz hızı, 0,1 m yatak yüksekliği). ....             | 102 |
| <b>Şekil 6.15 :</b> 0,05 m yükseklikte tanecik hacimsel oranının radyal değişimi (15-25 s arası ortalama değerler, sabit yoğunluk ve Syamlal-O’Brien modeli, 3m/s gaz hızı, 0,1 m yatak yüksekliği). .... | 103 |
| <b>Şekil 6.16 :</b> Değişken yoğunluk için 0,05 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                           | 104 |
| <b>Şekil 6.17 :</b> Değişken yoğunluk için 0,15 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                           | 104 |
| <b>Şekil 6.18 :</b> Sabit yoğunluk için 0,05 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                              | 105 |
| <b>Şekil 6.19 :</b> Sabit yoğunluk için 0,15 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                              | 105 |
| <b>Şekil 6.20 :</b> Sabit ve değişken yoğunluk durumlarında yatak yüksekliğinin zamanla değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                                    | 106 |
| <b>Şekil 6.21:</b> Sabit ve değişken yoğunluk durumlarında 778. saniyede yatak boyunca basınç düşümleri (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                             | 106 |
| <b>Şekil 6.22:</b> Sabit ve değişken yoğunluk durumlarında 2238. saniyede yatak boyunca basınç düşümleri (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                            | 107 |
| <b>Şekil 6.23:</b> Farklı sürüklenme modelleri için yatak yüksekliğinin zamanla değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                                                 | 108 |
| <b>Şekil 6.24:</b> Sabit ve değişken yoğunluk durumlarına ait katının hacimsel oranının anlık görselleri (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                            | 109 |
| <b>Şekil 6.25 :</b> Syamlal-O’Brien modeli için 778. ve 2238. saniyelerde yatak boyunca basınç düşümü (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                                    | 110 |
| <b>Şekil 6.26 :</b> Syamlal-O’Brien modeli için katının eksenel yönde zamanla hacimsel değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği). ....                                          | 111 |

|                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 6.27 :</b> Wen&Yu modeli için katının eksenel yönde zamanla hacimsel değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                                                           | 111 |
| <b>Şekil 6.28:</b> Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modelleri için katının hacimsel oranının anlık görselleri (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                                           | 112 |
| <b>Şekil 6.29 :</b> Wen&Yu modeli için 778. ve 2238. saniyelerde yatak boyunca basınç düşümü (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği). .                                                                         | 113 |
| <b>Şekil 6.30 :</b> Değişik restitüsyon katsayıları için yatak yüksekliğinin zamanla değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                            | 114 |
| <b>Şekil 6.31 :</b> 0,1 m yükseklikte, 1200. saniyesinde farklı restitüsyon katsayıları için radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ..... | 115 |
| <b>Şekil 6.32 :</b> 0,1 m yükseklikte, 4800. saniyesinde farklı restitüsyon katsayıları için katının radyal yönde hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). ..... | 115 |
| <b>Şekil 6.33:</b> Restitüsyon katsayısının basınç düşümüne etkisi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                                                       | 116 |
| <b>Şekil 6.34:</b> Farklı restitüsyon katsayıları için katının hacimsel oranının anlık görselleri (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                        | 117 |
| <b>Şekil 6.35 :</b> 3D ve 2D modellerde basınç düşümünün 200 saniyelik ortalama için eksenel yönde değişimi (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                             | 119 |
| <b>Şekil 6.36 :</b> 3D ve 2D modelde 0,1 m yükseklikte katının ortalama hacimsel oranının radyal değişimi (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                               | 119 |
| <b>Şekil 6.37 :</b> 3D ve 2D modelde 0,15m yükseklikte katının ortalama hacimsel oranının radyal değişimi (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                               | 120 |
| <b>Şekil 6.38:</b> 3D ve 2D modele ait 30, 60 120 ve 220. saniyelerdeki katının hacimsel oran konturu (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                   | 121 |
| <b>Şekil 6.39 :</b> Sıcak ve soğuk hava, ortalama basınç düşümü (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                                                          | 122 |
| <b>Şekil 6.40:</b> Sıcak ve soğuk hava için 10, 20 ve 30. saniyelerde katının hacimsel oran konturu (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği) .....                                       | 123 |
| <b>Şekil 6.41 :</b> Sıcak ve soğuk hava, katının radyal yönde hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği). .....                                                     | 124 |



## AKIŞKAN YATAK KURUTMA SİSTEMİNDE HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ ANALİZLERİ

### ÖZET

Kimya, ilaç, kâğıt, maden, polimer, seramik, tekstil, gıda ve tarım endüstrilerinde yer bulan en eski ve en yaygın proses kurutmadır. Gıdaların uzun süreli, temiz ve güvenli saklamasını sağlayan teknolojik ilerlemeler başlamadan önce bile tüm toplumlarda güneş altında kurutma kullanılmıştır. Bununla birlikte, kuruma prosesi karmaşık ve anlaşılması zor ısı, kütle ve momentum transfer mekanizmalarının eşzamanlı ve birbiriyle bağlantılı olarak gerçekleştiği bir prosestir. Kurutma işleminin hedefi temelde ürünün sahip olduğu nem miktarını azaltmaktır. Ancak, istenilen ürün kalitesini düşürmeden optimum ısı ve kütle transferini sağlamak ve böylece maksimum kurutma hızını elde etmek önemlidir. Sistemlerin enerji verimli olması ve çevreye olan etkileri de minimum seviyede olmalıdır.

Kurutma sistemleri kurutucu madde, proses sürekliliği, ısı transfer mekanizması ve malzeme taşıma yöntemlerine göre farklılık gösterebilir. Akışkan yatak kurutucular endüstride tanecikli malzemelerin, bulamaç ve lapa haldeki malzemelerin kurutulmasında kullanılan sistemlerden biridir. Temel olarak tanecikli malzemenin bulunduğu hazne, haznenin alt kısmında tanecikleri akışkanlaştırmak için verilen gazın yatak tabanı boyunca eşit aralıklarla üflenmesini sağlayan dağıtıcı, akışkanlaşmayı sağlayacak ve kurutmada kullanılacak olan gazın ısıtılması için ısıtıcı ve gazın beslemesini sağlayacak vantilatörden oluşan bir sistemdir. Sürekli ve kolay kullanım, akışkanlaşma ile birlikte tüm yatakta izotermal koşullar sağlamak, büyük kapasiteli olabilmek, ısı ve kütle transferinin yüksek olması, hareketli parça sayısı az olduğundan düşük bakım maliyetleri gibi avantajlar sunmaktadır.

Kuruma esnasında, taneciğin bulunduğu ortamdan tanecik yüzeyine olan ısı transferi ile tanecik yüzeyindeki nemin buharlaşması ve eşzamanlı olarak taneciğin iç yapısında bulundurduğu nemin de tanecik yüzeyine difüzyonu şeklinde iki süreç meydana gelir. Ampirik ve yarı teorik matematiksel kuruma modelleri bu süreçleri 2. Fick kanunundan türetilip basitleştirilerek kurutulan malzemenin ısı ve nem transferinin, kuruma hızının ve kuruma eğrisinin matematiksel olarak modellenmesini sağlamaktadır. Bu tür matematiksel modellere ince tabaka kurutma modelleri adı verilir. Bu modellerin kullanılabilmesi için zamana bağlı nem değişimini veren deneysel verilere ihtiyaç vardır. Deneysel veriler regresyon yöntemleri ile bu matematiksel ifadelerden uyum olanına dönüştürülürler. Bu şekilde istenilen nem oranı için gerekli proses süresi rahatlıkla hesaplanabilir. Literatürde bu tür çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır.

Kuruma prosesini incelemenin bir yolu da günümüzde pek çok alanda kullanılan hesaplamalı akış dinamiği analizleridir. Deneysel çalışmalardan farklı olarak bu analizlerde yatak içindeki akış hidrodinamiğinin gözlenmesi de mümkün olmaktadır. Ancak, hesaplamalı akış dinamiği simülasyon çalışmaları literatürde sınırlı sayıdadır.

Bu tez çalışmasında, literatürde sınırlı sayıda çalışma olması sebebiyle kuruma prosesinin hesaplamalı akış dinamiği ile akış hidrodinamiğini incelemek üzere literatürden alınan Ümran Çetin tarafından yapılan kuru bazda %98 nem oranına sahip olan (buğday) hedik için yapılmış olan bir akışkan yatak kurutma deneyi kullanılmıştır.

Referans deneyler sırasında 3, 6 ve 9 kg'lık hedikler (sırasıyla 10 cm, 20 cm ve 30 cm yatak yüksekliği) için her bir yatak yüksekliği için farklı hız değeri kullanılarak kuruma parametrelerinin kuruma eğrisine etkilerini incelemek üzere parametrik bir çalışma yapılmıştır. Kurutma 70 °C sabit hava sıcaklığında yapılmıştır.

Tez çalışmasında öncelikli olarak laboratuvar tipi akışkan yatak kurutucu ile kurutulan haşlanmış buğdayın kuruma esnasında zamana göre nem değişimini en iyi tahmin edecek matematiksel ince tabaka modelin bulunması amacıyla lineer olmayan regresyon metodu EXCEL Çözücü modülünde iç içe döngüler hazırlanarak deney sonuçlarına uygulanmıştır. Bu çalışma referans alınan çalışmada yapılmamıştır. 10 farklı ince tabaka kurutma modeli dikkate alınmış ve en yüksek korelasyon katsayısı  $R^2$ 'yi ve en düşük hataların kareleri toplamını veren model tespit edilmiştir. Analizler tezde kullanılan deney düzeneği için "Logarithmic" modelin en iyi yaklaşımı veren ince tabaka modeli olduğunu göstermiştir. Bu analiz referans çalışmada yapılmamıştır.

Daha sonra 2 boyutlu HAD analizlerine geçilmiştir. Simülasyonlarda ANSYS Fluent (versiyon 18.2) kullanılmıştır. Çalışmanın bu kısmında referans deney düzeneği geometrisi ANSYS Fluent SpaceClaim modülü ile bire bir olarak modellenmiş ve mesh (hesap ağı) oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçlarının mesh büyüklüğü ile değişmediği durum bulunarak sonuçların mesh büyüklüğünden bağımsız olması sağlanmıştır. Bu yapılırken hesaplama zamanı da dikkate alınmıştır.

Kuruma prosesinde kurutulan taneciklerin nem kaybetmesi ile yoğunlukları değişmektedir. Bazı durumlarda boyut değişimi de olmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak boyut sabit tutularak yapılan hesaplamalı akış dinamiği analizlerinde tanecik yoğunluğunun sabit kaldığı ve ince tabaka modeli sonucu elde edilen matematiksel eşitliğe göre zamanla azaldığı durumlar için simülasyonlar yapılarak akış dinamikleri incelenmiştir. "Logarithmic" model sonucu elde edilen yoğunluk değişimi eşitliği Fluent kodunun kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) özelliği kullanılarak C programlama dili ile yazılan algoritma ile Fluent koduna eklenmiştir. Simülasyonlar Eulerian-Eulerian yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Bu aşamada sürüklenme modeli olarak Syamlal-O'Brien modeli seçilmiştir. Katı taneciklerin yoğunluğunun azalmasıyla birlikte yatağın daha üst kısımlarına doğru ilerlediği gözlenmiştir. Yatak boyunca meydana gelen basınç düşümü ise neredeyse aynı kalmış, maksimum basınç düşümünün görüldüğü yükseklik ise artmıştır.

Katı-gaz tipi akışkan yatak sistemlerde farklı sürüklenme modelleri seçmek mümkündür. Referans deney düzeneğinin simülasyonu için kullanılabilecek bir diğer seçenek de Wen&Yu modelidir. İkinci aşamada Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modellerinin karşılaştırması için bir dizi simülasyon çalışması yapılmıştır. Wen&Yu modelinin yatak yüksekliği tahmini Syamlal-O'Brien modelinden daha fazla olmuştur. Ayrıca, Wen&Yu modelinde aynı sürelerde katı tanecikler yatağın alt bölgelerinde henüz tam akışkanlaşmamışken Syamlal-O'Brien modelinde homojen akışkanlaşma tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Wen&Yu yatak basınç düşümü değerleri deneysel verilere daha yakın çıkmıştır.

Katı taneciklerin kendi arasında yaptıkları çarpışmalardaki esneklik oranı restitüsyon katsayısı ile ifade edilir. Restitüsyon katsayısı 1 olduğunda çarpışmalar %100 elastik olarak değerlendirilmektedir. Üçüncü aşamada restitüsyon katsayısının akış

hidrodinamiği üzerindeki etkisini incelemek üzere bu değer 0,9 ve 0,6 seçilerek simülasyonlar yapılmıştır. Bu katsayının ortalama yatak yüksekliği ve basınç düşümü üzerinde ciddi bir etkisi olduğu gözlenmemiştir.

HAD simülasyonlarının en önemli avantajlarından biri eldeki problemin 3 boyutlu (3D) olarak incelenmesine olanak sağlamasıdır. Ancak bu imkân çok sayıda mesh kullanılmasına neden olmakta dolayısıyla hesaplama zamanını çok arttırmaktadır. Bu dezavantaj çok çekirdekli hızlı hesaplama sistemlerinde paralel hesaplama yapılması ile aşılabilmektedir. Bu tez çalışmasında Dr. Öğ. Üyesi Senem Şentürk Lüle'nin İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen "Genel Araştırma Projesi" kapsamında alınan çok çekirdekli hızlı hesaplama sistemi kullanılmıştır. Her zaman basamağında yakınsak bir simülasyon elde edebilmek için zamana bağlı hesaplar 0,04 saniye adım büyüklüğü ile yapılmıştır. Bazı simülasyonlarda ise 0,02 saniyesine inmek gerekmiştir. 3D hesaplarda bir zaman adımı 50 çekirdek kullanıldığında yaklaşık olarak 7 dakikada tamamlanmıştır. Tüm simülasyon süresinin 5400 saniye olduğu düşünüldüğünde 135.000 zaman adımına ihtiyaç duyulduğu bu sürenin anlamlı olmadığı aşıkardır. Bu nedenle hesaplamalar literatürde de yaygın olarak kullanıldığı üzere 2 boyut (2D) kullanılarak yapılmıştır. Son olarak geometrideki bu zorunlu boyut azaltmanın sonuçlar üzerinde ne kadar etkisi olduğuna bakılarak yaklaşımın geçerliliği test edilmiştir. Bu iki model arasında yatak basınç düşümünde yaklaşık %3'lük bir fark olduğu görülmüştür. Katı taneciklerin hacimsel oranlarına bakılınca bu farkın %15'lere çıktığı durumlar gözlenmiştir.

Bu tez çalışması akışkan yatak kurutucuda akış hidrodinamiği ile ilgili önemli çıkarımlar sunmuştur. Tez çalışmasından yola çıkarak daha sonra yapılacak çalışmalarda, sürüklenme katsayısını kodun UDF özelliği kullanılarak deneysel çalışmaya daha yakın sonuç verecek şekilde değiştirip sonuçları irdelenebilir.



# **COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS FOR A FLUIDIZED BED DRYER SYSTEM**

## **SUMMARY**

Drying is the oldest and the most common process in the chemical, pharmaceutical, paper, mineral, polymer, ceramic, textile, food, and agricultural industries. Even before the technological advances that enabled long-term, clean, and safe storage of food started, drying under the sun was used in all societies. However, the drying process is a process in which complex, difficult-to-understand heat, mass, and momentum transfer mechanisms occur simultaneously and in conjunction. The goal of the drying process is basically to reduce the amount of moisture in the product. However, it is important to ensure optimum heat and mass transfer without reducing the desired product quality thus achieving the maximum drying speed. The systems must be energy efficient and have a minimum impact on the environment.

Drying systems may differ according to the drying agent, process continuity, heat transfer mechanism, and material handling methods. Fluidized bed dryers are one of the systems used in the industry for drying granular materials, slurry, and porridge materials. Basically, they consist of a chamber containing the granular material, a distributor in the lower part of the chamber which ensures the gas supplied to fluidize the particles is blown evenly along the bed base, a heater that heats the drying fluid, and a ventilator that provides supply of fluidization gas. It offers advantages such as continuous and easy usage, providing isothermal conditions in the whole bed with fluidization, having large capacity, high heat, and mass transfer, and low maintenance costs due to the low number of moving parts.

During drying, two processes take place at the same time. While the moisture on the particle surface evaporates due to heat transfer from hot environment, the moisture contained in the particle diffuses to the particle surface. Empirical and semi-theoretical mathematical drying models derive and simplify these processes from 2. Fick's law, thereby mathematically modeling the heat and moisture transfer, drying speed, and drying curve of the dried material. Such mathematical models are called thin layer drying models. In order to use these models, there is a need for experimental data that gives moisture change over time. Experimental data are converted into one of these mathematical expressions by regression methods. In this way, the required process time for the desired humidity can be easily calculated. Such studies are frequently encountered in the literature.

One way to examine the drying process is computational flow dynamics (CFD) analysis that is used in many areas today. Unlike experimental studies, it is also possible to observe the flow hydrodynamics within the bed in these analyses. However, CFD simulation studies are limited in the literature.

In this thesis study, a fluidized bed drying experiment of Ümran Çetin from the literature for wheat having 98% humidity on a dry basis was used to examine the flow

hydrodynamics of the drying process since number of studies in the literature are limited on this method.

During the reference experiments, a parametric study was carried out to investigate the effects of drying parameters on the drying curve by using several different air inlet velocities for 3, 6 and 9 kg wheat load (10 cm, 20 cm and 30 cm bed height, respectively). Drying was done at constant air temperature of 70 °C.

In this thesis, in order to find the mathematical thin layer model that will best predict the change of moisture with time in boiled wheat that is dried within a laboratory scale fluidized bed dryer, interlocking loops were prepared in EXCEL Solver module and applied to non-linear regression method is the experimental data. 10 different thin layer drying models were taken into consideration and the model with the highest correlation coefficient  $R^2$  and minimum sum of the least squares of errors were determined. Analysis has shown that the "Logarithmic" model is the best thin layer model for this study. This study was not performed in the reference experimental study.

Then, 2D CFD analyses were performed. ANSYS Fluent (version 18.2) was used in the simulations. In this part of the study, the reference experiment setup geometry was modeled exactly with ANSYS Fluent SpaceClaim module and mesh was created. By finding the situation in which the simulation results do not change with the mesh size, the results are provided to be independent from the mesh size. Calculation time is also taken into account while doing this analysis.

The density of drying particles changes with the loss of moisture. In some cases, there is also a change of size. In this CFD analysis, while keeping the particle size constant, simulations were performed by analysing the flow dynamics for cases where the particle density remained constant and decreased over time according to the mathematical equation obtained as a result of thin layer model analysis at the first part of the thesis. The "Logarithmic" density change was added to the Fluent code using the algorithm written in C programming language using the user defined function feature of the Fluent code. Simulations were performed using the Eulerian-Eulerian approach. At this stage, Syamlal-O'Brien model was chosen as the drag model. It has been observed that the solid particles move towards the upper parts of the bed with the decreasing density. Pressure drop values along the bed was nearly similar however, the bed height which had maximum pressure drop was increased.

It is possible to choose different drag models in solid-gas type fluidized bed systems. Another option that can be used for simulating the reference experiment setup is the Wen&Yu model. A series of simulation studies have been carried out to compare Syamlal-O'Brien and Wen&Yu models. The bed height estimate of the Wen&Yu model was more than the Syamlal-O'Brien model. In addition, homogeneous fluidization was detected in the Syamlal-O'Brien model while the solid particles were not yet fully fluidized in the lower regions of the bed in Wen&Yu model. However, Wen&Yu bed pressure drop values were closer to experimental data.

The elasticity of the solid particle collisions between themselves is expressed by the restitution coefficient. Collisions are considered 100% elastic when the restitution coefficient is equal to 1. To examine the effect of the restitution coefficient on the flow hydrodynamics, simulations were performed by selecting this value as 0.9 and 0.6 respectively. It has been observed that this coefficient has no major effect on average bed height and pressure drop.

One of the most important advantages of CFD simulations is that it allows the problem to be examined in 3 dimensions (3D). However, this possibility requires many meshes to be used thus increases the duration of the calculation. This disadvantage could be overcome by performing parallel calculations in multi-core fast calculation work stations. In this thesis, multi-core fast calculation system, which was acquired within the scope of the "General Research Project" of Asst. Prof. Dr. Senem Şentürk Lüle supported by Istanbul Technical University Scientific Research Projects Unit was used. In order to obtain a convergent simulation at each time step, time dependent calculations were performed with a step size of 0.04 seconds. In some simulations, it was necessary to go down to 0.02 seconds. In 3D calculations, a time step was completed in approximately 7 minutes when 50 cores were used. Considering the entire experimental time of 5400 seconds, it is obvious that the computation time required for total of 135,000 time steps is not meaningful. For this reason, calculations were made using 2D, as is widely used approach in the literature. The validity of the approach has been tested by investigating how much this mandatory dimension reduction changes the results. A difference of approximately 3% was observed in the bed pressure drop between these two models. On the other hand, for the volume fraction of solid particles, the difference increased to 15%.

The simulation results in this study provided important insight on flow hydrodynamics of a fluidized bed dries. In the future studies, the drag coefficient can be changed by using the UDF feature of the code to give a closer result to the experimental study.



## 1. GİRİŞ

Kurutma işlemi kimya, ilaç, kâğıt, maden, polimer, seramik, tekstil, gıda ve tarım endüstrilerinde yer bulan en eski ve en yaygın prosestir. Aynı zamanda oldukça karmaşık ve anlaşılması zor ısı, kütle ve momentum transfer mekanizmalarının eşzamanlı ve birbiriyle bağlantılı olarak gerçekleştiği proseslerden biridir. Kurutma işleminde hedef ürünün sahip olduğu nem miktarını azaltmaktır. Örneğin; gıda endüstrisinde kurutma işlemi, gıda maddelerinin saklanma koşullarının iyileştirilmesi ve raf ömrünün uzatılması açısından oldukça önemlidir [1]. Bununla birlikte sıcaklık, nem miktarı ve madde içindeki suyun hareketliliği gibi parametreler kurutma işlemini ve ürün kalitesini ciddi ölçüde etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle kurutma işleminde prosesin sürekli kontrol altında olması önemlidir [2].

Kurutma prosesi ayırıştırma teknolojileri arasında enerjinin en yoğun kullanıldığı proseslerden biri olarak bilinir. Nem gidermenin verimli olması için bir ısı kaynağına, bazı durumlarda vakum işlemine [3] ve bazı tamburlu, akışkan yatak, konveyör vb. hareket gerektiren proseslerde ise elektrik enerjisine ihtiyaç vardır.

Kurutma temelde ısıl işlemlerden oluşan bir prosestir. Bu nedenle, kurutma esnasında çevreden kurutulan maddeye ısı geçişi ile maddenin yüzeyindeki nemin buharlaşması ve maddenin iç yapısında depolanmış nemin madde yüzeyine hareket etmesi şeklinde birbiri ile bağlantılı iki ana proses gerçekleşir. Bunun dışında kurutulan maddede gerçekleşen bazı fiziksel ve kimyasal dönüşümler maddenin yapısal özelliklerini de değiştirebilir [3].

Kurutma işleminde önemli konulardan biri de sistemin ve kurutulan maddenin kuruma kinetiğidir. Bu, kurutma sistemlerinin tasarımında, simülasyonunda ve optimizasyonunda oldukça önemli bir yere sahiptir. Literatürde farklı koşullar altında birçok malzemenin kinetiklerinin tanımlanması için sayısız farklı matematiksel model geliştirilmiştir [4].

İnce tabaka kurutma olarak bilinen ve katı maddelerdeki suyun hareketini ifade eden Fick difüzyon kanunundan yola çıkarak geliştirilen ampirik modeller bugün birçok maddenin kuruma davranışının ifade edilmesinde kullanılmaktadır. Bu ampirik

modeller Fick'in ikinci kanununu basitleştirmek için maddenin ince tabakalardan oluştuğunu varsayarak kısmi diferansiyel denklemlerin çözümüne dayanır [1]. Bu modeller genellikle kuruma kinetiklerinin hesaplanması işleminde büyük kolaylık sağlarlar. Bununla birlikte, regresyon yöntemi genellikle deneysel verilerin analizinde yaygın olarak kullanılır [5].

Akışkan yatak sistemler endüstride gübre, ilaç hammaddeleri, çeşitli kimyasallar, tarım ve gıda ürünlerinin kurutulması işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Akışkan yatak kurutucularda akışkanlaşmanın sağlanabilmesi için kurutulacak maddenin nem oranının çok yüksek ve boyutlarının yeterince küçük olması gerekmektedir [7]. Akışkan yatak kurutucularda ısı ve kütle transfer oranı yüksektir ve malzeme hazne içerisinde sürekli olarak karışmaktadır. Katı ve gazın sürekli ve iyi karışması katı-gaz arasındaki temasın verimini arttırmakta ve böylece ısı ve kütle transferinin verimliliği artmaktadır. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [7]. Ayrıca, basit yapıda olmaları ve böylece bakım kolaylığı sağlamaları, yüksek gaz sıcaklıklarının kullanılabilmesi ve bakım ve yatırım maliyetinin düşük olmaları sahip olduğu diğer avantajlarıdır.

Hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) ile modelleme ve simülasyon bir kurutucunun geliştirilmesinde veya optimizasyonunda büyük bir kolaylık sağlamakta ve hem ekonomik anlamda hem de zaman anlamında büyük tasarruflar sağlamaktadır. HAD yöntemi genellikle akışkan yatağın hidrodinamik davranışının analizinde kullanılmaktadır. Akışkan yataklar için yapılan HAD simülasyonları temelde kütle, enerji ve momentum korunumu denklemlerine dayanır. Bu denklemler fazların birbirleri arasındaki etkileşimi ifade etmektedir. Simülasyonlarda iki fazlı akış modelleri kullanılır. Fazlardan biri yoğun faz yani taneciklerin oluşturduğu faz olarak tanımlanırken diğeri tanecik olmayan ya da akışkan faz olarak tanımlanır [8].

Bu tez çalışmasında kurutma amacıyla kullanılan akışkan yatak kurutucularda yatağın hidrodinamik analizi HAD yöntemi ile incelenmiştir. Bu kapsamda, Dr. Ümran Erçetin'in doktora tez çalışmasında kullandığı haşlanmış buğdayları kurutmak için tasarladığı deney düzeneği temel alınmıştır [9]. Bu çalışmadan farklı yatak yükseklikleri için farklı hızlarda 70 °C çalışma sıcaklığında çalıştırılan yataktan kuruma ve basınç düşümü eğrileri alınmıştır.

Öncelikle, literatürde bulunan ampirik korelasyonlardan hangisinin deney düzeneğindeki kurutma için daha uygun olduğunun belirlenmesi için lineer olmayan regresyon yöntemi deneysel verilere uygulanmıştır. Ardından, simülasyonlarda yoğunluğun sabit alınması ve zaman bağı kuruma eğrilerine uygun olarak azalması arasındaki farklılıklar irdelenmiştir. Daha sonra, kurutulan buğday taneciklerinin simülasyonuna uygun olduğu tespit edilen Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu sürüklenme modellerinin akış dinamiği üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca taneciklerin çarpışma elastikliğini ifade eden restitüsyon katsayısının farklı değerlerinin simülasyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm bunlara ek olarak simülasyonların 2 veya 3 boyutlu yapılmasının yarattığı farklılıklar irdelenmiştir.





## **2. KURUMA TEORİSİ VE KURUTMA YÖNTEMLERİ**

Kuruma, basitçe kurutma havası ile kurutulan madde (tanecik) arasında gerçekleşen ısı ve kütle (nem) transferi olarak tanımlanabilir. Kuruma esnasında, taneciğin bulunduğu ortamdan tanecik yüzeyine olan ısı transferi ile tanecik yüzeyindeki nemin buharlaşması ve eşzamanlı olarak taneciğin içyapısında bulundurduğu nemin de tanecik yüzeyine difüzyonu şeklinde iki süreç meydana gelir.

Kuruma hızını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri kurutma havasının sahip olduğu sıcaklık ve dolayısıyla entalpi değeri ve sahip olduğu bağıl nem miktarıdır. Havanın ısıtılması ile birlikte bağıl nem miktarı azalırken entalpisi artar ve buna bağlı olarak da sahip olduğu buharlaştırma kapasitesi artar.

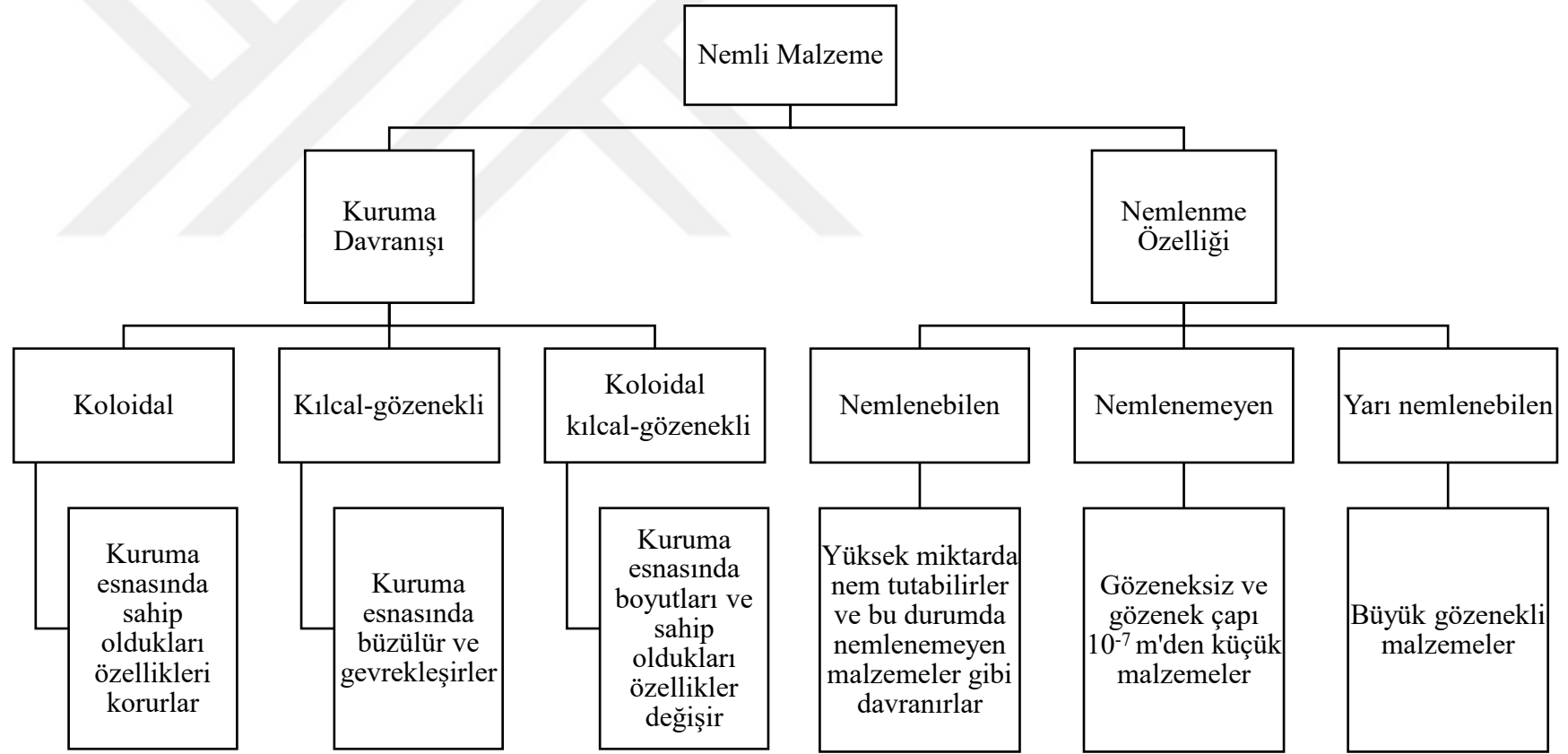
Kurutma sıcaklığı ise istenilen sonuca bağlı olarak belirli limitlerin altında olmalıdır. Sıcaklığın olması gerekenden yüksek olması, kurutma zamanını kısaltmakla birlikte kurutulan maddeye fiziksel, kimyasal ve/veya biyolojik olarak zarar vermekte ve bu da malzemenin dokusunun, renginin, aromasının ve besleyici özelliklerinin etkilenmesine sebep olabilmektedir [10]. Bu nedenle kurutma sıcaklığı, kurutulan maddenin yapısına ve özelliklerine uygun olarak seçilerek kontrollü bir şekilde uygulanmalıdır.

### **2.1 Kuruma Teorisi**

#### **2.1.1 Nemli tanecik**

Nemli tanecikler bünyesinde bulundurduğu su miktarına göre fiziksel, kimyasal, yapısal, biyokimyasal ve diğer özellikleri açısından farklılıklar gösterir. Bu nedenle kuruma işleminde kullanılacak yöntem, kurutucu tipinin seçilmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Nemli tanecikler Şekil 2.1’de gösterildiği gibi kuruma esnasında gösterdiği davranışlara göre üç grupta incelenir.



Şekil 2.1 : Nemli tanecik sınıflandırması [3] [11].

Koloidal taneciklerin kuruma esnasında tanecik boyutu değişirken, sahip oldukları elastiklik özellikleri korunur (örneğin Jelatin). Bu da nemlenmeden önce sahip olduğu fiziksel özelliklerin (boyut gibi), nemlenip tekrar kurutulduktan sonra da korunmasını sağlar.

Kılcal-gözenekli tanecikler, kuruma sırasında ve kuruduktan sonra gevrek, biraz büzülmüş hale gelir ve kolaylıkla öğütülebilir veya parçalanabilirler. Literatürde, kurutulan tanecikler sahip oldukları boşluk çapları  $10^{-7}$  m'den daha küçük ise kılcal boşluklu olarak değerlendirilirler.

Koloidal kılcal-gözenekli tanecikler ise yukarıda özellikleri verilen iki tanecik tipinin özelliklerinin hepsini taşır. Kılcal gözeneklerin veya kanalların duvarları elastik bir yapıya sahip olmakla birlikte, kuruma esnasında şişerler (gıda maddeleri, ağaç, kâğıt, deri...).

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kurutulan malzemeler yapısındaki neme göre üç grupta incelenirler.

- Nemlenemeyen malzemeler, içyapılarında nem bulundurmazlar. Bu gruptaki malzemeler gözeneksiz veya gözenekli fakat gözenek çapı  $10^{-7}$  m'den küçük olan taneciklerin tümünü kapsar.
- Yarı nemlenebilir malzemeler ise daha çok büyük gözenekli taneciklerin bulunduğu gruptur. Gözeneklerinin büyük olması sebebiyle içyapılarında bağlı nem bulundururlar ve kuruma esnasında içyapıdaki nemin uyguladığı buhar basıncı, atmosferik yüzeyde bulunan suyun oluşturduğu buhar basıncından çok az düşüktür.
- Nemlenebilir tanecikler ise küçük gözenekli yapıya sahiptir ve içyapılarında bağlı nem bulundurabilirler. Bu nedenle, nem oranı, nemlenebilir malzemenin sahip olabileceği maksimum nem oranını geçtiği durumlarda, yani bağımsız nem içerdikleri hallerde, nemlenemeyen malzemeler gibi davranış gösterirler.

### 2.1.2 Isı ve kütle transferi

Kuruma esnasında iki ana süreç gerçekleşir. İlk olarak dış ortamdaki ısı enerjisinin bir kısmı, kurutma sürecinin tipine ve kurutma yöntemine göre, malzemeye iletim, taşınım veya ışıınım yoluyla geçer. İkinci olarak da gözenekli yapıda bulunan nem, sıcaklığın

artması ve tanecik yüzeyindeki nemin buharlaşması ile birlikte, tanecik yüzeyine doğru hareket eder ve burada buharlaşarak tanecikten ayrılır.

Isı enerjisi taneciğe üç farklı şekilde geçebilir [3].

- **Taşıım:** En yaygın görülen transfer şeklidir. Buharlaşma için gerekli ısı enerjisi dış ortamda bulunan ısıtılmış hava veya gazın tanecik yüzeyine teması ile sağlanır. Hava (en yaygın kullanılan gaz), asal gazlar (örneğin Azot) direkt yanma gazları veya kızgın buhar, taşıım ile çalışan kurutma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu tip kurutucular direkt kurutucu olarak da adlandırılırlar. Akışkan yatak kurutucu, flaş kurutucu, döner kurutucu, spreı kurutucu ve konveyör-tünel kurutucu bu tip sistemlere örnektir [10].
- **İletim:** Buharlaşma için gerekli ısı enerjisi taneciğe temas eden sıcak yüzeylerden sağlanır [11]. Kurutucunun kurutma odasındaki duvarlar ve/veya taneciklerin yerleştirildiğı bölmeler, dışarıdan buhar, sıcak hava vb. gazların geçirilmesi ile ısıtılır ve malzemenin bu yüzeyler ile temas etmesi ile birlikte buharlaşma işlemi başlar. Buharlaşan nemin uzaklaştırılması için genellikle ortamda vakum olması gerekir [10]. Tepsili, tamburlu ve döner kurutucu iletim yolu ile enerji transferi sağlayan kurutuculardan bazılarıdır.
- **Isınım:** Güneş, dielektrik ve mikrodalga sistemler tarafından yayılan radyasyon enerjisi kullanılır. Nemli malzemelerin büyük bir kısmının yalıtkan olması, radyasyonun emilerek taneciğın hacimsel olarak ısınması sağlanır. Enerji sadece su molekülleri tarafında soğrulur. Bu nedenle kurutma işleminde daha az enerji kullanılır. Bu tip sistemlerin ilk yatırım ve işletme maliyeti oldukça yüksektir. Dolayısı ile yüksek hacimli kurutma ihtiyacında kullanılması daha uygundur [10].

Tanecik yüzeyine aktarılan ısı, taneciğın içi ile yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkından dolayı tanecik merkezine doğru aktarılır. Aktarılan ısının büyük bir kısmı iletim yolu ile bir kısmı da kuruma esnasında gerçekleşen nem hareketinden kaynaklı taşıım yolu ile aktarılır.

Nem transferi ise farklı transfer mekanizmalarının kombinasyonu ile gerçekleşir. Bunlardan en önemlileri [3]:

- Kılcal kanallarda oluşan basınç farkı ile oluşan akış.
- Sıvı suyun tanecik bünyesindeki konsantrasyon farkından dolayı yayılımı.

- Bölgesel buhar basıncı farkından dolayı oluşan buhar yayılımı.
- Dış basınç veya yüksek dış sıcaklık sebebiyle toplam basınç değişiminden dolayı oluşan viskoz akış.

Yukarıdaki transfer mekanizmalara ek olarak termal yayılım, yüzey yayılımı ve büzülme basıncından dolayı oluşan akış da nem transferinde rol oynar fakat etkileri ihmal edilecek kadar düşüktür. Bu nedenle gıda maddelerinin kurutulmasında etken olarak değerlendirilmezler.

### 2.1.3 Karakteristik kuruma eğrisi

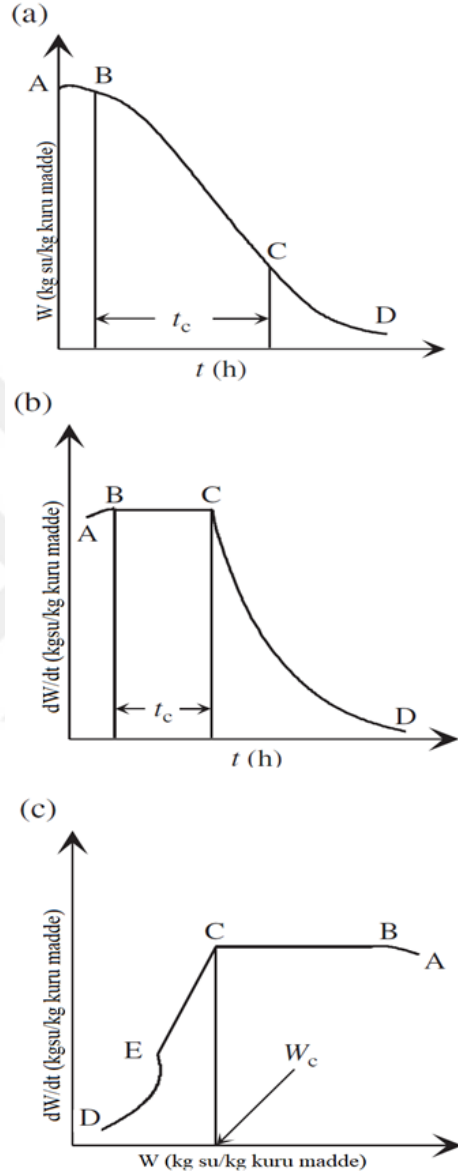
Kurutma işleminde nem miktarı genellikle kuru madde bazında hesaplanır. Nem oranı, maddenin sahip olduğu nemli kütlesinin ( $m_{su}$ ) maddenin tamamen kuru halde sahip olduğu kütleyle ( $m_{kuru\ madde}$ ) oranı olarak ifade edilir (Denklem 2.1). Bu aslında kuru nem olarak da adlandırılabilir ve  $MR_{kb}$  olarak gösterilir.

$$MR_{kb} = \frac{m_{su}}{m_{kuru\ madde}} \quad (2.1)$$

Şekil 2.2’de sıradan katı maddenin zamana bağlı kuruma eğrisi görülmektedir. Şekil 2.2a’daki grafik incelendiğinde, eğrideki A-B aralığı kuruma işleminin ilk adımıdır. Burada tanecik etrafında akan hava sahip olduğu ısıyı tanecik yüzeyine taşır ve taneciğin yüzeyindeki sıcaklık zamanla yükselir. Bu süreç hava ile tanecik yüzeyi sıcaklığı eşit olana kadar devam eder. Bu aşamada çevre koşullarına bağlı olarak, nemli malzeme kurumak yerine daha da fazla nemlenebilir.

