

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DİKEY BİR PORSELEN LEVHADAN TAŞINIMLA EŞZAMANLI ISI VE  
KÜTLE GEÇİŞİ OLAYLARININ TEORİK&AMPİRİK BAĞINTILAR VE  
DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME KULLANILARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Aykut EFE**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Isı-Akışkan Programı**

**HAZİRAN 2023**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DİKEY BİR PORSELEN LEVHADAN TAŞINIMLA EŞZAMANLI ISI VE  
KÜTLE GEÇİŞİ OLAYLARININ TEORİK&AMPİRİK BAĞINTILAR VE  
DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME KULLANILARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Aykut EFE  
(503201105)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Isı-Akışkan Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇAKAN**

**HAZİRAN 2023**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503201105 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi Aykut EFE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DİKEY BİR PORSELEN LEVHADAN TAŞINIMLA EŞZAMANLI ISI VE KÜTLE GEÇİŞİ OLAYLARININ TEORİK&AMPİRİK BAĞINTILAR VE DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME KULLANILARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇAKAN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Özden AĞRA** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 26 Mayıs 2023  
**Savunma Tarihi** : 20 Haziran 2023





*Sevgili ailem'e,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarında yorumları ile beni yönlendiren ve bilgi ve tecrübelerini paylaşan değerli hocam Sayın Öğr. Üyesi Dr. Murat Çakan'a, tezin jüri savunma sunuşunda yaptıkları yorumlar ve önerilerle tez ve potansiyel devam çalışmalarına katkılarını sağlayan Sayın Prof. Dr. Mustafa Özdemir'e ve Sayın Prof. Dr. Özden Ağra'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının yürütülmesine olanak sağlayan ve destek veren Arçelik A.Ş. Merkez Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne ve Ar-Ge Kıdemli Direktörü Sayın Dr. Emre Oğuz'a; Temizleme ve Tekstil Teknolojileri Yöneticiliği'ne ve Sayın Dr. Songül Bayraktar'a teşekkür ederim.

Bulaşık makinelerinde kurutma ile ilgili bildiklerimin temelini atan, hem teknik hem de teknik olmayan konularda benimle bilgi birikimini ve tecrübelerini paylaşan, saygıdeğer ağabeyim Dr. Yusuf Koç'a teşekkürlerimi sunarım.

Tasarlanan rüzgar tünelinin üretimi öncesinde akış kalitesini incelemek üzere yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerine yardımcı olan Akışkanlar Dinamiği Yöneticiliği'ne ve rüzgar tünelinin imalat sürecinde çalışmaya destek olan Arçelik Garaje ekibine teşekkür ederim.

Deney düzeneğinin kurulumunda, montajında ve deneylerin yürütülmesinde desteklerini sunan Sayın Özcan Hatipoğlu, Sayın Murat Elgün, Sayın Turan Sendinç ve Sayın Ömer Ensar Durmuş başta olmak üzere Temizleme Tekstil Teknolojileri ve Temel Bilimler Yöneticilikleri'ndeki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca sürekli motivasyon sağlayan ve teknik yorumlarını aktaran değerli çalışma arkadaşlarım Sayın Ekin Emek Saitoğlu, Sayın Rahmi Mert Akkühah, Sayın Ömer Ensar Durmuş ve Sayın Mert Çil'e ayrı bir teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda hissettiğim, sevgisini ve her türlü desteğini koşulsuz ve daimi olarak sunan kıymetli aileme teşekkür ederim.

Her zaman olduğu gibi tez çalışma sürecinde de yanımda olan, ruh halimin ve motivasyonumun korunmasındaki kuşkusuz en büyük destekçiler olan sevgili karım Sude, canım arkadaşlarım Umut ve Merve ve çözüm ortağımız Berkay'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2023

Aykut EFE  
Makina Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                         | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                  | ix   |
| KISALTMALAR .....                                                  | xi   |
| SEMBOLLER .....                                                    | xiii |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                               | xix  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                 | xxi  |
| ÖZET.....                                                          | xxv  |
| SUMMARY .....                                                      | xxix |
| 1. GİRİŞ.....                                                      | 1    |
| 1.1 Tezin Amacı .....                                              | 1    |
| 1.2 Hipotez .....                                                  | 2    |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                     | 3    |
| 2.1 Bulaşık Makinesi ve Bulaşık Makinesinde Kurutma .....          | 5    |
| 2.1.1 Bulaşık makinesinin temel bölümleri .....                    | 5    |
| 2.1.2 Bulaşık makinesinin çalışma prensibi .....                   | 5    |
| 2.1.3 Bulaşık makinelerinde kullanılan kurutma sistemleri .....    | 8    |
| 2.1.3.1 Pasif/statik (fansız) kurutma sistemleri .....             | 8    |
| 2.1.3.2 Fanlı açık çevrim kurutma sistemleri .....                 | 10   |
| 2.1.3.3 Fanlı kapalı çevrim kurutma sistemleri .....               | 11   |
| 2.1.3.4 Kurutmayı iyileştirmeye yönelik alternatif sistemler ..... | 11   |
| 2.1.4 Bulaşık makinesinde kurutma performansı ölçümü .....         | 13   |
| 2.2 Kurutma (Buharlaştırma ile Kütle Geçişi) .....                 | 13   |
| 2.2.1 Taşınımın fiziksel mekanizması .....                         | 14   |
| 2.2.2 Laminer ve türbülanslı hız sınır tabakaları .....            | 14   |
| 2.2.3 Laminer sınır tabakada taşınım denklemleri .....             | 16   |
| 2.2.4 Zorlanmış taşınım .....                                      | 18   |
| 2.2.4.1 Boyutsuzlaştırılmış sınır tabaka eşitsizlikleri: .....     | 19   |
| 2.2.4.2 Benzerlik çözümlemesi .....                                | 21   |
| 2.2.4.3 Ortalama sınır tabaka parametreleri .....                  | 25   |
| 2.2.5 Doğal taşınım .....                                          | 25   |
| 2.2.5.1 Boyutsuzlaştırılmış sınır tabaka eşitsizlikleri: .....     | 28   |
| 2.2.5.2 Benzerlik çözümlemesi .....                                | 29   |
| 2.2.5.3 Ampirik bağıntılar .....                                   | 30   |
| 2.2.5.4 Kütle geçişi .....                                         | 31   |
| 2.2.6 Karma doğal ve zorlanmış taşınım .....                       | 32   |
| 2.2.7 Eşzamanlı ısı ve kütle geçişi (buharlaştırma soğutma) .....  | 33   |
| 2.3 Rüzgar Tünelleri .....                                         | 33   |
| 2.3.1 Çalışma hızlarına göre rüzgar tünelleri .....                | 34   |
| 2.3.2 Çevrim türlerine göre rüzgar tünelleri .....                 | 34   |
| 2.3.2.1 Açık çevrim rüzgar tünelleri .....                         | 35   |
| 2.3.2.2 Kapalı çevrim rüzgar tünelleri .....                       | 35   |

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.3.2.3 Avantajlar ve dezavantajlar .....                                   | 36         |
| 2.4 Dijital Görüntü İşleme Yöntemi .....                                    | 37         |
| <b>3. TEORİK ÇALIŞMALAR.....</b>                                            | <b>43</b>  |
| 3.1 Rüzgar Tüneli Tasarımı .....                                            | 43         |
| 3.1.1 Matematiksel hesaplamalar .....                                       | 43         |
| 3.1.1.1 Reynolds ve Mach boyutsuz sayıları.....                             | 44         |
| 3.1.1.2 Test odası.....                                                     | 44         |
| 3.1.1.3 Daralma konisi .....                                                | 45         |
| 3.1.1.4 Dinlenme odası.....                                                 | 46         |
| 3.1.1.5 Yayıcı .....                                                        | 48         |
| 3.1.1.6 Rüzgar tüneli boyutları.....                                        | 49         |
| 3.2 Porselen Levha Üzerinde Isı ve Kütle Geçiş Olayları.....                | 50         |
| 3.2.1 Isı geçişi.....                                                       | 54         |
| 3.2.1.1 Zorlanmış taşınım.....                                              | 54         |
| 3.2.1.2 Doğal taşınım .....                                                 | 54         |
| 3.2.1.3 Buharlaşmalı soğutma .....                                          | 54         |
| 3.2.1.4 Toplam ısı geçişi .....                                             | 55         |
| 3.2.2 Kütle geçişi.....                                                     | 55         |
| 3.2.2.1 Zorlanmış taşınım.....                                              | 55         |
| 3.2.2.2 Doğal taşınım .....                                                 | 56         |
| 3.2.2.3 Isı ve kütle geçişi benzeşimi.....                                  | 56         |
| 3.2.3 Zamana bağlı ısı ve kütle geçişi grafikleri .....                     | 56         |
| <b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>                                          | <b>61</b>  |
| 4.1 Deneysel Çalışmaların Amacı .....                                       | 61         |
| 4.2 Deney Düzenegi .....                                                    | 61         |
| 4.2.1 Rüzgar tüneli .....                                                   | 61         |
| 4.2.2 Ortam ve tabak şartları .....                                         | 62         |
| 4.2.3 Deneylerin gerçekleştirilme yöntemi .....                             | 63         |
| 4.2.3.1 Hidrokromik kaplama .....                                           | 64         |
| 4.2.3.2 Tabağın ıslatılması .....                                           | 65         |
| 4.2.4 Ölçüm cihazları .....                                                 | 65         |
| 4.2.5 Rüzgar tüneli ölçümleri.....                                          | 66         |
| 4.2.5.1 Test odası içerisindeki ortalama hız dağılımı.....                  | 66         |
| 4.2.5.2 Test odası içerisindeki türbülans yoğunluğu .....                   | 67         |
| 4.3 Deney Sonuçlarının Analizi .....                                        | 67         |
| 4.3.1 Deneysel veriler ile matematiksel hesaplamalar .....                  | 67         |
| 4.3.1.1 Deneysel sıcaklık verileri ile matematiksel hesaplamalar.....       | 68         |
| 4.3.1.2 Dijital görüntü işleme verileri ile matematiksel hesaplamalar ..... | 71         |
| 4.3.2 Isı haritaları .....                                                  | 74         |
| 4.3.2.1 Porselen levhadan ısı geçişinin zamana bağlı ısı haritası.....      | 75         |
| 4.3.2.2 Porselen levhadan kütle geçişinin zamana bağlı ısı haritası .....   | 76         |
| <b>5. DEĞERLENDİRME, SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                             | <b>83</b>  |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                       | <b>89</b>  |
| <b>EKLER.....</b>                                                           | <b>95</b>  |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                        | <b>107</b> |

## KISALTMALAR

|            |                                             |
|------------|---------------------------------------------|
| <b>2D</b>  | : İki Boyutlu                               |
| <b>IEC</b> | : International Electrotechnical Commission |
| <b>Gr</b>  | : Grashof Sayısı                            |
| <b>Le</b>  | : Lewis Sayısı                              |
| <b>Ma</b>  | : Mach Sayısı                               |
| <b>Nu</b>  | : Nusselt Sayısı                            |
| <b>Pr</b>  | : Prandtl Sayısı                            |
| <b>Ra</b>  | : Rayleigh Sayısı                           |
| <b>Re</b>  | : Reynolds Sayısı                           |
| <b>RGB</b> | : Red-Green-Blue (Kırmızı-Yeşil-Mavi)       |
| <b>Sc</b>  | : Schmidt Sayısı                            |
| <b>SCD</b> | : Sıcak Durulama Adımı                      |
| <b>SĐD</b> | : Soğuk Durulama Adımı                      |
| <b>Sh</b>  | : Sherwood Sayısı                           |



## SEMBOLLER

|                 |                                                                  |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| $A_{cont}$      | : Daralma Konisinin Giriş Kesit Alanı                            |
| $A_{diff}$      | : Yayıcının Çıkış Kesit Alanı                                    |
| $A_{flow}$      | : Akışın Geçtiği Gerçek Kesit Alanı                              |
| $A_{hc}$        | : Bal Peteğinin Kesit Alanı                                      |
| $A_s$           | : Tabağın Kesit Alanı                                            |
| $A_{sc}$        | : Elek Telinin Kesit Alanı                                       |
| $A_{sett}$      | : Dinlenme Odasının Kesit Alanı                                  |
| $A_{ts}$        | : Test Odasının Kesit Alanı                                      |
| $c$             | : Ses Hızı                                                       |
| $C_A$           | : Mol Derişikliği (Karışimdaki A Bileşeni İçin)                  |
| $C_A^*$         | : Boyutsuz Mol Derişikliği (Karışimdaki A Bileşeni İçin)         |
| $C_{A,s}$       | : Yüzeydeki Mol Derişikliği (Karışimdaki A Bileşeni İçin)        |
| $C_{A,\infty}$  | : Serbest Akıştaki Mol Derişikliği (Karışimdaki A Bileşeni İçin) |
| $c_p$           | : Özgöl Isı Kapasitesi                                           |
| $c_{p,a}$       | : Havanın Özgöl Isı Kapasitesi                                   |
| $c_{p,p}$       | : Porselen Tabağın Özgöl Isı Kapasitesi                          |
| $C_f$           | : Yüzey Sürtünme Katsayısı                                       |
| $C_{f,x}$       | : Yerel Yüzey Sürtünme Katsayısı                                 |
| $\bar{C}_{f,L}$ | : Ortalama Yüzey Sürtünme Katsayısı (Laminer Akış İçin)          |
| $D_{AB}$        | : İkili Kütle Yayılım Katsayısı                                  |
| $D_{h,hc}$      | : Bal Peteğinin Hidrolik Çapı                                    |
| $D_{h,sett}$    | : Dinlenme Odasının Hidrolik Çapı                                |
| $D_{h,ts}$      | : Test Odasının Hidrolik Çapı                                    |
| $F_D$           | : Yüzey Sürtünme Kuvveti                                         |
| $f_x$           | : Birim Hacimdeki Gövde Kuvvetlerinin x Bileşeni                 |
| $f_y$           | : Birim Hacimdeki Gövde Kuvvetlerinin y Bileşeni                 |
| $g$             | : Yerçekimi İvmesi                                               |
| $Gr$            | : Grashof Sayısı                                                 |
| $Gr_L$          | : Grashof Sayısı (Laminer Akış İçin)                             |

|                |                                                                                             |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Gr_x$         | : Yerel Grashof Sayısı                                                                      |
| $Gr_{x,c}$     | : Kritik Grashof Sayısı                                                                     |
| $h$            | : Taşınım İle Isı Geçiş Katsayısı                                                           |
| $h_x$          | : Yerel Taşınım İle Isı Geçiş Katsayısı                                                     |
| $\bar{h}$      | : Ortalama Taşınım İle Isı Geçiş Katsayısı                                                  |
| $h_{fg}$       | : Buharlaşma Gizli Isısı                                                                    |
| $h_m$          | : Taşınım İle Kütle Geçiş Katsayısı                                                         |
| $h_{m,x}$      | : Yerel Taşınım İle Kütle Geçiş Katsayısı                                                   |
| $\bar{h}_m$    | : Ortalama Taşınım İle Kütle Geçiş Katsayısı                                                |
| $H$            | : Yükseklik                                                                                 |
| $H_{cont}$     | : Daralma Konisinin Giriş Kesitinin Yüksekliği                                              |
| $H_{sett}$     | : Dinlenme Odasının Yüksekliği                                                              |
| $H_{ts}$       | : Test Odasının Yüksekliği                                                                  |
| $I$            | : Türbülans Yoğunluğu                                                                       |
| $k$            | : Isı İletim Katsayısı                                                                      |
| $L$            | : Uzunluk                                                                                   |
| $L_c$          | : Tabanın Karakteristik Uzunluğu                                                            |
| $L_{cont}$     | : Daralma Konisinin Uzunluğu                                                                |
| $L_{gap}$      | : Dinlenme Odasındaki Bileşenlerin Arasındaki Mesafe                                        |
| $L_{hc}$       | : Bal Peteğinin Uzunluğu                                                                    |
| $L_{sett}$     | : Dinlenme Odasının Uzunluğu                                                                |
| $L_{ts}$       | : Test Odasının Uzunluğu                                                                    |
| $Le$           | : Lewis Sayısı                                                                              |
| $Ma$           | : Mach Sayısı                                                                               |
| $m_{a,s}$      | : Tabak Yüzeyindeki Hava Kütlesi                                                            |
| $m_{a,\infty}$ | : Serbest Akıştaki Hava Kütlesi                                                             |
| $m_p$          | : Tabanın Ağırlığı                                                                          |
| $m_s$          | : Tabak Yüzeyindeki Toplam Hava-Su Buharı Karışımı Kütlesi                                  |
| $m_{v,s}$      | : Tabak Yüzeyindeki Su Buharı Kütlesi                                                       |
| $m_{v,\infty}$ | : Serbest Akıştaki Su Buharı Kütlesi                                                        |
| $m_\infty$     | : Serbest Akıştaki Toplam Hava-Su Buharı Karışımı Kütlesi                                   |
| $M_A$          | : Mol Kütlesi (Karışımdaki A Bileşeni İçin)                                                 |
| $n_A$          | : Birim Zamanda ve Birim Hacimde Toplam Mol Geçiş Derişikliği (Karışımdaki A Bileşeni İçin) |

|                   |                                                                    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $\dot{n}_A$       | : Kimyasal Tepkime Nedeniyle A Bileşeni Üretimi                    |
| $\dot{n}_A''$     | : Kütle Akısı                                                      |
| $\dot{n}_{A,s}''$ | : Yüzeydeki Kütle Akısı                                            |
| $n_v$             | : Birim Zamandaki Toplam Mol Geçişi (Su Buharı İçin)               |
| $Nu$              | : Nusselt Sayısı                                                   |
| $\overline{Nu}$   | : Ortalama Nusselt Sayısı                                          |
| $Nu_F$            | : Zorlanmış Taşınım Nusselt Sayısı                                 |
| $\overline{Nu}_L$ | : Ortalama Nusselt Sayısı (Laminer Akış İçin)                      |
| $Nu_N$            | : Doğal Taşınım Nusselt Sayısı                                     |
| $Nu_x$            | : Yerel Nusselt Sayısı                                             |
| $P$               | : Basınç                                                           |
| $P^*$             | : Bağımsız Basınç                                                  |
| $P_{A,sat}$       | : Hava Kısmi Basıncı (Karışımdaki A Bileşeni İçin)                 |
| $P_{a,s}$         | : Tabak Yüzeyindeki Hava Kısmi Basıncı                             |
| $P_{a,\infty}$    | : Serbest Akıştaki Hava Kısmi Basıncı                              |
| $P_{atm}$         | : Atmosfer Basıncı                                                 |
| $P_{sat,s}$       | : Tabak Yüzeyinde Doyma Basıncı                                    |
| $P_{sat,\infty}$  | : Serbest Akıştaki Doyma Basıncı                                   |
| $P_{sett}$        | : Dinlenme Odasının Kesitinin Çevresi                              |
| $P_{ts}$          | : Test Odasının Kesitinin Çevresi                                  |
| $P_{v,s}$         | : Tabak Yüzeyindeki Su Buharı Kısmi Basıncı                        |
| $P_{v,\infty}$    | : Serbest Akıştaki Su Buharı Kısmi Basıncı                         |
| $P_\infty$        | : Serbest Akış Basıncı                                             |
| $Pr$              | : Prandtl Sayısı                                                   |
| $q$               | : Birim Zamanda ve Birim Hacimde Isı Geçişi                        |
| $\dot{q}$         | : Birim Zamanda Isı Üretimi                                        |
| $q_{conv}$        | : Birim Zamanda ve Birim Hacimde Taşınım ile Isı Geçişi            |
| $q_{evap}$        | : Birim Zamanda ve Birim Hacimde Buharlaştırma Kaynaklı Isı Geçişi |
| $q_s''$           | : Yüzeydeki Isı Akısı                                              |
| $R_u$             | : Evrensel Gaz Sabiti                                              |
| $R_{u,a}$         | : Havanın Evrensel Gaz Sabiti                                      |
| $R_{u,v}$         | : Su Buharının Evrensel Gaz Sabiti                                 |
| $Ra$              | : Rayleigh Sayısı                                                  |
| $Ra_x$            | : Yerel Rayleigh Sayısı                                            |

|                   |                                                |
|-------------------|------------------------------------------------|
| $Ra_{x,c}$        | : Kritik Rayleigh Sayısı                       |
| $Ra_L$            | : Rayleigh Sayısı (Laminer Akış İçin)          |
| $Re$              | : Reynolds Sayısı                              |
| $Re_L$            | : Reynolds Sayısı (Laminer Akış İçin)          |
| $Re_x$            | : Yerel Reynolds Sayısı                        |
| $Re_{x,c}$        | : Kritik Reynolds Sayısı                       |
| $RH_s$            | : Tabak Yüzeyindeki Bağlı Nem                  |
| $RH_\infty$       | : Serbest Akıştaki Bağlı Nem                   |
| $Sc$              | : Schmidt Sayısı                               |
| $Sh$              | : Sherwood Sayısı                              |
| $\overline{Sh}$   | : Ortalama Sherwood Sayısı                     |
| $Sh_F$            | : Zorlanmış Taşınım Sherwood Sayısı            |
| $\overline{Sh}_L$ | : Ortalama Sherwood Sayısı (Laminer Akış İçin) |
| $Sh_F$            | : Zorlanmış Taşınım Sherwood Sayısı            |
| $Sh_x$            | : Yerel Sherwood Sayısı                        |
| $T$               | : Sıcaklık                                     |
| $T^*$             | : Boyutsuz Sıcaklık                            |
| $T_f$             | : Film Sıcaklığı                               |
| $T_s$             | : Yüzey Sıcaklığı                              |
| $T_\infty$        | : Serbest Akıştaki Havanın Sıcaklığı           |
| $t$               | : Zaman                                        |
| $t_i$             | : i anı                                        |
| $t_{i+1}$         | : i+1 anı                                      |
| $T_i$             | : i anındaki sıcaklık                          |
| $T_{i+1}$         | : i+1 anındaki sıcaklık                        |
| $u$               | : Hızın x Bileşeni                             |
| $u'$              | : Ortalama Akış Hızlarının Standart Sapması    |
| $\bar{u}$         | : Ortalama Akış Hızı                           |
| $u^*$             | : Bağımsız Hızın x Bileşeni                    |
| $u_0$             | : Serbest Akış Hızı (Doğal Taşınım İçin)       |
| $u_\infty$        | : Serbest Akış Hızı                            |
| $v$               | : Hızın y Bileşeni                             |
| $v^*$             | : Bağımsız Hızın y Bileşeni                    |
| $V$               | : Yaklaşma Hızı                                |
| $V_s$             | : Yüzey Hacmi                                  |

|                   |                                                                            |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $V_{\infty}$      | : Serbest Akış Hacmi                                                       |
| $w_{a,s}$         | : Tabak Yüzeyindeki Hava Kütle Oranı                                       |
| $w_{a,\infty}$    | : Serbest Akıştaki Hava Kütle Oranı                                        |
| $w_{v,s}$         | : Tabak Yüzeyindeki Su Buharı Kütle Oranı                                  |
| $w_{v,\infty}$    | : Serbest Akıştaki Su Buharı Kütle Oranı                                   |
| $W$               | : Genişlik                                                                 |
| $W_{cont}$        | : Daralma Konisinin Giriş Kesitinin Genişliği                              |
| $W_{sett}$        | : Dinlenme Odasının Genişliği                                              |
| $W_{ts}$          | : Test Odasının Genişliği                                                  |
| $W_{ts}$          | : Test Odasının Genişliği                                                  |
| $x$               | : Karakteristik Uzunluk                                                    |
| $x^*$             | : Bağımsız x Bileşeni                                                      |
| $x_c$             | : Kritik Karakteristik Uzunluk                                             |
| $y^*$             | : Bağımsız y Bileşeni                                                      |
| $\alpha$          | : Isı Yayılma Katsayısı                                                    |
| $\alpha_{diff}$   | : Yayılcı Açısı                                                            |
| $\beta$           | : Hacimsel Isıl Genleşme Katsayısı                                         |
| $\beta_{ideal}$   | : Hacimsel Isıl Genleşme Katsayısı (İdeal Gaz İçin)                        |
| $\beta_{hc}$      | : Bal Peteğinin Porozitesi                                                 |
| $\beta_{sc}$      | : Elek Telinin Porozitesi                                                  |
| $\delta$          | : Sınır Tabaka Kalınlığı                                                   |
| $\delta_c$        | : Derişiklik Sınır Tabaka Kalınlığı                                        |
| $\delta_t$        | : Sıcaklık Sınır Tabaka Kalınlığı                                          |
| $\Delta$          | : Fark                                                                     |
| $\eta$            | : Benzerlik Değişkeni                                                      |
| $\mu$             | : Viskozite                                                                |
| $\nu$             | : Kinematik viskozite                                                      |
| $\rho$            | : Kütle Yoğunluğu                                                          |
| $\rho^*$          | : Boyutsuz Kütle Yoğunluğu                                                 |
| $\rho_A$          | : Kütle Yoğunluğu (Karışımdaki A Bileşeni İçin)                            |
| $\rho_A^*$        | : Boyutsuz Kütle Yoğunluğu (Karışımdaki A Bileşeni İçin)                   |
| $\rho_{A,s}$      | : Yüzeydeki Kütle Yoğunluğu (Karışımdaki A Bileşeni İçin)                  |
| $\rho_{A,sat}$    | : Doyma Noktasında Yüzeydeki Kütle Yoğunluğu (Karışımdaki A Bileşeni İçin) |
| $\rho_{A,\infty}$ | : Serbest Akıştaki Kütle Yoğunluğu (Karışımdaki A Bileşeni İçin)           |

|                   |                                               |
|-------------------|-----------------------------------------------|
| $\rho_{a,s}$      | : Tabak Yüzeyindeki Hava Kütle Yoğunluğu      |
| $\rho_{a,\infty}$ | : Serbest Akıdaki Hava Kütle Yoğunluğu        |
| $\rho_{v,s}$      | : Tabak Yüzeyindeki Su Buharı Kütle Yoğunluğu |
| $\rho_{v,\infty}$ | : Serbest Akıdaki Su Buharı Kütle Yoğunluğu   |
| $\rho_s$          | : Tabak Yüzeyindeki Kütle Yoğunluğu           |
| $\rho_\infty$     | : Serbest Akıda Kütle Yoğunluğu               |
| $\Phi$            | : Akış İç Sürtünme Kaybı Fonksiyonu           |
| $\Psi$            | : Akım Fonksiyonu                             |
| $\tau_s$          | : Yüzey Kayma Gerilmesi                       |
| $\tau_{s,x}$      | : Yerel Yüzey Kayma Gerilmesi                 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1: Rüzgar tüneli boyutları..... | 50 |
|-------------------------------------------|----|





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 2.1:</b> Siyaha boyama ve hidrokromik kaplama işlemi uygulanmış ve belirli bölgeleri ıslatılmış bir tabak görseli. .... | <b>3</b>  |
| <b>Şekil 2.2:</b> Örnek bulaşık makinesi çevrimi. ....                                                                           | <b>6</b>  |
| <b>Şekil 2.3:</b> Pasif/statik (fansız) kurutma sistemi örnekleri. ....                                                          | <b>9</b>  |
| <b>Şekil 2.4:</b> Fanlı açık çevrim kurutma sistemi örnekleri. ....                                                              | <b>10</b> |
| <b>Şekil 2.5:</b> Fanlı kapalı çevrim kurutma sistemi örnekleri. ....                                                            | <b>11</b> |
| <b>Şekil 2.6:</b> Alternatif kurutma sistemi örnekleri. ....                                                                     | <b>12</b> |
| <b>Şekil 2.7:</b> Isı pompalı bulaşık makinelerinde kurutma çevrimi [4]. ....                                                    | <b>13</b> |
| <b>Şekil 2.8:</b> Düz bir levha üzerinde hidrodinamik sınır tabakanın gelişimi [14]. ....                                        | <b>15</b> |
| <b>Şekil 2.9:</b> Hız, sıcaklık ve derişiklik sınır tabaka gelişimleri [14]. ....                                                | <b>16</b> |
| <b>Şekil 2.10:</b> Doğal taşınımda kuvvet dengesi (a) [15] ve hız ve sıcaklık sınır tabakaları (b) [14]. ....                    | <b>26</b> |
| <b>Şekil 2.11:</b> Doğal taşınım sınır tabakasında laminlerden türbölanslı akışa geçiş [14]. ....                                | <b>30</b> |
| <b>Şekil 2.12:</b> Doğal, zorlanmış ve karma akış (a), destek, karşıt ve çapraz akış (b) [14]. ....                              | <b>32</b> |
| <b>Şekil 2.13:</b> Açık çevrim (a) ve kapalı çevrim (b) rüzgar tünelleri [26]. ....                                              | <b>34</b> |
| <b>Şekil 2.14:</b> Emme tipi (a) ve basma tipi (b) açık çevrim rüzgar tünelleri [28]. ....                                       | <b>35</b> |
| <b>Şekil 2.15:</b> Kapalı çevrim rüzgar tüneli [28]. ....                                                                        | <b>35</b> |
| <b>Şekil 2.16:</b> Dijital görüntü işleme [32]. ....                                                                             | <b>37</b> |
| <b>Şekil 2.17:</b> Piksel yoğunluk ölçeği [34]. ....                                                                             | <b>38</b> |
| <b>Şekil 2.18:</b> Bir görselin orijinal ve gri tonlamalı formata dönüştürölmüş hali [36]. .                                     | <b>38</b> |
| <b>Şekil 2.19:</b> Bir görselin orijinal ve bulanıklaştırılmış hali [32]. ....                                                   | <b>38</b> |
| <b>Şekil 2.20:</b> Bir görselde bulunan dairesel şekillerin tespiti [40]. ....                                                   | <b>39</b> |
| <b>Şekil 2.21:</b> Bir görseli çember şeklinde maskeleme ve kırpma [42]. ....                                                    | <b>40</b> |
| <b>Şekil 2.22:</b> Piksel yoğunluğu analizi – yoğunluk matrisi [31]. ....                                                        | <b>41</b> |
| <b>Şekil 2.23:</b> Piksel yoğunluğu dağılımı – histogram [32]. ....                                                              | <b>41</b> |
| <b>Şekil 2.24:</b> Bir görselin ısı haritasını çıkartma [32]. ....                                                               | <b>41</b> |
| <b>Şekil 3.1:</b> Emme tipi açık çevrim rüzgar tüneli bölümleri [45]. ....                                                       | <b>43</b> |
| <b>Şekil 3.2:</b> Test odası [26]. ....                                                                                          | <b>44</b> |

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.3:</b> Daralma konisi [26].                                                                                                                                    | 45 |
| <b>Şekil 3.4:</b> Dinlenme odası (a) [26], bal peteği ve elek telleri (b) [53].                                                                                           | 46 |
| <b>Şekil 3.5:</b> Bal petekleri ve kayıp katsayıları [25].                                                                                                                | 47 |
| <b>Şekil 3.6:</b> Elek tellerinin akım kalitesine etkisi [59].                                                                                                            | 48 |
| <b>Şekil 3.7:</b> Yayıcı [27, 63].                                                                                                                                        | 49 |
| <b>Şekil 3.8:</b> Karma ve doğal taşınım ile ısı ve kütle geçişi hesaplamalarının akış şeması.                                                                            | 58 |
| <b>Şekil 3.9:</b> Karma taşınım durumunda tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim.                                     | 59 |
| <b>Şekil 3.10:</b> Doğal taşınım durumunda tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim.                                    | 60 |
| <b>Şekil 4.1:</b> Tez kapsamında tasarlanan ve üretilen rüzgar tüneli.                                                                                                    | 62 |
| <b>Şekil 4.2:</b> Tabak üzerinden toplanan sıcaklık ölçüm noktaları.                                                                                                      | 62 |
| <b>Şekil 4.3:</b> Yapılan deneylerdeki tabak sıcaklıkları, ortam sıcaklıkları ve bağıl nemi.                                                                              | 63 |
| <b>Şekil 4.4:</b> Tabak üzerindeki kurumayı kayıt eden düzenek.                                                                                                           | 64 |
| <b>Şekil 4.5:</b> Zorlanmış taşınım ile kurutmada 1. (a) ve 1800. (b) saniyelerdeki görseller.                                                                            | 64 |
| <b>Şekil 4.6:</b> Test odasından alınan hız ölçüm noktaları.                                                                                                              | 66 |
| <b>Şekil 4.7:</b> Test odası içerisindeki hız dağılımı.                                                                                                                   | 66 |
| <b>Şekil 4.8:</b> Test odası içerisindeki türbülans yoğunluğu.                                                                                                            | 67 |
| <b>Şekil 4.9:</b> Karma taşınım koşullarında tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim (karşılaştırmalı).                | 69 |
| <b>Şekil 4.10:</b> Doğal taşınım koşullarında tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim (karşılaştırmalı).               | 70 |
| <b>Şekil 4.11:</b> Bir görüntüden dairesel formda bir tabağın kırılması için uygulanan dijital görüntü işleme adımları.                                                   | 71 |
| <b>Şekil 4.12:</b> 0., 15. ve 30. dakikalardaki piksel yoğunluğu dağılımları.                                                                                             | 72 |
| <b>Şekil 4.13:</b> Karma taşınım koşullarında buharlaşma miktarının zamana bağlı değişiminin karşılaştırmalı grafiği.                                                     | 73 |
| <b>Şekil 4.14:</b> Doğal taşınım koşullarında buharlaşma miktarının zamana bağlı değişiminin karşılaştırmalı grafiği.                                                     | 74 |
| <b>Şekil 4.15:</b> Tabak üzerinden toplanan sıcaklık ölçüm noktaları.                                                                                                     | 75 |
| <b>Şekil 4.16:</b> Çapraz akış kaynaklı karma taşınım durumu [15].                                                                                                        | 75 |
| <b>Şekil 4.19:</b> Bir görüntüden dairesel formda bir tabağın kırılması ve renk yoğunluğunun ısı haritasının çıkartılması için uygulanan dijital görüntü işleme adımları. | 77 |
| <b>Şekil 4.20:</b> Çapraz akış kaynaklı karma taşınım durumu [15].                                                                                                        | 78 |

|                                                                                                                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Şekil 4.17:</b> Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabak sıcaklık ısı haritaları (karma taşınım). ....              | <b>79</b>  |
| <b>Şekil 4.18:</b> Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabak sıcaklık ısı haritaları (doğal taşınım). ....              | <b>80</b>  |
| <b>Şekil 4.21:</b> Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabaktaki buharlaşma miktarı ısı haritaları (karma taşınım)..... | <b>81</b>  |
| <b>Şekil 4.22:</b> Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabaktaki buharlaşma miktarı ısı haritaları (doğal taşınım)..... | <b>82</b>  |
| <b>Şekil 5.1:</b> Tabak üzerindeki kurumayı kayıt eden düzenek. ....                                                                                                    | <b>83</b>  |
| <b>Şekil 5.2:</b> Karma taşınım durumunda tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim. ....                              | <b>84</b>  |
| <b>Şekil 5.3:</b> Karma taşınım koşullarında buharlaşma miktarının zamana bağlı değişiminin karşılaştırmalı grafiği. ....                                               | <b>84</b>  |
| <b>Şekil 5.4:</b> 0. ve 5. dakikalar için tabak sıcaklığı ısı haritaları (karma taşınım). ....                                                                          | <b>85</b>  |
| <b>Şekil 5.5:</b> 0. ve 5. dakikalar için buharlaşma miktarı ısı haritaları (karma taşınım)..                                                                           | <b>86</b>  |
| <b>Şekil A.1:</b> Karma taşınım sıcaklık ısı haritaları. ....                                                                                                           | <b>96</b>  |
| <b>Şekil A.2:</b> Doğal taşınım sıcaklık ısı haritaları. ....                                                                                                           | <b>98</b>  |
| <b>Şekil B.1:</b> Karma taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları. ....                                                                                                 | <b>101</b> |
| <b>Şekil B.2:</b> Doğal taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları.....                                                                                                  | <b>104</b> |



# **DİKEY BİR PORSELEN LEVHADAN TAŞINIMLA EŞZAMANLI ISI VE KÜTLE GEÇİŞİ OLAYLARININ TEORİK&AMPİRİK BAĞINTILAR VE DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME KULLANILARAK İNCELENMESİ**

## **ÖZET**

Bulaşık makineleri, evlerdeki veya ticari işletmelerdeki bulaşıkların otomatik olarak yıkanmasını ve kurutulmasını sağlayan cihazlardır. Kullanıcı tarafından yüklerin makine içerisine yerleştirilmesi ve cihazın çalıştırılmasıyla beraber; sıcaklık, kimyasal etki, mekanik etki, süre ve su yardımıyla bulaşıkların otomatik olarak yıkanması, durulanması ve kurutulması işlemleri sırasıyla gerçekleşmektedir.

Yıkama programları incelendiğinde, genellikle program süresinin üçte birinden fazlasının kurutma adımına ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca, elektrik tüketiminin büyük bir bölümüne yıkama sıcaklığı ve kurutma başlangıç sıcaklığı sebep olmaktadır. Bulaşık makinesi içerisindeki yüklerin kuruma mekaniği hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak adına yapılan incelemeler yardımıyla daha etkin kurutma sistemleri tasarlamak mümkündür.

Bulaşık makinelerinde gerçekleşen kurutma işleminin daha iyi anlaşılması için, makine içerisindeki yüklerde gerçekleşen eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olaylarının detaylı analizleri gereklidir. Bu sebeple çalışmada; dikey bir porselen levhadan taşınım ile eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları, teorik ve ampirik bağıntılar yardımıyla matematiksel olarak ve dijital görüntü işleme yardımıyla deneysel olarak incelenmektedir. Matematiksel modeller, dijital görüntü işleme ile elde edilen sonuçları doğrulamak amacıyla kullanılmaktadır. Dijital görüntü işleme çalışmaları ile ise, levha üzerindeki sıcaklık değişimini ve buharlaşma miktarını zamana bağlı ısı haritaları (heatmap) elde edilmektedir.

Tez çalışmalarıyla, teknik özellikleri ve donanımları çok yüksek bilgisayarla dahi elde edilmesi güç olan ve uzun vakitler alan zamana bağlı levha sıcaklığı ve buharlaşma miktarı ısı haritalarını dijital görüntü işleme ile gerçekleştiren bir metot geliştirmek; bu vesile, ile bulaşık makinelerinde gerçekleşen kurutma işleminin daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve kurutma sistemi tasarımı çalışmalarına bilgi sağlamak amaçlanmaktadır.

Literatür araştırması; bulaşık makinesi ve bulaşık makinesinde kurutma, kurutma (taşınım ile ısı ve kütle geçişi, buharlaşma), rüzgar tünelleri ve dijital görüntü işleme olmak üzere dört ana başlık altında incelenmektedir. Kurutma bölümünde; taşınım ile ısı ve kütle geçişi ile beraber buharlaşmalı soğutmaya da yer verilmiştir.

Taşınım olayı, iletim/difüzyon gibi akışkanın rastgele hareketi ve adveksiyon gibi akışkanın yığın hareketi olaylarını kapsar. İletimle ısı geçişi olayında hareketsiz bir ortam varken, taşınım ise ortam hareketlidir ve daha karmaşık çözümlere ihtiyaç vardır. Isı taşınımı, esasen bir yüzey ile hareketli ortam arasındaki ısı iletimi olarak tanımlanabilir. Taşınım olayında ısı ve kütle geçişi yüzeydeki hareketli akışkanın özelliklerinden etkilendiğinden; taşınım ile ısı ve kütle geçişi hesaplamalarında

kütlenin, enerjinin ve maddenin korunum denklemleri ve Newton'un 2. Hareket yasasının birlikte ve eşzamanlı olarak çözülmesi gerekir. Fakat hareketli akışkanın termodinamik özelliklerinin sabit olarak kabul edilebildiği durumlarda; ilk adımda kütlenin korunumu (süreklilik) ve momentum denklemleri (Newton'un 2. hareket yasası) birlikte çözüldükten sonra, basınç ve hız bileşenleri enerjinin korunumu (termodinamiğin 1. Yasası) ve maddenin korunumu ifadeleri tek başına çözümlenebilir.

Tez kapsamında; ısıtılarak 40°C sıcaklığına çıkartılmış, 19 cm çapındaki dairesel kesitli dikey (90°) bir porselen levha üzerinden; 23°C sıcaklığa, %70 bağıl nem ve 0,2 m/s hıza sahip hava akışının sağlandığı koşullar için çalışmalar yapılmıştır. Doğal taşınım şartlarının incelendiği durumda ise, fan durdurulmuş ve zorlanmış akış şartı kaldırılmıştır. Bu şartlar altındaki düz levha üzerindeki akış incelendiğinde; akışın hem doğal hem de zorlanmış taşınım durumları için laminar olduğu görülmüştür. Kullanılacak olan teorik ve ampirik bağıntılar; laminar sınır tabaka denklemlerinin, doğal ve zorlanmış taşınım sınır şartları için benzerlik çözümlemeleri yardımıyla türetilmektedir. Zorlanmış taşınım koşulları incelendiğinde; akışın karma (doğal ve zorlanmış eşzamanlı) taşınım olarak değerlendirilmesine karar verilmiştir.

Teorik ve ampirik bağıntılarla yapılan incelemeler iki adımlı olarak yapılmıştır. İlk adımda eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları, doğal ve karma taşınım ile ısı ve kütle geçişi ve buharlaşmalı soğutma bağıntılarının eşzamanlı olarak çözülmesiyle incelenmiştir. İkinci adımda ise, levha sıcaklığı deneysel verilerden alınarak yalnızca kütle geçişi olayı incelenmiştir.

Bu olayların görsel olarak incelenebilmesi için, deneysel yöntemler kullanılabilir. Isıtılarak ısıtılan model üzerinden sıcaklık verileri toplanarak ve modelin ıslaklığının/kuruluğunun zamana bağlı olarak gözlenebileceği özel boya işlemleri uygulanarak kurutma olayları gözlemlenebilir/yorumlanabilir.

Boya işlemlerinden ilki, levhanın siyaha boyanma işlemidir. Siyaha boyamaktaki amaç, diğer boya işleminin etkisini arttırmaktır. İkinci boya işlemi, levhanın hidrokromik boya ile kaplanmasıdır. Hidrokromik boya sayesinde; ısıtılmış olan levha, deney başlangıcında -hidrokromik boya ısladığında şeffaflaştığından- siyah bir yüzeye sahiptir. Deney boyunca kuruma olayı gerçekleştiğinden, levha yüzeyinde kuruyan bölgeler kademeli olarak gri tonlarından beyaz rengine dönmektedir.

Yapılan deneylerde, levhanın beş noktasından sıcaklık ölçümü alınmıştır. Ek olarak deneylerde kullanılan porselen levhanın kurumasının incelenebilmesi adına, levhaya özel boya işlemleri uygulanmıştır. Boya işlemleri sayesinde, levha yüzeyinde kuruyan bölgeler zamanla koyu gri tonlarından -kademeli olarak- beyaz rengine dönmektedir.

Deneyleri gerçekleştirmek amacıyla; şeffaf malzemeden üretilmiş ve içerisinde görüntü kaydı alınabilen bir test odasına sahip, düşük hızlı emme tipi açık çevrim bir rüzgar tüneli tasarlanmıştır. Matematiksel hesaplamaları yapılan rüzgar tünelinin, üretim aşamasından önce hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapılmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen çıktılar da benzer şekilde iki adımlı olarak incelenmiştir. İlk olarak, levhanın beş ayrı noktasından toplanan sıcaklık verileri görselleştirilerek levha üzerinde zamana bağlı sıcaklık değişiminin incelendiği ısı haritaları oluşturulmuştur. Ardından, levha üzerindeki kurumaya bağlı renk değişiminin gözlemlenebilmesi için, şeffaf test odası içerisindeki levhanın profesyonel bir dijital kamera ile belirli periyotlarla fotoğrafları alınmıştır. Fotoğrafların dijital görüntü işleme yardımıyla analiz edilmesi sayesinde, levhanın kuruma karakteristiğine

dair bilgi veren ve levha üzerindeki zamana bağılı buharlaşma miktarının incelendiği ısı haritaları oluşturulmuştur. Her iki inceleme işleminde de Python programlama dili kullanılmıştır.

Son olarak, teorik ve ampirik bağıntılar ile yapılan incelemelerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sıcak ve ıslak bir dikey porselen levhadan doğal ve zorlanmış taşınım ile eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları yorumlanmıştır. Bunun için levha sıcaklığı, buharlaşma hızı ve buharlaşma miktarı grafikleri zamana bağılı olarak çizdirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Levha sıcaklığı ve buharlaşma hızı grafikleri, tamamen matematiksel model ile ve deneysel veriler ile yapılan hesaplamaların sonuçlarını vermektedir. Buharlaşma miktarı grafiklerinde ise, ek olarak dijital görüntü işleme sonuçlarından elde edilen eğri de grafiğe eklenmiştir.





# **INVESTIGATION OF CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER PHENOMENA FROM A VERTICAL PLATE BY USING EMPIRICAL CORRELATIONS AND DIGITAL IMAGE PROCESSING**

## **SUMMARY**

Dishwashers are devices that automatically wash and dry dishes in households or commercial establishments. By loading the dishes into the machine and starting the device, the dishes are automatically washed, rinsed, and dried through the use of temperature, chemical action, mechanical action, time, and water.

When examining the washing programs, it is observed that more than one-third of the program duration is typically allocated to the drying step. Additionally, washing temperature and initial drying temperature contribute to a significant portion of the electricity consumption. Through investigations conducted to gain more knowledge about the drying mechanism of loads inside the dishwasher, it is possible to design more efficient drying systems.

To better understand the drying process in dishwashers, detailed analyses of simultaneous heat and mass transfer phenomena occurring in the loads inside the machine are necessary. Therefore, in this study, the simultaneous heat and mass transfer phenomena through convection from a vertical porcelain plate are examined mathematically -with the help of theoretical and empirical correlations- and experimentally with the help of digital image processing. Mathematical models are used to validate the results obtained by digital image processing. With digital image processing studies, time-dependent heatmaps of the temperature change and evaporation amount on the plate are obtained.

With the thesis, it is aimed to develop a method that performs time-dependent plate temperature and evaporation amount heat maps with digital image processing, which is difficult to obtain even with a computer with very high technical features and hardware, and takes a long time.

The literature review covers four main topics: dishwashers and drying in dishwashers, drying (convective heat and mass transfer, evaporation), wind tunnels, and digital image processing. In the drying section, convective heat and mass transfer, as well as evaporative cooling, are also discussed.

Transport phenomena encompass random motion of fluid such as diffusion and advection, which involves bulk fluid motion. While conduction heat transfer occurs in a stagnant medium, convection involves a moving medium and requires more complex solutions. Heat transfer by conduction can essentially be defined as the transfer of heat between a surface and a moving medium. In transport phenomena, heat and mass transfer are influenced by the characteristics of the moving fluid on the surface. Therefore, in calculations of convective heat and mass transfer, the conservation equations of mass, energy, and momentum, as well as Newton's second law of motion, need to be solved simultaneously and concurrently. However, in cases where the

thermophysical properties of the moving fluid can be assumed constant, after solving the conservation of mass (continuity) and momentum equations (Newton's second law of motion) together in the first step, the pressure and velocity components, as well as the expressions for the conservation of energy (first law of thermodynamics) and mass, can be solved separately.

In the scope of this thesis, studies were conducted under conditions where a vertical porcelain plate with a circular cross-section of 19 cm diameter was wetted and heated to a temperature of 40°C. The air flow is at 23°C, 70% relative humidity, and has a velocity of 0.2 m/s. In the case of natural convection conditions, the fan was turned off, and forced flow conditions were eliminated. When the flow over the flat plate under these conditions was examined, it was observed that the flow was laminar for both natural and forced convection cases. The theoretical and empirical correlations are derived through similarity solutions for laminar boundary layer equations for natural and forced convection boundary conditions. When forced convection conditions were examined, it was decided to consider the flow as mixed (simultaneous natural and forced convection).

The analyses conducted with theoretical and empirical correlations were carried out in two steps. In the first step, simultaneous heat and mass transfer phenomena, natural and mixed convection heat and mass transfer, and evaporative cooling correlations were solved simultaneously. In the second step, only mass transfer phenomena were investigated by using experimental data for plate temperature.

In order to visually examine these phenomena, experimental methods can be used. Temperature data can be collected from the heated and wetted model under investigation, and special paint processes can be applied to observe/interpret the drying events where the wetness/dryness of the model can be observed over time.

The first painting process involves painting the plate black. The purpose of painting it black is to enhance the effect of the subsequent paint process. The second painting process involves coating the plate with hydrochromic coating. With the help of hydrochromic coating, the wetted plate initially has a black surface because it becomes transparent when wetted. As drying occurs during the experiment, the dried areas on the plate gradually change from dark gray to white.

In the experiments, temperature measurements were taken from five points on the plate. Additionally, special paint processes were applied to the porcelain plate used in the experiments to examine its drying. Thanks to the paint processes, the areas on the plate that dry over time change from dark gray to white in a gradual manner.

To conduct the experiments, a low-speed open-loop wind tunnel with a test chamber made of transparent material capable of capturing image recordings has been designed. Prior to production, computational fluid dynamics analysis was performed on the wind tunnel.

The outputs obtained from the experimental studies were also analyzed in a similar two-step manner. Firstly, temperature data collected from five different points on the plate were visualized to create heatmaps that examine the temperature change on the plate over time. Then, to observe the color change on the plate due to drying, the plate inside the transparent test chamber was photographed at specific intervals using a professional digital camera. By analyzing the photos using digital image processing, heatmaps were created that provide information about the drying characteristic of the

plate and examine the amount of evaporation on the plate over time. Python programming language was used for both analysis processes.

Lastly, the results obtained from the theoretical and empirical correlations and the experimental studies were compared and examined. The simultaneous heat and mass transfer phenomena by natural and forced convection from a hot and wet vertical porcelain plate were interpreted. For this purpose, graphs of plate temperature, evaporation rate, and evaporation amount were plotted over time and compared.

The graphs of plate temperature and evaporation rate provide the results of calculations made entirely based on the mathematical model and experimental data. In the evaporation amount graphs, an additional curve obtained from the results of digital image processing was also added to the graph.





## 1. GİRİŞ

Bulaşık makineleri, evlerdeki veya ticari işletmelerdeki bulaşıkların otomatik olarak yıkanmasını ve kurutulmasını sağlayan cihazlardır. Kullanıcı tarafından yüklerin makine içerisine yerleştirilmesi ve cihazın çalıştırılmasıyla beraber; sıcaklık, kimyasal etki, mekanik etki, süre ve su yardımıyla bulaşıkların otomatik olarak yıkanması, durulanması ve kurutulması işlemleri sırasıyla gerçekleşmektedir [1, 2].

Otomatik bulaşık makinesi, farklı malzemelerden (metaller ve metal olmayanlar) yapılmış 40-50 farklı bileşene sahip, su kullanan ve enerji tüketen bir makinedir. Son 70 yılda, özellikle gelişmiş dünya ülkelerinde modern şehirli ev mutfağında konforu artıran, kolaylık sağlayan, zaman kazandıran bir beyaz eşya rolünde evrilmiştir [3].

Bulaşık makineleriyle beraber kullanıcıların da beklentileri evrilmiştir. Daha az su ve enerji tüketen, daha kısa yıkama programlarına sahip, çevreci ve kullanıcı dostu ürünler pazarda avantaj sağlamaktadır. Yıkama programları incelendiğinde, genellikle program süresinin üçte birinden fazlasının kurutma adımına ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca, elektrik tüketiminin %80 ila 90'ını yıkama sıcaklığı ve kurutma başlangıç sıcaklığı oluşturmaktadır [4].

Bulaşık makinesi içerisindeki yüklerin kuruma mekaniği hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak adına yapılan incelemeler yardımıyla daha etkin kurutma sistemleri tasarlamak mümkündür. Ancak yüklerin üzerinde gerçekleşen kurutma olayları oldukça karmaşıktır ve üzerinde matematiksel veya nümerik modeller kurmak bir o kadar zor ve maliyetlidir.

### 1.1 Tezin Amacı

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda; dikey bir porselen levhadan (tatlı tabağı) doğal ve zorlanmış taşınım ile eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları, teorik ve ampirik bağıntılar yardımıyla matematiksel olarak, dijital görüntü işleme yardımıyla deneysel olarak incelenmektedir. Matematiksel modeller, dijital görüntü işleme ile elde edilen sonuçları doğrulamak amacıyla kullanılmaktadır. Dijital görüntü işleme çalışmaları ile

ise, levha üzerindeki sıcaklık değişimini ve buharlaşma miktarını zamana bağlı ısı haritaları (heatmap) elde edilmektedir.

Tez çalışmalarıyla, teknik özellikleri ve donanımları çok yüksek bilgisayarla dahi elde edilmesi g olan ve uzun vakitler alan zamana bağlı levha sıcaklığı ve buharlaşma miktarı ısı haritalarını dijital görüntü işleme ile gerçekleştiren bir metod geliştirmek; bu vesile, ile bulaşık makinelerinde gerçekleşen kurutma işleminin daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve kurutma sistemi tasarımı çalışmalarına bilgi sağlamak amaçlanmaktadır. Ek olarak, çalışmaları yürütmek üzere emme tipi açık çevrim bir sesaltı rüzgar tüneli tasarlanmış ve laboratuvar alt yapısına kazandırılmıştır.

## **1.2 Hipotez**

Bulaşık makineleri içerisinde, ıslak ve sıcak yüklerde eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları gerçekleşir. Bu olayları görsel olarak incelenebilmesi için, bilgisayar simülasyonlarına ek olarak dijital görüntü işleme teknikleri de kullanılabilir. İncelenecek olan model üzerinden -ısıt çiftler yardımıyla- sıcaklık verileri toplanarak ve modelin ıslaklığının/kuruluğunun zamana bağlı olarak gözlenebileceği özel boya işlemleri uygulanarak kurutma olayları -dijital bir kamera yardımıyla- gözlemlenebilir. Böylece, çok kısa sürelerde ve düşük maliyetlerle levha üzerindeki eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları yorumlanabilir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tezde, ısıtılmış ve ıslatılmış porselen bir levhadan zorlanmış taşınım ile ısı ve kütle geçişi olayları teorik ve ampirik bağıntılar yardımıyla matematiksel, dijital görüntü işleme yardımıyla deneysel olarak incelenmektedir. Tez ile elde edilen levha üzerindeki sıcaklık değişimini ve buharlaşma miktarını zamana bağlı ısı haritaları, bulaşık makinesinde kurutma işleminin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Bu amaçla; şeffaf bir test odasına sahip, düşük hızlı ve açık çevrim bir rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen ve sıcak su yardımıyla ıslatılarak ısıtılan porselen bir tabak ile deneyler yapılmış ve dijital görüntü işleme ile sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yapılan deneylerde kullanılan porselen tabağın kurumasının incelenebilmesi adına, tabağa iki farklı boya işlemi uygulanmıştır. Bunlardan ilki tabağın siyaha boyanma işlemidir, siyaha boyamaktaki amaç diğer boya işleminin etkisini arttırmaktır. İkinci boya işlemi, tabağın hidrokromik boya ile kaplanmasıdır. Hidrokromik boyalar, kuruyken ve ıslatıldıklarında farklı görünümlere sahip olan boyalardır. Tez kapsamında kullanılan hidrokromik boyanın özelliği gereği, yüzey kuruyken boyanın rengi beyazdır ve tabak beyaz görünmektedir. Yüzey ıslatıldığında ise, hidrokromik boya şeffaflaşmaktadır ve tabak yüzeyinin rengi, ilk boya işleminde uygulanan siyah rengine dönmektedir.



**Şekil 2.1:** Siyaha boyama ve hidrokromik kaplama işlemi uygulanmış ve belirli bölgeleri ıslatılmış bir tabak görseli.

Şekil 2.1, tezde kullanılan boya işlemleri uygulanmış ve belirli bölgeleri ıslatılmış bir tabağa ait görseldir. Tezde yapılan çalışmalarda ıslatılmış olan tabak, deney başlangıcında -hidrokromik boya ıslandığında şeffaflaştığından- koyu gri/siyah bir

yüzeye sahiptir. Deney boyunca zorlanmış taşınım ile kuruma olayı gerçekleştiğinden, tabak yüzeyinde kuruyan bölgeler kademeli olarak gri tonlarından beyaz rengine dönmektedir.

Tabak üzerindeki kurumaya bağlı renk değişiminin gözlemlenebilmesi için, şeffaf test odası içerisindeki tabağın profesyonel bir kamera ile belirli periyotlarla fotoğrafları alınmıştır. Fotoğrafların dijital görüntü işleme yardımıyla analiz edilmesi sayesinde, tabağın kuruma karakteristiğine dair bilgi edinilmiştir.

Bu sebeple literatür araştırması; bulaşık makinesi ve bulaşık makinesinde kurutma, kurutma (buharlaşıma ile kütle geçişi), rüzgar tünelleri ve dijital görüntü işleme olmak üzere dört ana başlık altında incelenmektedir.

Bulaşık makinesi ve bulaşık makinesinde kurutma bölümünde; ilk olarak bulaşık makinesinin temel bölümleri ve çalışma prensibinden iki ayrı başlık altında bahsedilmektedir. Bulaşık makinesinin çalışma prensibi başlığının altında, bulaşık makinesinde kurutma konusuna giriş yapılmaktadır ve süzülme, nem atma (tahliye, yoğunlaşma, nem tutma) ve buharlaşma alt başlıklarıyla konunun detayına girilmektedir. Çalışma prensibi başlığından sonra; pasif kurutma, açık çevrim kurutma ve kapalı çevrim kurutma alt başlıkları ile incelenen bulaşık makinelerinde kullanılan kurutma sistemleri başlığı gelmektedir. Son olarak, bulaşık makinesinde kurutma performans ölçümü için kullanılan metotlar bir başlık altında anlatılmaktadır.

Kurutma (buharlaşıma ile kütle geçişi) bölümünde; kurutma işlemi hakkında bilgi aktarıldıktan sonra, tezin ana odağı olan sert yüzey kurutma konusuna geçilmektedir. Sert yüzey kurutma başlığı, doğal taşınım ve zorlanmış taşınım ile ısı ve kütle geçişi olmak üzere iki alt başlık ile dikey levha özelinde detaylandırılmaktadır.

Rüzgar tünelleri bölümünde, rüzgar tünelleri çalışma hızlarına ve çevrim türlerine göre olmak üzere iki ana başlığa ayrılmaktadır. Çalışma hızlarına göre rüzgar tünelleri ses hızı altı, ses hızı, ses hızı üstü, ses hızından hızlı rüzgar tünelleri alt başlıkları altında incelenirken; çevrim türlerine göre rüzgar tünelleri, açık çevrim rüzgar tünelleri ve kapalı çevrim rüzgar tünelleri alt başlıkları altında incelenmiştir. Ardından, tez çalışmasında kullanılmak üzere rüzgar tüneli seçimi yapılmıştır.

Literatür araştırmasının son bölümünü dijital görüntü işleme konusu oluşturmaktadır. Bu bölümde, dijital görüntü işleme hakkında genel bilgiler verildikten sonra, tezde kullanılan tekniklere dair detaylar aktarılmaktadır.

## **2.1 Bulaşık Makinesi ve Bulaşık Makinesinde Kurutma**

Bu bölümde, bulaşık makinelerinin temel bölümleri ve çalışma prensibi anlatılarak bulaşık makineleri hakkında genel bilgiler verilmesinin ardından, bulaşık makinelerinde kullanılan kurutma sistemleri ve kurutma performans ölçüm metotları aktarılmaktadır.

### **2.1.1 Bulaşık makinesinin temel bölümleri**

Bulaşık makineleri temelde yıkama grubu, kurutma grubu, kazan grubu, kapı ve ön panel olmak üzere bölümlere ayrılabilir [5].

Yıkama grubu, yıkama işlemini gerçekleştiren bileşenleri içeren gruptur. Su giriş ve çıkış vanaları, sirkülasyon ve tahliye pompaları, sprej kolları/pervaneler, ısıtıcı, deterjan haznesi, filtreler ve su yumuşatma ünitesi bu grubun ana bileşenleridir [5].

Kurutma grubu, kurutma işlemini gerçekleştiren bileşenleri içerir ve makinede kullanılan kurutma sistemine göre farklılık gösterir. Yoğuşma/hava kanalları, fan, nem tutucu malzemeler (zeolit vb.), ısıtıcı, su cepleri ve otomatik kapı açma mekanizmaları gibi çeşitli bileşenlere sahip olabilir [5].

Kazan grubu, kapı ve ön panelde; gövde, şasi, yan kapaklar, üst tabla, sepetler, su haznesi, keçe, bitüm, kapı, panel, elektronik kartlar ve sensörler (sıcaklık, su seviyesi, taşma, kir/iletkenlik, nem vb.) bulunur [5].

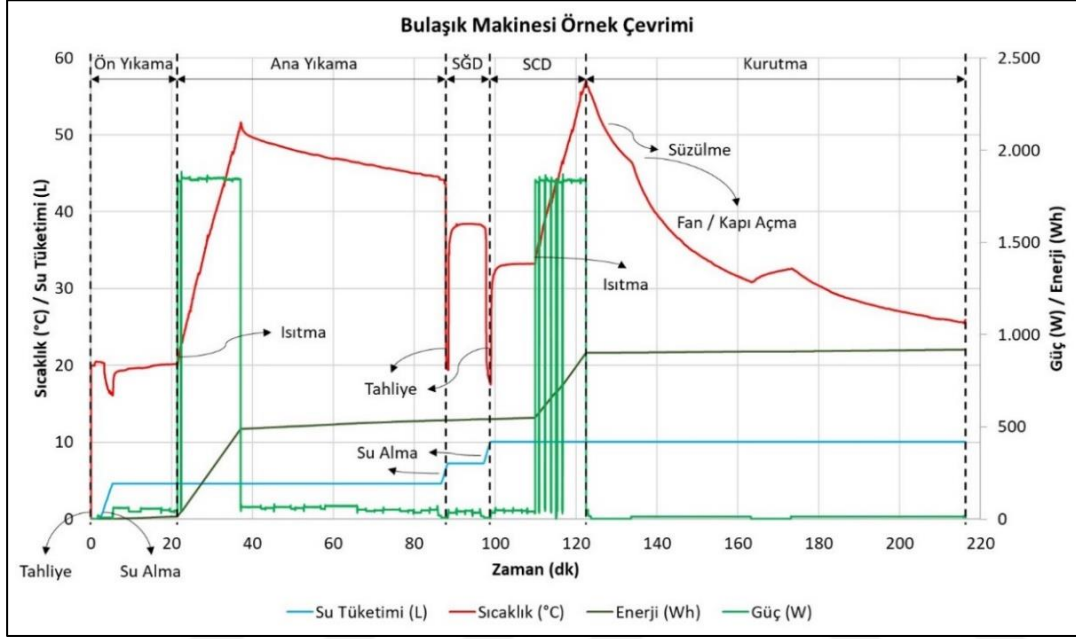
### **2.1.2 Bulaşık makinesinin çalışma prensibi**

Bulaşık makineleri, içerisindeki bulaşık yüklerini -elektrik enerjisini mekanik ve termal enerjiye dönüştüren yıkama ve kurutma adımları vasıtasıyla [6]- “ıslak ve kirli” durumundan “ıslak, kirleri alınmış ve çok sıcak” duruma, oradan da 'kuru, görsel olarak temiz ve oda sıcaklığında” durumuna doğru bir yolculuğa çıkartır. Uygulamalı termodinamik, akışkanlar mekaniği ve malzeme bilimlerindeki buluşları harmanlayan bir makinedir [3].

Bulaşık makinelerinin çalışma çevrimi üreticilere ve yıkama programlarına göre değişiklik göstermekle beraber; genellikle ön yıkama, ana yıkama, durulama ve kurutma adımlarından oluşur [2].

Şekil 2.2, örnek bir bulaşık makinesi çevrimini temsil etmektedir. Çalışma çevriminin başlangıcında; bir önceki yıkamadan kalmış olma ihtimali olan suyun uzaklaştırılması

adına, tahliye pompası yardımıyla su tahliyesi gerçekleşir. Yıkama adımlarında sıcaklık, süre, mekanik etki ve kimyasal etki (Sinner Döngüsü) yardımıyla yüklerin temizlenmesi sağlanır [1]. Yıkama adımlarının ardından, yükler üzerindeki deterjan kalıntılarının uzaklaştırılmalarını sağlayan durulama adımları (soğuk ve sıcak) ve bulaşıkların kurutulmasını sağlayan kurutma adımı gelmektedir.



**Şekil 2.2:** Örnek bulaşık makinesi çevrimi.

Ön yıkama adımı, çalışma çevriminin ilk adımıdır. Su giriş vanasından makine içerisine alınan su, sirkülasyon pompası ve sprej kolları yardımıyla sepetlere yerleştirilen kirli yüklere püskürtülür. Sprej kolları, üzerine yerleştirilmiş farklı açılı nozüllerden spreylenen suyun oluşturduğu kuvvet ile dönmektedir. Bu adım yardımıyla, tüm yükler ıslatılır ve yükler üzerindeki kirlerin yumuşaması sağlanır. Bu adım aynı zamanda yüksek sıcaklıkta sökülmesi zorlaşan kirlerin (örneğin protein bazlı kirler) temizlenmesini sağlar. Ön yıkama adımının sonunda, yıkama suyunun ısıtılması için ısıtıcı çalıştırılır. Isıtıcının çalıştırılmasıyla beraber ana yıkama adımına geçilmiş olur.

Ana yıkama adımı, yükler üzerindeki kirlerin sökülmesini sağlayan adımdır. Ana yıkama adımının başında su bir yandan ısıtılırken, diğer yandan yüklerin üzerine spreylenir. Yıkama suyu belirlenen bir sıcaklığa ulaştığında, deterjan bölmesi açılır ve yine daha önceden belirlenen bir sıcaklığa ulaşıldığında ısıtıcı kapatılır. Deterjanlı ve sıcak yıkama sıvısı bir süre daha sirküle edilir ve kirlerin tamamen sökülmesi sağlanır. Isıtıcının açılması ve suyun ısıtılması bazı kirlerin (örneğin yağ bazlı kirler)

sökülmesinin yanı sıra, deterjanın içerisindeki bileşenlerin hızlı aktivasyonunu sağlar. Kirli su tahliye edilerek adım sonlandırılır ve durulama adımına geçilir.

Durulama adımı, deterjan kalıntılarının uzaklaştırılmasının sağlandığı adımdır. Bazı üreticiler tek durulama adımı yaparken, bazı üreticilerin iki durulama adımı yaptığı görülmektedir. Durulama adımlarının başında makine içerisine temiz su alınır ve bu su sirküle edilerek deterjan yüklerden uzaklaştırılır. Durulama adımının sonunda, makineyi ve yükleri kurutma adımına hazırlamak üzere bir ısıtma gerçekleşir. Buradaki amaç, yükleri yüksek sıcaklığa çıkartarak kurutma prosesini hızlandırmaktır. Ek olarak, ısıtma esnasında parlaticı dozajı yapılarak suyun yükler üzerinde tutunması zorlaştırılmakta ve kurutma performansının iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Durulama adımının sonunda su tahliye edilir ve kurutma adımına geçilir.

Kurutma adımı, program sonunda yüklerin kuru bir şekilde kullanıcıya sunulmasını sağlayan adımdır. Durulama adımında yüzeyleri parlaticı ile kaplanmış sıcak yükler bu adımda kurutulur. Kurutma adımında, temelde üç olay görülür.

- Bunlardan ilki, yükler üzerindeki su damlacıklarının süzülerek düşmesinin beklendiği süzülme olayıdır. Parlaticı sayesinde suyun yükler üzerinde tutunması zorlaştırılarak süzülme olayı hızlandırılır [4].
- İkincisi, yükler üzerindeki su tamamen uzaklaştırılana kadar görülen buharlaşma olayıdır. Kullanılan kurutma sistemine bağlı olarak, doğal taşınım ile, zorlanmış taşınım ile veya her ikisi ile birden ısı ve kütle geçişi olayları gözlemlenebilir.
- Sonuncusu ise, makine içerisindeki nemli ve sıcak havanın uzaklaştırılmasını sağlayan nem atma adımdır. Amaç, kütle geçişini hızlandırarak daha hızlı kurutma sağlamaktır. Çoğunlukla makine içerisindeki havanın çevreye tahliye edilmesi, yoğunlaşma kanallarından veya soğuk yüzeylerden geçirilerek yoğunlaştırılması ve nem tutucu malzemeler (zeolit vb.) kullanılarak neminin azaltılması gibi yöntemler ile nem atma işleminin gerçekleştirildiği görülmektedir [7].

Bulaşık makinesi kurutma sistemlerinde kurulan temel mantık, kurutma adımında görülen üç olayın etkin bir şekilde kullanılması yönündedir. İlk olay olan süzülme olayı için yeterli süre geçtikten sonra, ikinci ve üçüncü olayların (buharlaşma ve nem atma) en etkili şekilde çalıştığı sistemin kurulması hedeflenir.

Bulaşık makinelerinde kurutmayı etkileyen ve kurutma sistem tasarımında etkin tasarım parametreleri: yüklerin boyutu, geometrik formu, malzemesi, yüzey özellikleri

ve yerleşimi gibi dış etkenler; tahliye edilen hava debisi, ortam sıcaklığı ve nemi, makine içerisindeki hava hızları, sıcaklığı ve nemi, kurutma süresi gibi kurutma teorisindeki etkenler ve son olarak kullanılan ısıtıcı, hava/tahliye/yoğuşma kanalları, yalıtım, soğuk yüzeyler, nem tutucular ve sepet tasarımı gibi tasarım parametreleri olarak sıralanabilir.

### **2.1.3 Bulaşık makinelerinde kullanılan kurutma sistemleri**

Kurutma adımı, yükler sıcak bir şekilde bu adıma girebilmesi için ısıtıldığından enerji tüketimi yüksek olan bir adımdır [8] ve bulaşık makinelerindeki kurutma prosesini iyileştirmek ve enerji tüketimini azaltmak için çeşitli kurutma sistemleri kullanılmaktadır.

Ürünün fiyat segmenti ile ilişkili olarak, kullanılan kurutma sistemleri de değişmektedir. Daha düşük segment bir ürün gamında olan makinelerde, daha çok doğal taşınım ile kurutma gözlemlenirken; ürünün segmenti yükseldikçe yoğuşma kanallarının, bir veya birden fazla fanın, nem tutucu malzemelerin, yoğuşma yüzeyi oluşturmak adına kullanılan su ceplerinin ve yoğuşma kanallarına entegre ısıtıcıların kullanıldığı görülmektedir.

Bulaşık makinelerinde kullanılan kurutma sistemleri; pasif/statik (fansız), fanlı açık çevrim ve fanlı kapalı çevrim olmak üzere üç kategori altında incelenebilir [4].

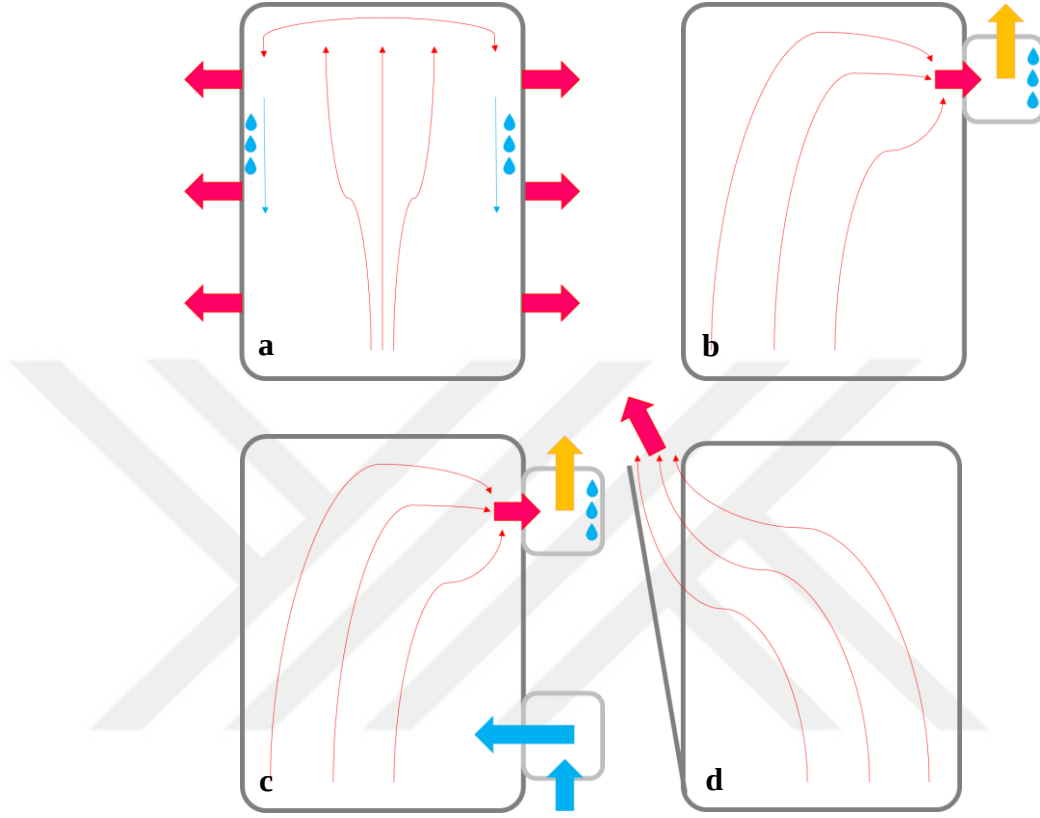
#### **2.1.3.1 Pasif/statik (fansız) kurutma sistemleri**

Pasif/statik kurutma sistemleri, doğal taşınım ve/veya soğuk yüzeyler yardımıyla yoğuşmanın görüldüğü kurutma sistemleridir. Bu sistemlerde, makine içerisindeki havaya tahliye yönüne doğru doğal bir akış patikası oluşturulur. Şekil 2.3, fansız kurutma sistemlerinin çeşitli örneklerini göstermektedir.

İlk örnek (Şekil 2.3-a) herhangi bir açıklığa sahip olmayan, makinenin iç yüzeylerinde yoğuşma sağlayarak nem atan bir sisteme örnektir [4]. Bu sistemlerde, ısınan nemli hava yoğunluk farkından dolayı yükselir. Yükselen hava tavana çarparak tavan jeti oluşturur ve makinenin iç yüzeylerinde yoğuşarak nemini bırakır. İç yüzeylerdeki yoğuşma miktarını arttırmak amacıyla, yalıtım malzemelerinin özel bir biçimde yerleştirildiği görülebilir.

İkinci örnekte (Şekil 2.3-b), havanın akış patikasına engel oluşturmayacak şekilde bir havalandırma açıklığı eklendiği görülmektedir. Bu sistemlerde, hidrostatik basınç

farkından (yoğunluk farkından) dolayı yükselen hava açılan açıklıktan çıkarak tahliye olur. Açıklığa bir yoğunlaşma kanalı bağlanarak, dışarıya atılan sıcak ve nemli havanın istenmeyen bir bölgede yoğunlaşmasındansa, kontrollü olarak kanal içerisinde yoğunlaşması sağlanır.



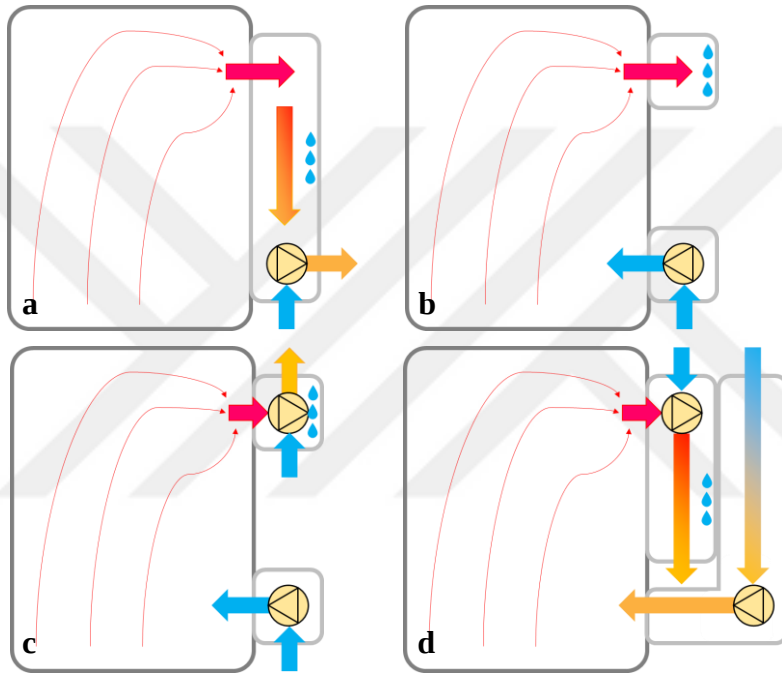
**Şekil 2.3:** Pasif/statik (fansız) kurutma sistemi örnekleri.

Üçüncü örnekte (Şekil 2.3-c), ikinci örnekteki sisteme ek olarak, tahliye edilen hava yerine makine içerisine hava vakumlanmasını sağlayacak bir sistem gösterilmektedir. Kütlenin korunumu gereği makine içerisinden tahliye edilen miktarda havanın tekrardan makine içerisine dolması gerekir. İkinci örnekteki hava takviyesi, kontrolsüz bir biçimde, makinede bulunan açıklıklardan içeriye dolar. Üçüncü örnekte ise, hava takviyesinin kontrollü bir biçimde ve daha verimli olarak gerçekleşmesi için bir hava açıklığı daha açılmaktadır.

Son örnekte ise (Şekil 2.3-d), kurutma adımı kapı açma sisteminin devreye girdiği bulaşık makinesi örneği görülmektedir. Bu sistemlerde, kurutma adımı geçildikten belirli bir süre sonra makinenin kapağı belirli bir miktarda açılmakta ve havanın tahliyesi sağlanmaktadır [4]. Kapının açılması için beklenen süre, tahliye edilen havanın tahliye edildiği çevredeki yüzeylerde yoğunlaşma miktarına göre belirlenmektedir.

### 2.1.3.2 Fanlı açık çevrim kurutma sistemleri

Açık çevrim kurutma sistemleri, makine içerisindeki hava akışının fan desteğiyle sağlandığı ve makine içerisindeki havanın tekrardan içeriye basılmadan dışarıya tahliye edildiği sistemlerdir [4]. Tahliye edilen havanın yerini, kütlenin korunumu gereği, makinede bulunan diğer açıklıklardan dolan taze hava doldurmaktadır. Bu sistemlerde, fan genellikle periyodik olarak açılıp kapatılarak yüklerin istenenden hızlı soğumasının önüne geçilmeye çalışılır. Şekil 2.4, fanlı açık çevrim kurutma sistemlerinin çeşitli örneklerini göstermektedir.



Şekil 2.4: Fanlı açık çevrim kurutma sistemi örnekleri.

İlk örnekte (Şekil 2.4-a), makine içerisindeki hava bir fan yardımıyla emilerek tahliye edildiği görülmektedir. Tahliye edilecek sıcak ve nemli hava önce bir yoğunlaşma kanalından geçirilerek yoğunlaştırılmaktadır. Ek olarak, fan bir miktar da dışarıdan taze hava emmektedir ve tahliye edilen nemi azaltılmış olan havanın nemi daha da azalmaktadır.

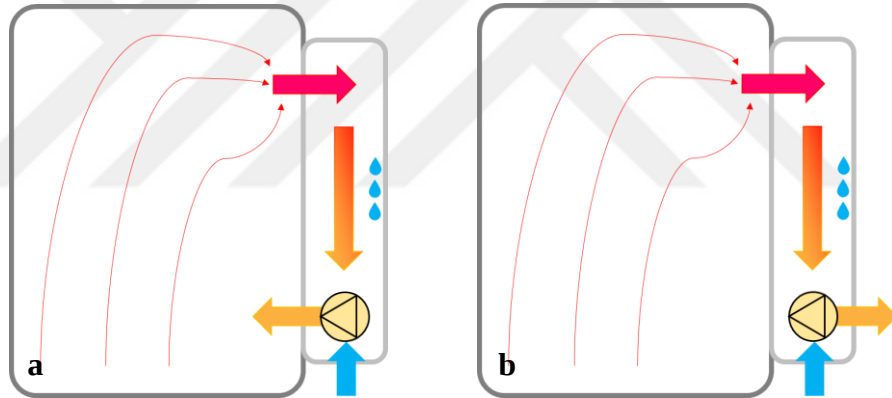
İkinci örnekte (Şekil 2.4-b), bir fan yardımıyla makine içerisine hava basılmaktadır. İçeride pozitif basınç olduğundan, açılan diğer hava kanalından tahliye gerçekleşmektedir.

Üçüncü örnekte (Şekil 2.4-c), hava sirkülasyonunun sağlanması amacıyla iki adet fan kullanıldığı görülmektedir. Fanlardan bir tanesi makine içerisinden hava tahliyesi yaparken, diğeri makine içerisine çevre havası basmaktadır.

Son örnekte (Şekil 2.4-d), üçüncü örneğe benzer biçimde hava sirkülasyonu için iki adet fan bulunmaktadır. İki fanın hava akışı sağladığı hava kanalları arasında ısı geçişi olması adına kanalların temas halinde olduğu görülmektedir. Böylece, makine içerisine alınan taze hava, tahliye edilen sıcak hava ile ısıtılırken; tahliye edilen nemli ve sıcak havanın yoğuşması sağlanmaktadır.

### 2.1.3.3 Fanlı kapalı çevrim kurutma sistemleri

Şekil 2.5, fanlı kapalı çevrim kurutma sistemi örneklerini göstermektedir. Kapalı çevrim kurutma sistemleri, makine içerisindeki hava akışının fan desteğiyle sağlandığı ve makine içerisindeki havanın çevreye (açık çevrimdeki gibi, Şekil 2.5-a) ya da tekrardan makine içerisine (Şekil 2.5-b) basılabildiği sistemlerdir [4]. Makinenin içerisinde kurulması istenen nem-sıcaklık dengesine göre, havanın çevreye veya makine içerisine basılması sağlanır. Bu sistemlerde de fan genellikle periyodik olarak açılıp kapatılarak yüklerin istenenden hızlı soğumasının önüne geçilmeye çalışılır.



Şekil 2.5: Fanlı kapalı çevrim kurutma sistemi örnekleri.