B-C aralığı artık malzemenin nem kaybetmeye başladığı aşamadır ve şekilde görüldüğü üzere neredeyse lineer bir değişim bulunmaktadır. Bu aralıkta malzemenin birim yüzeyinde kaybedilen su veya nem miktarı sürekli dir. B-C periyodu süresince malzeme yüzeyinde sürekli olarak buharlaşma ile birlikte nem kaybı oluşur. Burada tanecik yüzeyinden buharlaşma ile nem kaybedilirken taneciğin yapısındaki gözeneklerde bulunan nem veya su kılcal kanallar vasıtası ile tanecik yüzeyine taşınır ve yüzey sürekli neme doymun halde bulunur. Bu aşamada boşluklardan yüzeye olan nem transfer hızı, yüzeyden buharlaşan nem hızına neredeyse eşit olarak kabul edilir. Dolayısı ile kuruma oranı havadan tanecik yüzeyine olan ısı transferi ile kontrol edilebilir. Bu aşama matematiksel hesaplarda ısı ve/veya nem transfer katsayıları, kurutma havası ile temas halinde olan yüzey alanı ve kurutma havası ile kurutulan yüzey arasındaki sıcaklık ve bağıl nem farkı ile ifade edilmektedir. B-C eğrisinin

sonlarına doğru artık doygun halde bulunan tanecik yüzeyi kuru hale geçmeye başlar. Yani burada artık taneciğin içyapısından yüzeye olan nem transferi, yüzeyden olan buharlaşma miktarına göre azalmaya başlar ve yüzey zamanla tamamen kuru hale gelir ki bu C noktasıdır. Bu nokta “kritik nem oranı” olarak adlandırılır.



**Şekil 2.2 :** Kuruma fazları. (a) Nem zaman grafiği (b) Kuruma hızının zamana bağlı değişimi (c) Kuruma hızının, nem miktarına göre değişimi [2].

C-D aralığında artık yüzeyde herhangi bir nemlenme gözlenmemektedir. Dolayısıyla zamanla yüzey sıcaklığı daha da artmaya başlar ve kuru termometre sıcaklığına ulaşıncaya kadar da artmaya devam eder. Sıcaklığın artması ile birlikte tanecik yüzeyinden taneciğin içyapısına olan ısı transferi de artar ve bu şekilde içyapısında

kalan düşük miktardaki nem molekülleri zamanla daha da azalır fakat bu azalma oldukça yavaş seyreder.

Şekil 2.2 (c)'deki grafik taneciğin kuruma hızının, kuru bazda sahip olduğu nem miktarına göre değişimini ifade etmektedir ve Şekil 2.2 (a)'nın türevi alınarak elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere, B-C aralığında kuruma hızı sabit ve sürekli, C-D aralığında ise kuruma hızı azalmaktadır.

#### 2.1.4 Nem yayılımının modellenmesi

Yayılım denklemleri deneysel kuruma eğrilerinin matematiksel modellenmesi için uzun yıllardır gıda mühendisleri ve diğer bilim insanları tarafından kullanılmakta ve yeni teoriler geliştirilmektedir. 1988 yılında Craptise ve ekibi gözenekli maddelerdeki su aktivitesini ve itici gücü ifade eden bir teori geliştirmiş ve malzeme içindeki suyun hareketini aşağıdaki yayılım denklemi ile ifade etmişlerdir [2].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla_z (D_{eff} \nabla_z M) \quad (2.2)$$

Burada  $D_{eff}$  efektif nem transfer veya nem yayılım katsayısı ve  $z$  büzülmeyi belirleyen boyutsuz koordinattır.

Efektif yayılım katsayısı, kuruma sürecinin sıcaklık ve nem oranına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu bağımlılık da genellikle Arrhenius tipi denklem ile ifade edilir.

$$D_{eff} = D_0(M) \exp \left[ \frac{\Delta E_a(M)}{RT} \right] \quad (2.3)$$

Burada  $\Delta E_a$  nem yayılımı için gerekli aktivasyon enerjisi,  $R$  universal gaz sabiti,  $T$  ise sıcaklıktır.

Farklı sınır şartları, 1 boyutlu transfer, düzenli geometriler ve sabit yayılım katsayısı için Denklem 2.3 Crank (1967) tarafından analitik olarak tekrar çözülmüştür. Levha şeklindeki geometri için elde edilen denklem aşağıdadır [2].

İç kütle transferi;

$$\frac{M_m - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2i+1)^2}{4L_p^2} \pi^2 D_{eff} (t - t_0) \right] \quad (2.4)$$

İç ve dış dirençler;

$$\frac{M_m - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2Bi^2}{\lambda_i^2 + Bi^2 + Bi} \exp \left[ \frac{\lambda_i^2 D_{eff}}{L_p^2} (t - t_0) \right] \quad (2.5)$$

Burada  $L_p$  levha kalınlığının yarısını,  $\lambda_i$  ise  $\tan \lambda_i = Bi/\lambda_i$  nin çözümünü ve  $Bi$  ise Biot sayısını ifade etmektedir. Kütle transferi için Biot sayısı aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$Bi = \frac{k_g L_p}{\rho_s D_{eff} \left( \frac{\partial M}{\partial P_v} \right)_t} \quad (2.6)$$

Önceden de bahsedildiği üzere kuruma esnasında malzemede meydana gelen büzülmeden ve efektif yayılım katsayısının sıcaklık ve nem oranına bağımlılığından dolayı yukarıda belirtilen çözümler her durumda kuruma oranının belirlenmesi için kullanılamamaktadır. Bununla birlikte çoğunlukla kuruma kinetiklerinin belirlenmesinde yaklaşık değerler bulunması için kullanılabilirler.

Literatürde tahıllar gibi yavaş kuruyan malzemelerin kurutma kinetiğinin hesaplanmasında ince tabaka ampirik ve yarı ampirik matematiksel bağıntılar oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.1.5 Yarı teorik ve ampirik modeller

Ampirik ve yarı teorik matematiksel kuruma modelleri literatürde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak kurutulan malzemenin ısı ve nem transferinin, kuruma hızının ve kuruma eğrisinin matematiksel olarak modellenmesini sağlamaktadır [10].

Bu yarı teorik ve ampirik modeller, 2. Fick kanununun türetilip basitleştirilerek, deneysel verilere uydurulabilecek hale getirilmesi ile oluşturulmuştur. Malzeme ile hava arasındaki nem transferinde sadece dış dirençler dikkate alınır ancak bu malzemenin kuruma kinetiğinin belirlenmesi için yeterlidir [3]. Tarım bilimlerinde kuruma kinetikleri aşağıdaki basit formülle ifade edilir [10];

$$MR = f(t, \text{prosesparametreleri}) \quad (2.7)$$

Burada  $f$  fonksiyonu teorik olarak verilir. Örneğin Lewis (1921) tarafından tanımlanan kurutma modeli Denklem 2.8’de verilmiştir [2].

$$\frac{dM}{dt} = k(M - M_e) \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'in integrali alındığında nem oranı elde edilir.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9, ince tabaka kurutma modelleri arasında Lewis veya Newton modeli olarak bilinir. Bu denklem, farklı ihtiyaçlar, farklı malzemeler, farklı süreç ve farklı süreç koşulları için bilim insanları tarafından değiştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan modeller Tablo 2.1'de verilmiştir.

**Tablo 2.1 :** İnce tabaka kurutma matematiksel modelleri [12].

| Model Adı                  | Matematiksel Gösterim                          |
|----------------------------|------------------------------------------------|
| Newton                     | $MR = \exp(-kt)$                               |
| Page                       | $MR = \exp(-kt^n)$                             |
| Modified Page              | $MR = \exp(-(kt)^n)$                           |
| Henderson & Pabis          | $MR = a.\exp(-kt)$                             |
| Logarithmic                | $MR = a.\exp(-kt) + c$                         |
| Two-Term                   | $MR = a.\exp(-bt) + c.\exp(-dt)$               |
| Two-Term Exponential       | $MR = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-kat)$          |
| Wang & Singh               | $MR = 1 + at + bt^2$                           |
| Diffusion Approach         | $MR = a.\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$           |
| Verma                      | $MR = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-gt)$           |
| Modified Henderson & Pabis | $MR = a.\exp(-kt) + b.\exp(-gt) + c.\exp(-ht)$ |
| Midilli                    | $MR = a.\exp(-kt^n) + bt$                      |

### 2.1.6 Model seçimi

Kurutma kinetiklerinin belirlenmesinde basitliği sayesinde yaygın olarak kullanılan ince tabak kurutma modelleri, kurutulan malzeme, kurutucu tipi veya kurutma süreçlerine göre farklılık göstermektedir. Bu modellerden en uygun olanının seçiminde bazı istatistiksel yöntemlerden faydalanılmaktadır.

Model seçiminde öncelikle kontrol edilmesi gereken parametre korelasyon katsayısı olarak bilinen  $R^2$  değeridir. Bununla beraber  $\chi^2$ , SSE (hataların kareleri toplamı),

RMSE (hataların ortalamasının karekökü) ve MBE (ortalama çapraz hata) parametrelerinden herhangi biri veya birkaçı kontrol edilir. Tablo 2.2’de bu değerlere ait formüller verilmiştir.

Hesaplanan bu istatistiksel verilerden  $R^2$  değeri en yüksek ve SSE, RMSE, MBE değerlerinin ise en düşük olduğu model, kuruma kinetiğini en iyi ifade eden model olarak belirlenir.

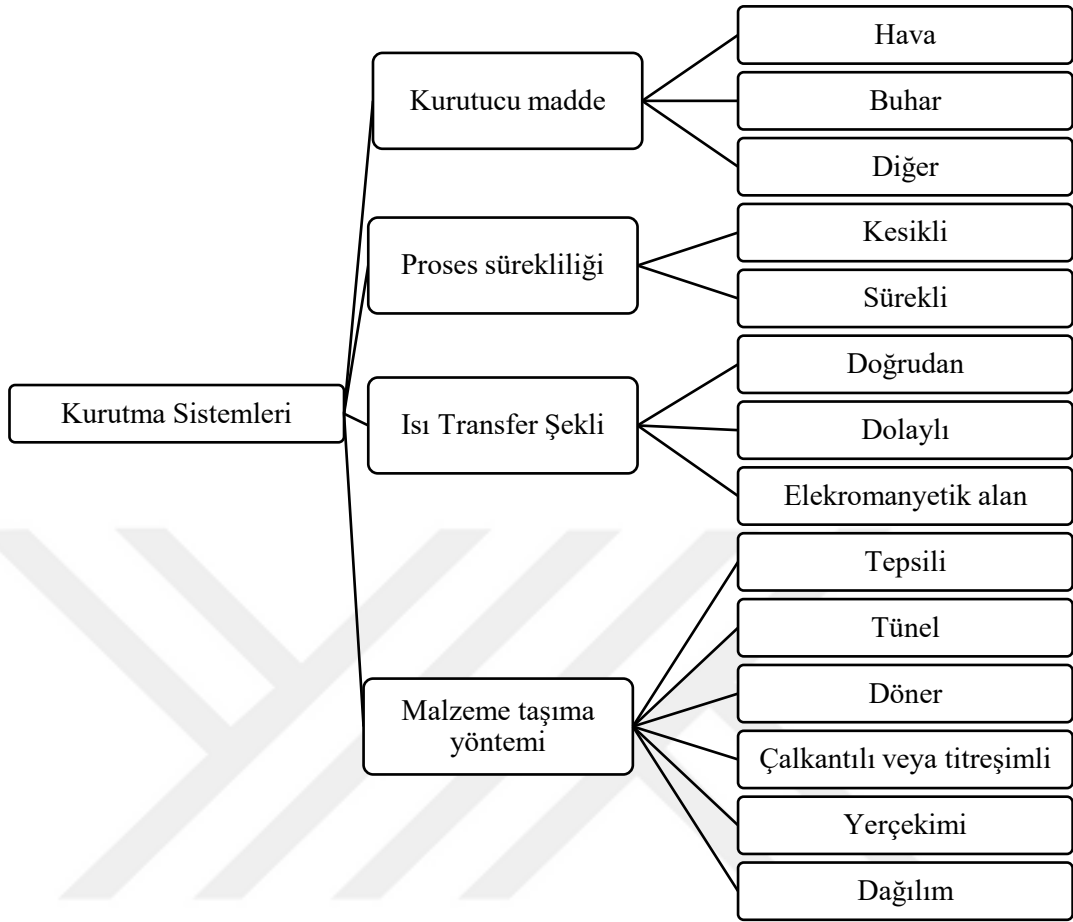
**Tablo 2.2 : Model Seçim Parametreleri [13].**

| Parametre | Formül                                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $\chi$    | $\sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n}$                    |
| MBE       | $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})$                        |
| RMSE      | $\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2}$ |
| SSE       | $\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$                                  |

## 2.2 Kurutma Yöntemleri

Endüstride kurutma ihtiyacı ile birlikte kurutulacak malzemelerdeki çeşitliliğin ve kurutma sonrasında istenilen özelliklerin ihtiyaca göre farklılık göstermesi, birçok farklı kurutma yönteminin geliştirilmesini sağlamıştır.

Kurutma teknolojileri basit veya oldukça karmaşık bir yapıda olmakla birlikte her yöntemin geliştirilmesindeki ortak amaç istenilen ürün kalitesini düşürmeden optimum ısı ve kütle transferini sağlamak ve böylece maksimum kurutma hızını elde etmektir. Dolayısıyla sistemin enerji verimli olması da sağlanmakta; bu koşullar gerçekleştirilirken çevreye olan etkiler de minimum düzeyde olmalıdır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının, sistemin enerji ihtiyacı için kullanılması, bir başka deyişle hibritleşme teknikleri ileri düzey kurutma teknolojilerinin gelişmesini sağlamıştır [3]. Kurutma sistemlerinin sınıflandırılması, kurutucu madde tipi, uygulama şekli, sürecin sürekliliği, ısı transfer şekli ve malzeme taşıma şekli gibi farklı kriterlere göre yapılmaktadır. Şekil 2.3’ de sistemlerin sınıflandırılması verilmiştir.



**Şekil 2.3 :** Kurutma sistemlerinin sınıflandırılması.

Endüstriyel kurutucular doğrudan ve dolay olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılırlar.

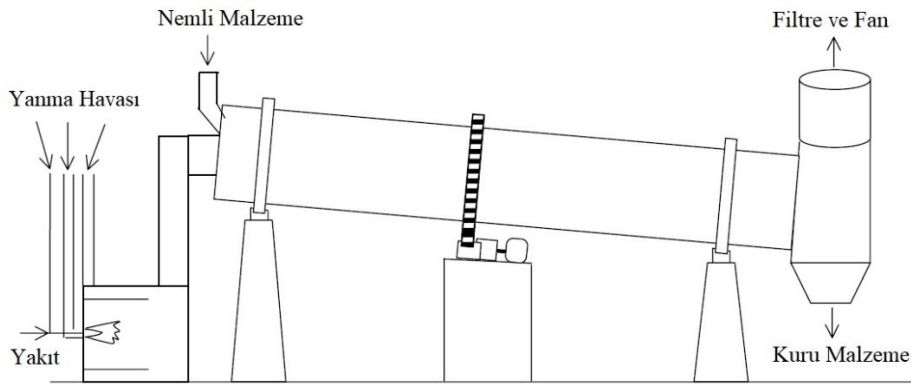
Doğrudan veya direkt kurutucularda, kurutucu madde, kurutulan malzemenin dış yüzeyi ile direkt temas halinde olduğundan ısı transferi doğrudan kurutulan malzeme yüzeyine yapılır. Bu tip sistemlerde, çalışma sıcaklığı 1000 K'ye kadar çıkabilmekle birlikte genellikle tercih edilen sıcaklık, kaynama noktasının üstünde kuruma hızını ve kaliteyi etkilemeyen bir sıcaklıktır.

Dolaylı (endirekt) kurutucularda ise ısı enerjisi nemli malzemeye, hava, buhar veya farklı kurutucu maddeler vasıtasıyla ısıtılmış yüzeylerden iletilir. Bu tip kurutucularda maksimum çalışma sıcaklığı, doğrudan kurutuculara göre 200 K kadar daha düşüktür. Özellikle hassas yapıdaki malzemelerin kurutulmasında, asal gaz çözücülerin geri dönüşümünde tercih edilirler. Kuruma hızı, malzemenin sıcak yüzeye temasına bağlı

olarak değişiklik gösterir. Bazı kaynaklarda iletimli kurutucular olarak da adlandırılırlar.

### 2.2.1 Döner kurutucular

Döner kurutucular, kimya ve gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan kurutuculardan biridir. Şekil 2.4’de basit bir döner kurutucu şematik olarak gösterilmiştir. Silindirik yapıda olan kurutma haznesi, yatay olarak konumlandırılmıştır. Hazne, rulmanlı yataklar sayesinde hareket kabiliyeti kazanmıştır. Açılı bir şekilde konumlandırılan kurutma haznesinde, üst kısımda malzeme besleme kısmı bulunur ve üstten beslenen malzeme, dönme hareketi ve yatayla olan açı sayesinde çıkışa doğru ilerler. Bu esnada, hazne içerisinde geçen sıcak hava ile malzeme kurutulur.



Şekil 2.4 : Döner kurutucu şematik gösterimi [10].

Hava akış yönü, kurutulan malzemenin karakteristik özelliklerine bağlı olarak, malzemenin akış yönü ile aynı veya ters yönde olabilir. Aynı yönlü akış genellikle ısıya karşı hassas olan malzemeler için tercih edilir ve kurutma süresini kısaltmak amacıyla daha yüksek debide hava kullanılır. Ters yönlü akış ise ısıdan etkilenmeyen malzemeler için kullanılır ve bu teknikte termal verim çok daha yüksek ve dolayısıyla kurutma zamanı nispeten daha düşüktür. Direkt kurutucular basit ve ekonomiktir.

Döner kurutucuların bazı tipleri aşağıdaki gibidir.

- **Direkt döner kurutucu:** Silindirik hazne metal basit bir yapıdan oluşur. Düşük veya orta seviye sıcaklıklarda kullanılır.
- **Direkt döner fırın:** Metal kurutma haznesi yalıtkan malzeme ile kaplanmıştır. Bu sayede yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygundur.

- **Endirekt buhar borulu kurutucu:** Kurutma haznesinin iç kısmında hazne boyunca uzanan bir veya birkaç sıra buhar boruları bulunur. Genellikle işletme içerisinde buhar bulunan tesislerde kullanılır.
- **Endirekt kalsiner kurutucu:** Kurutma haznesi, alevli veya rezistanslı fırın içerisinde bulunur.

Endirekt kurutucularda hava akışı, malzemeden buharlaşan nemin uzaklaştırılmasına yetecek kadardır. Burada sistem atmosferden tamamen izoledir. Genellikle kurutulan malzemeden çıkan gazın özel bir gaz olduğu durumlarda tercih edilir.

### 2.2.2 Tünel/ konveyör kurutucular

Konveyör veya bir başka deyişle tünel kurutucular oldukça basit yapılıdır. Genellikle çapı 1 ile 50 mm arasında olan tanecikli malzemelerin kurutulmasında kullanılırlar. Bulamaç benzeri yapışkan olabilen malzemeler bu tip kurutucular için uygun değildir. Aynı zamanda tane ağırlığı düşük olan malzemeler de havanın alttan uygulandığı tünel kurutucular için uygun olmamaktadır.

Hareket hızı kullanıcı tarafından belirlenmiş bir konveyör bant sisteminin kapalı bir oda içerisinde çalışması ve bu esnada da oda içinde belirli noktalarda bulunan sıcak hava kaynaklarının havayı bant üzerine önceden yerleştirilmiş kurutulacak malzeme üzerine yönlendirilmesi sonucu kurutma işlemi gerçekleştirilir.

Konveyör kurutucular geçiş ve kademe sayısına göre farklı tiplerde üretilirler. Tek geçiş-tek kademeli kurutucularda konveyör bant aynı seviyede tünel uzunluğu boyunca hareket eder. Bu esnada sıcak hava konveyör banda alttan, üstten veya alt üst birlikte yönlendirilir. Bu tip kurutucularda genellikle tünel bağımsız bölmelere ayrılır ve her bölgede farklı hava hızları ve sıcaklıklar uygulanabilir. Tek kademeli olduğundan tünel çıkışından sonra bant tünelin alt kısmından girişe döner ve bu da bant temizliği için fırçaların yerleştirilmesinde kolaylık sağlar. Tek geçiş-çok kademeli kurutucularda ise farklı yüksekliklerde konveyörler bir arada bulur. Bantlar birbirinden bağımsız olduğundan farklı hızlarda çalışabilir. Böylece bant hızı düşürülüp yatak derinliği azaltılarak kurutma için gereken süre azaltılabilir. Aynı zamanda alt alta bulunan kademeler, ürünün bir kademedan diğerine geçerken dökülerek yer değiştirmesi sonucu kurumanın her yerde aynı olmasını sağlar. Endüstriyel uygulamalarda genellikle 2 veya 3 kademeli olarak kullanılırlar. Çok geçişli kurutucularda ise alt alta birden fazla bant bulunur. Her bant diğerinin tersi

yönünde dönmektedir. Genellikle 2 veya 3 geçişli olurlar. Yapılarından dolayı geçişlerdeki hava hızı ve sıcaklığının ayrı ayrı kontrolü mümkün değildir. Aynı zamanda tek geçişlilere göre bantların temizlenmesi de oldukça zordur. Bu dezavantajlarına rağmen birçok endüstride kullanılmaktadırlar. Diğer kurutuculara göre daha düşük maliyetli olmaları ve daha az alan kaplamaları nedeniyle tercih edilirler.

### **2.2.3 Akışkan yatak kurutucular**

Akışkan yatak kurutucular, daha detaylı bir şekilde 3. Bölümde açıklanacaktır.

### **2.2.4 Sprey kurutucular**

Sprey kurutucular uzun yıllardan beri kullanılmakta olan tek aşamalı sürekli kurutuculardandır. 1800’lü yıllarda ilk olarak süt ve süt ürünlerinin kurutulmasında ve süt tozu üretiminde kullanılmışlardır. Şu an ticari olarak kimyasal tarım maddeleri, biyoteknoloji ürünleri, ağır kimyasallar, süt ürünleri, boya maddeleri ve ilaç hammaddelerinin kurutulmasında kullanılmaktadırlar. Sprey kurutucularda süt, peynir altı suyu, yumurta sarısı ve beyazı, soya proteini, muz, domates, Hindistan cevizi sütü, hazır kahve ve hazır çay gibi gıda maddeleri kurutulmaktadır. Kurutulacak maddenin pompalanabilir olması gereklidir [10]. Sprey kurutma prosesi 3 aşamada gerçekleşir.

- Atomizasyon
- Sprey-hava karışımı ve nemin buharlaşması
- Kurutulan ürün ile havanın ayrıştırılması

İlk olarak sıvı haldeki kurutulacak madde ürün tanklarından pompalar vasıtası ile kurutma haznesinin genellikle üst kısmında bulunan atomizasyon ünitelerine gönderilir. Burada ürün ve proses tipine göre 3 µm ile 1000 µm çap aralığında küçük damlacıklar haline getirilerek kurutucu haznesi içine püskürtülür. Kurutucu hava ise doğrudan veya dolaylı yöntemlerle ısıtıldıktan sonra filtrelenerek fanlar yardımı ile kurutma haznesine alt veya üst kısımdan giriş yapar. Prosese göre damlacıkların püskürtüldüğü yön ile kurutucu hava yönü aynı veya ters olabilir. Yüksek sıcaklıktaki havanın damlacıklar ile teması sonucu damlacıklar bir miktar ısı alarak bünyelerindeki nemin buharlaşması sağlanır. Kuruyan bu damlacıklar toz tanelerine veya granüllere dönüşerek kurutucu havaya karışırlar. Hava ile birlikte kurutma haznesinden çıktıktan sonra öncelikle siklon veya farklı bir filtre yardımı ile havadan ayrıştırılırlar. Kuru

filtrelerde ayrıştırılamayan tanecikler hava ile birlikte ikinci filtreleme ünitesi olan gaz yıkama sistemine girerler ve havadan tamamen ayrıştırılmış olurlar. Gaz yıkama sisteminde biriken bir miktar madde kurutma haznesine yönlendirilerek tekrar kurutulur. Atomizasyon işleminde disk atomizer, pnömatik püskürtücü, yüksek basınçlı püskürtücü veya ultrasonik püskürtücü kullanılabilir. Üretilen damlacıkların çapı 1 µm kadar küçük olabilir. En yaygın kullanılan döner disk atomizerlerdir.

Kurutucu hava, fueloil ile direkt aleve maruz bırakılarak, elektrikli ısıtıcılarla, buharla, kızgın yağ ile veya doğalgaz ile ısıtılabilir. Gıda endüstrisinde en yaygın kullanılan ise buhar ile ısıtmadır.

Filtreleme iki aşamada gerçekleşir. Kuru toz filtreleme için siklon, torba veya elektrostatik filtreleme sistemleri kullanılmaktadır. Torba filtreler hem maliyetinin düşük olması hem de basit yapıda olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Islak filtreleme için ise gaz yıkama, ıslak siklon veya ıslatılmış fanlar kullanılmakla birlikte en yaygın olanı gaz yıkama sistemleridir. Birincil filtreleme ünitesinden çıkan hava su dolu bir hazne ile çarpıştırılarak gaz içindeki partiküllerin suda kalması sağlanır.

#### Sprey kurutucuların

- Ürün özelliklerinin ve kalitesinin çok iyi kontrol edilebilmesi,
- Isıya karşı hassas gıdaların, biyolojik ürünlerin ve ilaç kimyasallarının düşük sıcaklık ve basınçlarda kurutulabilmesi,
- Yüksek miktarlarda kurutma imkânı (50 ton/saat),
- Kurutulan malzemenin homojen ve küresel yapıda olması

gibi avantajları vardır. Bununla birlikte

- Yüksek yoğunluktaki maddelerin kurutulamaması,
- Bir sistemin farklı tipte ürünler için kullanılamaması,
- Ürünün pompalanabilir olma gereksinimi,
- Yüksek ilk yatırım maliyetleri,
- Ürün geri dönüşümü ve filtreleme ünitelerinin ekstra maliyeti

gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

### 2.2.5 Dondurarak kurutma

Dondurarak kurutma yöntemi ısı ile teması halinde yapısal olarak bozulabilen bazı biyolojik maddelerin, tıbbi ürünlerin, kurutulması zor olan kahve, soğan, hazır çorba gibi gıda maddelerinin ve bazı deniz ürünlerinin kurutulmasında tercih edilir.

Dondurarak kurutma, bilinen tüm kurutma yöntemleri arasında en yüksek kalitede son ürünün elde edildiği yöntemdir. Bunun sebebi, önceden dondurulan malzemenin yapısında bulunan buz halindeki nemin direkt olarak süblimleşip uzaklaşmasıyla malzemenin yapısal sertliğinin korunması ve böylece geniş gözenekli, büzülmemiş ürün elde edilmesidir. Ayrıca düşük sıcaklık sebebi ile normal kurutma esnasında meydana gelen enzimsel aktivitelerin ve protein yapılarının bozulması gibi olaylar gerçekleşmediği için malzemenin tadı ve aroması daha iyi korunmaktadır. Kalite açısından oldukça avantajlı olan bu yöntemin dezavantajları da mevcuttur. Malzemenin soğutulması ve soğuk ortamda bekletilmesi, süblimleşme için gerekli vakum ortamının sağlanması ve düşük kuruma hızı proses için gerekli enerji tüketimini arttırdığından oldukça maliyetlidir.

Dondurarak kurutma prosesi üç aşamadan oluşur.

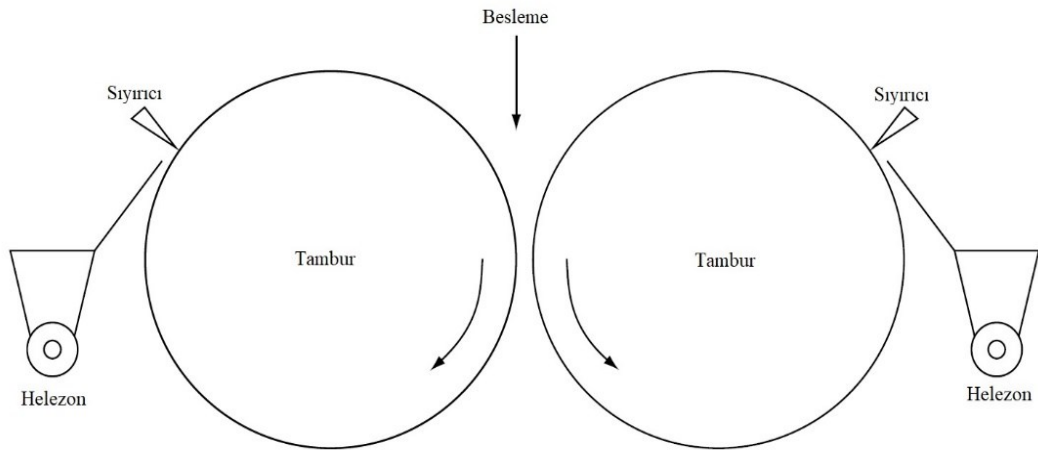
- **Dondurma evresi:** Kurutulacak malzeme soğutularak sıcaklığının 0 °C'nin altında yaklaşık 10 °C düşürüldüğü evredir.
- **Birincil kurutma evresi:** Dondurulmuş maddenin süblimleştirildiği evredir. Bu evrede süblimleşmenin sağlanması için ortamdaki açık hava basıncı maddenin denge buhar basıncının altına düşürülür. Bu evrede malzemedeki nemin %65 - %90'ı uzaklaştırılmış olur.
- **İkincil kurutma evresi:** Bu evre, ilk adımdaki dondurma esnasında malzeme içinde donmamış halde bulunan nemin malzemeden uzaklaştırıldığı evredir. Bu evrede malzemenin sıcaklığı yapısını ve aromasını bozmayacak kadar ısıtılır ve böylece donmamış halde kalan su moleküllerinin buharlaşması sağlanır.

### 2.2.6 Tamburlu kurutucular

Tamburlu kurutucular diğer kurutuculardan farklı olarak bulamaç veya macun benzeri konsantre ve viskoz haldeki sıvıların kurutularak daha viskoz ya da tamamen kuru hale getirilebildiği kurutuculardır.

Bu tip sistemler prosese göre bir veya iki tamburlu olabilirler. İç kısımdan ısı enerjisi verilen tamburun dış yüzeyi kurutma görevi görür. Döner haldeki tamburun yüzeyine kurutulacak malzemenin spreyle püskürtmeyle, üstten dökmeyle veya tambur altında bulunan havuzdan, tambur yüzeyine tutunması ile kurutma işlemi yapılır. Kurutulan malzeme yapısı gereği ince bir film tabakası halindedir ve tamburun dönme hareketi sayesinde homojen olarak dağılır. Bu esnada tamburun yüzeyindeki sıcaklıktan dolayı buharlaşma meydana gelir. Tamburun çapı, dönüş hızı ve iç kısımdan verilen sıcaklık gibi parametreler malzemenin kuruma hızının ayarlanmasını sağlar. Kurutulan malzeme, tamburun dönüş yönünün tersi yönde ve tamburun yaklaşık bir tam tur attıktan sonraki kısmında bulunan sıyırıcı vasıtasıyla yüzeyden alınarak kurutma işlemi tamamlanmış olur.

Şekil 2.5’de üstten dökerek beslemesi yapılan çift tamburlu bir sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Çift tamburlu kurutucu şematik gösterimi [10].

### 2.2.7 Flaş/Pnömatik kurutucular

Endüstride yaygın olarak kullanılan kurutma yöntemlerinden biri olan flaş veya pnömatik kurutma direkt kurutma yöntemlerindendir ve yüksek sıcaklıklara karşı hassas malzemelerin kurutulmasında tercih edilirler. Kimya, ilaç, seramik, ağaç, alçıtaşı ve maden gibi sektörlerde kullanılırlar. Yatırım maliyetlerinin düşük olması, basit yapılı olmaları ve bundan dolayı arıza yapma ihtimalinin düşük olması tercih sebepleridir.

Bir besleme helezonu veya benzeri bir karıştırıcı ünitenin çıkış kısmına çapraz yönden bir boru hattı ile sıcak hava uygulanır. Uygulanan bu hava tanecikler ile çarpışır ve

onları boru hattı boyunca sürükler. Boru hattının sonunda siklon filtre veya benzeri bir filtre sistemi vasıtasıyla hava ile malzeme birbirinden ayrışır ve kısmen kurumuş malzeme tekrar besleme kısmına gelir. Taneciğin sürüklenmesi esnasında geçen süre, prosese ve malzemeye göre farklılık göstermekle birlikte 0,5 ile 10 s arasında değişmektedir. Hava hızı en az malzemenin ağırlığını yenebilecek ve onu hareket ettirebilecek kadar olmalıdır. Bu tip kurutma sistemlerinde malzeme sıcak havaya çok kısa bir süre maruz kaldığı için sadece yüzey neminin alınmasında etkin bir yöntemdir.

İşletme içinde kapladıkları alanın az olması, kullanım kolaylığı ve bakım ve ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması gibi avantajlarına rağmen malzemeye göre çıkış gazı emisyon kontrol sistemlerine ihtiyaç duyabilirler. Birbirine yapışan taneciklere sahip malzemelerin kurutulmasında kullanılamazlar ve aynı zamanda çıkıştaki tozdan dolayı yangın veya patlama riski barındırırlar.

### 2.2.8 Mikrodalga ve dielektrik kurutucular

Mikrodalga ısıtma halk arasında oldukça yaygın olarak bilinen bir tekniktir. Birçok kişinin evine mikrodalga fırınlar ile giren bu tekniğin endüstride kullanımı sınırlıdır. Bugün dünyada yaklaşık 200-300 MW gücünde mikrodalga ısıtma amacıyla endüstriyel tesislerde kullanılmaktadır [10].

Çalışma prensibi olarak dielektrik ile mikrodalga ısıtma veya kurutma birbirinin aynısı olmakla birlikte donanım ve dalganın elde edilme metodu farklıdır. Elektromanyetik alan prensibi bu sistemlerin ana çıkış noktasıdır ve elektro manyetik dalgaların etki ettiği 3 farklı malzeme tipi vardır.

- **İletkenler:** Metaller gibi serbest elektron bulunduran malzemelerdir. Bu tip malzemeler tıpkı aynalar gibi elektromanyetik dalgaları yansıtırlar.
- **Yalıtkanlar:** Elektriksel olarak iletken olmayan cam, seramik ve hava gibi malzemelerdir. Elektromanyetik dalgaları soğururlar.
- **Dielektrikler:** Bu tip malzemeler elektromanyetik dalgaları soğurarak ısıya dönüştürürler. Su, yağ, ağaç, gıda ve bünyesinde su bulunduran malzemeler dielektrik malzemelere örnektir.

Birçok molekül (örneğin su) doğada çift kutuplu halde bulunur. Çift kutuplu haldeki bu moleküller serbest halde iken karmaşık bir düzende bulunurlar ve elektrik alanının bu moleküllere etki etmesi ile bu karmaşık düzen bozularak tüm moleküller sıra halinde dizilirler. Elektrik alanının etkisinin geçmesi ile birlikte tekrar eski serbest

haldeki dizilimlerine geri dönerler. Ardından elektrik alanın diğer yönde etki etmesi ile moleküller etki edilen alana göre tekrar dizilerek kutupsal hale gelirler. Bu dizilme ve tekrar bozulma mekanizmasının saniyede milyonlarca kez tekrar etmesi ile elektrik alanda depolanmış olan potansiyel enerjinin tanecikler arasında kinetik enerjiye ve böylece de ısı enerjisine dönüşmesi sağlanır.

Malzeme içindeki serbest nem miktarı malzemenin dielektrik katsayısını önemli ölçüde etkilemektedir. Su dielektrik türde bir molekül olduğundan mikrodalga veya dielektrik kurutma prosesinde önemli bir rol oynamaktadır. Nem oranının artması ile birlikte dielektrik katsayısı da artar. Bu katsayının artması ile ısıtma ve kurutma esnasında malzemenin ısınması daha da artar.

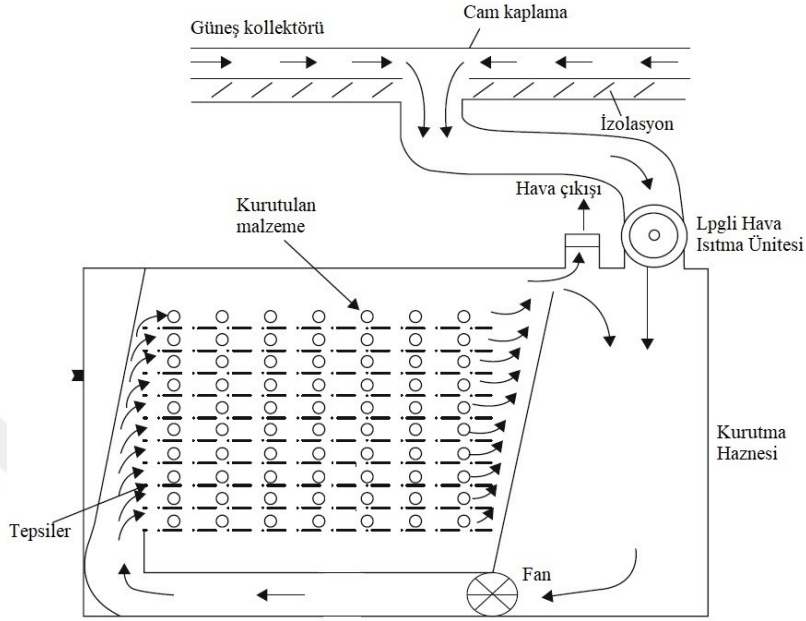
Mikrodalga ve dielektrik kurutma mekanizması konvansiyonel kurutuculardan oldukça farklıdır. Standart kurutucularda nem önce malzemenin yüzeyinden alınır ve kalan nem yüzeye doğru yayılır. Bu oldukça yavaş işleyen bir prosestir. Yayılım mekanizması yavaş olduğundan malzeme yüzeyi ile ortam sıcaklığı arasında yüksek fark olması gerekir. Fakat elektromanyetik kurutucularda mikrodalga ve dielektrik dalgalar malzemenin hem yüzeyine hem de iç kısmına aynı anda etki edebildiği için iç kısımdaki su daha yüzeye ulaşmadan buhar haline gelir ve bu nedenle kuruma hızı oldukça yüksektir.

#### **2.2.9 Solar kurutucular**

Güneş enerjisi ile kurutma bilinen kurutma yöntemlerinin en eskisidir. Tarih öncesi çağlarda çeşitli gıda maddeleri, topraktan yapılmış tuğlalar ve giysi yapımında kullanılan hayvan derileri açık alanda güneş altında kurutulurdu. Aynı yöntem günümüzde de kullanılmaktadır. Fakat açık alanda bulunan ürünler etraftaki tozdan, böceklerden, kemirgenlerden, kuşlardan ve diğer hayvanlardan hem sağlık açısından hem de kurutma kalitesi açısından olumsuz olarak etkilenmektedir.

Güneş enerjili kurutucu sistemlerde güneş enerjisi birincil ısı kaynağı veya destekleyici kaynağı olarak kullanılabilir. Prensip olarak bu tip kurutucu sistemlerde ürünler, sistemin tipine göre etrafı saydam ve/veya saydam olmayan bir malzeme ile kapatılmış hazne içerisine yerleştirilir ve bu hazne içerisinde bulunan hava dolaşımı ile buharlaşan nem sistemden uzaklaştırılır. Burada güneşten ışınlam ile gelen enerji direkt olarak malzemeye veya sirkülasyon havasını ısıtacak kolektörlere verilebilir. Bu ısıtıcı kolektörler iç yüzeyi siyah renkli dış yüzeyi ise saydam malzeme

ile kaplanmış ve dış ortam havasından tamamen izole edilmiş haznelerdir. Hava akışı ise doğal taşınım ile veya sisteme entegre edilmiş fanlar vasıtasıyla zorlanmış taşınım ile sağlanabilir. Şekil 2.6’da tipik bir hibrit kurutucu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Tipik bir hibrit kurutucu sistemi [14].

Güneş enerjisi ile kurutma sisteminin avantajları

- Daha az fosil yakıt kullanılması,
- Diğer sistemlere göre maliyetlerinin nispeten daha düşük olması,
- Güneş pilleri ile birlikte kullanıldıklarında dışarıdan herhangi bir enerjiye ihtiyaç duymadan çalışabilmeleri,
- Yenilenebilir olmaları,
- Tarımda ürünün hasat zamanından daha önce toplanarak toprağın bir sonraki ekime daha erken hazırlanmasına olanak sağlamaları

olarak özetlenebilir.

Her sistemde olduğu gibi bu sistemde de dezavantajlar mevcuttur. Güneş ışığının sadece gündüz saatlerinde olmasından dolayı gece saatlerinde kurutma yapılamamaktadır. Gece saatlerinde prosesin devamlılığını sağlayabilmek adına gündüz elde edilen enerjinin bir kısmının depolanması için çeşitli yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca güneş radyasyonundaki enerji yoğunluğunun bölgeden bölgeye değişmesi nedeniyle her bölgede yalın halde kullanıma uygun olmamaktadır. Bu sorun güneş kolektörlerinin kullanılması ile çözülebilir fakat bu kolektörler maliyet olarak

oldukça yüksektir. Ayrıca bu çözüm zaten fazla yer kaplayan güneş enerjili kurutucuların daha da fazla yer kaplamasına sebep olmaktadır.

Güneş enerjili kurutucular güneşin kullanım amacına ve kurutucu havanın akışına göre 4 grupta incelenirler.

- **Doğal taşınım kurutucular:** Bu tip kurutucular kurutma haznesi, baca ve hava ısıtıcı kolektörden oluşur. Hava kolektörde direkt güneş ışıını ile ısıtılırken basınç farkından dolayı doğal taşınım ile kurutma haznesi içinde hava dolaşımı sağlanır. Oldukça basit yapıdadırlar ve genellikle kurutulacak ürünün bulunduğu en yakın konuma yerleştirilirler. Kuruma süresi zorlanmış taşınım kurutuculara göre daha uzundur.
- **Zorlanmış taşınım kurutucular:** Aktif kurutucular olarak da adlandırılan bu kurutucular güneş enerjisini birincil ısı enerjisi kaynağı olarak kullanırlar. Doğal taşınım kurutuculardan farklı olarak kurutuma haznesine veya hazne çıkışına yerleştirilen fan yardımı ile hava dolaşımı sağlanır. Bu sayede kuruma hızını artırarak kuruma süresi azaltılır. Genellikle bu fanların enerji ihtiyacı düşüktür. Sisteme eklenen güneş pilleri ile fan için gereken elektrik enerjisi elde edilir.
- **Hibrit kurutucular:** Bu tip sistemlerde havanın ısıtılması için güneş enerjisi, fosil yakıtlı veya elektrik enerjisi ile çalışan ısıtıcılar birlikte kullanılmaktadır. Kurutucu havanın ısıtılmasında uygun sıcaklık koşullarında sadece güneş enerjisi ısı kaynağı olarak kullanılır. Sıcaklığın düşük olduğu durumlarda yardımcı kaynaklar devreye girer. Hava dolaşımı zorlanmış taşınım ile gerçekleşir.
- **Direkt kurutucular:** Bu tip kurutucularda kurutma haznesi saydam malzemeler ile kaplanarak güneş ışığının hazne içine girmesi sağlanır. Böylece kuruma esnasında kurutucu hazne içerisinde de güneş enerjisinden ısı elde edilmeye devam eder. Direkt güneş ışığının renk değişimine sebep olabileceği ürünler için uygun değildir. Aynı zamanda kuruma esnasında buharlaşan nemin saydam yüzeylerde yoğunlaşması sonucu yüzeylerin geçirgenliği azalmaktadır.
- **Endirekt kurutucular:** Dağıtılmış kurutucular olarak da adlandırılırlar. Bu tip sistemlerde kurutulacak ürünler üst üste dizilmiş tepsilere yerleştirilir. Kurutma haznesi tamamen güneş ışığından izole edilmiştir ve

sadece kurutucu hava tarafından ısıtılmaktadır. Kurutma havası kolektörlerde ısıtıldıktan sonra haznenin en altında bulunan hava dağıtıcılardan geçerek üst kısma doğru ilerler ve tüm ürünlerle temas ederek bacaya yönelir. Bu yöntemde malzemedeki renk değişimi çok daha azdır ve malzeme yüzeylerinde daha az çatlama meydana gelir. Bu nedenle şifalı bitkiler, baharatlar ve C vitamini içeren meyvelerin kurutulmasında tercih edilirler. Diğer kurutuculara göre yapısal olarak daha karmaşık ve daha yüksek maliyetlidirler.



### 3. AKIŞKAN YATAK KURUTMA

Akışkan yatak kurutucular endüstride tanecikli malzemelerin, bulamaç ve lapa halindeki malzemelerin kurutulmasında kullanılmaktadırlar. Yaygın olarak, çeşitli kimyasallar, gıda maddeleri, karbonhidratlar, biomalzemeler, çeşitli içecekler, seramik, toz ve sıkıştırılmış haldeki ilaçlar, tarım ilaçları ve kimyasalları, boya pigmentleri, deterjan, gübre, polimer ve reçine gibi malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadırlar [10]. Akışkan yatak sistemler kurutmanın dışında kömür gazlaştırmada, ergitilmiş malzemenin soğutulup tanecikli hale getirilmesinde, birçok farklı kaplama işleminde, fischer-tropsch sentezinde, ağır hidrokarbonların kırılmasında, koklaştırma işleminde, kömürün akışkanlaştırılarak yakılmasında, katı endüstriyel atıkların bertaraf edilmesinde ve gazlaştırılmasında kullanılmaktadır [15].

Akışkan yatak kurutmanın tercih edilmesindeki nedenler [10], [15]:

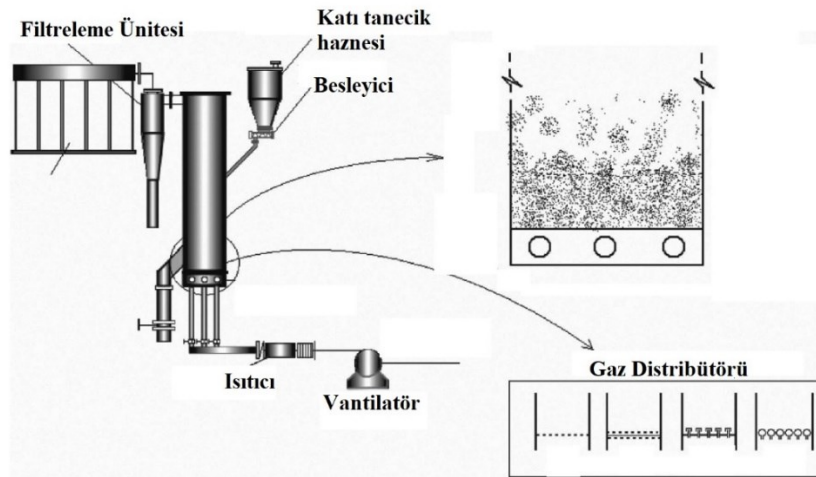
- Kurutulan katının akışkan halde olması, prosesin otomasyon ile birlikte sürekli ve kolay kullanılmasını sağlar.
- Akışkanlaşma ile birlikte katı maddelerin hızlı bir şekilde ve sürekli olarak karışması ile yatağın her yerinde izotermal koşullar sağlanır.
- Yatağın iyi karışması ısı dağılımını iyileştirir ve bu yatağın herhangi bir noktasında ani ısınmaların önüne geçer. Bu sayede emniyetli sıcaklık aralığı genişletilebilir ve çalışma sıcaklıkları daha yükseltilebilir.
- Büyük kapasitedeki işlemler için uygundur.
- Diğer yöntemlere göre ısı ve kütle transferi oldukça yüksektir.
- Termal verimi en yüksek sistemlerden biridir.
- Akışkan yatak ile daldırılmış nesne arasındaki ısı transferi yüksek olduğundan, akışkan yatak sistemlerde kullanılan ısı değiştiricilerin yüzey alanı daha düşüktür.
- Hareketli parça sayısı az olduğundan bakım maliyetleri düşüktür.

Akışkan yatak sistemlerin dezavantajları da mevcuttur. Bunlar [10]:

- Yatak yüksekliğine bağlı olarak basınç düşümünün yüksek olması nedeniyle elektrik sarfiyatının yüksek olması.

- Uzun dönemde yatak içinde bulunan metal yüzeylerin ve dağıtıcı borularının taneciklerin çarpması ile abrazyona uğraması.
- Bazı tanecikli malzemelerin akışkanlaşma kalitesini düşürmesi, taneciklerin yatak içinde birbirine çarpması sonucu kırılmaları veya aşınmaları.
- Bazı taneciklerin akışkanlaşma esnasında birbirine yapışarak topaklanması.

Temel olarak bir akışkan yatak, tanecikli malzemenin bulunduğu hazne, haznenin alt kısmında tanecikleri akışkanlaştırmak için verilen havanın yatak tabanı boyunca eşit aralıklarla üflenmesini sağlayan dağıtıcı ve gaz beslemesini sağlayan vantilatörden oluşur. Akışkan yatak kurutucularda ise bunlara ek olarak, gazın ısıtılmasını sağlayan ısı kaynağı, kurutucu tipine bağlı olmakla birlikte yataktan geçen gazın, gaz ile birlikte sürüklenen taneciklerden ayrıştırılmasını sağlayan filtre ünitesi ve kurutulan malzemelerin depolanarak beslendiği rezervuar ünitesi de bulunmaktadır. Şekil 3.1’de basit bir akışkan yatak kurutucu düzeneği gösterilmiştir.



**Şekil 3.1 :** Basit bir akışkan yatak kurutucu düzeneği [10].

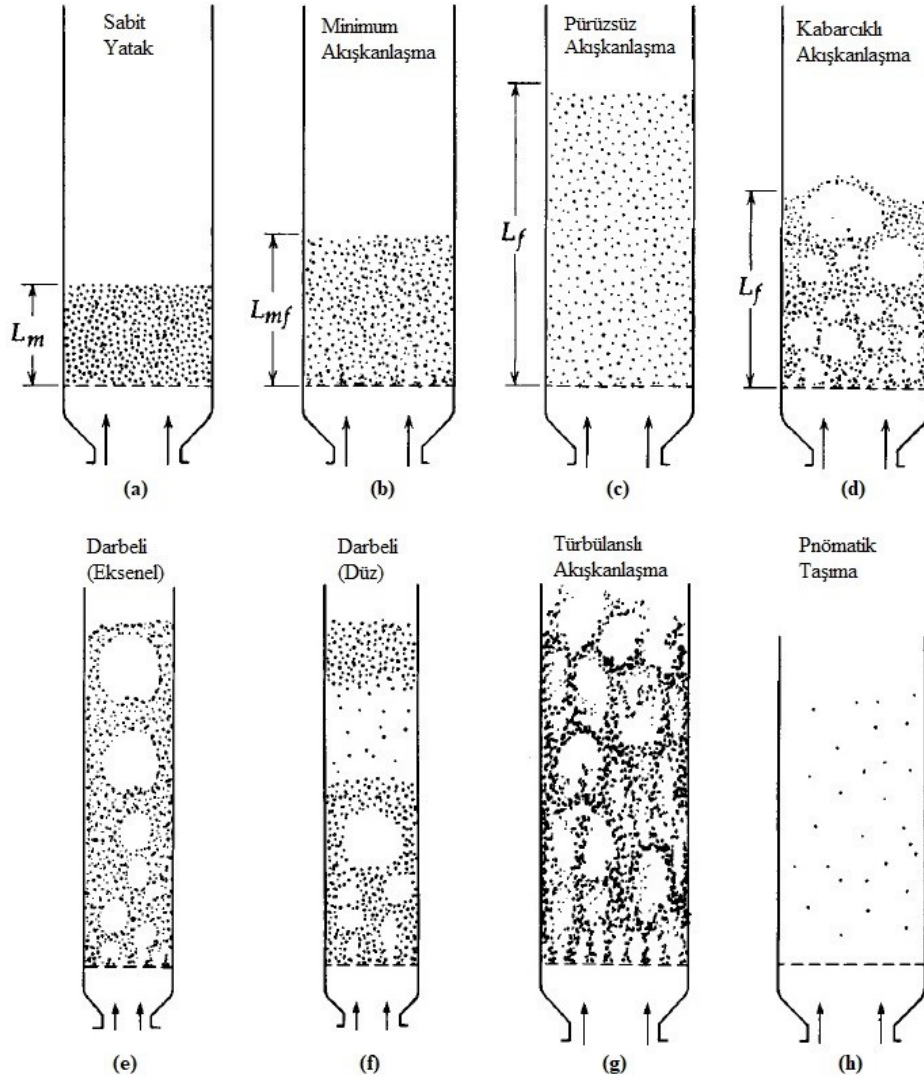
### 3.1 Akışkanlaşma

Akışkanlaşma temelde bir kap içindeki kırtı maddelerin sıvı veya gaz ile karışması sonucu sıvı benzeri davranışlar göstermesidir.

Bir akışkan, tanecikli madde ile doldurulmuş bir haznenin altından üstüne doğru düşük bir hızda geçirilirse tanecikler arasındaki boşluklardan süzülerek yüzeye ulaşır. Bu sabit yatak olarak adlandırılır (Şekil 3.2 (a)).

Akışın artırılması ile tanecikler hareket etmeye veya titreşim yapmaya başlar ve yatak içinde farklı bölgelere doğru hareket eder. Artan hız ile birlikte tanecikler ve akışkan

arasında oluşan sürtünme kuvveti taneciğin ağırlığını neredeyse dengeleyecek konuma gelir. Bir başka deyişle yatağın herhangi bir bölgesindeki basınç düşümü o bölgedeki katı maddenin ve akışkanın toplam ağırlığına eşittir. Bu esnada yatak minimum akışkanlaşma olarak adlandırılan fazdadır (Şekil 3.2 (b)).



**Şekil 3.2 : Akışkanlaşma fazları [15].**

Sıvı-katı sistemlerde akış hızının minimum akışkanlaşma hızının üzerine çıkması ile birlikte yatak aşamalı bir şekilde yükselir ve akışkanlaşma pürüzsüzdür. Yani katı maddeler arasındaki boşluk her yerde homojendir (Şekil 3.2 (c)). Gaz-katı sistemlerde ise benzer davranışlar yalnızca taneciklerin aşırı ince ve hafif, gaz yoğunluğunun yüksek olduğu bazı özel durumlarda görülebilir.

Akışkan hızının artması ile birlikte katı parçacıkların yatakta yaptıkları titreşim daha da artar ve yatağın tamamına yayılır. Parçacıklar titreşimden ziyade artık daha büyük

çaplı hareket halinde olurlar. Hızın artması ile yatak yüksekliğindeki artış, minimum akışkanlaşma durumundaki yükselmeye göre çok daha azdır. Bu faz kabarcıklı akışkanlaşma (Şekil 3.2 (d)) olarak adlandırılır ve akışkan gaz yatak yüzeyinde tıpkı kaynayan suyun yüzeyi gibi baloncuklar oluşturur.

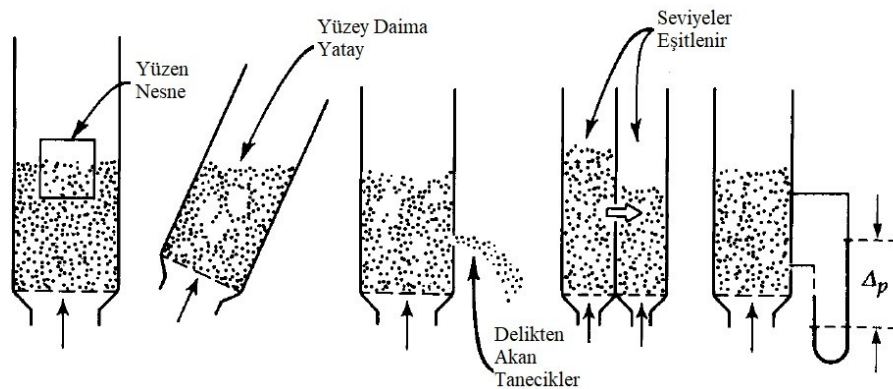
Gaz-katı sistemlerde, yatağın yüksekliğinin genişliğine göre çok fazla olduğu durumlarda yatak içerisindeki gaz baloncukları yatak yüksekliği boyunca yüzeye doğru ilerlerken bir araya gelerek büyürler ve bu birikme ile oluşan baloncuk yatağın tüm yüzeyini kaplayacak büyüklükte olabilir. Bu olay ise darbeli kaynama olarak adlandırılır (Şekil 3.2 (e) ve (f)).

Akışkan hızının, taneciklerin terminal hızından yüksek olduğu durumlarda yatak yüzeyi artık görünmez hale gelir; tanecikler hava ile birlikte yatağın dışına doğru sürüklenmeye başlar; yatak boyunca tanecikler kümeler halinde hareket eder. Bu faz türbülanslı akışkanlaşma (Şekil 3.2 (g)) olarak adlandırılır.

Gaz hızının daha da arttırılması ile tanecikler gaz ile birlikte taşınmaya başlar ve bu pnömatik taşıma olarak adlandırılır (Şekil 3.2 (h)).

### 3.2 Akışkan Yatakta Sıvı Benzeri Davranış

Yoğun fazdaki gaz-katı akışkan yatak, görüntü olarak kaynamakta olan bir sıvıyı andırmakta ve birçok açıdan sıvıya benzer davranışlar göstermektedir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi yoğun fazdaki akışkan yatak içine hafif bir nesne atıldığında nesne yatağın içine batar ve sonrasında ise tekrar yüzeye çıkarak askıda kalır. Benzer işlem sıvı için yapıldığında aynı davranış gözlenir. Akışkan yatak haznesi yatayla herhangi bir açı yapacak şekilde tutulduğunda tıpkı sıvı gibi yüzeyi daima yatay olarak kalır.



Şekil 3.3 : Akışkan yatağın sıvı benzeri davranışları [15].

Yatak haznesi üzerinde herhangi bir noktada delik açıldığında yatak malzemesi bu delikte akmaya başlar ve iki akışkan yatak birbirine yapıştırılıp aralarında bağlantı sağlandığında belirli bir zaman sonra ikisinin de yatak yükseklikleri eşitlenir. Ayrıca, yatak üzerindeki herhangi iki nokta arasındaki basınç farkı ölçüldüğünde bu fark noktalar arasındaki statik yükseklik farkına neredeyse eşit olacaktır.

### 3.3 Akışkan Yatak Parçacık Karakterizasyonu

Bir akışkan yatak sistem tasarlanırken akışkan yataktaki basınç düşümü ve akış hızının belirlenmesinde taneciğin fiziksel özellikleri etkin bir rol oynadığından ilk olarak yatakta bulunan parçacıkların karakterizasyonu yapılmaktadır.

Küresel yapıdaki taneciklerin tanımlanması oldukça kolaydır. Kumpas veya mikrometre yardımı ile taneciğin çapı ve yüzey alanı ölçülür. Küresel yüzeye sahip olmayan tanecikler için sorun vardır. Çapı 1 mm'den küçük ve düzensiz yüzey şekline sahip taneciklerin tane çapı belirlenirken, eşdeğer hacme sahip küresel yapıdaki taneciğin çapı esas alınır ve  $d_{sph}$  ile gösterilir. Parametre sayısını azaltmak adına küresellik  $\phi_s$  katsayısı kullanılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\phi_s = \left( \frac{\text{kürenin yüzeyi}}{\text{taneciğin yüzeyi}} \right)_{\text{eşdeğer hacimde}} \quad (3.1)$$

Bu katsayı küresel yapıdaki tanecikler için 1 olarak kabul edilir. Diğer tanecikler için ise 0 ile 1 arasında bir değerdedir.

Akışkan yatak tasarımı yapılırken kullanılan bir başka parametre  $\varepsilon_m$  sembolü ile gösterilen boşluk oranıdır. Bu katsayı yatak içindeki taneciklerin durgun halde küresel yüzeylerinden dolayı birbirleri arasında bıraktığı boşluğu ifade eder ve 0 ile 1 arasındadır. Genellikle deneysel yöntemler ile belirlenir.

#### 3.2.1 Minimum akışkanlaşma hızı ve basınç düşümü

Akışkanlaşma için gerekli koşullar aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\left( \begin{array}{c} \text{yatak boyunca} \\ \text{basınç düşümü} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{yatağın kesit} \\ \text{alanı} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{yatak} \\ \text{hacmi} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{katı madde} \\ \text{oranı} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{taneciğin} \\ \text{özlük ağırlığı} \end{array} \right) \quad (3.2)$$

$$\Delta p_b A_t = W = A_t L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) \left( (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right)$$

Burada  $\Delta p_b$  akışkan ile tanecikler arasındaki sürtünmeden dolayı her zaman pozitifdir. Akışkan yatak sistemlerde Ergun denklemi olarak bilinen basınç düşümü için verilen ifade aşağıdaki gibidir [15].

$$\frac{\Delta p_{fr}}{L_m} g_c = 150 \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu u_0}{(\varphi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \frac{\rho_s u_0^2}{\varphi_s d_p} \quad (3.3)$$

Minimum akışkanlaşma hızının belirlenmesinde birçok bilim insanı tarafından farklı tanecik tipleri, boşluk oranı ve küresellik katsayıları için farklı teoriler ve farklı formüller geliştirilmiştir [15]. Çok küçük tanecikler için Denklem 3.4 kullanılır.

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{150 \mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}}, \text{Re}_{p,mf} < 20 \quad (3.4)$$

Çok büyük tanecikler için minimum akışkanlaşma hızı Denklem 3.5 ile ifade edilir.

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{1,75 \rho_g} \varepsilon_{mf}^3 \varphi_s, \text{Re}_{p,mf} > 1000 \quad (3.5)$$

$\varepsilon_{mf}$  ve/veya  $\varphi_s$ 'in bilinmediği durumlarda  $K_1$  ve  $K_2$  katsayılarının farklı tanecik tiplerinde ve farklı çalışma koşullarında neredeyse sabit kaldığı için Denklem 3.3 aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$K_1 \text{Re}_{p,mf}^2 + K_2 \text{Re}_{p,mf} = Ar \quad (3.6)$$

$$K_1 = \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi}, K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_s^2} \text{ ve } \text{Re}_{p,mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu}$$

Farklı bilim insanları tarafından bulunan  $K_1$  ve  $K_2$  değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

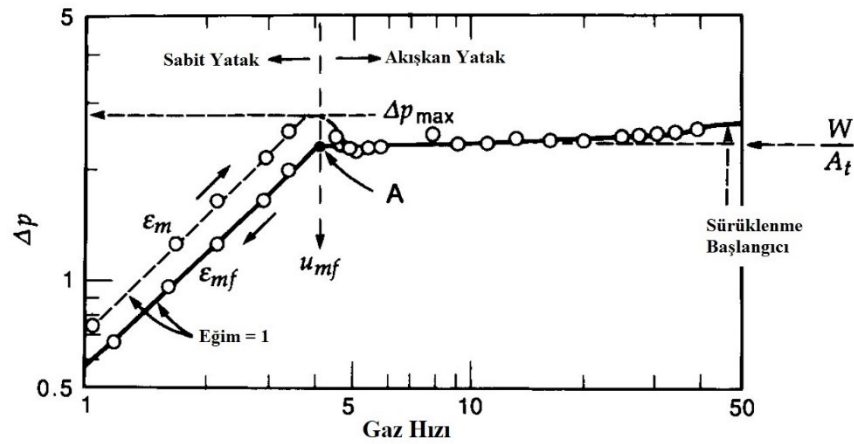
**Tablo 3.1:**  $K_1$  ve  $K_2$  katsayıları için belirlenmiş değerler [5].

| Araştırmacı                   | Birinci Katsayı | İkinci Katsayı |
|-------------------------------|-----------------|----------------|
|                               | $K_2/2K_1$      | $1/K_1$        |
| Wen&Yu (1966)                 | 33,7            | 0,0408         |
| Richardson (1971)             | 25,7            | 0,0365         |
| Saxena & Vogel                | 25,3            | 0,0571         |
| Babu ve diğerleri (1978)      | 25,3            | 0,0651         |
| Grace (1982)                  | 27,2            | 0,0408         |
| Chitester ve diğerleri (1984) | 28,7            | 0,0494         |

### 3.2.2 Basınç düşümü ( $\Delta p$ ) ve hız ilişkisi

Akışkan yatak sistemlerde akışkanlaşma kalitesinin belirlenmesinde basınç düşümü ( $\Delta p$ ) ve hız diyagramları önemli bir rol oynamaktadır.

Şekil 3.4’de taneciğin küçük ve yatağın tamamında aynı çapta olduğu bir akışkan yatağın grafiği verilmiştir. Çok düşük gaz hızlarında yani sabit yatak durumunda, basınç farkı neredeyse akışkan hızına eşdeğerdir ve genellikle ulaşılan maksimum  $\Delta p$  yatağın statik basıncından biraz büyüktür.

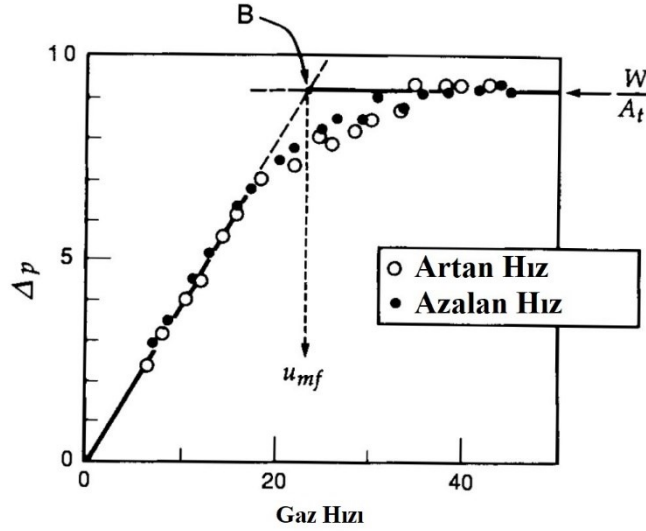


Şekil 3.4 : Tanecik boyutu sabit yatağın  $\Delta p$ -hız grafiği [15].

Gaz hızının biraz daha arttırılması ile birlikte sabit yatak durumu bozulur, tanecikler arasındaki boşluk oranı artarak minimum akışkanlaşma hızındaki boşluk oranı  $\epsilon_{mf}$  durumuna gelir.  $\Delta p$  yatağın statik basıncı ile aynı seviyededir. Bu aşamada yatak yükselir, yüzeyde baloncuklar görülmeye başlar ve homojenlik bozulur. Bu noktadan sonra gaz hızı artarken  $\Delta p$  sabit kalır ve bu durum yoğun gaz-katı fazının iyi havalandırıldığı ve kayda değer bir direnç olmadan şeklinin bozulabildiği durum veya hidrodinamik olarak sıvıya benzer hal olarak ifade edilir. Gaz hızı düşürüldüğünde ve tamamen durduğunda taneciklerin yaptıkları titreşim ve yer değiştirmeleri kademeli bir şekilde azalarak tamamen durur ve aynı zamanda boşluk oranı yatağın ilk haline ( $\epsilon_m$ ) dönerek sabit kalır.

Şekil 3.5’de ise farklı tanecik boyutlarının bulunduğu bir akışkan yatağın  $\Delta p$ -hız grafiği verilmiştir. Gaz hızı arttırıldığında daha küçük boyuttaki tanecikler büyük tanecikler arasında bulunan daha büyük boşluklara doğru hareket eder ve aynı zamanda akışkanlaşırlar. Bu esnada daha büyük ve ağır olan tanecikler ise hareketsiz halde kalırlar. Bu durum kısmi akışkanlaşma olarak tanımlanır. Akışkan hızının

artması ile birlikte  $\Delta p$   $W/A_t$  seviyesine gelir ve burada artık tüm tanecikler akışkanlaşmıştır. Bu tip karışık tanecikli sistemlerde  $U_{mf}$  sabit yatak kısmındaki  $\Delta p$ -hız eğrisi ile  $W/A_t$  çizgisinin kesiştiği nokta olarak ifade edilir.



Şekil 3.5: Farklı taneciklere sahip akışkan yatağın  $\Delta p$ -hız grafiği [15].

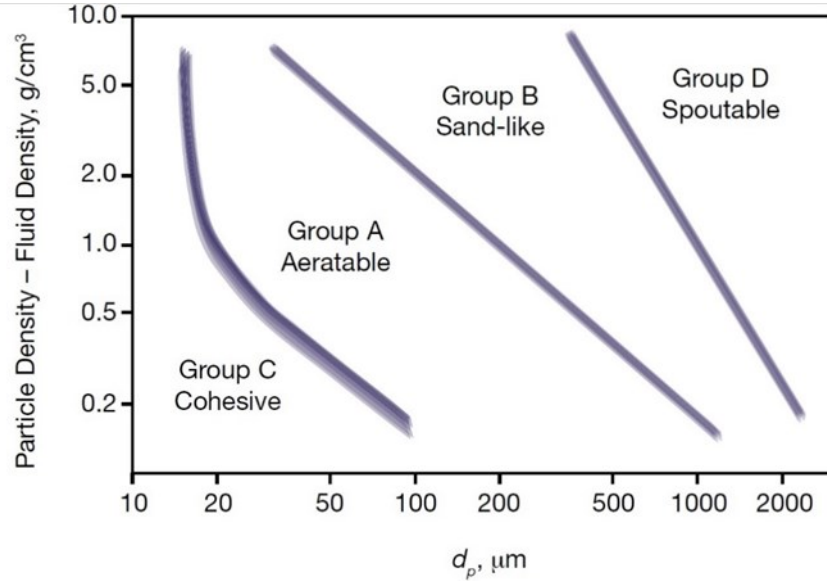
### 3.2.3 Geldart tanecik sınıflandırması

Akışkan yatağın gaz hızının artması ile hidrodinamik davranışı değişmesi tanecik özellikleri ile doğrudan bağlantılıdır. Bu davranışı öngörmek adına birçok bilim insanı tarafından çeşitli yöntemler denenmiştir. Literatüre göre Wilhelm ve Kwauk akışkanlaşma rejiminin değişiminde Froude sayısını kıstas olarak göstermiştir. Romero ve Johanson Reynolds sayısını dâhil etmiştir. Zenz ise farklı bir yöntem denemiş ve tanecik büyüklüğünü parametre olarak göstermiştir [15].

Geldart ise akışkan yatak davranışını öngörmek adına çok daha basit kullanışlı ve pratik bir yöntem önermiştir [15], [16]. Her tip ve boyuttaki katı tanecikleri detaylı olarak inceleyerek tanecikleri ortalama çap ve yoğunluklarına göre dört gruba ayırmıştır. Şekil 3.6'da Geldart A, B, C ve D tipi taneciklerin sınıflandırılması gösterilmiştir.

- **Geldart C tipi tanecikler:** Un, pudra ve nişasta gibi olukça küçük boyutlu taneciklerin olduğu gruptur. Bu tip taneciklerin birbirine yapışma eğilimi yüksektir ve tanecikler arası kuvvetler, akışkan havanın sağladığı kuvvetten daha yüksek olduğu için akışkanlaşmaları oldukça zordur. Akışkanlaştırma esnasında, taneciklerin bir arada kalma eğilimi sebebiyle akışkan gaz kanallar oluşturarak yatağın tamamına yayılamadan yatak yüzeyine ulaşır. Bunun

önüne geçmek için akışkanlaştırma işlemi yönlendiriciler, mikro jetler veya mekanik vibrasyon yardımı ile yapılır [16]. Ayrıca farklı bir yöntem olarak, B tipi tanecikler ile karıştırılırlar.



Şekil 3.6 : Geldart tanecik sınıflandırması [16].

- **Geldart A tipi tanecikler:** Ortalama tanecik çapları ( $\sim 1,4 \mu\text{m}$ ) ve yoğunluğu ( $\sim 1,4 \text{ g/cm}^3$ ) düşük olan taneciklerdir. Bu tip tanecikler düşük gaz hızlarında kolaylıkla akışkanlaştırılabilir ve kabarcıklar kontrol altında tutulabilir [15]. Akışkan yatak sistemlerde en çok kullanılan tanecik tiplerinin bulunduğu gruptur. Akışkanlaşma esnasında kabarcık oluşturmada yatak yüksekliğinde meydana gelen artış oldukça yüksektir. Yüksek basınçta yataktaki yükselme yatağın iki katına kadar ulaşabilir [16].
- **Geldart B tipi tanecikler:** Kum benzeri tanecikler olarak da bilinirler. Tanecik çapı  $40 \mu\text{m}$  ile  $500 \mu\text{m}$ , yoğunlukları ise  $1,4$  ile  $4 \text{ g/cm}^3$  arasında değişir. Bu tip tanecikler kolaylıkla akışkanlaşır ve nispeten daha büyük çapta kabarcıklar oluştururlar. Akışkan yatak yakıcılarında ve piroliz fırınlarında yaygın olarak kullanılırlar.
- **Geldart D tipi tanecikler:** Büyük ve yüksek yoğunluğa sahip taneciklerdir. Derinliği yüksek olan yataklarda bu tip taneciklerin akışkanlaştırılması oldukça zordur. Yatak içinde gaz dağılımının düzgün olmadığı durumlarda akışkanlaşma ile büyük, patlayan kabarcıklar oluşur ve püskürme olayı gözlenebilir. Tahılların, bezelye ve nohut gibi taneciklerin kurutulmasında, kömür gazlaştırmada, bazı demir madenlerinin tavlanması ve küresel

TRISO nükleer yakıtların kaplanması püskürmeli yatak geometrisi ile kullanılırlar [15].

### 3.4 Akışkan Yatak Kurutucuda Isı ve Kütle Transferi

Gaz-katı tipi akışkan yatak kurutucularda ısı transferi, prosese göre iletim, taşınım ve ışıyım ile birlikte olabilir. Isı transferini ifade eden ısı transfer katsayısı kurutulan malzemenin tipine, giriş gazının özelliklerine, akışkanlaşma fazına, distribütör tipine, çalışma sıcaklığına ve basıncına göre değişiklik göstermektedir. Tek bir tanecik ile akışkan gaz arasındaki ısı transferi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q = h_t A_t (T_t - T_g) \quad (3.7)$$

Akışkan yatak sistemindeki tek bir taneciğin ısı transfer katsayısı çok yüksek değildir ve genellikle 1-700 W/(m<sup>2</sup>K) aralığındadır. Fakat sistemin genelinde ara yüzey alanının 3.000 ile 45.000 m<sup>2</sup> aralığında olması sistem genelindeki toplam ısı transferinin oldukça yüksek seviyelerde olmasını sağlar. Isı sığası ise 10<sup>6</sup> J/(m<sup>3</sup>K) mertebelerindedir. Bu sistemler denge durumunu oldukça kısa bir sürede ulaşabilirler [10].

Isı transfer katsayısı  $h_t$  çalışma parametrelerinin, tanecik özelliklerinin ve kurutucu geometrisinin fonksiyonudur ve taneciğin Reynolds sayısına bağlı olarak aşağıdaki ifade (Denklem 3.8) ile gösterilir.

$$h_t = \frac{k_g}{d_p} Nu_p$$

$$0.1 < Re_p < 50 \text{ için } Nu_p = 0,0282 Re_p^{1,4} Pr_g^{0,33} \quad (3.8)$$

$$50 < Re_p < 1 \times 10^4 \text{ için } Nu_p = 1,01 Re_p^{0,48} Pr_g^{0,33}$$

Yüzeylerden yatağa olan ısı transfer katsayısı (Denklem 3.9) objenin yatağın içinde kalan kısmının alanına bağlı olarak değişmektedir. Eğer çalışılan sıcaklıklar çok yüksek ise bu katsayının taşınım ve ışıyım olmak üzere iki bileşeni vardır.

$$h_w = \frac{q}{a_w} (T_b - T_w) \quad (3.9)$$

Taşıyım ısı transfer katsayısı  $h_c$  yatay olarak batırılmış nesneler için aşağıdaki bağıntı (Denklem 3.10, ve 3.11) ile ifade edilir.

$$\frac{h_c d_t}{k_g} = 420 \left( \frac{\rho_s}{\rho_g} \text{Pr}_g \frac{\mu_g^2}{\rho \rho_s^2 d_p^3} \right)^{0,3} \text{Re}_d^{0,3}, \frac{\rho_s}{\rho_g} \text{Re} \geq 2550 \quad (3.10)$$

$$\frac{h_c d_t}{k_g} = 0,66 \left( \frac{\rho_s (1 - \varepsilon)}{\rho_g \varepsilon} \right)^{0,3} \text{Re}_d^{0,44}, \frac{\rho_s}{\rho_g} \text{Re}_p \leq 2550 \quad (3.11)$$

Burada

$$\text{Re}_d = \frac{d_t \rho_g u_g}{\mu_g}, \text{Re}_p = \frac{d_p \rho_g u_g}{\mu_g} \quad (3.12)$$

Işınım ısı transfer katsayısı  $h_r$  ise Denklem 3.13 kullanılarak hesaplanabilir.

$$h_r = \left( \frac{e_b e_w}{e_b + e_w - e_b e_w} \right) \frac{\sigma (T_b^4 - T_w^4)}{(T_b - T_w)} \quad (3.13)$$

Işınım ile olan ısı transferi sıcaklığın 700 °C'den az olduğu durumlarda ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Genellikle yatağın yayılım katsayısı  $e_b$  yaklaşık 0,9 ve duvarın yayılım katsayısı  $e_w$  0,9 ile 1,125 arasındadır.

### 3.5 Ampirik Model

Akışkan yatak kurutucularda, kurutma prosesi ampirik modellemelerde iki farklı periyotta incelenir. Fick difüzyon veya nem yayılım kanunu nem içeriğinin zamana göre değişiminin üstel olarak ifadesidir. Akışkan yatak kurutucularda tanecikli malzemeler yatak malzemesi olarak kullanıldığından küresel tanecikler için Fick yayılım ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{MR - MR_{eq}}{MR - MR} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 (\pi^2 D_{eff} t / r_{sph}^2)} \quad (3.14)$$

Yayılım denkleminin genel çözümü, üstel fonksiyonlar serisi olarak yazıldığında, akışkan yatak kurutucu deneysel verileri bu fonksiyonlar ile ilişkilendirilebilir. Tablo 2.1'de literatürde yaygın olarak kullanılan bazı fonksiyonlar verilmiştir.

Aşağıda üstel fonksiyonun en basit ifadesi verilmiştir. Bu denklem kuruma hızının, ortalama nem ve denge nemi arasındaki fark ile doğru orantılı olduğunu ifade eder.

$$\frac{MR - MR_{eq}}{MR_0 - MR_{eq}} = e^{-kt} \quad (3.15)$$

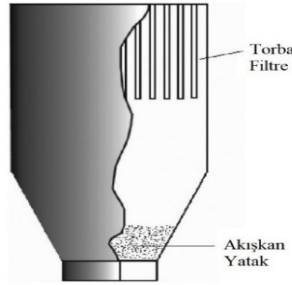
### 3.6 Akışkan Yatak Kurutucu Tipleri

#### 3.6.1 Konvansiyonel akışkan yatak kurutucular

##### 3.6.1.1 Sürekli olmayan kurutucular

Bu tip kurutucular gerekli kapasitenin düşük (50-1000 kg/h) veya birkaç farklı ürünün birlikte kurutulabildiği sistemlerdir. Karıştırma, kurutma, tanelendirme/kaplama ve soğutma gibi farklı işlemler aynı sistemde sırayla yapılabilir. Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir.

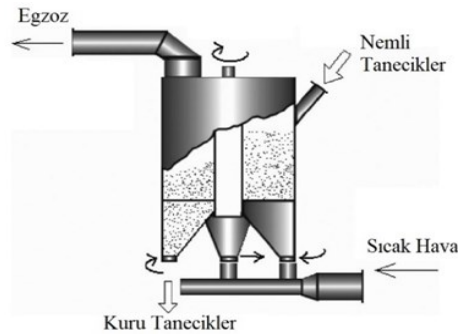
Kurutma havası sıcaklığı ve debisi genellikle sabittir. Bununla birlikte enerji tüketimini azaltmak amacıyla ayarlanabilir hale de getirilebilir. Akışkanlaşması zor olan malzemelerde titreşim veya çalkalama gibi mekanik destekler verilebilir.



Şekil 3.7 : Sürekli olmayan akışkan yatak kurutucu [1].

##### 3.6.1.2 Kısmen sürekli kurutucular

Bu tip kurutucularda kurutma haznesi birkaç bölümden oluşur ve farklı sıcaklık ve debilerin uygulanması ile birkaç işlem bir arada yapılabilir (Şekil 3.8).

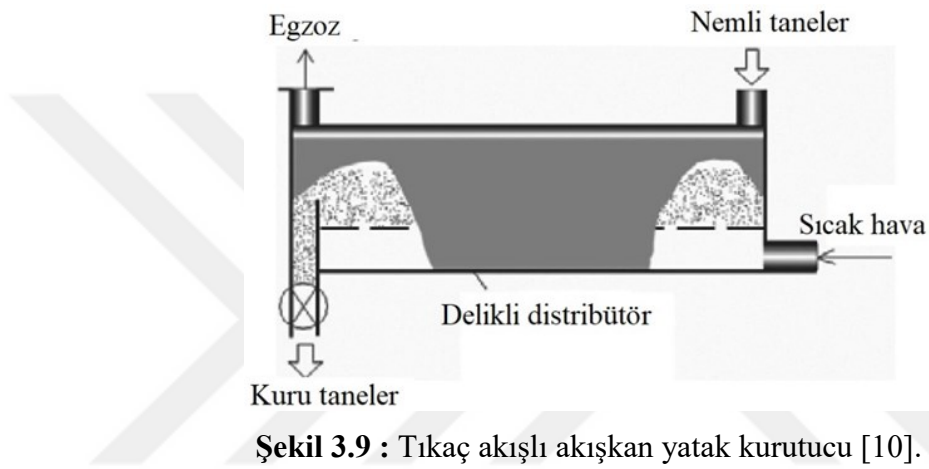


Şekil 3.8 : Yarı-sürekli akışkan yatak kurutucu [10].

Nemli ürün belirli miktarda kontrollü olarak kurutma haznesine beslenir. Hazneye dolan ürünler haznenin dönme hareketi sayesinde ikincil ve üçüncül işlemlerin yapıldığı diğer bölümlere doğru hareket eder. Son işlem biriminde ise kurutulmuş ürün çıkış ağzından alınır. Aynı işlem tekrar edilerek süreklilik sağlanmış olur.