### 2.1.3.4 Kurutmayı iyileştirmeye yönelik alternatif sistemler

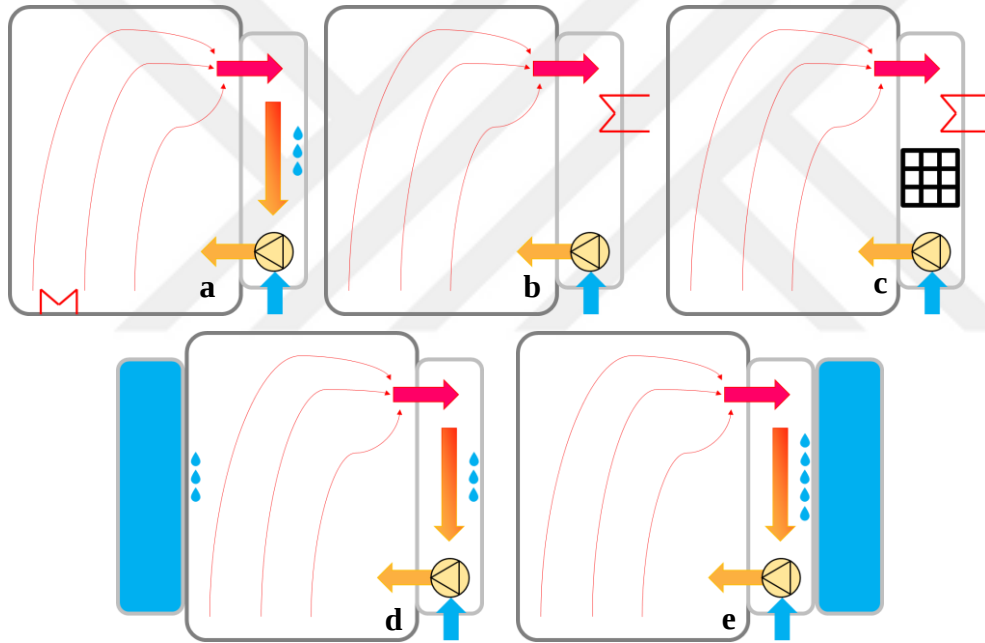
Fanlı ve fansız kurutma sistemlerine eklenen ısıtıcı, nem tutucu malzemeler, su depoları vb. çeşitli bileşenlerle oluşturulan alternatif sistemler ile kurutma performansında iyileşme sağlanabilir. Şekil 2.6, kapalı çevrim kurutma sistemlerine eklenmiş bileşenlerle oluşan örnek sistemleri göstermektedir.

İlk iki örnekte (Şekil 2.6-a ve Şekil 2.6-b), makinenin içerisine ve yoğuşma kanalına ek bir ısıtıcı yerleştirildiği görülmektedir. Kurutma adımı çalıştırılan ısıtıcı yardımıyla, hava ısıtılarak nem tutma kapasitesi artırılır.

Üçüncü örnekte (Şekil 2.6-c), ısıtıcı ile birlikte nem tutucu bir malzemenin kullanıldığı görülmektedir. Bu sayede, yoğuşma kanalından geçen nemli havanın neminin bir

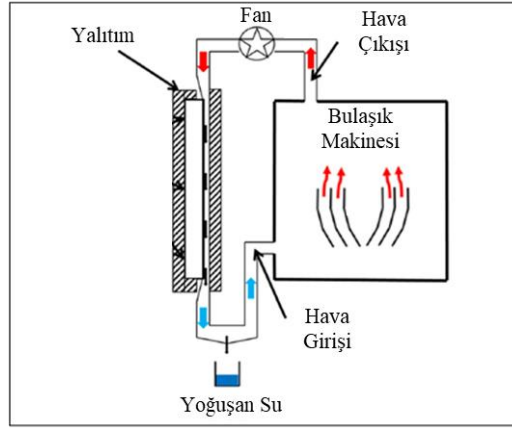
kısmı nem tutucu malzeme tarafından tutulur [4]. Buradaki ısıtıcının görevi nem tutucu malzemeyi rejenere etmektir. Zeolit malzemesinin nem tutucu malzeme olarak kullanıldığı uygulamalarda, bulaşık makinesi enerji tüketimi geleneksel bulaşık makinelerine göre %25'e kadar azaltılabilmektedir [9]. Buna karşın, zeolitin 300°C sıcaklıkta rejenere olması dezavantajını ortadan kaldıran ve standart A sınıfı bir bulaşık makinesine göre %41'e yakın enerji tasarrufu sağlayan, nem tutucu malzeme olarak silika-jel kullanılan çalışmalar da mevcuttur [7].

Son iki örnekte ise (Şekil 2.6-d ve Şekil 2.6-e), su depoları kullanılarak kurutma etkinliği artırılan sistemler görülmektedir. Su depoları yardımıyla soğuk yüzeyler oluşturularak yoğuşmayı arttırmak ana amaçtır. Su depolarının direkt olarak makine duvarlarına ya da yoğuşma kanalına teması mümkün olabilir.



**Şekil 2.6:** Alternatif kurutma sistemi örnekleri.

Bu sistemlere ek olarak, makine içerisinde tahliye edilen atık suyun ısısından yararlanmayı hedefleyen sistemlere de rastlanabilir. Atık suyun ısısıyla makine içerisine alınan sıcak suyun ısıtıldığı ısı geri kazanım sistemleri olduğu gibi [10], ısı pompaları ve termoelektrik modüller yardımıyla bu işlemin verimini arttıran çözümler de mevcuttur [1, 11]. Bu sistemler yardımıyla, %25'e varan enerji tasarrufu yapmak mümkündür [1, 10, 11]. Isı pompası entegre edilen sistemlerde aynı zamanda ısı kaynağı olarak kullanılan ve yıkama adımında ısı kaybederek katı fazına (buz) geçen suyun bulunduğu bir tank bulunur. Bu tanktaki buz, kurutma adımında soğuk yüzey etkisi yaratmaktadır (Şekil 2.7) [12].



Şekil 2.7: Isı pompalı bulaşık makinelerinde kurutma çevrimi [4].

#### 2.1.4 Bulaşık makinesinde kurutma performansı ölçümü

Ev tipi bulaşık makinelerinde performans ölçme metotları “IEC 60436: Electric dishwashers for household use – Methods for measuring the performance” başlıklı uluslararası standartta tanımlanmaktadır [13]. Kurutma performansı standartta tanımlandığı şekilde, bulaşıkların ıslaklıklarının deneyimli personeller yardımıyla görsel olarak değerlendirilmesi ile ölçülür.

#### 2.2 Kurutma (Buharlaştırma ile Kütle Geçişi)

Bulaşık makineleri içerisinde bulunan yük tipleri genellikle porselen, seramik, cam, çelik, plastik veya tahta malzemelerinden yapılır. Bu malzemeler de çoğunlukla gözeneksiz yapıdadır. Bu sebeple, tez kapsamındaki literatür araştırmasında sert yüzey kurutma üzerine odaklanılmıştır.

Kurutma momentum, ısı ve kütle geçişi olaylarının karmaşık bir fonksiyonudur ve kurutma olayını anlamak bulaşık makinesi kurutma performansını arttırabilmek için kritik öneme sahiptir [8].

Kurutma olayı momentum, ısı ve kütle geçişi olaylarının aynı anda görüldüğü bir prosestir. Gözenekli yüzeylerde gerçekleşen kurutma işleminde, suyun malzeme içerisine geçişi ve suyun yüzeyden buharlaşması olmak üzere iki adet olay gözlenir. Fakat bulaşık makinesinde kullanılan yüklerin büyük bir çoğunluğu gözeneksiz ve sert yüzeye sahip olduğundan, yalnızca yüzeydeki suyun buharlaşması olayı gerçekleşir [4].

### 2.2.1 Taşınımın fiziksel mekanizması

Buharlaşıma olayındaki gibi, bir yüzey ile üzerinde bulunan hareketli akışkan arasında gerçekleşen geçiş türüne taşınım denir. Taşınım olayı, iletim veya difüzyon gibi akışkanın rastgele hareketi ve adveksiyon gibi akışkanın yığın hareketi olaylarını kapsar. İletimle ısı geçişi olayında hareketsiz bir ortam varken, taşınım ise ortam hareketlidir ve daha karmaşık çözümlere ihtiyaç vardır. Isı taşınımı, esasen bir yüzey ile hareketli ortam arasındaki ısı geçişi olarak tanımlanabilir. Taşınım olayında ısı ve kütle geçişi yüzeydeki hareketli akışkanın özelliklerinden etkilendiğinden; taşınım ile ısı ve kütle geçişi hesaplamalarında kütle, enerji ve maddenin korunum denklemleri ve Newton'un 2. Hareket yasasının birlikte ve eşzamanlı olarak çözdürülmesi gerekir. Fakat hareketli akışkanın termofiziksel özelliklerinin sabit olarak kabul edilebildiği durumlarda; ilk adımda kütle korunumu (süreklilik) ve momentum denklemleri (Newton'un 2. hareket yasası) birlikte çözdürüldükten sonra, basınç ve hız bileşenleri, enerjinin korunumu (termodinamiğin 1. Yasası) ve maddenin korunumu ifadeleri tek başına çözümlenebilir [14, 15, 16, 17].

Literatür araştırmasındaki bağıntıların çözümlenmesinde çeşitli ısı ve kütle geçişi kaynak kitaplarından ve ders notlarından yararlanılmaktadır [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Çözümlemelerin daha detaylı adımlarının "Isı Taşınımı: Kuramsal Yaklaşım [17]" isimli kitaptan incelenmesi konunun kavranmasında büyük fayda sağlayacaktır.

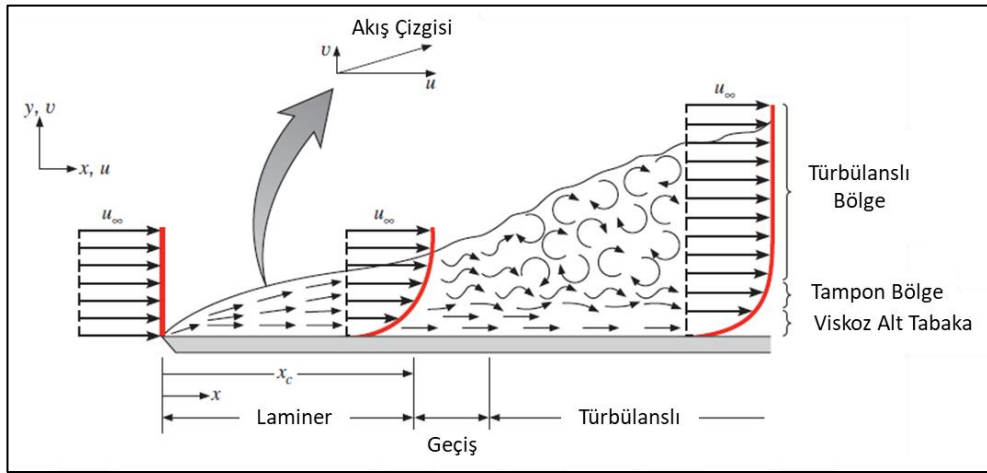
### 2.2.2 Laminer ve türbülanslı hız sınır tabakaları

Yüzey sürtünmesi ve taşınım ile ısı ve kütle geçişi olayları incelenirken, akışın laminer veya türbülanslı olması göz önünde bulundurulur. Şekil 2.8, Düz bir levha üzerinde hidrodinamik sınır tabaka gelişimini göstermektedir. Sınır tabakası, laminer ve türbülanslı olmak üzere iki farklı davranış sergiler. Laminer, geçiş ve türbülanslı bölgeler arasındaki farklar ve hız profili gelişimleri net bir şekilde görülmektedir.

Laminer sınır tabakasında akış düzenlidir, akış çizgileri belirlenebilir ve yüzeydeki kayma gerilimi akışın ilerlemesiyle azalır. Ancak, geçiş bölgesine gelindiğinde laminer akış türbülansa dönüşür ve akış koşulları zamanla değişir.

Tam türbülanslı sınır tabakasında ise akış düzensizdir ve akışkan kitleleri rastgele üç boyutlu hareket eder. Karışma ile birlikte, hızlı akışkan kitleleri yüzeye doğru taşınırken daha yavaş akışkan kitleleri serbest akışa doğru taşınır. Bu karışma, akış

yönünde ve levha üzerinde üretilen girdaplar sayesinde olur. Sonuç olarak, türbülanslı sınır tabakasında hız ve basınç dalgalanmaları oluşur.



**Şekil 2.8:** Düz bir levha üzerinde hidrodinamik sınır tabakanın gelişimi [14].

Laminer ve türbülanslı sınır tabakası profilleri karşılaştırıldığında, türbülanslı hız profili karışmanın etkisiyle nispeten düz olurken, viskoz alt tabaka içinde büyük hız gradyanları oluşur. Bu nedenle, türbülanslı sınır tabakasındaki yüzey kayma gerilimi genellikle laminer kısma göre daha büyüktür.

Türbülansa geçiş, türbülansı tetikleyen mekanizmaların baskın gelmesi ile başlar. Reynolds boyutsuz sayısı, atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını temsil eder; geometri, akış ve akışkan özelliklerini bir araya getirir:

$$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} = \frac{u_\infty x}{\nu} \quad (2.1)$$

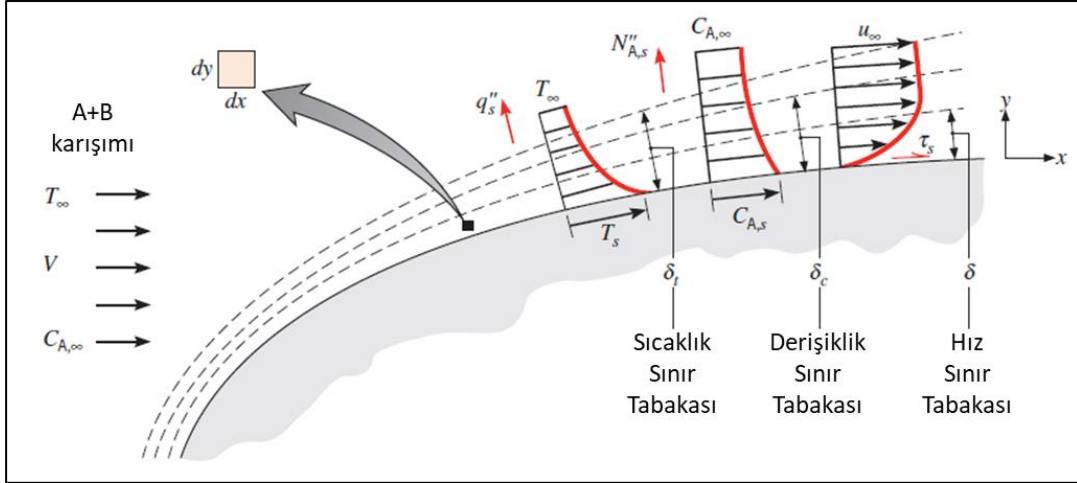
Reynolds sayısının küçük olması, atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetine karşı önemsiz olduğunu gösterir. Bu durumda akışta çalkantı yoktur ve akış laminerdir. Reynolds sayısının büyük olması durumunda ise, atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlere baskın gelir ve türbülansa geçiş gözlenir. Sınır tabakada laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş bölgesi kritik Re sayısı ile tanımlanır:

$$Re_{x,c} = \frac{\rho u_\infty x_c}{\mu} = 5.10^5 \quad (2.2)$$

Tez kapsamında, düşük Re sayıları ile çalışıldığından laminer akış çözümleri yapılmıştır.

### 2.2.3 Laminer sınır tabakada taşınım denklemleri

Yüzey ile üzerinden geçen akışkan arasındaki ısı ve kütle geçişi olayları, sınır tabaka kavramının anlaşılması ile incelenebilir. Şekil 2.9, bir yüzeydeki hız, sıcaklık ve derişiklik sınır tabaka gelişimlerini göstermektedir.



Şekil 2.9: Hız, sıcaklık ve derişiklik sınır tabaka gelişimleri [14].

Sürekli rejimde  $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = 0\right)$ , sıkıştırılamaz (sabit termofiziksel özellikler;  $\rho, k, c_p, \mu, \nu, \alpha = \text{sabit}$ ) ve sürtünmeli (viskoz) bir akış için Kartezyen koordinatlarda ve iki boyutlu (x ve y eksenlerinde) bir çözümleme için; akışkan içerisindeki diferansiyel kontrol hacimlerine kütle, enerji ve maddenin korunumu ve Newton'un 2. hareket yasası denklemleri uygulandığında aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir:

Kütlenin Korunumu (Süreklilik Denklemi): Maddenin var veya yok edilemeyeceğini ifade eder. Diferansiyel kontrol hacmine birim zamanda net kütle giriş-çıkışının sıfıra eşit olduğunu belirtir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

Newton'un İkinci Hareket Yasası (Momentum Denklemleri): Sürekli bir akışta, diferansiyel kontrol hacmindeki tüm kuvvetlerin toplamı ile kontrol hacmindeki net momentum giriş-çıkışının eşit olduğunu ifade eder.

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x \quad (2.4)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y \quad (2.5)$$

Akışkan üzerindeki kuvvetler, gövde kuvvetleri (hacimle orantılı) ve yüzey kuvvetleri (alanla orantılı) olmak üzere ikiye ayrılır. Yerçekimi, merkezkaç kuvveti, manyetik ve elektrik alan kuvvetleri gibi kuvvetler gövde kuvvetlerini; akışkanın statik basıncı ve sürtünme gerilmeleri yüzey kuvvetlerini oluşturur.

Eşitliklerin sol tarafları diferansiyel kontrol hacminden birim zamanda gerçekleşen net momentum çıkışını temsil ederken; sağ tarafları sırasıyla net basınç kuvveti, net sürtünme kuvveti ve gövde kuvvetini temsil etmektedir.

Enerjinin Korunumu: Sürekli bir akışta, diferansiyel bir kontrol hacmine birim zamanda kütle ile giren net enerjinin, kontrol hacmine giren ısıdan kontrol hacminin yaptığı işin çıkartılmasına eşit olduğunu ifade eder.

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \Phi + \dot{q} \quad (2.6)$$

$$\mu \Phi = \mu \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.7)$$

Eşitliğin sol tarafı diferansiyel kontrol hacminden birim zamanda akışkanın yığın hareketi (adveksiyon) nedeniyle çıkan net enerjiyi temsil ederken; sağ tarafı sırasıyla iletimle giren net enerjiyi, akış içi sürtünme kaybını ve ısı enerji üretimini temsil etmektedir.

Maddenin Korunumu: Sürekli bir akışta, diferansiyel bir kontrol hacmine net A maddesi girişinin, kontrol hacmi içerisinde A maddesinin net üretimine eşit olduğunu belirtir.

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \right) + \dot{n}_A \quad (2.8)$$

Eşitliğin sol tarafı diferansiyel kontrol hacminden A maddesinin akışkanın yığın hareketi (adveksiyon) nedeniyle aktarımını temsil ederken; sağ tarafı sırasıyla yayılımla giren net A maddesini ve kimyasal tepkimeler nedeniyle üretilen A maddesini temsil etmektedir.

### 2.2.4 Zorlanmış taşınım

Gövde kuvvetlerinin ihmal edilebildiği ( $f_x = f_y = 0$ ), ısı enerjisi üretiminin ve akış içerisinde kimyasal tepkimelerin olmadığı ( $\dot{q} = 0$  ve  $\dot{n}_A = 0$ ) ve düşük hızlar ile çalışıldığından akış içi sürtünme kaybının ihmal edildiği ( $\mu\Phi = 0$ ) durumda; büyüklük mertebesi analizinden yola çıkarak x yönündeki momentum, enerji ve madde geçişinin y yönündekine göre çok daha küçük olduğu varsayımı yapılırsa eşitlikler daha da sadeleştirilebilir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \quad (2.9)$$

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.10)$$

x-Momentum Denklemi:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.11)$$

Enerji Denklemi:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.12)$$

Madde Korunum Denklemi:

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \quad (2.13)$$

Sınır Şartları:

$x = 0$ :

$$u(0, y) = u_\infty, \quad T(0, y) = T_\infty, \quad C_A(0, y) = C_{A,\infty} \quad (2.14)$$

$y = 0$ :

$$u(x, 0) = v(x, 0) = 0, \quad T(x, 0) = T_s, \quad C_A(x, 0) = C_{A,s} \quad (2.15)$$

$y \rightarrow \infty$ :

$$u(x, \infty) = u_{\infty}, \quad T(x, \infty) = T_{\infty}, \quad C_A(x, 0) = C_{A, \infty} \quad (2.16)$$

#### 2.2.4.1 Boyutsuzlaştırılmış sınır tabaka eşitsizlikleri:

Sınır tabaka denklemleri,  $L_c$  karakteristik uzunluğu ve  $V$  yaklaşma hızı için bağımsız değişkenler yardımıyla boyutsuzlaştırılabilir. Böylece momentum, enerji ve madde korunum denklemleri üç önemli boyutsuz benzerlik parametresi olan Reynolds ( $Re_L$ ), Prandtl ( $Pr$ ) ve Schmidt ( $Sc$ ) sayıları ile tekrardan yazılabilir.

$$Re_L = \frac{VL_c}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2.17)$$

Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını; Prandtl sayısı, momentum ve ısı yayılım katsayılarının oranını; Schmidt sayısı, momentum ve kütle yayılım katsayılarının oranını gösterir.

Fonksiyonel biçimde çözümler,

$$u^* = f\left(x^*, y^*, Re_L, \frac{dP^*}{dx^*}\right) \quad (2.18)$$

$$T^* = f\left(x^*, y^*, Re_L, Pr, \frac{dP^*}{dx^*}\right) \quad (2.19)$$

$$C_A^* = f\left(x^*, y^*, Re_L, Sc, \frac{dP^*}{dx^*}\right) \quad (2.20)$$

için yapılırsa aşağıdaki fonksiyonlar elde edilir.

Sürtünme katsayısı ( $C_f$ , boyutsuz sürtünme katsayısıdır.):

$$C_f = \frac{2}{Re_L} f(x^*, Re_L) \quad (2.21)$$

Nusselt sayısı:

$$h = -\frac{k}{L_c} \frac{(T_{\infty} - T_s)}{(T_s - T_{\infty})} \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = +\frac{k}{L_c} \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} \quad (2.22)$$

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = + \left. \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} \quad (2.23)$$

$$Nu = f(x^*, Re_L, Pr) \quad (2.24)$$

Nusselt sayısı, taşınımın yalnızca iletimle olan ısı geçişine oranıdır. Yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanıdır. Ortalama ısı taşınım katsayısı, yüzey üzerinde alınan integral ile hesaplandığından,  $x^*$ 'den bağımsız hale gelir. Bu sebeple Nusselt sayısı için aşağıdaki fonksiyon yazılabilir:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}L_c}{k} = f(Re_L, Pr) \quad (2.25)$$

Sherwood sayısı:

$$h_m = - \frac{D_{AB}}{L_c} \frac{(C_{A,\infty} - C_{A,s})}{(C_{A,s} - C_{A,\infty})} \left. \frac{\partial C_A^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} = + \frac{D_{AB}}{L_c} \left. \frac{\partial C_A^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} \quad (2.26)$$

$$Sh = \frac{h_m L_c}{D_{AB}} = + \left. \frac{\partial C_A^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} \quad (2.27)$$

$$Sh = f(x^*, Re_L, Sc) \quad (2.28)$$

Sherwood sayısı, taşınımın yalnızca yayılımla olan kütle geçişine oranıdır. Yüzeydeki boyutsuz derişiklik gradyanıdır. Ortalama kütle taşınım katsayısı, yüzey üzerinde alınan integral ile hesaplandığından,  $x^*$ 'den bağımsız hale gelir. Bu sebeple Sherwood sayısı için aşağıdaki fonksiyon yazılabilir:

$$\overline{Sh} = \frac{\bar{h}_m L_c}{D_{AB}} = f(Re_L, Sc) \quad (2.29)$$

### Isı ve kütle geçişi benzeşimi

Aşağıda Nu ve Sh sayılarının her ikisinde de bulunan  $f(x^*, Re_L)$  sadeleştirilerek çözümü yapılmıştır:

$$Nu = f(x^*, Re_L)Pr^n, \quad Sh = f(x^*, Re_L)Sc^n \quad (2.30)$$

$$\frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n} \quad (2.31)$$

Denklem (2.23) ve Denklem (2.27) eşitlikte yerine konulursa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{hL_c/k}{Pr^n} = \frac{h_m L_c/D_{AB}}{Sc^n} \quad (2.32)$$

Denklem (2.32), Pr ve Sc sayıları ile bağlantılı olan Lewis boyutsuz sayısı (Le) ile de tanımlanabilir. Lewis sayısı, ısı ve kütle yayılım katsayılarının oranıdır. Le sayısı, taşınım ile ısı ve kütle geçişi olaylarının eşzamanlı gerçekleştiği durumlarda kritiktir.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.33)$$

Le sayısının eşitsizlikte yerine konmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^n} = \rho c_p Le^{1-n} \quad (2.34)$$

#### 2.2.4.2 Benzerlik çözümlemesi

Bu bölümde, Blasius yöntemi kullanılarak hidrodinamik, sıcaklık ve derişiklik sınır tabakaları için tam çözümler sonuçları aktarılmaktadır. Serbest akış hızının sabit olduğu ( $dp/dx=0$ ) durumda sınır tabaka denklemleri aşağıdaki şekle indirgenir:

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.35)$$

x-Momentum Denklemi:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.36)$$

Enerji Denklemi:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.37)$$

Madde Korunum Denklemi:

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \quad (2.38)$$

Denklemler, akışkan özelliklerinin film sıcaklığında hesaplanması durumunda geçerlidir.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.39)$$

### Hidrodinamik çözüm

Akım fonksiyonu ( $\psi(x, y)$ ):

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2.40)$$

Boyutsuz benzerlik değişkeni ( $\eta$ ) ve bağımlı değişken ( $f(\eta)$ ):

$$\eta = y \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \quad (2.41)$$

$$f(\eta) = \frac{\psi}{u_\infty \sqrt{\nu x / u_\infty}} \quad (2.42)$$

Buradan yola çıkarak hız terimleri düzenlenir ve türevleri alınır. Buradan elde edilen eşitliklerle Denklem (2.36) tekrardan yazılırsa, lineer olmayan üçüncü dereceden adi diferansiyel denklem elde edilir. Hidrodinamik sınır koşulları benzerlik değişkenleri cinsinden tekrardan yazılırsa, denklemler seri açılımları veya sayısal integrasyon gibi nümerik yöntemlerle çözümlenebilir.

$\frac{u}{u_\infty} = 0,99$  şartının sağlandığı  $y$  değeri sınır tabaka kalınlığı olarak tanımlanırsa, sınır tabaka fonksiyonlarının çözümünün yapıldığı tablo ve grafiklerden yararlanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\delta = \frac{4,91}{\sqrt{u_{\infty}/\nu x}} = \frac{4,91x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.43)$$

Yüzey kayma gerilmesi aşağıdaki gibi tekrardan yazılabilir ( $\eta = 0$  olduğu durumda,  $f'$ 'nin ikinci türevi 0,332'ye eşittir):

$$\begin{aligned} \tau_s &= \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \mu u_{\infty} \sqrt{\frac{u_{\infty}}{\nu x}} \left. \frac{d^2 f}{d\eta^2} \right|_{\eta=0} \\ &= 0,332 u_{\infty} \sqrt{\frac{\rho \mu u_{\infty}}{x}} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Böylece yerel sürtünme katsayısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$C_{f,x} = \frac{\tau_{s,x}}{\rho u_{\infty}^2 / 2} = 0,664 Re_x^{-1/2} \quad (2.45)$$

### Isı geçişi çözümü

Hidrodinamik sınır tabakanın çözümlenmesi ile birlikte, enerji denklemleri de çözülebilir hale gelir. Benzerlik çözümü için  $T^* = T^*(\eta)$  biçiminde bir boyutsuz sıcaklık tanımlanırsa:

$$T^* = \frac{T - T_{\infty}}{T_s - T_{\infty}} \quad (2.46)$$

Gerekli bağıntılar yardımıyla Denklem (2.37) tekrardan yazılırsa ve sınır koşulları tekrardan tanımlanırsa, farklı Pr sayıları için denklemlerin sayısal integrasyon yöntemi ile çözülmesi mümkündür.

$Pr \geq 0,6$  için  $\left. \frac{dT^*}{d\eta} \right|_{\eta=0}$  aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\left. \frac{dT^*}{d\eta} \right|_{\eta=0} = 0,332 Pr^{1/3} \quad (2.47)$$

Buradan hareketle yerel taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$h_x = \frac{q_s''}{T_s - T_\infty} = \frac{-k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \big|_{y=0}}{T_s - T_\infty} = 0,332 Pr^{1/3} k \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \quad (2.48)$$

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = 0,332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Pr \geq 0,6 \quad (2.49)$$

$Pr \geq 0,6$  için hız ve ısı sınır tabaka kalınlıkları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\delta}{\delta_t} \approx Pr^{1/3} \quad (2.50)$$

### Kütle geçişi çözümü

Madde sınır tabaka denklemi ile enerji sınır tabaka denklemlerinin çözümü benzerdir. Benzerlik çözümü için  $\rho^* = \rho^*(\eta)$  biçiminde bir boyutsuz madde yoğunluğu tanımlanırsa:

$$\rho_A^* = \frac{\rho_A - \rho_{A,s}}{\rho_{A,\infty} - \rho_{A,s}} \quad (2.51)$$

Isı geçişi ile benzer bir biçimde çözüm sağlandığında, yerel Sh sayısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$h_{m,x} = \frac{n_A''}{C_{A,s} - C_{A,\infty}} = \frac{-D_{AB} \left( \frac{\partial C_A}{\partial y} \right) \big|_{y=0}}{C_{A,s} - C_{A,\infty}} = 0,332 Sc^{1/3} D_{AB} \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \quad (2.52)$$

$$Sh_x = \frac{h_{m,x} x}{D_{AB}} = 0,332 Re_x^{1/2} Sc^{1/3}, \quad Sc \geq 0,6 \quad (2.53)$$

$Sc \geq 0,6$  için hız ve derişiklik sınır tabaka kalınlıkları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\delta}{\delta_c} \approx Sc^{1/3} \quad (2.54)$$

Le sayısı ile sınır tabaka kalınlıkları tekrardan ifade edilirse aşağıdaki eşitlik oluşur:

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.55)$$

$$\frac{\delta_t}{\delta_c} \approx Le^{1/3} \quad (2.56)$$

### 2.2.4.3 Ortalama sınır tabaka parametreleri

Ortalama sürtünme katsayısı, ısı ve kütle taşınım katsayıları, Nusselt sayısı ve Sherwood sayısı; yerel yüzey kayma gerilmesi ve ısı ve kütle taşınım katsayılarının tüm yüzey üzerinde intergrasyonu ile elde edilebilir. Böylece, levha üzerindeki ortalama ısı ve kütle geçişi hesaplamaları yapılabilir. Akışın tüm levha boyunca laminar olduğu durumlarda, x indisi yerine L indisi kullanılabilir.

Bağıntılar L uzunluğunda ve w genişliğinde bir yüzey için çözdürülmüştür.

Ortalama sürtünme katsayısı:

$$\bar{C}_{f,L} = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} C_{f,x} dx = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} 0,664 \sqrt{\frac{\nu}{u_\infty}} x^{-1/2} dx = 1,328 Re_L^{-1/2} \quad (2.57)$$

Ortalama Nusselt sayısı:

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h} L_c}{k} = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Pr \geq 0,6 \quad (2.58)$$

Ortalama Sherwood sayısı:

$$\bar{Sh}_L = \frac{\bar{h}_m L_c}{D_{AB}} = 0,664 Re^{1/2} Sc^{1/3}, \quad Sc \geq 0,6 \quad (2.59)$$

Ortalama ısı ve kütle taşınım katsayılarının ve ortalama Nusselt ve Sherwood sayılarının, levhanın ucundaki yerel değerlerin iki katı olduğu görülmektedir.

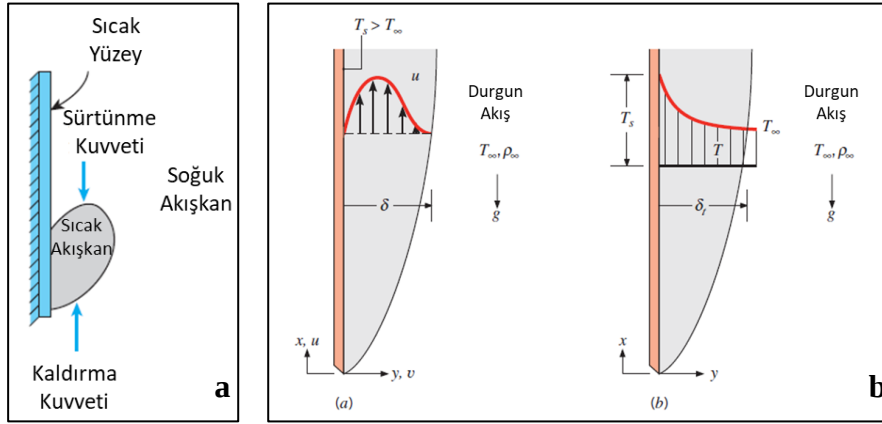
$$\bar{h} = 2h_x, \quad \bar{Nu}_L = 2Nu_x \quad (2.60)$$

$$\bar{h}_m = 2h_{m,x}, \quad \bar{Sh}_L = 2Sh_x \quad (2.61)$$

### 2.2.5 Doğal taşınım

Zorlanmış taşınımında gövde kuvvetleri ihmal edilirken, doğal taşınımında akışkan hareketini sağlayan kuvvetler yoğunluk farkları nedeniyle oluşan gövde kuvvetleridir.

Dolayısıyla ihmal edilmezler. Gövde kuvvetleri kaldırma kuvveti kaynaklıdır ve yerçekimi kuvvetini barındırır (Şekil 2.10).



**Şekil 2.10:** Doğal taşınım kuvvet dengesi (a) [15] ve hız ve sıcaklık sınır tabakaları (b) [14].

Bu şartlar altında; süreklilik, enerjinin korunumu ve maddenin korunumu denklemleri, düşey bir levha için zorlanmış taşınım ile aynı kalırken, x-momentum denkleminde gövde kuvveti terimi ( $f_x = -\rho g$ ) de eklenir.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP_\infty}{dx} - g + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.62)$$

Sınır tabakanın dışında kalan durgun bölgedeki ( $u=0$ ) serbest akışın basınç gradyanı ( $\frac{dP_\infty}{dx}$ ) aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{dP_\infty}{dx} = -\rho_\infty g \quad (2.63)$$

Bu durumda momentum denklemi tekrardan yazılabilir:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad \Delta \rho = \rho_\infty - \rho \quad (2.64)$$

Eşitliğin sağındaki ilk terim, yoğunluk değişimi kaynaklı kaldırma kuvveti terimidir. Yoğunluk değişiminin yalnızca sıcaklığa bağlı olduğu durumları temsil eden hacimsel ısı genleşme katsayısı terimi aşağıdaki gibidir:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.65)$$

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_{\infty} - \rho}{T_{\infty} - T} \quad (2.66)$$

Bu durumda, aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\rho_{\infty} - \rho \approx \rho \beta (T - T_{\infty}) \quad (2.67)$$

Mükemmel gaz yaklaşımıyla, aşağıdaki şekilde düzenleme yapılabilir:

$$\beta_{\text{ideal}} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{\rho} \frac{P}{R_u T^2} = \frac{1}{T} \quad (2.68)$$

Denklemlerin sadeleştirilmiş nihai halleri aşağıdaki gibidir:

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.69)$$

x-Momentum Denklemi:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \beta (T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.70)$$

Enerji Denklemi:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.71)$$

Madde Korunum Denklemi:

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \quad (2.72)$$

Sınır Şartları:

$y = 0$ :

$$u(x, 0) = v(x, 0) = 0, \quad T(x, 0) = T_s, \quad C_A(x, 0) = C_{A,s} \quad (2.73)$$

$y \rightarrow \infty$ :

$$u(x, \infty) = 0, \quad T(x, \infty) = T_{\infty}, \quad C_A(x, 0) = C_{A, \infty} \quad (2.74)$$

### 2.2.5.1 Boyutsuzlaştırılmış sınır tabaka eşitsizlikleri:

Sınır tabaka denklemleri,  $L_c$  karakteristik uzunluğu ve  $u_0$  referans hızı için bağımsız değişkenler yardımıyla boyutsuzlaştırılabilir. Bu koşullar altında Denklem (2.70), Denklem (2.71) ve Denklem (2.72) tekrardan yazılırsa ve  $u_0$  referans hızı  $Re$  sayısından faydalanılarak denklemi basitleştirmek için aşağıdaki gibi ifade edilirse:

$$u_0^2 = g\beta(T_s - T_{\infty})L_c \quad (2.75)$$

Bu durumda  $Re$  sayısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$Re_L = \sqrt{\frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2}} \quad (2.76)$$

Bu vesileyle  $Re$  sayısının karesine eşit olan Grashof boyutsuz benzerlik parametresi elde edilir. Grashof sayısı, kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını ifade eder:

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2} \quad (2.77)$$

$Gr$  sayısı,  $Re$  sayısının zorlanmış taşınımda gördüğü görevi doğal taşınımda görür. Bu durumda doğal taşınım fonksiyonları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Nu = f(x^*, Gr_L, Pr) \quad (2.78)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}L_c}{k_f} = f(Gr_L, Pr) \quad (2.79)$$

$$Sh = f(x^*, Gr_L, Sc) \quad (2.80)$$

$$\overline{Sh} = \frac{\bar{h}_m L_c}{D_{AB}} = f(Gr_L, Sc) \quad (2.81)$$

### 2.2.5.2 Benzerlik çözümlemesi

Denklemler, akışkan özelliklerinin film sıcaklığında hesaplanması durumunda geçerlidir.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.82)$$

Boyutsuz benzerlik değişkeni:

$$\eta = \frac{y}{x} \left( \frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4} \quad (2.83)$$

Akım fonksiyonu:

$$\psi(x, y) = f(\eta) \left[ 4\nu \left( \frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4} \right] \quad (2.84)$$

### Isı geçişi çözümü

Boyutsuz sıcaklık aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$T^* = \frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty} \quad (2.85)$$

Denklem (2.69), Denklem (2.70) ve Denklem (2.71) kısmi diferansiyel denklemleri iki adi diferansiyel denkleme dönüştürülebilir,  $f$  ve  $T^*$  yalnızca  $\eta$ 'nin fonksiyonudur.

Denklemlerin çözümlerine ve çözüm sonuçlarına grafikler ve korelasyonlar şeklinde literatürden ulaşılabilir.

Yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanı Prandtl sayısının bir fonksiyonudur ve %0,5 hassasiyetle sayısal sonuçları veren bağıntı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (bağıntı  $0 \leq Pr \leq \infty$  aralığında geçerlidir).

$$g(Pr) = \frac{0,75Pr^{1/2}}{(0,609 + 1,221Pr^{1/2} + 1,238Pr)^{1/4}} \quad (2.86)$$

Yerel Grashof sayısı:

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (2.87)$$

Ortalama taşınım katsayısı,  $L_c$  uzunluğunda bir yüzey için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\bar{h} = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} h \, dx = \frac{k}{L_c} \left[ \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{4\nu^2} \right]^{\frac{1}{4}} g(Pr) \int_0^{L_c} \frac{dx}{x^{1/4}} \quad (2.88)$$

Ortalama Nusselt sayısı:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L_c}{k} = \frac{4}{3} \left( \frac{Gr_x}{4} \right)^{\frac{1}{4}} g(Pr) \quad (2.89)$$

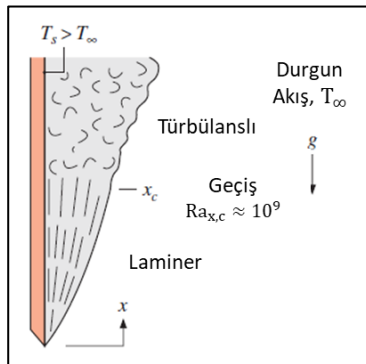
Buradan ortalama Nusselt sayısının, yerel Nusselt sayısının 4/3 katına eşit olduğu görülmektedir:

$$\overline{Nu}_L = \frac{4}{3} Nu_x \quad (2.90)$$

### 2.2.5.3 Ampirik bağıntılar

Şekil 2.11, doğal taşınım sınır tabakasında laminierden türbülanslı akışa geçişi göstermektedir. Rayleigh sayısı, doğal taşınım sınır tabakasında türbülanslı akış bölgesine geçişle ilişkili bir boyutsuz parametredir. Gr ve Pr sayılarının çarpımına eşittir ve düşey levhalar için aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$Ra_{x,c} = Gr_{x,c} Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu\alpha} \approx 10^9 \quad (2.91)$$



**Şekil 2.11:** Doğal taşınım sınır tabakasında laminierden türbülanslı akışa geçiş [14].

Laminer akışta doğal taşınım hesaplamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş ampirik bağıntılar genellikle aşağıdaki biçimdedir:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L_c}{k} = C Ra_L^n = C(Gr_L Pr)^n \quad (2.92)$$

Laminer akışta, deneysel çalışmalar sonucunda bulunmuş aşağıdaki katsayılarla çözüm yapılabilir:

$$\overline{Nu}_L = C(Gr_L Pr)^n = 0,59(Gr_L Pr)^{1/4}, \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (2.93)$$

Düşey levhadaki laminer akış için tüm  $Ra_L$  değer aralıklarını kapsayan genelleştirilmiş bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.94)$$

Daha hassas mühendislik çözümlmeleri yapmak için aşağıdaki bağıntı önerilir:

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}, \quad Ra_L \lesssim 10^9 \quad (2.95)$$

#### 2.2.5.4 Kütle geçişi

Kütle geçişi denklemlerinde, daha genel bir ifade ile yoğunluk farkını da barındıran bir  $Gr$  sayısı kullanılır.

$$Gr_L = \frac{g(\Delta\rho/\rho)L_c^3}{\nu^2} = \frac{g(\rho_s - \rho_\infty)L_c^3}{\rho\nu^2} \quad (2.96)$$

Benzer biçimde mühendislik hesaplamalarında kullanılmak üzere aşağıdaki biçimde bağıntılar kullanılır.

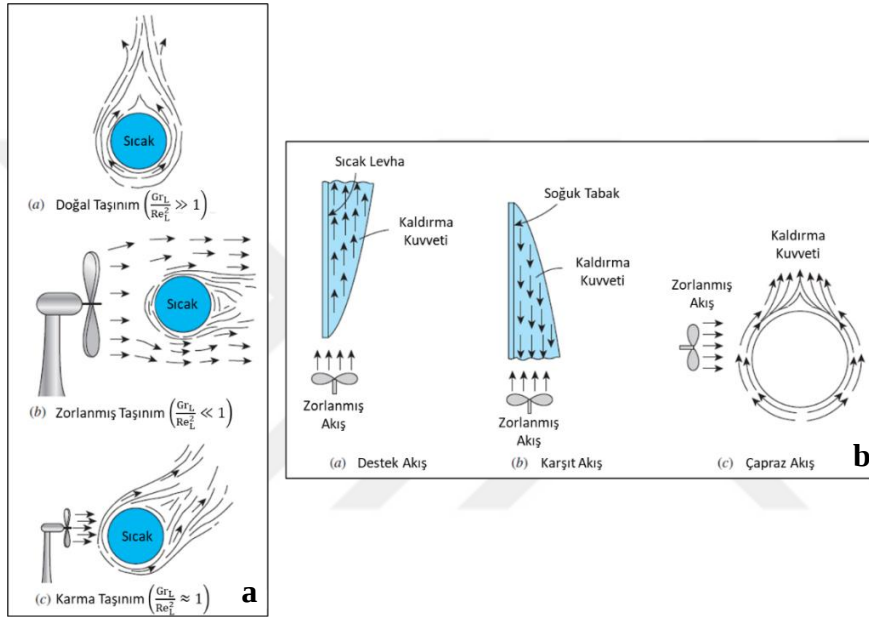
$$\overline{Sh}_L = \frac{\bar{h}_m L_c}{D_{AB}} = C(Gr_L Sc)^n \quad (2.97)$$

Laminer akış için geliştirilen ampirik bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$\overline{Sh}_L = C(Gr_L Sc)^n = 0,59(Gr_L Sc)^{1/4}, \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (2.98)$$

## 2.2.6 Karma doğal ve zorlanmış taşınım

Re sayısı atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını, Gr sayısı ise kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını temsil eder. Akıştaki atalet kuvvetleri kaldırma kuvvetlerine göre baskınsa zorlanmış taşınım, daha zayıfsa doğal taşınım, eşdeğerse birleşik/karma taşınım olayı gözlenir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Doğal, zorlanmış ve karma akış (a), destek, karşıt ve çapraz akış (b) [14].

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \approx 1 \rightarrow \text{doğal + zorlanmış taşınım}$$

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \ll 1 \rightarrow \text{zorlanmış taşınım} \quad (2.99)$$

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \gg 1 \rightarrow \text{doğal taşınım}$$

Karma akış durumunda aşağıdaki denklem kullanılarak çözümler yapılır:

$$Nu^3 = Nu_F^3 \pm Nu_N^3 \quad (2.100)$$

$$Sh^3 = Sh_F^3 \pm Sh_N^3 \quad (2.101)$$

Bu denklemde  $Nu_F$  ve  $Nu_N$  terimler sırasıyla zorlanmış ve doğal taşınımındaki Nusselt sayılarını temsil etmektedir. Artı işareti akışın desteklenen veya çapraz akış olduğunu, eksi işareti akışın ters akış olduğunu gösterir.

### 2.2.7 Eşzamanlı ısı ve kütle geçişi (buharlaşmalı soğutma)

Bir sıvı üzerinden gaz akışı olduğu durumlarda buharlaşmalı soğutma olayı gözlenir.

$$q''_{sens,conv} = q''_{latent,evap} \quad (2.102)$$

Buharlaşma ile gerçekleşen ısı geçişi hesabı için aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$q''_{evap} = n''_A h_{fg} \quad (2.103)$$

Bu denklemin Newton'un 2. yasası ile birlikte eşitliğe yazılması durumunda aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$h(T_\infty - T_s) = n''_A h_{fg} = h_{fg} h_m [\rho_{A,sat}(T_s) - \rho_{A,\infty}] \quad (2.104)$$

$$T_\infty - T_s = h_{fg} \left( \frac{h_m}{h} \right) [\rho_{A,sat}(T_s) - \rho_{A,\infty}] \quad (2.105)$$

$$T_s = T_\infty - \frac{M_A h_{fg}}{R_u \rho c_p Le^{2/3}} \left[ \frac{P_{A,sat}(T_s)}{T_s} - \frac{P_{A,\infty}}{T_\infty} \right] \quad (2.106)$$

## 2.3 Rüzgar Tünelleri

Bu bölümde, rüzgar tünelleri hakkında genel bilgiler verilecek ve çalışma kapsamında tasarlanan rüzgar tünelinin seçilme nedenleri aktarılacaktır.

Rüzgar tünelleri; tünel içerisine yollanan kontrollü akışın, tünelde bulunan test objesine uyguladığı etkinin incelenmesine olanak sağlayan aletlerdir. Rüzgar tünelindeki akışkan hızı, basınç ve sıcaklık gibi özellikler kontrol edilerek tünel içerisinde arzu edilen test koşulları oluşturulabilir [21].

Rüzgar tüneline oluşturan ana bölümler; test odası, daralma konisi, dinlenme odası, yayıcı ve fan olarak özetlenebilir [22]. Rüzgar tünelinin tasarımında ve imalatında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, test odasında homojen bir akışın

sağlanmasıdır. Her bir bölüm, test odasının girişinden çıkışına kadar olan hava akışının üniformluğunu korumaya yönelik özelliklere sahiptir. Bu bölümler sayesinde, içerisinde numune olmadığı sürece, test odasındaki türbülans ortadan kalkmış olur [23].

Rüzgar tünelleri, genellikle çalışma hızlarına göre ve çevrim türlerine göre sınıflandırılmaktadırlar.

### 2.3.1 Çalışma hızlarına göre rüzgar tünelleri

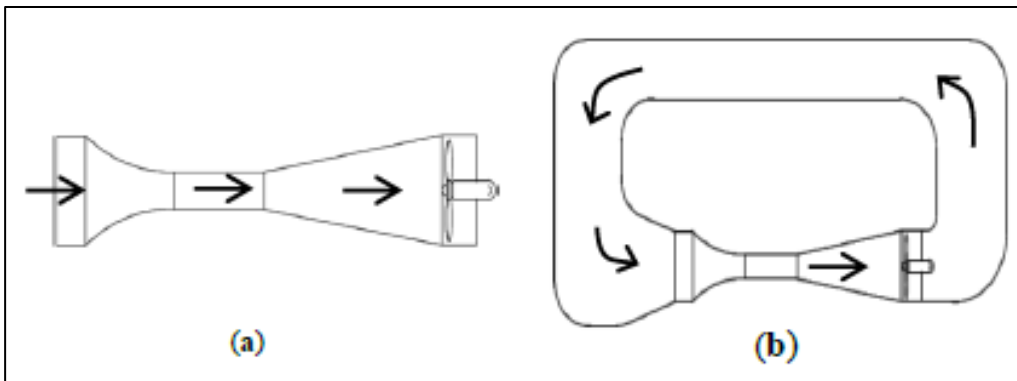
Rüzgar tünelleri çalışma hızlarına (hava akımı hızlarına) göre dörde ayrılır:

1. Ses hızı altı (subsonic) rüzgar tünelleri: Düşük ses hızı altı ve yüksek ses hızı altı rüzgar tünelleri olmak üzere ikiye ayrılır. Düşük ses hızı altı rüzgar tünelleri, test odasında 0,4'ün altında Mach sayısı değerine sahip rüzgar tünelleridir. Yüksek ses hızı altı rüzgar tünelleri ise 0-0,8 aralığında Mach değerleri görülür.
2. Ses hızı (transonic) rüzgar tünelleri: 0,8-1,2 aralığında Mach değerlerine sahiptir.
3. Ses hızı üstü (supersonic) rüzgar tünelleri: 1,2-5 aralığında Mach değerlerine sahiptir.
4. Ses hızından hızlı (hipersonic) rüzgar tünelleri: Mach sayısı 5'in üzerinde olan rüzgar tünelleridir [24, 25].

Tezde kullanılacak hava hızları bulaşık makinesi içerisinde gözlenen büyüklüklerde olduğundan dolayı, ses hızı altı rüzgar tünelleri ile çalışılmıştır.

### 2.3.2 Çevrim türlerine göre rüzgar tünelleri

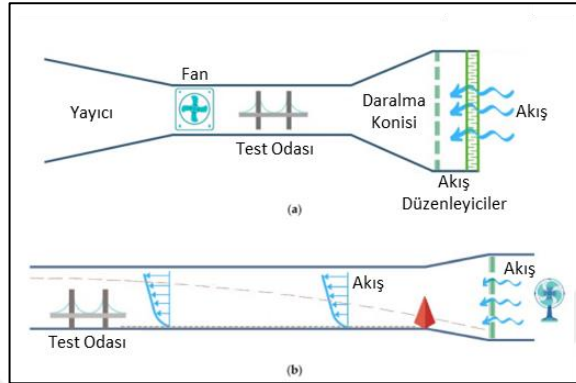
Rüzgar tünelleri, çevrim türlerine göre açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere temelde ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13: Açık çevrim (a) ve kapalı çevrim (b) rüzgar tünelleri [26].

### 2.3.2.1 Açık çevrim rüzgar tünelleri

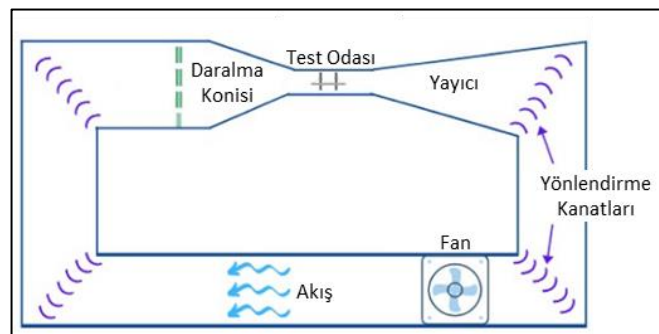
Açık çevrim rüzgar tünelleri, deney için gerekli havanın çevreden alınması ve tekrardan çevreye verilmesi mantığıyla çalışmaktadır. İki farklı tasarıma sahip olabilirler: basma tipi açık çevrim rüzgar tünelleri ve emme tipi açık çevrim rüzgar tünelleri (Şekil 2.14) [25, 27].



Şekil 2.14: Emme tipi (a) ve basma tipi (b) açık çevrim rüzgar tünelleri [28].

Basma tipi (blower-type) açık çevrim rüzgar tünellerinde, hava akışı test odasından önceki bir bölüme yerleştirilen ve test odasına hava basan fan yardımıyla sağlanmaktadır. Emme tipi (suction-type) açık çevrim rüzgar tünellerinde ise, hava akışını test odasından sonraki bir bölüme yerleştirilen ve test odasından hava emen bir fan sağlamaktadır [25].

### 2.3.2.2 Kapalı çevrim rüzgar tünelleri



Şekil 2.15: Kapalı çevrim rüzgar tüneli [28].

Kapalı çevrim rüzgar tünellerinde deneyde kullanılan hava çevreye verilmektense, kapalı bir çevrimde dolaştırılarak kontrollü olarak tekrardan giriş bölümüne verilir (Şekil 2.15). Rüzgar tüneli çalışmaya devam ettikçe, başlangıçta alınan hava sürekli olarak kullanılmaya devam edilmektedir. Bu sebeple, açık çevrim rüzgar tünellerinde ortama atılan hava nedeniyle oluşan kinetik enerji kayıpları kapalı çevrim rüzgar

tünellerinde olmaz. Ancak havanın tekrardan kullanılabilmesi adına eklenen 90°'lik dönüşler nedeniyle kayıplar oluşmaktadır [29]. Bu tip rüzgar tünelleri, akış şartlarının kontrolünü arttırmasına karşın oldukça büyük ve maliyetlidir [25].

### 2.3.2.3 Avantajlar ve dezavantajlar

Her iki rüzgar tüneli çeşidinin de birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır ve kullanım şartları ve amaçlarına göre birbirleri yerine tercih edilebilirler.

Açık çevrim rüzgar tünellerinin;

Avantajları:

- İmalat maliyetinin az olması,
- İmalatının ve montajının kolay olması,
- Kolay temizlenebilmesi olarak sıralanabilir.

Dezavantajları ise:

- Tünelin bulunduğu ortamın hava şartlarından kolayca etkileniyor olması,
- Tüketilen gücün fazla olması,
- Gürültü seviyesinin fazla olması olarak sıralanabilir [30].

Avantajları ve dezavantajları değerlendirildiğinde, açık çevrim rüzgar tünelleri yüksek performansa ihtiyaç duyulmayan durumlarda maliyet ve imalat avantajları dolayısıyla tercih edilmektedir [25].

Kapalı çevrim rüzgar tünellerinin;

Avantajları:

- Akım kalitesini belirleyen akım düzgünlüğü ve ortam sıcaklığı gibi akım şartlarının kontrollü bir şekilde sağlanabilmesi,
- Daha az enerji ile opere edilebilmesi,
- Daha az gürültü kirliliğine sebep olması olarak sıralanabilir.

Dezavantajları:

- Temizliğinin ve bakımının zor olması,
- Hava şartlandırıcılara ihtiyaç duyulduğundan maliyetinin yüksek olması olarak sıralanabilir [30].

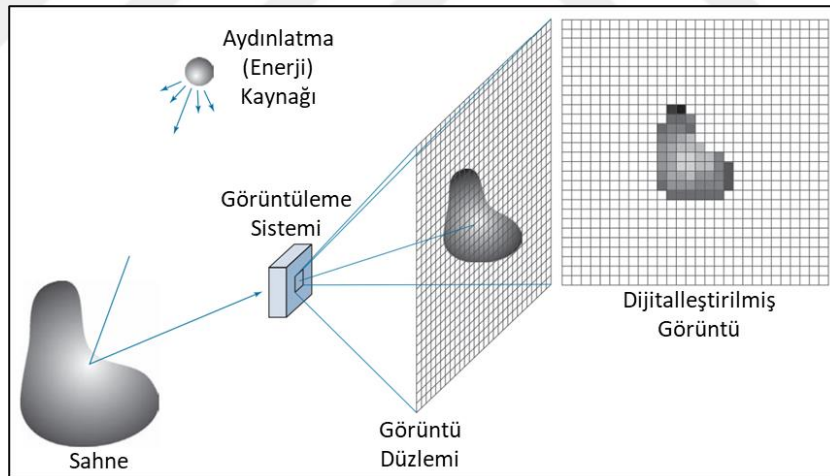
Rüzgar tüneli içerisinde hava şartlandırma üniteleri olan bir laboratuvara yerleştirileceğinden dolayı, açık çevrim rüzgar tüneli kullanılması durumunda halihazırda şartlandırılmış bir hava kullanılabilir. Kullanılacak olan hava hızları çok düşük olduğundan, harcanacak olan enerji ile ilgili bir problem bulunmamaktadır. Ek olarak, rüzgar tüneli kendisi için ayrılan bir alanda konumlandırılacağından gürültü ile ilgili sorunlar da ortadan kalkmaktadır.

Bu sebeplerle, sağladığı diğer avantajlar da göz önünde bulundurulduğunda, tez çalışmasında emme tipi açık çevrim rüzgar tüneli kullanılmıştır.

## 2.4 Dijital Görüntü İşleme Yöntemi

Tez kapsamında, porselen tabak üzerinde gerçekleşen buharlaşma miktarının gözlemlenebilmesi ve analiz edilebilmesi için dijital görüntü işleme yöntemi kullanılmıştır.

Dijital görüntü işleme, dijital bir görüntülerin toplanması, işlenmesi ve analiz edilmesi süreçlerini içeren bir manüpülasyon yöntemidir (Şekil 2.16) [31].

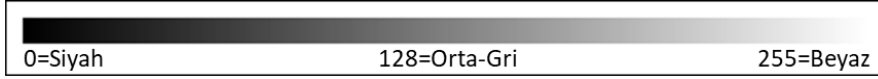


Şekil 2.16: Dijital görüntü işleme [32].

Dijital görüntü işleme, görüntüleri renkli formattan (RGB) gri-tonlamalı formata (grayscale) dönüştürme, gürültü azaltma, detayları artırma, nesne tespiti ve sınıflandırılması gibi işlemleri içerir. Bu süreçlerin anlaşılabilmesi için, dijital görüntülerin nasıl temsil edildiği ve işlendiğine dair bazı temel kavramları incelemek faydalı olacaktır.

Dijital görüntüler, bir dizi piksel olarak temsil edilebilir. Her bir piksel, görüntünün belirli bir bölgesini temsil eder ve belirli bir renk veya ton değerine sahiptir. Renkli bir

görüntü genellikle RGB (Red, Green, Blue - Kırmızı, Yeşil, Mavi) formatında temsil edilir. RGB formatında, her bir pikselin üç değeri vardır: kırmızı, yeşil ve mavi. Bu değerler tipik olarak 0-255 aralığındadır. 0-255 değer aralığı, dijital görüntülerde yaygın olarak kullanılan bir yoğunluk veya parlaklık ölçeğidir. Bu ölçekte, 0 pikselin en koyu (genellikle siyah) olduğu ve 255'in en açık (genellikle beyaz) olduğu anlamına gelir (Şekil 2.17) [31, 32, 33].



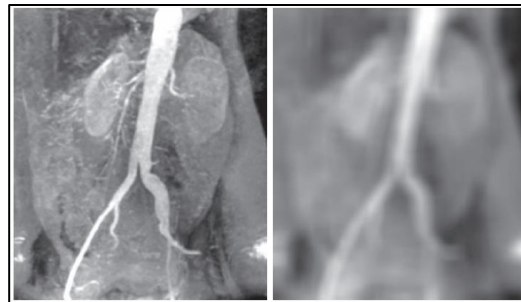
**Şekil 2.17:** Piksel yoğunluk ölçeği [34].

Bir görüntüyü gri tonlamalı formata çevirmek, genellikle görüntü işlemenin ilk adımlarından biridir. Bir görüntüyü renkli bir formattan gri tonlamalı (grayscale) bir formata dönüştürür (Şekil 2.18). Gri tonlama, her pikselin sadece bir ton değeri olduğu bir görüntü formatıdır. Bu genellikle bir görüntünün renk bilgisini ortadan kaldırmak ve görüntü işleme algoritmalarının karmaşıklığını azaltmak için kullanılır [31, 32, 33, 35].



**Şekil 2.18:** Bir görselin orijinal ve gri tonlamalı formata dönüştürülmüş hali [36].

Bir görüntüyü "blur"lamak (bulanıklaştırmak) genellikle gürültüyü azaltmak için kullanılır. Her bir pikselin değerini, genellikle kendisi ve komşu piksellerin değerlerinin ortalaması veya medyanı olarak ayarlar. Görüntüdeki yüksek frekanslı detayları (örneğin, keskin kenarlar ve doku) azaltır (Şekil 2.19) [32, 33, 37, 38].



**Şekil 2.19:** Bir görselin orijinal ve bulanıklaştırılmış hali [32].

Bir görüntüyü gri tonlamalı formata dönüştürdükten ve bulanıklaştırdıktan sonra, genellikle çeşitli analiz ve işlem adımları uygulanır. Bunlar arasında görüntü iyileştirme, kenar tespiti, nesne tespiti ve sınıflandırma ve daha fazlası bulunabilir.

En çok kullanılan görüntü işleme uygulamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Önişleme:** Görüntü dosyasının okunması, boyutlandırılması, renk formatının değiştirilmesi ve görüntüdeki gürültü ve bozulmaların azaltılması gibi işlemler gerçekleştirilir.
- **Görüntü iyileştirme:** Görüntüdeki detayların artırılması, gürültünün azaltılması, renk düzeltilmesi ve kontrastın artırılması gibi işlemler yardımıyla görüntü kalitesi iyileştirilir.
- **Kenar tespiti:** Bir görüntüdeki anlamlı sınırları veya kenarları belirlemek için kullanılır. Kenarlar, genellikle bir görüntünün yoğunluğundaki keskin değişikliklere karşılık gelir.
- **Nesne tespiti ve sınıflandırması:** Görüntüdeki belirli nesnelerin tespiti ve sınıflandırılması için makine öğrenmesi gibi birtakım araçlar kullanılarak gerçekleştirilir. Renk, şekil, boyut ve konum gibi nesne özellikleri kullanılır.
- **Görüntü sıkıştırma:** Resim dosyasının boyutunu küçültmek için kullanılır. Saklama ve paylaşım için kolaylık sağlasa da, resim kalitesinde bozulmalar görülebilir.

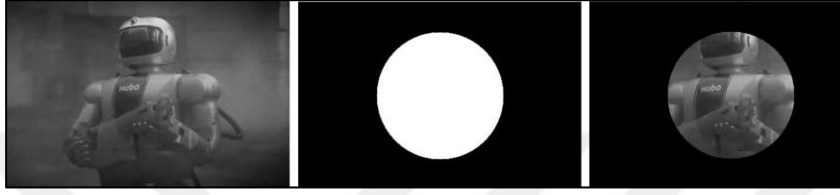
Tez kapsamında, gri tonlamalı formata (grayscale) dönüşüm ve medyan bulanıklaştırma (median blur) adımlarından sonra aşağıdaki görüntü işleme adımları uygulanmıştır:

- **Dairesel şekil tespiti:** Bir görüntüde dairesele şekilleri tespit etmek için kullanılan bir tekniktir. Hough Transform adı verilen bir teknik kullanılarak gerçekleştirilebilir. Hough Transform, bir görüntüde belirli geometrik şekilleri bulmak için kullanılan bir tekniktir. Her piksel üzerinden iterasyon yapılır ve belirli bir yarıçapa sahip potansiyel çemberler tespit edilir (Şekil 2.20) [31, 33, 39, 40].



**Şekil 2.20:** Bir görselde bulunan dairesele şekillerin tespiti [40].

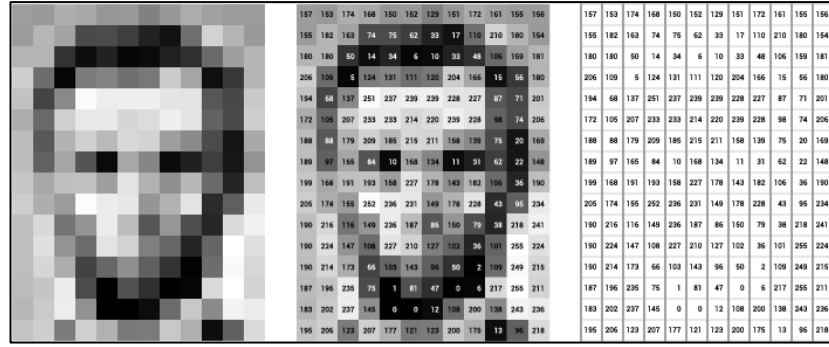
- Maskeleme ve kırpma: İki görüntü arasında bir çeşit “mantıksal ve” işlemi gerçekleştirir. Genellikle bir görüntünün belirli bir bölgesini maskelemek için kullanılır. Belirlenen çember, orijinal görüntü üzerine bir maske olarak uygulanır. İki resimdeki her piksel için, her iki resimde de aynı piksel pozisyonundaki değerlerin “mantıksal ve” işleminin hesaplanması sonucunda; yalnızca iki resim arasındaki ortak piksellerin korunmasını sağlar ve diğer tüm pikselleri siyah renge (0) dönüştürür. Bu işlem, görüntüden sadece belirli bir alanı (bu durumda, tespit edilen daire) almak için kullanılır (Şekil 2.21) [32, 33, 37, 41].



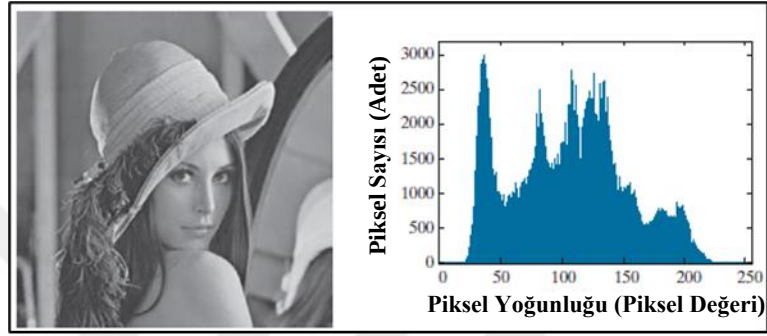
**Şekil 2.21:** Bir görseli çember şeklinde maskeleme ve kırpma [42].

- Arka plan kaldırma: Arka planın kaldırılması genellikle bir görüntüden istenmeyen alanları ortadan kaldırmak için kullanılır. Bir görüntüdeki nesneleri segmente etmeye ve vurgulamaya yarar. Genellikle bir görüntüyü temizlemek ve analizi kolaylaştırmak için kullanılır [33, 43].
- Piksel yoğunluğu analizi: Bir dizi görüntü işleme işlemlerinden sonra, piksellerdeki renk yoğunluğu sayısal değerlere çevrilerek yoğunluk sayısal değerlerden oluşan bir matrise dönüştürülebilir (Şekil 2.22). Çeşitli özel kullanım amaçlarına göre; görselin ortalama renk yoğunluğunu hesaplamak veya görseldeki renk yoğunluğu dağılımını gösteren grafikler çizdirmek mümkündür (Şekil 2.23).
- Isı haritası çıkartma: Isı haritaları, genellikle bir matris veya 2D görüntü biçiminde verilerin görsel bir temsidir (Şekil 2.24). Genellikle belirli bir değer veya yoğunluğu göstermek için renk haritası veya renk gradyanları kullanır. Isı haritası çıkartma işlemi, belirli bir nesnenin görüntüdeki yoğunluğu veya diğer özelliklerini vurgulayabilir ve daha karmaşık analizlerin yapılmasına yardımcı olabilir [32, 44].

Bu tekniklerin birleşimi, bir görüntüyü gri tonlamalı formata çevirme, görseli bulanıklaştırma, görselden belirli bir nesneyi (bir tabak) otomatik olarak tespit etme, kırpma, görselin arka planını kaldırma, piksel yoğunluğu analizi ve ısı haritası çıkartma görevlerini gerçekleştirebilir.



Şekil 2.22: Piksel yoğunluğu analizi – yoğunluk matrisi [31].



Şekil 2.23: Piksel yoğunluğu dağılımı – histogram [32].



Şekil 2.24: Bir görselin ısı haritasını çıkartma [32].



### 3. TEORİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında tasarlanan rüzgar tünelinin hesaplamalarından ve levha üzerinde ısı ve kütle geçişi olayları ile ilgili matematiksel hesaplamalar aktarılmaktadır.

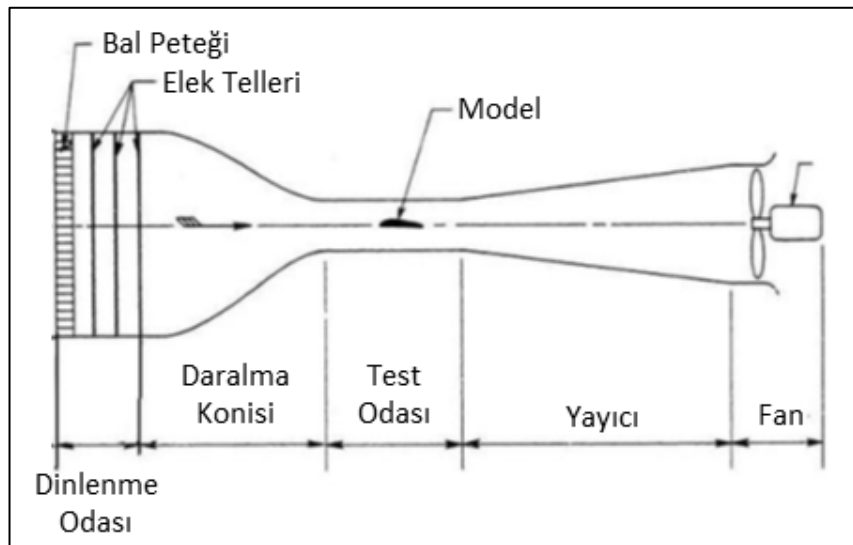
İlk olarak, rüzgar tünelinin her bir bölümünün tasarım kriterleri ve hesaplamalarından bahsedilmektedir. Devamında, porselen bir levha üzerinde ısı ve kütle geçişi doğal taşınım, zorlanmış taşınım ve buharlaşmalı soğutma olayları üzerinden incelenmektedir.

#### 3.1 Rüzgar Tüneli Tasarımı

Rüzgar tünelleri, yıllar içerisinde çeşitli değişimlere uğramıştır ancak temel yapısı gereğiyle (Şekil 3.1) benzer tasarım kurallarına sahiptir. Öncelikli tasarım parametreleri test numunesine ve akış koşullarına bağlı olarak seçilir [25].

##### 3.1.1 Matematiksel hesaplamalar

Bu bölümde, rüzgar tüneline ait test odası, daralma konisi, dinlenme odası ve yayıcı bileşenlerinin her birinin tasarım kriterlerinden bahsedilmektedir. Ardından tasarlanan rüzgar tünelinin boyutları ve katı modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Emme tipi açık çevrim rüzgar tüneli bölümleri [45].

### 3.1.1.1 Reynolds ve Mach boyutsuz sayıları

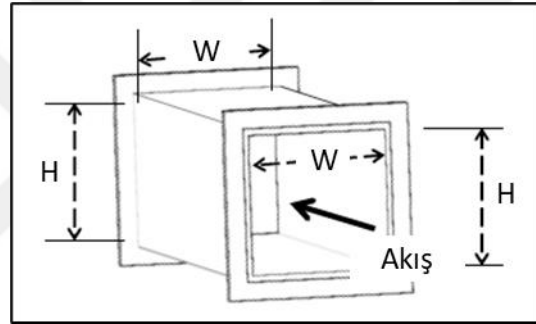
Deneylerde kullanılacak olan 0,2 m/s'lik hava hızları için Reynolds ve Mach boyutsuz sayıları aşağıdaki gibidir:

$$Re = \frac{u_{\infty} D_{h,ts}}{\nu} = \frac{0,2 \cdot 0,3}{1,534 \cdot 10^{-5}} = 3911, \quad 2300 < Re < 4000 \quad (3.1)$$

$$Ma = \frac{u_{\infty}}{c} = \frac{0,2}{343} = 5,83 \cdot 10^{-4} < 0,4 \quad (3.2)$$

Akışın laminar-türbülans geçiş bölgesinde ve düşük ses altı rüzgar tüneli şartlarına uygun olduğu görülmektedir.

### 3.1.1.2 Test odası



Şekil 3.2: Test odası [26].

Test odası akış hızının en yüksek olduğu ve test modelinin yerleştirildiği bölümdür (Şekil 3.2). Rüzgar tünelinin ölçümlerinin kalitesi büyük ölçüde test odasındaki hava akışının kalitesine bağlıdır. Bu durumda test odasındaki hava akışı düzgün ve laminar olmalı ve her noktadaki hava hızı sabit olmalıdır. Test odasına giren havanın türbülansı ne kadar düşükse, testin simülasyon sonuçları o kadar iyi ve doğru olacaktır. Test odasının boyutları, rüzgar tünelinde test edilecek numunenin boyutlarına ve araştırma hedeflerine bağlıdır [25, 27].

Daralma konisinden çıkan akış hidrolik çapın 0.5 katı kadar mesafe katettiğinde üniformlaşır. Buna göre test odasının uzunluğu, hidrolik çapının 0,5 ila 3 katı aralığında olmalıdır. Optimum bir test odası için, hidrolik çapının 2 katı uzunluğuna sahip tasarımlar önerilmektedir [25, 46].

Test odasındaki keskin köşelerde oluşan hız düşüşünü azaltmak ve sınır tabaka kalınlığını azaltmak amacıyla, 45° açılı pah kırılabilir [46].

$$0,5D_{h,ts} \leq L_{ts} \leq 3D_{h,ts} \quad (3.3)$$

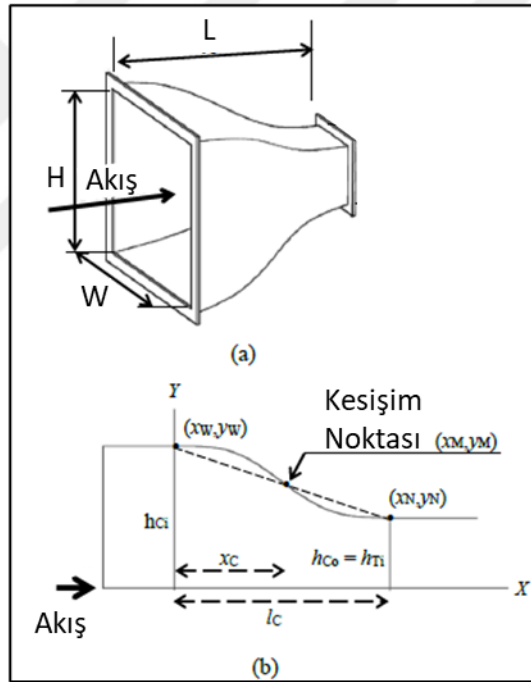
$$D_{h,ts} = \frac{4A_{ts}}{P_{ts}} \quad (3.4)$$

$$A_{ts} = H_{ts}^2, \quad P_{ts} = 4H_{ts} \quad (3.5)$$

Tasarlanan rüzgar tüneline; test odası uzunluğu hidrolik çapının 2 katı olarak seçilmiştir.

$$L_{ts} = 2D_{h,ts}$$

### 3.1.1.3 Daralma konisi



Şekil 3.3: Daralma konisi [26].

Daralma konisi, test odasına giden akışı test odasına girişte düzgün bir akış sağlayacak şekilde hızlandıran bölümdür (Şekil 3.3) [27, 47]. Açık çevrim rüzgar tünellerinin daralma konilerinde elde edilmesi gereken tasarım kriterleri, akış ayrılmalarını önlemek amacıyla potansiyel sınır tabaka kalınlığının ince olması ve daralma konisinin boyutlarının minimal olmasıdır [48, 25].

Tasarım adımı, daralma oranının seçimiyle başlar. Daralma oranı, daralma konisinin giriş alanının test odasına bağlanan çıkış alanına oranını temsil etmektedir. Küçük

rüzgar tünelleri için bu oranın 6 ila 10 arasında olması önerilmektedir [28, 49, 50]. 10'un üzerindeki değerler tünel boyutlarına doğru sürüklerken, 6'dan küçük oranlarda elek tellerinde büyük basınç kayıpları olmaktadır [47]. Boyut ve performans optimizasyonu göz önüne alındığında, daralma oranının 7 alınması optimum bir tasarım sağlar [50]. Daralma konisinin boyunun koninin giriş uzunluğu ile oranı 1 civarındadır [50, 51].

Türbülans sorunları olan rüzgar tünelleri için, 5. dereceden polinom şeklinde bir daralma konisi tasarımı önerilmektedir (Şekil 3.3). Ancak, düşük hızlardaki rüzgar tünelleri için bu tasarıma ihtiyaç yoktur. Dairesel veya dikdörtgen kesitli bir tasarım yeterli olmaktadır [26, 52].

$$6A_{ts} \leq A_{cont} \leq 10A_{ts} \quad (3.6)$$

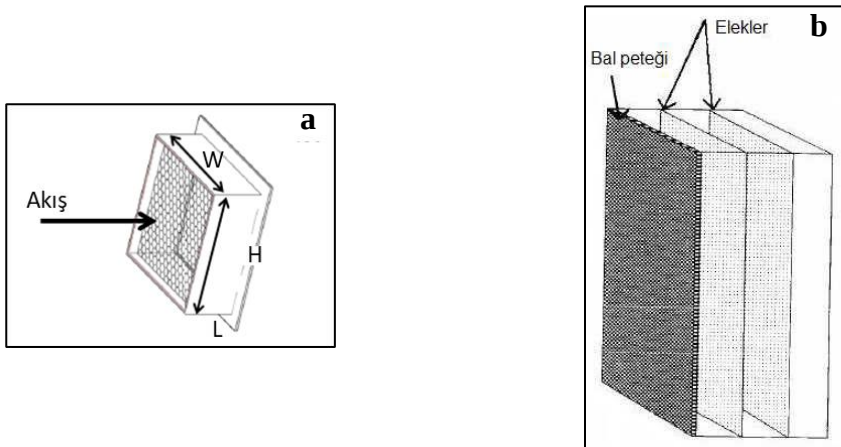
$$0,667 \left( 2 \frac{H_{cont}}{2} \right) \leq L_{cont} \leq 1,79 \left( 2 \frac{H_{cont}}{2} \right) \quad (3.7)$$

Tasarlanan rüzgar tünelimde, daralma oranı 7 ve daralma konisinin boyunun koninin giriş uzunluğu ile oranı 1 olarak alınmıştır.

$$A_{cont} = 7A_{ts}$$

$$L_{cont} = H_{cont}$$

#### 3.1.1.4 Dinlenme odası



**Şekil 3.4:** Dinlenme odası (a) [26], bal peteği ve elek telleri (b) [53].

Test odasına yüksek kaliteli bir hava sokabilmek için, daralma konisine girmeden önce akıştaki türbülans seviyesini azaltmak ve üniform akışı sağlamak amacıyla çeşitli

araçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Dinlenme odası, rüzgar tünelinin en başına yerleştirilen ve hava kalitesini yükselten bal peteği ve elek telleri gibi araçlara sahip olan rüzgar tüneli bölümüdür (Şekil 3.4) [21, 26, 27, 54].

Dinlenme odasının kesiti, daralma konisinin giriş kesiti ile aynıdır. Oda boyutları için ise, kesit hidrolik çapının 0,5 katı önerilmektedir [55].

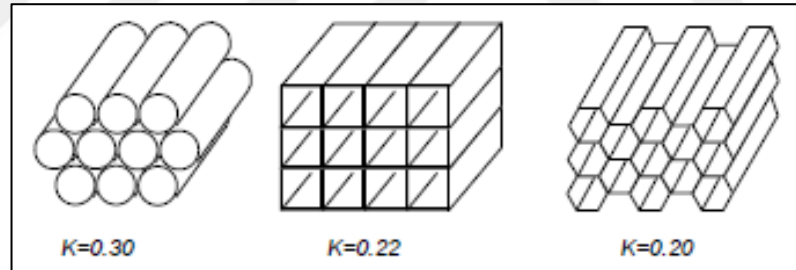
$$A_{sett} = A_{cont}, \quad H_{sett} = H_{cont} \quad (3.8)$$

$$L_{sett} = 0,5D_{h,sett} \quad (3.9)$$

$$D_{h,sett} = \frac{4A_{sett}}{P_{sett}} \quad (3.10)$$

$$P_{sett} = 4H_{sett} \quad (3.11)$$

### Bal petekleri



Şekil 3.5: Bal petekleri ve kayıp katsayıları [25].

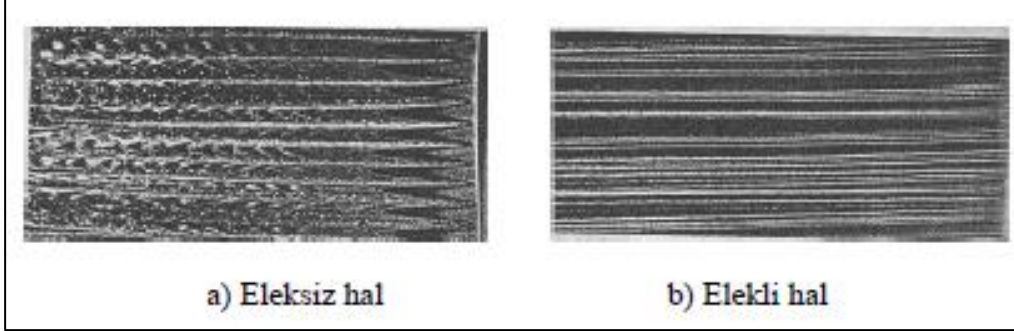
Bal petekleri, akıştaki büyük girdapları kırmaya yarar ve minimum kayıplarla akışı düzeltir [56, 57]. Bal peteklerinin formu dairesel, karesel veya hekzagonal şekillerde olabilir (Şekil 3.5) [58]. Bal peteğinin uzunluğu, bal peteğinin hidrolik çapının 6 ila 8 katı uzunluğunda olmalıdır ve bal peteği ile daralma konisi arasında hidrolik çapın 0,2'si kadar mesafe bulunmalıdır [27].