### 3.6.1.3 Tıkaç akışlı sürekli kurutucular

Tıkaç akışlı kurutucularda kurutma haznesine eklenen dikey bölmeler bulunur (Şekil 3.9). Bu bölmeler sayesinde ürünler kurutulurken bir yandan da girişten çıkışa doğru yatay bir hareket yaparlar.



Şekil 3.9 : Tıkaç akışlı akışkan yatak kurutucu [10].

Bu özelliği sayesinde ürünlerin tane boyutu fark gözetmeksizin ortalama yatakta kalma süresi birbirine çok yakındır ancak buna rağmen çıkıştaki ürünlerin nem oranı sabittir. Ürünlerin hareket ettiği yol düz veya spiral şekilde olabilir. Uzunluklarının genişliklerine oranı 5:1-30:1 aralığında değişmektedir.

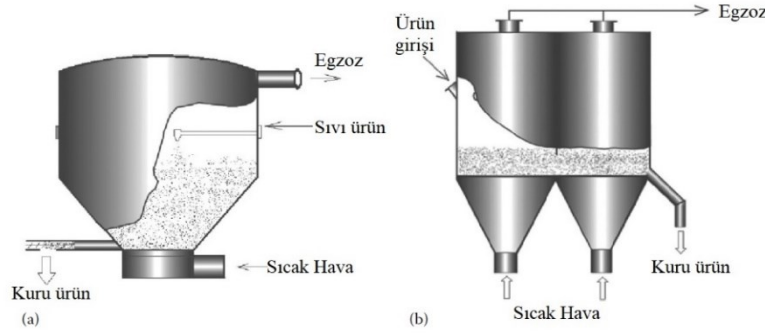
Bu sistemlerin en büyük problemi, nem oranı yüksek olan ürünlerin girişte akışkanlaşmamasıdır. Bunun önüne geçmek için bu sistemlere giren ürünün flaş kurutucudan geçirilerek yüzey nemi alınabilir veya giriş kısmına bir karıştırıcı-çalkalayıcı ünite eklenebilir.

### 3.6.2 Değiştirilmiş akışkan yatak kurutucular

#### 3.6.2.1 Çok aşamalı kurutucular

Akışkan yatak sistemler birçok farklı prosesler için kullanılabilen sistemlerdir. İki veya daha fazla farklı proses bu akışkan yatak sisteminde bir arada uygulanabilir. Basitçe çalışma parametreleri değiştirilerek karıştırma, kurutma, tanelendirme, kaplama ve soğutma gibi işlemler ürünler akışkan yatak haznesinden çıkarılmadan

yapılabilir. Örneğin; iki hazneden oluşan sprey akışkan yatak kurutucuda üst kısımda spreyleme yöntemi ile kurutma işlemi yapılırken, üst kısımdan alt kısma düşen ürünler alt kısımda alttan verilen sıcak hava yardımı ile ikincil olarak kurutulur (Şekil 3.10 (a)). Diğer bir örnek ise akışkan yatak kömür kurutucu sistemlerdir (Şekil 3.10 (b)). Bu sistemlerde, kömür kurtulduktan sonra akışkan hava hızı değiştirilerek taneciklerin sınıflandırılması yapılır.

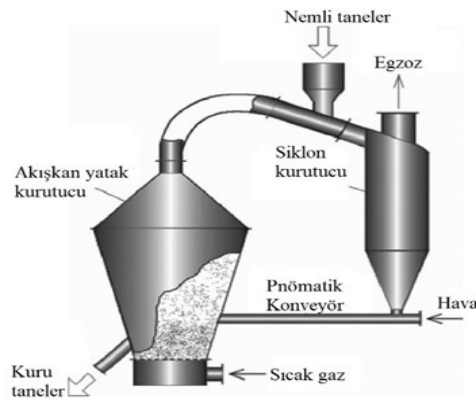


**Şekil 3.10 :** a) Sprey akışkan yatak kurutucu b) Akışkan yatak kömür kurutma ve sınıflandırma sistemi [10].

Farklı prosesler için yapılan bu akışkan yatak kombinasyonları ile alan, maliyet ve enerji tüketimi azaltılabilir [10].

### 3.6.2.2 Hibrit kurutucular

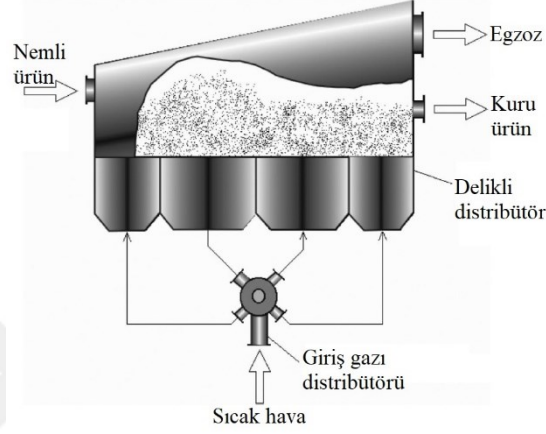
Hibrit kurutucular daha çok yüzey nemi ve iç nem içeren tanecikler için kullanılır. Ürünler, akışkan yatak kurutucuya girmeden önce yüzey neminin alınması için siklon veya flaş kurutucu ünitelerinden geçer. Şekil 3.11’de siklon kurutucu içeren hibrit kurutucu sistemi gösterilmiştir. Islak ürünler siklon kurutucuya girerek burada akışkan yatak kurutucunun egzozundan çıkan hava vasıtası ile bir ön kurutma işleminden geçer.



**Şekil 3.11 :** Siklon kurutuculu hibrit akışkan yatak kurutma sistemi [10].

### 3.6.2.3 Atımlı kurutucular

Bu tip kurutucular Geldart C tipi küçük tane boyutuna sahip taneciklerin akışkan yatakta meydana getirdiği kanallaşma ve topaklanma gibi bazı problemlerin önüne geçmek için kullanılan akışkan yatak kurutuculardır (Şekil 3.12). Bu problemin çözümü için yatağın alt kısmındaki distribütör birkaç bölümden oluşacak şekilde tasarlanır.

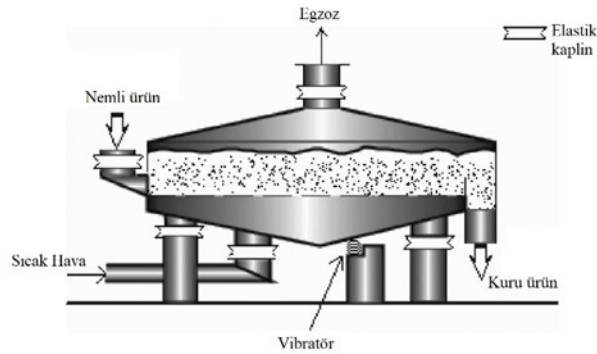


Şekil 3.12 : Atımlı akışkan yatak kurutucu [10].

Her bölüme verilen hava ayrı kanallardan gelir. Bu kanallar bir döner vanaya bağlıdır. Bu vana belirli zaman aralıklarında döner ve hava her seferinde yatağın farklı bölümlerine gönderilir. Böylece yatakta bulunan ürünler değişken gaz akışından dolayı sürekli hareket halindedir.

### 3.6.3.1 Titreşimli kurutucular

Akışkan yatak kurutuculara titreşim kabiliyeti sağlanarak akışkanlaşma kalitesinin artırılması sağlanmıştır (Şekil 3.13).

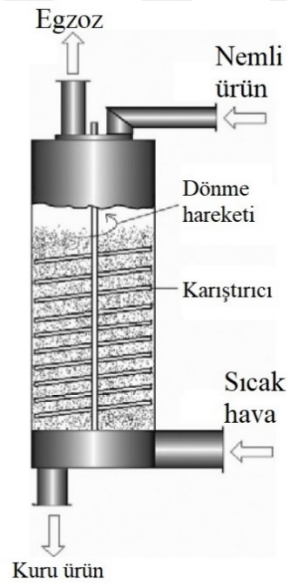


Şekil 3.13 : Titreşimli akışkan yatak kurutucu [10].

Taneciklerin titreşimle birlikte yaptıkları hareketin artması ve buna bağlı olarak kendi aralarında ve hazne duvarları ile olan sürtünmenin azalması yatak için kullanılan havanın minimum akışkanlaşma hızından daha düşük bir hızda verilmesi akışkanlaşma için yeterli olmaktadır. Azalan sürtünme ile kırılgen, aşındırıcı ve ısıya karşı duyarlı malzemelerde kurutulabilir. Ayrıca bu titreşim toz benzeri tanecikli malzemelerin akışkanlaştırma işleminde kanallaşma ve topaklanma gibi sorunların ortadan kaldırır.

### 3.6.3.2 Karıştırıcılı/girdaplı kurutucular

İnce taneciklere sahip malzemelerde akışkanlaşma kalitesini arttırmak için akışkan yatak haznesine bir karıştırıcının eklendiği sistemlerdir (Şekil 3.14). Karıştırıcı sayesinde ince tanelerin akışkanlaşma esnasında çıkardığı problemlerin önüne geçilir. Karıştırıcılar düz bıçaklı, eğik bıçaklı veya helis şerit bıçaklı olabilir. Bu durumda karıştırma macun benzeri malzemelerin kurutulurken parçalara ayrılmasına yardımcı olur. Ayrıca karıştırıcı sayesinde akışkanlaşma özellikleri korunarak daha yüksek yatak yükseklikleri uygulanabilir.

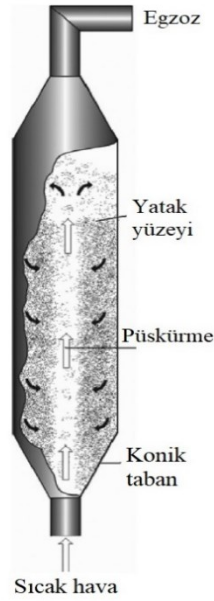


Şekil 3.14 : Karıştırıcılı akışkan yatak kurutucu [10].

### 3.6.3.3 Püskürtmeli kurutucular

Bu tip kurutucular Geldart D tipi malzemelerin akışkanlaşma esnasında meydana getirdiği vuruntu yardımıyla kurtulmasında kullanılır. Akışkanlaştırıcı gaz girişten yüksek hızda girer ve yataktan geçerek üst kısımdan yatağı terk eder (Şekil 3.15). Yatak içinde ilerlerken tanecikleri yatağın alt kısmından üst kısmına kadar sürükler ve

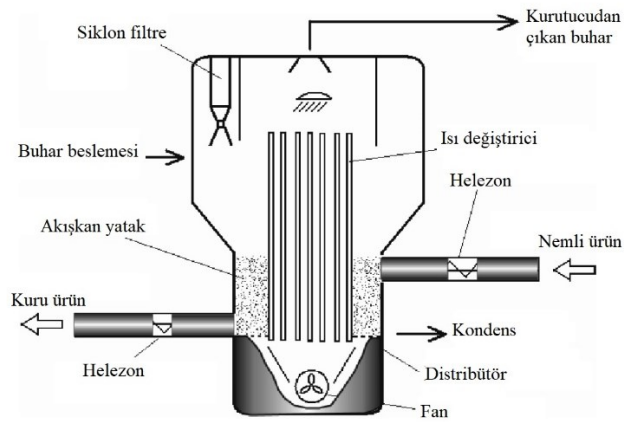
üst kısma gelen tanecikler momentumu kaybederek yatak yüzeyine düşer. Bu püskürme akışkan yatağın karışmasını iyileştirir.



Şekil 3.15 : Püskürtmeli akışkan yatak kurutucu [10].

#### 3.6.3.4 Kızgın buharlı kurutucular

Kızgın buharın akışkan olarak kurutucularda kullanılması beraberinde birçok avantaj getirir. Yanma ve patlama riskinin düşük olması, kuruma hızı ve ürün kalitesinin daha yüksek olması, enerji tüketiminin çok daha düşük olması, zehirli veya pahalı organik sıvılarda kullanıma uygun olması, gıda maddelerinde pastörizasyon, sterilizasyon ve koku giderimi gibi işlemlere uygun olması gibi avantajları vardır. Şekil 3.16’da kızgın buharlı bir akışkan yatak kurutucu şematik olarak gösterilmiştir.



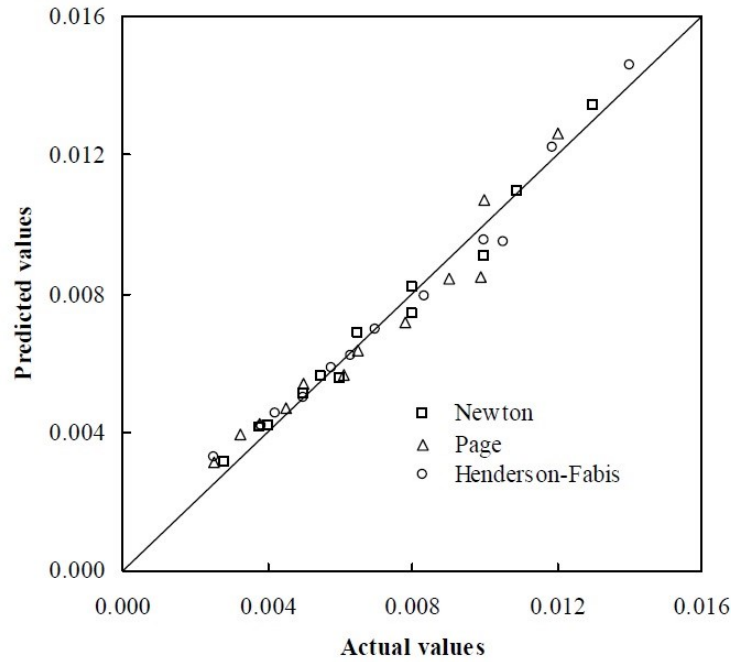
Şekil 3.16 : Kızgın buharlı akışkan yatak kurutucu [10].



#### 4. LİTERATÜR ÖZETİ

Kurutma prosesi genel anlamda deneysel çalışmalara konu olmuş ve özellikle kurutulan gıda için hangi matematiksel modelin deney şartlarına göre kuruma eğrisine daha iyi yaklaşım yaptığı bulunmaya çalışılmıştır.

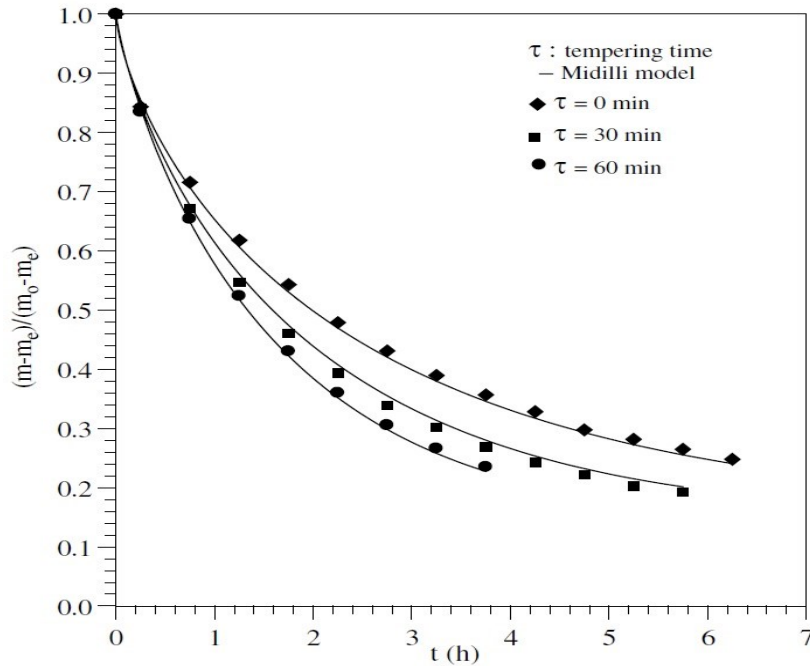
M. Kalender ve arkadaşları [5] haşlanmış buğdayın kurutulması üzerine yapılan deneysel çalışmanın matematiksel modellemesi üzerinde çalışmışlardır. Deneysel çalışmada 500 g Elâzığ bölgesi durum buğdayı haşlanarak kuru bazda %50 nem oranına getirilmiştir. Ardından nemli buğday kurutma düzeneğine yerleştirilerek sırasıyla 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 75 °C sıcaklıklarda ve 0,5 m/s, 0,75 m/s ve 1 m/s kurutucu hava hızı ile kurutulmuştur. Deneysel çalışmadan alınan nem-zaman değişim verileri “Newton”, “Page” ve “Henderson & Pabis” ince tabaka kurutma matematiksel modelleri kullanarak lineer olmayan regresyon analizi ile incelenmiştir. Karşılaştırma yapılırken  $R^2$ , MBE ve RMSE değerleri hesaplanmış ve sonuçların gerçek kuruma eğrisine oldukça yakında değerler verdiği gözlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : M. Kalender ve arkadaşları çalışma sonucu grafiği [5].

Coradi ve arkadaşları [17] limon yapraklarının kurutma kinetiğini araştırmak için yaptıkları çalışma sonunda kurutma hava sıcaklığının kuruma üzerindeki etkisinin ve yapraklardaki yağ oranının değişiminin matematiksel modelini çıkarmışlardır. Kurutma deneyinde tepsili kurutucuda 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C olmak üzere 4 farklı hava sıcaklığı ve 0,8 m/s ve 1,3 m/s gibi iki farklı hava hızı kullanılmış ve limon yaprağının kuruma davranışı ile ilgili deneysel veriler elde edilmiştir. Deneydeki amaç limon yaprağını kuruturken yaprağın öz yağ kaybını minimumda tutarak en kısa sürede istenilen nem oranına ulaşmayı sağlayacak kurutma parametrelerini belirlemektir. Yapılan çalışmada, deneyden alınan veriler 13 farklı ince tabaka kurutma matematiksel modeli için incelenmiştir. Lineer olmayan regresyon yöntemi kullanılarak her model için  $R^2$  ve SE parametreleri belirlenmiş ve buradan tüm hızlarda ve tüm sıcaklık değerlerinde  $R^2$  değeri en yüksek (0,9999) ve SE değeri en düşük (0,0036) olan “Two-Term” modeli en uygun model olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Arrhenius tipi denklem kullanılarak materyalin aktivasyon enerjisi 62,84 kJ/mol olarak bulunmuştur.

A. Cihan ve arkadaşları [18] 40 °C ve 1,5 m/s kurutma hava hızında yapılan deneyden aldıkları sonuçları 10 farklı ince tabaka kurutma modeli üzerinde uygulamışlardır. Lineer olmayan regresyon yöntemi ile yapılan analiz sonucunda “Midilli” matematiksel modelinin deneysel ölçümlere en yakın değerleri verdiği belirlenmiştir (Şekil 4.2).



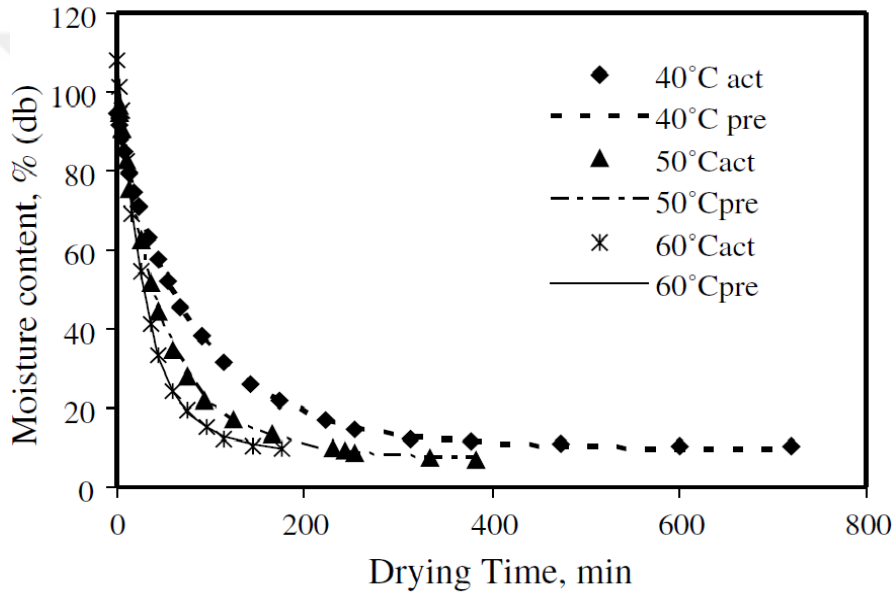
Şekil 4.2 : A. Cihan ve arkadaşları çalışma sonucu grafiği [18].

Rayaguru ve arkadaşları [19] yabani bir meyve olan taş elmasının kurutma kinetikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan kurutma deneyinde 8 mm kalınlığında kesilen elmalar tepsili bir kurutucuda 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C hava sıcaklıklarında 1,1 m/s hızda kurutulmuş ve zamana bağlı nem değişimi gözlenmiştir. Deneyden elde edilen veriler kullanılarak lineer olmayan regresyon yöntemi ile 6 farklı ince tabaka kurutma modeline uygulanmıştır. En uygun modelin “Logarithmic” model olduğu bulunmuştur. Modelin farklı hava sıcaklıkları için uygun olan ortak kurutma katsayıları belirlenmiş ve buradan her sıcaklık için nem yayılım katsayısı ve Arrhenius tipi denklem kullanılarak taş elmasının kurutma aktivasyon katsayısı belirlenmiştir. Kurutma hızının en fazla olduğu sıcaklık 70 °C olmasına rağmen, elma dilimlerindeki renk değişiminin kabul edilebilir olduğu en uygun sıcaklık 50 °C olarak belirlenmiştir.

Hakan Yoğurtçu [20] haşlanmış buğdayın kurutulması ile ilgili yaptığı çalışmada halojen lambalı kurutucu kullanmıştır. Numuneleri 50 °C, 60 °C, 70 °C ve 80 °C gibi farklı sıcaklıklarda kurutmuş ve zamana bağlı nem değişimini gözlenmiştir. Alınan verilerden yola çıkarak buğdayın yukarıda belirtilen sıcaklıkta ve halojen lambalı kurutucuda gösterdiği kuruma kinetiğini matematiksel olarak modellemiştir. Doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanarak 5 farklı ince tabaka kurutma modeli üzerinde uygulama yapmış ve her durum için  $R^2$ , RMSE ve  $\chi^2$  değerlerini tespit ederek en yüksek  $R^2$  (0,9998) ve en düşük RMSE (0,0026) değerlerini veren modelin “Weibull” modeli olduğunu belirlemiştir. Buradan yola çıkarak kurutulan materyalin difüzyon katsayısını 2. Fick kanunundan yararlanarak her bir sıcaklık için sırasıyla  $6,39 \times 10^{-11}$ ,  $1,18 \times 10^{-10}$ ,  $1,81 \times 10^{-10}$  ve  $2,22 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s olarak belirlemiştir.

Sevil Karaarslan ve arkadaşları [21] dilimlenmiş çileklerin kurutulması ile ilgili yaptıkları çalışmada, mikrodalga-fan destekli kurutucuda farklı kombinasyonlarda kurutma deneyleri yapmışlardır. Deneyde ilk olarak 180, 360, 540, 720 ve 900 W güçlerinde sadece mikrodalga kullanarak, ikinci olarak sadece 100 °C, 150 °C ve 200 °C sıcaklıkta hava kullanarak, üçüncü olarak ise bu mikrodalga-fan (sıcak hava) kombinasyonu ile sırasıyla 180 ve 360 W güçlerde ve bu her güç değerinde sırasıyla 100 °C, 150 °C ve 200 °C sıcaklıklarında denemeler yaparak çilek dilimlerinin zamanla nem değişimini ölçmüşlerdir. Deneyden elde ettikleri verileri kullanarak 7 farklı matematiksel model üzerinde  $R^2$ , SEE ve RSS değerlerini belirlemişler ve bu modellerden en yüksek  $R^2$  ve en düşük SEE ve RSS değerini veren modelin “Midilli-Kucuk” modeli olduğunu belirlemişlerdir.

D. Mohapatra ve arkadaşları [22] ince tabaka kurutma modelleri ile ilgili yaptığı çalışmada haşlanmış buğdayın kurutma kinetiği ile ilgilenmişlerdir. Çalışmada, önceden haşlanmış olan buğday tanelerini standart taşınım kurutucu içine yerleştirerek sabit hızda sırasıyla 40 °C, 50 °C ve 60 °C sıcaklıklarda kurutulmuş ve sıcaklığın kurutma hızı üzerine olan etkisi ölçülmüştür. Deneysel veriler 7 farklı matematiksel model ile karşılaştırılmış ve en iyi sonucu veren modelin “Two-Term” modeli olduğu gözlenmiştir. Haşlanmış buğdayın yukarıda belirtilen koşullardaki difüzyon katsayısının  $1,218 \times 10^{-10}$  ile  $2,861 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında olduğu belirlenmiştir. Materyalin aktivasyon enerjisi ise 37,013 kJ/mol olarak hesaplamıştır. Deneysel veriler ve model ile elde edilen nem-zaman değişimi Şekil 4.3’den incelenebilir.



Şekil 4.3 : D. Mohapatra, çalışma sonucu grafiği [22].

R. Assawarachan [23] Hindistan cevizi artıklarının kurutulması ile ilgili yaptığı çalışmada, kurutma esnasında malzemenin öz yağı konsantrasyonu ve renk değişimini dikkate alarak kurutma prosesini matematiksel olarak modellemiştir. Deneyde kurutma işlemi için akışkan yatak kullanılmış ve malzeme 70 °C, 80 °C, 90 °C ve 100 °C sıcaklıklarda kurutularak nem miktarının zamanla değişimi kaydedilmiştir. Ayrıca her işlemde öz yağındaki değişim ve malzemenin rengindeki beyazlaşma oranı ölçülmüştür. Deneysel veriler doğrusal regresyon yöntemi ile 4 farklı ince tabaka kurutma modeli üzerinde uygulamış ve en yüksek  $R^2$  (0,9993) ve en düşük RMSE (0,0128) değerini veren veya farklı bir değişle gerçek kuruma eğrisine en yakın değerleri veren modelin “Page” ince tabaka kurutma modelinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kurutma sıcaklığının malzemenin kuruma esnasında rengindeki beyazlaşmaya

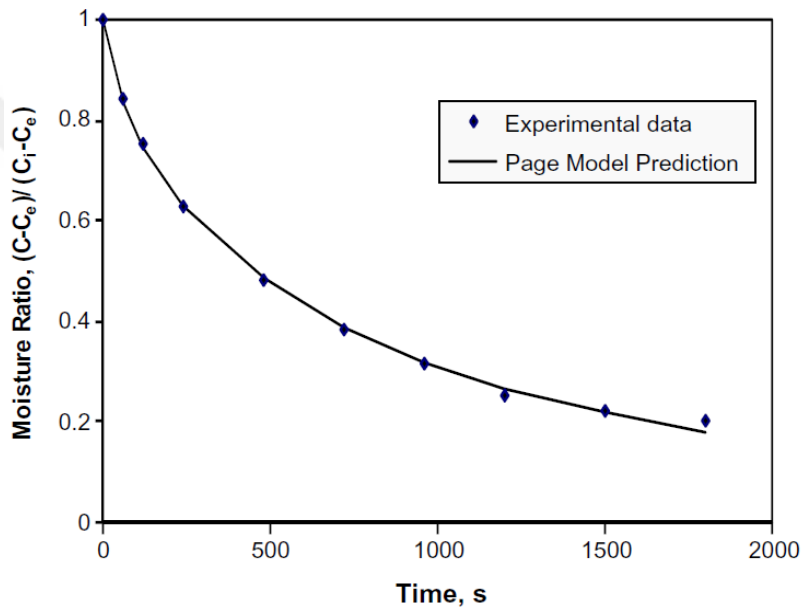
etkisi olmadığını gözlenmiş ve en fazla öz yağ içeriğinin 100 °C’de kuruma ile sağlandığını belirlemiştir.

Smail Meziane [13] zeytin posası için yaptığı deneysel çalışmada, başlangıçta ıslak bazda %48,6 nem oranına sahip olan deney malzemesini akışkan yatak kullanarak sırasıyla 50 °C, 60 °C, 70 °C ve 80 °C sıcaklıklarda ve her bir sıcaklıkta akışkan yatağı sırasıyla 41, 52 ve 63 mm yüksekliğine kadar doldurarak sabit hızda kurutmuştur. Elde ettiği deneysel verilere 10 ince tabaka kurutma modeline doğrusal olmayan regresyon yöntemini uygulamış ve her durum için  $R^2$ ,  $\chi^2$  ve RMSE değerlerini belirlemiştir. En yüksek  $R^2$  (0,99973) değerini ve en düşük RMSE (0,004927) değerini veren modelin “Midilli” modeli olduğunu belirlemiştir. Ayrıca malzemenin her durum için difüzyon katsayısını belirlemiş ve  $0,68 - 2,5 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s aralığında olduğunu tespit etmiştir. Aynı şekilde her yükseklik için Arrhenius tipi denklem kullanarak aktivasyon enerjisini sırasıyla 34,05, 36,84 ve 38,1 kJ/mol olarak hesaplamıştır.

M. Khanali ve arkadaşları [12] laboratuvar tipi akışkan yatak ünitede 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklıklar, her sıcaklık için 2,3 m/s, 2,5 m/s ve 2,8 m/s kurutma hava hızı, 0,66 kg ve 1,32 kg’lık pirinç yüklemesi ile parametrik bir kurutma deneyi yapmışlardır. Deney sırasında taneciklerin sahip olduğu nem miktarı düzenli olarak ölçülmüş ve deney sonucunda nemin zamana göre değişimini veren grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak, kurutma hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan ampirik ve yarı ampirik ince tabaka kuruma modellerinden; “Logarithmic”, “Two-Term”, “Modified Henderson & Pabis”, “Diffusion Approach”, “Page”, “Midilli ve arkadaşları” ve “Quasi Stationary” modelleri ile doğrusal olmayan regresyon analizi yapmışlardır. Sonuçlara göre tüm koşullar için en yüksek  $R^2$  ve en düşük RMSE değerini veren modelin “Midilli ve arkadaşları” modeli olduğunu belirlemişler ve modelin kuruma katsayılarını ve bu katsayıları sıcaklık, yükseklik ve hız parametrelerine bağlı olarak belirleyebilen denklemleri oluşturmuşlardır.

C. Srinivasakannan ve arkadaşları [24] darı tahılının kurutma kinetikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada öncelikle kabuklarını soydukları darıyı akışkan yatak bir kurutucu ile sırasıyla 40 °C, 50 °C ve 65 °C hava sıcaklıklarında ve 1,69 m/s ve 2,25 m/s hava hızlarında kurutmuşlardır. Deneyi bu parametreler ile 0,270 kg ve 0,155 kg’lık numuneleri kurutarak tekrarlamışlardır. Sonuçlara göre en düşük RMSE değerini veren modelin “Page” modeli olduğuna karar vermişlerdir. Elde ettikleri grafik Şekil 4.4’da gösterilmektedir.

V. Mohammadpour ve arkadaşları [25] kabuklu Antep fıstığının efektif yayılım katsayısını ve aktivasyon enerjisini belirlemek üzere fıstığı akışkan yatak kurutucuda kurutmuşlardır. Kurutma deneyini 4 farklı sıcaklıkta (25 °C, 30 °C, 45 °C ve 60 °C) ve 3 farklı hava hızında (6, 8 ve 10 m/s) yapmışlar ve deney esnasında fıstığın belirli zaman aralıklarında nem miktarını ölçerek nem-zaman grafiğini elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda kuruma süresinin kısılmasında en büyük etkenin hava hızından çok havanın sıcaklığı olduğunu gözlemişlerdir. Deneysel verileri, 6 matematiksel model üzerinde uygulamışlar ve en iyi yaklaşımın “Two-Term” modeli olduğunu göstermişlerdir.



**Şekil 4.4 :** C. Srinivasakannan ve arkadaşları çalışma sonucu grafiği [24].

M. Zielinska ve arkadaşları [26] 2009 yılında yaptıkları çalışmada kenar ölçüsü yaklaşık 1 cm olan küp halindeki havuçlar için kuruma kinetiklerini belirlemişlerdir. Deneyde kurutucu ünite olarak püskürtmeli akışkan yatak kullanmışlardır. Öncesinde şokladıkları havuç tanelerini sırasıyla 60 °C, 70 °C, 80 °C ve 90 °C sıcaklıklarda kurutmuşlar ve taneciklerin zamana göre nem değişimlerini ve boyutlarındaki değişimleri gözlemişlerdir. 4 farklı matematiksel modelden en iyi sonuçların “Two-Term” ve “Page” modellerinden alındığını belirlemişlerdir.

T. Madhiyanon ve arkadaşları [27] Hindistan cevizinin kurutulması ile ilgili yaptıkları çalışmada bir parçalayıcı yardımı ile ufaladıkları Hindistan cevizini laboratuvar ölçeğindeki bir akışkan yatak kurutucuda kurutmuşlardır. Hava hızının sabit 2,5 m/s olduğu deneyde hava sıcaklığını 60-120 °C aralığında değiştirmiş ve Hindistan

cevizini kuru bazda %105 nemden %3 neme kadar kurutmuşlardır. Deney esnasında belirli aralıklarda aldıkları numunenin ağırlıklarını ölçerek nem miktarını hesaplamışlar ve deneylere bu ağırlığın sabit kalmaya başladığı ana kadar devam ettirmişlerdir. Elde ettikleri verilerden yola çıkarak 10 farklı ince tabaka kuruma modeli üzerinde regresyon çalışması yapmışlar ve en uygun modelin “Modified Henderson & Pabis” olduğunu belirlemişlerdir.

D. Yogendrasasidhar ve arkadaşları [28] kademeli akışkan yatak kurutucu ile Hint darısının kuruma davranışlarını ölçmüşlerdir. 9 farklı model üzerinde regresyon analizi yapmışlar ve elde ettikleri sonuçlarda tüm modellerin yeterince doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Kurutma deneyinde elde ettikleri sonuçlara bakıldığında kullanılan farklı duvar sıcaklıklarının kuruma hızını ve denge nem miktarını etkilediğini gözlemişlerdir. Sıcaklığın yüksek olduğu durumda kurumu hızının daha yüksek ve denge nem miktarının daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, hızla ve yükseklikle kuruma süresinin azaldığını belirlemişlerdir.

Hamid Reza Gazor ve arkadaşları [4] kanolanın akışkan yatak kurutucudaki kuruma davranışları üzerinde çalışma yapmışlardır. 30-100 °C aralığında farklı giriş sıcaklıkları denemişlerdir. Elde ettikleri verileri 6 farklı ince tabak kurutma modeli üzerinde uygulayarak regresyon çalışması yapmışlar ve en uygun modelin “Logarithmic” model olduğunu belirlemişlerdir. Buradan yola çıkarak nem difüzyon katsayısını her sıcaklık değeri için hesaplamışlar ve bu sayının sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir.

Sadece deneysel çalışma yapan bilim insanlarının yanı sıra deneysel çalışmalar ile simülasyon çalışmalarını birleştiren araştırmacılar da mevcuttur.

Masli Irwan Rosli ve arkadaşları [29] bir çeşit palmiye ağacı olarak bilinen sago ağacının işlendikten sonra çıkan atıklarını bir akışkan yatak kurutucuda kurutarak matematiksel olarak modellemişlerdir. Literatürde bilinen ince tabaka kurutma modelleri arasında “Two-Term Exponential” modelinin en uygun sonucu verdiğini belirlemişlerdir. Bu matematiksel modelden yola çıkarak bu atıkların sonlu hacimler metodu ile akışkan yatak bir kurutucu modelleyerek akışkanlaşma davranışını incelemişlerdir. Eulerian-Eulerian çok fazlı akış modelini seçerek başlangıç koşulları olarak hava hızını 1,3 m/s, tane çapını 2000 µm ve hava sıcaklığını 50 °C olarak girmişlerdir. İlk olarak 0,6, 1,0, 1,3, 1,8 ve 2,2 m/s gibi farklı hava hızları kullanarak

taneciklerin akışkanlaşma esnasında gösterdiği davranışı incelemişlerdir. 1,0 ile 2,2 m/s aralığındaki tüm hızların akışkanlaşma için uygun olduğunu fakat kuruma davranışı için herhangi bir değişiklik göstermeyeceğini belirtmişlerdir. Ayrıca tanecik çapı olarak sırasıyla 200, 500, 1000 ve 2000  $\mu\text{m}$  değerleri girerek sabit hava hızında simülasyonu tekrarlamışlar ve tanecik çapı küçüldükçe akışkanlaşmanın ve böylece yataktaki genişlemenin arttığını gözlemişlerdir.

Junkee Jang ve arkadaşları [7] Duquesne üniversitesi tarafından yapılmış olan ilaç yapımında kullanılan toz halindeki maddenin laboratuvar ölçeğindeki akışkan yatak kurutma deneyini sonlu hacimler yöntemi ile incelemişlerdir. Eulerian-Eulerian tipi çift fazlı akış modelinin kullanıldığı simülasyonda nem yayılım katsayısı  $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , tane çapı 287  $\mu\text{m}$ , yoğunluk  $1200 \text{ kg/m}^3$  ve gaz giriş hızı 0,28 m/s olarak girilmiştir. Akış laminar ve tanecikler küresel olarak kabul edilmiştir. Başlangıç koşulları deneydeki parametreler ile birebir aynı tutulmuştur. Simülasyon sonunda elde ettikleri nem-zaman grafiği deneysel veriler ile karşılaştırıldığında nem değişiminin sabit oranlı ve azalan oranlı olduğu bölgelerde birbirine oldukça yakın olduğunu gözlemişlerdir. Aynı zamanda akışkan yatağın gaz çıkış sıcaklığı değerleri ile laboratuvar ölçekli sistemdeki verilerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Munna Verma ve arkadaşları [8] ağaç talaşının akışkan yatak bir kurutucuda modellenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. 600  $\mu\text{m}$  çapında ve  $600 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip talaş taneciklerini 40 cm boyundaki yatak geometrisi içine 15 cm'lik bir kısmı dolduracak şekilde yerleştirmişlerdir. Eulerian-Eulerian tipi çok fazlı akış modelinin seçildiği çalışmada akışın k-epsilon tipi türbülanslı olduğunu belirtmişlerdir. 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 ve 0,6 m/s'lik farklı giriş hızları kullanılarak her bir hızda katı-gaz karışımını ve taneciklerin akışkanlaşma esnasında gösterdiği davranışı incelemişlerdir. Çalışma sonunda gaz hızının artması ile birlikte yataktaki yükselmenin daha fazla olduğu ve katının hacimsel oranının azaldığı görülmüştür. Ayrıca gaz hızının yataktaki karışımın statik basınç değerleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve ortalama statik basıncın gaz hızı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir.

Fan Geng ve arkadaşları [30] tütün tanelerinin bir akışkan yatak kurutucuda akışkanlaşma karakteristiklerini incelemek adına sonlu hacimler yöntemi ile simülasyonunu yapmışlardır. Eulerian-Eulerian tipi çok fazlı modelinin kullanıldığı çalışmada tütün taneleri küresel olarak kabul edilmiş, ısı ve kütle transferi ise ihmal edilmiştir. Tütün tanesi ile eşdeğer hacimdeki kürenin hacmi hesaplanarak tane çapı

0,002 m olarak belirlenmiştir. Besleme ve yükselme borularından oluşan akışkan yatakta hava, yükselme borusunun alt kısmından girmekte ve belirli bir yükseklikte besleme borusundan gelen tanecikler ile çarpışarak tanecikleri sürüklemektedir. Taneciklerin hacimsel dağılımının incelendiği çalışmada, taneciklerin duvara yakın olduğu kısımlarda yer yer aşağı doğru yönlendiği ve bu esnada aşağıdan gelen tanecikler ile tekrar buluştuğu girdap oluşturduğu bulunmuştur. Ayrıca duvara yakın kısımlarda taneciklerin ortalama hızının orta bölgelere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Besleme borusu ile yükselme borusunun birleştiği kısımdaki katı-gaz karışımı incelendiğinde katı madde beslemesinin çok fazla olması ve gaz hızının yüksek olmasının katı-gaz karışımını olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir. Bu gözlemlerden yola çıkarak sistemdeki katı-gaz karışımını ve akışkanlaşmayı düzenlemek adına geometride bazı iyileştirmeler yapılmıştır. İlk olarak yükselme borusunun kare kesit alanı daire kesitli boru ile değiştirilmiştir. Aynı zamanda besleme borusundaki katı beslemesini düzenlemek adına besleme borusunun uç kısmına üçgen prizma şeklinde parçalar eklemiştir.

Chanchal Loha ve arkadaşları [31] kabarcıklı akışkan yatak ile yaptıkları HAD çalışmasında restitüsyon katsayısının katının akışkanlaşma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 530  $\mu\text{m}$  çapında taneciklerin kullanıldığı çalışmada 1, 0,99, 0,95, 0,90 ve 0,85 restitüsyon katsayılarını hazne duvarlarının tam kaygan ve kayganlık katsayısının 0,6 olarak girildiği iki durum için incelemişlerdir. Çalışma sonunda duvarların tam kaygan olduğu durum ile kayganlık katsayısının 0,6 olduğu durum arasında katının hacimsel oranında ve eksenel hızın yatak boyunca dağılımında kayda değer bir fark oluşmadığı sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte restitüsyon katsayısının 1 olduğu durumda yatak genelinde hiçbir şekilde kabarcık oluşumu gözlenmemiş ve yatağın radyal yöndeki hız dağılımının her yerde aynı ve neredeyse sıfır olduğu görülmüştür. Fakat katsayının azalması ile birlikte yatakta oluşan kabarcıkların boyutu ve sayısı artmıştır. Ayrıca merkeze yakın bölgelerdeki taneciklerin yukarı yöndeki hızları ve duvarlara yakın bölgelerdeki taneciklerin aşağı doğru olan hızların arttığı tespit edilmiştir.



## 5. REFERANS ALINAN DENEY DÜZENEGİ

Ümran Erçetin yaptığı doktora çalışmasında [9] haşlanmış buğday taneciklerini tasarladıkları laboratuvar tipi akışkan yatak kurutucuda kurutarak buğdayın nem değişimini belirli aralıklarla ölçmüş ve kuruma davranışını belirlemiştir. Deneyde Gaziantep bölgesinde bulunan sert durum buğdayı kullanılmıştır.

Deneysel çalışmanın temelini oluşturacak buğdaya ait ölçümler aşağıda belirtilen yöntemler ile yapılmıştır.

- **Yoğunluk tayini:** İlk olarak buğday tartılmış daha sonra ise yağ dolu kabın içine daldırılarak kabın yüksekliğindeki değişim ölçülmüş ve buradan da hacmi hesaplanmıştır. Bu işlem farklı nem oranlarına sahip buğday numuneleri ile tekrarlanmış ve buğdayların boşluklu ve boşluksuz haldeki yoğunlukları bulunmuştur.
- **Kuru ve yaş bazda nem ölçümü:** Ham buğdaydan alınan numune 70 °C’deki fırına koyularak farklı zamanlarda tartılmış ve kaybettikleri nem miktarı ölçülmüştür. Ölçümler arasındaki fark sıfırlanana kadar ölçüm devam etmiş ve aşağıdaki formüller ile kuru ve yaş bazdaki nem hesaplanmıştır. Nemlendirme işleminde ise ağırlığı bilinen numune delikli bir kabın içinde kaynayan suyun içine atılmış ve farklı sürelerde çıkarılarak ağırlıkları ölçülmüştür.

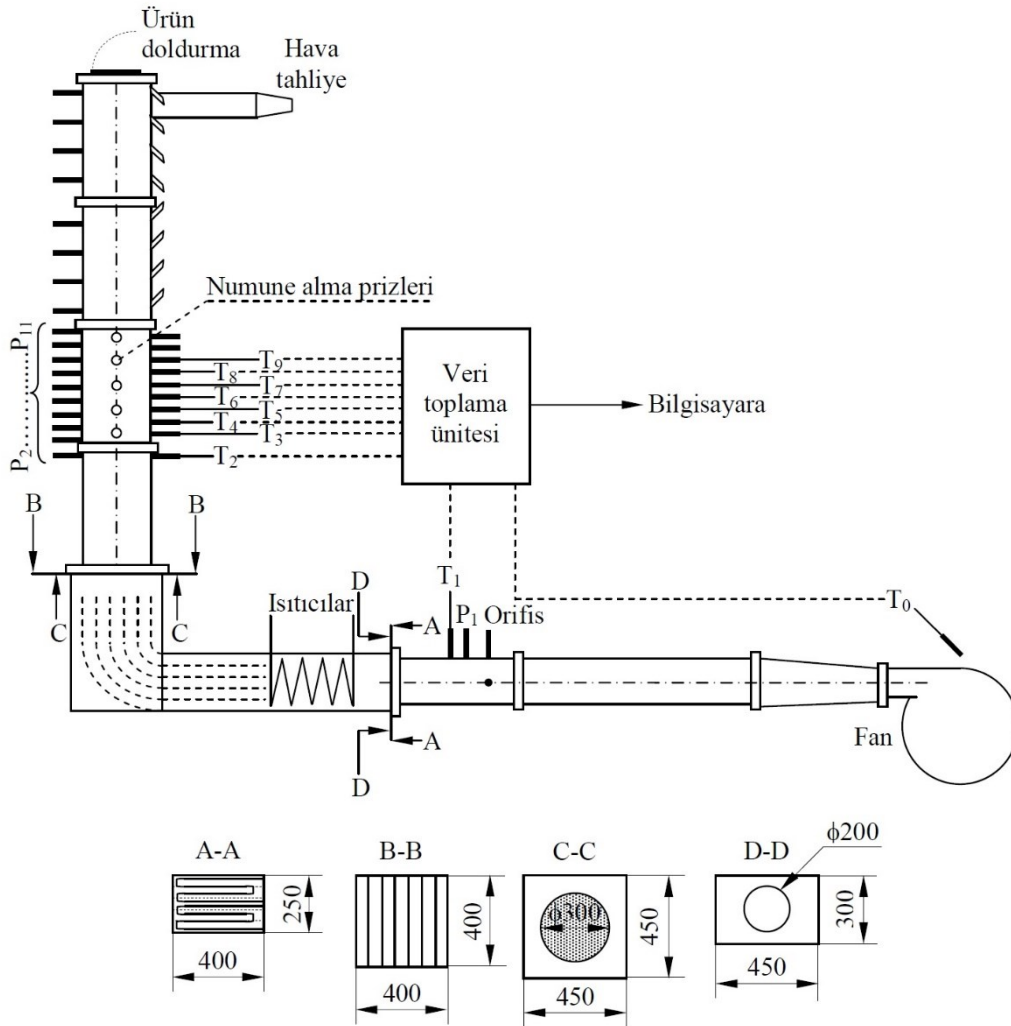
$$MR_{kb} = \frac{m_{su}}{m_{kurumadde}} \quad (5.1)$$

- **Tanecik boyutu ölçümü:** Ham buğdaydan ve farklı oranda neme sahip buğdaylardan belirli miktarda numuneler alınmış ve bu numunelerdeki her bir buğday tanesinin genişliği ve yükseklikleri ölçülmüş ve ortalamaları alınarak tanecik ölçüleri belirlenmiştir.
- **Küresellik hesabı:** Hesaplarda Denklem 3.1’de verilen ifade kullanılmıştır. Ancak buğdayın sahip olduğu geometrinin hacim hesabı için uygun bir ifade bulunamadığından bu geometriye en yakın geometrik şekil olan “Prolate Spheroid” için verilen aşağıdaki alan ve hacim formülleri kullanılmıştır.

$$S = 2\pi w + \frac{2\pi(\text{genişlik} / 2)(\text{yükseklik} / 2)}{\sqrt{(\text{derinlik} / 2)^2 - (\text{genişlik} / 2)^2}} \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{(\text{derinlik} / 2)^2 - (\text{genişlik} / 2)^2}}{\text{derinlik} / 2} \right) \quad (5.2)$$

$$V = -\pi w(\text{genişlik} / 2)^2 \text{yükseklik} \quad (5.3)$$

Şekil 5.1’de imal edilen akışkan yatak deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Sistem havası sürücülü fan ile beslenerek ısıtıcıya girmekte ve buradan 90 derecelik dirsek ile yukarı doğru yönlendirilmektedir. Bu kısımda hava distribütör plakadan geçerek 300 mm çapında, 500 mm’lik kısmı pleksiglas kalan kısmı ise paslanmaz çelikten imal edilen toplam 1400 mm yüksekliğe sahip akışkan yatağa girmektedir.



**Şekil 5.1 :** Referans alınan deney düzeneği [9].

Hava akışkan yatağa girmeden önce basıncı ve sıcaklığı ölçülmüştür. Pleksiglas olan bölümde her 50 mm’de bir basınç ve sıcaklık ölçüm prizi ve 50, 150, 250, 350 ve 450

mm'lik yüksekliklerde numune alma prizleri bulunmaktadır. Akışkan yataktan geçen hava üst kısımdan dış ortama verilmektedir.

Deneyde kullanılan hedik (haşlanmış buğdaya verilen isim) bulgur üretim fabrikalarındaki değerlere uygun şekilde hazırlanmış ve aynı şekilde kurutulmuştur.

Deneyde daha önce kaynatılmış suda ölçülerek yapılan nemlendirme işleminden alınan verilere göre buğdaylar yaş bazda %48-50 nem oranına gelene kadar geçen süre olan 50 dakika boyunca kaynatılmıştır. Daha sonra sudan alınan buğdaylar yüzey neminin alınması ve nem içeriklerinin sabitleşmesi için 60 dakika dinlendirilmişlerdir.

Dinlendirme işlemi sırasında hava besleyici fan ve 2 adet ısıtıcı değişken AC gerilimli varyağa bağlanarak hassas sıcaklık ayarlaması yapılmış ve deney tesisatı uygun çalışma koşullarına getirilmiştir. Dinlendirilme süresi sonunda buğdayların aldıkları nem miktarları tekrar tartılarak belirlenmiştir. Uygun koşullara geldiği gözlemlendikten sonra tesisat kapatılmış ve tesisat üzerindeki doldurma kapağından haşlanmış buğdaylar yatağa boşaltılarak fan ve ısıtıcılar tekrar çalıştırılmıştır.

Deney sırasında belirli aralıklarla numune alma prizlerinden deney koşullarını etkilemeyecek şekilde alınan numuneler hemen hassas terazide tartılmış ve numunenin alındığı zaman, numune ağırlığı ve numune numarası not alınmıştır. Deneyler buğdayın nem içeriği yaş bazda %12-13 değerlerine düşene kadar yaklaşık 100 dakika devam etmiştir.

Deneyler 3, 6 ve 9 kg'lık hedikler ile 70 °C sabit hava sıcaklığında yapılmıştır. Her bir deneyde yatağa yüklenen ağırlıkla orantılı olarak sırasıyla 10 cm, 20 cm ve 30 cm yatak yüksekliği oluşmuştur. Her yükseklik değeri için 5 farklı hız denenmiştir.



## 6. METODOLOJİ, SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

### 6.1 Uygun Matematiksel Modelin Belirlenmesi

Tez çalışmasında öncelikli olarak laboratuvar tipi akışkan yatak kurutucu ile kurutulan haşlanmış buğdayın kuruma esnasında zamana göre nem değişimini en iyi tahmin edecek matematiksel modelin bulunması amacıyla lineer olmayan regresyon metodu deney sonuçlarına uygulanmıştır.

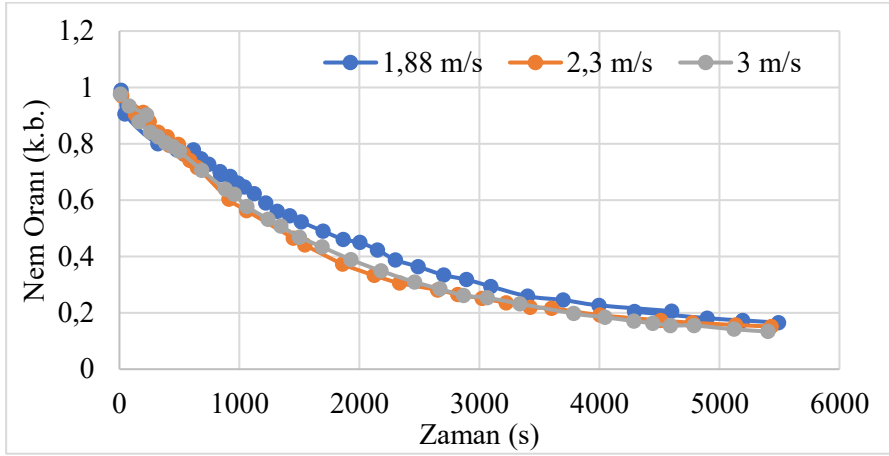
Kuru bazda %98 nem oranına sahip olan haşlanmış buğdaylar (hedik) için 70 °C sıcaklıktaki kurutma havası ile Tablo 6.1’de verilen parametreler dâhilinde yapılan kurutma deneyi sonuçları dikkate alınmıştır. Tablo 6.1’den görüldüğü üzere yatak yükseklikleri sabit tutularak farklı hızlar denenmiş böylece yatak yüksekliği-hız parametrelerinin kuruma eğrisi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla parametrik deneysel bir çalışmam yapılmıştır. Hızın 1,33 m/s olduğu ilk durum sabit yatak durumu olduğundan bu çalışmada yer verilmemiştir.

**Tablo 6.1 :** Referans deneysel çalışmada kullanılan parametreler [9].

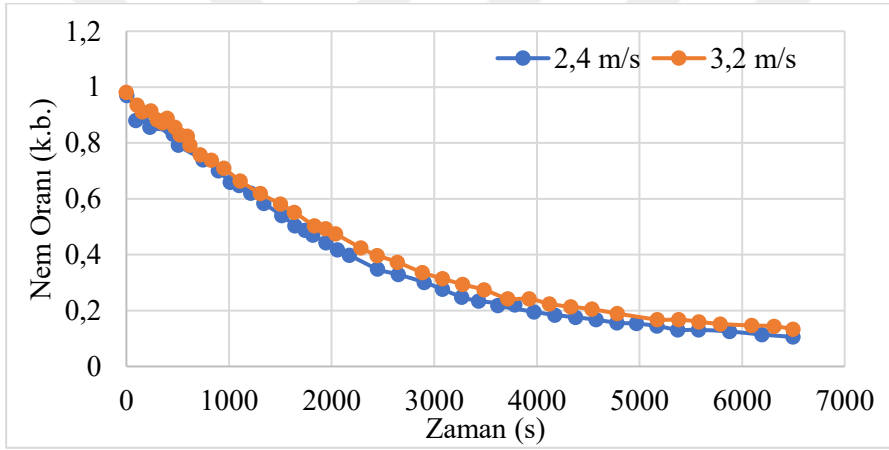
| Yatak Yüksekliği (m) | Hız (m/s) |
|----------------------|-----------|
| 0,1                  | 1,33      |
|                      | 1,88      |
|                      | 2,3       |
|                      | 3,0       |
| 0,2                  | 2,4       |
|                      | 3,2       |
|                      | 2,5       |
| 0,3                  | 3,2       |

Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 tüm hız ve yükseklikler için deneysel çalışmada elde edilen haşlanmış buğdayın kuruma esnasında zamana göre nem miktarı gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm durumlarda buğdayın nem miktarının zamanla üstel olarak azaldığı görülmektedir. Akışkan hızının artması ile birlikte, kuruma esnasında geçen süre çok az miktarda kısalmıştır. Yatak yüksekliğinin artması ve dolayısı ile

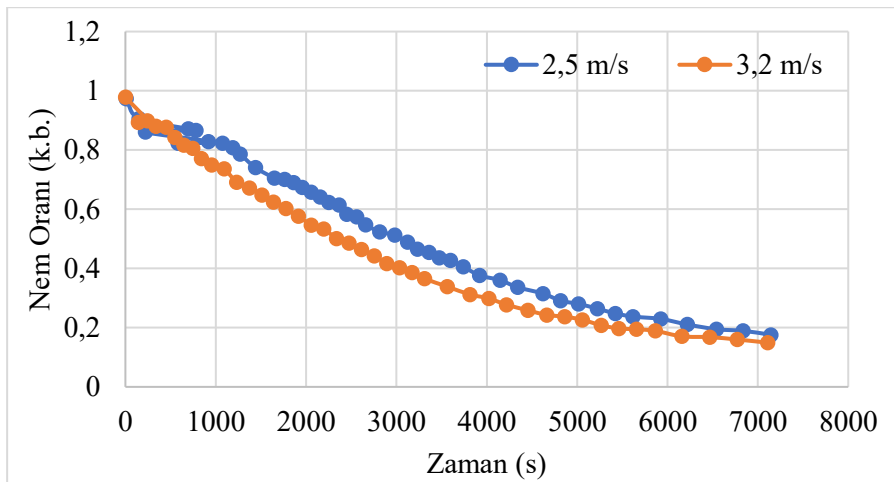
kurutulacak malzeme miktarının artması sonucu benzer hızlarda kuruma süresi 600 s kadar uzamıştır.



**Şekil 6.1 :** 0,1 m yatak yüksekliğinde 1,88, 2,3 ve 3 m/s hızlarda deneysel kuruma eğrileri [9].



**Şekil 6.2 :** 0,2 m yatak yüksekliğinde 2, 4 ve 3,2 m/s hızlarda deneysel kuruma eğrileri [9].



**Şekil 6.3 :** 0,3 m yatak yüksekliğinde 2,5 ve 3,2 m/s hızlarda deneysel kuruma eğrileri [9].

Gıda maddelerinin kuruma kinetiklerinin matematiksel olarak ifade edilmesinde kullanılan ampirik kuruma modelleri bu çalışmada yer almıştır. Literatürde ince tabaka kurutma olarak bilinen ve en yaygın kullanılan 10 farklı model bu tez çalışması için seçilmiştir. Kurutma deneyinden elde edilen, nem ve zaman verileri Tablo 6.2’de gösterilen modeller üzerinde uygulanmıştır.

**Tablo 6.2 :** Regresyon analizinde değerlendirilen matematiksel modeller.

| Model Adı                  | Matematiksel Gösterim                          |
|----------------------------|------------------------------------------------|
| Newton                     | $MR = \exp(-kt)$                               |
| Page                       | $MR = \exp(-kt^n)$                             |
| Henderson & Pabis          | $MR = a.\exp(-kt)$                             |
| Logarithmic                | $MR = a.\exp(-kt) + c$                         |
| Two-Term                   | $MR = a.\exp(-bt) + c.\exp(-dt)$               |
| Two-Term Exponential       | $MR = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-kat)$          |
| Diffusion Approach         | $MR = a.\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$           |
| Verma                      | $MR = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-gt)$           |
| Modified Henderson & Pabis | $MR = a.\exp(-kt) + b.\exp(-gt) + c.\exp(-ht)$ |
| Midilli                    | $MR = a.\exp(-kt^n) + bt$                      |

İnce tabaka kurutma modellerinin regresyon analizinde eğri uydurma işlemi yapılırken benzer konuda yapılmış birçok çalışmada yaygın olarak kullanılan istatistiksel parametrelerden bu çalışmada da faydalanılmıştır. Test edilen modellerin eğriye uyma kalitesini ifade eden ve korelasyon katsayısı olarak bilinen  $R^2$ , modelin oluşturduğu eğri ile gerçek kuruma eğrisi arasındaki hatayı ifade eden ve hataların kareleri toplamı olarak bilinen SSE parametreleri bu çalışmada kullanılmıştır. En uygun modelin  $R^2$  değerinin en yüksek SSE değerinin ise en düşük olması gerekmektedir.

Ampirik modellerden gerçek kuruma eğrisine en yakın sonucu verecek modelin belirlenmesi amacıyla günümüzde istatistiksel hesaplamalarda yaygın olarak kullanılan Microsoft Office Excel 2019 programının “Çözücü Modülü” kullanılmıştır. İç içe döngüler ayarlanarak en küçük kareler yöntemi ile Tablo 6.2’de belirtilen matematiksel ifadelerdeki katsayılar hesaplanmış ardından korelasyon katsayısı  $R^2$ ’nin hesaplanması sağlanmıştır.

**Tablo 6.3 :** H=0,1 m ve V=1,88 m/s için elde edilen model katsayıları.

| Model                      | k      | a     | b       | c     | d      | h      | n      |
|----------------------------|--------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| Newton                     | 0,0004 |       |         |       |        |        |        |
| Page                       | 0,0015 |       |         |       |        |        | 0,8314 |
| Henderson & Pabis          | 0,0004 | 0,917 |         |       |        |        |        |
| Logarithmic                | 0,0004 | 0,872 |         | 0,055 |        |        |        |
| Two-Term                   | 0,0004 | 0,458 |         | 0,458 | 0,0004 |        |        |
| Two-Term                   | 0,0045 | 0,079 |         |       |        |        |        |
| Experimental               |        |       |         |       |        |        |        |
| Diffusion                  | 0,0227 | 0,102 | 0,015   |       |        |        |        |
| Approximation              | 0,0239 | 0,101 |         |       |        |        |        |
| Verma                      |        |       |         |       |        |        |        |
| Modified Henderson & Pabis | 0,0004 | 0,305 | 0,305   | 0,305 |        | 0,0004 |        |
| Midilli                    | 0,0017 | 0,796 | -0,0001 |       |        |        | 0,0095 |

**Tablo 6.4 :** H=0,1 m ve V=2,3 m/s için elde edilen model katsayıları.

| Model                      | k      | a     | b       | c     | d      | h      | n      |
|----------------------------|--------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| Newton                     | 0,0005 |       |         |       |        |        |        |
| Page                       | 0,0012 |       |         |       |        |        | 0,8790 |
| Henderson & Pabis          | 0,0005 | 0,964 |         |       |        |        |        |
| Logarithmic                | 0,0006 | 0,884 |         | 0,122 |        |        |        |
| Two-Term                   | 0,0005 | 0,482 |         | 0,482 | 0,0005 |        |        |
| Two-Term                   | 0,0106 | 0,042 |         |       |        |        |        |
| Experimental               |        |       |         |       |        |        |        |
| Diffusion                  | 0,0219 | 0,039 | 0,0204  |       |        |        |        |
| Approximation              | 0,0006 | 0,917 |         |       |        |        |        |
| Verma                      |        |       |         |       |        |        |        |
| Modified Henderson & Pabis | 0,0005 | 0,321 | 0,3214  | 0,321 |        | 0,0005 |        |
| Midilli                    | 0,0015 | 0,817 | -0,0002 |       |        |        | 0,0095 |

**Tablo 6.5 :** H=0,1 m ve V=3 m/s için elde edilen model katsayıları.

| Model                      | k      | a     | b       | c     | d      | h      | n      |
|----------------------------|--------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| Newton                     | 0,0005 |       |         |       |        |        |        |
| Page                       | 0,0013 |       |         |       |        |        | 0,8642 |
| Henderson & Pabis          | 0,0004 | 0,952 |         |       |        |        |        |
| Logarithmic                | 0,0006 | 0,889 |         | 0,088 |        |        |        |
| Two-Term                   | 0,0004 | 0,476 |         | 0,476 | 0,0004 |        |        |
| Two-Term                   | 0,0011 | 0,299 |         |       |        |        |        |
| Experimental               |        |       |         |       |        |        |        |
| Diffusion                  | 0,0200 | 0,055 | 0,0215  |       |        |        |        |
| Approximation              | 0,0007 | 0,656 |         |       |        |        |        |
| Verma                      |        |       |         |       |        |        |        |
| Modified Henderson & Pabis | 0,0004 | 0,317 | 0,3174  | 0,317 |        | 0,0004 |        |
| Midilli                    | 0,0015 | 0,812 | -0,0002 |       |        |        | 0,0095 |

**Tablo 6.6 : H=0,2 m ve V=2,4 m/s için elde edilen model katsayıları.**

| Model             | k      | a     | b       | c     | d      | h      | n      |
|-------------------|--------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| Newton            | 0,0004 |       |         |       |        |        |        |
| Page              | 0,0006 |       |         |       |        |        | 0,9543 |
| Henderson & Pabis | 0,0004 | 0,971 |         |       |        |        |        |
| Logarithmic       | 0,0004 | 0,951 |         | 0,027 |        |        |        |
| Two-Term          | 0,0004 | 0,485 |         | 0,485 | 0,0004 |        |        |
| Two-Term          | 0,0179 | 0,022 |         |       |        |        |        |
| Experimental      |        |       |         |       |        |        |        |
| Diffusion         |        |       |         |       |        |        |        |
| Approximation     | 0,0229 | 0,027 | 0,0170  |       |        |        |        |
| Verma             | 0,3925 | 0,029 |         |       |        |        |        |
| Modified          |        |       |         |       |        |        |        |
| Henderson & Pabis | 0,0004 | 0,323 | 0,3239  | 0,323 |        | 0,0004 |        |
| Midilli           | 0,0015 | 0,811 | -0,0001 |       |        |        | 0,0095 |

**Tablo 6.7 : H=0,2 m ve V=3,2 m/s için elde edilen model katsayıları.**

| Model             | k      | a     | b       | c     | d      | h      | n      |
|-------------------|--------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| Newton            | 0,0004 |       |         |       |        |        |        |
| Page              | 0,0005 |       |         |       |        |        | 0,9596 |
| Henderson & Pabis | 0,0004 | 0,986 |         |       |        |        |        |
| Logarithmic       | 0,0004 | 0,945 |         | 0,053 |        |        |        |
| Two-Term          | 0,0004 | 0,493 |         | 0,493 | 0,0004 |        |        |
| Two-Term          | 0,0214 | 0,016 |         |       |        |        |        |
| Experimental      |        |       |         |       |        |        |        |
| Diffusion         |        |       |         |       |        |        |        |
| Approximation     | 0,0193 | 0,012 | 0,0183  |       |        |        |        |
| Verma             | 0,0134 | 0,014 |         |       |        |        |        |
| Modified          |        |       |         |       |        |        |        |
| Henderson & Pabis | 0,0004 | 0,328 | 0,3287  | 0,328 |        | 0,0004 |        |
| Midilli           | 0,0018 | 0,846 | -0,0001 |       |        |        | 0,0095 |

**Tablo 6.8 : H=0,3 m ve V=2,5 m/s için elde edilen model katsayıları.**

| Model                      | k      | a      | b       | c      | d      | h      | n      |
|----------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Newton                     | 0,0002 |        |         |        |        |        |        |
| Page                       | 0,0001 |        |         |        |        |        | 1,1403 |
| Henderson & Pabis          | 0,0002 | 1,010  |         |        |        |        |        |
| Logarithmic                | 0,0001 | 1,276  |         | -0,301 |        |        |        |
| Two-Term                   | 0,0002 | 0,505  |         | 0,505  | 0,0002 |        |        |
| Two-Term                   | 0,0488 | 0,004  |         |        |        |        |        |
| Experimental               |        |        |         |        |        |        |        |
| Diffusion                  |        |        |         |        |        |        |        |
| Approximation              | 0,0156 | -0,020 | 0,0153  |        |        |        |        |
| Verma                      | 0,0007 | -0,277 |         |        |        |        |        |
| Modified Henderson & Pabis | 0,0002 | 0,337  | 0,3370  | 0,337  |        | 0,0002 |        |
| Midilli                    | 0,0005 | 0,900  | -0,0001 |        |        |        | 0,0094 |

**Tablo 6.9 : H=0,3 m ve V=3,2 m/s için elde edilen model katsayıları.**

| Model             | k      | a     | b       | c       | d      | h      | n      |
|-------------------|--------|-------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Newton            | 0,0003 |       |         |         |        |        |        |
| Page              | 0,0004 |       |         |         |        |        | 0,9758 |
| Henderson & Pabis | 0,0003 | 0,979 |         |         |        |        |        |
| Logarithmic       | 0,0003 | 0,982 |         | -0,0066 |        |        |        |
| Two-Term          | 0,0003 | 0,489 |         | 0,4897  | 0,0003 |        |        |
| Two-Term          | 0,0164 | 0,017 |         |         |        |        |        |
| Experimental      |        |       |         |         |        |        |        |
| Diffusion         | 0,0185 | 0,020 | 0,0155  |         |        |        |        |
| Approximation     |        |       |         |         |        |        |        |
| Verma             | 0,0166 | 0,021 |         |         |        |        |        |
| Modified          |        |       |         |         |        |        |        |
| Henderson & Pabis | 0,0003 | 0,326 | 0,3264  | 0,3264  |        | 0,0003 |        |
| Midilli           | 0,0018 | 0,846 | -0,0001 |         |        |        | 0,0095 |

Tablo 6.4 ve Tablo 6.9 arasındaki tablolarda Tablo 6.1’de gösterilen her durum için Tablo 6.2’de verilen her bir modele ait regresyon sonucu elde edilen katsayılar verilmiştir.

Regresyon hesaplamaları sonucunda elde edilen istatistiksel model seçim parametrelerine,  $R^2$  ve SSE, ait veriler Tablo 6.11’de verilmiştir.

Veriler incelendiğinde yüksekliğin 0,1 m ve hızın 1,88 m/s olduğu durumda en yüksek  $R^2$  ve en düşük SSE değerine sahip olması nedeniyle en uygun modellerin “Verma” ve “Diffusion Approach” diğer tüm durumlarda en yüksek  $R^2$  ve en düşük SSE değerinin elde edildiği modelin “Logarithmic” olduğu görülmektedir.

$R^2$  değerinin, yatak yüksekliğinin 0,1 m ve hızın 1,88 m/s olduğu durum ile yatak yüksekliğinin 0,3 m ve hızın 2,5 m/s olduğu durumda 0,98 geri kalan durumlarda ise 0,99’un üzerinde olduğu görülmektedir.  $R^2$  değerinin 0,98’in üzerinde olması modelin uygunluğu açısından oldukça yeterlidir.

İlk durum haricinde tüm koşullarda en uygun değerleri veren model “Logarithmic” model olduğundan, bu deney koşullarında haşlanmış buğdayın kuruma kinetiğini en iyi ifade eden model olduğuna karar verilmiştir. Gerçek kuruma eğrisine en uzak modelin ise tüm durumlarda en düşük  $R^2$  ve en yüksek SSE değerlerini veren “Midilli” modeli olduğu görülmüştür.

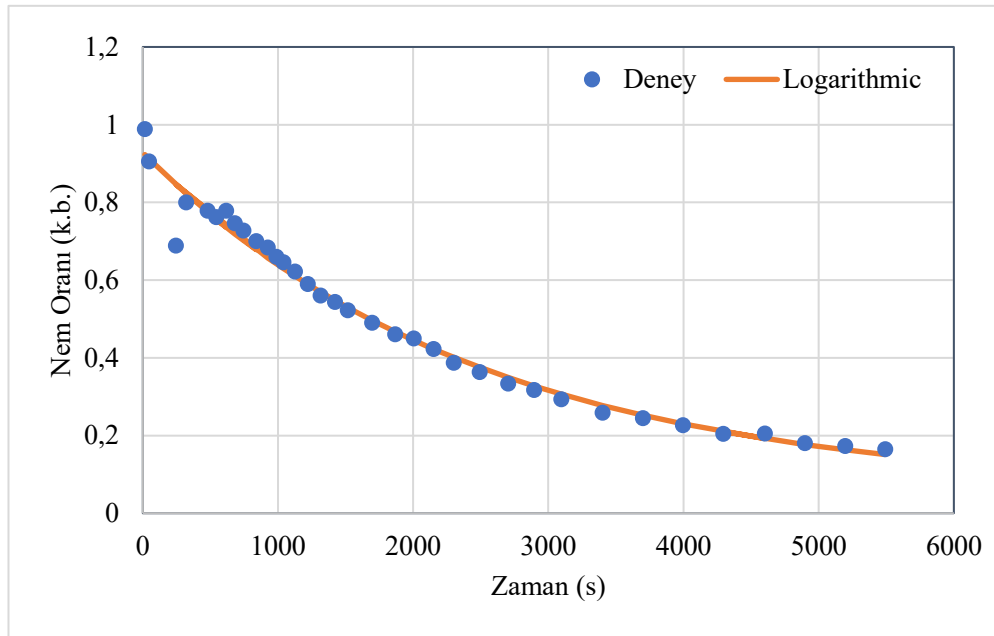
Sonuç olarak, deney çalışmasında kullanılan buğdayın akışkan yatakta kuruma eğrisini

matematiksel olarak en iyi tahmin eden “Logarithmic” model için Tablo 6.1’de verilen tüm durumlar için hesaplanan katsayılar ile birlikte gösterimi Tablo 6.10’de verilmiştir.

**Tablo 6.10 :** Tüm durumlar için “Logarithmic” model matematiksel ifadeleri.

| Yükseklik | Hız  | Matematiksel İfade                          |
|-----------|------|---------------------------------------------|
| 0,1       | 1,88 | $MR = 0,872904 \exp(-0,000403t) + 0,055472$ |
|           | 2,3  | $MR = 0,884480 \exp(-0,000645t) + 0,122349$ |
|           | 3    | $MR = 0,889757 \exp(-0,000556t) + 0,088070$ |
| 0,2       | 2,4  | $MR = 0,951105 \exp(-0,000419t) + 0,027442$ |
|           | 3,2  | $MR = 0,945365 \exp(-0,000402t) + 0,053380$ |
| 0,3       | 2,5  | $MR = 1,276390 \exp(-0,000149t) - 0,301481$ |
|           | 3,2  | $MR = 0,982607 \exp(-0,000282t) - 0,006623$ |

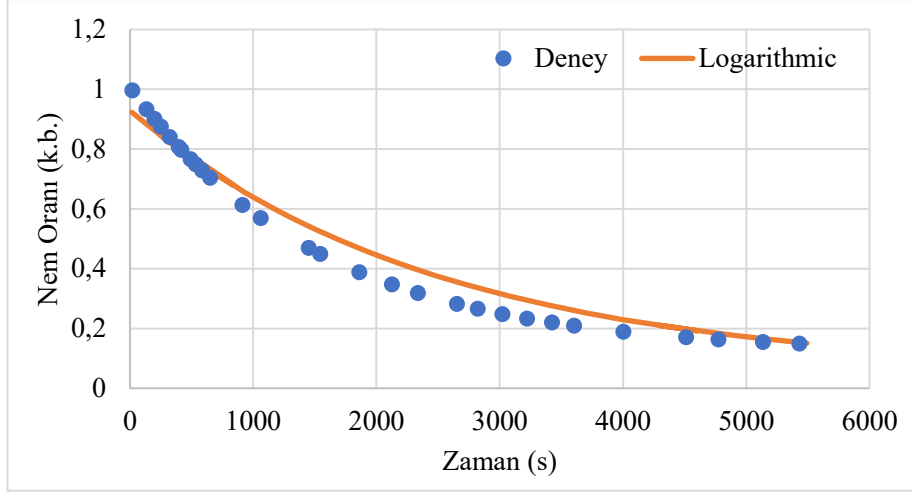
Yukarıdaki ifadelerden elde edilen kuruma verileri kullanılarak Şekil 6.4 ile Şekil 6.10 arasında verilen şekillerde “Logarithmic” modelin her durum için oluşturduğu kuruma eğrileri çıkarılmış ve deney sonuçları ile birlikte verilmiştir.



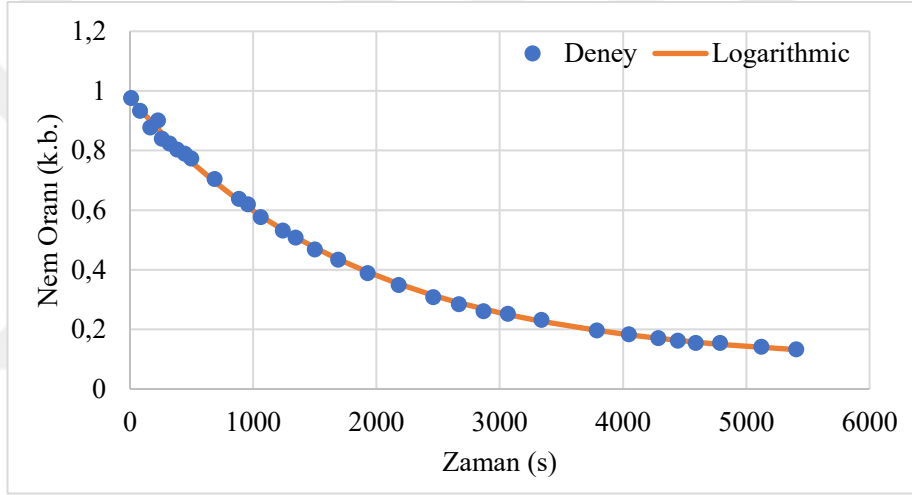
**Şekil 6.4 :** H= 0,1 m ve V= 1,88 m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.

**Tablo 6.11 :** Regresyon çalışması sonucunda tüm modeller için elde edilen  $R^2$  ve SSE değerleri.

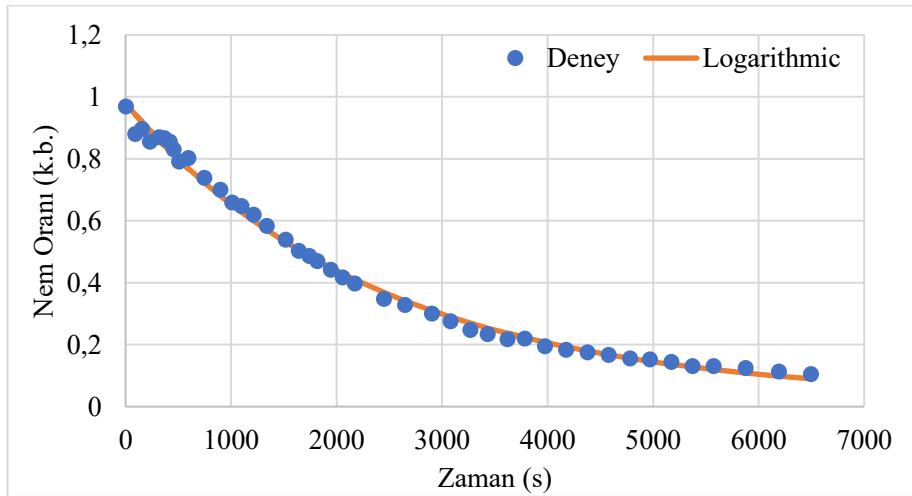
| Model                      | H= 0,1 m   |       |           |       |           |       | H= 0,2 m  |       |           |       | H= 0,3 m  |       |           |       |
|----------------------------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                            | V=1,88 m/s |       | V=2,3 m/s |       | V=3,0 m/s |       | V=2,4 m/s |       | V=3,2 m/s |       | V=2,5 m/s |       | V=3,2 m/s |       |
|                            | $R^2$      | SSE   | $R^2$     | SSE   | $R^2$     | SSE   | $R^2$     | SSE   | $R^2$     | SSE   | $R^2$     | SSE   | $R^2$     | SSE   |
| Newton                     | 0,980      | 0,078 | 0,992     | 0,035 | 0,997     | 0,028 | 0,996     | 0,019 | 0,997     | 0,013 | 0,982     | 0,045 | 0,997     | 0,010 |
| Page                       | 0,976      | 0,046 | 0,992     | 0,018 | 0,997     | 0,006 | 0,995     | 0,019 | 0,997     | 0,010 | 0,990     | 0,028 | 0,997     | 0,009 |
| Henderson & Pabis          | 0,979      | 0,039 | 0,989     | 0,028 | 0,995     | 0,014 | 0,995     | 0,016 | 0,997     | 0,011 | 0,982     | 0,044 | 0,997     | 0,007 |
| Logarithmic                | 0,980      | 0,037 | 0,998     | 0,005 | 0,999     | 0,002 | 0,996     | 0,014 | 0,998     | 0,007 | 0,988     | 0,029 | 0,997     | 0,007 |
| Two-Term                   | 0,979      | 0,039 | 0,989     | 0,028 | 0,995     | 0,014 | 0,995     | 0,016 | 0,997     | 0,011 | 0,982     | 0,044 | 0,997     | 0,007 |
| Two-Term                   | 0,979      | 0,047 | 0,989     | 0,027 | 0,998     | 0,006 | 0,995     | 0,017 | 0,997     | 0,012 | 0,982     | 0,046 | 0,997     | 0,008 |
| Exponential                | 0,983      | 0,032 | 0,989     | 0,028 | 0,995     | 0,013 | 0,995     | 0,017 | 0,997     | 0,012 | 0,982     | 0,043 | 0,997     | 0,008 |
| Diffusion Approach         | 0,983      | 0,032 | 0,998     | 0,004 | 0,999     | 0,004 | 0,995     | 0,016 | 0,997     | 0,012 | 0,990     | 0,026 | 0,997     | 0,008 |
| Verma                      | 0,979      | 0,039 | 0,989     | 0,028 | 0,995     | 0,014 | 0,995     | 0,016 | 0,997     | 0,011 | 0,982     | 0,044 | 0,997     | 0,007 |
| Modified Henderson & Pabis | 0,904      | 0,177 | 0,868     | 0,306 | 0,892     | 0,269 | 0,896     | 0,351 | 0,907     | 0,312 | 0,964     | 0,086 | 0,932     | 0,187 |
| Midilli                    |            |       |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |



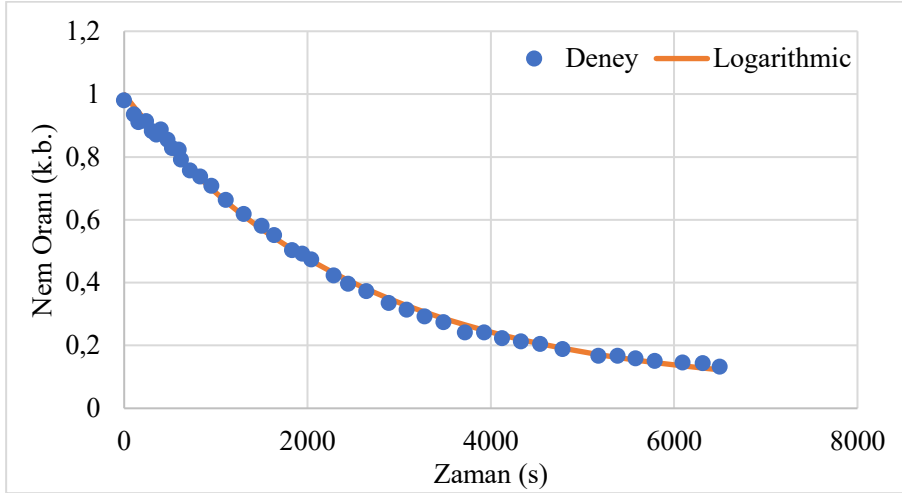
Şekil 6.5 :  $H=0,1$  m ve  $V=2,3$  m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.