Bal peteğinin porozitesi, dikkat edilmesi gereken bir diğer tasarım parametresidir. Porozite, akışın geçtiği gerçek alanın toplam kesit alanına bölünmesi yardımıyla bulunur [46]. Porozite değerinin 0,8 ve üzerinde olması önerilir [27, 54].

$$6D_{h,hc} \leq L_{hc} \leq 8D_{h,hc} \quad (3.12)$$

$$\beta_{hc} = \frac{A_{flow}}{A_{hc}}, \quad \beta_{hc} \geq 0,8 \quad (3.13)$$

### Elek telleri



**Şekil 3.6:** Elek tellerinin akım kalitesine etkisi [59].

Bal peteklerinden sonra, akıştaki türbülansı azaltmak amacıyla gerdirilmiş elek telleri yerleştirilir. Elek telleri, çember veya kare şeklinde örülmüş metal tellerdir [21]. Akıştaki büyük girdapları kırarak daha küçük girdaplar haline getirir (Şekil 3.6). Türbülansı etkin bir biçimde azaltabilmek için 0,58 ila 0,8 değerleri arasında poroziteye sahip elek telleri kullanılmalıdır [47, 60]. 0,8'in üzerindeki değerler gerekli türbülans kontrolünü sağlamazken, 0,58'in altındaki değerler akışta süreksizliğe sebep olmaktadır [47, 61].

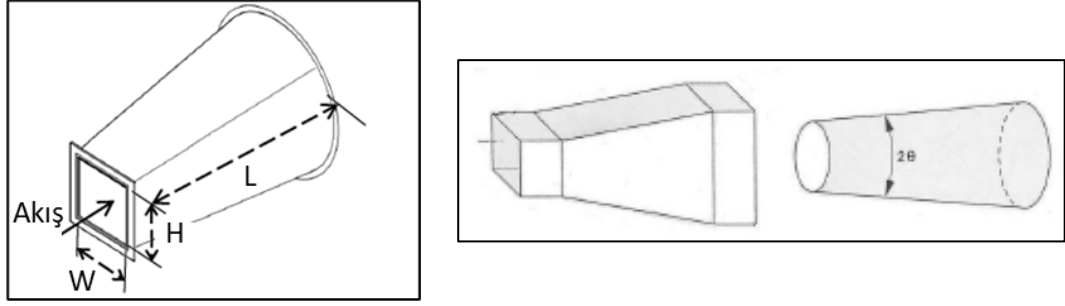
Bal peteklerinde olduğu gibi, elek tellerinde de bir diğer bileşen ile arasında hidrolik çapın 0,2'si kadar mesafe olması şartı bulunmaktadır [27].

$$\beta_{sc} = \frac{A_{flow}}{A_{sc}}, \quad 0,58 \leq \beta_{sc} \leq 0,8 \quad (3.14)$$

$$L_{gap} \leq 0,2D_{h,sett} \quad (3.15)$$

#### 3.1.1.5 Yayıcı

Yayıcı, fandaki yükü azaltmak amacıyla hava akış hızını yavaşlatmayı sağlayan bölümdür (Şekil 3.7) [27]. Yayıcıda, akıştaki kinetik enerji basınç enerjisine dönüştürülür [47]. Tasarım aşamasında, fana giden hava hızını mümkün olan en kısa tasarım ile istenen seviyeye getirmek hedeflenir. Test odasının çıkış alanı (yayıcının giriş alanı) ile yayıcının çıkış alanı arasındaki oran ve yayıcı açısı tasarım kriterlerini oluşturur [49, 62].



**Şekil 3.7:** Yayıcı [27, 63].

Yayıcı oranının 2 ila 3 arasında olması gerekmektedir birlikte, mümkün olan en küçük değerin kullanılması önerilmektedir [25]. Boyutlar ve performans arasındaki optimizasyon göz önünde bulundurulduğunda, yayıcı oranının 2 olarak seçilmesi önerilmektedir [46].

Yayıcı açısı ne kadar küçükse, yayıcı o kadar verimli olur [48]. Düşük hızlı rüzgar tünellerinde yayıcı açısının  $6^\circ$ 'yi geçmemelidir [25]. Çok uzun yayıcılar basınç düşüşlerine sebep olduğundan,  $4^\circ$  iyi bir tasarım değeridir [46].

$$2A_{ts} \leq A_{diff} \leq 3A_{ts} \quad (3.16)$$

$$\alpha_{diff} \leq 6^\circ \quad (3.17)$$

Tasarlanan rüzgar tüneline; yayıcı oranı 2 ve yayıcı açısı  $4^\circ$  olarak seçilmiştir.

$$A_{diff} = 2A_{ts}$$

$$\alpha_{diff} = 4^\circ$$

### 3.1.1.6 Rüzgar tüneli boyutları

Çizelge 3.1, belirlenen tasarım parametrelerine göre tasarlanmış rüzgar tüneline boyutlarını göstermektedir.

Tasarlanan rüzgar tüneline, 0,2 m aralıklarla art arda yerleştirilmiş elek telleri kullanılmıştır. “4 Mesh” boyutlarına sahip elek telleri, 1 mm tel kalınlığına ve %71,26 poroziteye sahiptir.

Rüzgar tüneli tasarlanırken, bal peteği tasarımı da yapılmıştır. Ancak bal peteği boyutları nedeniyle oluşan maliyetten ve bal peteği kullanılmadan da istenilen akış koşulları elde edilebildiğinden dolayı bal peteği kullanılmamıştır.

**Çizelge 3.1:** Rüzgar tüneli boyutları.

| Bileşen        | Giriş Kesiti<br>(HxW)<br>(m <sup>2</sup> ) | Çıkış Kesiti<br>(HxW)<br>(m <sup>2</sup> ) | Uzunluğu<br>(L)<br>(m) | Açı    |
|----------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|--------|
| Dinlenme Odası | 0,794x0,794                                | 0,794x0,794                                | 0,397                  | 0°     |
| Daralma Konisi | 0,794x0,794                                | 0,300x0,300                                | 0,794                  | 17,28° |
| Test Odası     | 0,300x0,300                                | 0,300x0,300                                | 0,600                  | 0°     |
| Yayıcı         | 0,300x0,300                                | 0,424x0,424                                | 0,886                  | 4°     |

### 3.2 Porselen Levha Üzerinde Isı ve Kütle Geçiş Olayları

Tezin bu bölümü kapsamında, bulaşık makinelerinin içerisinde çoğunlukla bulunan yükler arasında olan porselen bir tatlı tabağı için ısı ve kütle geçiş olaylarının matematiksel olarak analizi yapılmıştır.

Isı ve kütle geçiş olayları fanlı ve fansız durumlar için incelenmiştir. Fanın çalıştığı durumda, rüzgar tüneli içerisinde bulunan ve üzerinden 0,2 m/s hıza, 23°C sıcaklığa ve %70 bağıl neme sahip hava geçen 19 cm çapındaki dairesel kesitli bir porselen tatlı tabağı üzerinde incelemeler yapılmıştır. Tabağın sahip olduğu çukurluk, tatlı tabağı olduğundan oldukça sığdır. Bu sebeple hesaplamalarda tabak düz bir levha olarak kabul edilmiştir. Fanın çalışmadığı durumda ise, hızın sıfır olduğu durum üzerinde incelemeler yapılmıştır.

Literatür bölümünde türetilen teorik ve ampirik bağıntılar Microsoft Excel ve Python yardımıyla her bir birim saniye için çözdürülmüş ve zamana bağlı değişim grafikleri elde edilmiştir.

Hesaplamalar sonucunda elde edilen zamana bağlı grafikler, “Deneysel Çalışmalar” başlığının altında deneysel çalışmalardan ve dijital görüntü işleme sonuçlarından elde edilen grafikler ile kıyaslanmıştır.

Termofiziksel özelliklerin bulunmasında ve psikrometri hesaplamalarında çeşitli termodinamik ve ısı ve kütle geçiş kaynak kitaplarından ve ders notlarından yararlanılmaktadır [14, 20, 64].

Hesaplamalarda kullanılan sabit değerler aşağıdaki gibidir:

$$g = 9,81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \quad L_c = 0,19 \text{ (m)} \quad (3.18)$$

$$u_\infty = 0,2 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad A_s = 2 * \frac{\pi L_c^2}{4} (\text{m}^2) \quad (3.19)$$

$$k = 0,25362.10^{-1} \left( \frac{\text{W}}{\text{m. K}} \right) \quad v = 0,15436.10^{-4} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad (3.20)$$

$$\alpha = 0,21142.10^{-4} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad c_{p,a} = 1007 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg. K}} \right) \quad (3.21)$$

$$m_p = 0,25 \text{ (kg)} \quad c_{p,p} = 1085 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg. K}} \right) \quad (3.22)$$

$$P_{\text{atm}} = 101325 \text{ (Pa)} \quad P_{\text{sat},\infty} = 2837,56 \text{ (Pa)} \quad (3.23)$$

$$R_{u,v} = 461,5 \left( \frac{\text{Pa. m}^3}{\text{kg. K}} \right) \quad R_{u,a} = 287 \left( \frac{\text{Pa. m}^3}{\text{kg. K}} \right) \quad (3.24)$$

İkili kütle yayılım katsayısı ve tabak yüzeyindeki doyma basıncı aşağıdaki bağıntılar yardımıyla zamanla sıcaklığa bağlı olarak hesaplanarak çözümlenmeler yapılmıştır.

$$D_{AB} = 1,87.10^{-10} \cdot \frac{T_\infty^{2,072}}{P_{\text{atm}}} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right), \quad 280 \text{ K} < T < 450 \text{ K} \quad (3.25)$$

$$P_{\text{sat},s} = (0,76.10^{-2}(T_s)^2 - 0,206T_s + 3,4761)10^3 \text{ (Pa)} \quad (3.26)$$

Psikrometri hesaplamalarında kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir:

$$P_{v,\infty} = P_{\text{sat},\infty} RH_\infty \text{ (Pa)}, \quad P_{v,s} = P_{\text{sat},s} RH_s \text{ (Pa)} \quad (3.27)$$

$$P_{a,\infty} = P_{\text{atm}} - P_{v,\infty} \text{ (Pa)}, \quad P_{a,s} = P_{\text{atm}} - P_{v,s} \text{ (Pa)} \quad (3.28)$$

$$\rho_{v,\infty} = \frac{P_{v,\infty}}{R_{u,v}T_\infty} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right), \quad \rho_{v,s} = \frac{P_{v,s}}{R_{u,v}T_s} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (3.29)$$

$$\rho_{a,\infty} = \frac{P_{a,\infty}}{R_{u,a}T_{\infty}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right), \quad \rho_{a,s} = \frac{P_{a,s}}{R_{u,a}T_s} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (3.30)$$

$$\rho_{\infty} = \frac{P_{v,\infty}}{R_{u,v}T_{\infty}} + \frac{P_{a,\infty}}{R_{u,a}T_{\infty}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right), \quad \rho_s = \frac{P_{v,s}}{R_{u,v}T_s} + \frac{P_{a,s}}{R_{u,a}T_s} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (3.31)$$

$$m_{a,\infty} = \frac{P_{a,\infty}V_{\infty}}{R_{u,a}T_{\infty}} (\text{kg}), \quad m_{a,s} = \frac{P_{a,s}V_s}{R_{u,a}T_s} (\text{kg}) \quad (3.32)$$

$$m_{\infty} = \rho_{\infty}V_{\infty} (\text{kg}), \quad m_s = \rho_sV_s (\text{kg}) \quad (3.33)$$

$$w_{v,\infty} = \frac{m_{v,\infty}}{m_{\infty}}, \quad w_{v,s} = \frac{m_{v,s}}{m_s} \quad (3.34)$$

$$w_{a,\infty} = \frac{m_{a,\infty}}{m_{\infty}}, \quad w_{a,s} = \frac{m_{a,s}}{m_s} \quad (3.35)$$

$$\rho = \frac{\rho_{\infty} + \rho_s}{2} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (3.36)$$

Bölüm 2.2’de verilen laminar sınır tabaka denklemleri ile matematiksel hesaplamalar yapılmıştır.

Zorlanmış taşınımında, akışın laminar veya türbülanslı olduğunu tespit edebilmek adına Reynolds sayısı hesaplanmıştır. Reynolds sayısının  $5.10^5$ ’ten büyük olması durumunda, akışın türbülanslı akışa dönüşmeye başladığı görülmektedir.

$$Re_L = \frac{u_{\infty}L_c}{\nu}, \quad Re_{x,c} = 5.10^5 \quad (3.37)$$

Çalışmalar kapsamında sağlanan akışın Re sayısı 2461,78’dir, bu sebeple zorlanmış taşınım şartlarında akışın laminar olduğu durum için hesaplamalar yapılabilir.

Doğal taşınımında ise, akışın laminar veya türbülanslı olduğunun tespiti için Rayleigh sayısının bilinmesine ihtiyaç vardır. Rayleigh sayısının  $10^9$ ’dan büyük olması, akışın türbülanslı bölgeye geçmeye başladığını gösterir. Rayleigh sayısı aşağıdaki denklemler yardımıyla elde edilebilir.

Sıcaklık değeri, film sıcaklığı hesaplanarak elde edilmiştir:

$$T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2} \text{ (K)} \quad (3.38)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \left( \frac{1}{K} \right) \quad (3.39)$$

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_\infty - T_s)L_c^3}{\nu^2} \quad (3.40)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.41)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr, \quad Ra_{x,c} \approx 10^9 \quad (3.42)$$

Tez kapsamında yapılan çalışmada, Rayleigh sayısının en büyük  $1,1 \cdot 10^7$  değerini aldığı görülmektedir. Bu sebeple, doğal taşınım şartlarında akışın laminar olduğu durum için hesaplamalar yapılabilir.

Eğer akışta atalet kuvvetleri ve kaldırma kuvvetleri birbirine karşı baskın değilse, doğal ve zorlanmış taşınımdan herhangi biri ihmal edilemez. Bu durumda, karma taşınım hesaplamaları yapılması gerekir. Bu durumun kontrolü için aşağıdaki kontrol yapılır:

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \approx 1 \rightarrow \text{doğal + zorlanmış taşınım} \quad (3.43)$$

Karma karışım durumunda aşağıdaki denklemlerden yararlanılır:

$$Nu^3 = Nu_F^3 \pm Nu_N^3 \quad (3.44)$$

$$Sh^3 = Sh_F^3 \pm Sh_N^3 \quad (3.45)$$

Çalışmalar kapsamında sağlanan akışta,  $\frac{Gr}{Re^2}$  eşitliğinin sonucu, tabağın sıcaklığının zamanla düşmesinden kaynaklı sürekli değişim göstermektedir. Deney başlangıcında (tabak sıcakken) bu değer 2,6 iken, sıcaklık düştükçe sıfıra yakınsamaktadır. Bu sebeple; deney başlangıcında eşitlik sonucu 1 değerine yakinken karma karışım, bir süre sonra tabak sıcaklıkları 23°C'ye düşüp eşitlik sonucu 0 değerine yakınsadığında ise sadece zorlanmış taşınım hesaplamaları yapılmıştır.

### 3.2.1 Isı geçişi

Taşınımla ısı geçişi hesaplamalarının yapılmasında Newton'un soğuma yasasından yararlanılır. Buna göre:

$$q_{conv} = \bar{h}A_s(T_s - T_{\infty}) \text{ (W)} \quad (3.46)$$

Taşınımla ısı geçişi katsayısının bulunması için, Nusselt boyutsuz sayısından faydalanılır. Doğal ve zorlanmış taşınım koşulları için geliştirilmiş teorik ve ampirik bağıntılar aşağıdaki gibidir (Çalışma koşullarında Prandtl sayısı 0,73'e eşittir.):

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h}L_c}{k} \Rightarrow \bar{h} = \frac{\bar{Nu}_L k}{L_c} \quad (3.47)$$

$$Nu^3 = Nu_F^3 \pm Nu_N^3 \quad (3.48)$$

#### 3.2.1.1 Zorlanmış taşınım

$$\bar{Nu}_L = 0,664Re_L^{1/2}Pr^{1/3}, \quad \begin{array}{l} Re < 5.10^5 \\ Pr \geq 0,6 \end{array} \quad (3.49)$$

#### 3.2.1.2 Doğal taşınım

$$\bar{Nu}_L = 0,59(Gr_L Pr)^{1/4}, \quad \begin{array}{l} Re < 5.10^5 \\ Ra \leq 10^9 \end{array} \quad (3.50)$$

#### 3.2.1.3 Buharlaşmalılı soğutma

Tabak üzerinden su filminin buharlaşması olayında, suyun buharlaşmasını sağılayan enerji tabaktan sağılandığından buharlaşma kaynaklı bir soğuma gerçekleşir. Tabak sıcaklık modellemesinde bu etkinin de hesaba katılması gerekir. Taşınımla kütle geçişi hesaplamalarından elde edilen birim zamandaki buharlaşma miktarı ( $n_v$ ) yardımıyla, buharlaşma enerjisi hesaplanır:

$$q_{evap} = n_v h_{fg} \text{ (W)} \quad (3.51)$$

### 3.2.1.4 Toplam ısı geçişi

Böylece toplam ısı geçişi miktarı, taşınım ile ısı geçişi ve buharlaşmalı soğutma kaynaklı ısı geçişi toplanarak hesaplanır.

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{evap}} \text{ (W)} \quad (3.52)$$

Basitleştirilmiş sürekli rejim ısı enerjisi denklemi yardımıyla, tabak yüzeyindeki birim zamandaki sıcaklık değışimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$q = m_p c_{p,p} (T_{i+1} - T_i) \text{ (W)} \quad (3.53)$$

$$T_{i+1} = \frac{q}{m_p c_{p,p}} (t_{i+1} - t_i) + T_i \text{ (°C)} \quad (3.54)$$

### 3.2.2 Kütle geçişi

Taşınım ile kütle geçişi hesaplamalarının yapılmasında da Newton'un soğuma yasasından yararlanılır. Buna göre, denklem aşağıdaki şekilde güncellenir:

$$n_v = \bar{h}_m A_s (\rho_{v,\infty} - \rho_{v,s}) = \bar{h}_m A_s \rho (w_{v,\infty} - w_{v,s}) \text{ (g)} \quad (3.55)$$

Taşınım ile kütle geçiş katsayısının bulunması için, Sherwood boyutsuz sayısından faydalanılır. Doğal ve zorlanmış taşınım koşulları için geliştirilmiş teorik ve ampirik bağıntılar aşağıdaki gibidir (Çalışma koşullarında Schmidt sayısı 0,63'e eşittir.):

$$\overline{Sh}_L = \frac{\bar{h}_m L_c}{D_{AB}} \Rightarrow \bar{h}_m = \frac{\overline{Sh}_L D_{AB}}{L_c} \quad (3.56)$$

$$Sh^3 = Sh_F^3 \pm Sh_N^3 \quad (3.57)$$

#### 3.2.2.1 Zorlanmış taşınım

$$\overline{Sh}_L = 0,664 Re_L^{1/2} Sc^{1/3}, \quad \begin{matrix} Re < 5.10^5 \\ Sc \geq 0,6 \end{matrix} \quad (3.58)$$

### 3.2.2.2 Doğal taşınım

$$Gr_L = \frac{g(\rho_\infty - \rho_s)L_c^3}{\rho\nu^2} \quad (3.59)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{12}} \quad (3.60)$$

$$\overline{Sh}_L = 0,59(Gr_L Sc)^{1/4}, \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (3.61)$$

### 3.2.2.3 Isı ve kütle geçişi benzeşimi

Isı ve kütle geçişi olaylarının eşzamanlı gerçekleştiği durumlarda, Lewis sayısı sayesinde taşınım ile ısı ve kütle geçiş katsayıları arasında ilişki kurulabilir

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} \quad (3.62)$$

$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^n} = \rho c_p Le^{1-n} \quad (3.63)$$

Tez çalışmasındaki koşullarda, Lewis sayısı 0,86'ya eşittir.

### 3.2.3 Zamana bağlı ısı ve kütle geçişi grafikleri

Şekil 3.8, eşzamanlı ısı ve kütle geçişi probleminin çözümü için kurulan matematiksel modelin çözüm adımlarını akış şeması olarak göstermektedir.

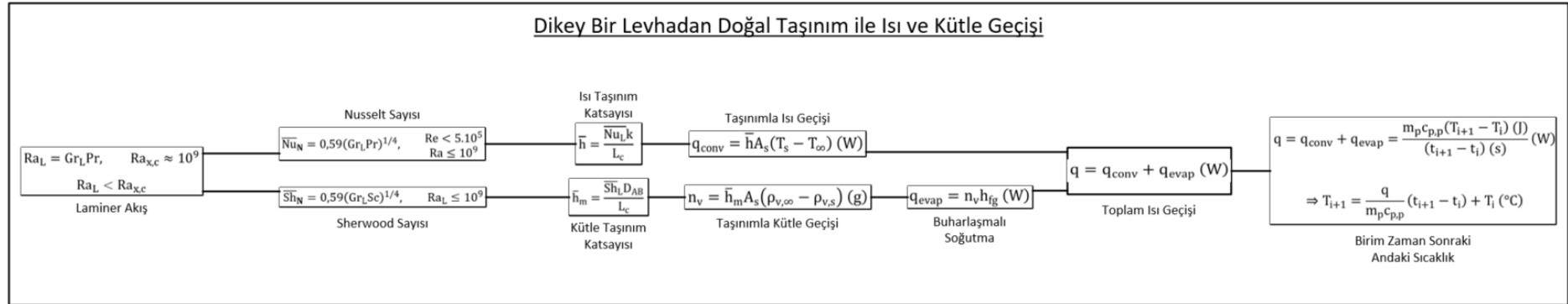
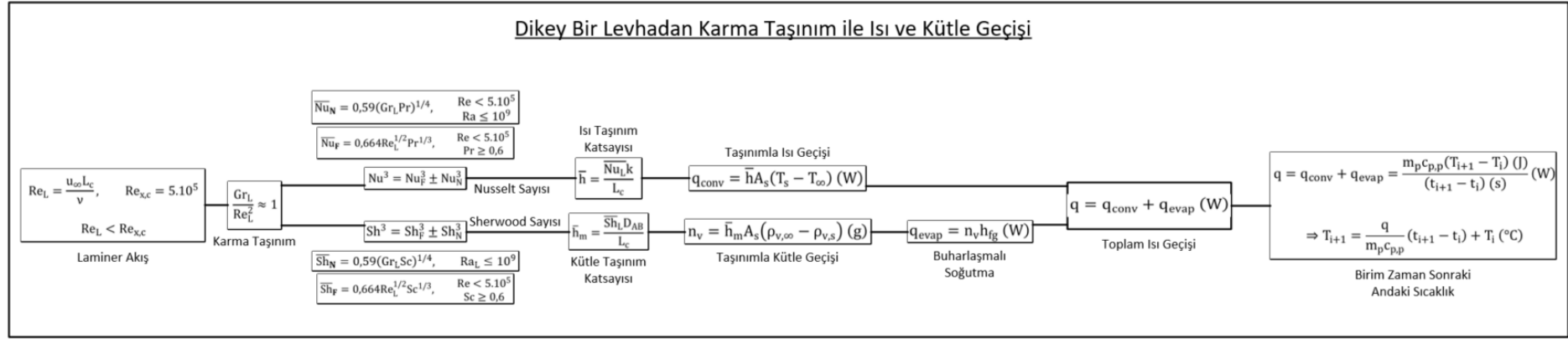
Bu bölümde, eşzamanlı ısı ve kütle geçişi ile ilgili teorik ve ampirik bağıntıların her bir birim saniye için çözdürülmesi sonucunda elde edilmiş zamana bağlı grafiklere yer verilmektedir.

DeneySEL çalışmalar bölümünde, deneySEL çalışmalardan toplanan veriler yardımıyla hesaplamalar tekrardan yapılmış ve kıyaslamalı olarak grafikler tekrardan incelenmiştir.

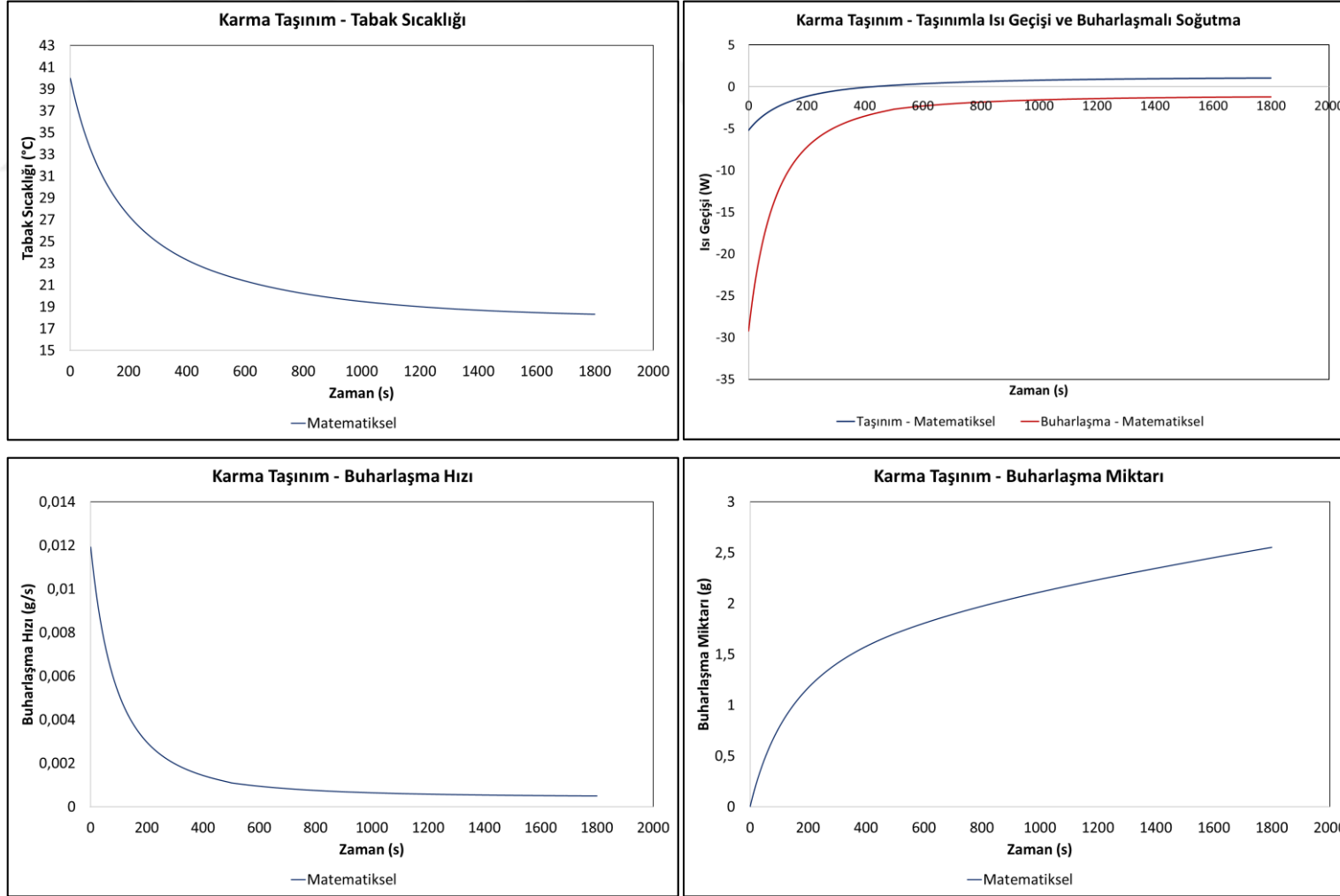
Şekil 3.9, doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin aynı anda görüldüğü durum için tabak sıcaklığındaki, buharlaşma hızındaki ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişimleri göstermektedir. Hesaplamalar 30 dakika süresi için çözdürülmüştür.

Şekil 3.10 ise, yalnızca doğal taşınım etkilerinin aynı anda görüldüğü durum için tabak sıcaklığındaki, buharlaşma hızındaki ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişimleri göstermektedir. Doğal taşınım olayları, hareketli akışkan sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı dengelendiğinde duracağından; termal dengenin sağlandığı 23°C sıcaklık koşuluna ulaşılan kadar geçen 5 dakika süre için çözümlmeler yapılmıştır.

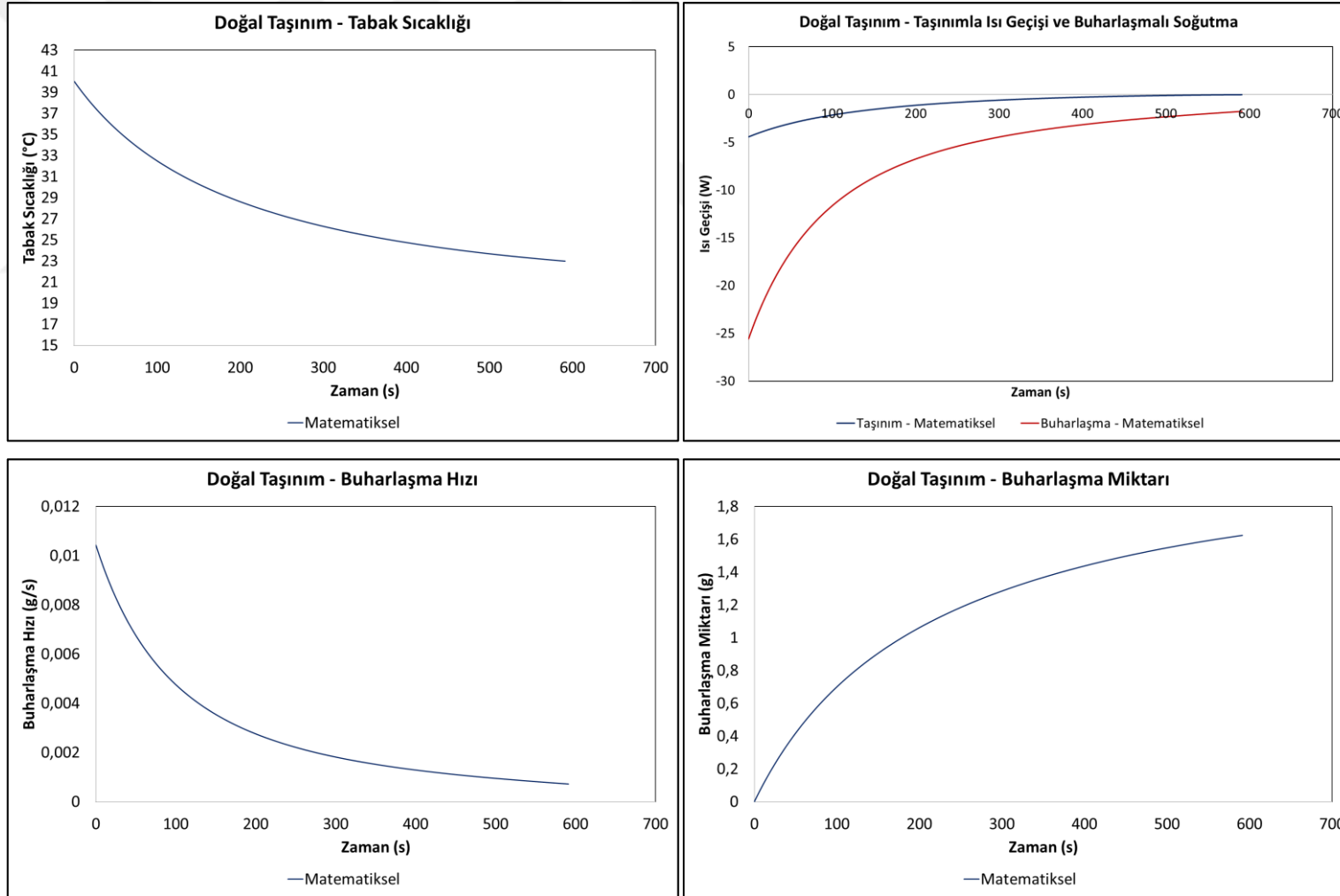




**Şekil 3.8:** Karma ve doğal taşınım ile ısı ve kütle geçişİ hesaplamalarının akış şeması.



Şekil 3.9: Karma taşınım durumunda tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim.



Şekil 3.10: Doğal taşınım durumunda tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim.

## **4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bulaşık makineleri içerisinde, ıslak ve sıcak yüklerde eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları gerçekleşir. Bu olayları görsel olarak incelenebilmesi için, bilgisayar simülasyonlarına ek olarak dijital görüntü işlemenin kullanıldığı deneysel yöntemler de kullanılabilir.

### **4.1 Deneysel Çalışmaların Amacı**

Tabak üzerindeki kurutma olaylarını gözlemlemek ve yorumlamak amacıyla; tabağın farklı noktalarından sıcaklık verilerinin -ısıt çiftler yardımıyla- toplandığı ve özel boya işlemleri uygulanarak tabağın ıslaklığının/kuruluğunun -dijital bir kamera yardımıyla- zamana bağlı olarak gözlenebileceği bir deney düzeneği kurulmuştur. Böylece, çok kısa sürelerde ve düşük maliyetlerle levha üzerindeki eşzamanlı ısı ve kütle geçişi olayları yorumlanabilir.

### **4.2 Deney Düzeneği**

Deney düzeneği; rüzgar tüneli, ortam ve tabak şartları, deneylerin gerçekleştirilme yöntemi ve ölçüm cihazları başlıkları altında incelenecektir.

#### **4.2.1 Rüzgar tüneli**

Deneyleri gerçekleştirmek amacıyla; şeffaf malzemeden üretilmiş ve içerisinden görüntü kaydı alınabilen bir test odasına sahip, düşük hızlı ve emme tipi açık çevrim bir rüzgar tüneli tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 4.1).

Rüzgar tünellerinde test odaları, çoğunlukla içerisine modelin ve çeşitli ölçüm araçlarının rahatça sokulabileceği şekilde ve gözlem ve görüntü kaydı sağlanabilmesi amacıyla şeffaf malzemeler ile imal edilmektedir [58].

Bu sebeple rüzgar tünelinin dinlenme odası, daralma konisi ve yayıcısı paslanmaz çelik sac ile, test odası ise pleksiglas ile üretilmiştir. Test odasının alt ve üst duvarlarında porselen tabağın oda içerisine sokulmasını ve oda içerisindeyken ısılatılabilmesini sağlayan açılır/kapanır kapaklar bulunmaktadır. Açılır/kapanır

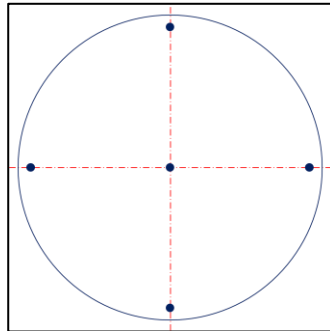
kapakların sızdırmazlığı için conta ve kapağı sıkıştıran sıkıştırma elemanları kullanılmıştır.

Rüzgar tünelinin her bir bileşeni monte/demonte edilebilir şekilde üretilmiştir ve contalar yardımıyla sızdırmazlıkları sağlanmaktadır. Aynı şekilde, rüzgar tünelinin mobilitesinin artırılması için, rüzgar tünelinin üzerine yerleştirildiği ve kilitlenerek sabitlenebilen ayaklara sahip bir demir platform üretilmiştir.



**Şekil 4.1:** Tez kapsamında tasarlanan ve üretilen rüzgar tüneli.

#### 4.2.2 Ortam ve tabak şartları

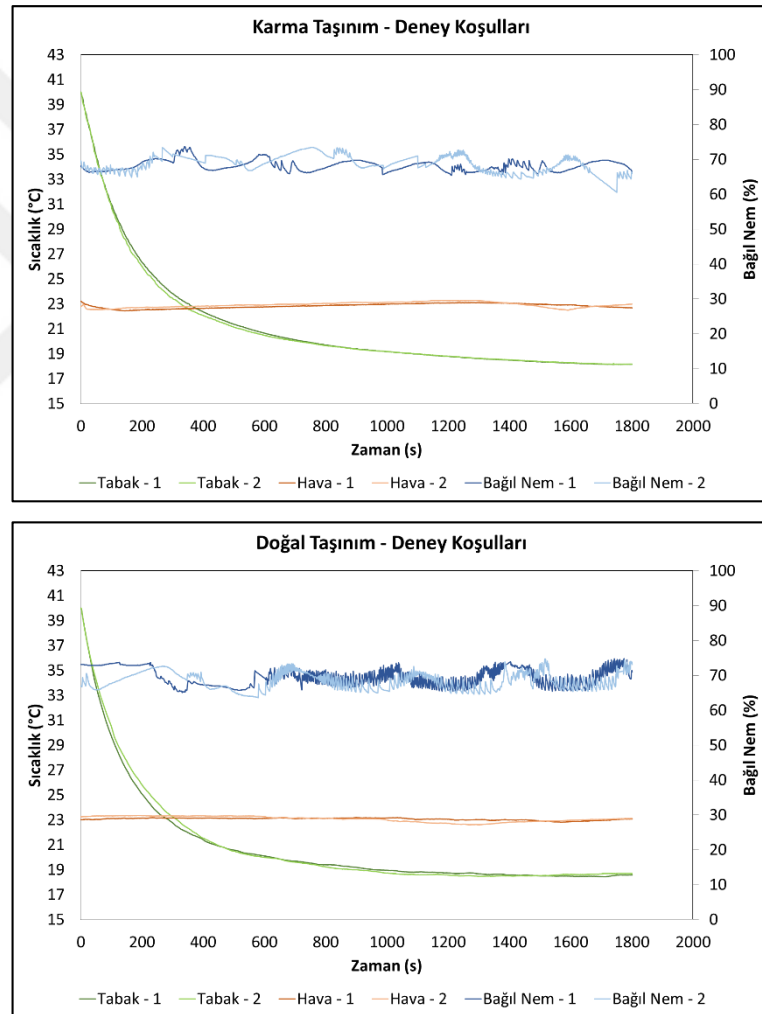


**Şekil 4.2:** Tabak üzerinden toplanan sıcaklık ölçüm noktaları.

Matematiksel çözümler ve deneysel inceleme, ısıtılarak  $40^{\circ}\text{C}$  sıcaklığına çıkartılmış dikey ( $90^{\circ}$ ) bir porselen levha üzerinden  $23^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa, %70 bağıl neme ve  $0,2 \text{ m/s}$  hıza sahip hava akışının sağlandığı koşullar için yapılmıştır. Yapılan deneylerde, levhanın beş noktasından sıcaklık ölçümü alınmıştır. Sıcaklık verilerinin ortalaması

alınarak işlemler yapılmıştır (Şekil 4.2). Sıcaklık verisi toplamak adına yerleştirilen ısıtıcı çiftler, tabağın arka yüzüne sabitlenmiştir ve strafor yardımıyla yalıtımı sağlanmıştır. Tabağın sahip olduğu çukurluk, tatlı tabağı olduğundan oldukça sıgıdır. Bu sebeple hesaplamalarda tabak düz bir levha olarak kabul edilmiştir.

Şekil 4.3, deneyler boyunca tabaktan toplanan sıcaklık verilerinin ortalamalarını, ortam sıcaklığını ve bağıl nemini göstermektedir. Deneyler doğal taşınım ve karma taşınımından her ikisi için de iki tekrarlı olarak yapılmıştır. 1 ve 2 sayıları deney numarasını temsil etmektedir. Ortam, deneyler boyunca  $23\pm0,5^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ve  $\%70\pm5$  bağıl nem koşullarında bulunmaktadır.



Şekil 4.3: Yapılan deneylerdeki tabak sıcaklıkları, ortam sıcaklıkları ve bağıl nemi.

#### 4.2.3 Deneylerin gerçekleştirilme yöntemi

Tabak üzerindeki kurumunun gözlemlenebilmesi için, şeffaf test odası içerisindeki tabağın bir kamera ile belirli periyotlarla fotoğrafları alınmıştır. Çekilen fotoğraflar aynı dijital kamera ile, aynı arka plan, aynı ışıklandırma koşullarında ve aynı

mesafeden çekilmiştir (Şekil 4.4). Fotoğrafların dijital görüntü işleme yardımıyla analiz edilmesi sayesinde, tabağın kuruma karakteristiğine dair bilgi edinilmiştir.

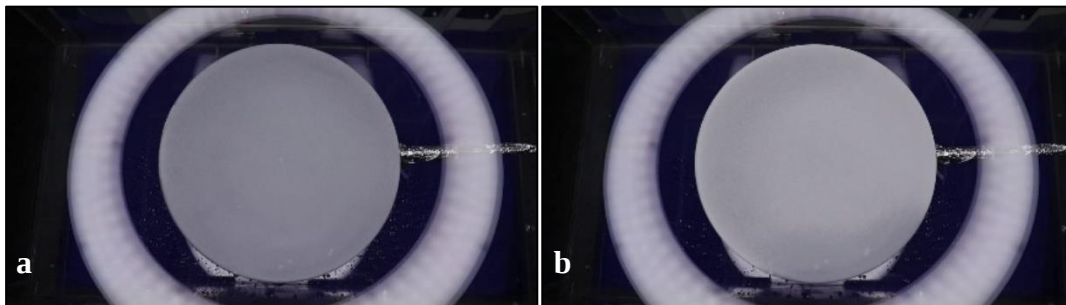


**Şekil 4.4:** Tabak üzerindeki kurumayı kayıt eden düzenek.

#### 4.2.3.1 Hidrokromik kaplama

Porselen tabağın kurumasının incelenebilmesi adına, tabağa iki farklı boya işlemi uygulanmıştır. Bunlardan ilki tabağın siyaha boyanma işlemidir, siyaha boyamaktaki amaç diğer boya işleminin etkisini arttırmaktır. İkinci boya işlemi, tabağın hidrokromik boya ile kaplanmasıdır. Hidrokromik boyalar, kuruyken ve ıslatıldıklarında farklı görünümlere sahip olan boyalardır. Tez kapsamında kullanılan hidrokromik boyanın [65] özelliği gereği, yüzey kuruyken boyanın rengi beyazdır ve tabak beyaz görünmektedir. Yüzey ıslatıldığında ise, hidrokromik boya şeffaflaşmaktadır ve tabak yüzeyinin rengi, ilk boya işleminde uygulanan siyah rengine dönmektedir.