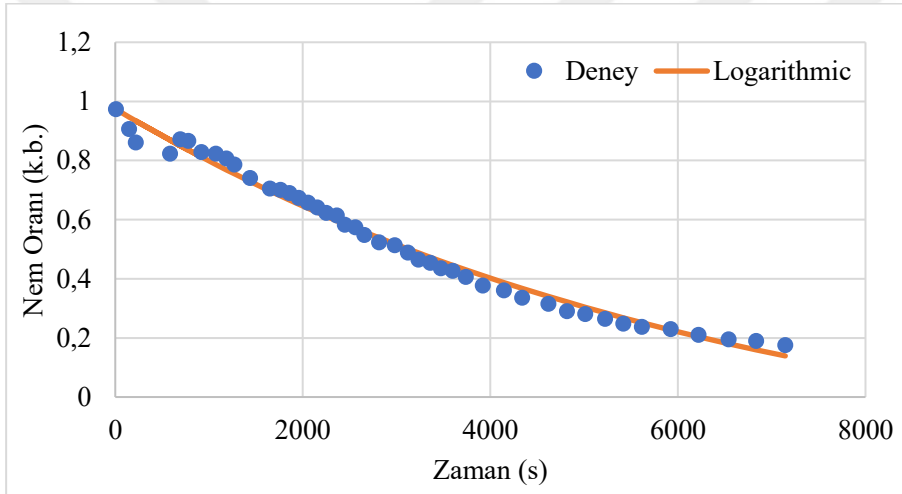
Şekil 6.6 :  $H=0,1$  m ve  $V=3$  m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.



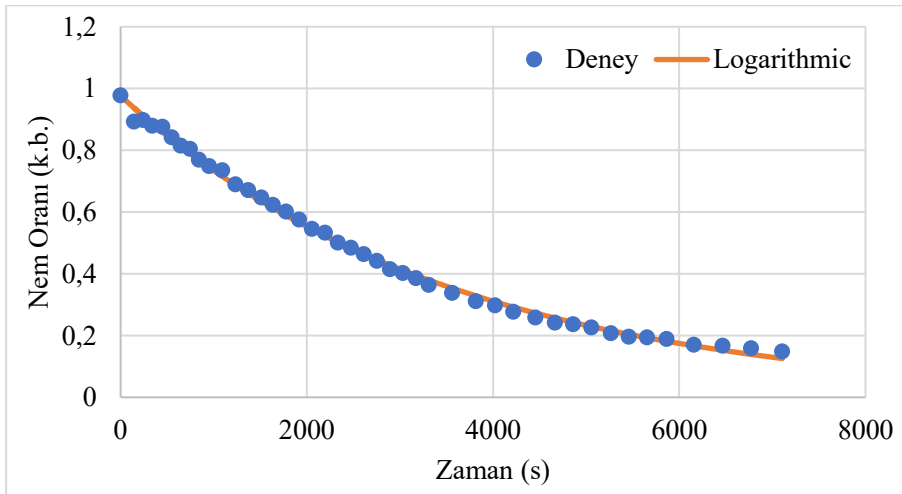
Şekil 6.7 :  $H=0,2$  m ve  $V=2,4$  m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.



**Şekil 6.8 :**  $H= 0,2$  m ve  $V= 3,2$  m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.



**Şekil 6.9 :**  $H= 0,3$  m ve  $V= 2,5$  m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.



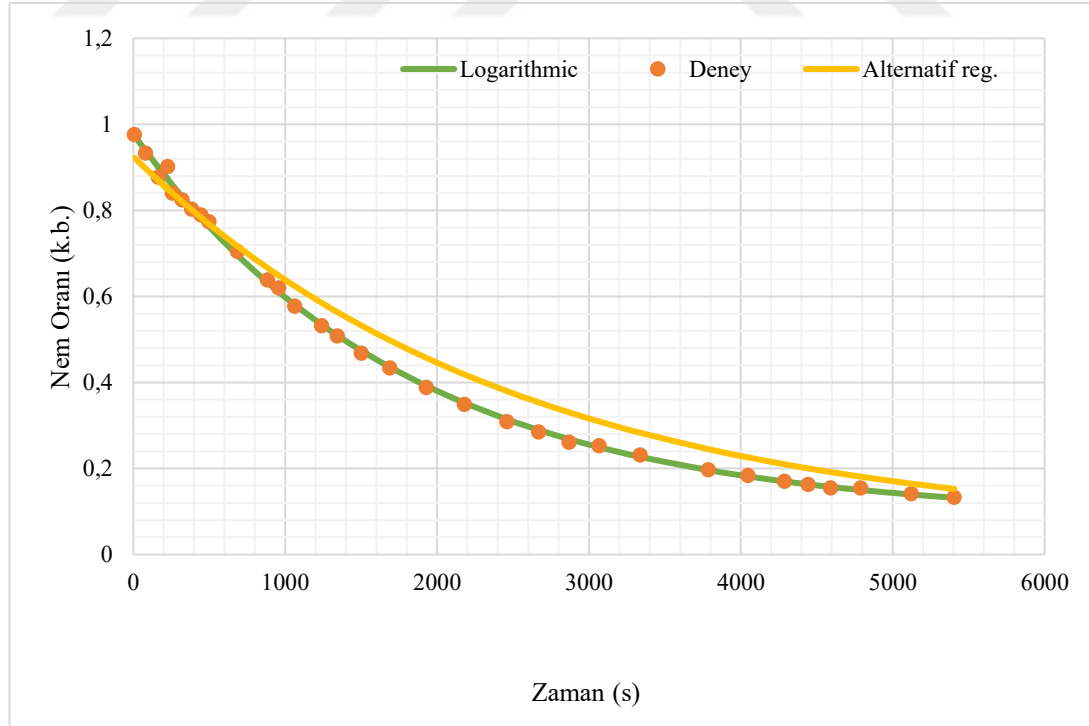
**Şekil 6.10 :**  $H= 0,3$  m ve  $V= 3,2$  m/s için deneysel ve “Logarithmic” model kuruma eğrileri.

Seçilen “Logarithmic” model için her bir akışkan yatak yüksekliğindeki tüm hızlar için yapılan deneylerin sonuçlarını kullanarak global bir kuruma eğrisini verebilecek ortak ve tek bir matematiksel ifade için bir çalışma yapılmıştır. Önceki regresyon çalışmasına benzer şekilde deneysel çalışmadan alınan veriler önce her bir yatak yüksekliği için tek bir matematiksel ifade oluşturunak şekilde tekrar çözülmüştür. Tablo 6.12’de “Logarithmic” model için kurutma sabitleri ile bu sabitleri veren istatistiksel veriler verilmiştir.

**Tablo 6.12 :** Alternatif regresyon çalışması sonuçları.

| Yükseklik | a        | k        | c        | $R^2$    | SSE      |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,1       | 0,000397 | 0,875016 | 0,050128 | 0,980901 | 0,034783 |
| 0,2       | 0,000399 | 0,976785 | 0        | 0,993374 | 0,011686 |
| 0,3       | 0,000228 | 1,000612 | 0        | 0,969862 | 0,038347 |

Tablo 6.12’deki veriler ile Tablo 6.11’deki veriler karşılaştırıldığında  $R^2$  değerlerinin tüm durumlara göre azaldığı görülmektedir. Bu da gerçek kuruma eğrisi ile Tablo 6.12’deki verilerden elde edilen kuruma eğrisi arasındaki farkın artacağı anlamına gelmektedir.



**Şekil 6.11 :** H= 0,1 m ve V= 3 m/s için alternatif regresyondan elde edilen kuruma eğrisi karşılaştırması.

Şekil 6.11’de yatak yüksekliğinin 0,1 m ve akışkan hızının 3 m/s olduğu durum için gerçek kuruma eğrisi, ilk regresyon çalışmasından ve alternatif regresyon çalışmasından elde edilen kuruma eğrisi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde gerçek kuruma eğrisi ve alternatif olarak sadece yüksekliğin değişken olarak tutulduğu regresyon çalışması ile elde edilen eğri arasında oldukça fazla bir fark oluşmaktadır.

Tezin bu kısmından elde edilen matematiksel ifadeler, tezin ikinci kısmını oluşturan hesaplamalı akış dinamiği analizlerinde yoğunluğun zamana bağlı değişiminin akış hidrodinamiğine eklenmesinde kullanılmıştır.

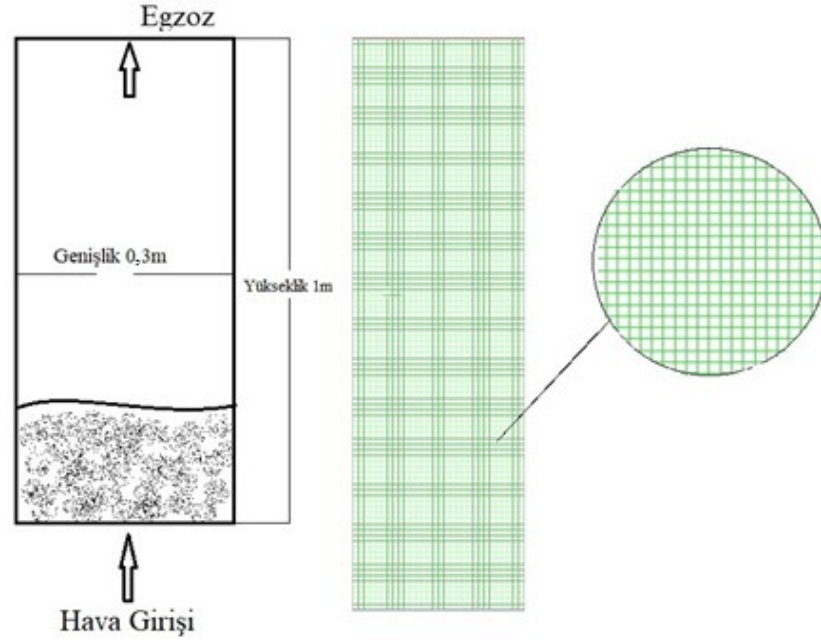
## **6.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları**

Tezin bu bölümünde deneysel çalışmada kullanılan akışkan yataktaki akış hidrodinamiği incelenmiştir. Bir önceki bölümde regresyon analizinden elde edilen matematiksel ifadeler akışkan yatak kurutucunun sonlu hacimler yöntemi ile modellenmesi ve modele etki eden bazı parametrelerin incelenmesi amaçlanmıştır.

İlk aşamada, tüm HAD simülasyonlarının ilk adımı olan geometrik modelleme yapılmıştır. Deney düzeneğinin geometrik ölçüleri kullanılarak akışkan yatak birebir olarak ANSYS Fluent (versiyon 18.2) programının SpaceClaim modülü üzerinde modellenmiştir. 2 boyutlu ve 3 boyutlu olmak üzere toplamda 2 farklı geometri oluşturulmuştur.

İkinci aşamada, simülasyonun yapılabilmesi için gerekli olan mesh oluşturulmuştur. Mesh oluşturma işlemi 2 veya 3 boyutlu bir modelin parçalara veya elemanlara bölünmesi olarak adlandırılabilir. Burada amaç modelin başlangıç ve sınır şartlarını her bir elemana uygulayarak modelin çözülmesi esnasında kullanılan diferansiyel denklemin çözülmesini sağlamaktır. Bu nedenle sonlu hacimler yöntemi ile elde edilecek sonuçların doğruluğu mesh ile oluşturulan elemanların tipi, kalitesi ve sayısı ile doğrudan bağlantılıdır. Öte yandan eleman sayısının arttırılması problemin çözümü için gereken süreyi arttırmaktadır.

Bu aşamada geometri 0,01 m boyutlarında elemanlara ayrılmıştır. 2 boyutlu model toplamda 3.000 eleman, 3 boyutlu model ise toplamda 148.300 eleman içermektedir. Şekil 6.12’de her yatak geometrisi ve mesh detayları verilmiştir.



**Şekil 6.12 :** Mesh (hesap ağı) ve akışkan yatak geometrisi detayları.

Üçünü aşamada, simülasyonda kullanılacak modellerin ve değişkenlerin tanımlanması yapılmıştır. Kuruma işleminde temel fiziksel olay buğdayın içindeki nemin dolayısıyla yoğunluğunun zamanla azalmasıdır. Bu çalışmada fiziksel olay modellenmek yerine, regresyon çalışmasından elde edilen nem değişimini ifade eden matematiksel modeller aşağıdaki ifade kullanılarak yoğunluğun fonksiyonu olarak düzenlenmiştir.

$$\rho_i = \frac{\rho_0(1 + MR_i)}{1 + MR_0} \quad (6.1)$$

Elde edilen yoğunluk fonksiyonları, Fluent programına uygun makrolar kullanılarak C++ dilinde kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) halinde kodlanmıştır. Yazılan bu kod ile simülasyon esnasında buğdayın yoğunluğu, deneysel kurutma işleminde olduğu gibi zamana bağlı olarak değişecektir. Yazılan kod EK-1’de verilmiştir.

Tanecikler küresel olarak kabul edilmiş ve deneysel çalışmada kabul edilen tanecik şekli için verilen ortalama tane ölçüleri üzerinden hacim hesaplanmış ve eşdeğer hacimdeki kürenin çapı yaklaşık 0,004 m olarak belirlenmiştir. Fluent kodu girdi verisinde ikinci fazın tanecikli olduğu belirtilerek tane çapı 0,004 m olarak girilmiştir.

Tablo 6.13’de simülasyonda her çalışma için ortak olarak kullanılan parametreler listelenmiştir. Tablodan da görülebileceği gibi haşlanmış buğdaylar tanecikli yapıda olduğundan yatak içerisinde oluşturduğu akışı modellemek için Eulerian-Eulerian çok fazlı akış modeli seçilmiş ve faz sayısı 2 olarak girilmiştir.

**Tablo 6.13 : HAD modelinin parametreleri.**

| Parametre                                     | Değer       |
|-----------------------------------------------|-------------|
| Akış Modeli                                   | Euler-Euler |
| Tane Çapı (m)                                 | 0,004       |
| Başlangıç Tane Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) | 1300        |
| Gaz Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )            | 1,225       |
| Gaz Giriş Hızı (m/s)                          | 3           |
| Başlangıç Yatak Yüksekliği (m)                | 0,1         |
| Gaz Giriş Sıcaklığı (K)                       | 294         |
| Tane Sıcaklığı (K)                            | 294         |
| Başlangıç Nem Oranı (kuru bazda)              | % 98        |
| Tane Yüzeyi                                   | Küresel     |
| Yatak Çapı (m)                                | 0,3         |
| Yatak Yüksekliği (m)                          | 1,0         |
| Restitüsyon Katsayısı                         | 0,9         |
| Hacimsel Oran                                 | 0,55        |

Analizi yapılacak olan sistem, tam akışkanlaşmış yatak olduğundan buna uygun Reynolds sayısı denklem 6.2 kullanılarak 298 K sıcaklıktaki havanın özellikleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \quad (6.2)$$

$$Re = \frac{0,004(m)1,88(m/s)1,177(kg/m^3)}{0,00001846(kg/ms)} = 479,5$$

Literatürde [32] katı-gaz tipi tam akışkanlaşmış akışkan yatak sistemler için “laminar” akış için Reynolds sayısının maksimum 10, “türbülanslı” akış için Reynolds sayısının 2000’den büyük olması gerekmektedir. Bu iki limit arasında kalan akış ise “geçiş rejimi” olarak ifade edilmektedir. Yukarıda hesaplanan Reynolds sayısı değeri tez çalışması için seçilen deney düzeneğinde akışın geçişli rejim bölgesinde olduğunu göstermektedir. Simülasyonların girdi verisinde hangi akış modelinin (laminar veya türbülans) seçileceğinin belirlenmesi amacıyla deneme simülasyonları yapılmış ve

laminar modelin seçilmesi durumunda yakınsama sorunlarının baş gösterdiği ve simülasyon süresinin arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte literatürde yapılan çalışmalarda simülasyonlarda akışın laminar veya türbülanslı seçilmesinin önemli farklar oluşturmadığı belirtilmiştir [33]. Bu nedenle tez kapsamında yapılan simülasyonlarda akış k-ε tipi türbülanslı olarak programa girilmiştir.

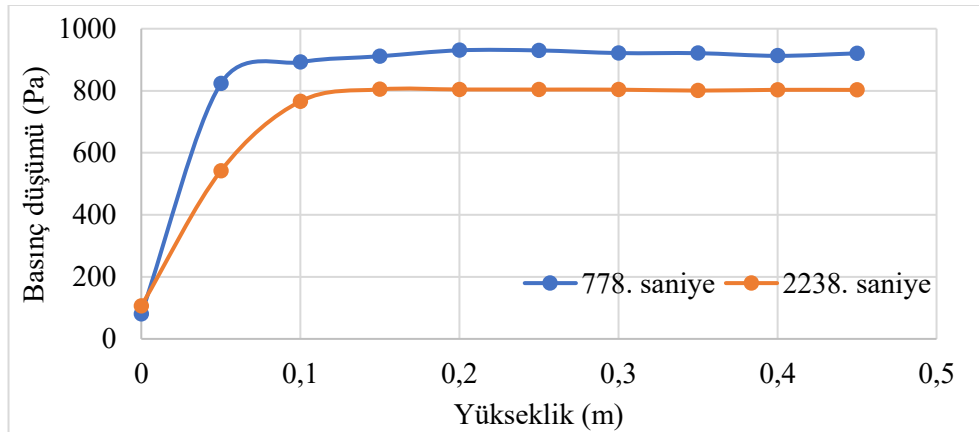
Sürüklenme katsayısının (drag coefficient) akışkanlaşma üzerindeki etkisini gözlemek amacı ile gaz-katı sistemlerde kullanılan Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modelleri karşılaştırma yapmak amacıyla seçilmiştir.

Buğday tanelerinin akışkanlaşma esnasında özellikle başlangıç halinde nem oranı yüksek olduğundan taneciklerin birbiri ile ve hazne duvarları ile yapacağı çarpışmaların etkisini gözlemek adına çarpışmaların etkisini ifade eden esneklik katsayısı (restitution coefficient) sırasıyla 0,9 ve 0,6 olarak farklı simülasyonlarda denenmiştir.

### 6.2.1 Deneysel çalışmadan alınan basınç düşümü eğrisi

Deneysel çalışmada deneyin 778. ve 2238. saniyelerinde anlık olarak yatak boyunca ölçülmüş basınç düşümü grafiği verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla kullanılmak üzere aynı grafik Şekil 6.13'de gösterilmiştir.

Grafiğe göre 778. saniyede basınç düşümü 0,2 m yatak yüksekliğine kadar devam etmiş ve toplamda 910-920 Pa kadar basınç düşümü olmuştur. 2238. saniyede ise basınç düşümü 0,15-0,16 m yüksekliğe kadar artmaya devam etmiş ve buradan sonra yaklaşık 800 Pa seviyesinde sabit kalmıştır.



**Şekil 6.13 :** Deneysel çalışmada yatak boyunca 778. ve 2238. saniyedeki basınç düşümü.

Grafikte görüldüğü üzere basınç düşümü yatağın en alt kısmında yaklaşık 100 Pa olarak ölçülmüştür. Genel olarak basınç düşümü yatak girişi ile ölçüm yapılan nokta arasındaki fark alınarak hesaplanır. Bu nedenle basınç düşümü grafiklerinin sıfırdan başlaması beklenmektedir. Deneysel alışmada basınç düşümünün ölçüm detayları verilmediğinden grafik aynen bu çalışmaya aktarılmıştır.

### 6.2.2 Sürüklenme modelinin matematiksel ifadesi

Buğdayın akışkan yatak kurutucuda sonlu hacimler yöntemi ile hidrodinamik olarak modellenmesi yapılırken genel kütle ve momentum korunumu denklemlerinden faydalanılmıştır. Kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir.

Kütlenin korunumu [34]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{sg} - \dot{m}_{gs}) + Sq \quad (6.3)$$

Burada  $\vec{v}_g$  gaz fazının hızını,  $\dot{m}_{sg}$  katı fazından sıvı fazına olan kütle geçişini,  $\dot{m}_{gs}$  sıvı fazından katı fazına olan kütle geçişini ifade etmektedir.

Tez kapsamında yapılan simülasyonlarda fazlar arasında herhangi bir kütle geçişi olmadığından bu kısım tamamlayıcı olması amacıyla eklenmiştir.

Momentumun korunumu [34]:

Gaz fazı için

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} - K_{gs}(\vec{v}_s - \vec{v}_g) \quad (6.4)$$

Burada;

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) - \frac{2}{3} \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g) \bar{I} \quad (6.5)$$

Katı fazı için

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} - K_{sg}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (6.6)$$

Burada;

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) - \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \vec{v}_s \bar{I} \quad (6.7)$$

$$\lambda_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 \rho_{0,ss} \theta_s \quad (6.8)$$

$$\mu_s = \frac{4}{5} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (2e_{ss} - 1) \alpha_s \rho_{0,ss} \right] \quad (6.9)$$

Katı ve gaz fazları arasındaki etkileşim, akışkan yatağın hidrodinamik davranışları üzerinde oldukça önemli etkilere sahiptir. Eulerian-Eulerian tipi modelde katı ile gaz fazı arasındaki etkileşim sürüklenme kuvveti tarafından sağlanır. Bu çalışmada katı-gaz sistemler için kullanılan Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu teorileri aynı model üzerinde kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu teoriler ile sürüklenme katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

**Syamlal-O'Brien modeli** [34]:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{v_{r,s}^2 d_s} C_d \left( \frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (6.10)$$

Burada  $v_{r,s}$  katı fazı için terminal hızdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$v_{r,s} = 0,5(a - 0,06 Re_s + \sqrt{(0,06 Re_s)^2 + 0,12 Re_s (2B - A) + A^2}) \quad (6.11)$$

Burada;

$$A = \alpha_g^{4,14}$$

$$B = \begin{cases} \alpha_g \leq 0,85 \text{ için } 0,8 \alpha_g^{1,28} \\ \alpha_g > 0,85 \text{ için } 0,8 \alpha_g^{2,65} \end{cases} \quad (6.12)$$

**Wen&Yu modeli** [34]:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} C_d \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2,65} \quad (6.13)$$

Burada:

$$C_d = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[ 1 + 0,15 (\alpha_g Re_s)^{0,687} \right] \quad (6.14)$$

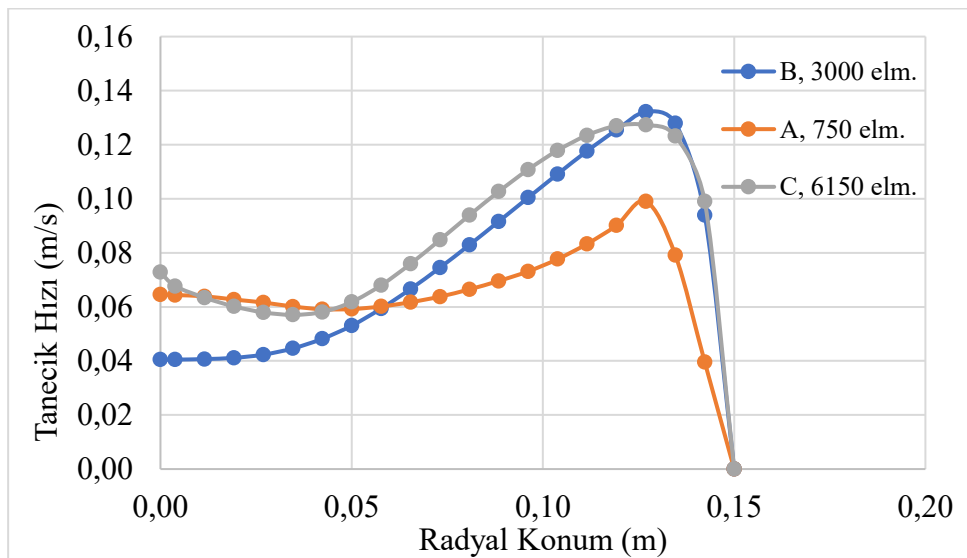
şeklinde ifade edilir.

### 6.2.3 Mesh (hesap ağı) bağımsızlık testi

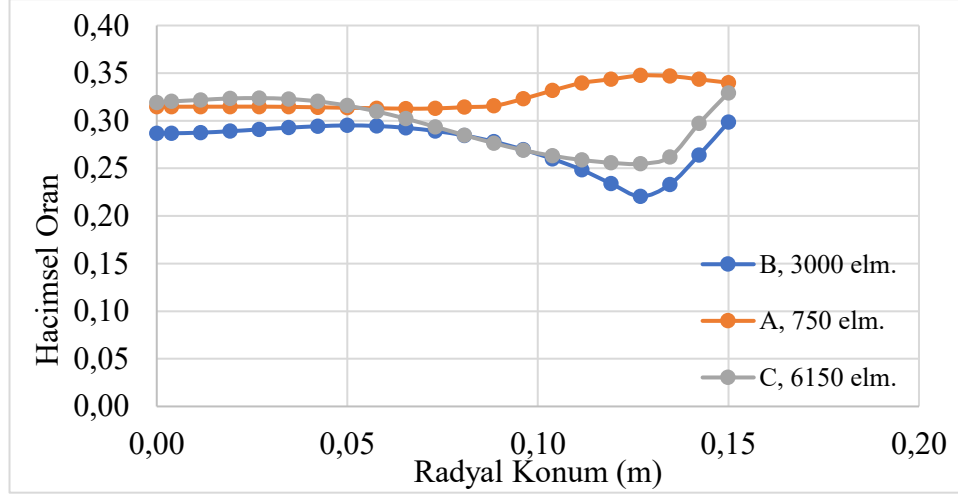
Bu bölümde, sonlu hacimler yöntemi ile elde edilen sonuçların veya hesaplanan değerlerin oluşturulan mesh boyutlarıyla olan bağlantısını incelemek ve çözümü seçilen mesh ağından bağımsız hale getirmek adına çalışma yapılmıştır. Bu amaçla sabit yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 3m/s gaz hızı, 0,1 m yatak yüksekliği ve 0,9 restitüsyon katsayısı durumu seçilmiştir.

Yapılan çalışmada, 2 boyutlu akışkan yatak geometrisi için 3 farklı mesh oluşturularak 30 saniyelik simülasyonlar yapılmıştır. A tipi hesap ağında (mesh) geometri 0,02 m'lik boyutlara sahip 750 parçaya, B tipinde geometri ölçüsü 0,01 m boyutlarında 3000 parçaya ve C tipinde ise geometri 0,007 m'lik boyutlardaki 6150 parçaya bölünerek hesaplamalar yapılmıştır.

Şekil 6.14'de katının 0,05 m yükseklikteki sahip olduğu ortalama hızın A, B ve C tipi mesh için dağılımı gösterilmiştir. Benzer şekilde Şekil 6.15'de ise aynı durum için radyal yönde hacimsel oran dağılımı verilmiştir. Grafikler incelendiğinde A tipi mesh B ve C tipi mesh ağına göre daha farklı ve daha uzak bir eğri oluşturmuştur. Bu da A tipindeki eleman büyüklüğünün büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle de akışkan yatağın hidrodinamik davranışlarının incelenmesinde tercih edilmesi uygun olmayacaktır. B ve C tipi meshlerde ise grafikler incelendiğinde oluşan eğrilerin birbirine oldukça benzer fakat yine de aralarında bir küçük miktar fark olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.14 :** 0,05 m yükseklikte tanecik hızının radyal değişimi (15-25 s arası ortalama değerler, sabit yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 3m/s gaz hızı, 0,1 m yatak yüksekliği).



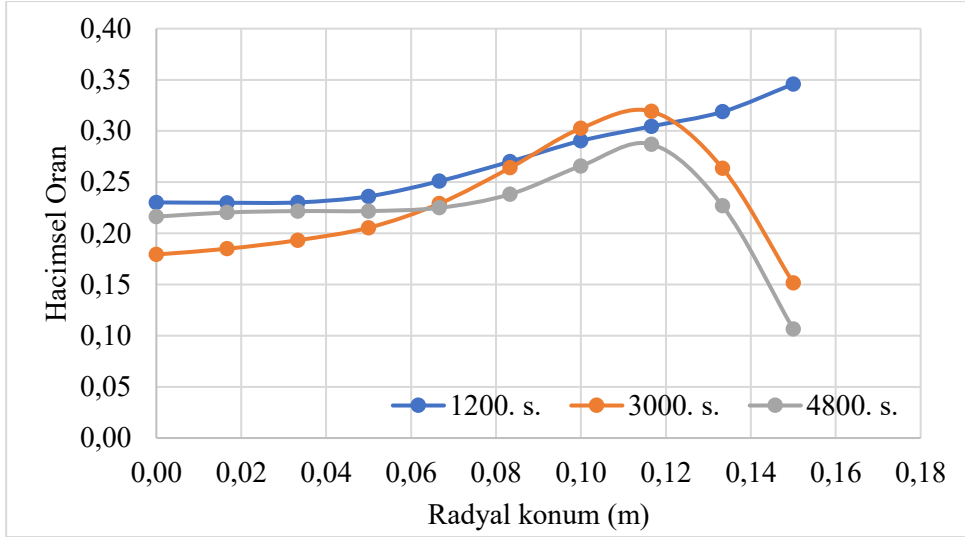
**Şekil 6.15 :** 0,05 m yükseklikte tanecik hacimsel oranının radyal değişimi (15-25 s arası ortalama değerler, sabit yoğunluk ve Syamlal-O'Brien modeli, 3m/s gaz hızı, 0,1 m yatak yüksekliği).

Mesh boyutları küçüldükçe simülasyon için kullanılacak olan sistem gereksinimleri ve simülasyonun çözümü için gereken sürenin de artacağı aşikardır. Bu nedenle bu tezde bu noktadan sonra belirtilen tüm simülasyonlarda 2 boyutta B tipi 3000 elemandan oluşan mesh tercih edilmiştir.

#### 6.2.4 Sabit veya zamanla azalan yoğunluk kullanımının etkisi

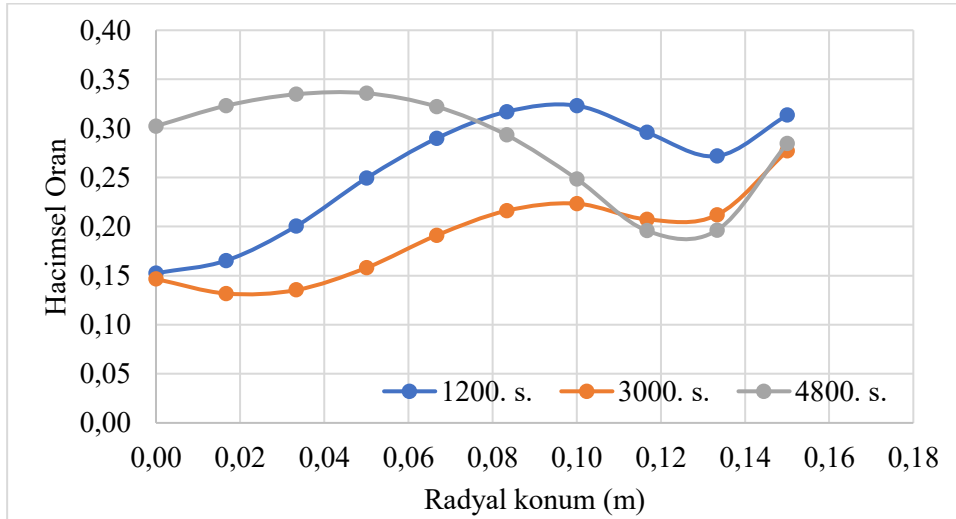
Regresyon çalışması ile buğdayın kuruma esnasında kaybettiği nemin matematiksel ifadesi daha önce elde edilmişti. Buradan yola çıkarak bu matematiksel ifade akışkan yatak kurutucunun simülasyonu yapılırken tane çapı, hacimsel boşluk oranı, başlangıç yoğunluğu, gazın fiziksel özellikleri, gaz hızı, yatak başlangıç yüksekliği ve restitüsyon katsayısı aynı olmak koşulu ile ilk olarak yoğunluğun zamanla değiştiği bir simülasyon yapılmıştır. İkinci olarak ise yoğunluğun sabit  $1300 \text{ kg/m}^3$  olduğu simülasyon yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmında 3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği ve 0,9 restitüsyon katsayısı durumu kullanılmıştır.

Şekil 6.16'de değişken yoğunluk durumu için 0,05 m yükseklikte Şekil 6.17'da ise 0,15 m yükseklikte simülasyonun 1200., 3000. ve 4800. saniyelerindeki radyal yönde katının hacimsel oranının değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.16 incelendiğinde, 1200. saniyede katının hacimsel oranı ortalama 0,27, 3000. saniyede 0,25, 4800. saniyede ise ortalama 0,23 seviyelerindedir. Yoğunluğun azalması ile birlikte tane ağırlığı azalmış ve böylece katı madde yatağın üst kısımlarına doğru hareket etmiştir. Bu nedenle simülasyonun ileriki safhalarında özellikle yatağın uç ve orta kısımlarında katı maddenin konsantrasyonu azalmıştır.



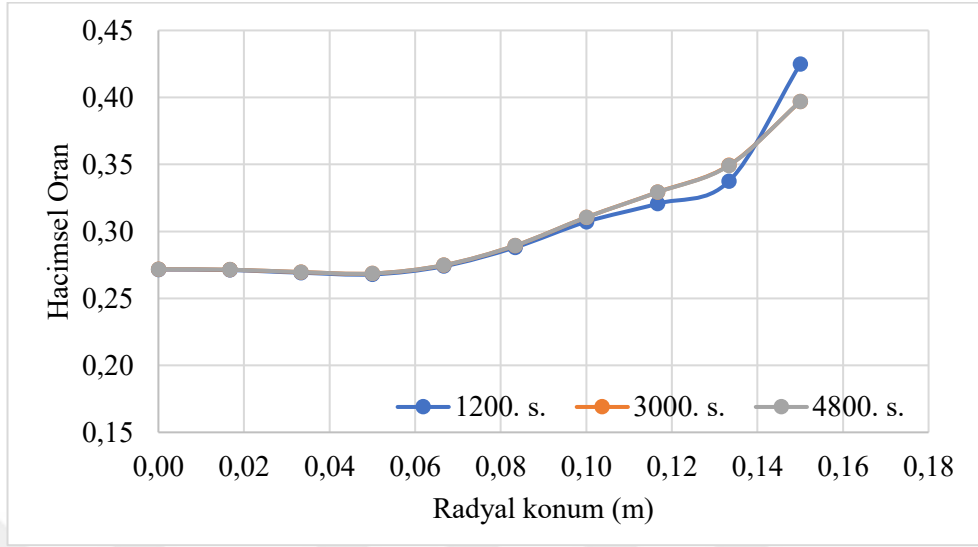
**Şekil 6.16 :** Değişken yoğunluk için 0,05 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.17 incelendiğinde ise 1200. saniyede katının hacimsel oranı ortalama 0,29, 3000. saniyede ortalama 0,2 ve 4800. saniyede ise ortalama 0,3 seviyelerindedir. Yatağın özellikle merkez ve merkeze yakın bölgelerinde katı maddenin konsantrasyonunun zamanla arttığı görülmüştür. Bu durum alt kısımlarda meydana gelen konsantrasyon azalışının bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Gazın taneciklere uyguladığı sürüklenme kuvveti sabit iken katı yoğunluğunun azalmasıyla birlikte ağırlık ile uygulanan kaldırma kuvveti arasındaki fark artmış bu nedenle de hafifleyen tanecikler yatağın daha üst kısımlarına doğru ilerlemiştir.



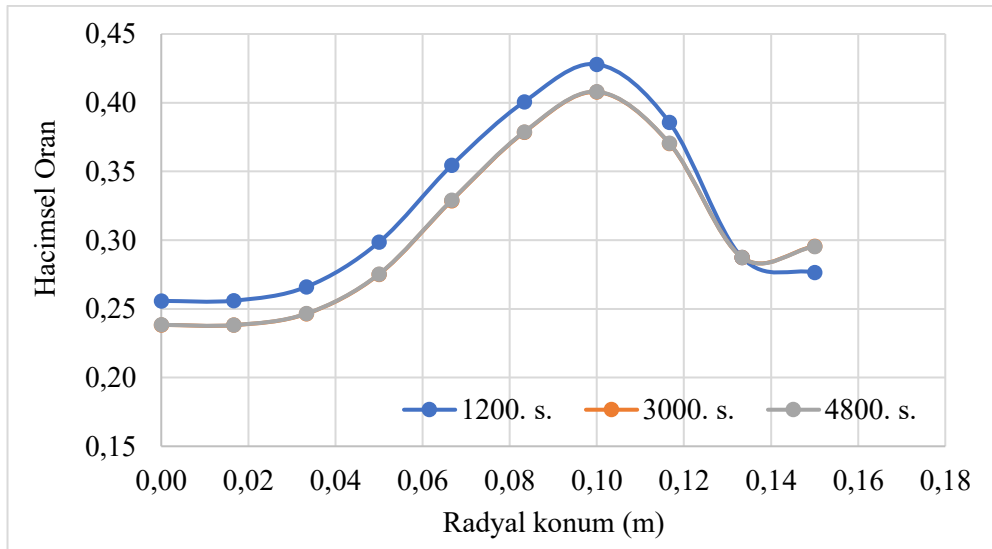
**Şekil 6.17 :** Değişken yoğunluk için 0,15 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da ise sabit yoğunluk olması halinde katının 0,05 m ve 0,15 m yükseklikteki radyal yönde hacimsel oranının değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 6.18 :** Sabit yoğunluk için 0,05 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

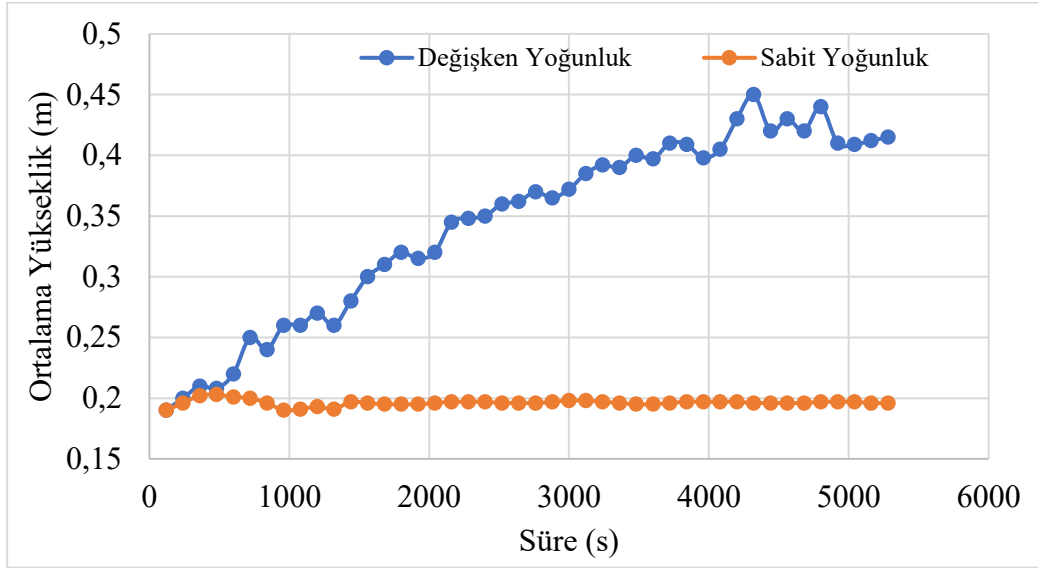
Her iki grafik incelendiğinde katının hacimsel oranı zamanla her iki yükseklikte de sabit kalmıştır. Bunun sebebi ise yoğunluğun sabit kalması ile birlikte tane ağırlığının ve taneciğe sürtünme ile uygulanan toplam kuvvetin sabit kalmasıdır.



**Şekil 6.19 :** Sabit yoğunluk için 0,15 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

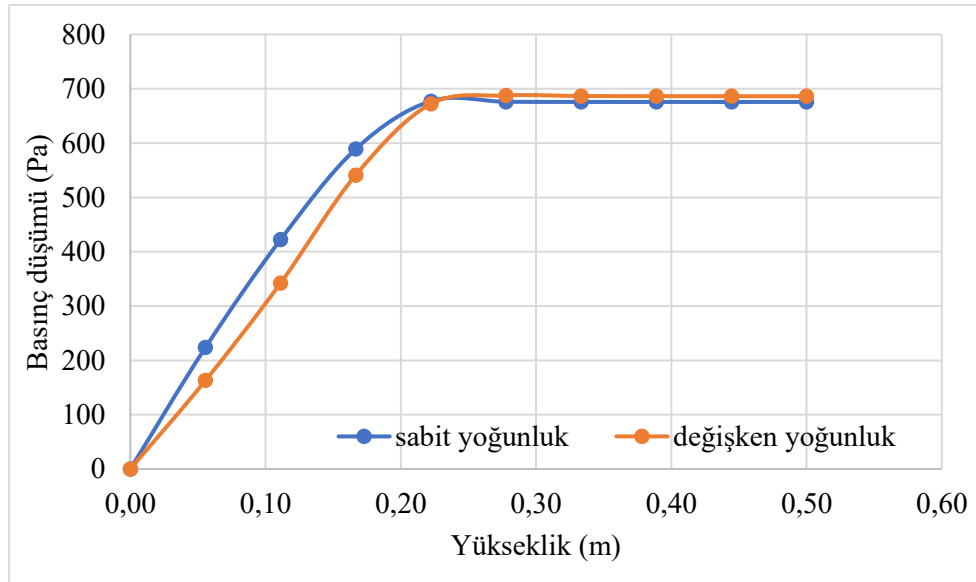
Şekil 6.20’de ortalama yatak yüksekliğinin sabit yoğunluk ve değişken yoğunluk olması durumunda değişimi gösterilmiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere

yoğunluğun azalması ile birlikte tanecikler yatağın üst kısımlarına doğru hareket etmiş bu nedenle de yatak yüksekliği zamanla artmıştır.