Bir başka deyişle; ıslatılmış olan tabak, deney başlangıcında -hidrokromik boya ıslandığında şeffaflaştığından- siyah bir yüzeye sahiptir. Deney boyunca zorlanmış taşınım ile kuruma olayı gerçekleştiğinden, tabak yüzeyinde kuruyan bölgeler kademeli olarak gri tonlarından beyaz rengine dönmektedir (Şekil 4.5).



**Şekil 4.5:** Zorlanmış taşınım ile kurutmada 1. (a) ve 1800. (b) saniyelerdeki görseller.

#### 4.2.3.2 Tabağın ısıtılması

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, tabağın ısıtılması için çeşitli yöntemler kullanılmış ve en etkin olan çözüm ile çalışmalar sürdürülmüştür. Sıcak tabağın deney düzeneğinin dışarısında ısıtıldığı ve test odasına ısıtıldıktan sonra yerleştirildiği yöntemlerde, tabak sıcaklığı çok hızlı bir şekilde düştüğünden istenilen çalışma şartları sağlanamamıştır. Bu sebeple tabağın test odası içerisine sabitlendikten sonra ısıtıldığı bir yöntem kullanılmıştır.

Test odası içerisine yerleştirilen tabak, test odasının alt yüzeyindeki kapak yardımıyla içeriye sokulan 55°C sıcaklıktaki bir su banyosunda sıcaklığı homojen bir şekilde 42°C sıcaklığa ulaşana dek ısıtılmaktadır. Ardından su banyosunun test odasından çıkartılması işlemi sırasında soğuyan bölgeler, test odasının üst kapağından 55°C sıcaklıktaki su ile ısıtılmaya devam edilmektedir. Üst kapaktan dökülen su alt kapak açık olduğundan tahliye edilebilmektedir.

- Zorlanmış taşınım koşullarının yaratıldığı durumda tekrardan homojen şekilde 42°C sıcaklıklara erişildiğinde test odasının açık olan alt ve üst kapakları kapatılmaktadır. Tüm ısıtma işlemleri boyunca, tabak yüzeyine yerleştirilmiş beş ısıl çiftin sıcaklıkları kontrol edilmektedir. Ardından fan çalıştırılmaktadır. Alt ve üst kapakların kapatılması ve fanın çalıştırılması işlemleri sırasında tabak sıcaklığı 40°C'ye düşmektedir. Bu sebeple deney başlangıç sıcaklığı 40°C olacak şekilde işlemler yapılmıştır.
- Doğal taşınım koşullarında ise, üst kapaktan dökülen su ile ısıtma işlemi 40°C sıcaklığa erişilene dek sürdürülmektedir. Ardından test odasının alt ve üst kapakları doğal taşınım koşullarının sağlanması amacıyla açık bırakılmıştır.

Tabak yüzeyi ısıtıldığında kısa süreliğine tabak üzerinde su damlacıkları bulunmaktadır. Ancak tabak dikey bir pozisyonda (90°C) konumlandırıldığından, su damlacıkları hızlı bir şekilde süzülerek uzaklaşmaktadır. Tabak yüzeyindeki ıslanmanın damlacık biçiminde değil su filmi biçiminde olduğu gözlenmiştir.

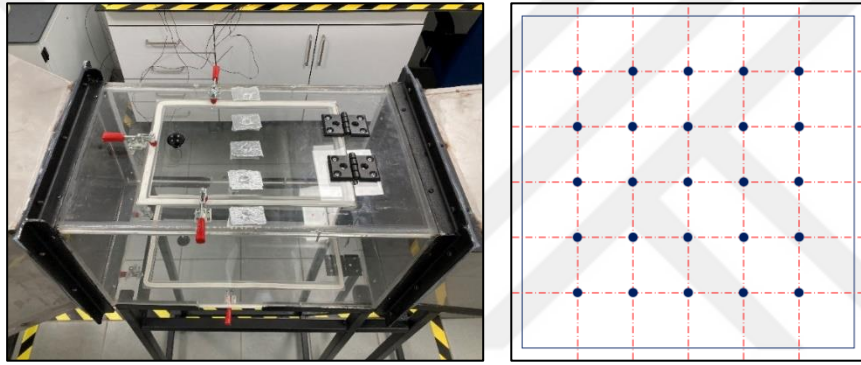
#### 4.2.4 Ölçüm cihazları

Elektrik gücü  $\pm 0,2\%$  hassasiyete sahip B&K Precision Model 9103 DC besleme kaynağı ile sağlanmıştır. Sıcaklık verisi T-tipi ısıl çiftler ve nem verisi Keysight DAQ973A veri toplama sistemi ( $\pm 0,2^\circ\text{C}$  ve  $\pm 2\%$  hassasiyet) aracılığıyla toplanmıştır. Rüzgar tüneli hız ölçümlerinde  $\pm 0,01$  m/s hassasiyete sahip Testo 440 hava hızı ve iç

hava kalitesi ölçüm cihazının sıcak tel probu kullanılmıştır. Tüm ölçümler saniyede bir veri toplanacak şekilde yapılmıştır. Görüntülerin toplanması amacıyla Canon marka EOS 800D model bir dijital kamera kullanılmıştır.

#### 4.2.5 Rüzgar tüneli ölçümleri

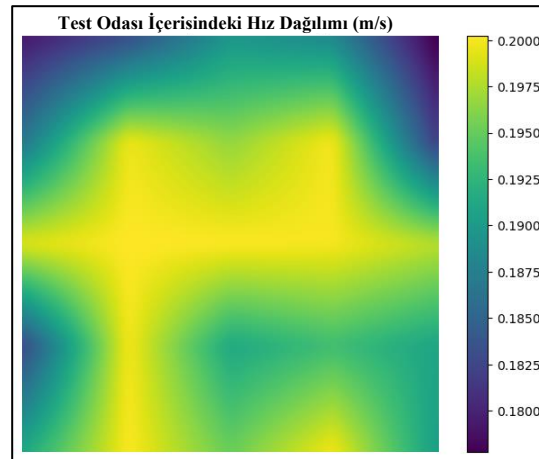
Test odasında çalkantı ve türbülansı düşük, üniform ve paralel akım şartları sağlamak amaçlanmaktadır. Rüzgar tüneli içerisindeki hava akış şartlarının kontrolü ve validasyonu amacıyla rüzgar tüneli içerisinde hız ölçümü alınmıştır. Şekil 4.6, test odasının tam ortasında ve havanın akışına dik olan bir düzlemde işaretlenmiş hız ölçüm noktalarını göstermektedir. Her birinin arasında 5 cm'lik aralıklar bulunan 25 ölçüm noktası kullanılmıştır.



Şekil 4.6: Test odasından alınan hız ölçüm noktaları.

##### 4.2.5.1 Test odası içerisindeki ortalama hız dağılımı

Test odası içerisinde, 0,2 m/s hızında üniform bir akış sağlama hedefi bulunmaktadır. Şekil 4.7, test odasındaki hava hızlarının dağılımını göstermektedir. Hız ölçümleri her bir noktada 60 saniyelik bir periyot boyunca yapılmıştır.



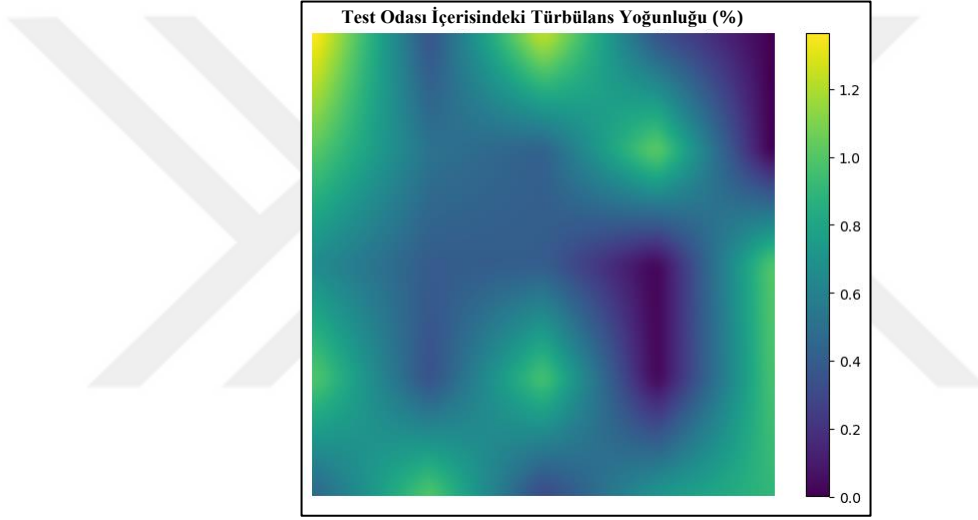
Şekil 4.7: Test odası içerisindeki hız dağılımı.

#### 4.2.5.2 Test odası içerisindeki türbülans yoğunluğu

Çoğu durumda, test odası içerisinde düşük türbülans seviyelerinde hava akışı sağlamak kritiktir. Belirli bir noktadaki türbülans yoğunluğu, o noktadaki hızların standart sapmasının yine aynı noktadaki ortalama hızına bölünmesi ile hesaplanır [46, 66, 67].

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} \times 100 \quad (4.1)$$

Çok yüksek kaliteli rüzgar tünellerinde, türbülans yoğunluğu %1 mertebelerinin altındadır [68, 69]. Şekil 4.8, test odası içerisindeki türbülans yoğunluğunu göstermektedir.



Şekil 4.8: Test odası içerisindeki türbülans yoğunluğu.

### 4.3 Deney Sonuçlarının Analizi

Deney sonuçları, toplanan sıcaklık verilerinin ve dijital görüntü işleme verilerinin matematiksel ve görsel (ısı haritaları) olarak incelendiği iki adımda değerlendirilmiştir.

#### 4.3.1 Deney sonuçları ile matematiksel hesaplamalar

İlk adımda; matematiksel ve ampirik yöntemlerle türetilen denklemler, sıcaklık değerlerinin deney verilerinden sağlandığı durumda tekrardan çözülürülmüştür. Ardından, daha önceden sıcaklık değerlerinin de matematiksel olarak elde edildiği durum ile karşılaştırmalı grafikleri çizdirilmiştir. İkinci adımda ise; dijital görüntü

işlemede yapılan piksel analizleri yardımıyla, piksel yoğunluklarının zamana değişimi incelenmiş ve karşılaştırmalı grafikleri çizdirilmiştir.

#### **4.3.1.1 Deneysel sıcaklık verileri ile matematiksel hesaplamalar**

Teorik çalışmalarda yapılan matematiksel hesaplamaların doğruluğunun kontrolü, deneylerde toplanan tabak sıcaklıkları ile kıyaslanarak yapılmıştır.

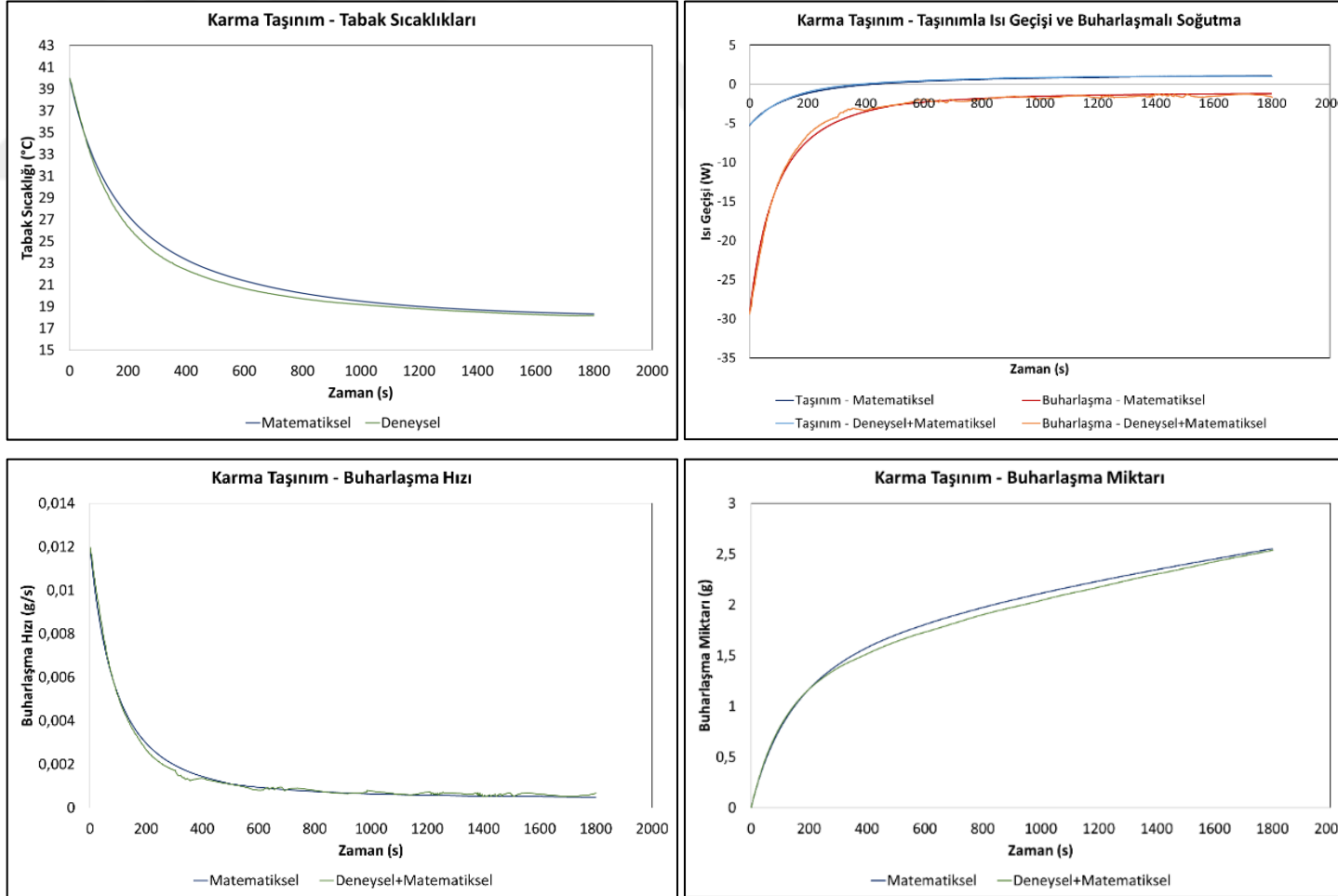
Şekil 4.9, doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin aynı anda görüldüğü durum için tabak sıcaklığındaki, buharlaşma hızındaki ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişimlerinin karşılaştırmalı grafiklerini göstermektedir.

Tabak sıcaklıkları incelendiğinde, matematiksel hesaplamalar ile elde edilen sonuç ile deneysel sonuçların yüksek doğruluk ile örtüştüğü görülmektedir. Dolayısıyla, tabak sıcaklıklarının ana etken olduğu diğer hesaplama sonuçları (taşınım ile ısı geçişi ve buharlaşmalı soğutma, buharlaşma hızı ve buharlaşma miktarı) da birbiriyle örtüşmektedir. Buradan yola çıkarak, matematiksel model ile elde edilen çıktılar dijital görüntü işleme ile elde edilen sonuçları doğrulamakta kullanılabileceği söylenebilir.

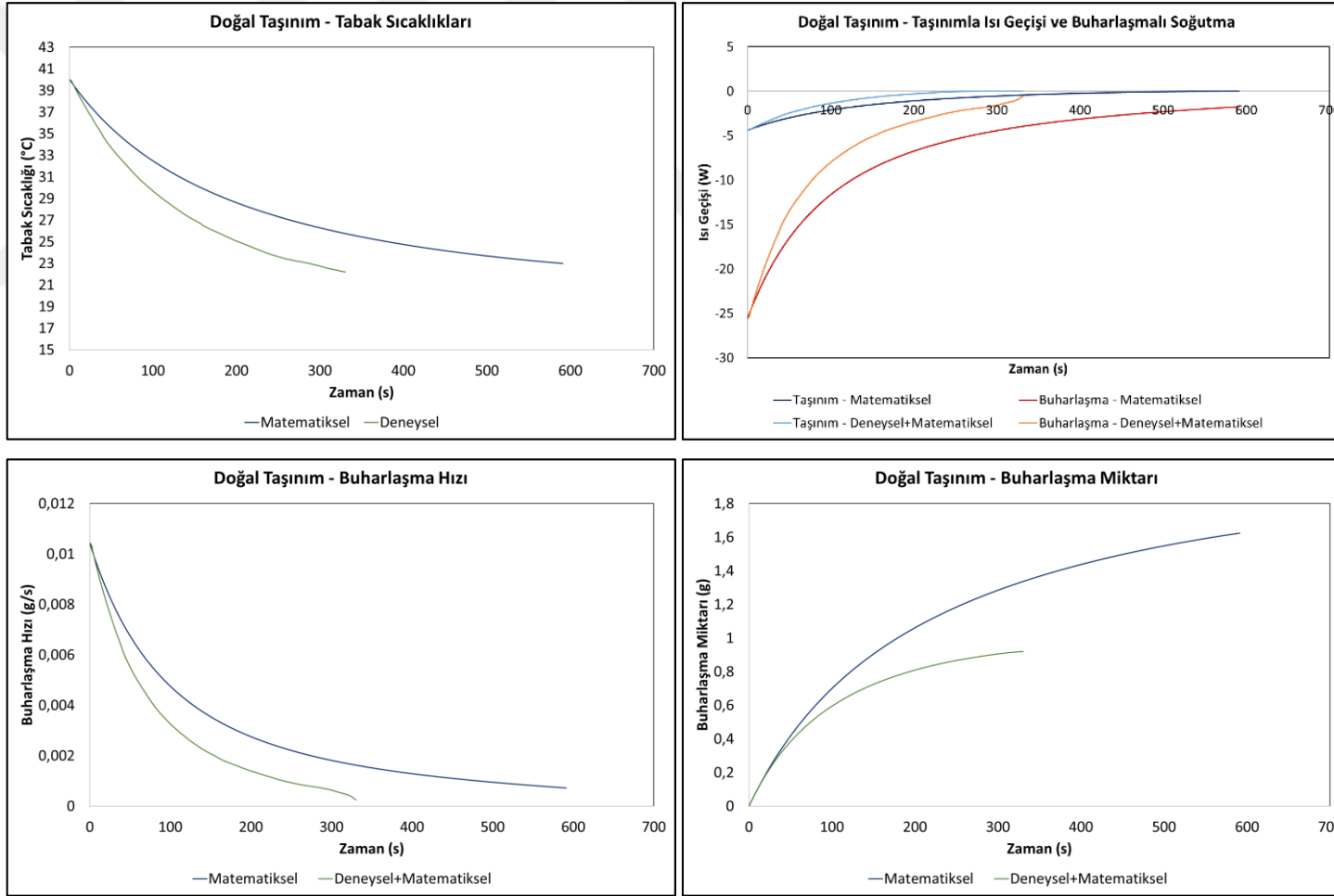
Şekil 4.10 ise, yalnızca doğal taşınım etkilerinin aynı anda görüldüğü durum için tabak sıcaklığındaki, buharlaşma hızındaki ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişimlerinin karşılaştırmalı grafiklerini göstermektedir.

Grafikler incelendiğinde; deneysel sonuçların yaklaşık ilk 300 saniye için elde edildiği, matematiksel model ile elde edilen sonuçların ise yaklaşık ilk 600 saniye için elde edildiği görülmektedir. Bunun sebebi; doğal taşınım olayları, hareketli akışkan sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı dengelendiğinde duracağından, termal dengenin sağlandığı 23°C sıcaklık koşuluna ulaşılan kadar çözümlemelerin yapılabilmesidir.

Doğal taşınım şartı için kurulan matematiksel modelin, deney sonuçları ile uyumlu olmadığı görülmektedir. Doğal taşınım için yapılan dijital görüntü işleme çalışmalarının doğrulamasının sağlanması için bu matematiksel modelin kullanılması mümkün değildir. Taşınım ile ısı geçişi ve buharlaşmalı soğutma grafiği incelendiğinde; tabak sıcaklıkları arasında çıkan hatanın ana kaynağının, buharlaşmalı soğutma nedeniyle olan ısı geçişi hesaplamalarındaki hata olduğu görülmektedir. Taşınım ile ısı geçişi hesaplamalarında da bir miktar hata görülmesine karşın, buharlaşmalı soğutma hesaplamalarındaki hata daha baskın gelmektedir.



Şekil 4.9: Karma taşınım koşullarında tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim (karşılaştırmalı).

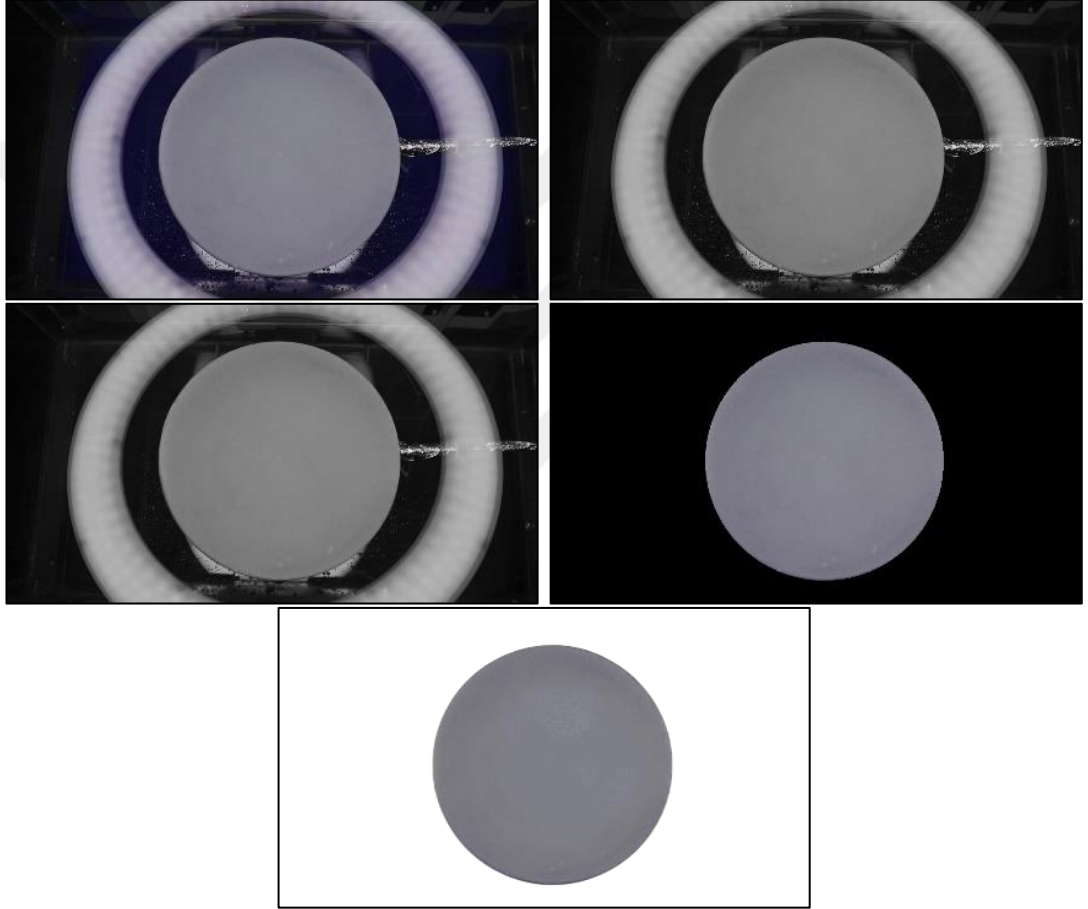


**Şekil 4.10:** Doğal taşınım koşullarında tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim (karşılaştırmalı).

#### 4.3.1.2 Dijital görüntü işleme verileri ile matematiksel hesaplamalar

Bölüm 2.4'te aktarılan dijital görüntü işleme tekniklerinin birleşimi, bir görüntüyü gri tonlamalı formata çevirme, görseli bulanıklaştırma, görselden belirli bir nesneyi (bir tabak) otomatik olarak tespit etme, kırpma, görselin arka planını kaldırma ve piksel yoğunluğu analizi görevlerini gerçekleştirebilir.

Şekil 4.11, çalışmalarda kullanılan tabağın dijital görüntü işleme yardımıyla bir fotoğraftan kırılma adımlarını göstermektedir.

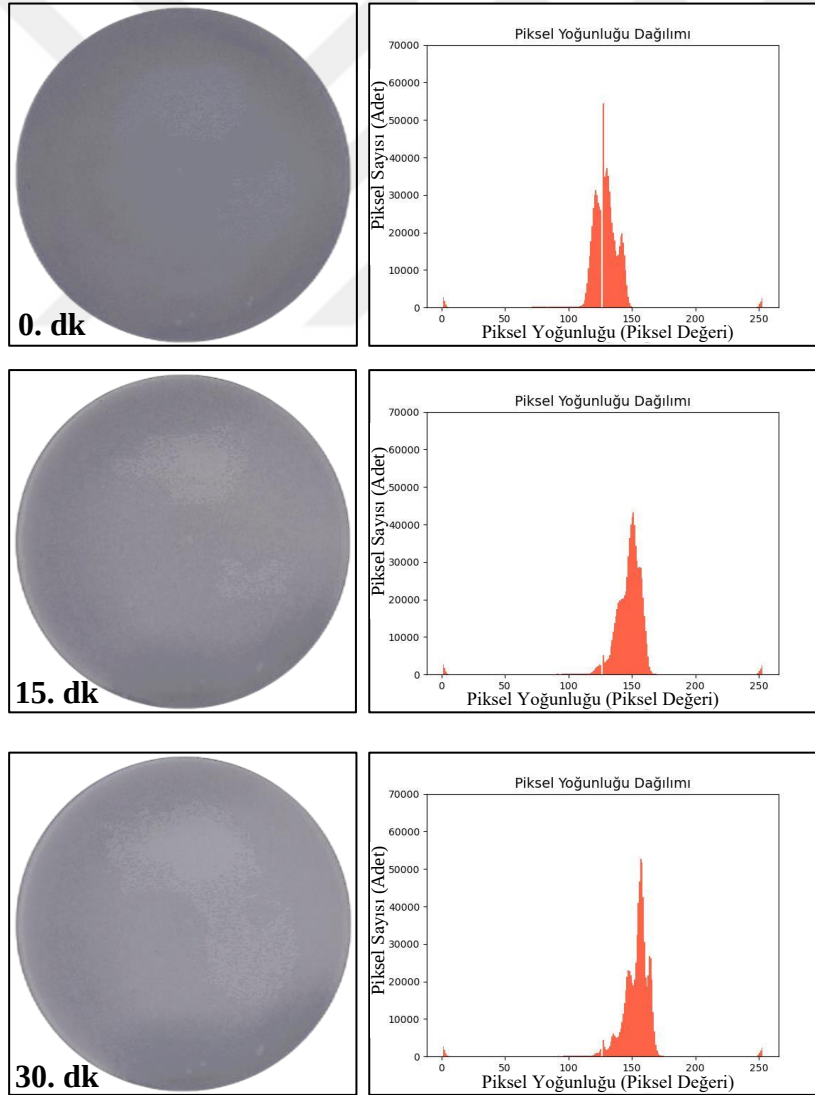


**Şekil 4.11:** Bir görüntüden dairesel formda bir tabağın kırılması için uygulanan dijital görüntü işleme adımları.

Her birim saniye için kırılmış görseller üzerinde yapılan piksel yoğunluğu analizleri yardımıyla, zamana bağlı piksel yoğunluklarını gösteren bir grafik çizdirilebilir. Bunun için piksel yoğunlukları, sayısal değerlerden oluşan bir matrise dönüştürülür. Matris içerisindeki sayısal değerler, karşılık geldikleri piksellerin yoğunluklarını temsil etmektedir. Piksel yoğunluklarının sayısal değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak, görselin ortalama piksel yoğunluğu elde edilebilir. Her bir birim saniyedeki

görsel için bu işlem uygulanarak, zamana bağlı ortalama piksel yoğunluğu grafiği elde edilir (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).

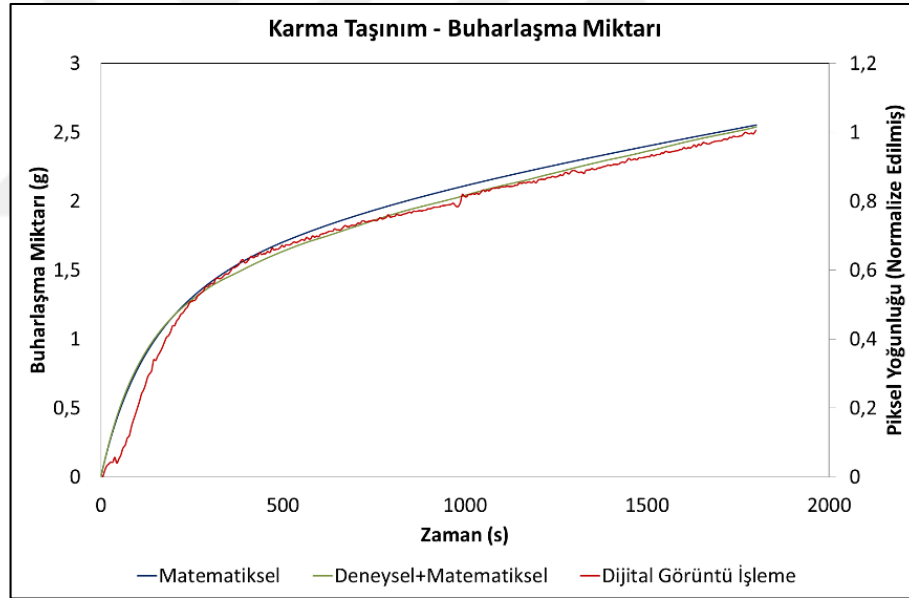
Piksel yoğunluğu değerleri hatırlanacak olursa, 0-255 aralığında değer almaktadır. Bu ölçekte, 0 pikselin en koyu (genellikle siyah) olduğu ve 255'in en açık (genellikle beyaz) olduğu anlamına gelir. Diğer yandan, tekrardan hatırlanacak olursa; ısıtılmış olan tabak, deney başlangıcında koyu gri bir yüzeye sahipken, deney boyunca kuruma olayı gerçekleştiğinden, tabak yüzeyinde kuruyan bölgeler kademeli olarak gri tonlarından beyaz rengine dönmektedir. Bu bilgiler ışığında; piksel yoğunluğundaki artış, piksellerin koyu tonlardan açık tonlara (0'a yakın değerlerden, 255'e yakın değerlere) değiştiğini gösterir. Şekil 4.12, 0., 15. ve 30. dakikalardaki piksel yoğunluğu dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 4.12: 0., 15. ve 30. dakikalardaki piksel yoğunluğu dağılımları.

Piksel yoğunluğu dağılımı grafikleri, görseldeki hangi piksel yoğunluğuna sahip kaçar adet piksel olduğunun dağılımını vermektedir. Piksellerin yoğunluk dağılımlarının 0'dan 255 değerine doğru yaklaşması, piksellerin renginin siyahtan beyaza doğru döndüğü anlamına gelmektedir. Örnek olarak şekildeki 0., 15. ve 30. dakikalardaki piksel yoğunluğu dağılımları incelendiğinde, piksel yoğunluklarının zamanla 255'e doğru yaklaştığı görülmektedir. Buradan hareketle, tabak üzerinde kuruma işleminin gerçekleştiği çıkarımı yapılabilir.

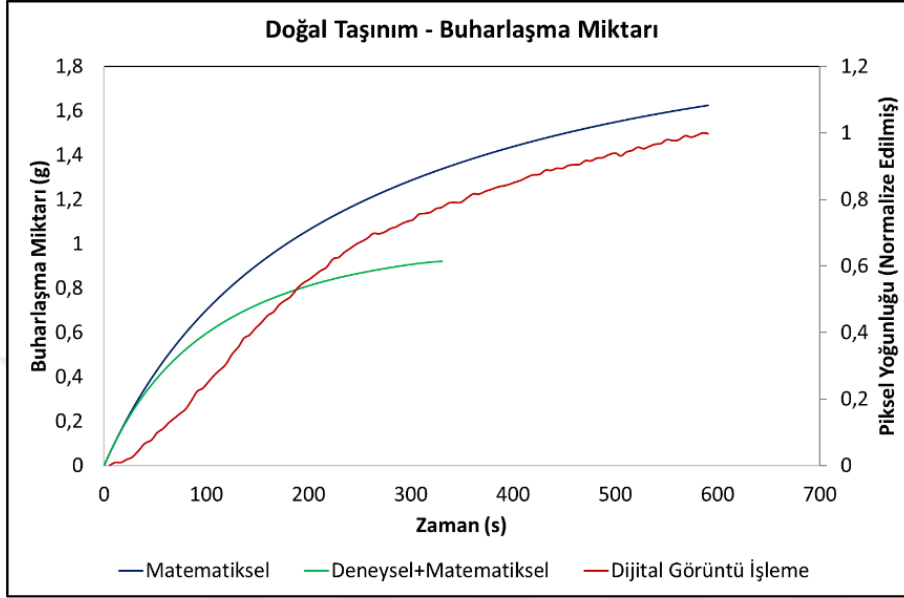
Görseldeki her bir pikselin yoğunluğunu toplanması ve toplam piksel sayısına bölünmesi ile görselin ortalama piksel yoğunluğu elde edilebilir. Piksel yoğunlukları tabağın kuruması ile ilişkili olduğundan, ortalama piksel yoğunluğu değerleri aynı zamanda görselin kuruluk derecesi hakkında da bilgi verir. Piksel yoğunluklarındaki değişim ile buharlaşma miktarı arasında, her bir saniye için ortalama piksel yoğunluğunun elde edilmesi ile bir ilişki kurulabilir (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).



**Şekil 4.13:** Karma taşınım koşullarında buharlaşma miktarının zamana bağlı değişiminin karşılaştırmalı grafiği.

Doğal ve zorlanmış taşınım durumlarının eşzamanlı görüldüğü durumda, dijital görüntü işleme sonuçlarının -matematiksel model deney sonuçları ile uyumlu olduğundan- matematiksel model ile kıyaslanabileceği bir önceki bölümde kanıtlanmaktadır. Dijital görüntü işleme sonuçlarıyla elde edilen buharlaşma miktarlarının, deneysel ve matematiksel sonuçlar ile tutarlı olduğu görülmektedir. Yani tezde önerilen yöntem kullanılarak dijital görüntü işleme yardımıyla, tabak üzerindeki buharlaşma miktarları incelenebilir.

Doğal taşınım durumunda, dijital görüntü işleminin matematiksel model ile kıyaslanmasının uygun olmayacağı, çünkü matematiksel modelin deneysel sonuçlar ile uyuşmadığı görülmüştür. Fakat yine de dijital görüntü işleme sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği paylaşılmıştır.



**Şekil 4.14:** Doğal taşınım koşullarında buharlaşma miktarının zamana bağlı değişiminin karşılaştırmalı grafiği.

Dijital görüntü işleme ile elde edilen grafik birkaç adım sola kaydırıldığında, sonuçların matematiksel model ile uyuştugu görülmektedir. Ancak sonuçlar, matematiksel modelde olduğu gibi deneysel sonuçlar ile uyuşmamaktadır. Grafikte yapılacak kaydırma işlemi için matematiksel bir dayanak bulunamadığından kaydırma işlemi yapılmamıştır.

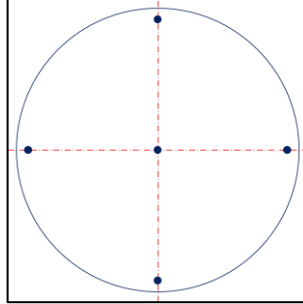
#### 4.3.2 Isı haritaları

Tabak üzerinde gerçekleşen ısı ve kütle geçişi olaylarının görsel analizleri için, toplanan sıcaklık verilerinden ve dijital fotoğraflardan faydalanılmıştır.

İlk adımda; tabağın beş noktasından (Şekil 4.15) toplanan her bir birim saniye için toplanan sıcaklık verileri, Python yardımıyla işlenerek tabak üzerindeki sıcaklık dağılımını temsil edecek biçimde görselleştirilmektedir. Devamında ise; her bir birim saniyedeki tabak görselleri Python yardımıyla bir seri dijital görüntü işleme adımından geçirilerek, tabak üzerindeki buharlaşma miktarını temsil edecek şekilde görselleştirilmektedir.

#### 4.3.2.1 Porselen levhadan ısı geçişinin zamana bağlı ısı haritası

Aşağıdaki görselde (Şekil 4.15) tanımlanan noktalardan deney boyunca sıcaklık verisi toplanarak her bir birim zaman için sıcaklık ısı haritaları oluşturulmuştur.



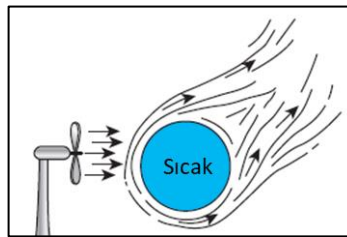
**Şekil 4.15:** Tabak üzerinden toplanan sıcaklık ölçüm noktaları.

Bunun için Python programlama dilinde; dairesel bir şekil tanımlanarak bu şeklin, görseldeki ile denk konumlarına o andaki sıcaklık verileri tanımlanmıştır. Arada kalan boşluklar ise regresyon yardımıyla doldurulmaktadır.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20; 0-30 dakika aralığındaki tabak sıcaklık ısı haritalarını, beşer dakika arayla karma ve doğal taşınım koşulları için göstermektedir. 5'er dakikadan daha sık periyotlarla (1'er dakika) tabak sıcaklık dağılımlarını gösteren ısı haritaları EK A bölümünde verilmiştir.

Zorlanmış ve doğal taşınımın aynı anda görüldüğü durum için (Şekil 4.19) incelemeler yapıldığında;

- Başlangıç durumunda tabakta homojene yakın bir sıcaklık dağılımı varken, 5. dkya gelindiğinde tabağın sağ bölgesinin sol bölgesine göre daha sıcak olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, tabağın üst bölgesinin alt bölgesine göre daha sıcak olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, hava akışının tabağın solundan sağına doğru olması ve karma taşınım durumunda tabak üzerindeki hava akışının sağ üst bölgeye doğru olmasıdır (Şekil 4.16). Havanın tabakla temas ettiği noktada akışın ayrılıp tekrardan tabağın ortalarında birleşmesinin de etkisinin olduğu söylenebilir.



**Şekil 4.16:** Çapraz akış kaynaklı karma taşınım durumu [15].

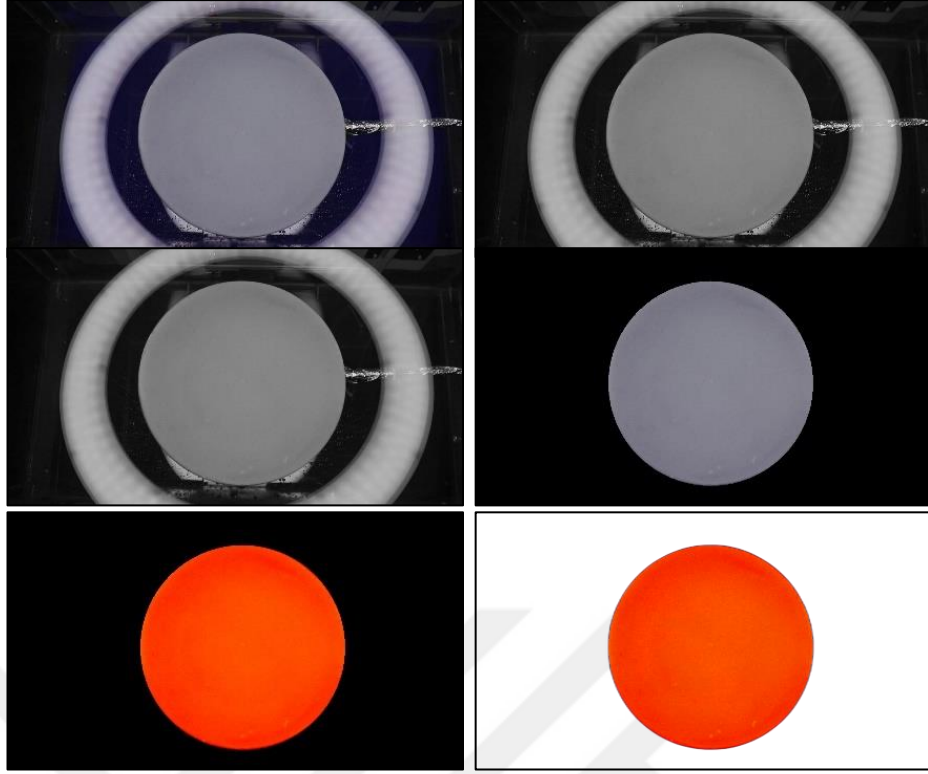
- Tabak üzerindeki hava akışından dolayı, tabağın ilk olarak sağ tarafının kuruduğunun gözlemlenmesi gerektiği yorumu yapılabilir.
- Devamında tabak sıcaklıklarının tabağın sağ bölgesinde yükselmeye başladığı ve sol bölgelerin gittikçe soğuduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, sağ bölgenin daha hızlı kuruması ve bu seple buharlaşmalı soğutmayla gerçekleşen ısı geçişi etkisinin sağ bölgede azalması olabilir. Böylece hala ıslak olan sol bölgede buharlaşmalı soğutma kaynaklı ısı geçişi ile taşınım ile ısı geçişi eşzamanlı olarak görülürken, sağ bölgede buharlaşmalı soğutma kaynaklı ısı geçişinin etkisi azalmış olur. Bu sebeple, tabağın sol bölgesinin daha hızlı soğuduğu gözlemlenebilir.
- Tabak üzerindeki süzülme olayından dolayı, tabağın alt bölgesi en ıslak bölgedir. Bu bölgede sürekli olarak buharlaşma gerçekleştiğinden, sürekli olarak buharlaşmalı soğutmanın etkisi bulunmaktadır. Bu sebeple, tabağın en soğuk bölgesi her zaman bu bölgelerdir.
- Bu yorumları doğrular nitelikteki sonuçlara, buharlaşma miktarı ısı haritaları bölümünde tekrardan değinilecektir.

Yalnızca doğal taşınımın görüldüğü durum için (Şekil 4.20) incelemeler yapıldığında; tabak sıcaklıklarının homojen bir şekilde düştüğü görülmektedir. Tabağın alt bölgeleri karma taşınım da olduğu gibi süzülme kaynaklı sürekli olarak ıslak kaldığından, bu bölgelerde sürekli olarak buharlaşmalı soğutma ile ısı geçişi gerçekleşecektir. Bu sebeple; buharlaşmalı soğutma ile ısı geçişinin etkisinin az olduğu üst bölgeler daha sıcakken, alt bölgeler daha soğuktur.

#### **4.3.2.2 Porselen levhadan kütle geçişinin zamana bağlı ısı haritası**

Bölüm 2.4'te aktarılan dijital görüntü işleme tekniklerinin birleşimi, bir görüntüyü gri tonlamalı formata çevirme, görseli bulanıklaştırma, görselden belirli bir nesneyi (bir tabak) otomatik olarak tespit etme, kırpma, görselin arka planını kaldırma, piksel yoğunluğu analizi ve ısı haritası çıkartma görevlerini gerçekleştirebilir.

Şekil 4.17, çalışmalarda kullanılan tabağın dijital görüntü işleme yardımıyla bir fotoğraftan kırılması ve renk yoğunluğunun ısı haritasının çıkartılması adımlarını göstermektedir.



**Şekil 4.17:** Bir görüntüden dairesel formda bir tabağın kırılması ve renk yoğunluğunun ısı haritasının çıkartılması için uygulanan dijital görüntü işleme adımları.

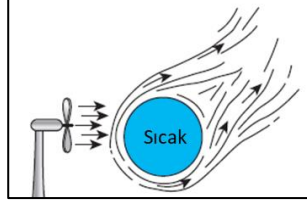
Isı haritaları, renkleri kullanarak verilerin grafik olarak görselleştirilmesini sağlar. Şekil 4.17 örneğinde, düşük değerlere daha soğuk renkler ve daha sıcak değerler verecek bir renk haritası kullanılmıştır. Böylece; tabağın ıslak bölgeleri daha sıcak renkler ile temsil edilirken, kuru bölgeleri daha soğuk renkler ile temsil edilmiştir.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22; 0-30 dakika aralığındaki tabaktaki buharlaşma miktarı ısı haritalarını, beşer dakika arayla karma ve doğal taşınım koşulları için göstermektedir. 5'er dakikadan daha sık periyotlarla (1'er dakika) buharlaşma miktarı dağılımlarını gösteren ısı haritaları EK B bölümünde verilmiştir.

Zorlanmış ve doğal taşınımın aynı anda görüldüğü durum için (Şekil 4.21) incelemeler yapıldığında;

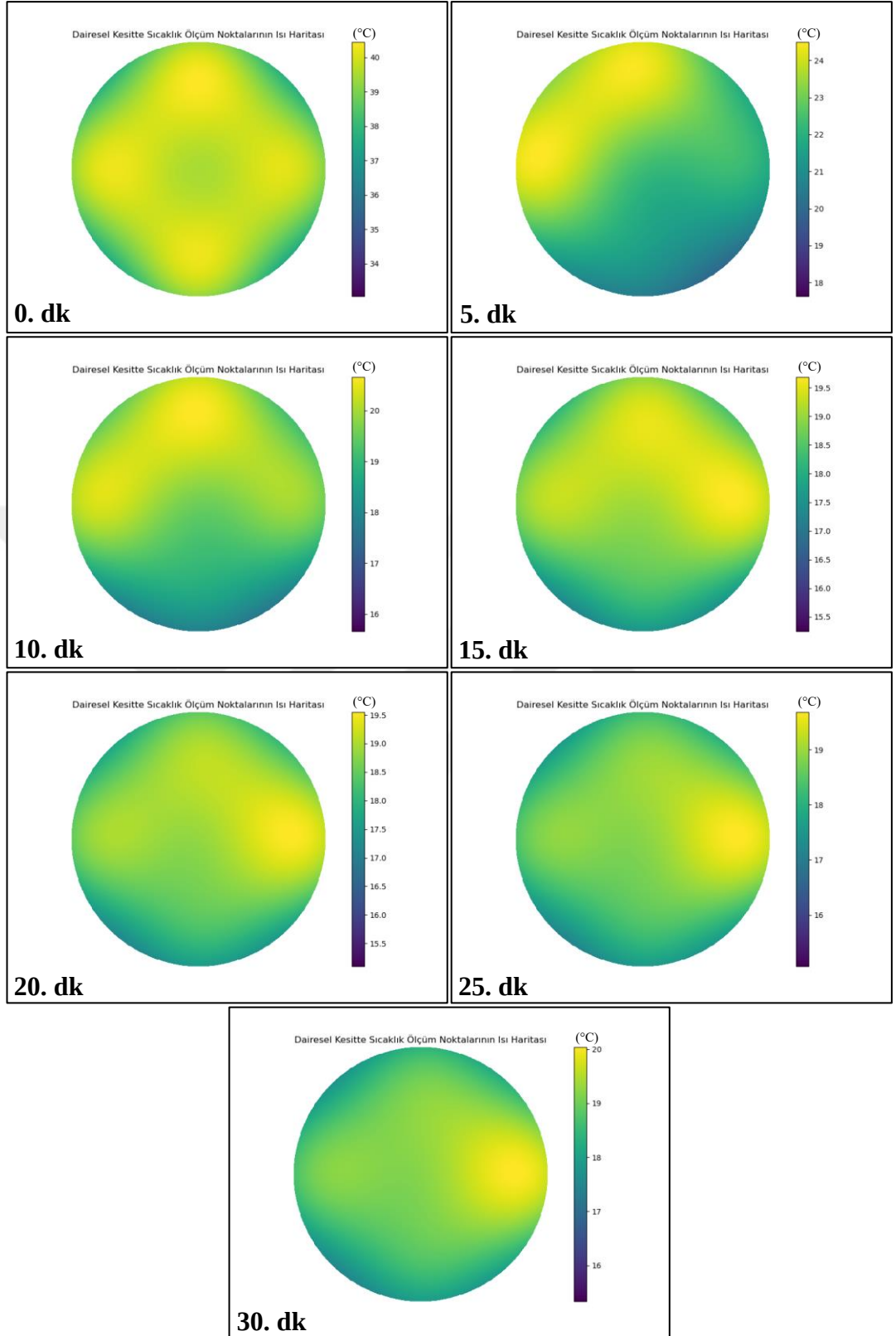
- Başlangıç durumunda tabakta homojene yakın bir ıslaklık dağılımı varken, 5. dkya gelindiğinde tabağın sağ bölgesinin sol bölgesine göre daha ıslak olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, tabağın alt bölgesinin üst bölgesine göre daha ıslak olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, hava akışının tabağın solundan sağına doğru olması ve karma taşınım durumunda tabak üzerindeki hava akışının sağ üst bölgeye doğru olmasıdır (Şekil 4.18). Havanın tabakla temas ettiği noktada akışın

ayrılıp tekrardan tabağın ortalarında birleşmesinin de etkisinin olduğu söylenebilir. Tabak üzerindeki süzülme olayından dolayı, tabağın alt bölgesi her zaman en ıslak bölgesidir.

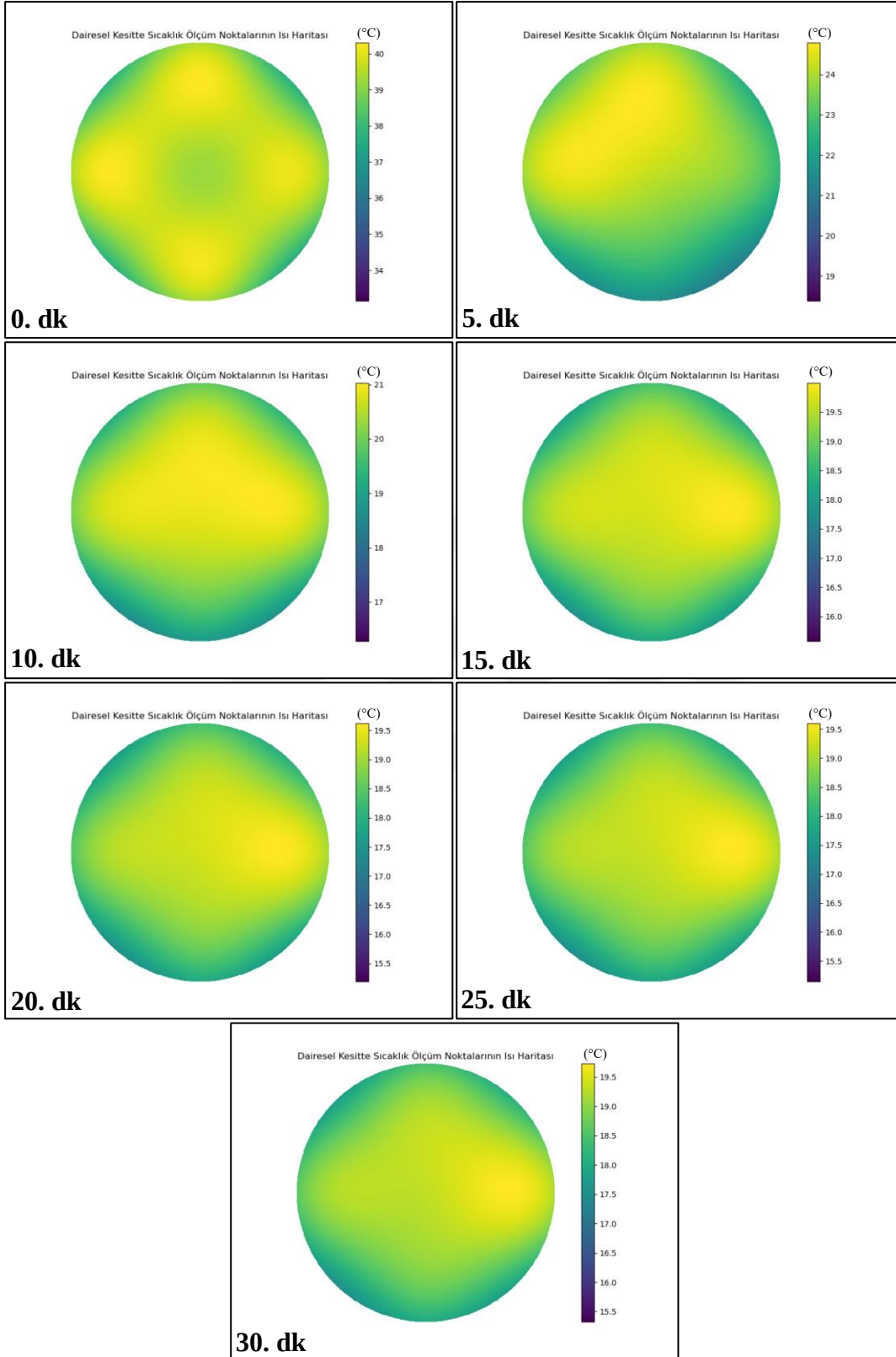


**Şekil 4.18:** Çapraz akış kaynaklı karma taşınım durumu [15].

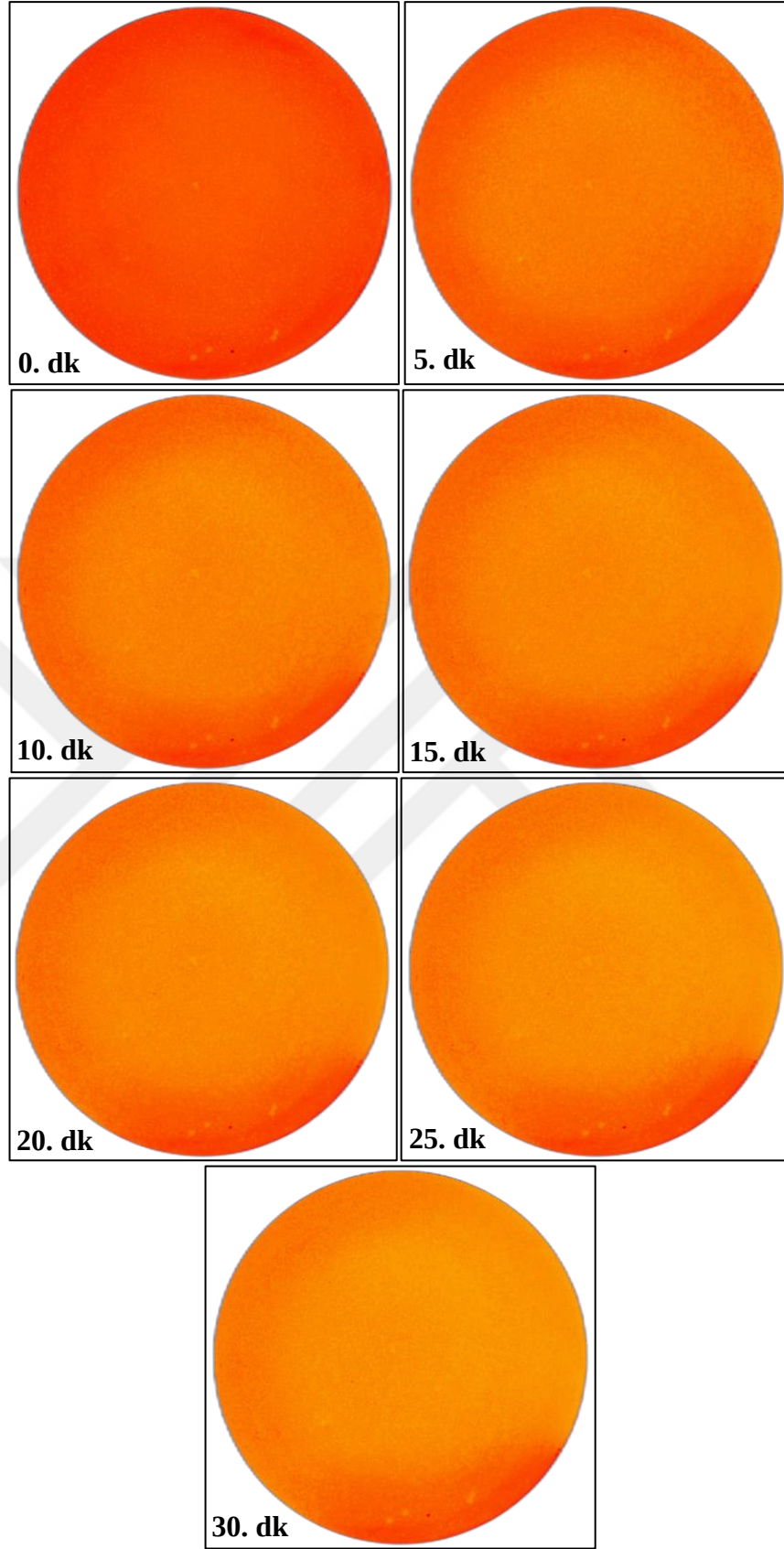
Yalnızca doğal taşınımın görüldüğü durum için (Şekil 4.22) incelemelerin yapılması, dijital görüntü işleme sonuçları ve matematiksel model sonuçlarının her ikisinin de deneysel sonuçlar ile uyumlu olmamasından dolayı doğrulaması yapılamadığından geçerli olmayacaktır. Fakat yine de incelemeler yapıldığında, tabak üzerindeki buharlaşmanın homojen bir şekilde gerçekleştiği göze çarpmaktadır. Tabak üzerindeki süzülmeden dolayı, tabağın alt bölgeleri daha ıslaktır.



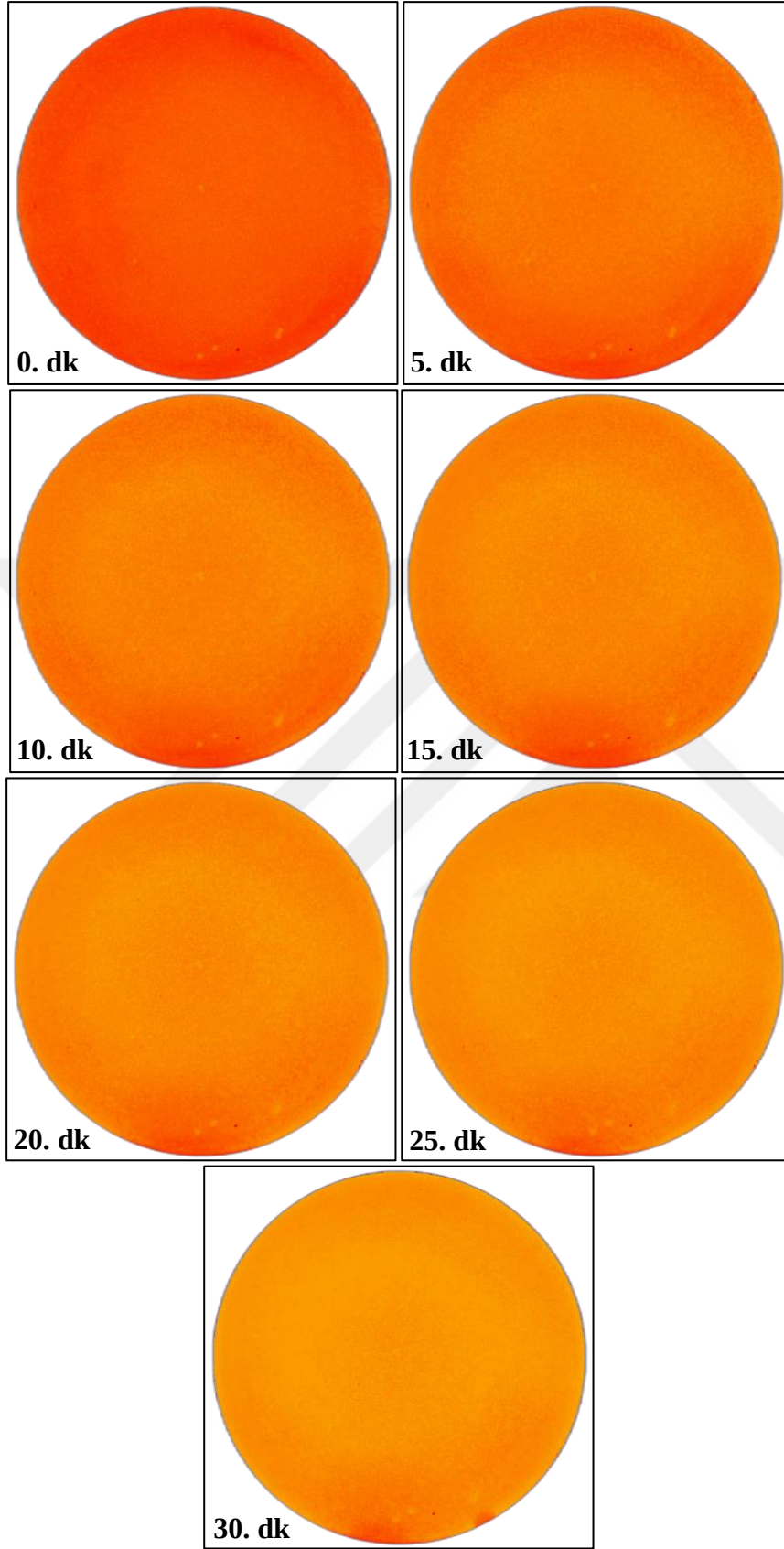
**Şekil 4.19:** Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabak sıcaklık ısı haritaları (karma taşınım).



**Şekil 4.20:** Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabak sıcaklık ısı haritaları (doğal taşınım).



**Şekil 4.21:** Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabaktaki buharlaşma miktarı ısı haritaları (karma taşınım).



**Şekil 4.22:** Sol üst uçtan sağ alt uca sırasıyla, 0-30 dakika aralığındaki her bir 5 dakika için tabaktaki buharlaşma miktarı ısı haritaları (doğal taşınım).

## 5. DEĞERLENDİRME, SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında; ısıtılarak  $40^{\circ}\text{C}$  sıcaklığına çıkartılmış, 19 cm çapındaki dairesel kesitli dikey ( $90^{\circ}$ ) bir porselen levha üzerinden;  $23^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa, %70 bağıl neme ve 0,2 m/s hıza sahip hava akışının sağlandığı koşullar için karma ve doğal taşınım olayları incelenmiştir. Kurulan matematiksel modeller, deneysel çalışmalardan elde edilen tabak sıcaklıkları ile doğrulandıktan sonra; dijital görüntü işleme işleme sonuçları matematiksel modelden elde edilen buharlaşma miktarı hesaplamalarıyla doğrulanmıştır. Karma taşınım durumu için yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilirken, doğal taşınım için deney sonuçlarıyla uyumlu bir matematiksel model ve dijital görüntü işleme analizi elde edilememiştir.

Tez çalışmaları ile birlikte;

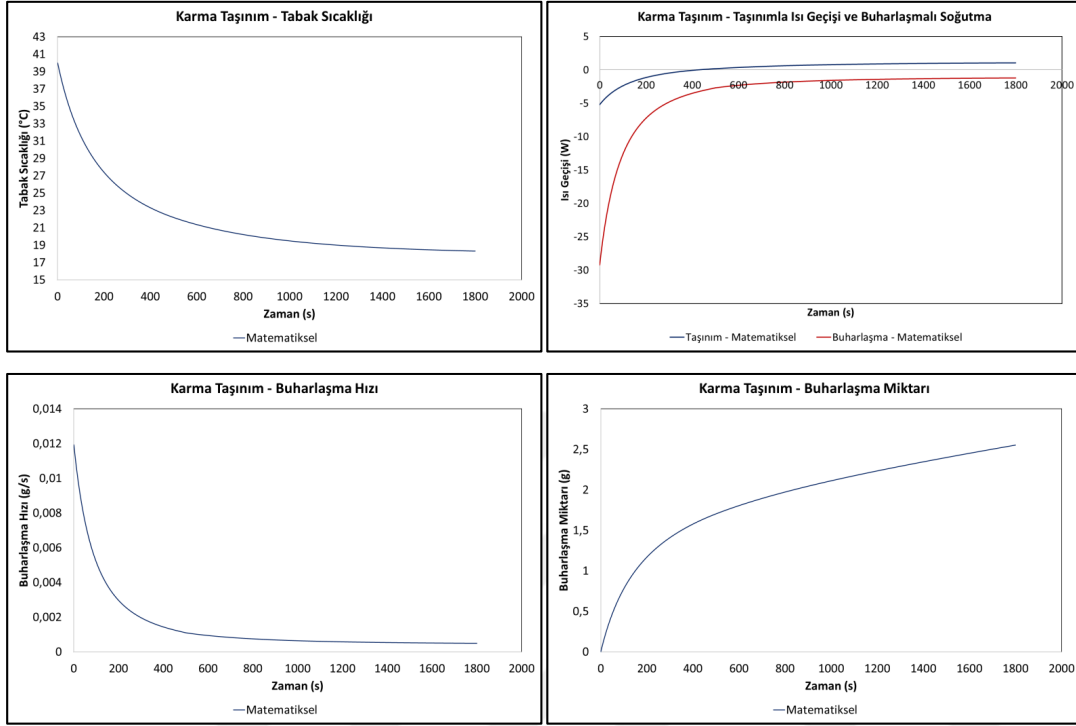
- Laboratuvar alt yapısına benzer çalışmaların yürütülmesine olanak sağlayacak bir rüzgar tüneli kazandırılmıştır (Şekil 5.1).



**Şekil 5.1:** Tabak üzerindeki kurumayı kayıt eden düzenek.

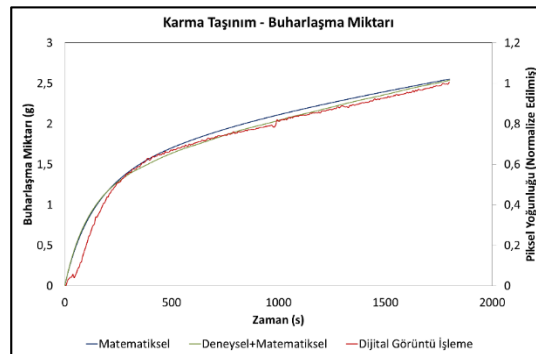
- Zorlanmış/karma taşınım için yüksek doğruluklar ile çalışan bir matematiksel model oluşturulmuş ve Python koduna dönüştürülmüştür. Python kodu sayesinde, zamana bağlı tabak sıcaklığı, ısı geçişi, buharlaşma hızı ve buharlaşma miktarı grafikleri çizdirilebilmektedir. Böylece, ortam ve tabak şartları (tabak çapı ve ağırlığı, ortam nemi ve sıcaklığı, kurutma başlangıç sıcaklığı, hava hızları vb.) ve sabit değerler (Atmosfer basıncı, yerçekimi ivmesi, evrensel gaz sabitleri, buharlaşma entalpisi, kinematik viskozite, kütle yayılım katsayısı, ısı yayılım

katsayısı, özgül ısılar vb.) çalışma durumuna göre düzenlendiğinde, taşınım ile ilgili hesaplamaların otomatik olarak yapılması ve zamana bağlı grafik formatına dönüştürülmesi sağlanabilmektedir (Şekil 5.2).



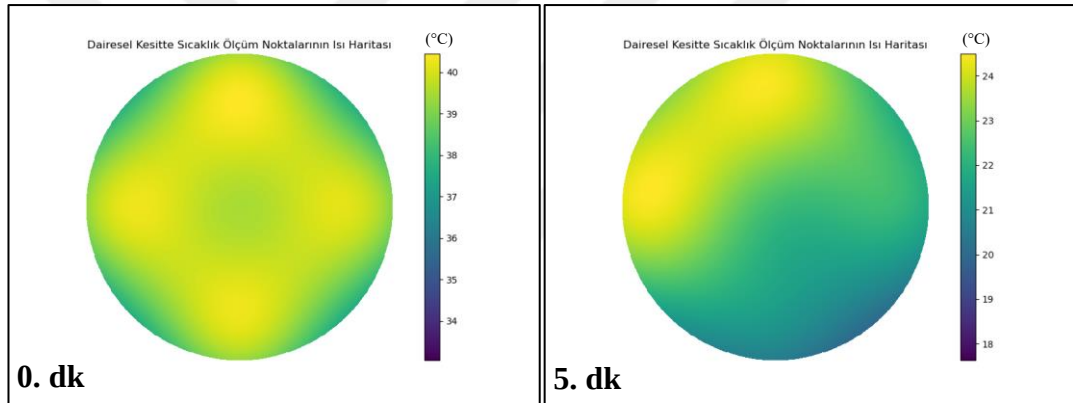
**Şekil 5.2:** Karma taşınım durumunda tabak sıcaklıkları, buharlaşma hızı ve toplam buharlaşma miktarındaki zamana bağlı değişim.

- Zorlanmış/karma taşınım için yüksek doğruluklar ile çalışan bir dijital görüntü işleme analiz yöntemi geliştirilmiş ve Python koduna dönüştürülmüştür. Python kodu sayesinde, deney süresi boyunca rüzgar tüneli içerisindeki tabağın görüntülerinin toplandığı video Python koduna aktarıldığında otomatik olarak aşağıdaki işlemler gerçekleşmekte ve zamana bağlı buharlaşma miktarı grafiği elde edilmektedir (Şekil 5.3):



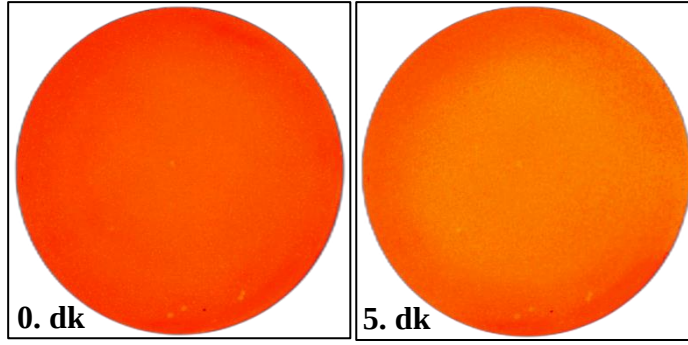
**Şekil 5.3:** Karma taşınım koşullarında buharlaşma miktarının zamana bağlı değişiminin karşılaştırmalı grafiği.

- Videonun her saniyesinden bir kare kesilir ve JPG formatında kaydedilir.
- Görsellere daha önceki bölümlerde aktarılan dijital görüntü işleme teknikleri uygulanır (Şekil 4.11) ve her bir saniyedeki görsel için piksel yoğunluğu ortalamaları elde edilip zamana bağlı çizdirilerek ortalama buharlaşma miktarı grafiği elde edilir.
- Zamana bağlı ortalama buharlaşma miktarı grafiği PNG formatında kaydedilir.
- Tabak üzerinden toplanan sıcaklık verilerini tabak üzerindeki sıcaklık dağılımının zamana bağlı olarak incelenmesini sağlayan ısı haritalarına dönüştüren bir Python kodu yazılmıştır. Böylece; tabak üzerinde işaretli beş noktadan (Şekil 4.15) deney süresi boyunca sıcaklık verisi toplanarak Excel veya CSV formatında Python koduna aktarıldığında, her saniye için tabak üzerindeki sıcaklık dağılımı ısı haritaları elde edilmektedir (Şekil 5.4).



**Şekil 5.4:** 0. ve 5. dakikalar için tabak sıcaklığı ısı haritaları (karma taşınım).

- Dijital kamera ile toplanan video görüntülerinin dijital görüntü işleme teknikleri ile işlenmesi yardımıyla, tabak üzerindeki buharlaşma miktarı dağılımının zamana bağlı olarak incelenmesini sağlayan ısı haritalarını oluşturan bir Python kodu yazılmıştır. Böylece, deney süresi boyunca rüzgar tüneli içerisindeki tabağın görüntülerinin toplandığı video Python koduna aktarıldığında otomatik olarak aşağıdaki işlemler gerçekleşmekte ve her bir saniye için tabak üzerindeki buharlaşma ısı haritaları elde edilmektedir (Şekil 5.5):
- Videonun her saniyesinden bir kare kesilir ve JPG formatında kaydedilir.
- Görsellere daha önceki bölümlerde aktarılan dijital görüntü işleme teknikleri uygulanır (Şekil 4.17) ve her bir saniye için buharlaşma miktarı ısı haritaları elde edilir.
- Buharlaşma miktarı ısı haritaları PNG formatında kaydedilir.



**Şekil 5.5:** 0. ve 5. dakikalar için buharlaşma miktarı ısı haritaları (karma taşınım).

- Tüm bu işlemlerin yapılması; uygun laboratuvar şartları altında yapılacak olan 30 dakikalık bir inceleme işlemi için, 30 dakikalık ön ve son hazırlık süresi ve 2 saatlik bir Python kodu çalıştırarak analiz yöntemi ile toplamda 3 saat sürmektedir. Benzer bir deneyin farklı koşullar ile tekrardan yapılması 30 dakikalık bir deney için benzer şekilde 3 saat olacaktır. Tez çalışmalarında 8 DDR3 RAM'e ve 2.50 GHz – 2.59 GHz işlemci hızlı Intel Core i7-6500U işlemciye sahip Windows işletim sistemli ASUS marka Zenbook UX303U model bir bilgisayar kullanılmıştır. Analizlerin yapılması için yüksek teknik donanım özelliklerine sahip bilgisayarlara ihtiyaç duyulmamaktadır. Benzer sonuçların yüksek doğruluklar ile bilgisayar simülasyonuna dönüştürülmesinin oluşturacağı para ve zaman maliyeti göz önüne alındığında, hızlı gerçekleştirilebilen ve maliyeti düşük bir yöntem geliştirilmiştir.

Tezde geliştirilen, ispatlanan ve benzer şartlarda kullanımı uygun görülen yöntemler yardımıyla devam çalışmaları gerçekleştirilebilir:

- Farklı kurutma başlangıç sıcaklıkları ile çalışmalar yapılabilir.
- Farklı hava akış hızları ile çalışmalar yapılabilir.
- Aynı geometriye sahip ve farklı malzemeden (seramik, cam, plastik, paslanmaz çelik vb.) yapılmış yükler ile çalışmalar yapılabilir.
- Aynı malzemeden yapılmış ve farklı geometriye sahip (farklı çaplar, farklı derinlikler vb.) yükler ile çalışmalar yapılabilir.
- Bulaşık makinesi içerisinde olduğu gibi, tabakların yanyana sıralı dizildiği durumu simüle etmek için; tabağın önüne ve arkasına şeffaf malzemeden yapılmış ve tabakları simüle eden modeller eklenebilir. Böylece, şeffaf modelin arkasında kalan tabaktan görseller elde edilebildiğinden, tabakların yerleştirilme aralıklarının tabağın kurumasına olan etkisini inceleyen çalışmalar yapılabilir.

- Farklı geometrilerle ve farklı dizilme aralıklarıyla yapılan devam çalışmalarında, dijital görüntü işleme sonuçlarıyla elde edilen buharlaşma miktarı yardımıyla çalışılan koşullar için uygun ampirik bağıntılar türetilebilir.





## KAYNAKLAR

- [1] **Bengtsson, P., Berghel, J., & Renström, R.** (2015). A household dishwasher heated by a heat pump system using an energy storage unit with water as the heat source. *International Journal of Refrigeration*, 49, 19-27. doi:10.1016/j.ijrefrig.2014.10.012
- [2] **Bengtsson, P., & Eikevik, T.** (2016). Reducing the global warming impact of a household heat pump dishwasher using hydrocarbon refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, 99, 1295-1302. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.02.018
- [3] **Venkatesh, G.** (2022). Dishwashers: Literature Review to Summarise the Multi-Dimensionality of Sustainable Production and Consumption. *Sustainability*, 14(16), 10302. doi:10.3390/su141610302
- [4] **Bengtsson, P., & Berghel, J.** (2017). Concept study of a new method for drying dishware in a heat pump dishwasher. *Energy Efficiency*, 10(6), 1529-1538. doi:10.1007/s12053-017-9541-4
- [5] **Arçelik A.Ş.** (tarih yok). Ankara Bulaşık Makinesi İşletmesi-Ürün Geliştirme Bölümü Ürün Tanımları Dökümanı.
- [6] **Jeong, S.-W., & Lee, D.** (2014). Drying performance of a dishwasher with internal air circulation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31(9), 1518-1521. doi:10.1007/s11814-014-0194-0
- [7] **Santori, G., Frazzica, A., Freni, A., Galieni, M., Bonaccorsi, L., Polonara, F., & Restuccia, G.** (2013). Optimization and testing on an adsorption dishwasher. *Energy*, 50, 170-176. doi:10.1016/j.energy.2012.11.031
- [8] **Kumar, N., Joseph, R., Gluesenkamp, K., Patel, V., Momen, A., & Turnaoglu, T.** (2021). Measurements Of Evaporation And Condensation Mass Transfer Resistances For Surfaces In Residential Dishwashers. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 18. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3211&context=iracc> adresinden alındı
- [9] **Hauer, A., & Fischer, F.** (2011). Open Adsorption System for an Energy Efficient Dishwasher. *Chemie Ingenieur Technik*, 83(1-2), 61-66. doi:10.1002/cite.201000197
- [10] **De Paepe, M., Theuns, E., Lenaers, S., & Van Loon, J.** (2003). Heat recovery system for dishwashers. *Applied Thermal Engineering*, 23(6), 743-756. doi:10.1016/s1359-4311(03)00016-4
- [11] **Kumar, N., Gluesenkamp, K., Rendall, J., Patel, V., Gehl, T., Momen, A., . . . Vaidhyanathan, R.** (2021). Novel Dishwasher with Thermal Storage and Thermoelectric Heat Recovery. *International Refrigeration and Air*

Conditioning Conference, 18. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1371&context=ihpbc> adresinden alındı

- [12] **Bengtsson, P., & Berghel, J.** (2016). Study of using a capillary tube in a heat pump dishwasher with transient heating. *International Journal of Refrigeration-revue Internationale Du Froid*, 67, 1-9. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.04.006
- [13] **IEC.** (2015). *IEC 60436: Electric dishwashers for household use – Methods for measuring the performance*. International Electrotechnical Commission (IEC).
- [14] **Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., & Lavine, A.** (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7 b.). John Wiley & Sons.
- [15] **Cengel, Y., & Ghajar, A.** (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications* (5 b.). McGraw Hill.
- [16] **Welty, J., Rorrer, G., & Foster, D.** (2015). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* (6 b.). Wiley.
- [17] **Kuddusi, L.** (2022). *Isı Taşınımı: Kuramsal Yaklaşım* (1 b.). Nobel Akademik Yayıncılık.
- [18] **Bird, R.** (2002). *Transport Phenomena* (2 b.). John Wiley & Sons.
- [19] **Kuddusi, L.** (2020). *MIA 513E - Convective Heat Transfer ders notları*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Isı-Akışkan Yüksek Lisans Programı.
- [20] **Uralcan, İ.** (2021). *MIA504 - İleri Isı ve Kütle Geçişi ders notları*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Isı-Akışkan Yüksek Lisans Programı.
- [21] **Mezenes dos Santos Jr, R., & Amarante Mesquita, A.** (2015). DEVELOPMENT OF AN OPEN-CIRCUIT LOW-SPEED WIND TUNNEL. *ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 23.
- [22] **Hegade, K., Natalia, R., Wehba, B., Mittal, A., Bhat, R., & Packirisamy, M.** (2020). Design and study of mini wind tunnel for microsystems fluid interaction under low Reynolds number flows. *SN applied sciences*, 2(5). doi:10.1007/s42452-020-2602-x
- [23] **Hernandez, M., López, A., Jarzabek, A., Perales, J., Wu, Y.-L., & Xiaoxiao, S.** (2013). *Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel*. InTech eBooks. doi:10.5772/54169
- [24] **Cattafesta, L., Bahr, C., & Mathew, J.** (2010). Fundamentals of Wind-Tunnel Design. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. doi:10.1002/9780470686652.eae532
- [25] **Rae, W., Pope, A., & Barlow, J.** (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (3 b.). John Wiley & Sons.
- [26] **Ismail, John, J., Libyawati, W., Rhakasywi, D., Suwandi, A., & Hendrayanto, P.** (2017). Optimization Design of Open Circuit Wind Tunnel Suction Type. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering (IJMME-IJENS)*, 17(06).