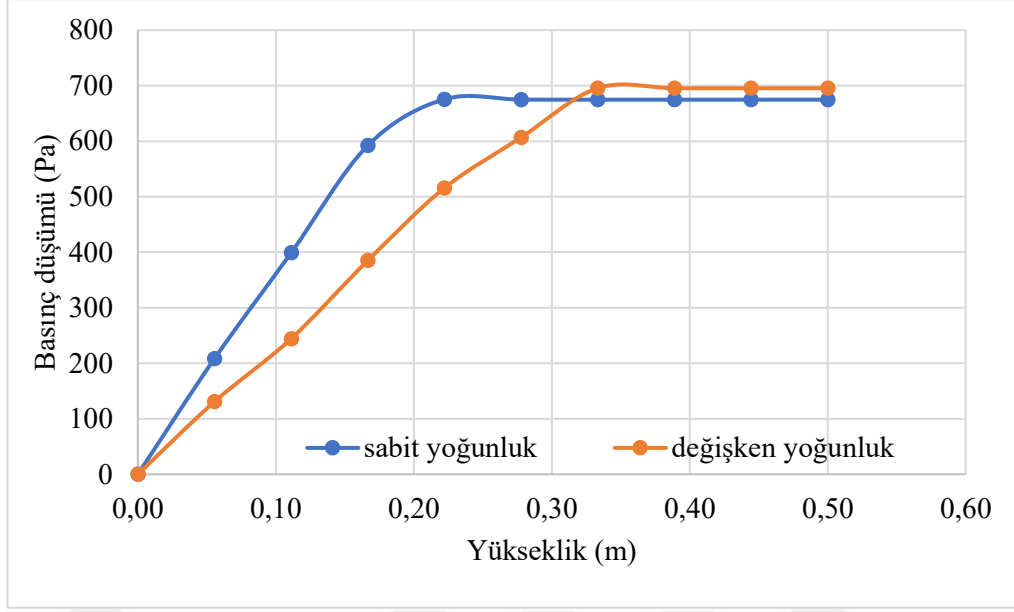


**Şekil 6.20 :** Sabit ve değişken yoğunluk durumlarında yatak yüksekliğinin zamanla değişimi (3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.21'de sabit ve değişken yoğunluk durumları için yapılan simülasyonlara ait 778. saniyedeki, Şekil 6.22'de ise 2238. saniyedeki yatak boyunca olan basınç düşümleri gösterilmiştir.



**Şekil 6.21:** Sabit ve değişken yoğunluk durumlarında 778. saniyede yatak boyunca basınç düşümleri (3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).



**Şekil 6.22:** Sabit ve değişken yoğunluk durumlarında 2238. saniyede yatak boyunca basınç düşümleri (3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Sabit yoğunluk halinde 778. saniyede maksimum basınç düşümü 720 Pa iken 2238. saniyede bu değer 670 Pa seviyelerindedir. Fakat her iki anda da maksimum basınç düşümünün görüldüğü yükseklik 0,22 m'dir. Değişken yoğunluk durumunda ise 778. saniyede görülen maksimum basınç düşümü 660 Pa iken 2238. saniyede 685 Pa'dır. Bununla birlikte maksimum basınç düşümünün görüldüğü yükseklik 0,28 m'den 0,33 m'ye yükselmiştir.

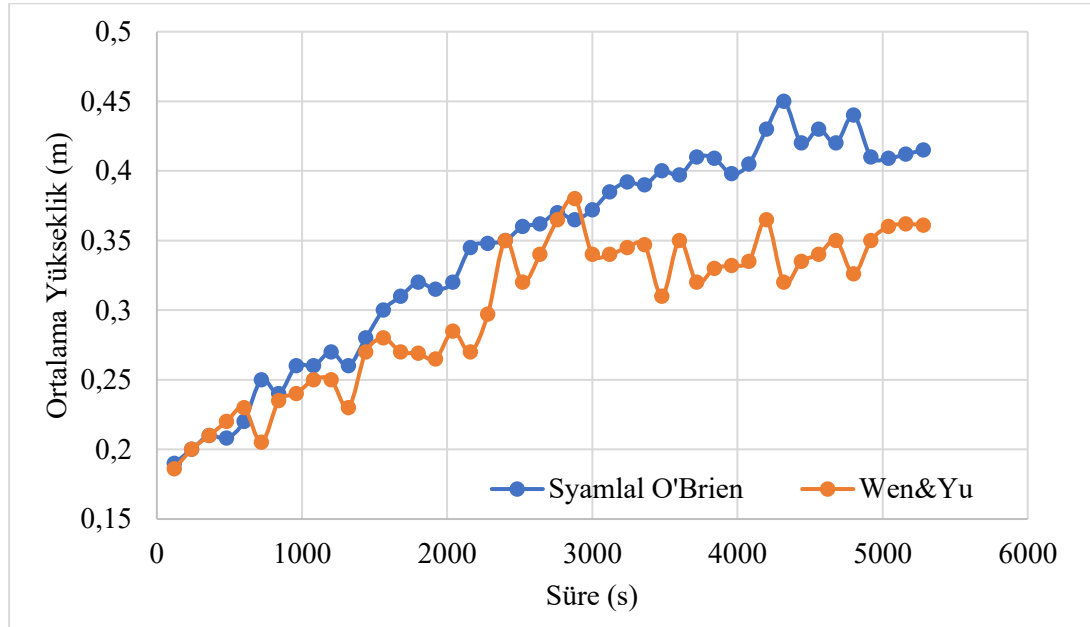
Şekil 6.24'de değişken ve sabit yoğunluk durumları için yapılan simülasyonların 1200, 2040, 3000, 3840 ve 4800. saniyelerine ait katının hacimsel oranının anlık görselleri verilmiştir. Sabit yoğunluk durumunda katının hacimsel oranı alt kısımlarda duvara yakın bölgelerde, üst kısımlarda ise duvar ile merkez arasında kalan bölgede yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu durum simülasyonun her anında benzerlik göstermekte ve maksimum değerler 0,42 ile 0,43 arasında kalmaktadır. Değişken yoğunluk durumunda ise yataktaki katının hacimsel dağılımı heterojen haldedir ve yatak yüksekliği zamanla yoğunluğun azalmasına bağlı olarak artmaktadır.

### 6.2.5 Sürüklenme modelinin etkisi

Katı-gaz tipi akışkan yatak sistemlerde, ANSYS Fluent (versiyon 18.2) katı taneciklerin sürüklenme katsayılarının modellenmesinde akışkan yatakları için Syamlal-O'Brien, Wen&Yu ve Gidaspow olmak üzere toplamda 3 tane model

seçeneği sunmaktadır. Bu modeller, akışkan yatağın hidrodinamik davranışı üzerindeki etkisini gözlemek ve deneysel verilerden elde edilen basınç düşümü verileri üzerinden karşılaştırma yapmak amacıyla bu çalışmada konu edilmiştir. Bu amaçla değişken yoğunluk, 3m/s gaz hızı, 0,1 m yatak yüksekliği ve 0,9 restitüsyon katsayısı durumu seçilmiştir.

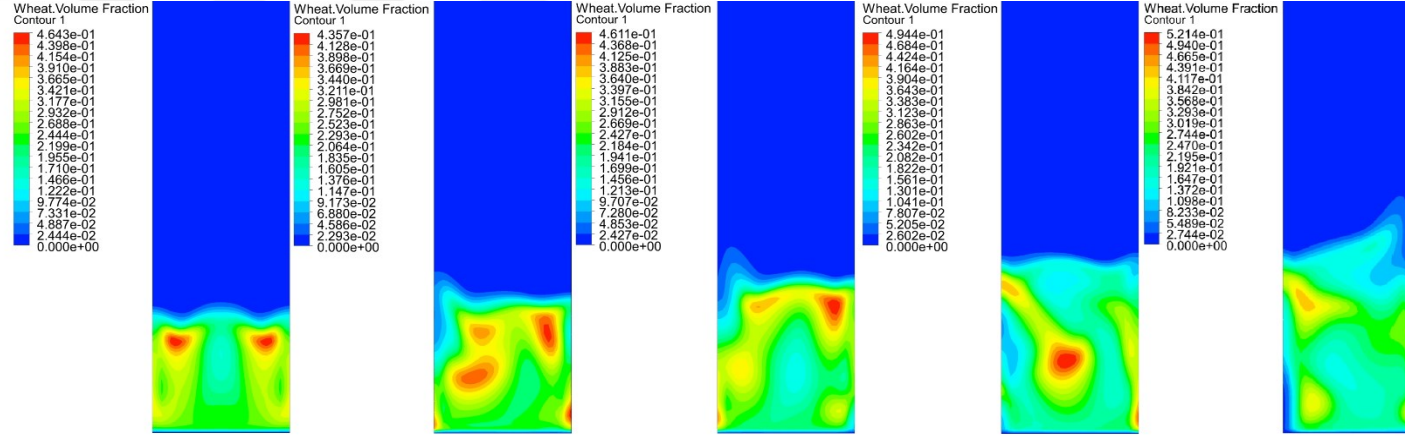
Çalışma kapsamında yukarıda bahsedilen modellerden Gidaspow modeli, yoğun yatak modelleri için kullanılması uygun olduğundan ve deney parametrelerinin normal yatak ile gevşek yatak arasında bir bölgede olduğundan yapılan simülasyon denemelerinde başarılı bir sonuca ulaşılamamıştır. Bu nedenle sonuç kısmına dâhil edilmemiş ve sadece Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modellerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.



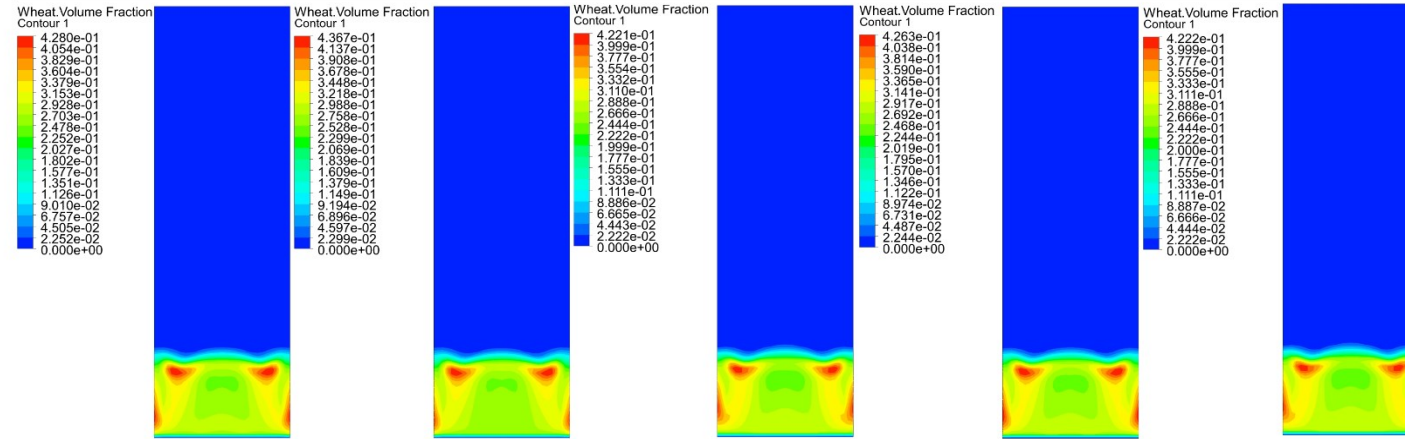
**Şekil 6.23:** Farklı sürüklenme modelleri için yatak yüksekliğinin zamanla değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.23'de yoğunluğun zamanla değiştiği durumda bahsi geçen iki sürüklenme modeli için 5400 saniyelik simülasyon süresinde ortalama yatak yüksekliğinin zamanla değişimi verilmiştir. Yoğunluğun düşmesi ile birlikte her iki modelde de yatak yüksekliğinin arttığı sonucu Şekil 6.24'den çıkarılmaktadır. Ancak 3000 saniye sonrasında Wen&Yu modelinde yatak yüksekliği 0,3 m ile 0,32 m aralığında değişmekle birlikte sabit kalmıştır. Syamlal-O'Brien modelinde ise aynı süreden itibaren artmaya devam etmiş ve maksimum 0,46 m yüksekliğe kadar ulaşmıştır. Simülasyon sonlarına doğru ise 0,4 m'nin üzerinde kalmaya devam etmiştir.

Değişken  
Yoğunluk



Sabit  
Yoğunluk



t= 1200 s.

t=2040 s.

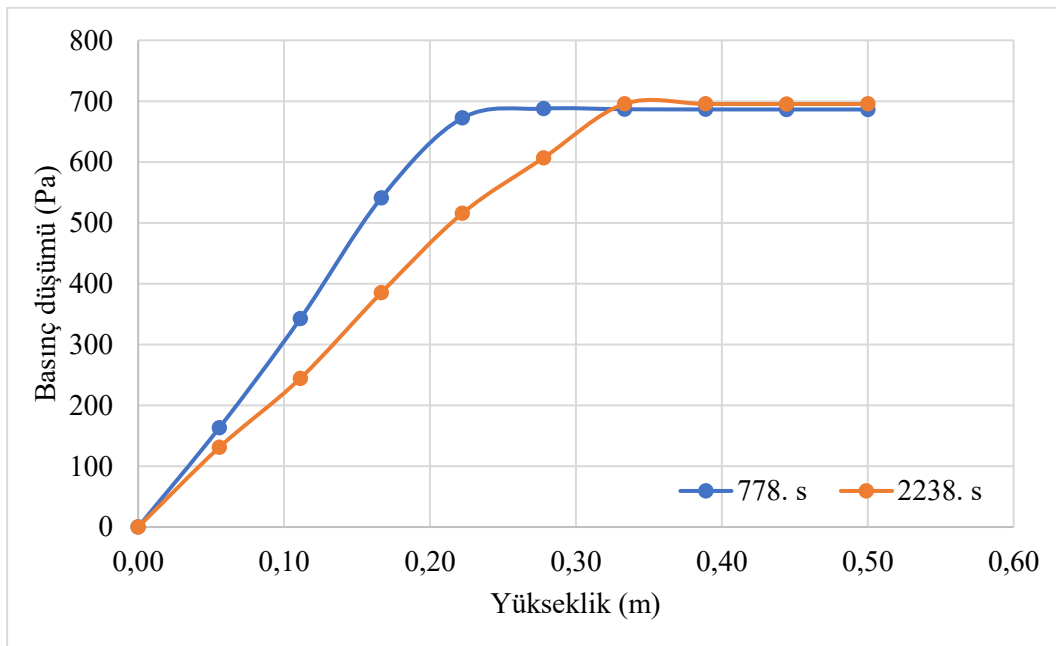
t=3000 s.

t=3840 s.

t=4800 s.

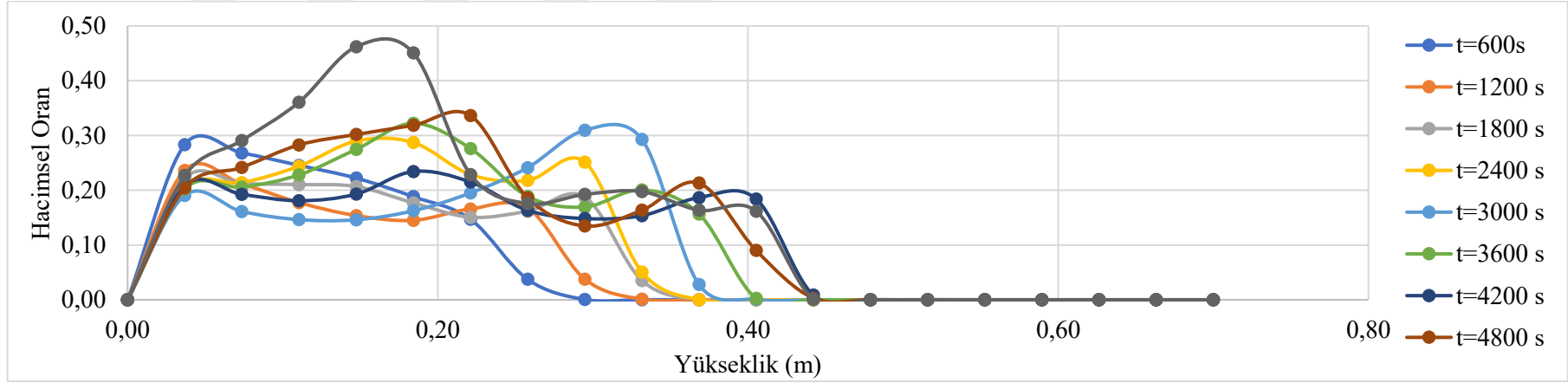
Şekil 6.24: Sabit ve değişken yoğunluk durumlarına ait katının hacimsel oranının anlık görselleri (3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.25’de Syamlal-O’Brien modeli için 778. ve 2238. saniyelerde yatak boyunca anlık basınç düşümü eğrileri verilmiştir. Şekil 6.25 incelendiğinde 778. saniyede basınç düşümü 688 Pa seviyelerine kadar ulaşmıştır. Yatağın alt kısmından itibaren basınç düşümü 0,23 m yüksekliğe kadar devam etmektedir. Toplam basınç düşümü deneysel eğriye göre yaklaşık %34 daha azdır. 2238. saniyede ise toplam basınç düşümü 696 Pa seviyelerinde olup gerçek eğriden %15 oranında daha düşüktür. Ancak basınç düşümü 0,33 m yüksekliğe kadar devam etmiştir. Buradan da görülebileceği üzere ulaşılan yatak yüksekliği deneye göre daha fazladır.

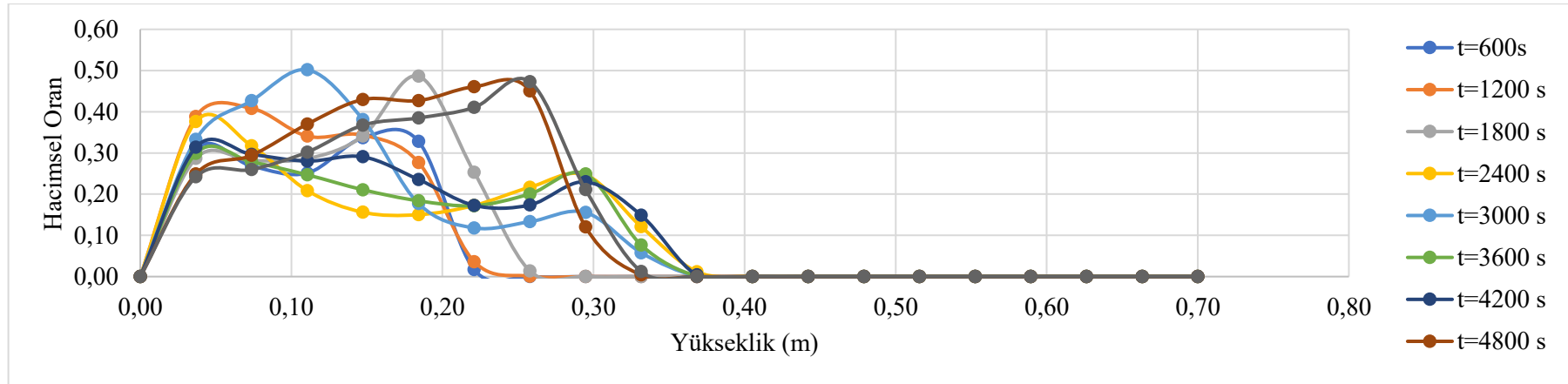


**Şekil 6.25 :** Syamlal-O’Brien modeli için 778. ve 2238. saniyelerde yatak boyunca basınç düşümü (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği).

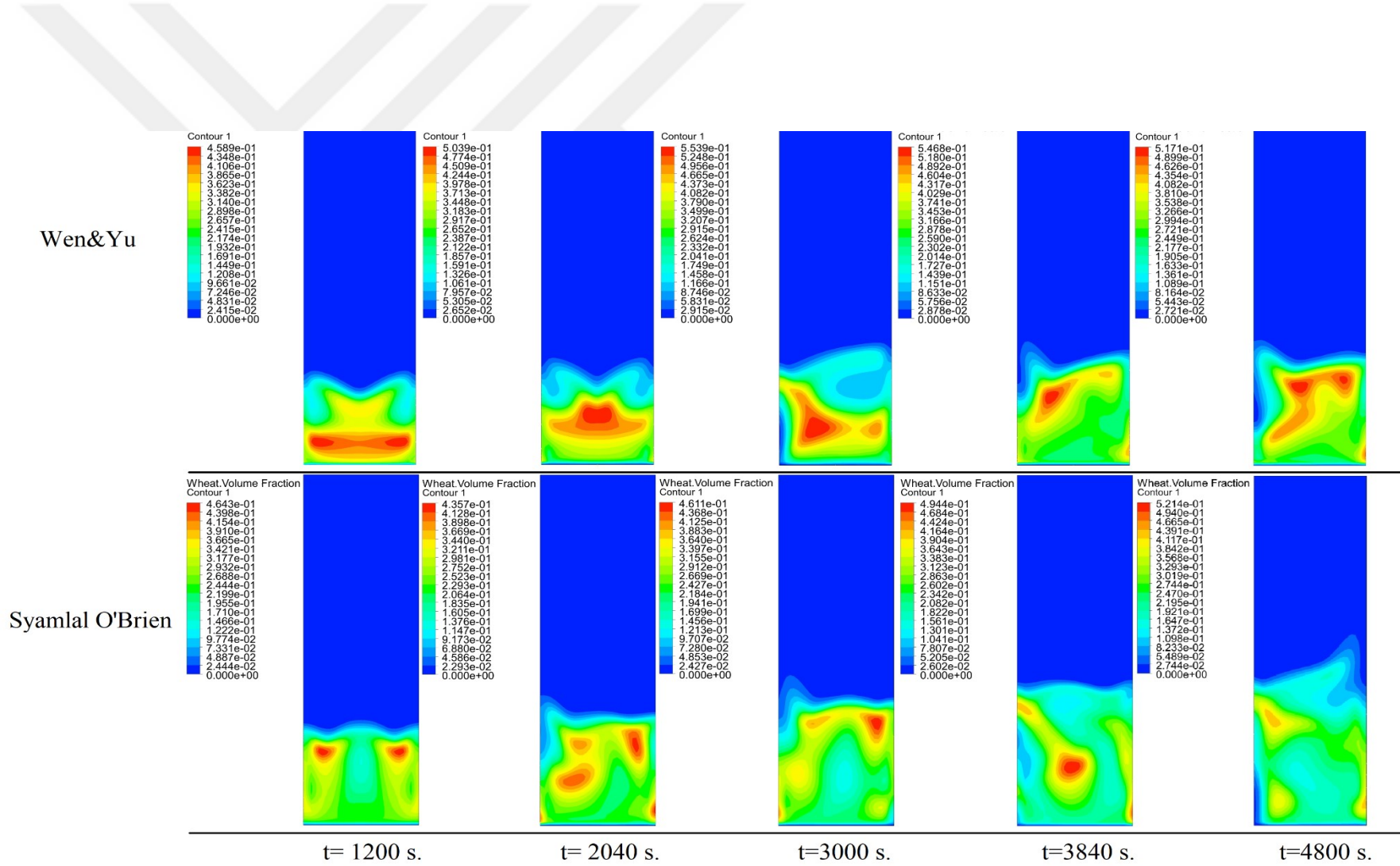
Şekil 6.29’da ise Wen&Yu modeli için 778. ve 2238. saniyelerde yatak boyunca anlık basınç düşümü eğrileri verilmiştir. Şekil 6.29 incelendiğinde 778. saniyede ulaşılan toplam basınç düşümü 955 Pa seviyelerinde kalmış ve bu değer gerçek basınç düşümünden yaklaşık %3,6 daha fazladır. 2238. saniyede ise toplam basınç düşümü 600 Pa seviyelerindedir. Deneysel grafikteki 2238. saniye ile karşılaştırıldığında %34 daha düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte basınç düşümü bu modelde 0,2 m yüksekliğine kadar devam ederken deneyde 0,14 m yüksekten sonra sabit kalmaktadır. 778. saniyede basınç düşümü 0,17 m yüksekliğe devam ederken deneydeki 778. saniyede bu değer 0,18 m seviyelerindedir.



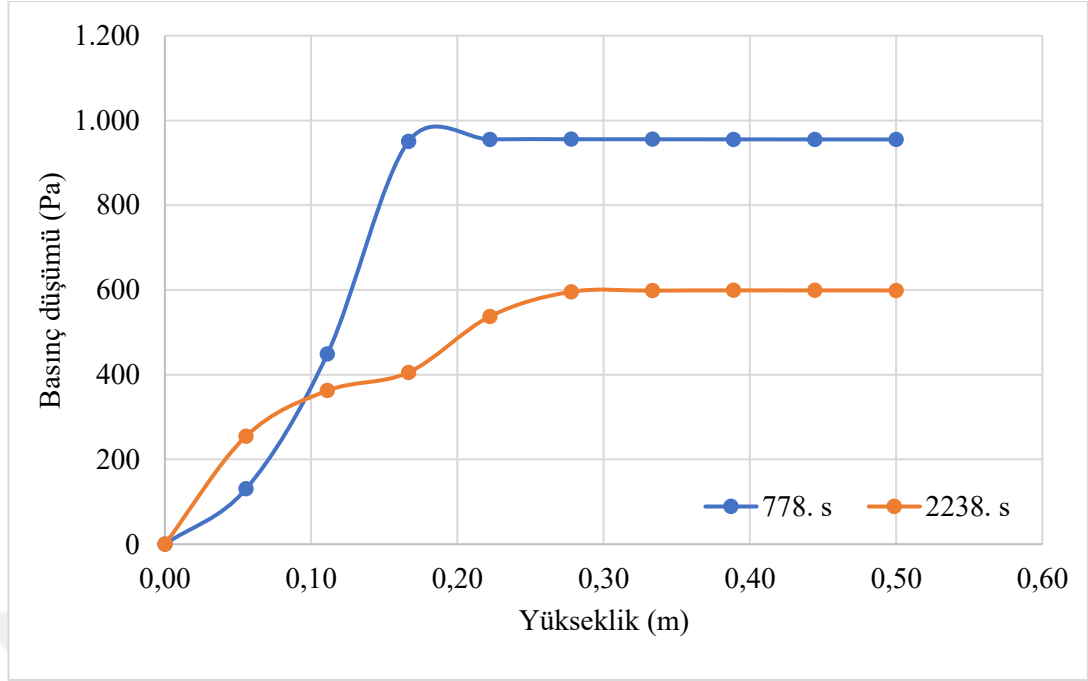
**Şekil 6.26 :** Syamlal-O'Brien modeli için katının aksel yönde zamanla hacimsel değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği).



**Şekil 6.27 :** Wen&Yu modeli için katının aksel yönde zamanla hacimsel değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği).



**Şekil 6.28:** Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modelleri için katının hacimsel oranının anlık görselleri (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği).



**Şekil 6.29 :** Wen&Yu modeli için 778. ve 2238. saniyelerde yatak boyunca basınç düşümü (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.26’da Syamlal-O’Brien modeli ve Şekil 6.27’de ise Wen&Yu modeli için katının hacimsel oranının aksel yönde farklı zamanlara ait değerlerini gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde her iki modelde de zamanla yatağın üst kısımlarındaki katı madde miktarı artmıştır. Syamlal-O’Brien modelinde katının görüldüğü maksimum yükseklik 0,44 m iken Wen&Yu modelinde bu değer 0,37 m seviyelerindedir. Ayrıca Syamlal-O’Brien modelinde eksende yatağın alt ve orta kısımlarında katının hacimsel oranının zamanla değişimi Wen&Yu modeli ile karşılaştırıldığında daha azdır. Buradan katının yatak içerisinde dağılımının Syamlal-O’Brien modelinde daha homojen olduğu söylenebilir. Bu çıkarımlar Şekil 6.28’de her iki modele ait katının hacimsel oranının anlık görüntülerinden de anlaşılmaktadır. Aynı şekilde yatağın zamanla ulaşılan yüksekliğin Syamlal-O’Brien modelinde Wen&Yu modeline göre daha fazla olduğu görülebilir.

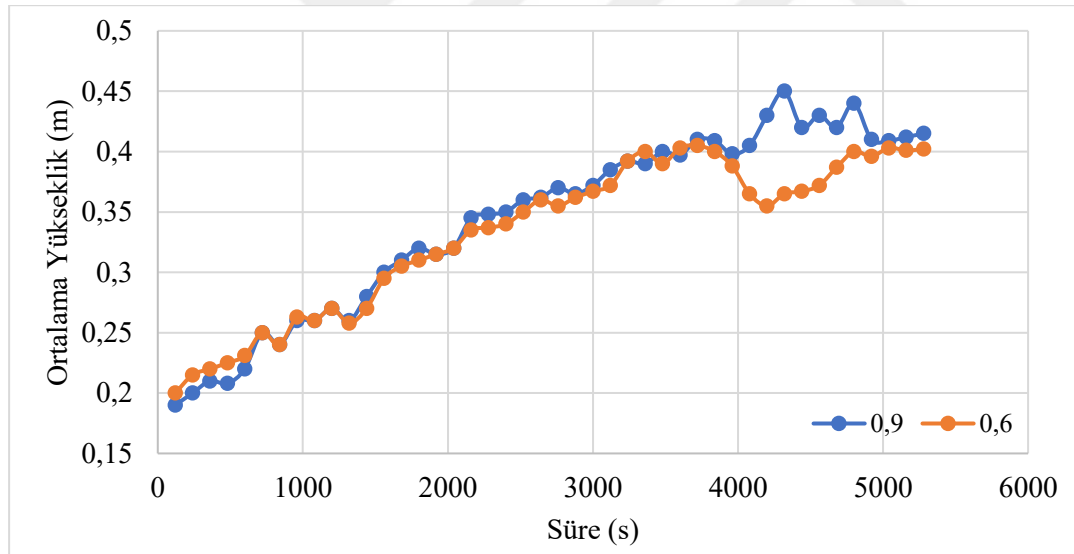
#### 6.2.6 Restitüsyon katsayısının etkisi

Katı-gaz tipi akışkan yatak sistemlerde, taneciklerin kendi arasında ve hazne duvarları ile yaptıkları çarpışmalardaki esneklik veya bir başka deyişle sahip oldukları kinetik enerjileri birbirlerine aktarmanın oranı restitüsyon katsayısı  $e_{ss}$  ile ifade edilir. Chanchol Loha [31] akışkan yatak ile yaptığı çalışmada restitüsyon katsayısının

akışkan yatak davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve katsayının azaldıkça kabarcık oluşumlarının ve aynı zamanda taneciklerin sahip olduğu hızın arttığını görmüşlerdir.

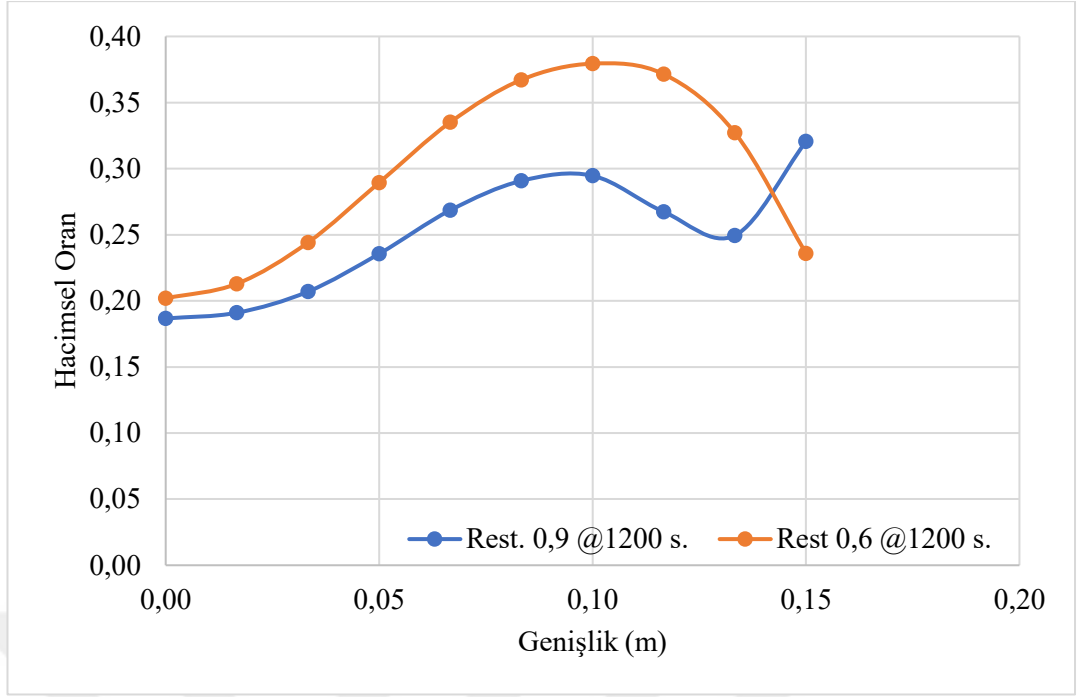
Bu çalışmada, 3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği durumu için iki farklı restitüsyon katsayısının akışkan yatağın hidrodinamik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Başlangıç ve sınır şartları olarak her iki simülasyon için Tablo 6.13'deki değerler sadece ikinci simülasyonda restitüsyon katsayısı 0,6 olarak değiştirilerek birebir kullanılmıştır.

Şekil 6.30'da restitüsyon katsayısının 0,9 ve 0,6 olarak seçildiği iki farklı simülasyonda akışkan yatak yüzeyinin ortalama yüksekliğinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Her iki simülasyonda 4000. saniyelere kadar benzer yatak yüksekliklere ulaşılmış, 4000 ile 5000. saniyeler arasında yatak yükseklikleri arasındaki fark açılmıştır. Fakat sonlara doğru yatak yükseklikleri tekrar eşitlenmiştir. Buradan anlaşılabileceği üzere restitüsyon katsayısının değişiminin ortalama yatak yüksekliği üzerinde etkisi olmamıştır.

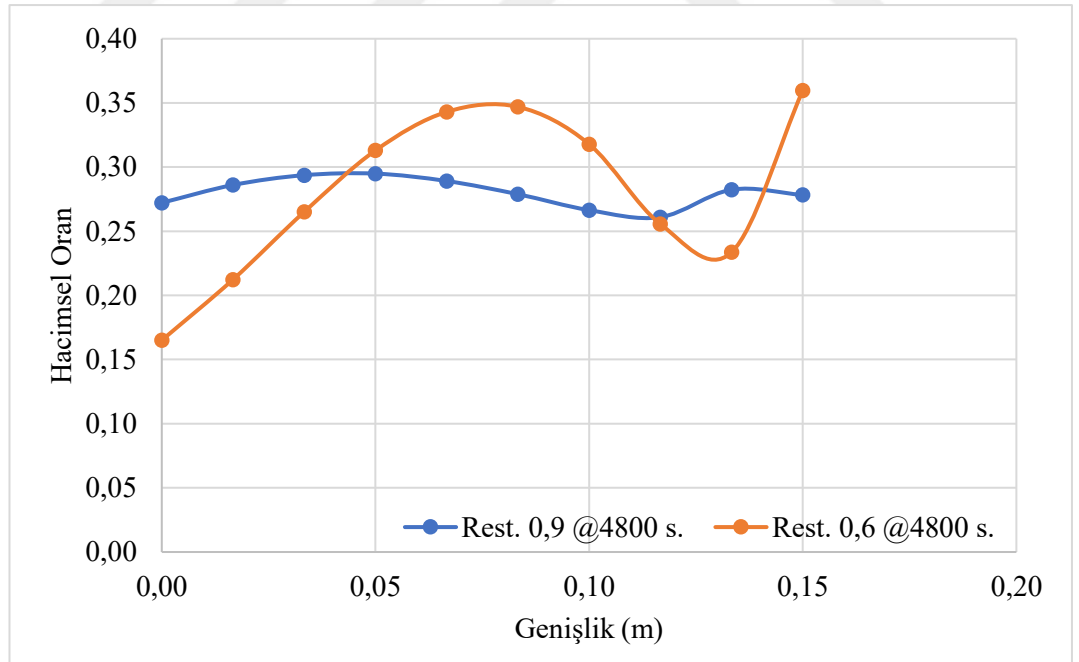


**Şekil 6.30 :** Değişik restitüsyon katsayıları için yatak yüksekliğinin zamanla değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.31 ve Şekil 6.32'de katının 0,1 m yükseklikte yatak genişliği boyunca hacimsel oranının 1200. ve 4800. saniyelerdeki dağılımı gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde yüksek restitüsyon katsayısında katının hacimsel oranındaki dağılım farkının yatak genişliği boyunca maksimum 0,13 iken katsayının düşmesi ile birlikte bu miktar 0,17-0,18 mertebelerine çıkmaktadır. Buradan da anlaşılabileceği üzere katsayı arttıkça katının yatak içerisindeki homojen dağılımı artmaktadır.



**Şekil 6.31** : 0,1 m yükseklikte, 1200. saniyesinde farklı restitüsyon katsayıları için radyal yönde katının hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).



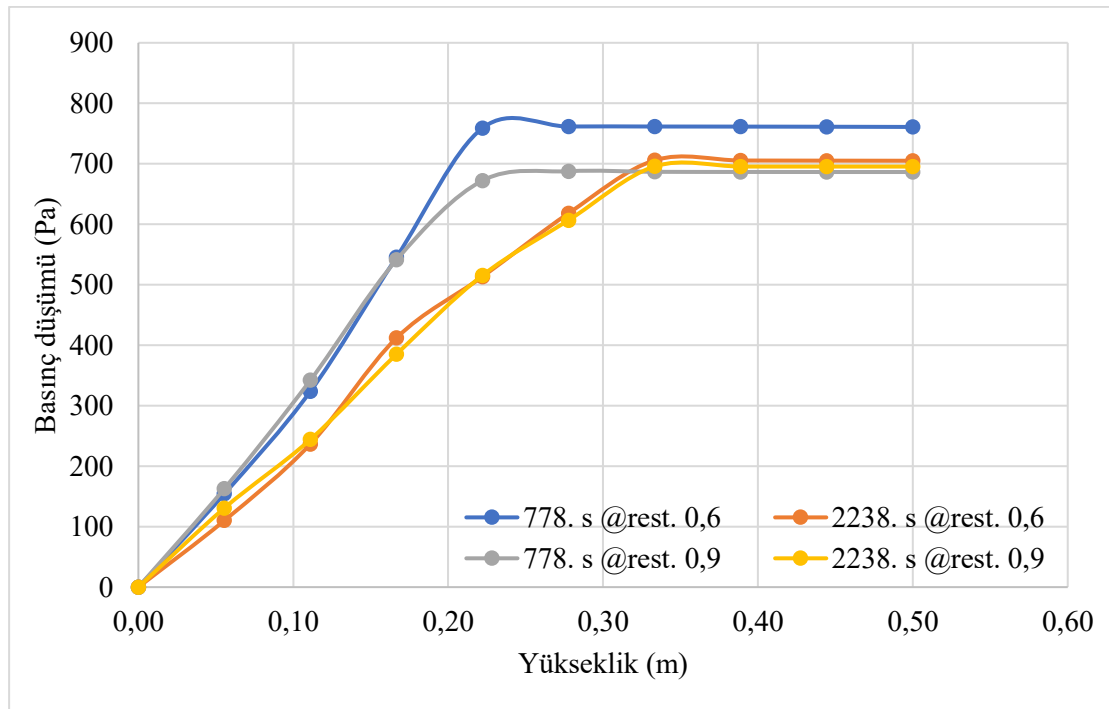
**Şekil 6.32** : 0,1 m yükseklikte, 4800. saniyesinde farklı restitüsyon katsayıları için katının radyal yönde hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Bununla birlikte yoğunluğun azalması ile düşük restitüsyon katsayısı için yatak genişliği boyunca hacimsel dağılımdaki dalgalanma artmakta, yüksek katsayı

durumunda dalgalanma azalmaktadır. Böylece yoğunluğun azalması ile restitüsyon katsayısının yatak davranışı üzerinde oluşturduğu hassasiyetin arttığı söylenebilir.

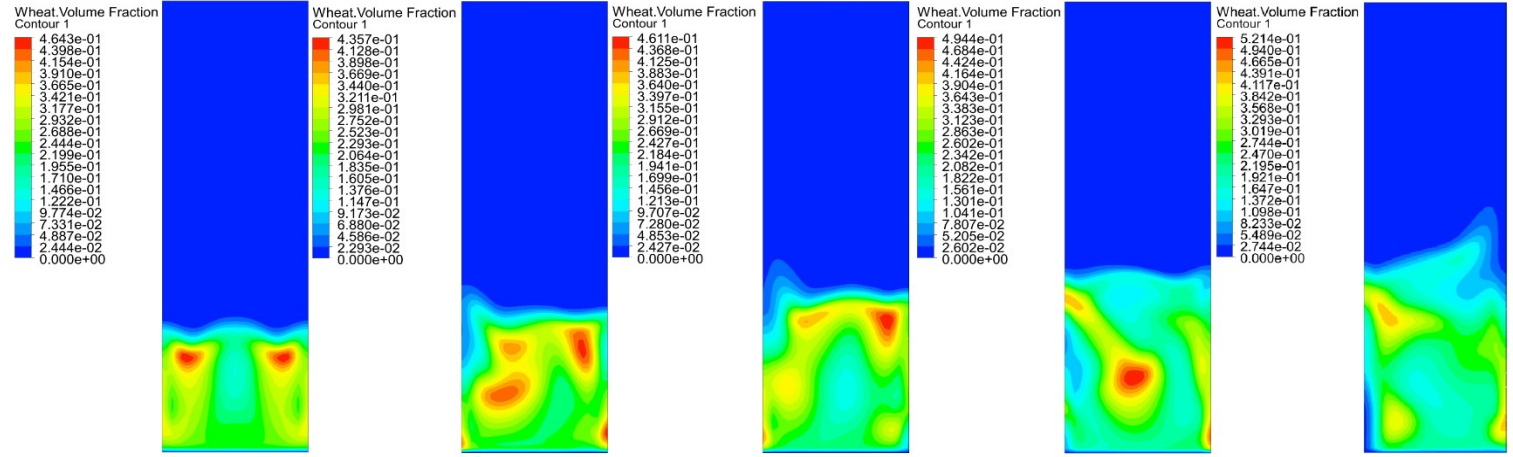
Şekil 6.34’de iki simülasyona ait farklı zamanlarda kaydedilmiş katının hacimsel olarak dağılımı gösterilmiştir. Restitüsyon katsayısının azalması ile taneciklerin birbirleri ile çarpışmaları elastığe yaklaşacağı için kaybettikleri momentumun artacağı bilinmektedir. Görseller incelendiğinde taneciklerin yaptıkları çarpışmadan sonra momentumunun azalmasıyla yapacakları yer değiştirme de azalacağından taneciklerin bir arada kalma eğilimine girdiği görülebilir. Yatak genelinde yüksek restitüsyon katsayısında katının dağılımı daha homojen iken katsayının 0,6 olması ile birlikte aynı anlık görüntüde bu homojenlik bozulmakta veya azalmaktadır.

Şekil 6.33’da restitüsyon katsayısının eksenel yönde yatak boyunca meydana gelen basınç düşümüne etkisi gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında 778. saniyede katsayının düşük olduğu durumda meydana gelen basınç düşümü 760 Pa seviyelerinde iken katsayının 0,9 olduğu durumda bu değer 685 Pa seviyelerindedir. Simülasyonun 2238. saniyesinde ise meydana gelen basınç düşümü her iki durumda da neredeyse aynı olmakla birlikte 700 Pa seviyelerindedir.

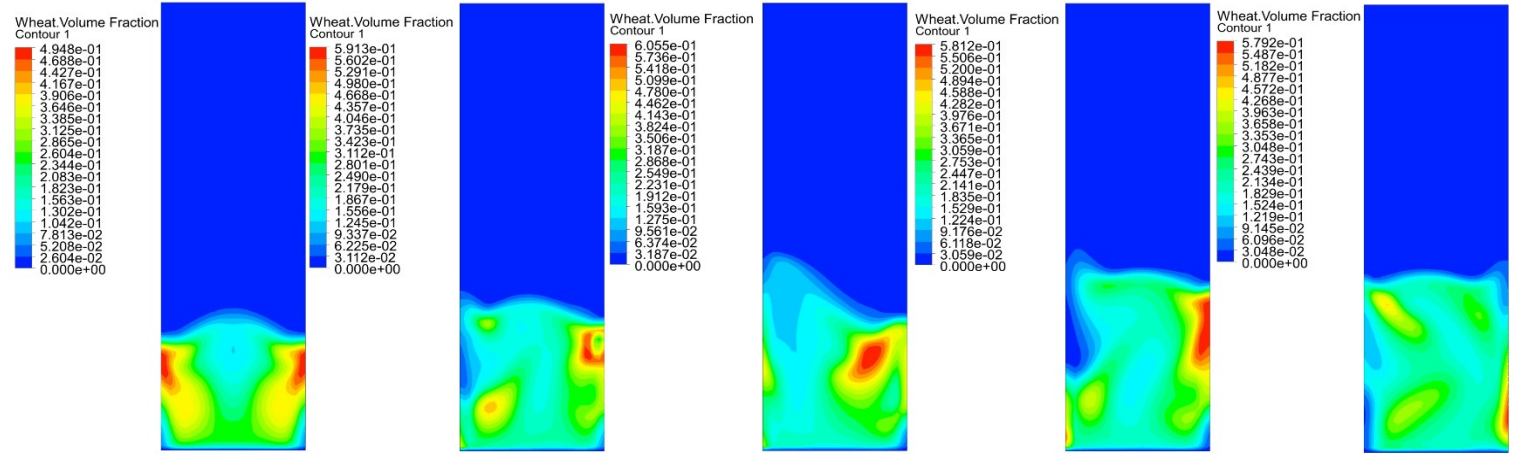


**Şekil 6.33:** Restitüsyon katsayısının basınç düşümüne etkisi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Restitüsyon  
0,9



Restitüsyon  
0,6



t= 1200 s.

t=2040 s.

t= 3000 s.

t= 3840 s.

t= 4800 s.

**Şekil 6.34:** Farklı restitüsyon katsayıları için katının hacimsel oranının anlık görselleri (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

### 6.2.7 3D ve 2D geometrinin etkisi

Sonlu hacimler metodu ile yapılan simülasyon hesaplamalarında kullanılan geometride hesaplama yapılan nokta sayısının artmasının ulaşılan sonucun doğruluğunu arttıracığı bilinmektedir. Ancak bu durum simülasyon zamanını çok arttırmaktadır. Bu dezavantaj çok çekirdekli hızlı hesaplama sistemlerinde paralel hesaplama yapılması ile aşılabilmektedir.

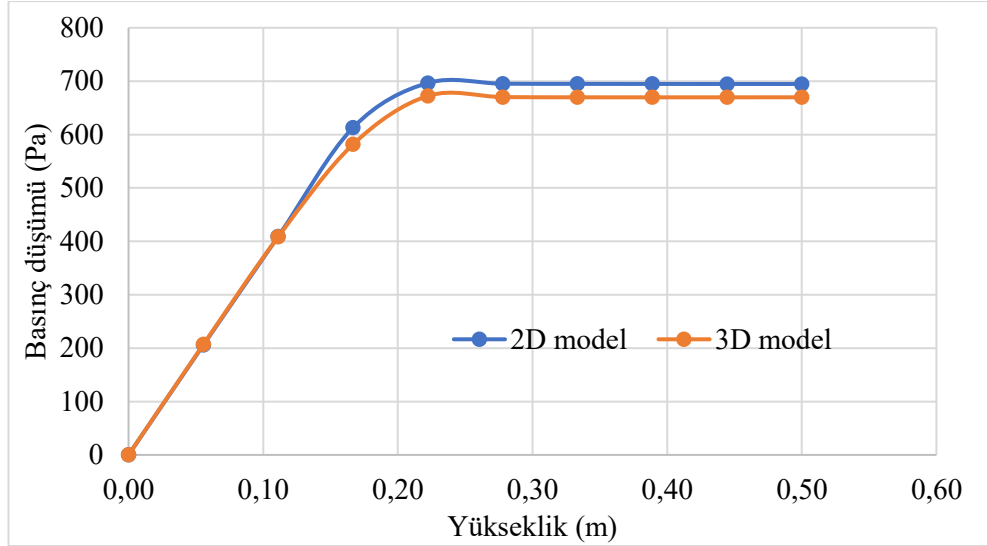
Bu tez çalışmasında Dr. Öğ. Üyesi Senem Şentürk Lüle'nin İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen “Genel Araştırma Projesi” kapsamında alınan çok çekirdekli hızlı hesaplama sistemi kullanılmıştır. Her zaman basamağında yakınsak bir simülasyon elde edebilmek için zamana bağlı hesaplar 0,04 saniye adım büyüklüğü ile yapılmıştır. Bazı simülasyonlarda ise 0,02 saniyesine inmek gerekmiştir. 3D hesaplarda bir zaman adımı 50 çekirdek kullanıldığında yaklaşık olarak 7 dakikada tamamlanmıştır. Tüm simülasyon süresinin 5400 saniye olduğu düşünüldüğünde 135.000 zaman adımına ihtiyaç duyulduğu bu sürenin anlamlı olmadığı aşikardır. Bu nedenle hesaplamalar literatürde de yaygın olarak kullanıldığı üzere 2 boyut (2D) kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmanın bu kısmında 3 boyutlu (3D) veya 2 boyutlu (2D) geometri kullanmanın akışkan yatak hidrodinamik davranışı ve yatak boyunca olan basınç düşümü açısından oluşturabileceği farklılıklar incelenmiştir.

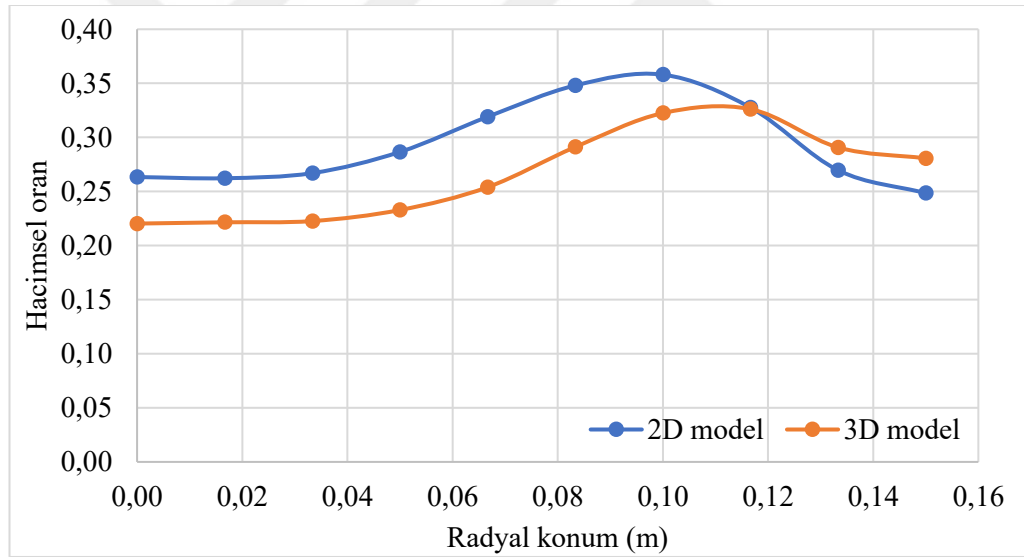
Toplam simülasyon süresi 3D modelin hesap yükünün fazla olması nedeniyle 220 saniye ile sınırlandırılmıştır. Çalışmada 3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği durumu kullanılmıştır.

Şekil 6.35'de simülasyonu yapılan 3D ve 2D geometrilerin ilk 200 saniyenin ortalaması alınarak hesaplanan toplam basınç düşümü gösterilmiştir. Her iki durumda da ortaya çıkan basınç düşümü eğrileri birbirini oldukça yakın olmakla birlikte 2D modelde hesaplanan maksimum basınç düşümü 695 Pa iken 3D modelde bu değer 670 Pa seviyelerinde olmuştur. Bu da iki model arasında yaklaşık %3 lük bir fark vardır.

Şekil 6.36'da iki model için 0,1 m yükseklikte katının radyal yönde hacimsel dağılımının ilk 200 saniyelik ortalaması gösterilmiştir. Eksene yakın kısımlarda 2D modelde katının hacimsel oranı 3D modele göre daha yüksek iken duvara yakın kısımlarda 3D modelde katının hacimsel oranı daha yüksek olduğu görülebilir.

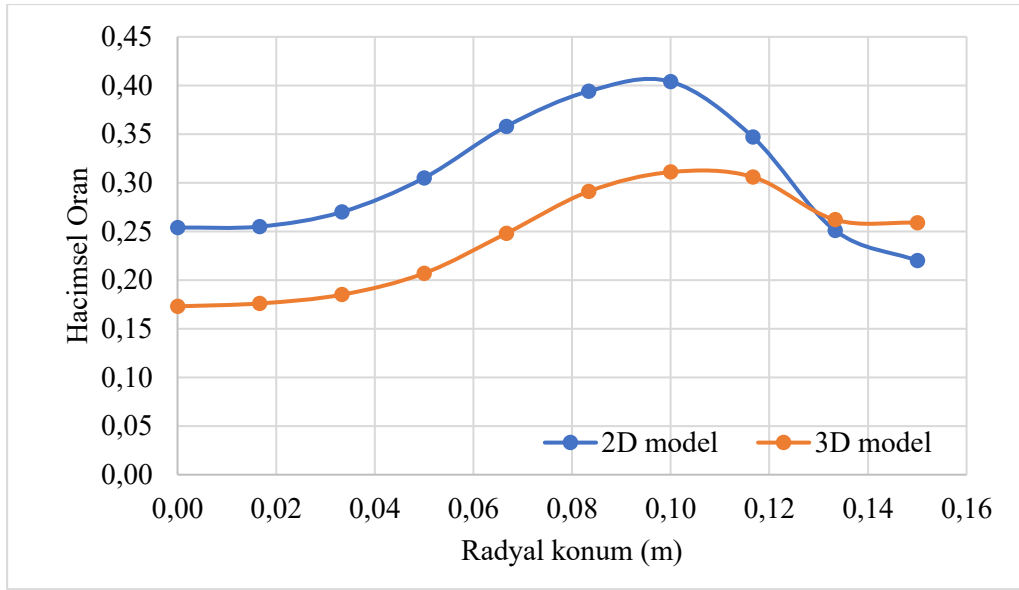


**Şekil 6.35 :** 3D ve 2D modellerde basınç düşümünün 200 saniyelik ortalama için aksenal yönde değişimi (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).



**Şekil 6.36 :** 3D ve 2D modelde 0,1 m yükseklikte katının ortalama hacimsel oranının radyal değişimi (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.37'de ise 0,15 m yükseklikte radyal yönde katının hacimsel oranının değişimi gösterilmiştir. Benzer şekilde eksene yakın kısımlarda 2D modelde katının hacimsel oranı fazla iken duvara yakın kısımlarda 3D modelde hacimsel oran daha yüksektir. Yatağın orta kısımlarında iki model arasındaki fark eksene yakın kısımlarda %18 seviyelerinde iken üst kısımlarda fark %40'lara kadar çıkmaktadır. Bununla birlikte 0,1 m yükseklikte 2D modelde ulaşılabilen maksimum hacimsel oran 0,385 iken 0,15 m yükseklikte bu oran 0,404 seviyelerine çıkmıştır.



**Şekil 6.37 :** 3D ve 2D modelde 0,15m yükseklikte katının ortalama hacimsel oranının radyal değişimi (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

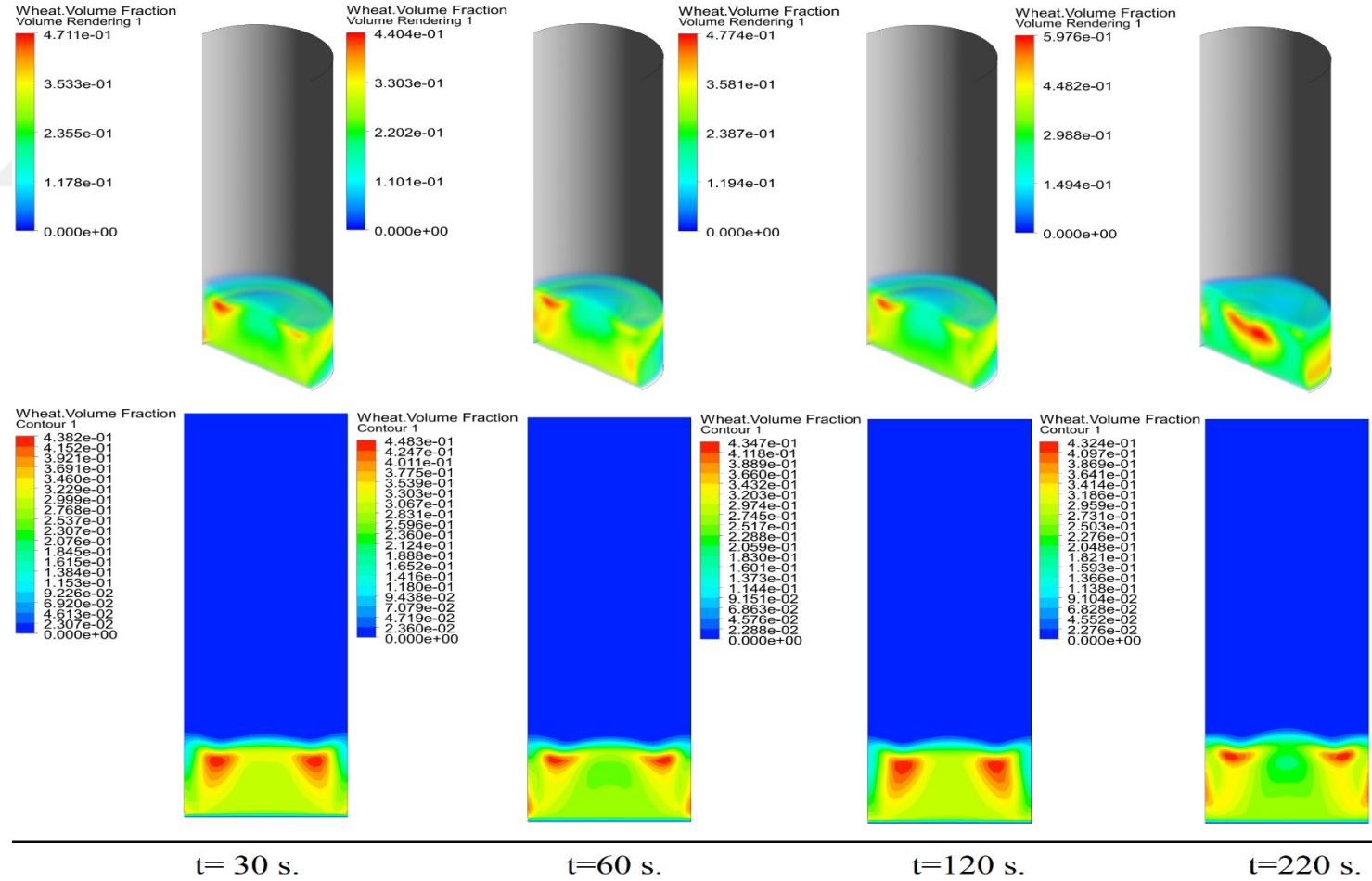
3D modelde ise 0,1m yükseklikte ulaşılabilen maksimum oran 0,326 seviyelerinde iken 0,15 m yükseklikte bu sayı 0,311 seviyelerindedir.

Şekil 6.38'de 2 ve 3 boyutlu modele ait 30, 60, 120 ve 220. saniyelerdeki katının hacimsel oranının dağılımı gösterilmiştir. 3 boyutlu modele ait görseller modelin x-y düzlemi ile kesiti alınarak hazırlanmıştır. Ayrıca minimum ve maksimum değerler modelin tamamını değerlendirmektedir.

Görüleceği üzere 30, 60 ve 120. saniyelerdeki durumlar birbirine benziyor olsa da 3 boyutlu modelde ulaşılan maksimum oran 2 boyutlu modelde 0,43 seviyelerinde seyrederken 3 boyutlu modelde 0,44 ile 0,47 arasında değişmektedir. Ayrıca 2 boyutlu modelde oluşan akış eksene göre simetrik halde iken 3 boyutlu modelde bu durum bozulmaya başlamıştır. 220. saniyede ise simetriklik iki modelde de mevcut iken 3 boyutlu modelde katı oranı merkeze yakın bölgelerde fazla iken 2 boyutlu modelde katı madde duvar ile merkez arasındaki bölgede yoğunlaşmıştır.

### 6.2.8 Hava sıcaklığının etkisi

Referans alınan deneyde akışkan yatak sistemde kullanılan hava sıcaklığı her durum için 70 °C'dir. Sıcaklığın değişmesi ile birlikte havanın da fiziksel özellikleri değişmektedir. Değişen bu özelliklerin akışkan yatağın hidrodinamik davranışları üzerindeki etkisi bu kısımda incelenmiştir.



**Şekil 6.38:** 3D ve 2D modele ait 30, 60 120 ve 220. saniyelerdeki katının hacimsel oran konturu (3 m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

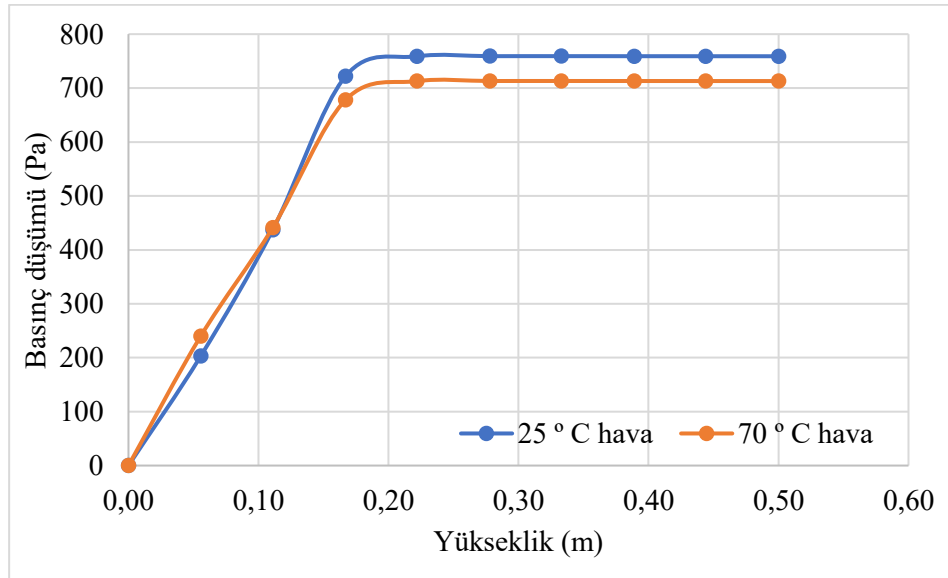
25 °C ve 70 °C sıcaklıkların kullanıldığı iki farklı ve her biri 30’ar saniyelik simülasyon 3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği ve restitüsyon katsayısı 0,9 durumu için yapılmıştır.

Tablo 6.14’de 70 °C sıcaklıktaki havanın bazı fiziksel özellikleri verilmiştir. Tabloda verilen özellikler kullanılarak Fluent programı üzerinde hava fazının özellikleri değiştirilmiştir.

**Tablo 6.14 : 70 °C sıcaklıktaki havanın özellikleri.**

| Parametre                     | Değer                  |
|-------------------------------|------------------------|
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,0287                 |
| Viskozite (kg/m-s)            | $2,056 \times 10^{-5}$ |
| Moleküler ağırlık (kg/kmol)   | 28,966                 |

Şekil 6.39’da yapılan iki simülasyona ait 10. ve 30. saniyeler arasında eksenel yönde meydana gelen ortalama basınç düşümünün eğrileri verilmiştir. Maksimum basınç düşümünün gerçekleştiği yükseklik her iki durumda da aynı iken soğuk havanın olduğu durumda meydana gelen basınç düşümü sıcak havaya göre biraz daha fazladır. Soğuk havada maksimum 759 Pa, sıcak havanın olduğu durumda ise maksimum 713 Pa kadar bir basınç düşümü gerçekleşmiştir.



**Şekil 6.39 :** Sıcak ve soğuk hava, ortalama basınç düşümü (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O’Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekil 6.41’de 0,1 m yükseklikte radyal yönde iki simülasyona ait katının hacimsel oranının radyal yönde değişimi verilmiştir.

Sıcak Hava

Soğuk Hava

Solid Volume Fraction  
Contour 1  
4.763e-01  
4.512e-01  
4.262e-01  
4.011e-01  
3.760e-01  
3.510e-01  
3.259e-01  
3.009e-01  
2.758e-01  
2.507e-01  
2.256e-01  
2.005e-01  
1.755e-01  
1.504e-01  
1.253e-01  
1.003e-01  
7.521e-02  
5.014e-02  
2.507e-02  
0.000e+00

Solid Volume Fraction  
Contour 1  
4.246e-01  
4.023e-01  
3.799e-01  
3.576e-01  
3.352e-01  
3.129e-01  
2.905e-01  
2.682e-01  
2.458e-01  
2.235e-01  
2.011e-01  
1.788e-01  
1.564e-01  
1.341e-01  
1.117e-01  
8.939e-02  
6.705e-02  
4.470e-02  
2.235e-02  
0.000e+00

Solid Volume Fraction  
Contour 1  
4.044e-01  
3.831e-01  
3.618e-01  
3.406e-01  
3.193e-01  
2.980e-01  
2.767e-01  
2.554e-01  
2.341e-01  
2.128e-01  
1.915e-01  
1.703e-01  
1.490e-01  
1.277e-01  
1.064e-01  
8.514e-02  
6.385e-02  
4.257e-02  
2.128e-02  
0.000e+00

Solid Volume Fraction  
Contour 1  
4.201e-01  
3.980e-01  
3.759e-01  
3.538e-01  
3.317e-01  
3.096e-01  
2.875e-01  
2.653e-01  
2.432e-01  
2.211e-01  
1.990e-01  
1.769e-01  
1.548e-01  
1.327e-01  
1.106e-01  
8.845e-02  
6.634e-02  
4.422e-02  
2.211e-02  
0.000e+00

Solid Volume Fraction  
Contour 1  
4.815e-01  
4.561e-01  
4.308e-01  
4.055e-01  
3.801e-01  
3.548e-01  
3.294e-01  
3.041e-01  
2.788e-01  
2.534e-01  
2.281e-01  
2.027e-01  
1.774e-01  
1.520e-01  
1.267e-01  
1.014e-01  
7.602e-02  
5.068e-02  
2.534e-02  
0.000e+00

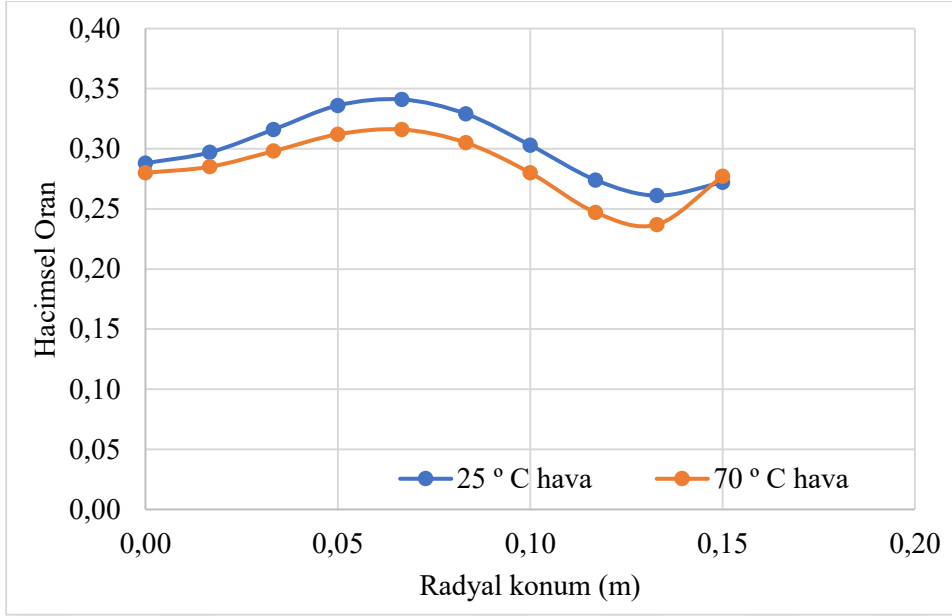
Solid Volume Fraction  
Contour 1  
3.846e-01  
3.643e-01  
3.441e-01  
3.238e-01  
3.036e-01  
2.834e-01  
2.631e-01  
2.429e-01  
2.226e-01  
2.024e-01  
1.822e-01  
1.619e-01  
1.417e-01  
1.214e-01  
1.012e-01  
8.099e-02  
6.072e-02  
4.048e-02  
2.024e-02  
0.000e+00

t= 10 s.

t=20 s.

t=30 s.

**Şekil 6.40:** Sıcak ve soğuk hava için 10, 20 ve 30. saniyelerde katının hacimsel oran konturu (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği)



**Şekil 6.41 :** Sıcak ve soğuk hava, katının radyal yönde hacimsel oran değişimi (3m/s gaz hızı, değişken yoğunluk, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği).

Şekildeki eğriler simülasyonun 10. ve 30. saniyeleri arasındaki ortalaması alınarak hazırlanmıştır. İki simülasyonda da benzer eğriler ortaya çıkmış olsa da soğuk havanın olduğu durumda eksen ile duvar arasındaki bölgede katının hacimsel oranının sıcak havaya göre daha fazla olduğu görülmektedir. İki eğri arasındaki maksimum farkın yaklaşık %7 olduğu söylenebilir.

Şekil 6.40'da her iki simülasyona ait 10. 20. ve 30. saniyelerde katının hacimsel oranını gösteren anlık konturlar verilmiştir. Her iki durumda da oluşan dağılım simetriktir ve oluşan görseller birbirlerine benzerlik göstermektedir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada literatürden referans olarak alınan buğday kurutmada kullanılan bir akışkan yatak kurutuma sisteminin akış hidrodinamiği hesaplamalı akış dinamiği (HAD) simülasyonları ile incelenmiştir. Ayrıca, simülasyonlarda kullanılan farklı model ve parametrelerin etkileri irdelenmiştir.

İlk olarak kurutulan haşlanmış buğdayların gösterdiği kuruma davranışı ince tabaka matematiksel modelleri kullanılarak modellenmiştir. Buradaki amaç hangi matematiksel modelin kurumayı en iyi şekilde tahmin ettiğinin bulunmasının yanı sıra HAD yöntemi ile yapılacak analizlere girdi verisi de sağlamaktır.

Kurutmanın matematiksel olarak modellenmesinde kullanılabilecek en iyi modelin bulunması amacıyla deneysel çalışmadan alınan nem-zaman verileriyle lineer olmayan regresyon analizi yapılmıştır. Her yatak yüksekliği ve giriş hızı için bu analiz tekrarlanmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan 10 farklı matematiksel model arasında bu çalışmada incelenen deney düzeneği ve buğday için kuruma kinetiğini en iyi ifade eden modelin “Logarithmic” model olduğuna karar verilmiştir. Matematiksel ifadeleri giriş hızından bağımsız olarak genelleştirmek amacıyla her bir yatak yüksekliği için alternatif regresyon çalışması da yapılmış ancak elde edilen sonuçların gerçek eğriden uzaklaştığı görülmüştür. Bu sonuç hava giriş hızının kuruma kinetiğindeki önemini göstermiştir.

HAD analizi yönteminde referans çalışmada kullanılan parametreler ve yatak geometrisi birebir olarak modellenmiştir. Simülasyonlarda giriş hava hızının 3 m/s ve yatak yüksekliğinin 10 cm olduğu durum kullanılmıştır. İlk olarak kuruma ile taneciğin ağırlığının ve buna bağlı olarak yoğunluğunun azalmasının akışkanlaşma davranışı üzerindeki etkisini araştırmak adına 5400 saniyelik yoğunluğun sabit kaldığı ve zamanla değiştiği iki farklı simülasyon yapılmıştır. Zamanla değişen yoğunluk değerleri “Logarithmic” modelden elde edilen fonksiyonun FLUENT kodunun kullanıcı tanımlı fonksiyon özelliği kullanılarak yazılan C algoritmasının koda entegre edilmesi ile sağlanmıştır. Değişken yoğunluk durumunda sabit yoğunluk durumuna kıyasla katının radyal yönde hacimsel yoğunluğunun zamanla yatağın üst kısımlarında

arttığı ve dolayısıyla yatak yüksekliğinin zamanla arttığı gözlenmiştir. Ayrıca yatak boyunca basınç düşümü sabit yoğunluk ve değişken yoğunluk durumlarında neredeyse aynı kalmış fakat maksimum basınç düşümünün görüldüğü yükseklik değişiklik göstermiştir.

Katı-gaz tipi sistemlerde kullanılan sürüklenme modellerinden Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modelleri yapılan çalışmada değişken yoğunluk durumu için değerlendirilmiştir. Referans çalışmada verilen basınç düşümü değerleri ile bahsi geçen modeller kullanılarak hesaplanan basınç düşümü değerleri farklılık göstermiştir. Syamlal-O'Brien modeli kullanılarak hesaplanan basınç düşümü değerleri deneyde ölçülen basınç düşümü değerlerinin altında kalırken, Wen&Yu modelinin kullanılmasıyla hesaplanan basınç düşümü değerleri kurutmanın 778. saniyesi için deneysel verilere oldukça yakın çıkarken 2238. saniyesi için deneysel verilerin altında kalmıştır. Bu nedenle Wen&Yu modelinin referans çalışmanın modellenmesi için daha uygun olduğu düşünülmektedir. Katının yatak içerisinde dağılımı incelendiğinde Syamlal-O'Brien modeli uygulandığında dağılımın daha homojen, Wen&Yu modeli uygulandığında ise belirli noktalarda çok fazla yoğunlaştığı görülmektedir.

Katı taneciklerin yatak duvarları ve birbirleri ile yaptıkları çarpışmaların momentum transferinin ifadesi olarak kullanılan restitüsyon katsayısının 0,9 ve 0,6 olduğu durumların akışkanlaşma üzerindeki etkisi çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Her iki durum için sonuçlar karşılaştırıldığında, yatak boyunca oluşan maksimum basınç düşümünün ve gerçekleştiği yüksekliğin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Buradan restitüsyon katsayısının yataktaki basınç düşümü üzerinde büyük bir etkisi olmadığı söylenebilir. Öte yandan restitüsyon katsayısının 0,6 olduğu durumda meydana gelen çarpışmaların esnekliği daha düşük olduğundan katının belirli bölgelerde yoğunlaştığı gözlenmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında geometriler 2 veya 3 boyutlu olarak modellenebilmektedir. Referans alınan çalışmadaki deney süresinin çok uzun olması ve akışkan yatak sistemlerdeki akışkan hareketinin karmaşıklığı simülasyon için harcanan süreyi uzatmaktadır. Bu nedenle çalışmada 2 boyutlu geometriler tercih edilirken 3 boyutlu model için de kısa bir simülasyon çalışması yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre 3 boyutlu modelde hesaplanan maksimum basınç düşümü ile 2 boyutlu modelde ulaşılan maksimum basınç düşümünün %3'lük bir fark oluşturduğu görülmüştür. Katının yatak içerisinde dağılımının ise 2 boyutlu modelde

daha homojen olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak hesap altyapısının yeterli olmadığı durumlarda 2 boyutlu analiz yapmanın uygunluğu gösterilmiştir.

Referans alınan çalışmada kullanılan kurutucu hava sıcaklığı 70 °C'dir. Bu tez çalışmasında yapılan simülasyonlarda ise 25 °C'deki havanın fiziksel özellikleri kullanılarak sıcaklığın akışkanlaşmaya etkisi irdelenmiştir. Yatak boyunca gerçekleşen maksimum basınç düşümünün sıcak hava olması durumunda düşük bir farkla daha az olduğu görülmüştür. Aynı zamanda katının hacimsel olarak dağılımının düşük de olsa farklılık gösterdiği gözlenmiştir.

Konu ile ilgili ileriki çalışmalarda oldukça karmaşık olan kuruma işlemindeki gaz-katı ısı transferi ve buna eşlik eden nemin taneciklerin iç kısımlarından yüzeye taşınması modellenebileceği gibi kullanıcı tanımlı fonksiyonlar ile sürüklenme katsayıları değiştirilerek deney sonuçlarına daha yakın simülasyon sonuçları elde edilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **H. Çakmak, S. Kumcuoğlu ve Ş. Tavman**, (2014). Mathematical Modeling and thin layer drying of chicken meat enriched baguette bread slices, *GIDA*, 39.
- [2] **J. Delgado ve A. G. Barbarose de Lima**, (2016). Drying and Energy Technologies, Switzerland: Springer.
- [3] **C. Z. İbrahim Dinçer**, Drying Phenomena, (2016.) ON, Canada: WILEY,
- [4] **H. R. Gazor ve A. Mohsenimanesh**, (2010.) Modelling the drying kinetics of canola in fluidized bed dryer,» *Czech Journal of Food Science*, 28.
- [5] **C. A. Mehmet Kalender**, (2011). Thin Layer Drying Characteristics of Parboiled Wheat to Produce Bulgur, *Turkish Journal of Science&Technology*, 7.
- [6] **C. Srinivasakannan ve N. Balasubramanian**, (2008). An investigation on drying of millet in fluidized beds, *Advanced Powder Technology*, 20.
- [7] **J. Jang ve H. Arastoopour**, (2014). CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales, *Powder Technology*, 263.
- [8] **M. Verma, A. N. Sinha ve P. Chandra**, (2017). Numerical simulation of 2-D bubbling fluidized bed dryer using sawdust as bed material, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3.
- [9] **Ü. Erçetin**, (2007). Tanecikli Gıda Maddelerinin Akışkan Yatakta Kurutulması,» Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi.
- [10] **A. S. Mujumdar**, (2015). Handbook of Industrial Drying Fourth Edition, CRC Press.
- [11] **K. J. Valentas, E. Rotstein ve R. P. Singh**, (1997). Food Engineering Practice, New York: CRC Press.
- [12] **S. R. A. J. S. H. M. Khanali**, (2012). Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice, *Journal of Agricultural Technology*, 8.
- [13] **S. Meziane**, (2010). Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer, *Energy Conversion and Management*, 52.
- [14] **O. Prakash ve A. Kumar**, (2017). Solar Drying Technology, Singapore: Springer.
- [15] **D. Kunii ve O. Levenspiel**, (1991). Fluidization Engineering, Second Edition, Heinemann.
- [16] **R. Cocco, S. R. Karri ve T. Knowlton**, (2014). Introduction to fluidization,» *American Institute of Chemical Engineers*.
- [17] **E. d. C. M. R. P. d. R. Paulo Carteri Coradi**, (2014). Mathematical modeling of the drying kinetics of the leaves of lemon. *IDESIA*, 32.
- [18] **K. K. O. H. Ahmet Cihan**, (2006). Modeling of intermittent drying of thin layer rough rice, *Journal of Food Engineering*, 79.
- [19] **R. K. v. R. W.**, (2012). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices, *International Food Research Journal*, 19.

- [20] **H. Yoğurtçu**, (2016). Investigation of drying characteristics of parboiled wheat kernel in a halogen lamp dryer and its modelling, *International Journal of Pure Applied Sciences*, 2.
- [21] **S. Karaaslan**, (2014). Determination of suitable drying model for combined microwave-fan assisted convection drying of strawberry, *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 2.
- [22] **D. Mohapatra ve P. S. Rao**, (2004). A thin layer drying model of parboiled wheat, *Journal of Food Engineering*, 66.
- [23] **R. Assawarachan**, (2013). Drying kinetics of coconut residue in fluidized bed, *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 2.
- [24] **C. Srinivasakannan ve N. Balasubramaniam**, (2006). An experimental and modeling investigation on drying of ragi, *Drying Technology*, 24.
- [25] **V. Mohammadpour, M. T. Hamed Mosavian ve A. Etemadi**, (2007). Determination of effective diffusivity coefficient and activation energy of shelled pistachio by using fluidized bed dryer, *SID*.
- [26] **M. Zielinska ve Markowski Marek**, (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49.
- [27] **T. Madhiyanon, A. Phila ve S. Soponronnarit**, (2009). Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut, *Applied Thermal Engineering*, 29.
- [28] **D. Yogendrasasidhar ve Y. P. Setty**, (2019). Experimental studies and thin layer modeling of pearl millet using continuous multistage fluidized bed dryer staged externally, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22.
- [29] **M. I. Rosli, A. M. Abdul Nasir, M. S. Takriff ve L. P. Chern**, (2018). Simulation of a fluidized bed dryer for the drying of sago waste, *Energies*, 11.
- [30] **F. Geng, D. Xu, Z. Yuan, Y. Yan, D. Luo, H. Wang, B. Li ve C. Chyang**, (2009). Numerical simulation on fluidization characteristics of tobacco particles in fluidized bed dryers, *Chemical Engineering Journal*, 150.
- [31] **C. Loha, H. Chattopadhyay and P. K. Chatterjee**, (2014). Effect of coefficient of restitution in Euler–Euler CFD simulation of fluidized-bed hydrodynamics, *Particuology*, 15.
- [32] **Url-1** <<https://neutrium.net/fluid-flow/packed-bed-reynolds-number/>>, *Neutrium, Native Dynamics*.
- [33] **J. Gao, X. Lan, Y. Fan ve G. Wang**, (2009). CFD modeling and validation of the turbulent fluidized bed of FCC particles, *Particle Technology and Fluidization*, 10.1002.
- [34] **Url-2**, <[https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm)>, ANSYS, Inc.
- [35] **N. S. ve D. K. K.**, (2016). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics and moisture diffusivity study of elephant apple, *International Food Research Journal*, 23-6.

- [36] **P. C. Correa, O. Resende ve D. M. Ribeiro**, (2006). Drying characteristics and kinetics of coffee berry, *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 8.





## **EKLER**

**EK A:** Yoğunluk değişimi için yazılan UDF kodu.





#### **EK A:** Yoğunluk değişimi için yazılan UDF kodu

H= 0,1 m ve V=3 m/s durumuna ait lineer olmayan regresyon analizi sonucu elde edilen matematiksel ifade kullanılarak yazılan UDF kodu aşağıda verilmiştir. Burada yoğunluk simülasyon zamanı ile değiştirilmektedir. Diğer yatak durularının incelenmesi için matematiksel ifadenin değiştirilmesi yeterli olacaktır.

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(cell_density,cell,thread)
{
    real rho;
    real c_t;
    #if PARALLEL
    c_t=CURRENT_TIME;
    rho=(1300*(1+0.889756858*exp(-0.000556308*c_t)+0.08806987)/(1+0.97608));
    #endif
    return rho;
}
```



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad :** Alper DOĞAN

**E-posta :** alper00dogan@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2017-2019 yılları arasında akışkan yatak atık su çamuru yakma projesinin kurulumu, devreye alınması ve optimizasyonunda proje mühendisi.