- [27] **Bradshaw, P., & Mehta, R.** (1979). Design rules for small low speed wind tunnels. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 83(827), 443-453. doi:10.1017/s0001924000031985
- [28] **Zhang, Y., Cardiff, P., & Keenahan, J.** (2023). Wind-Induced Phenomena in Long-Span Cable-Supported Bridges: A Comparative Review of Wind Tunnel Tests and Computational Fluid Dynamics Modelling. *Applied Sciences*, 11. <https://doi.org/10.3390/app11041642> adresinden alındı
- [29] **Bradshaw, P.** (1965). The effect of wind-tunnel screens on nominally two-dimensional boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(04), 679. doi:10.1017/s0022112065001064
- [30] **Kaya, M.** (2003). *SESALTI RÜZGAR TÜNELLERİ, DİZAYN ESASLARI VE EMMELİ TİP SESALTI RÜZGAR TÜNELİ TASARIMI*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, İstanbul.
- [31] **Url-1** <<https://ai.stanford.edu/~syue/cvweb/tutorial1.html>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [32] **Gonzalez, R., & Woods, R.** (2019). *Digital Image Processing* (4 b.). Pearson.
- [33] **Url-2** <<https://datacarpentry.org/image-processing/04-drawing.html>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [34] **Url-3** <<https://www.whymath.org/node/wavlets/imagebasics.html>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [35] **Url-4** <[https://docs.opencv.org/3.4/d8/d01/group\\_\\_imgproc\\_\\_color\\_\\_conversions.html](https://docs.opencv.org/3.4/d8/d01/group__imgproc__color__conversions.html)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [36] **Url-5** <<https://techtutorialsx.com/2018/06/02/python-opencv-converting-an-image-to-gray-scale/>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [37] **Url-6** <<https://www.oreilly.com/library/view/practical-computer-vision/9781449337865/ch04.html>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [38] **Url-7** <[https://docs.opencv.org/4.x/d4/d86/group\\_\\_imgproc\\_\\_filter.html](https://docs.opencv.org/4.x/d4/d86/group__imgproc__filter.html)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [39] **Url-8** <[https://docs.opencv.org/4.x/dc/da5/tutorial\\_py\\_drawing\\_functions.html](https://docs.opencv.org/4.x/dc/da5/tutorial_py_drawing_functions.html)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [40] **Url-9** <[https://docs.opencv.org/4.x/da/d53/tutorial\\_py\\_houghcircles.html](https://docs.opencv.org/4.x/da/d53/tutorial_py_houghcircles.html)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [41] **Url-10** <[https://docs.opencv.org/3.4/d0/d86/tutorial\\_py\\_image\\_arithmetics.html](https://docs.opencv.org/3.4/d0/d86/tutorial_py_image_arithmetics.html)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [42] **Url-11** <<http://wiki.lofarolabs.com/index.php/Masking>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [43] **Url-12** <<https://github.com/danielgatis/rembg>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [44] **Url-13** <[https://docs.opencv.org/4.x/d3/d50/group\\_\\_imgproc\\_\\_colormap.html](https://docs.opencv.org/4.x/d3/d50/group__imgproc__colormap.html)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [45] **Hussain, I., & Majeed, M.** (2011). DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTING OF LOW SPEED WIND TUNNEL WITH ITS

MEASUREMENT AND INSPECTION DEVICES. *The Journal of Engineering*, 17(6). <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=2952> adresinden alındı

- [46] **Mauro, S., Bruzca, S., Lanzafame, R., Famoso, F., Galvagno, A., & Messina, M.** (2016). Small-Scale Open-Circuit Wind Tunnel: Design Criteria, Construction and Calibration. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(23).
- [47] **Aslan, Z.** (2016). *SUBSONIC WIND TUNNEL DESIGN*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı.
- [48] **Abdelhamed, A., Yassen, S., & Huang, W.** (2015). Design optimization of three dimensional geometry of wind tunnel contraction. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 281-288. doi:10.1016/j.asej.2014.09.008
- [49] **Patil, A., Manjarekar, A., Aswale, M., & Nakade, S.** (2022). Low-Speed Wind Tunnel design, optimization and CFD Analysis. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(06).
- [50] **Bell, J., & Mehta, R.** (1988). *Contraction design for small low-speed wind tunnels*. NASA STI/Recon Technical Report N. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19890004382/downloads/19890004382.pdf> adresinden alındı
- [51] **Bell, J., & Mehta, R.** (1989). Boundary-layer predictions for small low-speed contractions. *AIAA Journal*, 27(3), 372-374. doi:10.2514/3.10122
- [52] **Mehta, R.** (1979). The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers. *Progress in Aerospace Sciences*, 18, 59-120. doi:10.1016/0376-0421(77)90003-3
- [53] **Url-14** <[http://www.grc.nasa.gov/www/k-1/windtunnel/wandering\\_windtunnel.html](http://www.grc.nasa.gov/www/k-1/windtunnel/wandering_windtunnel.html)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [54] **Panda, M., & Samanta, A.** (2016). Design of Low Cost Open Circuit Wind Tunnel - A Case Study. *Indian Journal of Science and Technology*. doi:10.17485/ijst/2016/v9i30/99195
- [55] **Basak, R., Mitra, D., & Mazumdar, A.** (tarih yok). Design of Various Components of an Open Circuit Blower Tunnel without Exit Diffuser. *International Journal of Advanced Science and Technology*.
- [56] **Rona, A., & Soueid, H.** (2010). Boundary Layer Trips for Low Reynolds Number Wind Tunnel Tests. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. doi:10.2514/6.2010-399
- [57] **Boudreau, H.** (2009). *Design, construction, and testing of an open atmospheric boundary layer wind tunnel*. (Doktora Tezi). University of Florida, Gainesville.
- [58] **Roomi, T.** (2015). Designing an Open Circuit Wind Tunnel for Atmospheric Boundary Layers. *Diyala Journal for Pure Sciences*.
- [59] **Loehrke, R., & Nagib, H.** (1976). Control of Free-Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation. *Journal of Fluids Engineering*, 98(3), 342-351. doi:10.1115/1.3448313

- [60] **Ghorbanian, K., Soltani, M., & Manshadi, M.** (2011). Experimental investigation on turbulence intensity reduction in subsonic wind tunnels. *Aerospace Science and Technology*, 15(2), 137-147. doi:10.1016/j.ast.2010.06.009
- [61] **Mehta, R.** (1985). Turbulent boundary layer perturbed by a screen. *AIAA Journal*. doi:10.2514/3.9089
- [62] **Japikse, D., & Baines, N.** (2000). *Diffuser Design Technology* (2 b.). Concepts Eti.
- [63] **Mehta, R.** (1979). *Aspects of the design and performance of blower tunnel components*. (Doktora Tezi). Imperial College London, Londra.
- [64] **Cengel, Y., & Boles, M.** (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (5 b.). McGraw Hill.
- [65] **Šidlof, P., Antoš, P., Šimurda, D., & Štěpán, M.** (2017). Turbulence intensity measurement in the wind tunnel used for airfoil flutter investigation. 143, s. 02107. *Epj Web of Conferences*. doi:10.1051/epjconf/201714302107
- [66] **Url-15** <<https://www.sfxco.co.uk/products/sfxco-hydrochromic-sprayable-coating-ink-paint?variant=12650824433748>>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [67] **Nader, G., dos Santos, C., Jabardo, P., Cardoso, M., Taira, N., & Pereira, M.** (2006). CHARACTERIZATION OF LOW TURBULENCE WIND TUNNEL. 18. IMEKO WORLD CONGRESS.
- [68] **Url-16** <[https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_intensity#:~:text=Typically%20the%20turbulence%20intensity%20is,is%20between%201%25%20and%205%25](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity#:~:text=Typically%20the%20turbulence%20intensity%20is,is%20between%201%25%20and%205%25)>, erişim tarihi 21.05.2023.
- [69] **Url-17** <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node238.htm#:~:text=A%20turbulence%20intensity%20of%201,boundary%20from%20external%20C%20measured%20data.>>, erişim tarihi 21.05.2023.



## **EKLER**

### **EK A: Isı Geçişi (Sıcaklık) Isı Haritaları**

**EK A.1** Isı Geçişi (Sıcaklık) Isı Haritaları – Karma Taşınım

**EK A.2** Isı Geçişi (Sıcaklık) Isı Haritaları – Doğal Taşınım

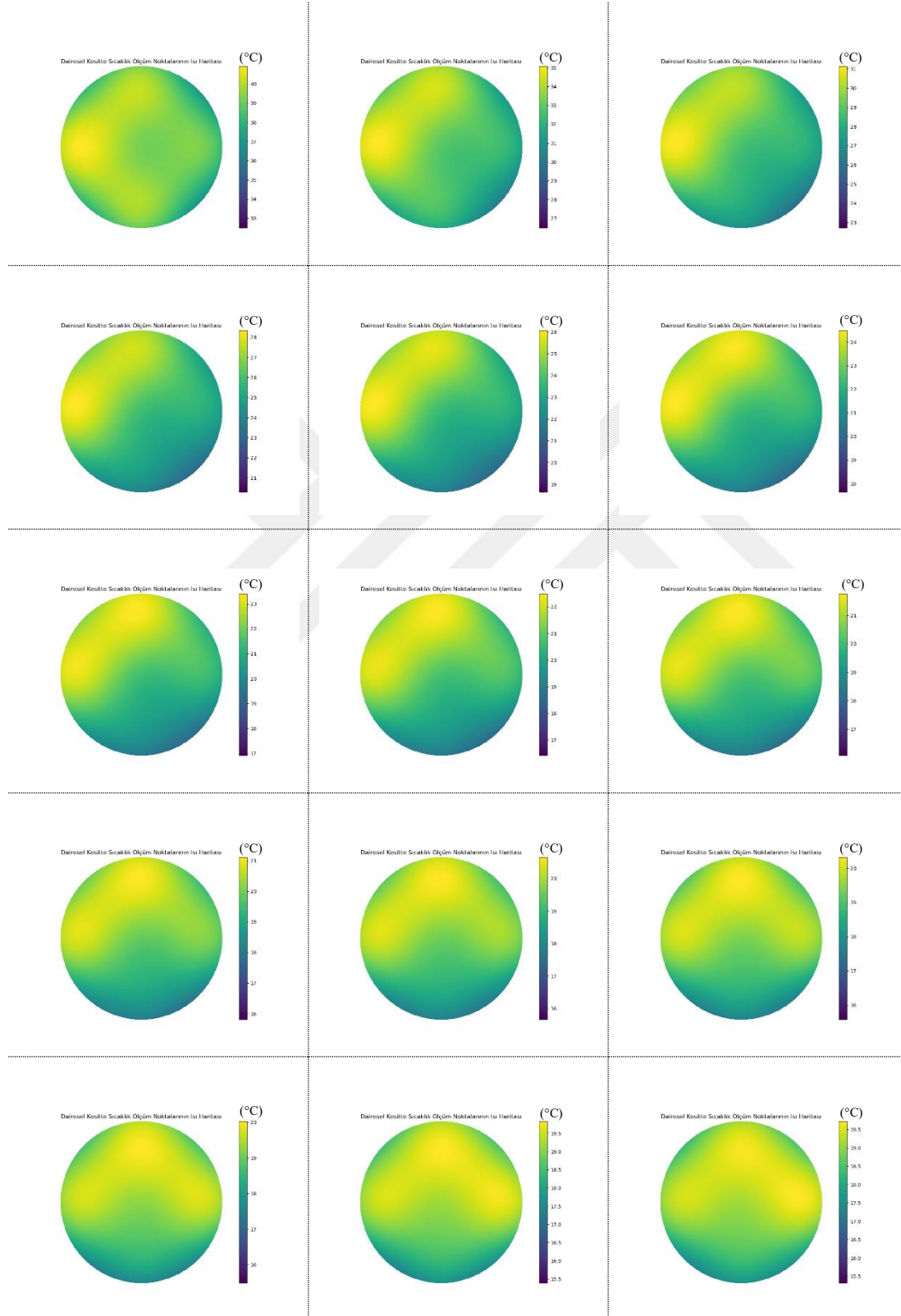
### **EK B: Kütle Geçişi (Buharlaşıma Miktarı) Isı Haritaları**

**EK B.1** Kütle Geçişi (Buharlaşıma Miktarı) Isı Haritaları – Karma Taşınım

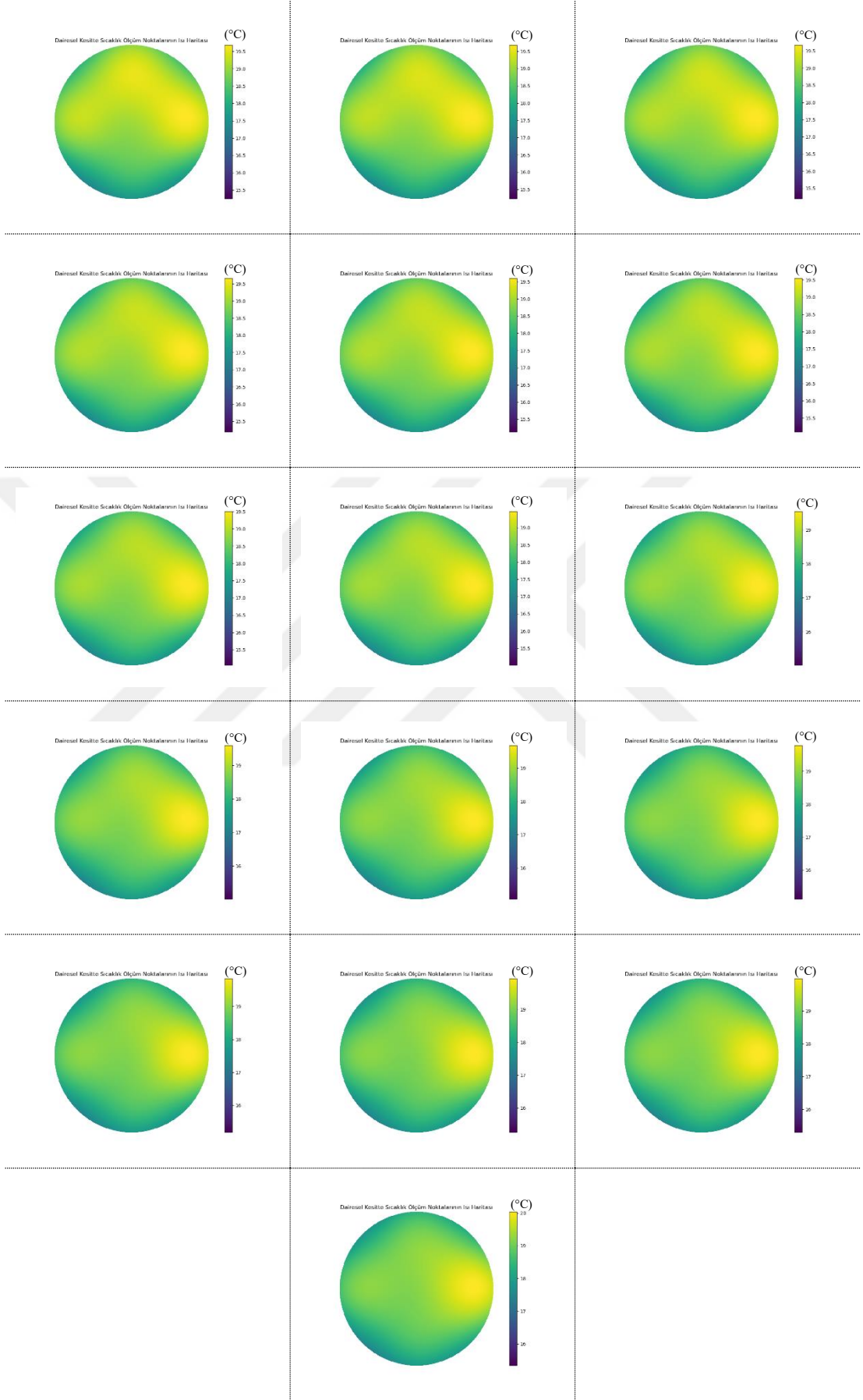
**EK B.2** Kütle Geçişi (Buharlaşıma Miktarı) Isı Haritaları – Doğal Taşınım

## EK A. Isı Geçişi (Sıcaklık) Isı Haritaları

### EK A.1 Isı Geçişi (Sıcaklık) Isı Haritaları – Karma Taşınım

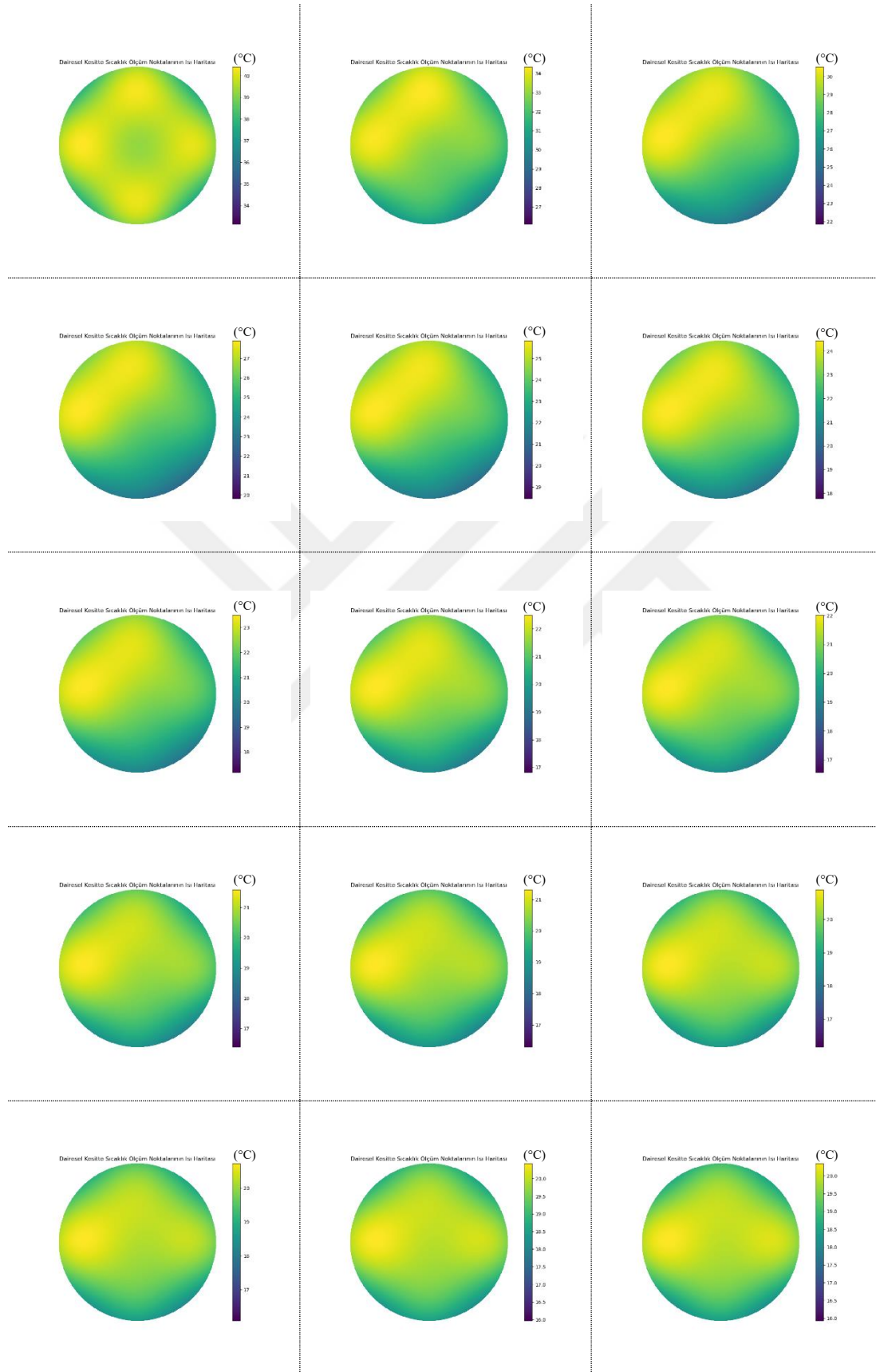


Şekil A.1: Karma taşınım sıcaklık ısı haritaları.

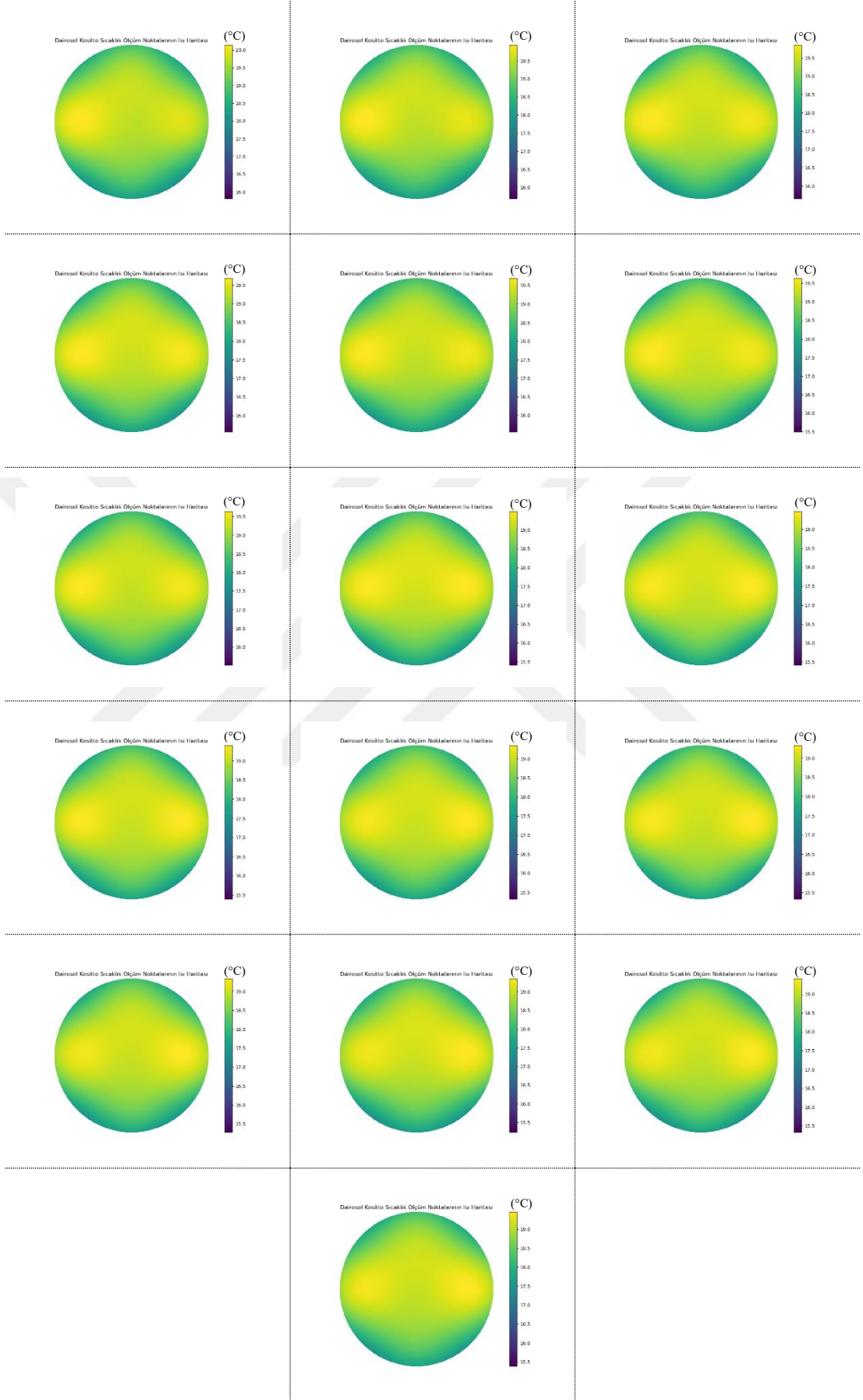


**Şekil A.1 (devam):** Karma taşınım sıcaklık ısı haritaları.

## EK A.2 Isı Geçişi (Sıcaklık) Isı Haritaları – Doğal Taşınım



Şekil A.2: Doğal taşınım sıcaklık ısı haritaları.

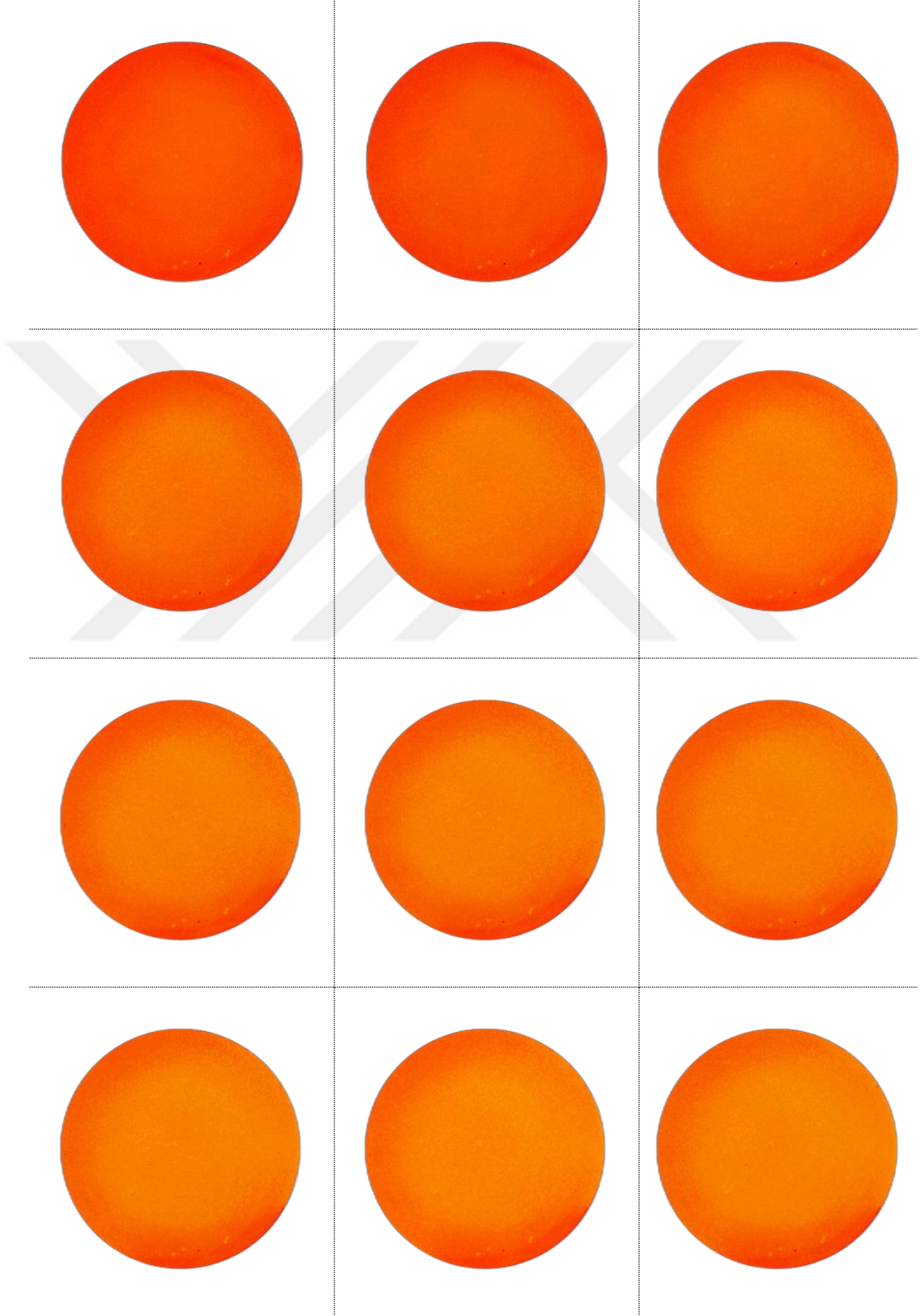


Şekil A.2 (devam): Doğal taşınım sıcaklık ısı haritaları.

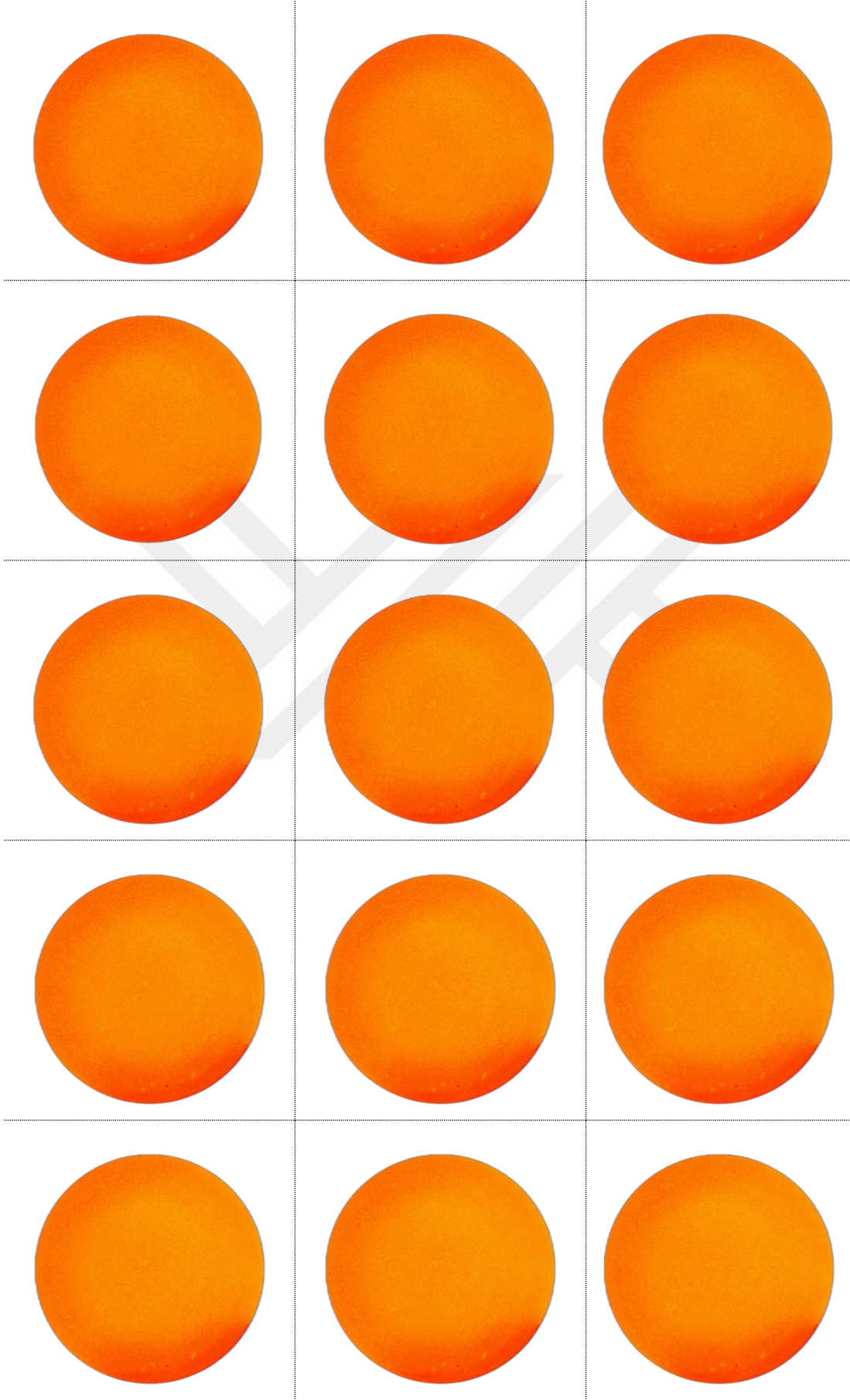


## EK B. Ktle Geişi (Buharlaşma Miktarı) Isı Haritaları

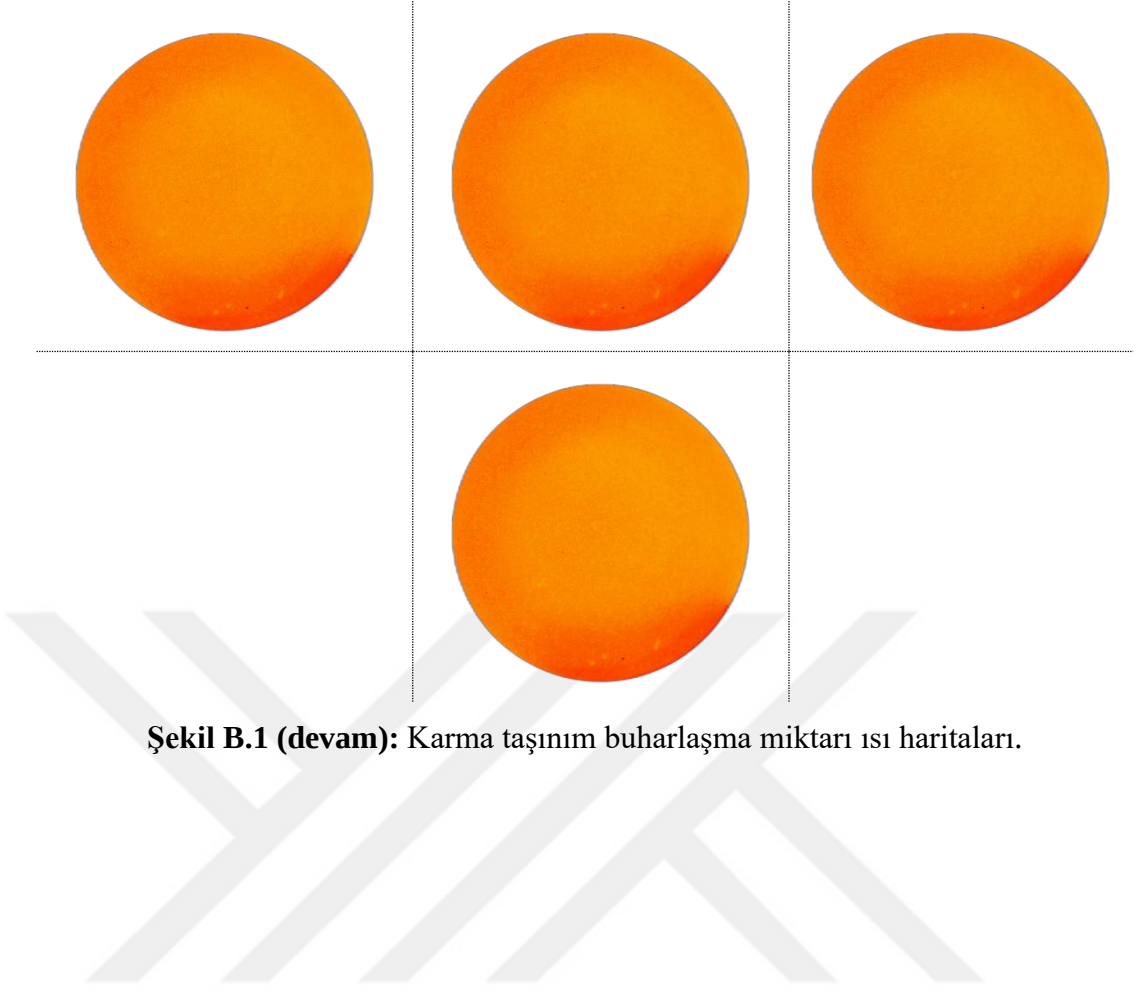
### EK B.1 Ktle Geişi (Buharlaşma Miktarı) Isı Haritaları – Karma Taşınım



şekil B.1: Karma taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları.

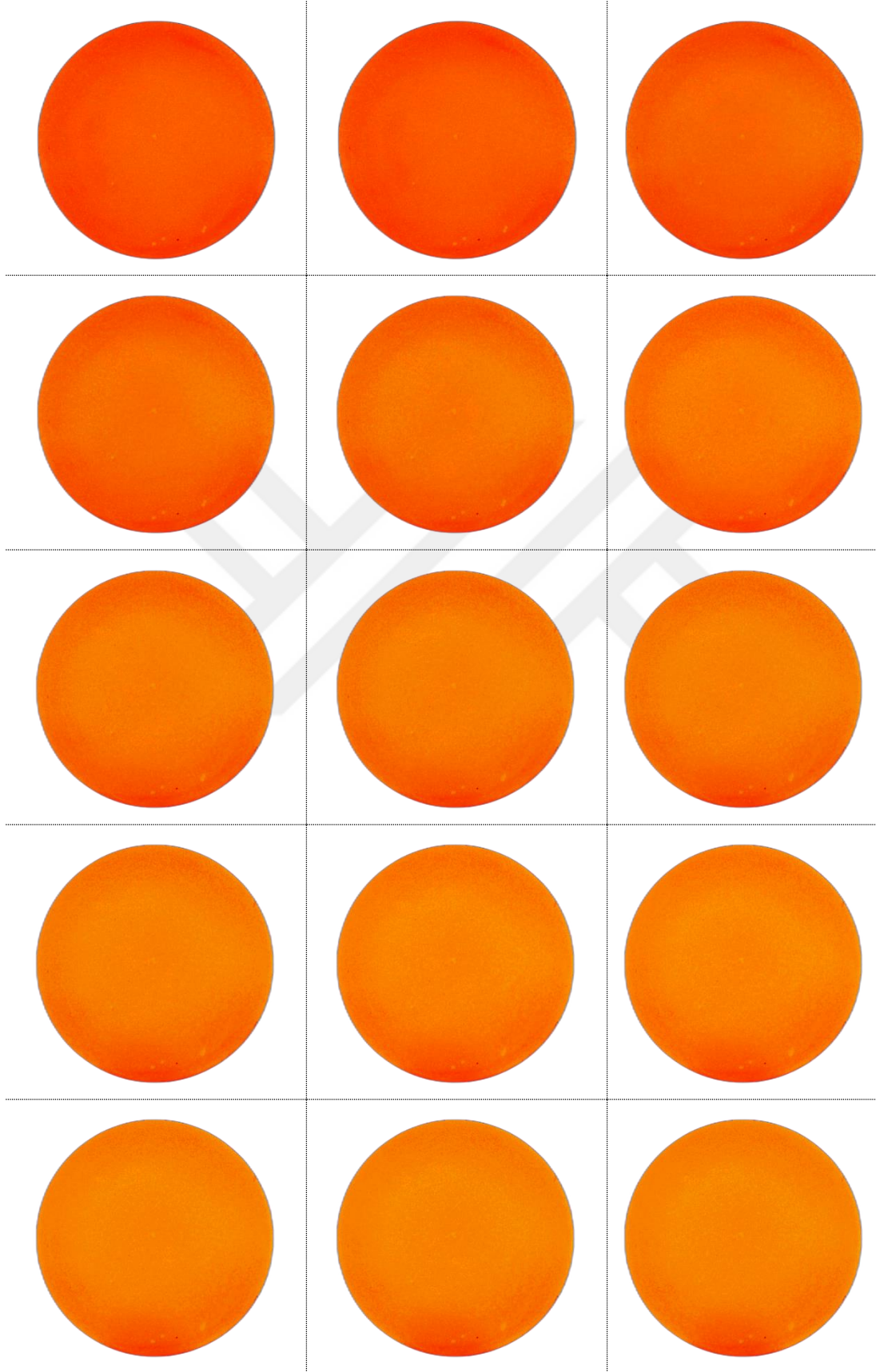


**Şekil B.1 (devam):** Karma taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları.

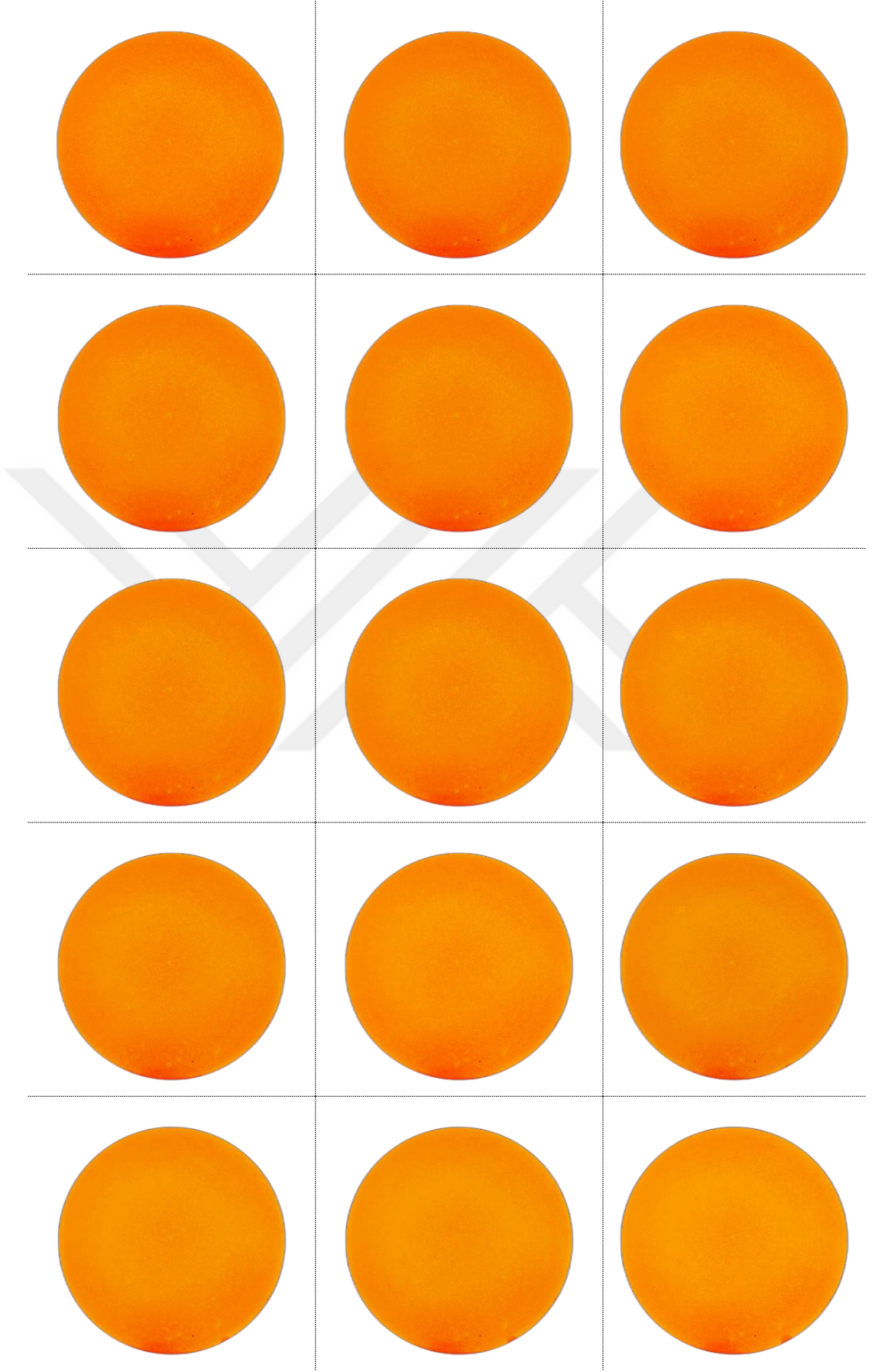


**Şekil B.1 (devam):** Karma taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları.

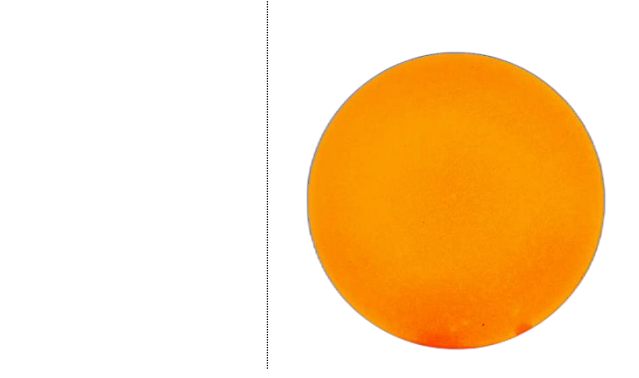
**EK B.2 Kütle Geçişi (Buharlaşma Miktarı) ısı Haritaları – Doğal Taşınım**



**şekil B.2:** Doğal taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları.



**Şekil B.2 (devam):** Doğal taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları.



**Şekil B.2 (devam):** Doğal taşınım buharlaşma miktarı ısı haritaları.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Aykut EFE

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği