T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖZENEKLİ YATAY BİR YÜZEYDEN BUHARLAŞMANIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

MEHMET İNAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI-PROSES PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ŞEVKET ÖZGÜR ATAYILMAZ

İSTANBUL, 2017

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖZENEKLİ YATAY BİR YÜZEYDEN BUHARLAŞMANIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet İNAN tarafından hazırlanan tez çalışması 09.05.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail TEKE

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail Cem PARMAKSIZOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Bu çalışma, ARÇELİK A.Ş Merkez AR-GE Direktörlüğü tarafından desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans ve Yüksek Lisans tez çalışmalarım boyunca, bilgi ve tecrübeleri ile desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve her aşamada katkıda bulunan danışman hocam Sn. Doç. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ' a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam için tüm imkân ve olanakları sunarak bana destek olan Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, Ar-Ge Direktörü Sn. Cem KURAL, deneysel çalışmalarım süresince Mekanik Teknolojiler Grup Yöneticisi, şuan ise Beko-Çin fabrika direktörü olan Sn. Dr. Faruk BAYRAKTAR, Isıl Teknolojiler Yöneticisi Sn. Dr. Levent AKDAĞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar için her türlü donanımın sağlanmasında yardımcı olan, bilgi ve tecrübeleriyle tez çalışmamın planlı ve başarılı bir şekilde ilerlemesine destek olan Termodinamik Tek. Ailesi Takım Lideri Sn. Dr. Tolga N. Aynur' a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın her aşamasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, proje liderliği ile tez çalışmamın sağlıklı bir biçimde ilerlemesini sağlayan Sn. Aydın ÇELİK'e, değerli bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan ve tez çalışmamın daha nitelikli olmasına katkıda bulunan Sn. Dr. Tolga APAYDIN ve Sn Dr. Sedat TOKGÖZ' e teşekkür ederim.

Deney düzeneğinin kurulması, deneysel çalışmaların başlaması ve işleyişinde gösterdikleri özverili çalışma ve ilgiden ötürü Sn. Yasin İĞİT, Sn. Seçkin TÜYSÜZ' e teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalar ve deney düzeneğinin kurulması süresince göstermiş oldukları teknik destekten dolayı başta Sn. Fikri ÇAVUŞOĞLU, Sn. Sabahattin HOCAOĞLU, Sn. Nihat KANDEMİR ve Sn. Murat BAKYÜZ olmak üzere tüm Arçelik A.Ş. Ar-Ge Akışkanlar Dinamiği Tek. Ailesi, Termodinamik Tek. Ailesi ve Yapısal Tasarım – Prototip Ailesi çalışanlarına teşekkür ederim. Tez çalışmalarım sırasında tüm samimiyetleriyle bana her konuda destek olan Göker KÜLÜŞLÜ, Mert GÜNEY, Serkan SOLMAZ, Burcu ÜNAT, Furkan BAYAV ve tüm Ar-Ge Yüksek Lisans arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli Annem, Babam ve Ablama en derin duygularımla teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Mayıs, 2017

Mehmet İNAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xiii

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.1.1 Buharlaşmaya Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi ve Buharlaşmayla İlgili Psikrometrik Tanımlar 2
1.1.1.1 Buharlaşmaya Etki Eden Faktörler 3
1.1.1.2 Buharlaşmayla İlgili Psikrometrik Tanımlar 4
1.1.2 Buharlaşma Prosesinde Taşınımla Isı ve Kütle Geçişi 9
1.1.2.1 Taşınımla Isı ve Kütle Geçişi 9
1.1.2.2 Isı ve Kütle Geçişi Benzeşimi 15
1.1.3 Serbest Su Yüzeyinden Buharlaşmanın İncelendiği Çalışmalar 16
1.1.4 Gözenekli Islak Yüzeylerden Buharlaşmanın İncelendiği Çalışmalar 31
1.2 Tezin Amacı 40
1.3 Hipotez 40

BÖLÜM 2

DENEY DÜZENEĞİ 41

2.1 Deney Tesisatı 42
2.2 Dış Ortam Hava Şartlandırma Odası 44
2.3 Rüzgar Tüneli ve Buharlaşma Haznesi 44

2.3.1 Rüzgar Tüneli 45
2.3.2 Buharlaşma Haznesi 47
2.4 Ölçüm ve Veri Toplama Sistemi 47
2.4.1 Ölçüm Sistemi 47
2.4.1.1 Hız Ölçümü 49
2.4.1.2 Debi Ölçümü 52
2.4.1.3 Bağıl Nem Ölçümü 53
2.4.1.4 Sıcaklık Ölçümü 56
2.4.1.5 Ağırlık Ölçümü 57
2.4.2 Veri Toplama Sistemi 58
2.5 Güç ve Kontrol Ünitesi 59

BÖLÜM 3

SERBEST SU YÜZEYİNDEN BUHARLAŞMA DENEYSEL ÇALIŞMALARI 60

3.1 Deneysel Tasarım Sisteminin Oluşturulması 60
3.2 Deney Koşulları ve Başlangıç Şartları 61
3.3 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi 65

BÖLÜM 4

GÖZENEKLİ ISLATILMIŞ YÜZEYDEN BUHARLAŞMA DENEYSEL ÇALIŞMALARI 68

4.1 Deneysel Tasarım Sisteminin Oluşturulması 69
4.2 Deney Koşulları ve Başlangıç Şartları 70
4.3 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi 71

BÖLÜM 5

DENEYSEL HATALAR VE BELİRSİZLİK ANALİZİ 74

5.1 Belirsizlik Analizi Yöntemi 75
5.2 Belirsizliklerin Tespiti 75
5.2.1 Kütle Transfer Katsayısı İçin Belirsizliklerin Tespiti 76
5.2.2 Boyutsuz Sherwood Sayısı İçin Belirsizliklerin Tespiti 78

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLARIN TEORİK İNCELENMESİ VE REGRESYON MODELİ İLE KORELASYON OLUŞTURULMASI 79

6.1 Kütle Transfer Katsayısı ve Sherwood Sayısının Belirlenmesi 79
6.2 Doğrusal Olmayan Regresyon Analizi ile Korelasyon Eldesi 82

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 90

KAYNAKLAR 95

EK-A 98
EK-B 100
EK-C 102
ÖZGEÇMİŞ 106

SİMGE LİSTESİ

A	Buharlaşan yüzey alanı (m^2)
C	Molar yoğunluk ($kmol/m^3$)
D_{AB}	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
E, J	Buharlaşma akısı (g/m^2h)
h	Isı transfer katsayısı (W/m^2K)
h_m	Kütle transfer katsayısı (m/s)
h_{fg}	Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)
L	Karakteristik uzunluk (m)
$\dot{m}$	Buharlaşma debisi (g/h)
P_s, P_∞	Yüzey ve hava tarafı kısmi buhar basıncı (Pa)
R_v	Gaz sabiti (Su buharı için = 0,4615 $kPa.m^3/kgK$)
ϕ, RH	Ortam havasının bağıl nemi (%)
T_s, T_∞	Su ve hava tarafı sıcaklık (°C)
w	Özgül nem (g sb/kg kh)
ρ_s, ρ_∞	Yüzey ve hava tarafı su buharı yoğunluğu (kg/m^3)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
δ	Sapma (%)
c_p	Özgül ısı (J/kgK)
k	İletim ısı transfer katsayısı (W/mK)
Re	Reynolds sayısı (-)
Pr	Prandtl sayısı (-)
Sc	Schmidt sayısı (-)
Sh	Sherwood sayısı (-)
Le	Lewis sayısı (-)
Nu	Nusselt sayısı (-)
V	Hava akış hızı (m/s)
A, B	Korelasyon sabitleri (-)
X	Gözenekli ortam başlangıç su içeriği (-)

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
ANOVA	Analysis of Variance (Değişken Analizi)
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DOE	Design of Experiment (Deneysel Tasarım)
IWC	Initial Water Content (Başlangıç Su İçeriği)
MDF	Medium Density Fiberboard
PIV	Particle Image Velocimetry
PVC	Polivinil Klorür
RMC	Residual Moisture Content (Artık Nem İçeriği)
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Atmosferik basınçtaki hava için oluşturulan psikometrik diyagram, İpek [4] 7
Şekil 1. 2 Psikometrik diyagramın şematik gösterimi, İpek [4] 8
Şekil 1. 3 Proses havasının nemlendirilmesi..... 8
Şekil 1. 4 Bir düz levha üzerinde hidrodinamik sınır tabakanın gelişimi, Incropera [5] 10
Şekil 1. 5 Düz plakada ısı geçişi, Incropera [5]..... 11
Şekil 1. 6 Düz plakada kütle geçişi, Incropera [5] 12
Şekil 1. 7 Buharlaşma deney düzeneği şematik gösterimi, Pauken [13]..... 19
Şekil 1. 8 Dört farklı hava akış hızı için buharlaşma oranı değişimi, Pauken [13] 20
Şekil 1. 9 Ana parametrelerin gösterildiği serbest su yüzeyinden buharlaşmayı temsil eden çizim, Sartori [14] 21
Şekil 1. 10 Deney düzeneğinin şematik görünümü, Raimundo [15] 22
Şekil 1. 11 Dikey eksen boyunca deneysel ve nümerik ortalama hızlar, Raimundo [15]..... 24
Şekil 1. 12 Farklı kısmi buhar basınç farkları ve hava hızlarında deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırılması, Raimundo [15]..... 26
Şekil 1. 13 Hava akış hızı, hava bağıl nemi ve hava-su sıcaklık farklarının fonksiyonu olan buharlaşma oranının farklı koşullarda değerlendirilmesi, Raimundo [15] 27
Şekil 1. 14 Buharlaşma testleri için kullanılan şatlandırılmış kabin ve deney düzeneği şematik görünümü, Asdrubali [17] 29
Şekil 1. 15 Farklı su sıcaklıkları ve ortam havası bağıl neminde buharlaşma akısının değişimi, (a) V = 0,05 m/s, (b) V = 0,08 m/s, (c) V = 0,17 m/s, Asdrubali [17]..... 31
Şekil 1. 16 Buharlaşma havuzları, Tang ve Etzion [20]..... 32
Şekil 1. 17 Serbest yüzey ve gözenekli ıslak yüzey durumlarında hava akış hızına bağlı kütle transfer katsayısı değerleri, n = 0,8, Tang ve Etzion [20]..... 34
Şekil 1. 18 Bağıl nem = %50, Hava sıcaklığı = 20°C durumlarında hava akış hızı ve yüzey su sıcaklığına bağlı $m_{gözenekli}/m_{serbest}$ oranları, Tang ve Etzion [20] 35
Şekil 1. 19 Kurutma prosesini temsil eden çizim, Donnarumma vd. [21]..... 36
Şekil 1. 20 Pasif soğutma sistemleri test düzenekleri, Nahar vd. [23, 24]..... 38
Şekil 2. 1 Deney tesisatı, (a) Buharlaşma haznesiz, (b) Buharlaşma hazneli..... 42
Şekil 2. 2 Deney tesisatının şematik görünümü 43
Şekil 2. 3 Rüzgar tüneli, (a) CAD çizimi (b) Fotoğraf görünümü 45

Şekil 2. 4 Rüzgar tüneli hava giriş ve çıkış bölgesinde kullanılan akış düzeltici yapıları, (a) Hücre tipi akış düzeltici, (b) Bal peteği akış düzeltici 46
Şekil 2. 5 Hücre tipi ve bal peteği akış düzelticilerin rüzgar tüneli içindeki yerleşimi . 47
Şekil 2. 6 Buharlaşma haznesi (a) CAD çizimi ve (b) Fotoğraf görünümü 47
Şekil 2. 7 Hava akış hızlarının belirlenmesi için kurulan PIV düzeneği 50
Şekil 2. 8 Yüzey üzeri farklı fan gerilimlerinde hava akış hızı eğrisi 51
Şekil 2. 9 Farklı fan gerilimlerinde hava akış hızı dağılımları, (a) 6V, (b) 9V, (c) 12V ... 51
Şekil 2. 10 Rüzgar tüneli hava akış debisi ölçümleri 52
Şekil 2. 11 Farklı fan gerilimlerinde tünel içi hava akış debisi eğrisi 53
Şekil 2. 12 MSI HTG3500 marka nem sensörü 54
Şekil 2. 13 MSI HTG3500 sıcaklık modüllü bağıl nem sensörü çalışma aralığı 54
Şekil 2. 14 Bağıl nem-hata payı ilişkisi 54
Şekil 2. 15 Kontrol hacmi nem sensör yerleşimi 55
Şekil 2. 16 Deneylerde kullanılan bir nem sensörünün kalibrasyon eğrisi 56
Şekil 2. 17 Gözenekli ortam ve serbest su yüzeyi sıcaklığı ölçümü termoeleman ağ yapısı 56
Şekil 2. 18 Deneylerde kullanılan bir termoelemanın kalibrasyon eğrisi 57
Şekil 2. 19 Elektronik terazi 57
Şekil 2. 20 Anlık ağırlık değişim grafiği örneği 58
Şekil 2. 21 Agilent 34970A veri toplama cihazı 59
Şekil 2. 22 DC güç kaynağı 59
Şekil 3. 1 Serbest su yüzeyi deneysel tam faktöriyel tasarımın oluşturulması 61
Şekil 3. 2 Ortam havası T = 26 °C, RH = %50 durumu 62
Şekil 3. 3 Ortam havası T = 16 °C, RH = %50 durumu 62
Şekil 3. 4 Ortam havası T = 26 °C, RH = %72 durumu 63
Şekil 3. 5 Ortam havası T = 16 °C, RH = %72 durumu 63
Şekil 3. 6 Ortam havası T = 21 °C, RH = %61 durumu 64
Şekil 3. 7 Örnek bir deneydeki başlangıç koşulu hava-su arayüzeyi sıcaklık farkı grafiği 65
Şekil 3. 8 Parametrelerin serbest su yüzeyinden buharlaşma akısı üzerindeki ana etkileri 66
Şekil 3. 9 Yüzey sıcaklığına göre buharlaşma akısı değişimi 67

Şekil 4. 1 Gözenekli ıslatılmış yüzey deneysel tam faktöriyel tasarımın oluşturulması 69
Şekil 4. 2 Parametrelerin gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma akısı üzerindeki ana etkileri 72
Şekil 4. 3 Farklı gözenekli ortam nemliliğinde yüzey sıcaklığının buharlaşma akısına etkisi 73
Şekil 6. 1 Hava-su arayüzeyinde kontrol hacmi 79
Şekil 6. 2 Korelasyon modeli oluşturulması, Minitab 17.0 83
Şekil 6. 3 Korelasyondaki bilinmeyenlere değer atanması, Minitab 17.0 84
Şekil 6. 4 ±20 hata bandında ölçülen ve Eşitlik 6.9 ile hesaplanan buharlaşma akıları 86
Şekil 6. 5 ±20 hata bandında ölçülen ve Eşitlik 6.10 ile hesaplanan buharlaşma akıları 87

Şekil 6. 6 ±20 hata bandında ölçülen ve Eşitlik 6.11 ile hesaplanan buharlaşma akıları 87
Şekil 6. 7 ±20 hata bandında önerilen korelasyon sonuçlarının literatür verileriyle karşılaştırılması, (a) Pauken (b) Smith (c) Tang 88
Şekil 6. 8 Kısmi buhar basınç farkına göre farklı hızlarda deneysel ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırılması 89

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1. 1 Isı ve kütle geçişinde kullanılan boyutsuz sayılar 15
Çizelge 1. 2 Taşınımsal özelliklere bağlı k-ε türbülans modeli yönetici denklemleri, Raimundo [15] 24
Çizelge 1. 3 Deneysel ölçümler ve nümerik analizlerin sonuçları ve sapma değerleri, Raimundo [15] 25
Çizelge 1. 4 Buharlaşmaya etki eden parametre değerleri, Asdrubali [17] 29
Çizelge 1. 5 V = 0,05 m/s' de hava akış hızı ve bağıl neminin fonksiyonu olarak buharlaşma kütle taşınım katsayısı K değeri (10^{-8}), Asdrubali [17] 30
Çizelge 1. 6 Farklı tuzluluk derecesine sahip yüzey etkin maddeler, Donnarumma [21] 36
Çizelge 1. 7 Su sertliklerinin pamuk tekstil malzemesi kurutma oranına etkisi, Donnarumma vd. [21] 37
Çizelge 1. 8 HLAS maddesinin kurutma oranına etkisi, Donnarumma vd. [21] 37
Çizelge 2. 1 Deney tesisatı ekipman listesi 43
Çizelge 2. 2 Deney düzeneğinde kullanılan termoelemanların isimleri ve konumları 48
Çizelge 2. 3 Deney düzeneğinde kullanılan nem sensörlerinin isimleri ve konumları 49
Çizelge 3. 1 Serbest su yüzeyinden buharlaşma deneysel çalışmalarında uygulanan parametrik deney matrisi 60
Çizelge 3. 2 Yatay serbest su yüzeyinden parametrik buharlaşma sonuçları 65
Çizelge 4. 1 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma deneysel çalışmalarında uygulanan parametrik deney matrisi 68
Çizelge 4. 2 Deneylerde kullanılan başlangıç su içeriği yüzdeleri 70
Çizelge 4. 3 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden parametrik buharlaşma sonuçları 71
Çizelge 5. 1 Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluk değerleri 75
Çizelge 5. 2 Örnek bir deneydeki hesaplanan parametrelerin nominal değerleri ve belirsizlikleri 78
Çizelge 6. 1 Serbest su yüzeyinden buharlaşmada kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı değerleri 81
Çizelge 6. 2 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşmada kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı değerleri 82
Çizelge 6. 3 Serbest su yüzeyinden buharlaşma akıları ve sapma değerleri (Ölçülen ile Eşitlik 6.9 arasında) 85

Çizelge 6. 4 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma akıları ve sapma değerleri (X=41% için; ölçülen ile Eşitlik 6.10, X=57% için; ölçülen ile Eşitlik 6.11 arasında)..... 86

ÖZET

GÖZENEKLİ YATAY BİR YÜZEYDEN BUHARLAŞMANIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet İNAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ

Bu çalışmada, yalıtımlı bir ısı odasında istenilen hava şartlarının sağlandığı, ek olarak hava akış hızının rüzgar tüneli vasıtasıyla ayarlanabildiği bir sistemde serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslak bir yüzeyden suyun buharlaşması prosesini inceleme amaçlanmıştır. Farklı proses parametrelerinin (hava hızı, hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi, gözenekli ortam başlangıç su içeriği) incelendiği bu çalışmada buharlaşma hızı ve akısı değerlendirilmiştir. Ayrıca buharlaşma mekanizması ile ilgili taşınımsal dinamikler incelendikten sonra proses parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda; bağıl nem arttıkça kısmi buhar basınç farkının azalmasına bağlı olarak buharlaşma akısının da azaldığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, hava sıcaklığının artması su buharı emme kapasitesini artıracağından buharlaşmanın arttığı görülmüştür. Hava akış hızının artmasıyla zorlanmış taşınım etkinliği artmış ve buharlaşmanın artmasına sebep olmuştur. Yüzey sıcaklığının artması ile suyun kısmi buhar basıncı artmış ve buharlaşmanın da arttığı görülmüştür. Gözenekli ortam başlangıç su içeriğinin artması az da olsa buharlaşmanın arttığını göstermiştir. Deneysel ölçüm verileri kullanılarak yeni korelasyonlar elde edilmiş ve literatürde sıkça çalışılmış olan serbest su yüzeyinden buharlaşma konusunda araştırmalar yapan yazarların korelasyonları ile karşılaştırıldığında uyum sağlanmıştır.

Tez çalışması yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmaya başlama nedenleri ve çalışma sonucunda hedeflenen sonuçlar genel olarak açıklanmış, yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırması paylaşılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, tez çalışmasında kullanılan deney tesisatı ve ekipmanları detaylı olarak anlatılmış, rüzgar tüneli boyunca hava akış ölçümleri (hız, debi) gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, oluşturulan parametrik deney düzeneğinde serbest su yüzeyinden buharlaşma testleri yapılmış, buharlaşmayı etkileyen parametreler değerlendirilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, çalışma konusu olan gözenekli ortamdan buharlaşma, dört parametrenin oluşturduğu deneysel sistemde irdelenmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, deneysel çalışma boyunca oluşacak hatalar değerlendirilmiş olup Kline-McClintock belirsizlik analizi yöntemine göre hava tarafı ve yüzey tarafı sıcaklık, hava tarafı bağıl nem ile kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı için belirsizlikler tespit edilmiştir.

Çalışmanın altıncı bölümünde, deneysel ölçüm sonuçlarına göre teorik analiz gerçekleştirilmiş ve kütle transfer katsayısı ile Sherwood sayısı her deney adımı için belirlenmiştir. Ayrıca, regresyon analizi ile literatürde yer alan korelasyon alt yapısında model oluşturulmuş ve yeni korelasyonlar üretilmiştir. Testlerdeki parametre koşulları altında geçerli olan bu korelasyonlar ile ölçüm sonuçları arasındaki yüzdesel sapma grafikleri elde edilmiştir.

Çalışmanın yedinci ve son bölümünde gerçekleştirilmiş deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Su buharlaşma oranı, serbest yüzey, gözenekli yüzey, ısı ve kütle transferi, zorlanmış taşınım, doğal taşınım, rüzgar tüneli ölçümleri

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WATER EVAPORATION FROM A HORIZONTAL POROUS SURFACE

Mehmet İNAN

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Şevket Özgür ATAYILMAZ

In this study, water evaporation from a horizontal porous surface is examined experimentally. Experimental study had taken place in different enviromental conditions in a climatic test chamber which can be maintained at a durable required values. Using the full factorial design which is a kind of design of experiment, relationship between evaporation rate and affecting parameters such as air flow velocity, air temperature, relative humidity and initial water content were examined. Convection dynamics is also related to the mechanism of evaporation were investigated and optimization of process parameters were carried out.

As a result of the study; as relative humidity increases, it was concluded that the evaporation rate decreased depending on partial vapor pressure difference decreases. In addition, as the air temperature increases, water vapor absorption capacity has increased and evaporation rate has also increased. Evaporation rate has increased with surface temperature. With the increase of air flow rate, the effectiveness of forced convection has increased and this led to increase of evaporation. Slightly increase initial water content of porous media show that the increase in evaporation.

This thesis study is composed of seven main chapters. In chapter one; motivation and aim of this study have explained in general terms as an introduction. At the same time this chapter consists literature research about master thesis subject.

In chapter two; components and structure of the experimental setup explained in the first part. The subsequent part of this chapter contains wind tunnel measurements such as air flow velocity and flow rate.

In chapter three; evaporation tests from a horizontal free water surface were carried out in the experimental setup and the parameters that effect evaporation were evaluated.

In chapter four; evaporation from porous media which is the subject of the study is explicated consisting of four parameters in the experimental system and optimization of these parameters was carried out.

In chapter five; the experimental errors that will occur throughout the study were evaluated. According to the Kline and McClintock uncertainty analysis method, uncertainties have been identified for temperature at air side and surface side, relative humidity, mass transfer coefficient and dimensionless Sherwood number.

In chapter six; theoretical analysis has been performed according to the results of experimental measurements and mass transfer coefficient and Sherwood number were determined for each experiment. Also, using regression analysis, the correlation in the literature of the sub-model structure was created and new correlations have been proposed. Graphs of percentage deviation were obtained among the results of experimental measurements and these correlations that are valid under the parametric conditions.

In the final chapter, results of this study have been evaluated and suggestions have proposed.

Keywords: Water evaporation rate, free surface, porous surface, heat and mass transfer, forced convection, free convection, wind tunnel measurements

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Tabiatta suyun hidrolojik çevriminin önemli bir unsurunu teşkil eden buharlaşma, yeryüzünde sıvı ve katı halde değişik şekil ve şartlarda bulunan suyun meteorolojik faktörler etkisiyle atmosfere gaz halinde dönüşü olarak tarif edilir. Denizler, göller, akarsular, nemli topraklar, karla örtülü veya buzla kaplı yüzeyler, ormanlar, bitki örtüsüne sahip araziler üzerinde devamlı buharlaşma meydana gelmektedir. Su yüzeyi ve ıslak yüzeylerde meydana gelen buharlaşma devamlı bir harekettir. Su yüzeyini terk eden su buharı miktarı, birim saha üzerindeki havanın özelliklerine, suyun ve çevrenin özelliklerine göre değişim gösterir [1].

Su buharlaşması olayını incelemek amacıyla araştırmacılar özellikle hidroloji, tarım, meteoroloji gibi temel alanların yanı sıra yüzme havuzlarında serbest su yüzeyinden ortam havasına su buharının geçişi, su saflaştırma üniteleri, evsel tip soğutuculardaki defrost suyunun buharlaştırılması ve alttan ısıtılan/ısıtılmayan su haznelerinde buharlaşma konularına yoğunlaşmışlardır. Literatürde bu çalışmaların dışında nadiren de olsa ıslatılmış gözenekli bir yüzeyden buharlaşma konusu ile karşılaşılmaktadır. Bu durum genellikle toprak, torf gibi tarımsal gözenekli yapılardan buharlaşmada, evsel kurutucu ve güneş enerjisiyle kurutma sistemlerinde, evaporatif soğutma sistemlerinde görülmektedir.

Isıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri, yüzme havuzları ve kurutma sistemleri gibi çeşitli alanlarda görülen buharlaşma olayının artırılması veya azaltılması istenen farklı durumlar söz konusu olmaktadır. Örneğin, kapalı yüzme havuzlarında iklimlendirme

sistemlerinin enerji tüketimini artırmanın yanında ortam havasının bağıl neminin artmasıyla kapalı hacimde konfor sıkıntılarına sebep olacağından buharlaşmanın azaltılması istenir. Bunun yanında, evsel tip bir soğutucuda defrost suyunun toplandığı bir su kabından gerçekleşecek buharlaşma taşmayı önlemek için artırılmalıdır. Giyim, gıda sektöründe de kurutma prosesi ile ıslak yüzeyden havaya su buharı transferi artırılmak istenmektedir. Serbest su yüzeyinden buharlaşmayı değerlendirmek için literatürde birçok matematiksel model oluşturulup çeşitli deneysel korelasyonlar üretilmiştir. Gözenekli yüzeylerden buharlaşma konusunda ise serbest su yüzeyi durumuna göre yapılan çalışmalar sınırlıdır.

Tez kapsamında yalıtımlı bir ısı odasında istenilen hava şartlarının sağlandığı, ek olarak hava hızlarının rüzgar tüneli vasıtasıyla ayarlanabildiği bir sistemde gözenekli ıslak bir yüzeyden buharlaşma irdelenmiştir. Farklı proses parametrelerinin (hava akış hızı, hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi, gözenekli ortam başlangıç su içeriği) incelendiği bu çalışmada buharlaşma hızı ve akısı değerlendirilmiştir. Ayrıca buharlaşma mekanizması ile ilgili taşınımsal dinamikler incelendikten sonra deneysel korelasyonlar önerilmiştir. Literatürde yer alan konu ile ilgili çalışmalar dört ana başlık altında özetlenmiştir.

- Buharlaşmaya etki eden faktörlerin incelenmesi ve buharlaşmayla ilgili psikrometrik tanımlar
- Buharlaşma prosesinde taşınımla ısı ve kütle geçişi
- Serbest su yüzeyinden buharlaşmanın incelendiği çalışmalar
- Gözenekli yüzeyden buharlaşmanın incelendiği çalışmalar

1.1.1 Buharlaşmaya Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi ve Buharlaşmayla İlgili Psikrometrik Tanımlar

Hidrolojik çevrimin bir parametresi olan buharlaşma, su kaynaklarının planlanması ve işletilmesi, sulama suyu miktarının belirlenmesinde, meteorolojik ve atmosferik çalışmalarda önemli bir faktör olarak görülmektedir. Su yüzeyi yakınlarında sürekli olarak sudan havaya veya havadan suya geçen moleküllere rastlanır. Sudan havaya geçen moleküllerin sayısı daha fazla ise buharlaşma olayının meydana geldiği kabul edilmektedir [2].

1.1.1.1 Buharlaşmaya Etki Eden Faktörler

Buharlaşmada meteorolojik ve topografik faktörler ile buharlaşan yüzeyin özelliği önem kazanmaktadır. Hava ve su tarafı buhar basıncı farkı, hava hareketleri, enerji, hava basıncı, güneş ışınımı, nem ve sıcaklık parametreleri incelenmesi gereken temel meteorolojik faktörlerdir. Ek olarak, yükseklik (rakım) gibi topografik faktör ile buharlaşan yüzeyin içeriği de değerlendirilmelidir.

- Buhar basınç farkı: Dalton Kanunu'na göre buharlaşma, su yüzeyindeki buhar basıncıyla (P_s) suyun üstündeki havanın buhar basıncı (P_a) arasındaki fark ile doğru orantılıdır (P_s–P_a). Suyun sıcaklığı arttıkça moleküllerin hızları artar, yüzeysel gerilim azalır ve buharlaşma kolaylaşır.
- Hava hareketleri (Hava hızı): Buharlaşan su, yüzeyden uzaklaşmadığı takdirde havanın buhar basıncının artması sonunda yukarıda sözü edilen basınç farkı bir süre sonra sıfıra düşeceğinden suyun üstündeki havanın doymuş hale geçmesi ile buharlaşma durur ($P_s – P_a \leq 0$).

Buharlaşmanın devam etmesi için difüzyon ve konveksiyon ile su buharının su yüzeyinden uzaklaşması gerekir. Bu da havanın hareketi ile mümkündür. Rüzgarlar (hava hareketleri) yatay doğrultuda iletimin yanında düşey doğrultuda türbülanslı difüzyon yolu ile alışverişi de artırdıklarından buharlaşmayı devam ettirmekte önemli rol oynarlar.

- Enerji: Su moleküllerinin hızlarını artırarak buharlaşmayı sağlamak için enerji gereklidir. 1 gram suyun buharlaşması için gerekli ısı ortamın sıcaklık derecesine göre 2255-2498 J arasında değişir.
- Hava basıncı: Havanın basıncı azaldıkça buharlaşma artar. Ancak bu etki diğerlerinin yanında önemsizdir.
- Güneş ışınımı: Buharlaşma, gün ışığının olduğu saatlerde ve hatta geceleri de kesintiye uğramadan devam eder. Tezde gerçekleştirilen buharlaşma ölçümleri, kapalı gölge ortamda yapıldığı için radyasyon etkisi ihmal edilmiştir.
- Bağıl nem: Havanın nemi arttıkça su buharı emme gücü azalır ve dolayısıyla buharlaşma yavaşlar. Bağıl nem buharlaşma mekanizması için büyük önem taşır.

- Hava sıcaklığı: Buharlaşma olayı; hava sıcaklığının yüksek olması halinde, sıcaklığın düşük olmasına göre daha hızlı olur. Hava sıcaklığı arttıkça havanın su buharı emme kapasitesi de artacağından, buharlaşma olayı üzerinde iki kat etkiye sahiptir.
- Yükseklik (Rakım): Diğer faktörlerin değişmediği kabul edilirse yükseklikle hava basıncı azalacağından buharlaşma artar. Bir taraftan ise yükseklikle hava sıcaklığı da azalacağından buharlaşma azalır. Fakat bu azalma hava basıncının düşmesinden ileri gelen artmayı karşılayamayacağından yükseklikle buharlaşmanın artacağı kabul edilir. Tezde buharlaşma ortamında yükseklik değişikliği bulunmamaktadır.
- Buharlaşan yüzeyin içeriği: Suda erimiş tuzlar buharlaşmayı azaltır. Bu azalma % 1 tuz eriyiği için % 1 kadardır. Tezde buharlaşma haznesi içindeki su, saf su olarak seçilmiştir [3].

1.1.1.2 Buharlaşmayla İlgili Psikrometrik Tanımlar

Psikrometri, nemli havanın termodinamik özelikleri ile bu özelikleri kullanarak nemli havadaki işlemler ve şartlarla ilgilenen, termodinamiğin bir dalıdır. Atmosferik hava tamamen kuru değildir, içerisinde su buharı bulunmaktadır. Bu nedenle psikrometri, atmosferik havanın incelenmesinde önemli bir rol almaktadır. Özellikle iklimlendirme hesaplamalarında atmosferik hava, içindeki su buharının varlığı dikkate alınarak hesaplamalara dahil edilmektedir. Psikrometri; soğutma, iklimlendirme, nem alma ve nemlendirme sistemlerinin temelini oluşturmaktadır.

-10 °C ile 50 °C sıcaklık aralığında yapılan termodinamik hesaplamalarda hava, mükemmel gaz olarak kabul edilmektedir. 50 °C sıcaklıkta, suyun doyma basıncı 12,3 kPa'dır. Bu değerden daha düşük basınçlarda, doymuş buhar halinde olsa bile su buharı çok az bir hatayla (%0,2'nin altında) ideal gaz olarak ele alınabilir [4]. Tez kapsamında havadaki su buharı bu sıcaklık aralığında olacağından ideal gaz kabul edilmiştir. O halde ideal gaz denklemi yazılacak olursa,

$$P_a V_a = RT \tag{1.1}$$

$$P_v V_v = RT \tag{1.2}$$

olmaktadır. Böylelikle atmosferik hava basıncı, kuru havanın (P_a) ve su buharının (P_v) kısmi basınçlarının toplamı olan, ideal bir gaz karışımı olarak incelenebilir.

$$P = P_a + P_v \tag{1.3}$$

(1.3)' te ifade edilen P nemli havanın basıncını, P_a kuru havanın kısmi basıncını ve P_v su buharının kısmi basıncını ifade etmektedir. Su buharının kısmi basıncı, su buharının atmosferik hava sıcaklığı ve hacminde tek başına olması durumunda sahip olacağı basıncı göstermektedir.

Bağıl Nem ve Mutlak Nem (Özgül Nem)

Nem verme veya nem alma iklimlendirme proseslerinde bağıl nem ve mutlak nem ifadeleri ile sıkça karşılaşılmaktadır. Bu ifadelerin doğru anlaşılması ve yorumlanması iklimlendirme sistemlerinin doğru analiz edilmesi açısından çok önemlidir.

Mutlak (özgül) nem, birim kuru hava kütlesinde bulunan su buharı kütlesi olarak tanımlanabilir. Bu ifade, (1.4) eşitliğinde belirtildiği gibi yazılabilir.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \tag{1.4}$$

Burada ω özgül nemi, m_v nemli hava içerisindeki su buharı miktarını ve m_a kuru hava miktarı simgelemektedir.

Nemli hava içerisindeki kuru hava ve su buharı bileşenlerinin ideal gaz kabulüyle (1.4)' teki ifadeler yeniden düzenlenirse,

$$\omega = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0,622 \frac{P_v}{P_a} \tag{1.5}$$

(1.5) eşitliği elde edilmektedir. (1.5) yeniden düzenlenir ve (1.3)' teki ifade dikkate alınırsa özgül nem ifadesi,

$$\omega = \frac{0,622 P_v}{P - P_v} \text{ (kg su buharı / kg kuru hava)} \tag{1.6}$$

olarak yazılmaktadır.

Nemli havanın içerisinde bulunan su buharı miktarının (m_v), aynı sıcaklıktaki havanın içerisinde bulunabilecek en çok su buharı miktarına (m_g) oranı, bağıl nem olarak adlandırılır. Bağıl nem, ϕ ile gösterilmekte ve eşitlik 1.7 ile ifade edilmektedir.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V/(R_v T)}{P_g V/(R_v T)} = \frac{P_v}{P_g} \tag{1.7}$$

Eşitlik (1.7)' de yer alan suyun doyma basıncı P_g, (1.8)' de ifade edilmektedir.

$$P_g = P_{doyma,T} \tag{1.8}$$

Bağıl nem ile özgül nem arasındaki ilişkiyi açıklamak istersek ise, (1.6) ve (1.7)'den yararlanmak gerekir. Bağıl nem ve özgül nem ifadeleri sırasıyla, (1.9) ve (1.10) eşitlikleri yardımıyla ifade edilmiştir.

$$\phi = \frac{\omega P}{(0,622+\omega)P_g} \tag{1.9}$$

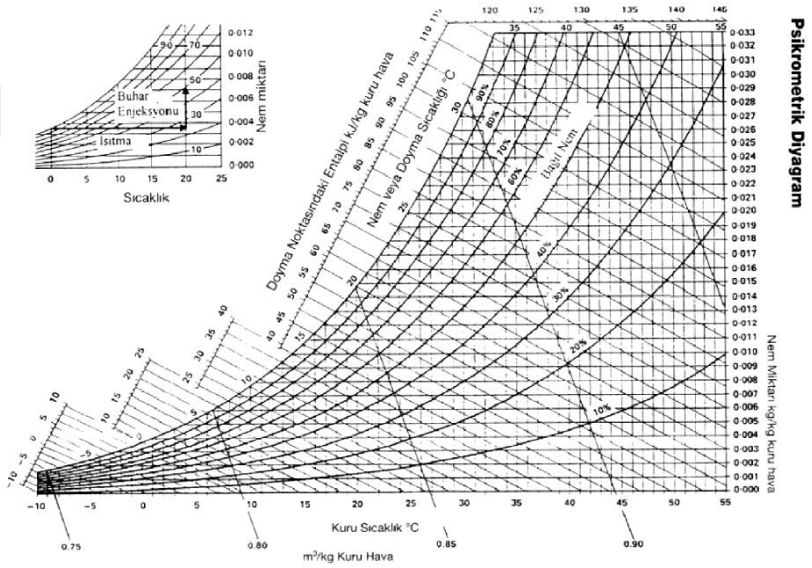
$$\omega = \frac{0,622\phi P_g}{P - \phi P_g} \tag{1.10}$$

Bağıl nem değeri, havanın doygunluk kapasitesine ulaşıp ulaşmadığının bir göstergesidir. Bu değer, havanın taşıdığı su buharı miktarına göre 0 ile 1 arasında değişiklik göstermektedir. Hava, bağıl nem değerinin 0 olması durumunda kuru hava, bağıl nem değerinin 1 olması durumunda ise doymuş hava olarak ifade edilir. Belirli sıcaklıktaki kuru havaya su buharı ilave edilerek özgül nem değeri, bağıl nem değeri 1'e ulaşıncaya kadar artırılabilir. Bağıl nem değeri 1'e ulaştıktan sonra yani havanın belirli bir sıcaklıktaki maksimum su buharı taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra havaya su buharı ilave etmek mümkün olmaz (sabit sıcaklıkta). Bu kapasiteye ulaşmış havaya, doymuş hava denilmektedir [4].

Psikrometrik Diyagram

Mühendislik hesaplamalarında, bağıl nem, mutlak nem, çiğ noktası sıcaklığı vb. değerlerin bir diyagram üzerinden okunması ve karşılaştırılması, iklimlendirme, nem alma ve nem verme problemleri çözümlerinde kolaylık sağlamaktadır. Belirli bir basınçtaki atmosferik havanın özelliklerinin, iki bağımsız özellik tarafından kesin olarak belirlenebildiği, hesaplamalar sonucu oluşturulmuş diyagramlara psikrometrik diyagramlar adı verilir.

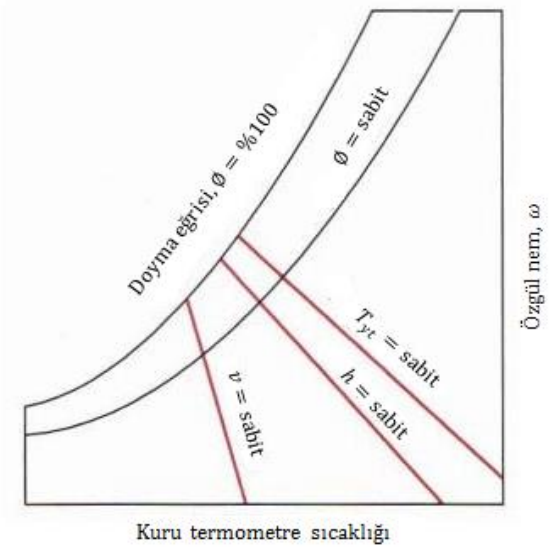
Atmosferik basınç altındaki nemli hava için oluşturulmuş psikrometrik diyagram Şekil 1.1' de gösterilmektedir. Havanın maksimum taşıyabileceği su buharı miktarı, havanın sıcaklığı ve basıncına göre değişiklik göstermektedir. Havanın sabit basınçta soğutulduğu zaman yoğuşmanın başladığı sıcaklığa havanın çiğ noktası sıcaklığı ($T_{çn}$) denilmektedir. Diğer bir deyişle, çiğ noktası sıcaklığı suyun söz konusu buhar basıncındaki doyma sıcaklığıdır.



Şekil 1. 1 Atmosferik basınçtaki hava için oluşturulan psikometrik diyagram, İpek [4]

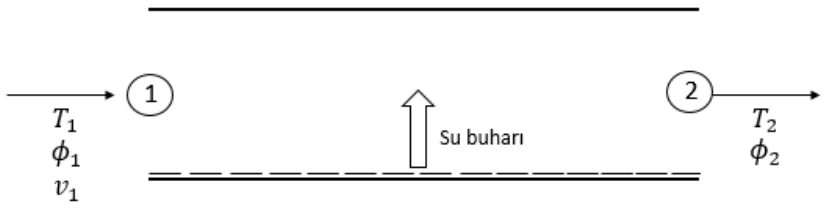
Psikrometrik diyagramda kuru termometre sıcaklıkları yatay eksende, özgül nemler ise dikey eksende yer almaktadır. Psikrometrik diyagramın sol bitiminde, doyma hattı eğrisi vardır. Su buharına doymuş havaya ait tüm özellikler bu eğri üzerinde yer alır. Bu nedenle söz konusu eğri aynı zamanda %100 bağıl nem eğrisidir.

Psikrometrik diyagram üzerinde, eğik çizgiler yer almaktadır. Bu çizgiler, sabit entalpi (kJ/kg kuru hava), sabit yaş termometre sıcaklığı ve sabit özgül hacim (m^3 / kg kuru hava) çizgileridir. Söz konusu değerler, Şekil 1.2' de yer alan şematik psikrometrik diyagram üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 1. 2 Psikometrik diyagramın şematik gösterimi, İpek [4]

Buharlaşma olayı bir nemlendirme prosesidir. Tez kapsamında sabit kuru termometre sıcaklığında proses havasının nemlendirilmesi konusu incelenecektir. Bu durumda, proses havası kanal giriş ve çıkış bağıl nemlerinin bilinmesi çok önemlidir.



Şekil 1. 3 Proses havasının nemlendirilmesi

Şekil 1.3' te görüldüğü gibi $T_1 = T_2 = sabit$ durumunda kanal giriş ve çıkış bağıl nemleri bilindiğinde psikrometrik diyagram üzerinde özgül nem değerleri bulunabilir. Nemlendirme sistemlerinde kütlenin ve enerjinin korunumu denklemleri uygulanırsa; kütlenin korunumu gereği,

$$\sum \dot{m}_g = \dot{m}_ç \tag{1.11}$$

olmaktadır. Kuru havanın korunumu için eşitlik tekrar yazıldığında,

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} \tag{1.12}$$

olmaktadır. Su kütlesinin korunumu ise,

$$\dot{m}_{a2}\,\omega_2 = \dot{m}_{a1}\,\omega_1 + \dot{m}_{su} \tag{1.13}$$

şeklinde ifade edilmektedir. (1.13)' te bulunan birim zamanda proses havasına eklenen su miktarı (buharlaşma hızı),

$$\dot{m}_{su} = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) \tag{1.14}$$

ifadesi ile bulunmaktadır. Enerjinin korunumunu yazacak olursak,

$$Q - \cancel{W} = \sum \dot{m}_ç h_ç - \sum \dot{m}_g h_g \tag{1.15}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{a2}\,h_2 - \dot{m}_{a1}\,h_1 + \dot{m}_{su}\,h_{su} \tag{1.16}$$

Proses havası sabit kuru termometre sıcaklığında olduğunda, (1.16) eşitliği (1.17) şeklinde ifade edilecektir.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{su}\,h_{su} \tag{1.17}$$

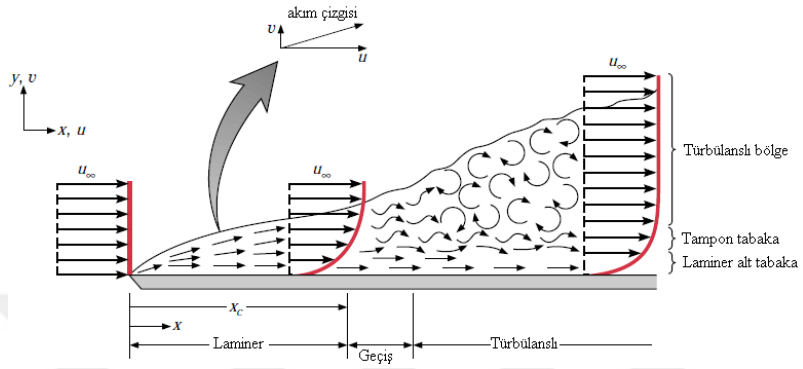
1.1.2 Buharlaşma Prosesinde Taşınımla Isı ve Kütle Geçişi

1.1.2.1 Taşınımla Isı ve Kütle Geçişi

Buharlaşma sıvı yüzeyinden olur ve faz değişimi için gerekli enerji, sıvının buharlaşma gizli ısısıdır. Yüzeye yakın sıvı moleküllerinin çarpışmaları sonunda moleküllerin enerjisi yüzey bağlanma enerjisini yenebilmek için gerekli enerjinin üzerine çıkar ve buharlaşma olur. Taşınım, bir yüzeyle üzerindeki akış arasındaki enerji aktarımını açıklamak için kullanılan bir terimdir. Her ne kadar yayılım bu aktarımı etkilese de üstün olan genellikle akışkan parçacıklarının yığın veya bütünüyle hareket etmesidir.

Herhangi bir taşınım probleminin incelenmesinde ilk adım sınır tabakanın laminer veya türbülanslı olduğunun belirlenmesidir. Yüzey sürtünmesi ve taşınımla ısı geçişi akışın

laminer veya türbülanslı olmasına büyük ölçüde bağlı olmaktadır. Şekil 1.4' te gösterildiği gibi laminer ve türbülanslı akış arasında keskin farklılıklar bulunmaktadır. Bir akış çizgisi boyunca akışkan hareketi x ve y yönlerinde hız bileşenleri ile tanımlanabilir. v hız bileşeni yüzeye dik yöndeki bileşendir ve bu bileşen sınır tabakada momentum, enerji ve kütle geçişine önemli katkıda bulunmaktadır [5].



Şekil 1. 4 Bir düz levha üzerinde hidrodinamik sınır tabakanın gelişimi, Incropera [5]

Sınır tabaka hesaplamalarında laminerden türbülanslı akışa geçişin, bir x_c noktasında başladığı varsayılır. Bu nokta Reynolds sayısı olarak adlandırılan bir boyutsuz değişkenin aldığı değerle belirlenir.

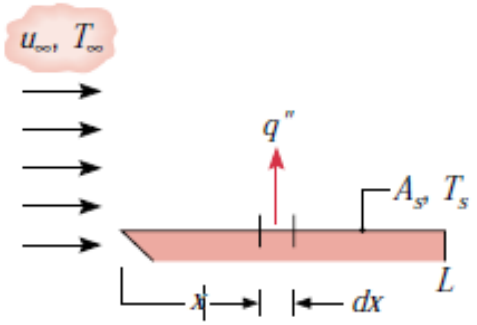
$$\mathrm{Re}_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} \tag{1.18}$$

Burada karakteristik uzunluk x, giriş ucundan uzaklıktır. Sınır tabaka hesaplarında kritik Reynolds sayısı olarak genellikle,

$$\mathrm{Re}_{x,c} = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} = 5\times 10^5 \tag{1.19}$$

alınmaktadır.

Şekil 1.5' teki akış ele alındığında, V hızında ve T_∞ sıcaklığında bir akışkanın yüzey alanı A_s olan düz bir yüzey üzerinden akmakta olduğu görülmektedir. Yüzey sıcaklığı T_s ile ifade edildiğinde $T_s \neq T_\infty$ ise taşınımla ısı geçişi olacaktır. Yerel ısı akısı (1.20)' deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 1. 5 Düz plakada ısı geçişi, Incropera [5]

$$q'' = h\left(T_s - T_\infty\right) \tag{1.20}$$

(1.20)' de ifade edilen h yerel taşınım katsayısıdır. Yüzey üzerinde akış koşullarının noktadan noktaya değişmesi nedeniyle, yüzey boyunca q'' ve h değişecektir. Toplam ısı geçişi q, yerel ısı akısının bütün yüzey üzerinde integrasyonuyla elde edilmektedir.

$$q = \int_{A_s} q'' dA_s \tag{1.21}$$

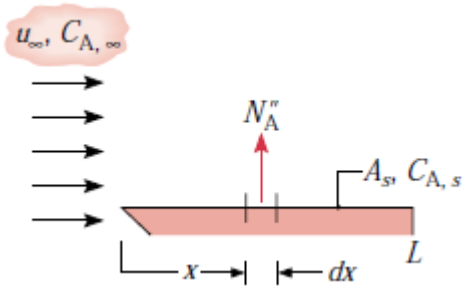
$$q = \left(T_s - T_\infty\right) \int_{A_s} h dA_s \tag{1.22}$$

Tüm yüzey için ortalama ısı taşınım katsayısı, $\bar{h}$ tanımlanırsa, toplam ısı geçişi aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$q = \bar{h} A_s \left(T_s - T_\infty\right) \tag{1.23}$$

Taşınımla ısı geçişi ile ilgili sonuçlar taşınımla kütle geçişi için de elde edilebilir. Eğer içindeki A maddesinin mol derişikliği $C_{A,\infty}$ olan bir akışkan düz bir yüzey üzerinden akıyorsa ve yüzey üzerindeki A maddesinin derişikliği $C_{A,s} \neq C_{A,\infty}$ ise, taşınımla kütle geçişi olacaktır. Söz konusu olan kütle geçişinin hangi hızla gerçekleştiği olmaktadır. Isı geçişinde bu hız taşınım katsayısı ile belirlenir. Burada da A maddesinin molar akısı, kütle geçiş katsayısı ve yüzey ile ortam arasındaki derişiklik farkı ile gösterilebilir. Şekil 1.6' da görüldüğü üzere, A maddesinin molar akısı N_A'' (kmol/s.m^2) eşitlik (1.24) ile ifade edilebilmektedir.

$$N_A'' = h_m \left(C_{A,s} - C_{A,\infty}\right) \tag{1.24}$$



Şekil 1. 6 Düz plakada kütle geçişi, Incropera [5]

(1.24) eşitliği h_m (m/s) taşınımla kütle geçiş katsayısını simgelerken, mol derişiklikleri $C_{A,s}$ ve $C_{A,\infty}$ (kmol/m^3) birimindedir. Tüm yüzey için ortalama kütle taşınım katsayısı, $\overline{h_m}$ tanımlanırsa, toplam kütle geçişi N_A (kmol/s) aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$N_A = \overline{h_m} A_s \left(C_{A,s} - C_{A,\infty} \right) \tag{1.25}$$

Kütle geçişi ayrıca kütlesel akı, n''_A (kg/s.m^2) veya kütlesel debi, n_A (kg/s) olarak da yazılabilmektedir. Bu büyüklükler (1.24) ve (1.25) eşitliklerinin her iki yanını sırasıyla A maddesinin mol kütlesi M_A (kg/kmol) ile çarparak belirlenebilir. Burada ρ_A (kg/m^3) biriminde A maddesinin kütlesel yoğunluğudur.

$$n''_A = h_m \left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty} \right) \tag{1.26}$$

$$n_A = \overline{h_m} A_s \left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty} \right) \tag{1.27}$$

Taşınımla kütle geçişini hesaplamak için $C_{A,s}$ ve $\rho_{A,s}$ değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bilgi gaz ve sıvı veya katı faz arasındaki yüzeyde termodinamik dengenin varlığını gözönüne alarak sağlanmaktadır. Bu durumda, serbest yüzeyde buhar sıcaklığı, T_s yüzey sıcaklığına eşit olur. Ayrıca buhar doymuş haldedir ve T_s' ten yola çıkarak (örneğin su için) doymuş suyun termofiziksel özellikleri tablodan okunabilir.

Yüzeyde buharın mol derişikliği mükemmel gaz denklemi ile hassas bir biçimde bulunabilir (1.28). Burada R üniversal gaz sabiti (8,31447 kPa.m^3/kmol.K), P_{sat} ise T_s sıcaklığındaki doymuş buharın basıncıdır (kPa).

$$C_{A,s} = \frac{P_{sat}(T_s)}{RT_s} \tag{1.28}$$

(1.29), üniversal gaz sabiti ile buharın özgül gaz sabiti arasındaki ilişkiyi göstermektedir. R_v ile gösterilen buharın özgül gaz sabitidir ve 0,4615 kPa.m^3/kg.K değerini almaktadır. M_A molar kütleyi temsil ederken su buharının molar kütlesi 18,015 kg/kmol değerindedir.

$$R_v = \frac{R}{M_A} \tag{1.29}$$

$$C_{A,s} = \frac{P_{sat}(T_s)}{R_v M_A T_s} \tag{1.30}$$

Molar derişim ifadesi özgül gaz sabiti cinsinden ifade edildiğinde (1.30) eşitliği elde edilmektedir. Ek olarak, buharın kütlesel yoğunluğu ile molar derişikliği arasında ilişkinin $\rho_A = M_A C_A$ olduğu bilinmektedir. Bu durumda, (1.30) eşitliğinde verilen molar derişiklik ifadesinin yeniden düzenlenmiş hali olan kütlesel yoğunluk eşitliği (1.31)' de gösterilmektedir.

$$\rho_{A,s} = \frac{P_{sat}(T_s)}{R_v T_s} \tag{1.31}$$

T_s yüzey sıcaklığında doymuş su tablosundan su buharı doyma basıncı değerini okumamız gerekir. Ayrıca, yüzeyin üzerindeki gaz ortamında su buharının kütlesel yoğunluğu bulmak için (1.7)' deki havanın bağıl nem ifadesinden yola çıkarak T_∞ sıcaklığında su buharı için doymuş su tablosundan doyma basıncı değeri alınır. $P_v = \phi P_g$ eşitliği kullanılarak yüzey üzerindeki ortamda su buharının kısmi basıncı bulunabilir.

Böylelikle, (1.27) eşitliğindeki yüzey ve ortamdaki su buharı kütlesel yoğunlukları bulunabilmektedir.

Yüzey ve hava ortamındaki düzenlenmiş kütlesel yoğunluk ifadeleri (1.31) $n_A = \overline{h_m} A_s \left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty} \right)$ eşitliğinde yerine konulup gerekli düzenlemeler yapıldığında, (1.32)' deki buharlaşma hızını veren genel bir ifade ortaya çıkmaktadır.

$$n_A = \frac{\overline{h_m} A_s}{R_v} \left(\frac{P_{v,s}}{T_s} - \frac{P_{v,\infty}}{T_\infty} \right) \tag{1.32}$$

Buharlaşmanın fiziksel mekanizması gereği, yüzey ve ortam arasındaki su buharı kısmi basınç farklarının buharlaşma hızında önemli rol oynayacağı açıkça görülmektedir. Toplam ısı-kütle geçişi herhangi bir taşınım probleminde büyük önem taşımaktadır. Bu bakımdan, taşınım katsayılarının hesaplanması taşınım probleminin özünü oluşturmaktadır.

Taşınım katsayısı yoğunluk, viskozite, ısıl iletkenlik ve özgül ısı gibi akışkan özelliklerine ayrıca yüzey geometrisi ve akış koşullarına bağlıdır. Bağımsız değişkenlerin çokluğu taşınımla ısı-kütle geçişinin yüzey üzerinde gelişen sınır tabakalara bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 1.1' de ısı ve kütle geçişinde sıkça rastladığımız yüzey üzerinde gelişen sınır tabakalarda boyutsuzlaştırılmış sayılar görülmektedir.

Çizelge 1. 1 Isı ve kütle geçişinde kullanılan boyutsuz sayılar

Boyutsuz sayı	Tanımı	Fiziksel anlamı
Reynolds sayısı (Re)	$\frac{VL}{\nu}$	Atalet ve sürtünme kuvvetleri oranı
Prandtl sayısı (Pr)	$\frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$	Momentum ve ısıl yayınım katsayıları oranı
Nusselt sayısı (Nu)	$\frac{hL}{k}$	Yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanı
Schmidt sayısı (Sc)	$\frac{\nu}{D_{AB}}$	Momentum ve kütle yayınım katsayıları oranı
Sherwood sayısı (Sh)	$\frac{h_m L}{D_{AB}}$	Yüzeydeki boyutsuz derişiklik gradyanı
Lewis sayısı (Le)	$\frac{\alpha}{D_{AB}}$	Isı ve kütle yayınım katsayıları oranı

1.1.2.2 Isı ve Kütle Geçişi Benzeşimi

İki veya daha fazla fiziksel olgu aynı biçimdeki boyutsuz eşitliklerle gösterilebiliyorsa, bu olgular arasında benzeşim olduğu söylenebilir. Bu benzeşimin bir sonucu olarak, ısıl sınır tabaka davranışını belirleyen boyutsuz ilişkiler, derişiklik sınır tabakasının davranışını da etkilemektedir. Bu sebeple sınır tabaka sıcaklık ve derişiklik profilleri aynı fonksiyonel biçimde olmalıdır [5].

Zorlanmış laminer dış akış koşullarında ısıl sınır tabakadaki Nusselt boyutsuz sayısı korelasyonu derişiklik sınır tabakasındaki Sherwood boyutsuz sayısı için kullanılabilir. Yalnızca Nusselt sayısı bulunurken Prandtl sayısı fonksiyona katılırken, Sherwood sayısı için Schmidt sayısı kullanılmaktadır. Pr ve Sc sayıları 0,6’ dan büyük olduğunda (1.34) ve (1.36) eşitlikleri kullanılabilir.

$$\overline{Nu_x} = f\left(\mathrm{Re}_x, \mathrm{Pr}\right) \tag{1.33}$$

$$\overline{Nu_x} = \frac{\overline{h_x} x}{k} = 0,664\,\mathrm{Re}_x^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \qquad \mathrm{Pr} > 0,6 \tag{1.34}$$

$$\overline{Sh_x} = f\left(\mathrm{Re}_x, Sc\right) \tag{1.35}$$

$$\overline{Sh_x} = \frac{\overline{h_{m,x}} x}{D_{AB}} = 0,664\,\mathrm{Re}_x^{1/2}\,Sc^{1/3} \qquad Sc > 0,6 \tag{1.36}$$

Akış, tüm levha üzerinde laminer ise, x indisi yerine L konulabilir.

Benzeşim ayrıca iki taşınım katsayısını doğrudan ilişkilendirmek için de kullanılabilir. Böylece katsayılardan biri bilindiği zaman (örneğin h_m) diğer katsayı (1.37) ile hesaplanabilir. Aynı ilişki ortalama katsayılar $\overline{h}$ ve $\overline{h_m}$ için de geçerlidir, bunun yanında laminer akış için olduğu gibi türbülanslı akış için de kullanılabilir. Uygulamaların birçoğunda n değeri 1/3 alınabilir.

$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^n} = \rho c_p Le^{1-n} \tag{1.37}$$

Taşınımla ısı transfer katsayını bildiğimiz bir su buharlaşması probleminde (1.37) kullanılırsa buharlaşma hızı (1.38)' deki gibi ifade edilebilir.

$$n_A = \frac{\overline{h} A_s}{\rho c_p Le^{2/3} R_v}\left(\frac{P_{v,s}}{T_s} - \frac{P_{v,\infty}}{T_\infty}\right) \tag{1.38}$$

Bahsedilen ısı ve kütle geçiş benzeşimi, Chilton-Colburn benzeşimi olarak da bilinmektedir ($\mathrm{Pr} \neq Sc \neq 1$).

1.1.3 Serbest Su Yüzeyinden Buharlaşmanın İncelendiği Çalışmalar

Yatay bir yüzey boyunca ortam havasına su buharı transferini kapsayan buharlaşma prosesi konusunda kaynak taraması yapıldığında serbest su yüzeyinden gerçekleşen buharlaşmanın yoğun olarak çalışıldığı tespit edilmiştir. Tezde, literatür verilerinin sunuşunda gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma çalışmaları öncesi bu konu hakkındaki veriler irdelenmiştir.

Literatürde bu durumu esas alan birçok deneysel korelasyon ve teorik tanımlama yer almaktadır. Isı ve kütle geçiş benzeşimi temelinde incelenen suyun ortam havasına buharlaşması, su buharının hava ve su tarafındaki kısmı basınç farkına dayanmaktadır. (1.39) ile gösterilen ifade, bu mekanizmayı temsil etmektedir. $\dot{m}_{buh}$ buharlaşma oranı (kg/m^{2}h), P_w ve P_a sırasıyla su ve hava tarafı kısmi buhar basıncı (Pa), ϕ ortam havası bağıl nemi (%), h_m buharlaşma kütle transfer katsayısı (m/h) ve h_{fg} buharlaşma gizli ısısıdır (kJ/kg). Buharlaşmada kütle transfer katsayısı h_m (m/h), zorlanmış taşınımlı hava hızına bağlı bir korelasyon olarak değerlendirilebilir (1.40).

$$\dot{m}_{buh} = \frac{h_m (P_w - \phi P_a)}{h_{fg}} \tag{1.39}$$

$$h_m = A + BV \tag{1.40}$$

Literatürde sıkça karşılaşılan buharlaşma oranı ile ilgili korelasyonun genel formu şu şekildedir:

$$\dot{m}_{buh} = (A + BV)(P_w - \phi P_a) / h_{fg} \tag{1.41}$$

Carrier [6] tarafından 1918 yılında yapılan deneysel çalışma ve elde edilen korelasyon en çok bilinen ve kullanılan ifadedir. Yüzme havuzundan buharlaşma incelemeleri ve ısıl yüklerin belirlenmesi için yapılan testlerde serbest su yüzeyi üzerinden ortam havası üflenmiştir. 0 – 0,7 m/s arasında değişen hava hızlarının test edildiği çalışmada su buharının havaya kütle transfer akısı (1.42) eşitliği ile belirlenebilir; fakat bu ifade tahmin edilenden fazla buharlaşma olduğunu göstermiştir.

$$E = \frac{(0,089 + 0,0782V)(P_w - \phi P_a)}{h_{fg}} \tag{1.42}$$

ASHRAE [7] ısıtma, soğutma ve havalandırma uygulamaları kaynaklarında, (1.42) eşitliğine 0,5 etkinlik katsayısı eklenip hava hızlarının 0,05 – 0,15 m/s olduğu durumda yüzme havuzlarından buharlaşmayla ilgili daha basit ve doğru bir korelasyon yayınlanmıştır.

$$E = 0,000144(P_w - P_a) \quad (1.43)$$

Smith vd. [8], 1994 yılında yaptıkları çalışmada, ASHRAE' nin yüzme havuzlarında buharlaşma oranının bulunmasıyla ile ilgili yayınladığı Carrier deneysel korelasyonunun performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Alttan ısıtılan ve serbest su yüzey sıcaklığı 29 °C' de tutulan bu deneysel çalışmada Carrier' in korelasyonu ile yüksek oranda uyum sağlanmıştır. Hava hızına bağlı kütle transfer katsayısı fonksiyonuna göre elde ettikleri yeni A ve B katsayılarının verildiği korelasyonu (1.44)' teki gibi elde etmişlerdir.

$$\dot{m}_{buh} = (0,0638 + 0,0669V)(P_w - \phi P_a) / h_{fg} \quad (1.44)$$

Sodha vd. [9], Ali [10] yaptıkları çalışmalarında sıcak suyun depolanması konusunda güneş kollektörlerinin kullanıldığı sistemlerde buharlaşmayı incelemişlerdir. Serbest su yüzeyinden buharlaşma akısını belirlemek için esas aldıkları ifade, konunun öncül isimlerinden Carrier [6]' in korelasyonu olmuştur. Bu korelasyonda havanın bağıl neminin değiştiği durumlar incelenmezken; Sodha ve Ali [9, 10], bağıl nem değişimini dikkate almışlardır. Çünkü, ortam havası neminin değişmesi içerdiği su buharı kısmi basıncını ve buna bağlı olarak buharlaşma akısını değiştirecektir.

Himus ve Hinchley [11], küçük su kaplarından buharlaşmayı inceledikleri çalışmalarında rüzgar tüneli yardımı ile test kabına doğru ortam havasını yönlendirmişlerdir. Deneyler boyunca su sıcaklığı, hava sıcaklığı, havanın bağıl nem değerleri ile hava hızı sabit tutulmuştur. Isı-kütle transfer yüzey alanının 0,02 ve 0,07 m^2 arasında değiştirildiği kaplarda buharlaşma akısını veren korelasyonu aşağıdaki gibi elde etmişlerdir.

$$J_w = 1 \times 10^{-9}(64.58 + 28.06V_a)(P_w - \phi P_a) \quad (1.45)$$

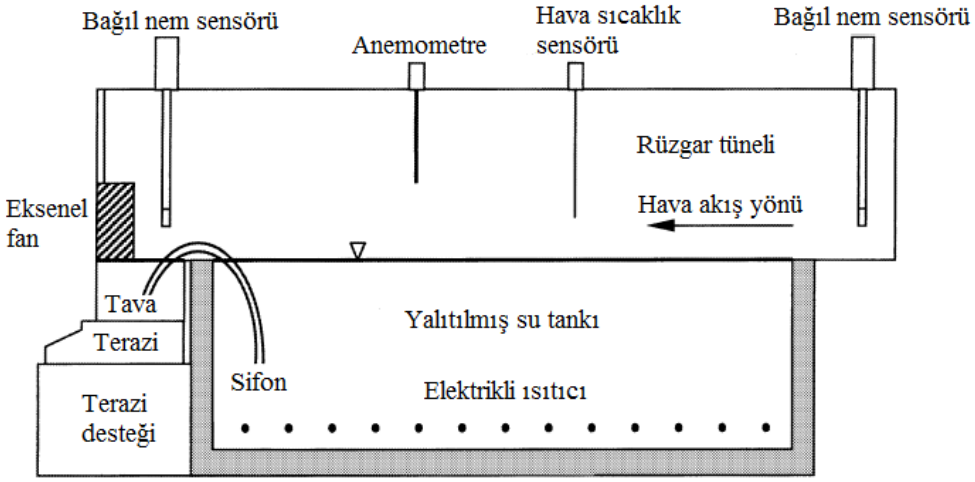
Rowher [12], çalışmasında Himus ve Hinchley [11]' in izlediği deneysel metotu izlemiş ve hava ve su tarafında termofiziksel özellikler ile hava hızını sabit almıştır. Diğer çalışmadan farkı, su kabının yüzeysel boyutları ile ilgilidir. Rowher, daha büyük buharlaşma yüzey alanlarında çalışmıştır (0,84 m^2). Bu durumda, Rowher' in önerdiği korelasyon (1.46) ile ifade edilmiştir.

$$J_w = 1 \times 10^{-9}(34.72 + 20.97V_a)(P_w - \phi P_a) \quad (1.46)$$

Pauken [13], 1999 yılında yaptığı çalışmasında düşük hızlı rüzgar tünelinde alttan ısıtma uygulanan suyun havaya buharlaşmasını konu almıştır. Türbülanslı zorlanmış ve doğal taşınımı birlikte incelemiştir. ($0,1 < Gr_m/Re^2 < 10$). Çalışmada, farklı hava hızları ve farklı hava-su sıcaklık farklarında evaporasyon oranı belirlenmiştir.

Çalışma için oluşturulan deney düzeneği şematik görünümü Şekil 1.7' de görülmektedir. Eksenel fan kullanılan bir rüzgar tüneli ile testlerde uygulanan hava akış hızları 0,33 ile 1,45 m/s arasında değişmiştir. Isıl yalıtım uygulanmış su tankı 30 cm derinliğe sahip olup içerisinde PID kontrollü elektrikli ısıtıcı bulunmaktadır. Bu ısıtıcı sayesinde su sıcaklıkları 25°C ve 50°C arasında 2,5°C artımlarla sağlanmıştır. Buharlaşmayla su kaybı küçük bir buharlaşma tavası kullanılarak altındaki elektronik tartı yardımıyla belirlenmiştir. Veri toplama sistemi aracılığıyla testler boyunca her on dakikada bir tartının okuduğu değerler bir bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Tünelin hava giriş ve çıkışında ± %2 doğruluğu olan bağıl nem sensörleri kullanılmıştır. Hava sıcaklık değerleri ise buharlaşma tankının hemen üzerinde konumlandırılan, kalibre edilmiş, hassasiyeti ± 0,2°C olan T-tipi ısıl çiftler ile ölçülmüştür. Farklı hava akış hız değerlerinin belirlenmesi için kalibre edilmiş ± %10' dan az sapma gösteren termal anemometre kullanılmıştır.



Şekil 1. 7 Buharlaşma deney düzeneği şematik gösterimi, Pauken [13]

Havanın tünele giriş sıcaklığı 20°C, bağıl nemi % 50 olarak sabitlenmiştir. Şartlandırılmış kabin içi sıcaklık ve nem değerleri bilgisayar ortamında izlenmiştir.

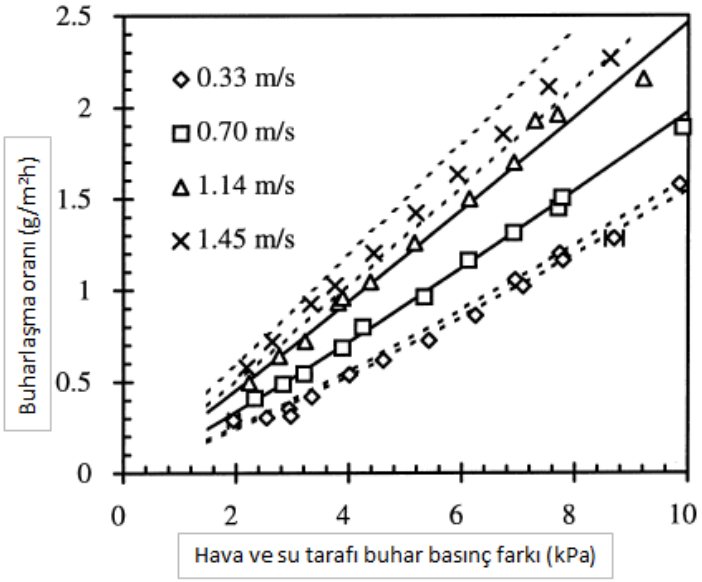
Ortam sıcaklık ve bağıl nem şartları rejim halinde olduğunda buharlaşma tankı tamamen su ile doldurulmuştur. Testte kullanılacak hava hızı ayarlandıktan sonra deney başlamış ve 24 saat sürmüştür. Veri toplama sistemi ile hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi ve su sıcaklığı bilgisayar ortamından takip edilmiştir.

Pauken, deney sonuçları değerlendirmesinde regresyon analizini kullanmıştır. (1.47)' de görüldüğü gibi, buharlaşma oranının iki temel unsura bağlı olduğunu belirtmiştir. Bunlardan birincisi hava akış hızı, ikincisi ise hava ve su tarafındaki kısmi buhar basınç farkıdır.

$$J = a(P_w - \phi P_a)^b$$

$$a = 74 + 97.97V + 24,91V^2 \quad \text{ve} \quad b = 1.22 - 0.19V + 0.038V^2 \qquad (1.47)$$

(1.47) eşitliğinde J buharlaşma oranı/akısı (g/m^2h), V hava hızı (m/s), P_w ve P_a sırasıyla su ve hava tarafı kısmi buhar basıncıdır (kPa).

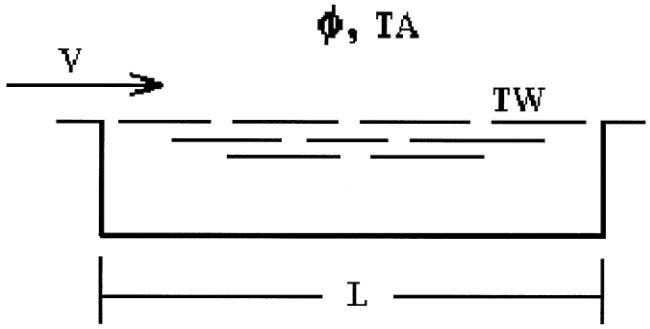


Şekil 1. 8 Dört farklı hava akış hızı için buharlaşma oranı değişimi, Pauken [13]

Farklı hava akış hızları ve buhar basınç farklarında buharlaşma oranının değişimi Şekil 1.8' de görülmektedir. Kesik çizgilerle belirtilen en yüksek ve en düşük hava hızlarında hata çizgileridir. Grafikten açıkça anlaşılacağı gibi, hava hızının artması buharlaşmayı artırmıştır. Buhar basınç farkının artmasıyla da parabolik bir artış görülmüştür.

Sartori [14], hacimce büyük su kütlelerinden ve küçük yüzey alanlı su kaplarından buharlaşma konusunda yapılmış deneysel çalışmaları ve elde edilen korelasyonları derlemiştir. Doğal ve zorlanmış taşınımlı buharlaşma prosesi konusunda çalışmalar yayınlayan yazarların deneysel korelasyonlarını birbirleri ile karşılaştırarak aralarındaki uyumu incelemiştir. (1.41) eşitliğini çalışmalarında baz alan yazarların deneysel şartları gereği elde ettikleri korelasyon sabitlerinin değiştiğini gözlemlemiştir.

Sartori' ye göre serbest su yüzeyinden buharlaşmayı ana parametreleriyle temsil eden çizim Şekil 1.9' da gösterilmiştir. Önceleri yapılan birçok çalışmada havanın neme doygun olduğu (%100) durumlar incelenirken, Sartori düşük bağıl nemli ortam havasında kısmi buhar basınç farklarının buharlaşmada yarattığı etkinin önemine değinmiştir.



Şekil 1. 9 Ana parametrelerin gösterildiği serbest su yüzeyinden buharlaşmayı temsil eden çizim, Sartori [14]

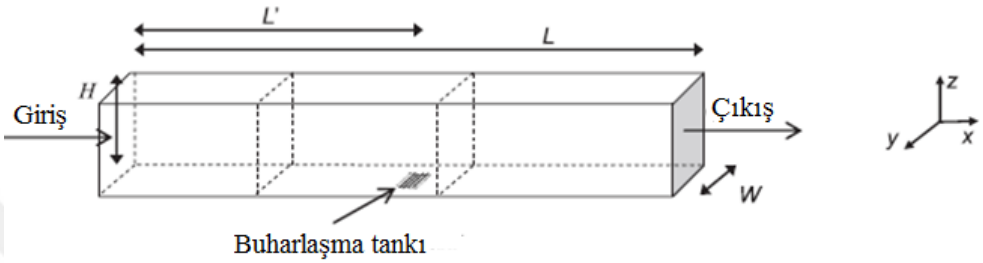
İlgili yazar, yaptığı çalışmasında Sherwood ve Schmidt boyutsuz sayıları temelinde serbest su yüzeyinde rüzgar hızı ölçümlerine göre çevresel koşullar altında buharlaşma mekanizmasını incelemiştir. Türbülanslı akış koşullarında su yüzeyindeki dalgalanmaların en aza indirildiği korelasyon (1.48) eşitliği ile verilmiştir.

$$\dot{m} = (0.00407 V^{0.8} L^{-0.2} - 0.01107 L^{-1})(P_w - P_d) / P \qquad (1.48)$$

(1.48)' de dikkat çeken durum L karakteristik uzunluğunun türbülanslı akış durumunda buharlaşmaya etkisinin olduğudur. Bu ifadenin kütlesel yoğunluk farkı açısından belirtildiği korelasyon (1.49)' da yer almaktadır.

$$\dot{m} = (0.00562 V^{0.8} L^{-0.2} - 0.01529 L^{-1})(\rho_w - \rho_d) \qquad (1.49)$$

Raimundo vd. [15] zorlanmış taşınımlı hava akışı etkisiyle ısıtılan su yüzeyinden buharlaşmayı incelemişlerdir. Çalışmada Reynolds sayısı değerleri 2473 ile 49503 arasında değişmektedir. Düşük hızlı hava akışları olan rüzgar tüneli ve buharlaşma tankı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmak amacıyla 3D-CFD kodu yazılarak nümerik analizler irdelenmiştir. Bunun yanında, literatür verileri ile deneysel veriler de karşılaştırılmıştır. Çalışmada, hava hızının, hava-su sıcaklık farkının ve hava bağıl neminin buharlaşma oranına etkisi incelenmiştir.



L (m)	L' (m)	H (m)	W (m)
3.30	1.80	0.40	0.40

Şekil 1. 10 Deney düzeneğinin şematik görünümü, Raimundo [15]

Şekil 1.10' da zorlanmış taşınım etkisi ile serbest su yüzeyinden buharlaşmayı değerlendirmek amacıyla oluşturulan deney düzeneğinin şematik görünüşü yer almaktadır. Rüzgar tüneli kesit alanı 0,40 x 0,40 m^2 (H x W) ve uzunluğu 3,30 m (L) dir. Bunun yanında tünel içi maksimum hız ise 0,8 m/s' dir. Buharlaşma tankı, tünelin giriş bölümünden 1,80 m uzaklıkta konumlandırılmış ısıl yalıtımlı çelik bir kaptır. Tank içi su sıcaklığı, elektrikli ısıtıcı ve kontrol sistemi yardımıyla belirli sıcaklıklarda tutulabilmektedir. Hava akış bozukluklarını önlemek amacıyla serbest su yüzeyi rüzgar tüneli zeminine denk getirilmiştir. Bunun yanında, tünel duvarlarının buharlaşma prosesinde hata etkisini minimize etmek amacıyla buharlaşma tankının simetri ekseni ile tünelin simetri ekseni çakışıktır.

Su kütlesini ölçmek için Sartorius GW6202 model 6,2 kg ölçme kapasiteli, ölçüm aralığı 10^{-5}, yinelenebilirliği < ± 10^{-5} ve maksimum hatası ± 2 x 10^{-5} olan (Avrupa doğruluk sınıfı E2) tartı kullanılmıştır. Hava ve su sıcaklıkları beş adet kalibre edilmiş K-tipi termoeleman ile ölçülmüştür. Bunlardan dördü tünel ve tankın simetri eksenine yerleştirilmiştir. Bir termoeleman hava, tank bölgesine girmeden hemen önce tünel

yüksekliğinde orta noktaya, iki tanesi serbest yüzeye yakın olmak koşuluyla suyun içine, diğeri ise tanktaki suyun yarı yüksekliğinin olduğu noktaya yerleştirilmiştir. Beşinci termokupl belirli bir noktaya sabitlenmemiş, olası uyumsuzlukları değerlendirmek için kullanılmıştır. Deneyler üç saat sürmekte ve her dakika tanktaki su kütlesi ölçülüp sıcaklık ölçümleri kayıt altına alınmaktadır. Birbirini takip eden iki veri arasında su kütlesinin farkı bu süre sırasında buharlaşan suyun kütlesine karşılık gelir.

Havanın bağıl nemi sadece tünelin giriş bölümünde taşınabilir Hanna HI9065 model higrometre (nemölçer) ile her testin başında ve sonunda ölçülmüştür. Bu nem ölçerin ölçüm aralığı %5 – %95, kararlılığı 0,001 ve hassasiyeti ± 2% dir. Düzenekte ek olarak bir nem verme veya nem alma cihazı bulunmamakta olup testlerin yapıldığı çevre koşullarındaki bağıl nem değerleri iki ölçümün ortalaması olarak alınmıştır.

Buharlaşma tankı üzerinde hava hızı profilleri, sabit sıcaklıkta anemometre ve sensör yardımıyla ölçülüp oluşturulmuştur. Hız ölçüm cihazının doğruluğu % ±2, kararlılığı 0,001 m/s' dir. Akış alanı karakteristiğini belirlemek için buharlaşma tankının başı, ortası ve sonu olmak üzere simetri eksenine dik üç profil çıkarılmıştır.

Deneysel çalışmalar boyunca 28 adet test yapılmıştır. Bu testlerde, serbest yüzey su sıcaklığı 300,8 – 319,8 K (27,6 – 46,6 °C), hava ortalama hızı (V_a) 0,101 – 0,697 m/s, ortalama hava giriş sıcaklığı 291,6 – 297,7 K (18,4 – 24,5 °C), havanın bağıl nemi (RH_a) 0,510 ve 0,743 arasında değişmektedir. $\Delta P = P_w - P_a$ şeklinde ifade edilen hava ve su tarafı kısmi buhar basıncı farkı ise 1850 ile 8751 Pa arasında değişmektedir. Deneysel çalışmalarda boyutsuz Reynolds sayısı değerleri 2475 ile 17326 arasında değişmekte olup $Re < 5x10^5$ olduğundan laminer akış koşulları geçerlidir.

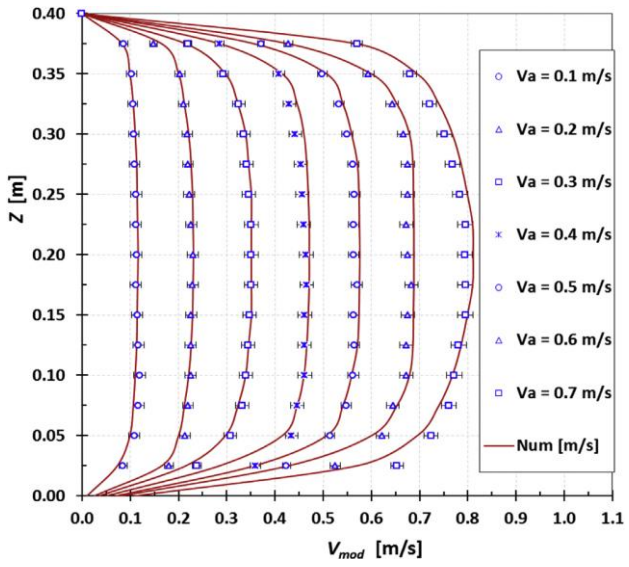
Nümerik çalışmalar iki aşama halinde yapılmıştır. İlk aşamada, deneysel çalışılan 28 farklı koşul test edilmiş ve nümerik metot doğrulanmıştır. İkinci aşamada ise tünel hava giriş hızları artırılmış 0,1 – 2,0 m/s aralığı için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu durumda boyutsuz Reynolds sayısı 2475 ie 49503 arasında değişim göstermiştir. Laminer akışlı deneysel çalışmaların yanında nümerik olarak incelenen türbülanslı akış koşulları da değerlendirilmiştir. Nümerik analizlerde su-hava ara yüzeyinde buharlaşma oranını elde etmek için Chieng ve Launder [16]' in önerdiği yüksek Reynolds sayılarında daha doğru, dengeli ve kararlı sonuçlar veren çift katmanlı k-ε türbülans modeli

kullanılmıştır. Çizelge 1.2' de nümerik analizler kapsamında kullanılan taşınımsal özelliklere göre yönetici denklemler görülmektedir.

Çizelge 1. 2 Taşınımsal özelliklere bağlı k-ε türbülans modeli yönetici denklemleri, Raimundo [15]

Transport property	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Mass	1	0	0
Momentum in x direction	u	$\mu_{ef} = \mu + \mu_t$	$-(\partial P/\partial x) + S_u$
Momentum in y direction	v	$\mu_{ef} = \mu + \mu_t$	$-(\partial P/\partial y) + S_v$
Momentum in z direction	w	$\mu_{ef} = \mu + \mu_t$	$-(\partial P/\partial z) + S_w$
Thermal energy	T	$\Gamma_T = \frac{\mu}{\mathrm{Pr}} + \frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}$	S_T
Mass fraction of fluid B	C_B	$\Gamma_T = \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t}$	0
Turbulent kinetic energy	k	$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k - D_k - G_k$
Dissipation rate of k	ε	$\Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$P_\varepsilon - D_\varepsilon - G_\varepsilon$

Dikey eksende momentum denklemleriyle elde edilen ortalama hız değerleri ve deneysel ortalama hız değerleri Şekil 1.11' de sırasıyla kırmızı çizgilerle ve mavi işaretlerle gösterilmiştir.



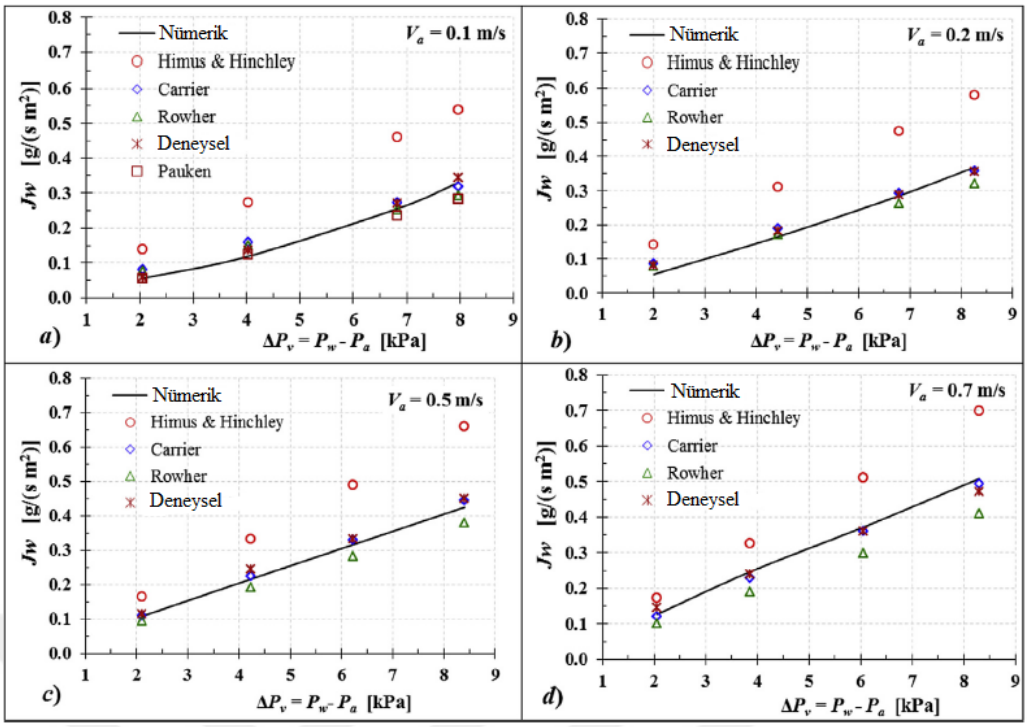
Şekil 1. 11 Dikey eksen boyunca deneysel ve nümerik ortalama hızlar, Raimundo [15]

Çizelge 1. 3 Deneysel ölçümler ve nümerik analizlerin sonuçları ve sapma değerleri, Raimundo [15]

V_a [m/s]	T_a [K]	T_w [K]	P_w - P_a [Pa]	$J_{deneysel}$ [g/ms^2]	$J_{nümerik}$ [g/ms^2]	δ sapma [%]
0,101	293,3	301,9	2051	0,059	0,056	5,3
	294,6	307,9	4026	0,136	0,119	12,6
	293,9	315,3	6835	0,270	0,256	5,2
	293,1	317,7	7968	0,342	0,330	3,7
0,194	295,5	301,3	2007	0,081	0,055	31,6
	293,6	309,1	4429	0,182	0,166	8,8
	294,0	315,2	6786	0,287	0,285	0,7
	295,0	319,0	8265	0,355	0,369	3,9
0,308	295,1	301,1	1850	0,087	0,075	13,2
	294,9	309,8	4201	0,208	0,188	9,6
	295,4	314,2	6076	0,294	0,276	6,4
	295,5	319,3	8341	0,401	0,381	5,0
0,406	295,1	300,8	1976	0,106	0,094	11,0
	295,9	308,2	4141	0,206	0,196	4,7
	295,3	314,2	5910	0,301	0,284	5,5
	297,5	319,4	8412	0,400	0,412	3,0
0,497	296,1	302,5	2105	0,114	0,108	5,1
	294,9	309,9	4238	0,244	0,217	11,4
	297,0	314,9	6226	0,332	0,316	4,9
	291,6	319,3	8405	0,449	0,425	5,5
0,596	294,4	301,7	2147	0,152	0,124	18,9
	296,8	309,7	4240	0,257	0,244	5,1
	294,0	313,7	5767	0,328	0,327	0,3
	296,8	319,8	8751	0,460	0,480	4,5
0,697	296,2	301,5	2059	0,145	0,127	12,2
	295,9	308,7	3866	0,239	0,247	3,5
	297,7	314,7	6061	0,359	0,372	3,5
	296,6	319,1	8295	0,471	0,508	7,8

Farklı hava hızları ve hava-su arayüzeyindeki kısmi buhar basınç farklarında deneysel ölçüm ve nümerik analiz sonuçları Çizelge 1.3' te sunulmuştur. Tabloda son sütunda verilen deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki sapma değerleri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır. %95 güvenilirlikte hesaplanan sapma değerleri %0,3 - %31,6 arasında değişmiştir.

$$\delta = 100 \frac{\left| J_{w,2} - J_{w,1} \right|}{\left| J_{w,1} \right|} [\%] \tag{1.50}$$



Şekil 1. 12 Farklı kısmi buhar basınç farkları ve hava hızlarında deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırılması, Raimundo [15]

Raimundo vd., yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmalarının literatürdeki korelasyonlarla uyumunu incelemişlerdir. Bu kapsamda, Carrier [6], Himus ve Hinchley [11], Rowher [12] ve Pauken [13]' in elde ettikleri korelasyonları kendi test koşulları ile karşılaştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda elde ettikleri korelasyon ortalama sapma δ = %7,5 ve Pearson korelasyon katsayısı r = 0,992 değerinde (1.51)' de ifade edilmiştir. Pearson korelasyon katsayısının formülize edilmiş hali (1.52)' de verilmektedir.

$$J_w = 1\times10^{-9}(37.17+32.19V_a)(P_w-\phi P_a) \tag{1.51}$$

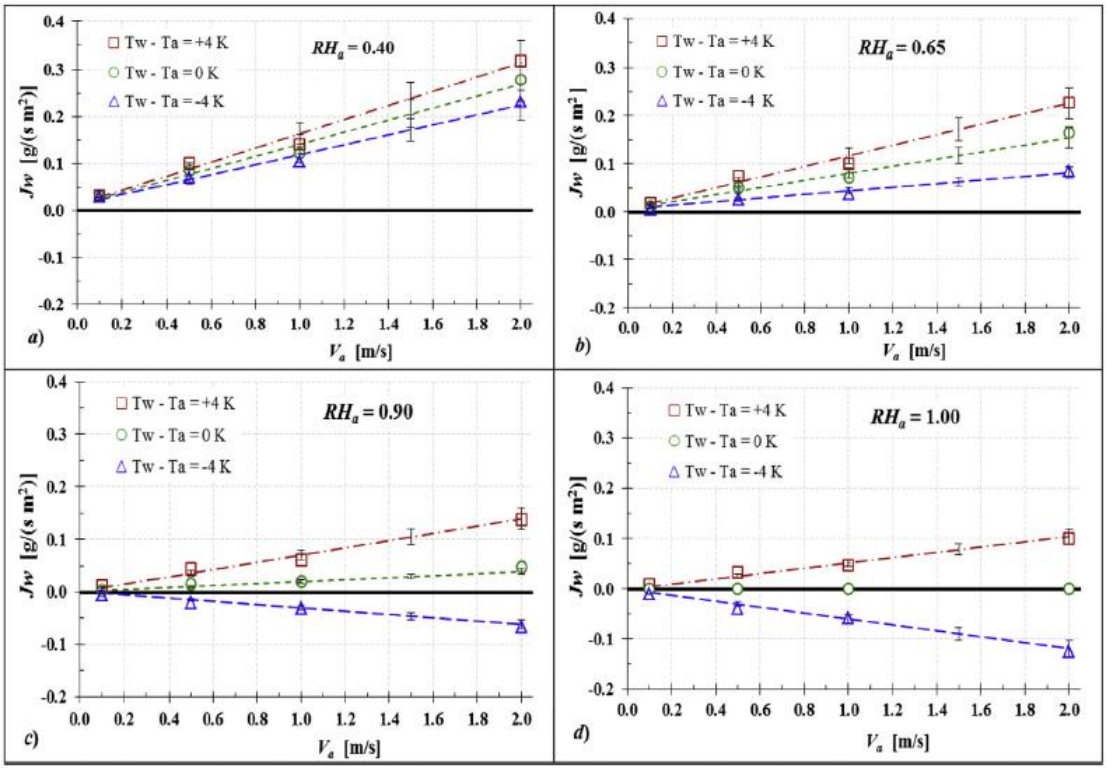
$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[(J_{w,2}-\overline{J}_{w,2})(J_{w,1}-\overline{J}_{w,1})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left[(J_{w,2}-\overline{J}_{w,2})^2\right]\sum_{i=1}^{N}\left[(J_{w,1}-\overline{J}_{w,1})^2\right]}} \tag{1.52}$$

Şekil 1.12' de görüldüğü üzere, çalışmada karşılaştırma yapılması için ele alınan temel korelasyon olan Carrier [6] korelasyonu ile yüksek oranda uyum sağlanmıştır. Carrier korelasyonu ortalama sapma değeri %7,4 Pearson korelasyon katsayısı r = 0,992 çıkmıştır. Himus ve Hinchley [11] dışındaki diğer yazarların korelasyonları ile açıkça

uyum sağlanırken, bu korelasyon sonucunda tahminlerin çok üstünde buharlaşma oranları bulunmuştur.

Çalışmada deneysel tasarım ile hava akış hızı, hava bağıl nemi ve hava-su sıcaklık farklarının fonksiyonu olan buharlaşma oranı; parametrelerin tek etkili, çift etkileşimli ve çok etkileşimli olması durumuna göre farklı bir şekilde de ifade edilmiştir (1.53).

$$J_w = 1\times10^{-6}(22.77 + 215.85V_a - 23.59RH_a - 219.05V_aRH_a + 13.95V_aRH_a\Delta T) \qquad (1.53)$$



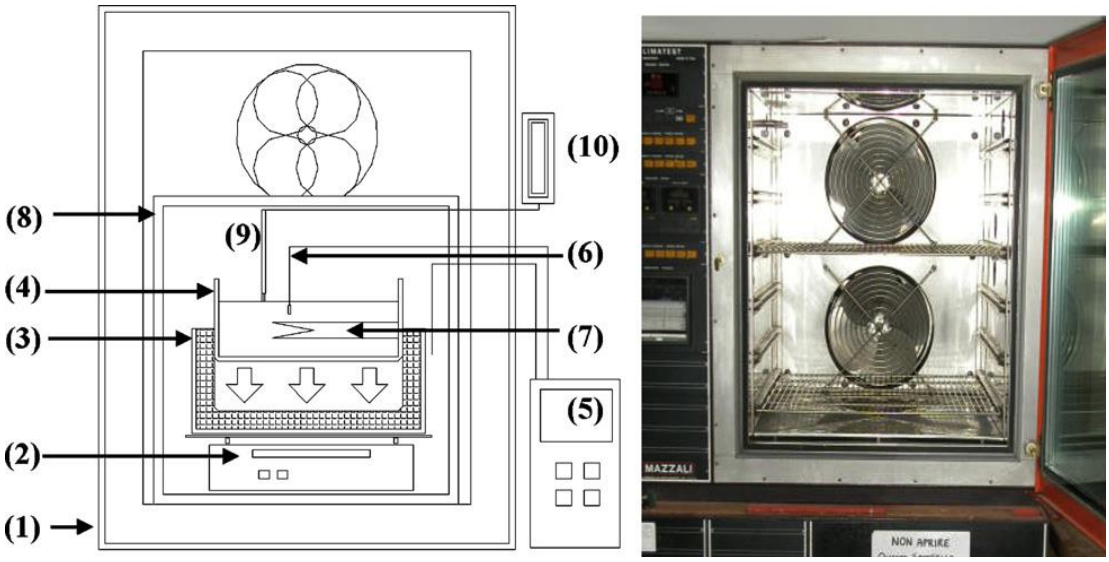
Şekil 1. 13 Hava akış hızı, hava bağıl nemi ve hava-su sıcaklık farklarının fonksiyonu olan buharlaşma oranının farklı koşullarda değerlendirilmesi, Raimundo [15]

Sunulan yeni korelasyon (1.53) ile ilgili farklı bağıl nem koşullarında diğer parametrelerin etkisi Şekil 1.13' te görülmektedir. Bağıl nemin %90 ve hava-su sıcaklık farkı $T_w - T_a = -4K$ olması durumunda buharlaşma yerine havadaki su buharının yoğuştuğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple, buharlaşma prosesi açısından yüksek bağıl nem koşullarından kaçınılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Her durumda hava akış hızının buharlaşma oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. Hava-su sıcaklık farkı pozitif olması, yani suyun ısıtılması durumu diğer sıcaklık farklarına göre en çok buharlaşma görüldüğü durumdur. (1.53) eşitliği ve Şekil 1.13’ ten anlaşılacağı üzere, hava akış hızı ve hava

bağıl neminin ikili etkileşimi buharlaşma oranına en çok etki eden parametre olurken, tekil parametre açısından bakıldığında hava akış hızı tartışmasız en etkili parametre çıkmıştır.

Asdrubali [17]' ye göre yüzme havuzlarında buharlaşma prosesi ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinde yüksek enerji tüketimine sebep olmaktadır. Çalışma kapsamında buharlaşmaya etki eden parametrelerin buharlaşma oranına etkisi incelenip enerji tüketim hesaplamaları yapılmıştır. Çevre koşullarının şartlandırılabildiği bir kabinde yüzme havuzunu temsil edecek model küçük bir su kabından hava sıcaklığı, su sıcaklığı, ortam havasının bağıl nemi ve hava akış hızı parametrelerinin buharlaşmaya etkisi üzerine çalışılmıştır.

Deneysel çalışma boyunca yüzme havuzu ortam koşullarını simüle eden şartlandırılmış oda ve deney tesisatının şematik görünümü Şekil 1.14' te görülmektedir. Düzenek 10 adet ana elemandan oluşmaktadır. (1) numaralı komponent Mazzali model 300 litre iç hacime sahip, 0,7 m x 0,66 m x 0,68 m boyutlarda bir şartlandırılmış kabindir. Bu kabinin sıcaklık aralığı -40 °C – 150 °C olup doğruluğu ± 0,3 °C, bağıl nem aralığı %15 - %98 iken doğruluğu ± %3' tür. Kabinde iki adet merkezkaç fan gerekli hava hızları ve hava sıcaklığını düzenlemek için kullanılmıştır. (2) numarada buharlaşma miktarını ölçen Scaltec 4000 marka 0 – 4 kg ağırlık ölçüm aralığı olan terazi bulunmaktadır. Terazinin hassasiyeti ± 0,01 g, sıcaklık aralığı 0 – 40 °C, nem aralığı % 20 - % 85' tir. (4) numaralı 2,5 litre su hacmi olan buharlaşma kabı, serbest yüzey boyunca ısı değişimlerinden etkilenmemesi için (3) numaralı 0,3 m x 0,3 m x 0,095 m boyutlarındaki içten 5 cm poliüretan malzeme ile yalıtılmış kaba yerleştirilmiştir. (5) numara ile verilen ise Gefran 2000 marka sıcaklık düzenleyicidir. Su sıcaklığını ölçmek için (6) numaralı PT100 marka ± 0,04 °C hassasiyete sahip sıcaklık probu suya daldırılmış ve (5) numaralı komponente bağlanmıştır. Suyu ısıtmak için (7) numaralı ısıtıcı kullanılmıştır. Hız ölçer sensör (9) 0°C – 40°C sıcaklık ve %10 - %95 bağıl nem aralığında çalışmaktadır. Serbest su yüzeyinin 10 mm üstünden hız ölçümü alan sensörün hassasiyeti ± 0,01 m/s olup ölçüm aralığı 0 – 1 m/s' dir. (8) numaralı tahta kutu şartlandırılmış odanın içinde olup deney sistemi bu kutunun içindedir. (10) numaralı cihaz hava akış hızı sinyallerini veren bir gösterge ekranıdır.



Şekil 1. 14 Buharlaşma testleri için kullanılan şatlandırılmış kabin ve deney düzeneği şematik görünümü, Asdrubali [17]

Çalışmada yapılan her testte Asdrubali, 2500 gram saf sudan buharlaşmayı incelemiştir. Çizelge 1.4' te belirtidiği gibi çalışmada kullanılan parametreler; su sıcaklığı (20°C – 30°C), hava sıcaklığı (22°C – 32°C) , havanın bağıl nemi (%50 - %80) ve hava akış hızıdır (0,05 – 0,17 m/s). Parametre değerleri, ASHRAE [18]' nin yüzme havuzları ortam koşulları için önerdiği şartlardır. Veri toplama ünitesinde su sıcaklığı ve buharlaşan su miktarı her on dakikada bir ölçülmüştür. Deneyler, 1 atm hava basıncı olan koşullarda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. 4 Buharlaşmaya etki eden parametre değerleri, Asdrubali [17]

T_w (°C)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ta (°C)	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
ϕ (%)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
V_a (m/s)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

Çalışmanın ana amacı, farklı parametrelerin etkisinde buharlaşma oranı ve buharlaşma akısını elde etmenin yanı sıra kütle taşınım katsayısını bulmaktır. Asdrubali çalışmasında taşınım katsayısını bulmak için Treybal [19]' ın önerdiği ifadeyi kullanmıştır. (1.54)' ten hesaplanan kütle taşınım katsayısı ile ilgili değerler V = 0,05 m/s için Çizelge 1.5' te verilmiştir.

$$G_w = KA\left[P_w(T_w) - \phi P_w(T_a)\right] \tag{1.54}$$

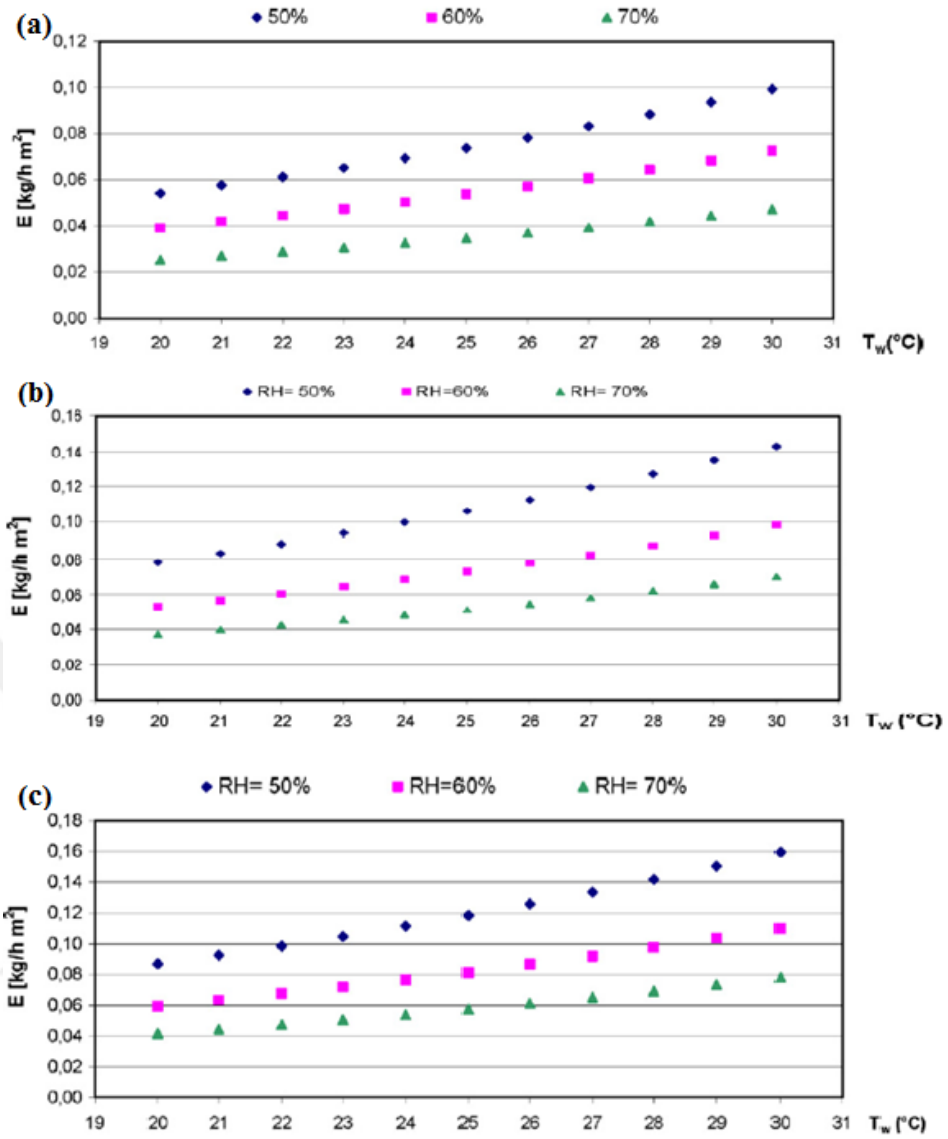
(1.51)' de G_w (kg/s) buharlaşma oranı, A (m^2) buharlaşma yüzey alanı, K basınç esaslı kütle taşınım katsayısı ve P_w (Pa) su doyma basıncıdır.

Çizelge 1. 5 V = 0,05 m/s' de hava akış hızı ve bağıl neminin fonksiyonu olarak buharlaşma kütle taşınım katsayısı K değeri (10^{-8}), Asdrubali [17]

	Ta (°C)										
ϕ (%)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
50	3,35	3,33	3,40	3,35	3,31	3,33	3,34	3,30	3,24	3,20	3,23
60	2,94	3,16	3,33	3,48	3,60	3,72	3,73	3,59	3,74	3,76	3,65
70	3,06	3,17	3,54	3,85	3,85	3,65	3,57	3,61	3,52	3,53	3,44

Buharlaşma kütle taşınım katsayısı, bazı boyutsuz parametrelere bağlıdır. (1.36)' da verilen deneysel korelasyonda Reynolds ve Schmidt sayısına bağlı olarak Sherwood sayısı bulunur. Bu boyutsuz sayıya bağlı olarak da buharlaşmada kütle taşınım katsayısı (2,94 x 10^{-8} - 3,85 x 10^{-8} kg/Pam^{2}s) elde edilmiştir.

Üç farklı hava hızında, serbest su yüzeyi sıcaklıkları ve havanın bağıl nemine göre buharlaşma akısı değişimleri Şekil 1.15' te gösterilmiştir. Su sıcaklığının artması serbest yüzeyde kısmi buhar basıncının artmasına sebep olur ve buharlaşma akısı her hız durumu için su sıcaklığına bağlı olarak yükselmiştir. Hava akış hızı buharlaşmayı arttırıcı esas parametre olmanın yanında bağıl nemin düşük olduğu durumlar da bu yönde etki göstermiştir. Bunun sebebi, havadaki düşük bağıl nemin su buharı kısmi basıncını düşürmesidir. Hava tarafı buhar kısmi basıncı düşük olursa buharlaşma mekanizması gereği $P_w - P_a$ değerleri artacaktır; bu da buharlaşma akısını artırır.



Şekil 1. 15 Farklı su sıcaklıkları ve ortam havası bağıl neminde buharlaşma akısının değişimi, (a) V = 0,05 m/s, (b) V = 0,08 m/s, (c) V = 0,17 m/s, Asdrubali [17]

1.1.4 Gözenekli Islak Yüzeylerden Buharlaşmanın İncelendiği Çalışmalar

Serbest su yüzeyinde farklı iklimsel koşullardaki buharlaşma oranının belirlenmesi ile ilgili deneysel ve teorik çalışmaların geçmişten günümüze yoğun bir şekilde çalışıldığı görülmüştür. Gözenekli yüzeylerden suyun buharlaşması için hava hızı, havanın bağıl nemi, hava ve su sıcaklıklarına bağlı olarak yapılan çalışmalar ve elde edilen korelasyonlar çok sınırlıdır.

Güneş enerjisi ile kurutma sistemleri, pasif soğutma sistemleri, evsel tip kurutucular ve tarımsal alanlarda buharlaşma prosesi ile sıkça karşılaşılmaktadır. Özellikle güneş enerjisi ile kurutma, pasif soğutma sistemleri ve tarımsal konularda radyasyon etkisi ile ısı ve kütle transferi çalışmaları çokça bulunmaktadır; fakat bu tez çalışmasında deneysel süreç boyunca tamamen karanlık bir ortam kullanılmış olup ışınımla ısı transfer etkileri ihmal edilmiştir. Nemli toprak, torf, çuval, havlu ve bunun dışındaki diğer ıslak yüzeyli gözenekli ortamlardaki buharlaşma oranının belirlenmesi ile ilgili çalışmalar üzerine çok az yoğunlaşılmıştır. Tez kapsamında da bu konuda literatüre birtakım bilgiler katabilecek gözenekli, su tutma kapasitesi yüksek ıslatılmış ince yatay bir yüzeyden buharlaşma prosesinin deneysel olarak çalışılması hedeflenmiştir.

Tang ve Etzion [20], 2004 yılında yaptıkları çalışmalarında serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslak bir yüzeyden buharlaşma oranını karşılaştırmışlardır. Farklı iklimsel koşullar altında yapılan bu çalışmada hava hızı, su sıcaklığı, hava sıcaklığı ve havanın bağıl nemine göre en küçük kareler yöntemi kullanılarak serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslak yüzey için korelasyonlar oluşturulmuştur.

Deneysel metotla yapılan bu çalışmada 116 cm x 116 cm x 22 cm boyutlarında iki adet havuz oluşturulmuştur. MDF malzemeden yapılan bu havuzların yüzeyleri ısı transferini minimize etmek ve sadece üst yüzeyde ısı ve kütle geçişi olması için 5 cm kalınlığındaki polistiren köpük ile yalıtılmıştır. Şekil 1.16’ da testler için hazırlanan buharlaşma havuzları görülmektedir. İki havuz da saf su ile doldurulmuştur. Bunlardan birinin üzerine delikli PVC panel yerleştirilmiş olup pamuk bir havlu üzerine gerilmiş ve ıslak gözenekli yüzey oluşturulmuştur. Diğerinde ise serbest su yüzeyi ortam havasına açık halde bulunmaktadır.



Şekil 1. 16 Buharlaşma havuzları, Tang ve Etzion [20]

Pamuk havlunun kullanıldığı düzenekte sıcaklık sensörleri havlu alt yüzeyi ile PVC panel üst yüzeyi arasında kalan bölgeye konumlandırılmışken, diğerinde serbest su yüzeyinin 1 cm altına yerleştirilmiştir. Her iki düzenekte de yüzeyden 1,6 m yukarıya hava sıcaklığını ölçmek için sensörler yerleştirilmiştir. Aynı konumlarda Campbell HMP35C marka %90 değerine kadar % ±2, %90 ile %100 arası % ±3 doğruluk değerlerine sahip bağıl nem sensörleri yerleştirilmiştir.

Tang ve Etzion [20], hava hızının buharlaşma oranını en çok etkileyen parametre olduğunu belirtmişlerdir. Yüzeyden 0,55 m yukarıya yerleştirdikleri anemometre ile hava akış hızı ortalama değerlerini 10 dakikada bir veri toplama ünitesinde kayıt altına almışlardır.

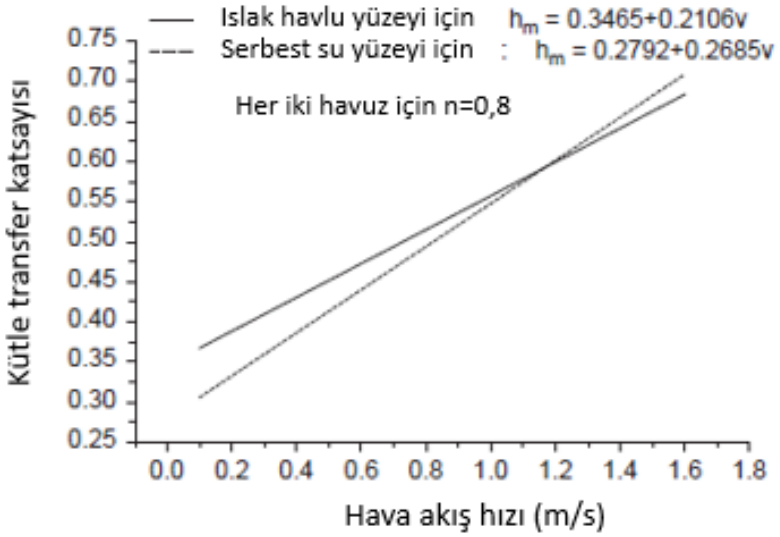
Deneysel ölçümler hava koşulları farklı olan iki aşamada yapılmıştır. Birincisi, 10 Ağustos 2002 ve 5 Eylül 2002 tarihleri arasını kapsarken, ikinci aşama 22 Eylül 2002 ile 25 Ekim 2002 tarihleri arasındadır. Böyle bir yol izlenmesinin sebebi farklı iklimsel koşulları sağlamak için olmuştur. Birinci periyotta sıcak ve kuru hava şartları seçilirken maksimum hava sıcaklığı 40°C, ortalama hava sıcaklığı 29,62°C' dir. Bunun yanında bağıl nem değerleri minimum %10' un altında iken, ortalama %45 civarındadır. İkinci iklimsel koşul ilkine göre daha soğuk bir dönemi temsil ederken minimum hava sıcaklığı 18°C' nin altında ve ortalama hava sıcaklığı 26,7°C' dir. Bağıl nem değerleri ise maksimum %95 dolaylarında iken ortalama %52 değerindedir.

Çalışmanın amaçlarından biri buharlaşma akısı ile ilgili serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslatılmış yüzey durumları için korelasyonlar oluşturmaktır. (1.55)' te korelasyonun yüzey ve ortam arasındaki kısmi buhar basınç farkının parabolik fonksiyonu ve kütle transfer katsayısına bağlı olduğu görülmektedir. Kütle transfer katsayısı ise hava akış hızının bir fonksiyonudur.

$$m_e = h_m (P_w - \phi P_a)^n \tag{1.55}$$

$$h_m = C_1 + C_2 v \tag{1.56}$$

En küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan regresyon analizi ile h_m kütle transfer katsayısı $h_m = C_1 + C_2 v + C_3 v^2 + C_4 v^3 + ... + C_n v^{n-1}$ şeklindeki polinom fonksiyonu ile ifade edilmiştir.



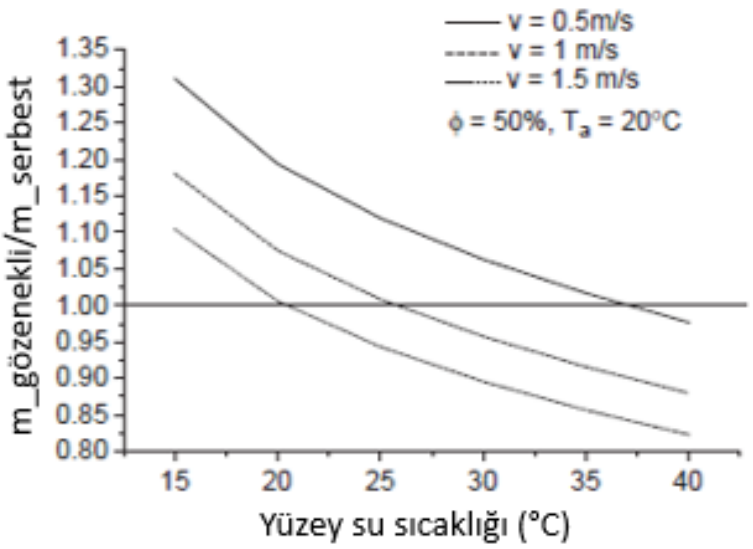
Şekil 1. 17 Serbest yüzey ve gözenekli ıslak yüzey durumlarında hava akış hızına bağlı kütle transfer katsayısı değerleri, n = 0,8, Tang ve Etzion [20]

Serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşmada kütle transfer katsayılarını hava akış hızına bağlı olarak karşılaştırmak için regresyon analizi sonucu her iki durum özelinde en iyi sapma değerini veren n = 0,8 katsayısı kullanılmıştır. Buna bağlı olarak oluşturulan hava akış hızının fonksiyonu olan kütle transfer katsayısının değişimi grafiği Şekil 1.17' de görülmektedir. Grafik incelendiğinde, V = 1,16 m/s kritik değer olarak göze çarpmaktadır. V < 1,16 m/s için; gözenekli nemli havlu yüzey alanı, düz serbest su yüzey alanından daha fazla olduğu için kütle transfer katsayısı daha yüksek çıkmıştır. V > 1,16 m/s durumunda ise; gözenekli yüzeyde sürtünme etkisi ile oluşan daha kalın bir sınır tabaka kütle transfer katsayısını düşürmüştür.

Yapılan regresyon analizi sonucunda her iki durum için oluşturulan korelasyonlar sırasıyla (1.57) ve (1.58)' de gözenekli yüzey ve serbest su yüzeyi durumları için verilmiştir. Gözenekli havlu yüzeyinden buharlaşma için önerilen korelasyonda hava ve yüzey tarafı kısmi buhar basınç farkı üstel katsayısı n = 0,7 iken standart sapma δ = 188 çıkmıştır. Serbest su yüzeyinden buharlaşma korelasyonu n değeri 0,82, standart sapma δ = 170 olarak hesaplanmıştır.

$$m_e = (0,7581 + 0,42572v)(P_w - \phi P_a)^{0,7} / h_{fg} \qquad \text{(n = 0,7} \quad \delta = 188) \qquad (1.57)$$

$$m_e = (0,2253 + 0,24644v)(P_w - \phi P_a)^{0,82} / h_{fg} \qquad \text{(n = 0,82} \quad \delta = 170) \qquad (1.58)$$



Şekil 1. 18 Bağıl nem = %50, Hava sıcaklığı = 20°C durumlarında hava akış hızı ve yüzey su sıcaklığına bağlı $m_{gözenekli}/m_{serbest}$ oranları, Tang ve Etzion [20]

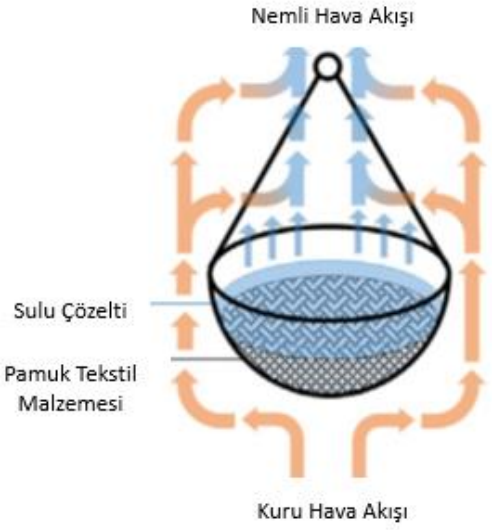
Serbest su yüzeyi ve gözenekli havlu yüzeyi buharlaşma oranlarının karşılaştırılması çalışmanın temel amacı olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda eşitlik 1.57 ve 1.58 deneysel korelasyonları yardımıyla oluşturulan karşılaştırma grafiği Şekil 1.18' de sunulmuştur. Hava sıcaklığının 20°C ve bağıl nemin %50 olarak sabitlendiği bir koşulda üç farklı hava hızı değeri ve altı farklı yüzey su sıcaklığında $m_{gözenekli}/m_{serbest}$ oranları literatüre suyun farklı yüzeylerde buharlaşması ile ilgili faydalı bilgiler vermektedir. Özellikle, düşük hava hızlarında (V = 0,5 m/s) gözenekli ıslak yüzeyden buharlaşmanın serbest düz su yüzeyinden buharlaşmadan su sıcaklığı 37°C' ye kadar daha fazla olduğu söylenebilir. Hava akış hızı arttıkça (V = 1,5 m/s) Şekil 1.17' de de görüldüğü üzere kütle transfer katsayısının düşmesine bağlı olarak gözenekli yüzeyde buharlaşma oranı serbest su yüzey durumuna göre daha az çıkmıştır.

Donnarumma vd., [21] 2015 yılında yayınlanan çalışmalarında gözenekli bir ortam olan %100 pamuklu tekstil malzemesinin farklı yüzey etkin maddelerle etkileşimi sonucu buharlaşma ve emilim proseslerini incelemişlerdir. Yüzey etkin madde olarak saf su ve tuzluluk derecesi yüksek çeşitli çözeltiler kullanılmıştır. Çizelge 1.6' da su çözeltilerinin tuzluluk içeriği verilmiştir.

Çizelge 1. 6 Farklı tuzluluk derecesine sahip yüzey etkin maddeler, Donnarumma [21]

Numune İsmi	Sertlik (ppm)	Tuzluluk içeriği (mg/250 ml)
Orta Sertlikteki Su	255	702,99 $CaCl_2.2H_2O$ 324,01 $MgCl_2.6H_2O$
Sert Su	420	1157,78 $CaCl_2.2H_2O$ 533,66 $MgCl_2.6H_2O$
Çok Sert Su	540	1433,45 $CaCl_2.2H_2O$ 660,73 $MgCl_2.6H_2O$

Çalışmanın tez için katkı sağlayacak kısmı kurutma ile suyun buharlaşması prosesidir. Şekil 1.19' da çalışmadaki pamuk havlunun kurutulmasını anlatan basit bir çizim yer almaktadır. Testler boyunca hava sıcaklığı 40 ± 0,1°C, bağıl nem % 0 olmak üzere kuru havadır. Pamuk tekstil malzemesi sıcaklık kontrollü oda içerisindeki buharlaşma haznesinin içinde konduktan sonra 25 mg su ile ıslatılmıştır. Daha sonra oda kapatılmış ve sıcaklık 5 dakika içinde rejim durumuna gelmiştir.



Şekil 1. 19 Kurutma prosesini temsil eden çizim, Donnarumma vd. [21]

Deneyler sonunda tekstil malzemesinin kurutma işleminde buharlaşma miktarını ölçmek için ağırlık verileri elde edildikten sonra Carter vd. [22]' nin önerdiği RMC (Residual Moisture Content) artık nem içeriği yüzdesi hesaplanmıştır. (1.59) RMC değerleri, test sonundaki çözelti ağırlığı ve pamuk tekstil malzemesinin kuru ağırlığına bağlıdır.

$$RMC = \frac{W_w - W_d}{W_d} x100 \tag{1.59}$$

Çizelge 1. 7 Su sertliklerinin pamuk tekstil malzemesi kurutma oranına etkisi, Donnarumma vd. [21]

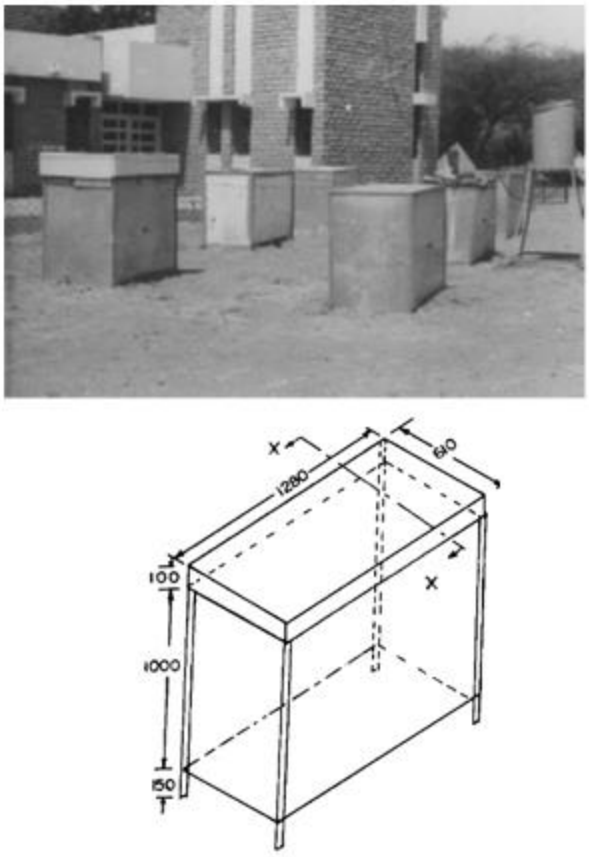
Numune İsmi	Sertlik (ppm)	Kurutma Oranı (%/dakika)	Sapma (%)
Saf Su	0	6,67	0
Orta Sertlikteki Su	255	6,88	3
Sert Su	420	7,19	8
Çok Sert Su	540	6,71	0

Su sertliklerinin (ppm) kurutma oranına (%/dakika) etkisi Çizelge 1.7' de sunulmuştur. Dört numune arasında tekstil malzemesinden kurutma oranı saf suda en düşük çıkmıştır. Sert suyun kurutma oranına etkisinin en fazla çıkmasının sebebi, pamuk tekstil malzemesi yüzeyindeki OH gruplarının sert su çözeltisindeki iyonik gruplarla etkileşime girmesi olarak açıklanmıştır. Alkil benzen sülfonik asit (HLAS) isimli yüzey etkin maddenin saf suya karıştırılması ile 20000 ppm seviyesine çıkan sertlik durumunda da sert sudaki etkiye benzer durum ortaya çıkmıştır. (Çizelge 1.8) Tez kapsamında yapılacak deneysel çalışmalarda saf su kullanılacaktır.

Çizelge 1. 8 HLAS maddesinin kurutma oranına etkisi, Donnarumma vd. [21]

Numune İsmi	HLAS İçeriği (ppm)	Kurutma Oranı (%/dakika)	Sapma (%)
Saf Su	0	6,67	0
Saf Su + Alkil Benzen Sülfonik Asit	20000	7,13	7

Nahar vd. [23], kurak alanlarda binaların soğutulmasına ilişin pasif soğutma tekniklerini farklı yapısal tasarımlarla araştırmışlardır. Bu bögelerde binaların ısıl yükünün %50' sinin çatı kısmından olduğu ve bu konu üzerinde çalışılması gerektiği düşünülmüştür. İç ortamı yüksek ısıl yüklerden koruma amacıyla yaptıkları deneylerde 1280 x 610 x 1100 mm^3 hacminde yapılar kullanılmış ve üst yüzeylerine farklı pasif soğutma teknikleri uygulanmıştır. Şekil 1.20' de oluşturulan beton yapılı test düzenekleri görülmektedir. Çevresel iklim koşullarında üst yüzeyin beyaz boya ile boyanması, çatı yüzeyi alt kısmı ısıl yalıtım uygulaması, sığ su kabı üzeri hareket ettirilebilir ısıl yalıtım uygulaması ve ıslak gözenekli çuval yapıları gibi farklı durumlar denenmiştir.



Şekil 1. 20 Pasif soğutma sistemleri test düzenekleri, Nahar vd. [23, 24]

Uygulanan sistemler arasında en etkili pasif soğutma sistemi, ıslak yüzey ile sağlanan evaporatif soğutma çıkmıştır. Bu teknik, iç ortam kuru termometre sıcaklıklarını dış ortam yaş termometre sıcaklıklarına yakın tutmaktadır. Islak yüzeyden ortama su buharının kütle geçişi diğer yandan yüzeyde soğutma etkisi yaratır ve ortamın çevreden soğuk kalmasını sağlar. Tez kapsamında da yatay gözenekli ıslak bir ortamın bulunduğu yüzeyden suyun buharlaşması incelenecektir.

Tarımsal alanlarda buharlaşma konusu ile sıkça karşılaşılmaktadır. Özellikle, toprak ve torf gibi gözenekli nemli yüzeylerde suyun ortam havasına buharlaşması eşzamanlı ısı ve kütle transfer hesaplamalarını gerektirir. Torf, çok fazlı bir yapı olup bitkilerin yetişmesi için bir ara ortam olarak kullanılmaktadır. Gözenekli ve nemli torf bitki yetiştirme ortamı; özellikle ılıman İskandinav bölge ikliminde bulunup katı kuru organik madde, su ve gaz fazlarının birleşimiyle oluşur. Porozite oranı yüksek olan torfun su tutma kapasitesi de yüksektir. Filkov vd. [25], 2011 yılında yayınlanan çalışmalarında

ince torf tabakasının kurutulması ile ilgili matematiksel model oluşturmuşlardır. Kurutma oranı üzerinde torf içi suyun hacimsel kesrinin etkisi incelenmiştir.

Torfun çevresel koşullar altında kuruması ile yangın tehlikesi oluşmaktadır. Bu sebeple, torf içi su içeriği önem kazanmaktadır. Çalışmada, torf yüzeyinden gerçekleşen buharlaşmanın sadece z-yönünde olduğu kabul edilmiştir. Torf yüzeyi - atmosfer arayüzeyinde tek boyutlu ısı ve kütle transfer çözümlemesi ile buharlaşma oranı (kurutma oranı) için matematiksel model oluşturulmuştur. Kuru organik madde hacimsel oranı φ_1, suyun hacimsel oranı φ_2, gaz fazı hacimsel oranı φ_3 olarak ifade edilmiştir. Eşitlik (1.60)' ta suyun torftan ortam havasına buharlaşma oranı ile ilgili ifade yer almaktadır.

$$R_{2s} = \frac{\rho_2 \varphi_2 k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT)}{\sqrt{T_2}} \tag{1.60}$$

Torfta bulunan suyun kütlesel buharlaşma oranı R_{2s}, suyun torf sıcaklığındaki yoğunluğu ρ_2, suyun hacimsel oranı $\varphi_{2,}$ buharlaşma katsayısı tabanı k_{2s} ile ifade edilmiştir. $(-E_{2s} / RT)$ buharlaşma katsayısı olarak belirtilirken, E_{2s} buharlaşma aktivasyon enerjisi, T ise torf sıcaklığı olarak tanımlanmıştır. T_2 ise suyun sıcaklığı olarak verilmektedir.

Serbest su yüzeyi ve farklı gözenekli ıslak yüzeylerden gerçekleşen buharlaşma ile ilgili çalışmalar deneysel ve teorik kapsamda özetlenmiştir. Buharlaşmanın doğal ve zorlanmış taşınım koşullarında gerçekleşen bir mekanizma olduğu ve bu prosese etki eden birçok parametrenin olduğu yazarlar tarafından ortak bir dille belirtilmiştir. Özellikle hava akış hızlarının en etkili parametre olduğu suyun buharlaşması olayında hava sıcaklığı, hava bağıl nemi ve su sıcaklığı diğer önemli parametreler olarak göze çarpmaktadır. Gözenekli yüzeyden buharlaşma konusunda Tang ve Etzion [20] bu durumu serbest yüzey buharlaşması ile bahsedilen parametreler bazında karşılaştırıp korelasyonlar oluşturmuşlardır. Diğer çalışmalarda kurutma oranı ile ilgili önemli bilgiler verilmiş olup gözenekli ortam başlangıç su içeriğinin de buharlaşmada önemine değinilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu yüksek lisans tezi kapsamında; yalıtımlı bir ısı odasında istenilen hava şartlarının sağlandığı, ek olarak hava akış hızının rüzgar tüneli vasıtasıyla ayarlanabildiği bir sistemde gözenekli ıslatılmış bir yüzeyden suyun buharlaşması prosesini inceleme amaçlanmıştır. Farklı proses parametrelerinin (hava hızı, hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi, gözenekli ortam başlangıç su içeriği) incelendiği bu çalışmada buharlaşma hızı ve akısı değerlendirilmiştir. Ayrıca buharlaşma mekanizması ile ilgili taşınımsal dinamikler incelendikten sonra proses parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

1.3 Hipotez

Geçmişten günümüze suyun buharlaşması olayı çeşitli mühendislik sistemleri ile tarımsal ve meteoroloji alanındaki ısı ve kütle transfer çözümlemeleri için sıkça karşılaşılan bir mekanizma olmuştur. Özellikle, kapalı ve açık yüzme havuzlarında serbest su yüzeyinden buharlaşmanın sebep olduğu ısıl yükler ve ortam bağıl nemi ile ilişkili konfor şartları, evsel tip bir soğutucuda defrost suyunun toplandığı kaptan suyun buharlaştırılması, su saflaştırma ünitelerinde gerçekleşen buharlaşma yoğun olarak incelenen serbest yüzey buharlaşması çalışmalarıdır. Fakat; çevremizde torf, toprak, tekstil ürünleri gibi nemli ve gözenekli yüzeyli ortamlar da bulunmaktadır. Karanlık bir ortamda (ışınım etkilerinin ihmal edildiği) bu tip nemli yüzeylerden parametrik buharlaşma çalışmaları sınırlıdır. Bu tez çalışması, evsel tip bir kurutucuda tekstil ürünlerinin neminin alınması ve tarımsal faaliyet alanlarında bitki yetiştirici ortam olarak kullanılan nemli toprak gibi gözenekli yüzeylerden buharlaşma konularına deneysel veriler ve önemli bilgilerle katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

DENEY DÜZENEĞİ

Tez çalışması kapsamında, yalıtımlı bir ısı odasında istenilen hava şartlarının sağlandığı (sıcaklık ve bağıl nem), ek olarak hava hızlarının rüzgar tüneli vasıtasıyla ayarlanabildiği bir sistemde gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşmayı incelemek amacıyla bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu bölümde, deney düzeneğinde kullanılan elemanların teknik özellikleri, deney tesisatı, kullanılan güç ve ölçüm aletleri sunulmuştur.

Deney düzeneği kurulurken, çalışma parametrelerine uygun olarak elemanların seçimi gerçekleştirilmiş ve bu doğrultuda deney tesisatı oluşturulmuştur. Çalışmada incelenecek parametreler aşağıdaki gibidir:

- Ortam hava hızı (m/s)
- Ortam havası sıcaklığı (°C)
- Ortam havası bağıl nemi (%)
- Gözenekli ortam başlangıç su içeriği (%)

Oluşturulan deney düzeneği aşağıda verilen dört ana kısımdan oluşmaktadır:

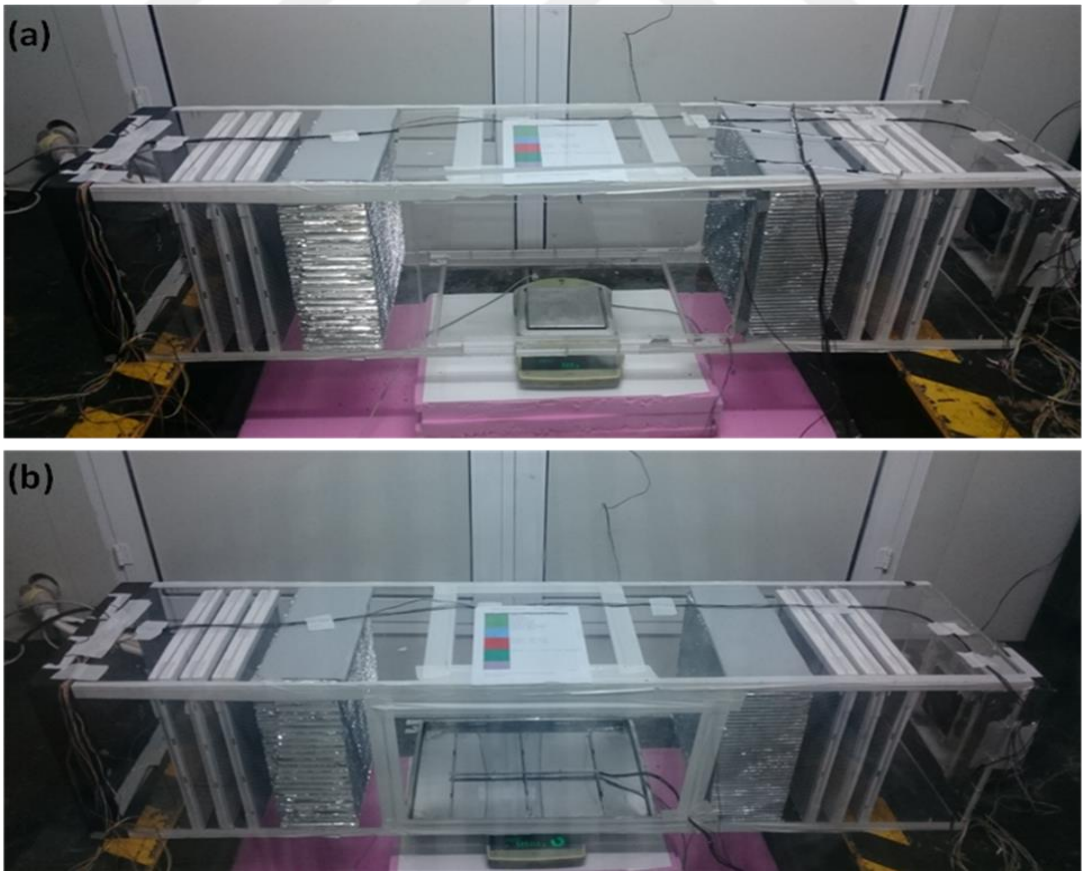
- Dış ortam hava şartlandırma odası (hava sıcaklığı, hava bağıl nemi)
- Dış ortam hava hızları ayarlanabilen rüzgar tüneli ve buharlaşma haznesi
- Ölçüm ve veri toplama sistemi
- Güç ve kontrol ünitesi

2.1 Deney Tesisatı

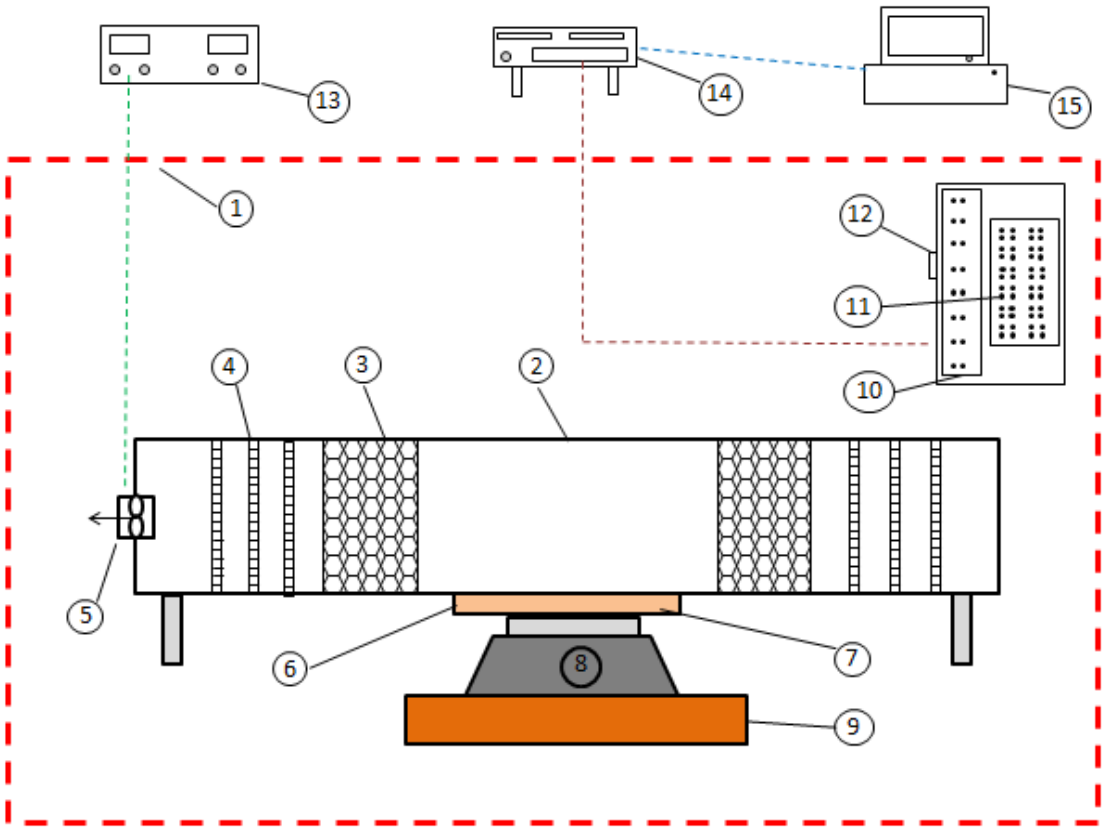
Dört ana bölümden oluşan deney tesisatı Arçelik A.Ş' nin Ar-Ge Merkezi' nde kurulmuştur.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için istenilen hava sıcaklığı ve bağıl neminin sağlanabildiği şartlandırılmış yalıtımlı ısı odası kullanılmıştır. Oda içinde hava hızlarının ayarlanabildiği bir rüzgar tüneli bulunmaktadır. Bu tünelin taban kısmında buharlaşma testlerinin yapılacağı bir hazne yer almaktadır. Akış bozukluklarını önlemek amacıyla haznenin açık olan üst yüzeyi tünelin taban yüzeyine paralel olup tünel ve hazne simetri eksenleri çakışıktır.

Güç ve kontrol ünitesi sistem komponentlerinin özelliklerine göre alternatif veya doğru akımlı cihazlardan oluşmaktadır. Ölçüm ve veri toplama ünitesi ise, sistem üzerinden sıcaklık, bağıl nem ve ağırlık değerlerinin okunmasını sağlamakla birlikte, bu verilerin düzenli ve zamana bağlı kaydedilmesine olanak tanımıştır. Deney tesisatının fotoğrafı Şekil 2.1' de, şematik gösterimi ise Şekil 2.2' de sunulmuştur.



Şekil 2. 1 Deney tesisatı, (a) Buharlaşma haznesiz, (b) Buharlaşma hazneli



Şekil 2. 2 Deney tesisatının şematik görünümü

Bu yüksek lisans deneysel tez çalışması için hazırlanan düzenekte kullanılan ekipmanların isimleri Çizelge 2.1' de sunulmuştur.

Çizelge 2. 1 Deney tesisatı ekipman listesi

No	Ekipman Adı	No	Ekipman Adı
1	Şartlandırılmış Oda	9	Terazi Altı Düz Destek Parçası
2	Rüzgar Tüneli	10	Sinyal Panosu (Nem sensörleri)
3	Bal Peteği Akış Düzeltici	11	Termoeleman paneli
4	Hücre Tipi Akış Düzeltici	12	AC Elektrik Panosu
5	DC Motorlu Eksenel Fan	13	DC Güç Kaynağı
6	Buharlaşma Haznesi	14	Veri Toplama Ünitesi
7	Gözenekli Ortam	15	Bilgisayar
8	Elektronik Terazi		

2.2 Dış Ortam Hava Şartlandırma Odası

Testler boyunca buharlaşma haznesinin bulunduğu ortamın sıcaklık ve bağıl nemini istenilen değerlerde hassas olarak ayarlamak amacıyla Arçelik A.Ş Araştırma ve Geliştirme Merkezi Termodinamik laboratuvarında bulunan yalıtımlı şartlandırılmış ısı odası kullanılmıştır. 3,5 m x 2,8 m x 1,6 m (W x H x L) boyutlarında 15,7 m^3 hacme sahip odada ortam sıcaklığı 5 – 50 °C, bağıl nem %20 - % 95 arasında istenilen değerlere ayarlanabilmektedir. Deneyler süresince oda içi hava sıcaklığı ve bağıl nem koşulları program üzerinden ayarlanmıştır.

Bu çalışmada buharlaşma haznesi üzeri ortalama hava akış hızları büyük önem taşımaktadır. Oda içi hava hızlarının 0,2 m/s' den küçük olduğu üretici firma tarafından bildirilmiştir. Testlerde uygulanacak hava hızları bu mertebenin üstüne çıkabileceğinden, bir rüzgar tüneli kurularak zorlanmış taşınım koşulları sağlanmıştır.

Deneysel ölçüm verileri odanın veri toplama ünitesi ile alınmıştır. Ölçüm cihazları ile alınan veriler bu ünitede toplandıktan sonra bir bilgisayara aktarılmış ve uygun yazılım programı ile veri takibi yapılmıştır.

Deneyler süresince şartlandırılmış ısı odası içi bağıl nem ve sıcaklık değerleri istenen değerlere ayarlanmıştır. Deneysel tasarım uygulanan tez çalışmasında havanın sıcaklık değerleri 16 °C - 21 °C - 26 °C, havanın bağıl nem değerleri %50 - %61 - %72 olarak set edilmiştir.

2.3 Rüzgar Tüneli ve Buharlaşma Haznesi

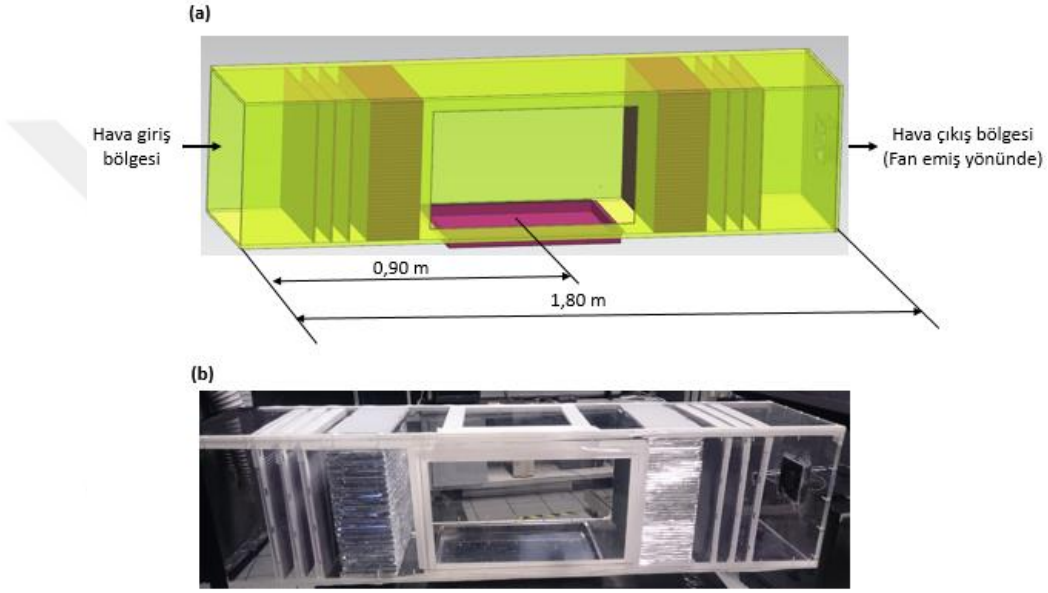
Suyun havaya buharlaşması prosesinde iki temel mekanizma rol oynamaktadır. Bunlardan ilki, doğal taşınımlı buharlaşma yoluyla yüzey ile ortam havası arasındaki su buharı yoğunluğu farkıdır. Yoğunluk farkı ise esasında iki ortam arasındaki kısmi buhar basınç farklarına dayanır. Doğal taşınım durumlarında hava durgun veya durguna yakın olmaktadır. İkinci mekanizma ise zorlanmış taşınım ile gerçekleşen buharlaşmadır. Burada ise hareketli ortam havası koşulları geçerlidir.

Bu tez çalışmasında ortam havasının farklı bağıl nem ve sıcaklık koşulları yani farklı kısmi buhar basınçlarında olduğu doğal taşınım koşulları ile eksenel fanlı bir rüzgar tüneliyle hava akış hızlarının değiştirildiği zorlanmış taşınım koşulları beraber

değerlendirilmiştir. Bunun için hava akış bozukluklarını minimuma indiren ve istenen hava hızlarını sağlayan bir rüzgar tüneli sistemi kurulmuş olup buharlaşma haznesi tünel tabanına konumlandırılmıştır.

2.3.1 Rüzgar Tüneli

Zorlanmış taşınım yoluyla buharlaşma etkinliğini belirlemek için oluşturulan rüzgar tüneli Şekil 2.3‘ te görülmektedir. Sistemde farklı hava akış hızlarını elde etmek amacıyla DC motorlu SUNON marka eksenel fan kullanılmıştır.

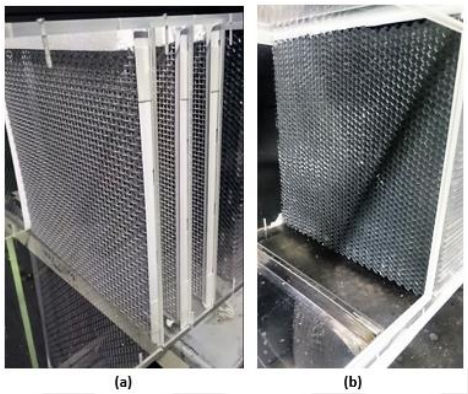


Şekil 2. 3 Rüzgar tüneli, (a) CAD çizimi (b) Fotoğraf görünümü

Rüzgar tüneli, kalınlığı 10 mm olan şeffaf pleksiglas (plastik cam) levhalardan oluşturulmuştur. Akış kesit alanı 0,4 x 0,4 m^2 olup toplam uzunluğu 1,80 m’ dir. Buharlaşan yüzey üzerinde hava akış bozukluklarını minimuma indirmek için öncelikle buharlaşma haznesi tünelin genişlik ve derinlik yönlerinde simetri eksenlerine yerleştirilmiştir. Sonrasında hazne üst yüzeyi tünel tabanı iç yüzeyi ile aynı eksen üzerine oturtulmuştur. Bu sayede tünel duvarlarının akış bozulmalarına etkisi minimal seviyede tutulmuştur.

Çalışmada kullanılacak farklı hava akış hızları ve film sıcaklığındaki kinematik viskozite değerleri esas alınarak hesaplanan boyutsuz Reynolds sayısı aralığı 6274 – 12667 çıkmıştır. Elde edilen Re sayıları 5 x 10^{5}’ ten küçük olduğundan yüzey üzeri dış akışta laminer akım koşulları geçerlidir.

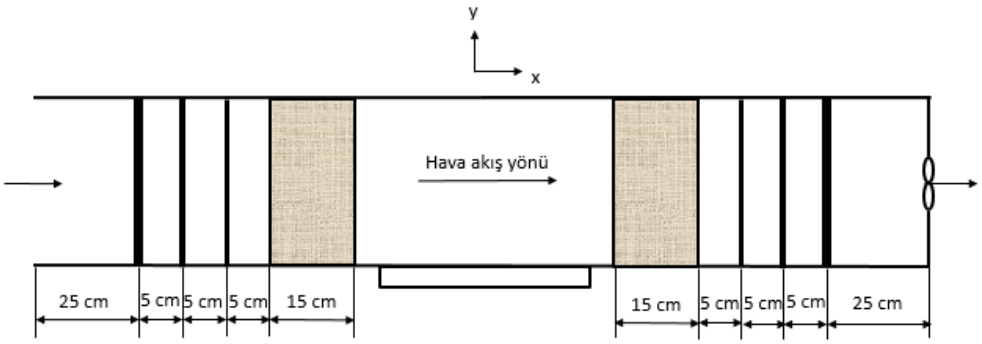
Sistemde akış vektörlerinin düzgün olması adına ANSI-AMCA ve ASHRAE [26] standartlarında belirtilen akış düzeltici ekipmanların kullanılması uygun görülmüştür. Şekil 2.4' te sunulan farklı kalınlıklardaki hücre tipi akış düzelticiler ve bal peteği akış düzelticiler buharlaşma haznesinden önceki hava giriş bölümü ve hazne sonrası hava çıkış bölümüne yerleştirilmiştir.



Şekil 2. 4 Rüzgar tüneli hava giriş ve çıkış bölgesinde kullanılan akış düzeltici yapıları, (a) Hücre tipi akış düzeltici, (b) Bal peteği akış düzeltici

Buharlaşma haznesi merkezi ile tünel taban yüzey merkezi çakışık olan bu sistemde akış düzelticilerin hava giriş ve çıkış bölümünde birbirlerine göre simetrik yerleşimi söz konusudur. Bunun sebebi, hazne öncesi profili düzeltilmiş olan akışın hazne sonrası da tünelden düzgün bir profille çıkmasını sağlamak olmuştur.

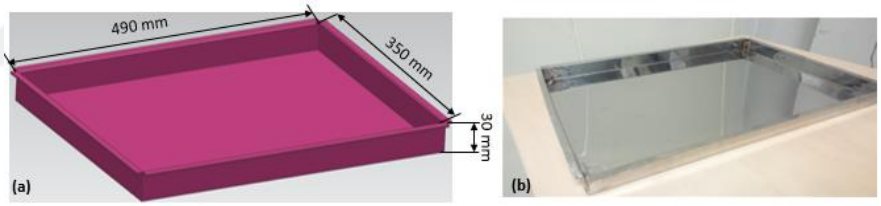
Rüzgar tüneline giren ortam havası Şekil 2.5' te gösterildiği üzere öncelikle hücre tipi akış düzelticilerden geçmektedir. Farklı kalınlık ve hücre boyutlarında olan bu yapılar kalın, orta ve ince tel kafes yapıları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Aralarında 5 cm mesafe bulunan bu tel kafesler sayesinde dağınık hava akış profili bir miktar düzeltilmiştir. Standart 15 cm uzunlukta hücre yapıları altıgen olan bal peteği akış düzelticisi buharlaşma haznesi üzeri tünel kesit alanının her bölgesinde düzgün profilli laminer akışı sağlamıştır. Hazne sonrası tünel hava çıkış bölgesinde de ilk olarak bal peteği yapısına giren hava daha sonra sırasıyla ince, orta ve kalın hücre tipi akış düzelticisinden geçerek fan yardımıyla şartlandırılmış oda ortamına üflenmiştir. Akış düzelticilerin birbirlerine göre konumları, aralarındaki mesafaler ve tünel içi yerleşimleri ile ilgili detaylı çizim Şekil 2.5' te sunulmuştur.



Şekil 2. 5 Hücre tipi ve bal peteği akış düzelticilerin rüzgar tüneli içindeki yerleşimi

2.3.2 Buharlaşma Haznesi

Deneysel çalışmalar boyunca buharlaşmanın inceleneceği haznenin CAD gösterimi ve fotoğrafı Şekil 2.6' da genişlik, derinlik ve yükseklik ölçüleriyle verilmiştir. Bu hazne 2 mm kalınlıktaki sac malzemeden yapılmış olup 5,145 litre gözenekli ortam hacmine sahiptir. Kenarlarında büküm yöntemiyle oluşturulan kulak yapıları sayesinde buharlaşma haznesi, tünelin taban iç yüzeyinde simetri eksenine göre konumlandırılmıştır.



Şekil 2. 6 Buharlaşma haznesi (a) CAD çizimi ve (b) Fotoğraf görünümü

2.4 Ölçüm ve Veri Toplama Sistemi

2.4.1 Ölçüm Sistemi

Deney sistemi üzerinden okunan sıcaklık ve bağıl nem değerleri, termoeleman ve sensör yardımı ile okunan büyüklüğün cinsine göre çesitli sinyallere dönüştürülerek kayda alınmaktadır.

Deneylerden önce hava akış hızı ve hava akış debisi ölçümleri gerçekleştirilmiş olup deney esnasında sıcaklık, bağıl nem ve ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3' te sırasıyla sistem üzerine yerleştirilen termoeleman ve bağıl nem

sensörlerinin listesi verilmiştir. Deneyler sırasında 19 adet T tipi termo-eleman, 9 adet bağıl nem sensörü kullanılmıştır.

Çizelge 2. 2 Deney düzeneğinde kullanılan termoelemanların isimleri ve konumları

SICAKLIK SENSÖRLERİ		
TERMOELEMAN İSMİ	KONUM	KANAL NO
T1	Buharlaşma Haznesi Matris-1	1
T2	Buharlaşma Haznesi Matris-2	2
T3	Buharlaşma Haznesi Matris-3	3
T4	Buharlaşma Haznesi Matris-4	4
T5	Buharlaşma Haznesi Matris-5	5
T6	Buharlaşma Haznesi Matris-6	6
T7	Buharlaşma Haznesi Matris-7	7
T8	Buharlaşma Haznesi Matris-8	8
T9	Buharlaşma Haznesi Matris-9	10
T10	Tünel Hava Giriş-1	11
T11	Tünel Hava Giriş-2	12
T12	Tünel Hava Giriş-3	13
T13	Tünel Hava Giriş-4	14
T14	Tünel Hava Çıkış-1	15
T15	Tünel Hava Çıkış-2	17
T16	Tünel Hava Çıkış-3	18
T17	Tünel Hava Çıkış-4	19
T18	Tünel Ortam	20
T19	Oda Ortam	21

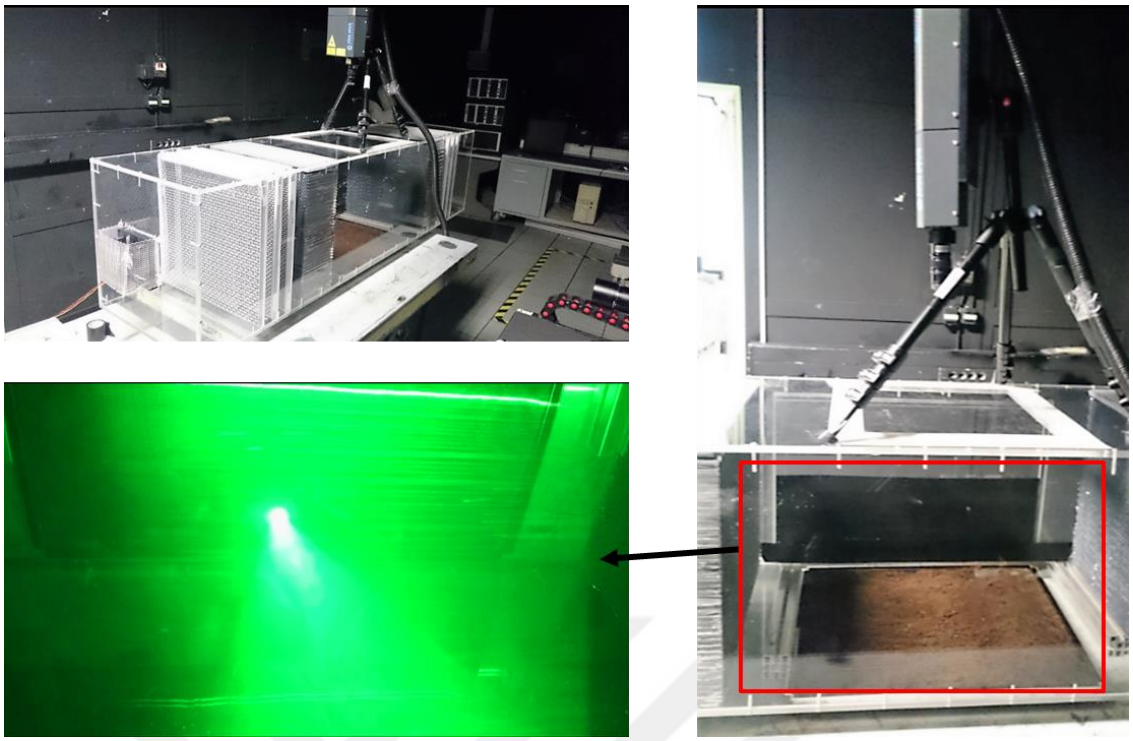
Çizelge 2. 3 Deney düzeneğinde kullanılan nem sensörlerinin isimleri ve konumları

NEM SENSÖRLERİ			
İSTASYON	SENSÖR NO	KONUM	KANAL NO
2. İSTASYON	RH1	Tünel Hava Giriş-1	513
	RH2	Tünel Hava Giriş-2	514
	RH3	Tünel Hava Giriş-3	515
	RH4	Tünel Hava Giriş-4	516
1. İSTASYON	RH5	Tünel Hava Çıkış-1	506
	RH6	Tünel Hava Çıkış-2	507
	RH7	Tünel Hava Çıkış-3	508
	RH8	Tünel Hava Çıkış-4	509
	RH9	Oda Ortam	510

2.4.1.1 Hız Ölçümü

Buharlaşma haznesindeki gözenekli ıslatılmış yüzeyden zorlanmış taşınım durumunda buharlaşma etkinliğini belirlemek için yatay yüzey üzeri hava akış hızlarının tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Hazne üzerindeki ortalama hava hızlarının belirlenmesi için parçacık takibi hız ölçen PIV (Particle Image Velocimetry) teknolojisi kullanılmıştır. Bu amaçla hazırlanan düzenek Şekil 2.7‘ de görülmektedir.

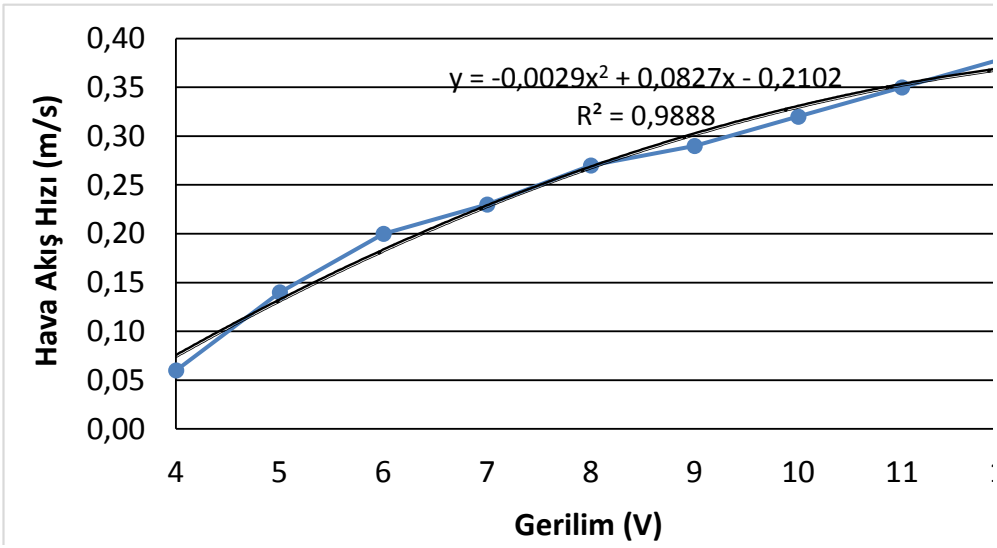
PIV sistemleri; akışa eklenen özel parçacıkların (duman) akış ile birlikte hareket etmesi ve bu parçacıkların görüntülerinin dijital kamera ile kaydedilmesi sayesinde, akışa ait hız vektör alanlarının belirlenmesini kapsar. Parçacık hız görüntüleme sisteminin içerdiği temel elemanlar; yüksek çözünürlüklü dijital kamera, YAG lazer, kamera ve lazerin ortak çalışmasını sağlayan senkronizasyon cihazı, gerekli yazılım ve donanıma sahip bilgisayar, travers sistemi ve duman jeneratörüdür.



Şekil 2. 7 Hava akış hızlarının belirlenmesi için kurulan PIV düzeneği

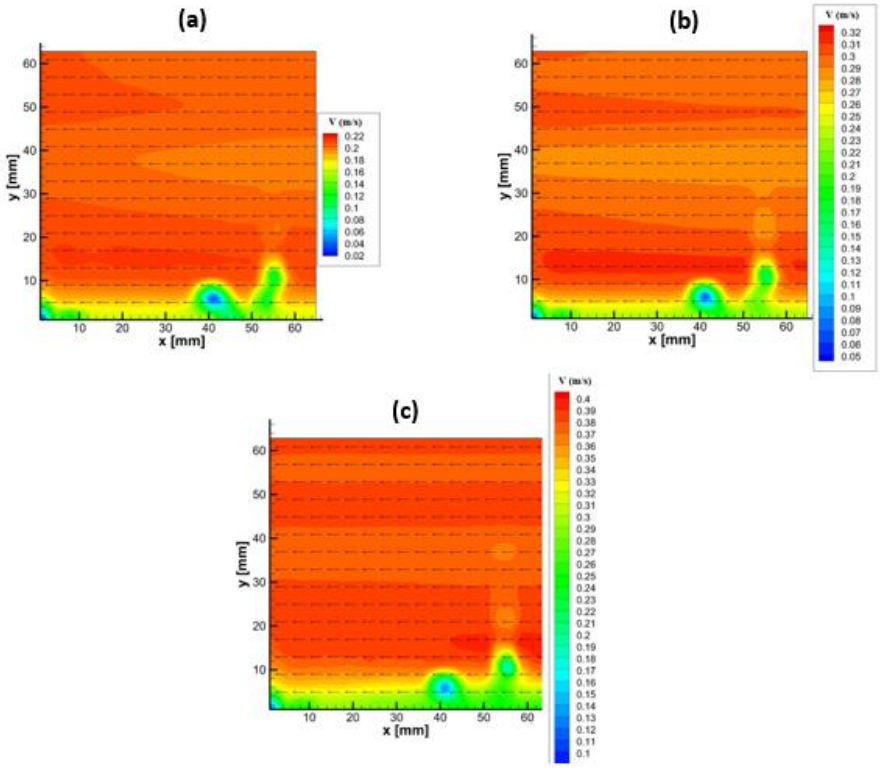
Buharlaşma haznesi üzeri hava akış hızlarının belirlenmesi için öncelikle kameranın gördüğü kısımda tünel arka yüzeyi siyah bir bantla kaplanmıştır. Sonrasında ise parlayan sac metal plakalı hazne siyaha boyanmıştır. Sistemde parlak yüzeylerin bulunması kameranın akış görüntülemesini bozduğu için bu işlemler yapılmıştır. Kamera açısı ve lazer konumu ayarlandıktan sonra sistemin kalibrasyonu hız alanı bölgesi için yapılmış ve uygun zaman aralıklarında birkaç örnek görüntü alınmıştır. Elde edilen bu görüntülerin doğrulanması ile öçümlere başlanmıştır.

Tamamen karanlık bir ortamda yapılan bu deneylerde duman jeneratörünün çalıştırılmasıyla deneyler başlamıştır. Önerilen yazılım programında gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.8‘ de farklı fan gerilimlerinde oluşturulan hava akış hızı eğrisi görülmektedir.



Şekil 2. 8 Yüzey üzeri farklı fan gerilimlerinde hava akış hızı eğrisi

Hava akış hızı dağılımları sunulan Şekil 2.9‘ da deneysel çalışmalar boyunca uygulanacak olan 0,20 – 0,29 – 0,38 m/s için fan gerilim değerleri belirlenmiştir. Hız dağılım grafiklerinde ayrıca hız vektörleri de sunulmuş olup tünel içi düzgün akış profillerinin sağlandığı görülmüştür. Testlerde uygulanacak hız değerleri sınır tabaka üzeri serbest akış bölgesi için alınmıştır.



Şekil 2. 9 Farklı fan gerilimlerinde hava akış hızı dağılımları, (a) 6V, (b) 9V, (c) 12V

Hava akış hız dağılım grafikleri x = 0 – 60 mm, y = 0 – 60 mm koordinatları için oluşturulmuş olup sınır tabaka bölgesinde Arçelik A.Ş' deki PIV sistemi komponentlerinden kameranın o bölge için piksel yanmasına bağlı problemi bulunmaktadır. Bu durum ölçüm hatası yaratmamakla birlikte o kısımdaki hız dağılımlarının göz ardı edilmesi gerekmektedir.

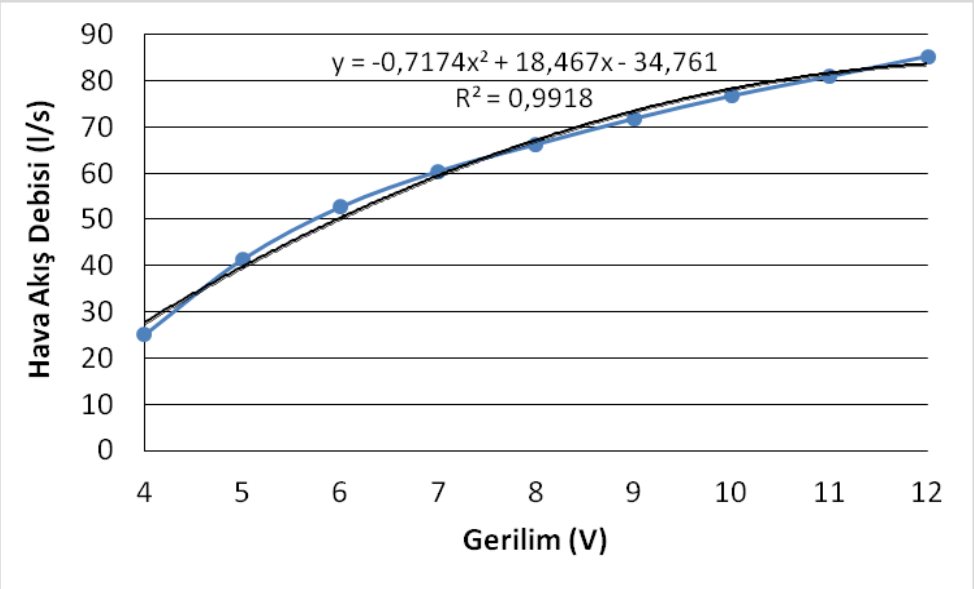
2.4.1.2 Debi Ölçümü

Zorlanmış taşınım koşullarını sağlamak için hazırlanan rüzgar tüneli boyunca hava akış debisinin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Bu sebeple, oluşturulan rüzgar tünelinde hava debisini ölçmek için Arçelik A.Ş Merkez Ar-Ge Akışkanlar Dinamiği Teknolojileri Laboratuvarı' nda yer alan büyük rüzgar tüneli kullanılmıştır. Deneyler esnasında kullanılacak tünel, ölçüm yapılacak olan tünele Şekil 2.10' daki gibi bağlanmıştır.



Şekil 2. 10 Rüzgar tüneli hava akış debisi ölçümleri

Ölçüm yapan rüzgar tünelinin çalışma prensibi, statik ve dinamik basınç farkı esasına dayanmaktadır. Tünelde kullanılan lülenin çapı Agilent VEE isimli programda girilerek farklı fan gerilimleri için deneyler yapılmıştır. 0,4 x 0,4 m^2 kesit alanındaki tünelde elde edilen hava akış debi değerleri Şekil 2.11' deki grafikte belirtilmiştir. Hız ölçümlerinde 6V - 9V - 12V olarak belirlenen fan gerilim değerleri buharlaşma deneyleri analizinde kullanılacak akış debileri için de geçerlidir.



Şekil 2. 11 Farklı fan gerilimlerinde tünel içi hava akış debisi eğrisi

2.4.1.3 Bağıl Nem Ölçümü

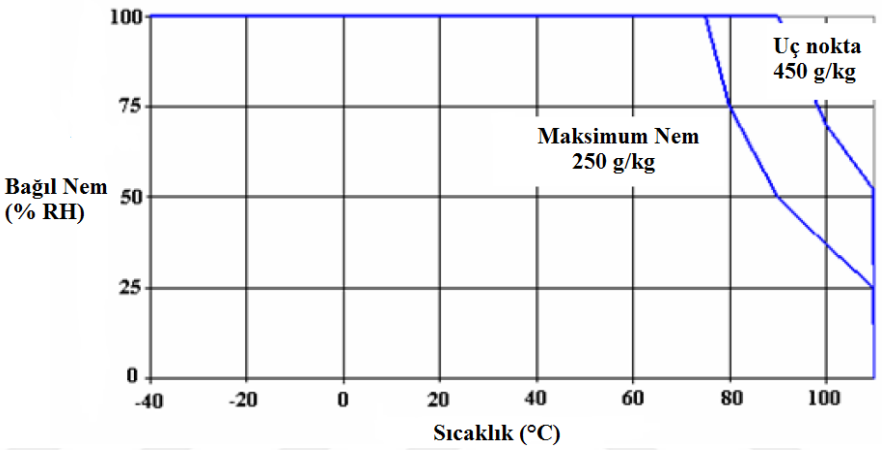
Deney sisteminde, ortam havasının bağıl nemini ölçme teknikleri üzerine yapılan araştırma sonucunda, düşük güçle çalışan elektriksel ve elektronik higrometresinden kapasitans değişimine göre çıktılar veren sıcaklık modüllü bir nem sensörünün kullanımının uygun olduğuna karar verilmiştir. Sensör çıkışında gerilim farkı ve akım değerleri esas alınmaktadır.

Elektriksel higrometrede malzemeninin nemi alması ve bırakması arası geçen sürede elektriksel direnç, empedans ve kapasitansta değişimler gözlenir ve bu değişim sayesinde sensör ile ölçüm yapılmış olur. Nem ölçümü için Şekil 2.12' deki MSI HTG3500 marka sensör kullanılmıştır.



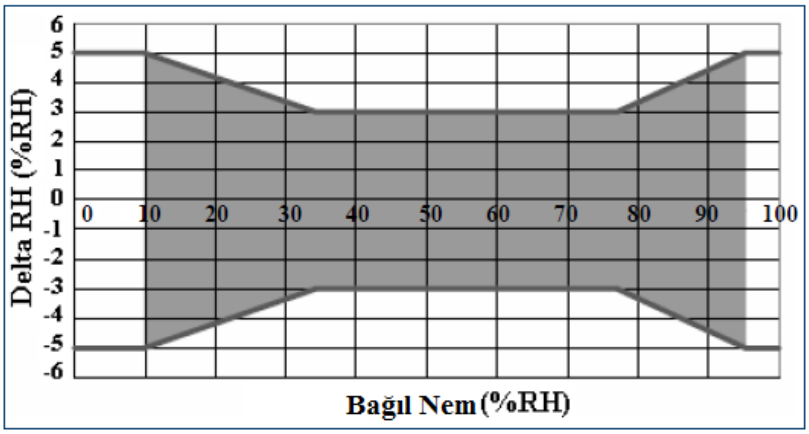
Şekil 2. 12 MSI HTG3500 marka nem sensörü

Şekil 2.13‘ te nem sensörünün çalışma aralıkları verilmiştir. Sensörler -40°C / 125 °C sıcaklık aralığında ve 0 -100 % bağıl nem aralığında çalışabilmektedir.

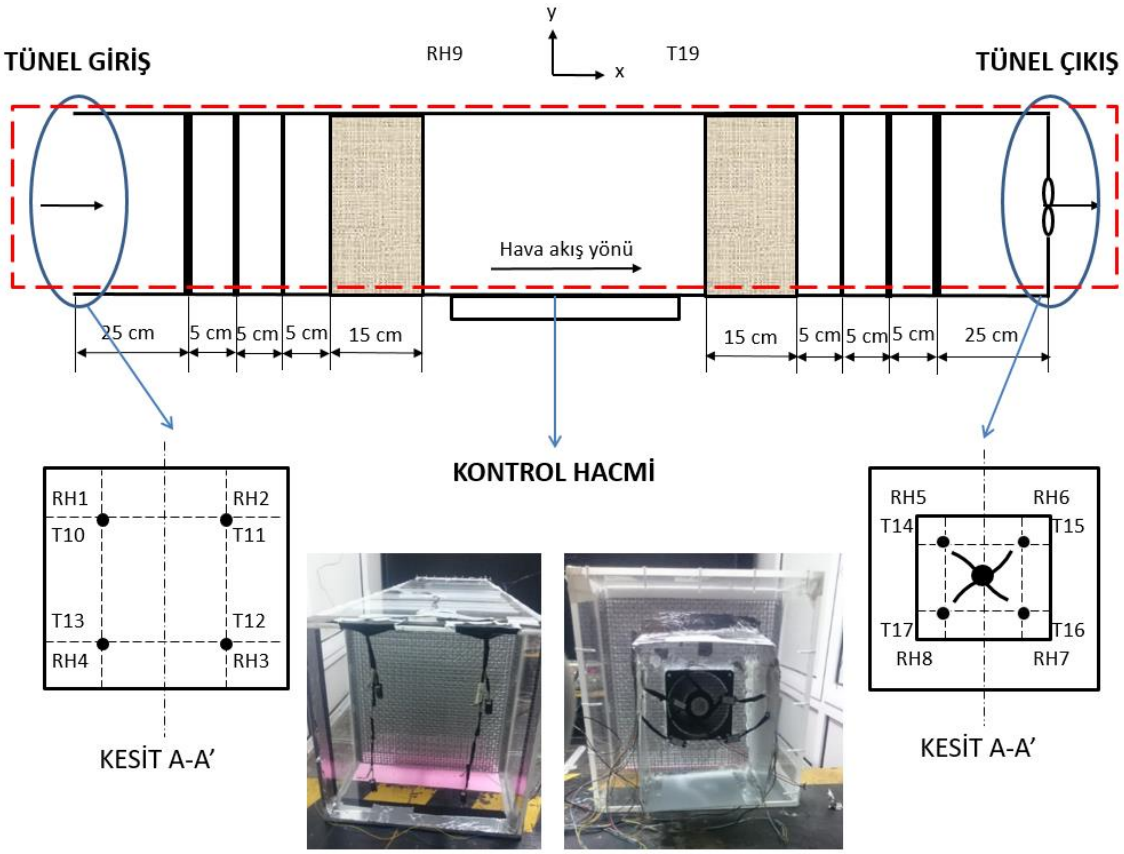


Şekil 2. 13 MSI HTG3500 sıcaklık modüllü bağıl nem sensörü çalışma aralığı

Şekil 2.14’ te görülebileceği gibi yüksek ve düşük bağıl nem değerlerinde sensörün nem ölçüm belirsizliği artmaktadır. %10 - %95 bağıl nem aralığında ölçüm belirsizliği % ±3 civarındadır.



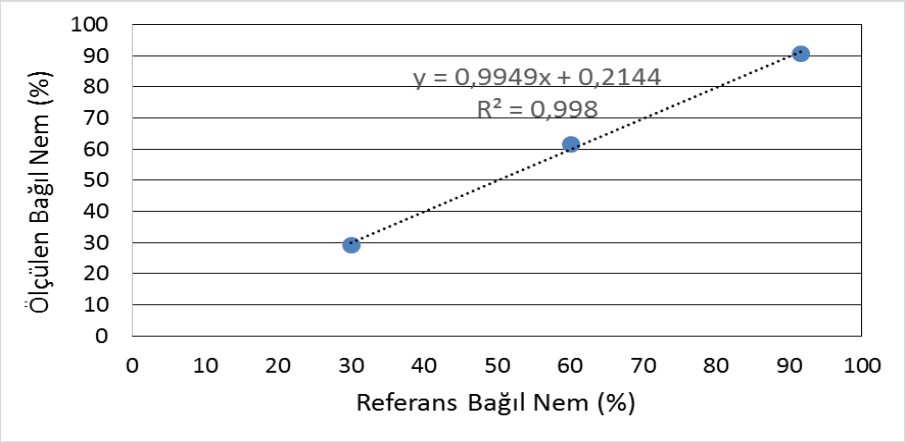
Şekil 2. 14 Bağıl nem-hata payı ilişkisi



Şekil 2. 15 Kontrol hacmi nem sensör yerleşimi

Rüzgar tüneli girişinden fan çıkışına kadar olan bölge kontrol hacmi olarak seçilmiştir. Ortam havasının bağıl nemi çalışmada bir parametre olduğundan veri takibinin zamana bağlı olarak yapılması gerekmektedir. Bu sebeple, Şekil 2.15' te detaylı olarak nem sensörlerinin yerleşimi sunulmuştur. Tünel giriş bölgesinde dört adet nem sensörü (RH1 - RH2 - RH3 - RH4) birbirinden 20 cm uzaklıkta x- ve y- yönlerinde konumlandırılmıştır. Dört adet nem sensörü ise (RH5 – RH6 – RH7 – RH8) fan çıkışından 8 cm ileriye yerleştirilmiştir. Tünelden çıkan havanın bir miktar uzaklıkta neminin ölçülmesinin sebebi fan sonrası havanın karışmasının sağlanmasıdır. Deney süresince giriş ve çıkış bağıl nem değerleri bu dörtlü ağ yapısının ortalamaları alınarak elde edilmektedir.

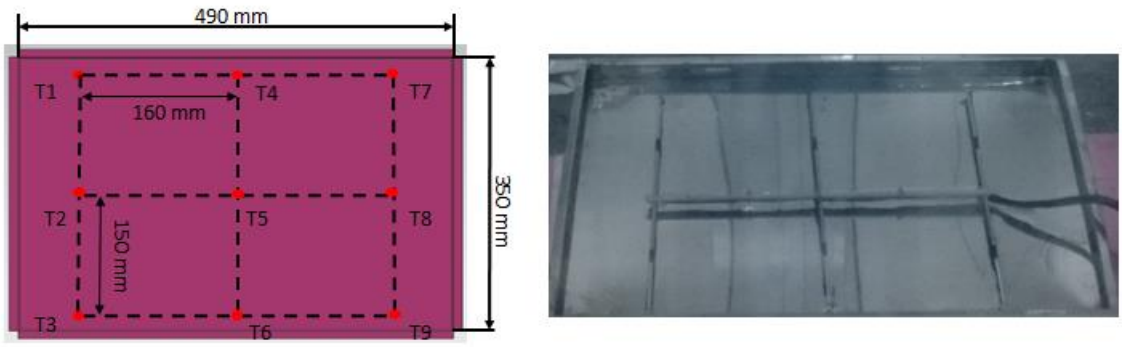
Deneylerden önce bağıl nem sensörlerinin kalibrasyonu Testo firmasının kalibratörü yardımıyla %30 - %60 - %90 bağıl nem değerlerinde yapılmıştır. Deneylerde kullanılan bir nem sensörünün kalibrasyon eğrisi Şekil 2.16' da yer almaktadır. Tüm nem sensörlerin kalibrasyon eğrisi denklemlerine Ek-B' den erişilebilmektedir.



Şekil 2. 16 Deneylerde kullanılan bir nem sensörünün kalibrasyon eğrisi

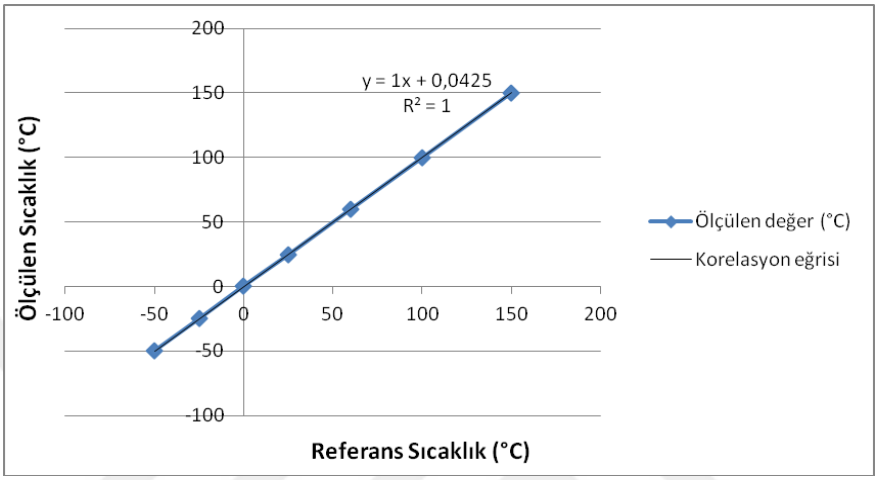
2.4.1.4 Sıcaklık Ölçümü

Deneylerde sıcaklık ölçümlerini gerçekleştirmek için T-tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Sistemde kullanılan termoelemanlar, bakır ve konstant uçların birleştirilmesi ile üretilmektedir. Kontrol hacminde ortam havasının bağıl nemini ölçmek için kullanılan noktalarda termoelemanlar da bulunmaktadır (Tünel Giriş: T10 – T11 – T12 – T13, Tünel Çıkış: T14 – T15 – T16 – 17, Şekil 2.15). Ayrıca gözenekli ortam yüzey sıcaklığını ölçmek için de Şekil 2.17' deki gibi termoeleman ağ yapısı oluşturulmuştur (T1' den T9' a). Termoelemanların ölçüm alan metal uç bölgesi tamamen gözenekli ortama veya serbest su yüzeyine gömülmüş olup hiçbir şekilde hava ile temas etmemektedir. (T19) ile şartlandırılmış odanın sıcaklığı ölçülmekte olup bu sayede rejim durumu takip edilebilmektedir.



Şekil 2. 17 Gözenekli ortam ve serbest su yüzeyi sıcaklığı ölçümü termoeleman ağ yapısı

Termoelemanların kalibrasyonu FLUKE 5500-A kalibratör yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, termoeleman kanallarına istenen sıcaklığa karşılık gelen gerilim değerini yollayarak termoeleman kalibrasyonu yapabilmektedir. -50°C ile +150°C arasında gerçekleştirilen kalibrasyon sonucunda, tüm termokupllar için gerekli düzeltme katsayıları elde edilmiş ve EK-B' de sunulmuştur. Şekil 2.18' de kalibrasyonu gerçekleştirilen bir termokuplun kalibrasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 2. 18 Deneylerde kullanılan bir termoelemanın kalibrasyon eğrisi

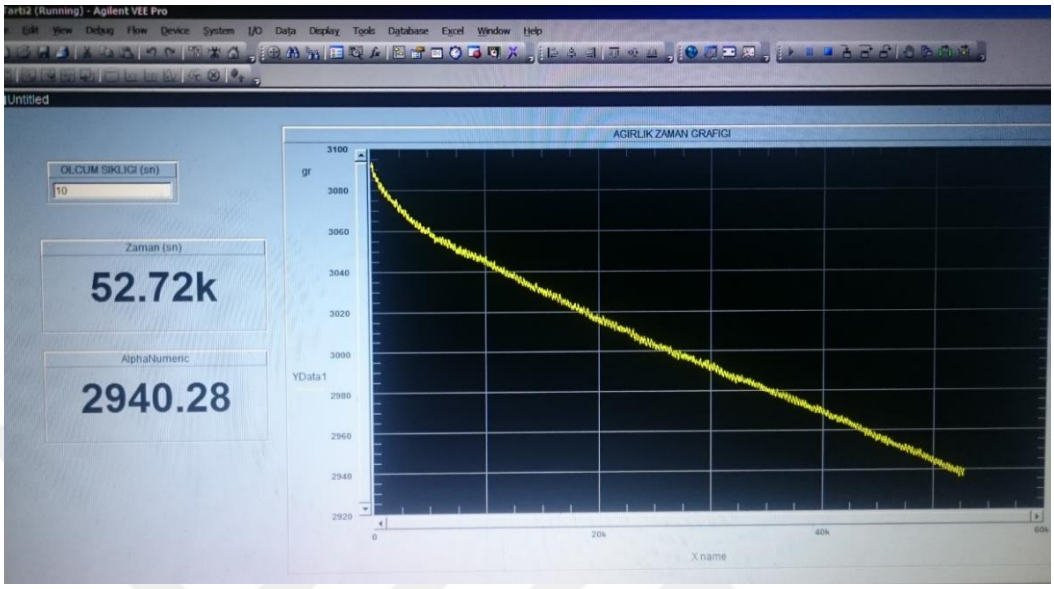
2.4.1.5 Ağırlık Ölçümü

Buharlaşma haznesinden suyun buharlaşmayla olan kaybı Mettler Toledo PG6002-SDR marka elektronik hassas terazi ile ölçülmüştür. Şekil 2.19' da ağırlık ölçümünde kullanılan terazinin ticari ve tez düzeneğindeki resmi gösterilmektedir. Maksimum ölçme kapasitesi 6100 g olan terazinin ölçüm kefesi boyutları 165 mm x 165 mm' dir. Mettler Toledo PG6002-SDR hassas terazisinin okunabilirliği 0,01 g / 0,1 g ve tekrarlanabilirliği 0,01 g / 0,03 g' dir.



Şekil 2. 19 Elektronik terazi

Testler boyunca RS-232 kablosuyla bir bilgisayara bağlı olan hassas teraziden ölçülen ağırlık verileri HP VEE programı yardımı ile zamana bağlı olarak okunmuştur. Şekil 2.20' de bir deneydeki zamana bağlı ağırlık değişim grafiği verilmektedir.



Şekil 2. 20 Anlık ağırlık değişim grafiği örneği

Ağırlık ölçümleri bu tez çalışmasında çok kritik bir öneme sahiptir. Terazi, Arçelik A.Ş bünyesinde kalibre edilen diğer cihazlar gibi ISO 9001 Kalite Güvence Standartları gereğince Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)' nden izlenebilirliği olan kalibratör kullanılarak kalibre edilmiştir.

2.4.2 Veri Toplama Sistemi

Deneysel çalışmalar şartlandırılmış test odasında gerçekleştirilmiş olup oda içinde bulunan iki istasyondan biri sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Bağıl nem sensörlerinin ölçümü için birinci istasyon ve ikinci istasyonun bir kısmı kullanılmıştır. Bir veri toplama istasyonundan aynı anda 64 kanaldan sıcaklık 8 kanaldan da gerilim değerleri okunabilmektedir. Gerilim kanalları bağıl nem sensörleri için kullanılmıştır. Deney düzeneğinde toplam 9 adet nem sensörü kullanıldığından sensörlerin 5 tanesi birinci istasyona, 4 tanesi ikinci istasyona bağlanmıştır.

Veri toplama istasyonları şartlandırılmış oda dışındaki veri toplama cihazına (datalogger) bağlanmıştır. Agilent marka 34970A veri toplama cihazı Şekil 2.21' de gösterilmiştir. Ayrıca oda içindeki tüm istasyonların veri toplama cihazlarının bağlı

olduğu ve anlık olarak istenilen aralıkta ölçüm değerlerinin kaydedilebilmesine, izlenebilmesine, grafik üzerine yansıtılabilmesine ve deney sonrası analiz yapılabilmesine olanak sağlayan bir çalışma istasyonu (work station) ve verilerin bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan HP VEE tabanlı bir yazılım programı bulunmaktadır. Program sayesinde, ölçüm değerleri anlık olarak görülebildiği gibi istenilen ortalama değer grafikleri de izlenebilmektedir.



Şekil 2. 21 Agilent 34970A veri toplama cihazı

2.5 Güç ve Kontrol Ünitesi

Deney tesisatında istenilen elektriksel güç değerlerini verebilmek için DC motorlu eksenel fan DC güç kaynağına, elektronik terazi ise AC güç kaynağına bağlanmıştır. DC güç kaynağı sayesinde farklı gerilimlerde fan debileri değiştirilerek gözenekli yüzey üzeri hız değerleri de değiştirilebilmektedir. Ayrıca nem sensörlerine DC güç kaynağı yardımıyla sürekli 5V gerilim uygulanmaktadır. Deneylerde kullanılan güç kaynağı Şekil 2.22' de görülmektedir.



Şekil 2. 22 DC güç kaynağı

BÖLÜM 3

SERBEST SU YÜZEYİNDEN BUHARLAŞMA DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Yalıtımlı bir ısı odasında istenilen hava şartlarının sağlandığı, ek olarak hava akış hızının rüzgar tüneli vasıtasıyla ayarlanabildiği bir sistemde gözenekli ıslatılmış bir yüzeyden buharlaşmanın incelenmesi amacıyla parametrik bir deney düzeneği kurulmuştur. Öncelikle, bu düzeneğin doğrulanması için literatürde sıkça çalışılmış olan serbest su yüzeyinden buharlaşma konusunda Çizelge 3.1' de verilen deney matrisine göre deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

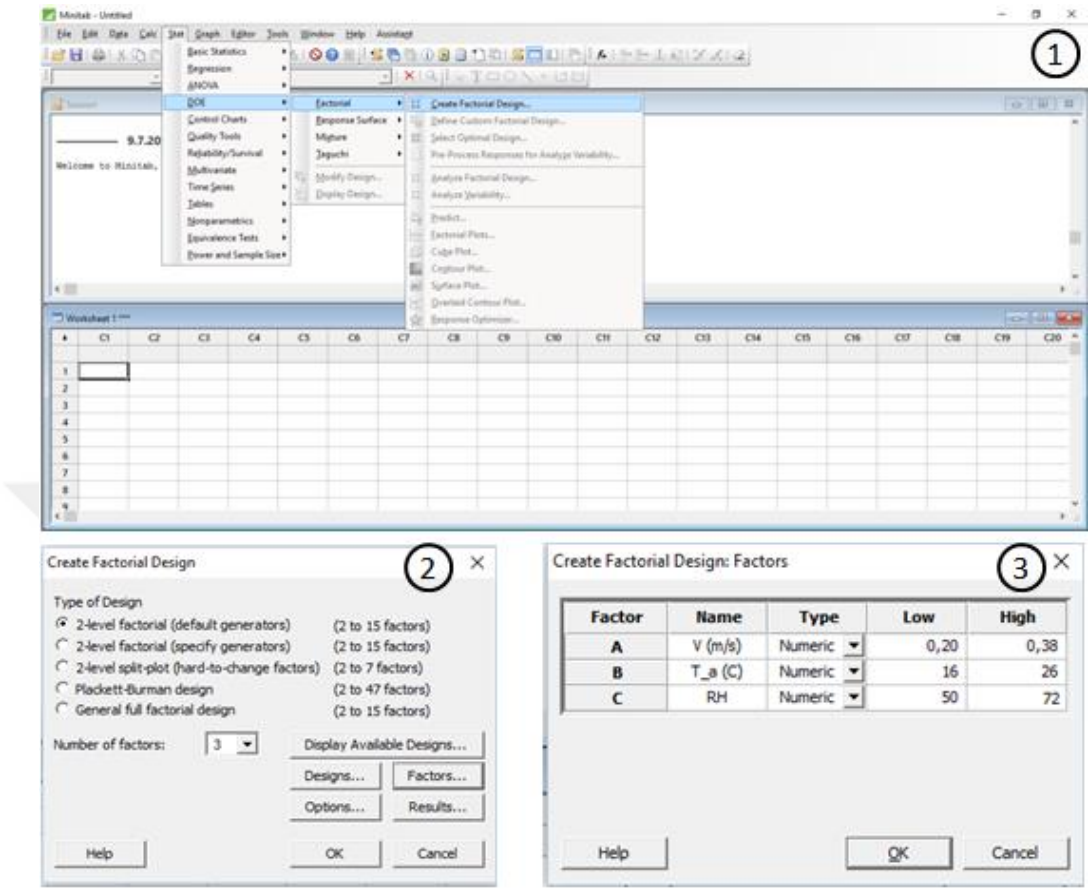
Çizelge 3. 1 Serbest su yüzeyinden buharlaşma deneysel çalışmalarında uygulanan parametrik deney matrisi

Hava Akış Hızı (m/s)	Hava Sıcaklığı (°C)	Havanın Bağıl Nemi (%)
0,20	16	50
0,29	21	61
0,38	26	72

3.1 Deneysel Tasarım Sisteminin Oluşturulması

Deneysel çalışmalar boyunca toplam deney sayısı çok olduğundan bu sayıyı azaltmak ve doğru bir deney stratejisi oluşturmak amacıyla DOE (Design of Experiment) yöntemi kullanılmıştır. Bu sebeple, en az iki veya daha fazla parametre ve bu parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyenin bulunduğu deneylerde, seviyelerin birbirleri ile çarpımları ile oluşan kombinasyon olan tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımında rastsal tam bloklamalar kullanılır. Bloklamanın temel amacı bilinmeyen ve kontrol edilemeyen hataların deneyi etkilemesini önlemesidir

[28]. Deney tasarımını oluşturmak ve sonrasında sonuçları analiz etmek için Minitab 17.0 istatistiksel analiz programı kullanılmıştır.

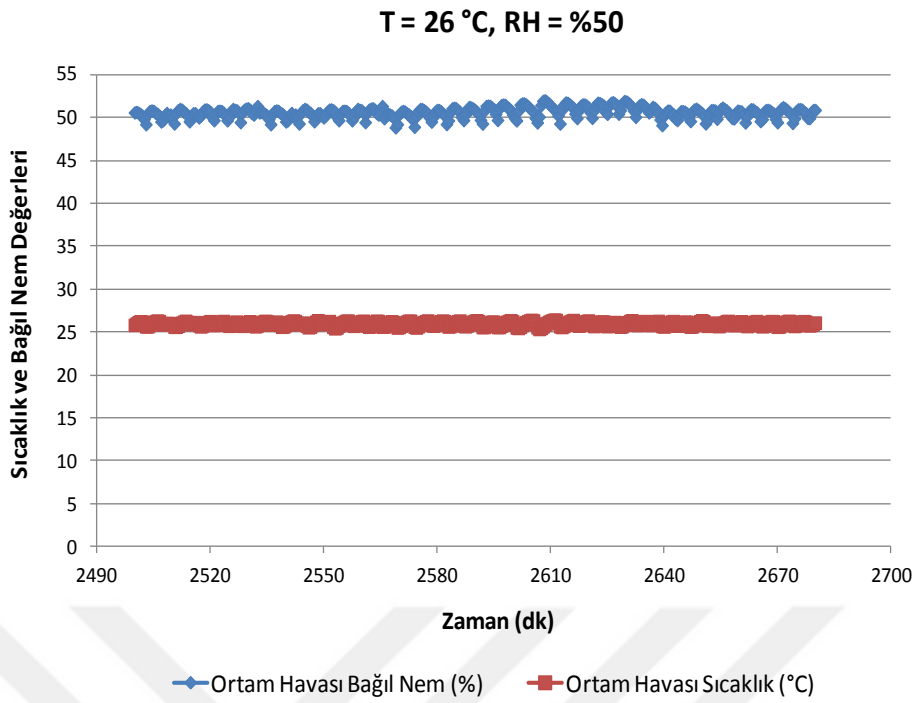


Şekil 3. 1 Serbest su yüzeyi deneysel tam faktöriyel tasarımın oluşturulması

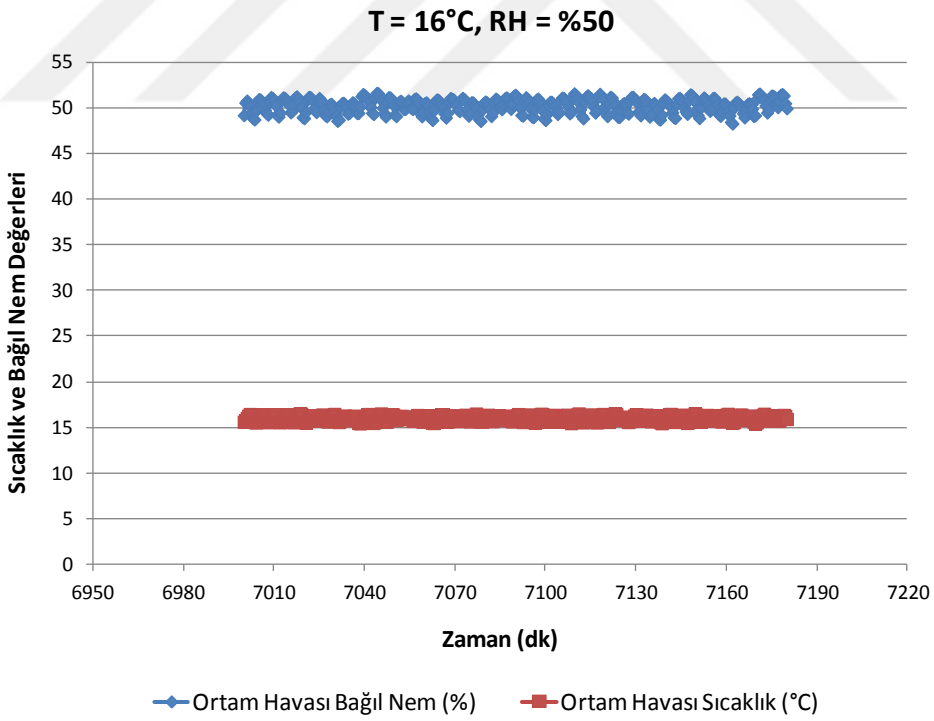
Deneysel çalışmalar öncesinde gerçekleştirilmesi gereken deney setleri her seviyenin düşük ve yüksek değerlerinin çaprazlanmasıyla oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Bir adet de her seviyenin orta değerleri kullanılarak orta nokta deneyi yapılmıştır. $2^3 + 1 = 9$ adet deney iki tekrarlı olarak uygulanmıştır.

3.2 Deney Koşulları ve Başlangıç Şartları

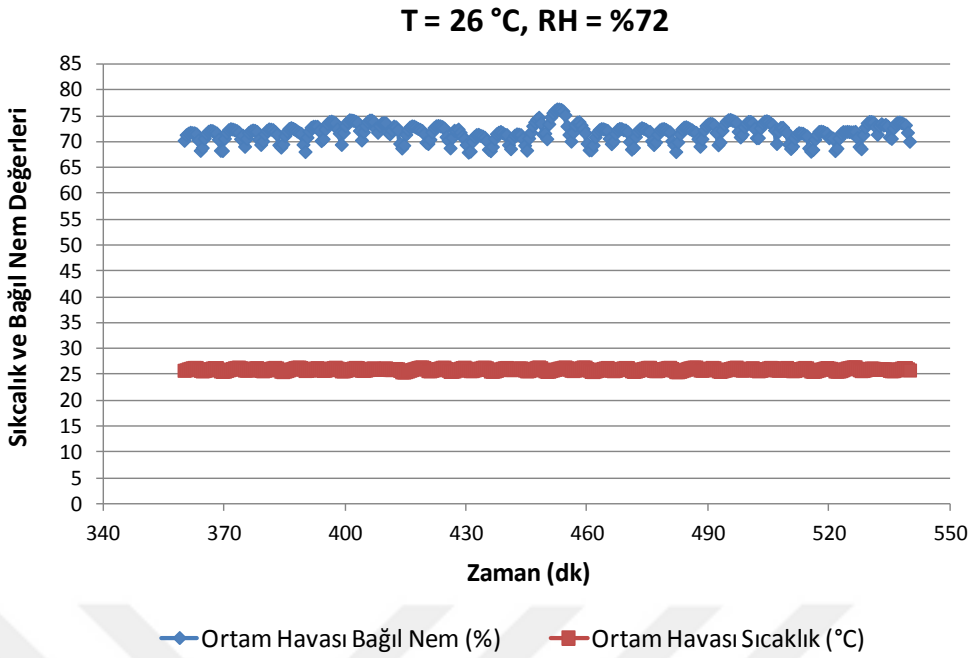
Deneyler süresince şartlandırılmış ısı odası içi bağıl nem ve sıcaklık değerleri Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6' daki gibi istenen değerlere ayarlanmıştır. Tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanan tez çalışmasında havanın sıcaklık değerleri 16 °C - 21 °C - 26 °C, havanın bağıl nem değerleri %50 - %61 - %72 olarak set edilmiştir.



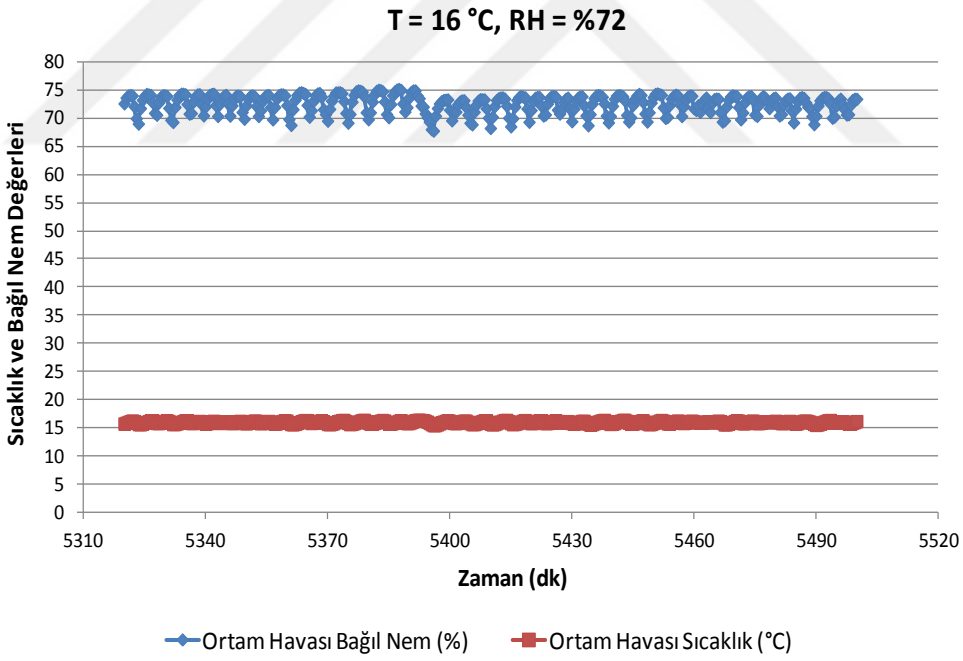
Şekil 3. 2 Ortam havası T = 26 °C, RH = %50 durumu



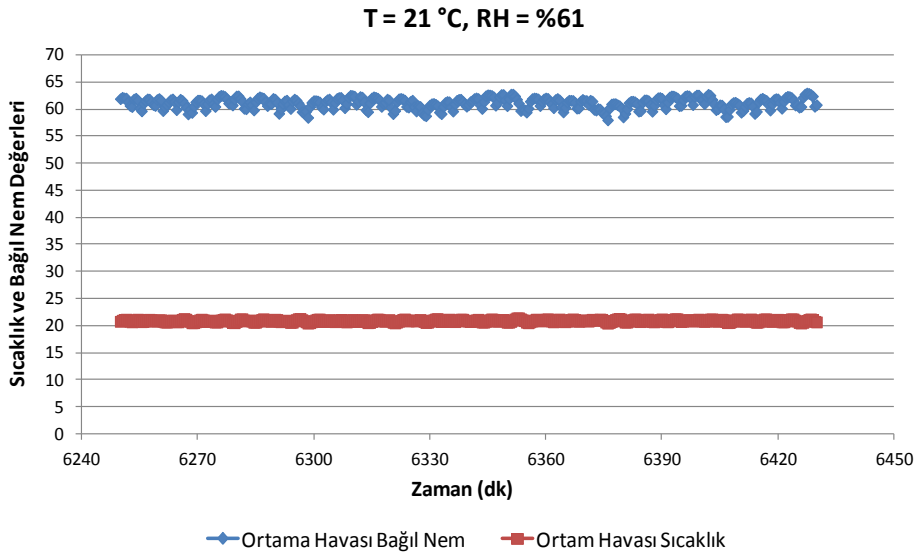
Şekil 3. 3 Ortam havası T = 16 °C, RH = %50 durumu



Şekil 3. 4 Ortam havası T = 26 °C, RH = %72 durumu



Şekil 3. 5 Ortam havası T = 16 °C, RH = %72 durumu



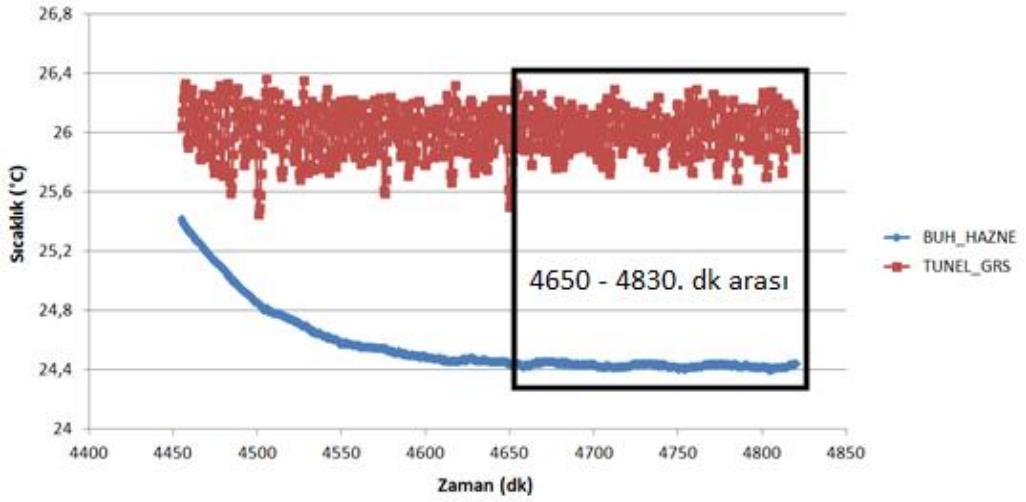
Şekil 3. 6 Ortam havası T = 21 °C, RH = %61 durumu

Yüzey üzeri ortalama hava akış hızları 2.4.1.1 bölümünde anlatıldığı üzere PIV tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Tam faktöriyel tasarımda düşük seviye olarak 0,20 m/s, yüksek seviye olarak 0,38 m/s ve orta nokta olarak ise 0,29 m/s hava akış hızları kullanılmıştır.

Her deneyden önce DC güç kaynağı yardımıyla fanın gerilimi değiştirilerek istenen hava akış hızı değerleri elde edilmiştir. Sonrasında buharlaşma haznesi su ile doldurularak yüzey sıcaklık gridi yerleştirilmiş ve tünelin yan kapağı kapatılmıştır. Deneyler ısı odası içi sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin dengeye geldiği anda başlatılmıştır. Fakat, buharlaşma haznesine doldurulan suyun sıcaklığı şartlandırılmış odanın sıcaklığından farklı bir değerde olduğundan öncelikle hava ve su arasında sıcaklık dengesinin oluşması için bir süre beklenmiştir. Denge durumu oluştuğunda ise deney başlatılmış olur ve her bir deney 3 saat sürer.

Hava-su arayüzeyinde oluşan sıcaklık farkının dengeye gelmesi zamana bağlı ağırlık ölçümünü de etkilemektedir. Örneğin; ortam havası 26 °C' ye şartlandırıldığında, hazneye konan suyun sıcaklığı yaklaşık olarak 25,5 °C olduğu için deneyin ilk anlarında yüksek buharlaşma hızları görülür. Yüzey sıcaklığı denge durumuna gelene kadar hızlı bir düşüş yaşamaktadır. Bu aralıkta gerçekleşen buharlaşma verilerinin esas alınması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, nispeten çok düşük salınımların olduğu sıcaklık farklarında deney başlatılmış ve 3 saat süreyle su kaybı verileri zamana bağlı olarak HP

VEE programı vasıtasıyla kaydedilmiştir. Örnek bir deneyin hava-su arayüzeyindeki sıcaklık farkına göre başlangıç durumu Şekil 3.7' de sunulmuştur.



Şekil 3. 7 Örnek bir deneydeki başlangıç koşulu hava-su arayüzeyi sıcaklık farkı grafiği

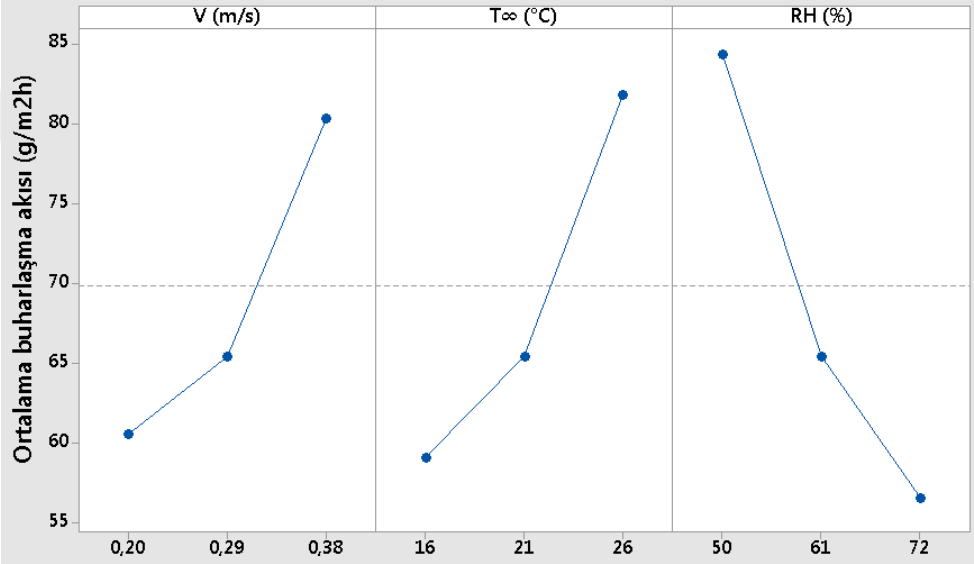
3.3 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi

Ortam havasının farklı sıcaklık ve bağıl nemde olduğu durumda yüzey üzeri ortalama hava akış hızının değiştirilmesiyle elde edilen deneysel buharlaşma hızı ve buharlaşma akısı sonuçları Çizelge 3.2' de verilmiştir. Sonuçlar, hava-su arayüzeyinde oluşan sıcaklık farkı ve havanın bağıl neminin, başka bir ifadeyle kısmi buhar basınç farkının dengede olduğu durumda elde edilmiştir. Su kaybı değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiş ve akı değerleri 0,1715 m^2 kütle transfer yüzey alanı için değerlendirilmiştir.

Çizelge 3. 2 Yatay serbest su yüzeyinden parametrik buharlaşma sonuçları

Test No	V (m/s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	ϕ (%)	$\dot{m}$ (g/h)	E (g/m^2h)
1	0.20	14	16	50	10.061	58.665
2	0.38	14	16	50	12.480	72,770
3	0.20	23	26	50	15.167	88.437
4	0.38	23	26	50	20.130	117.376
5	0.20	15	16	72	7.110	41.458
6	0.38	15	16	72	10.893	63.516
7	0.20	24	26	72	9.213	53.720
8	0.38	24	26	72	11.603	67.656
9	0.29	19	21	61	11.221	60.426

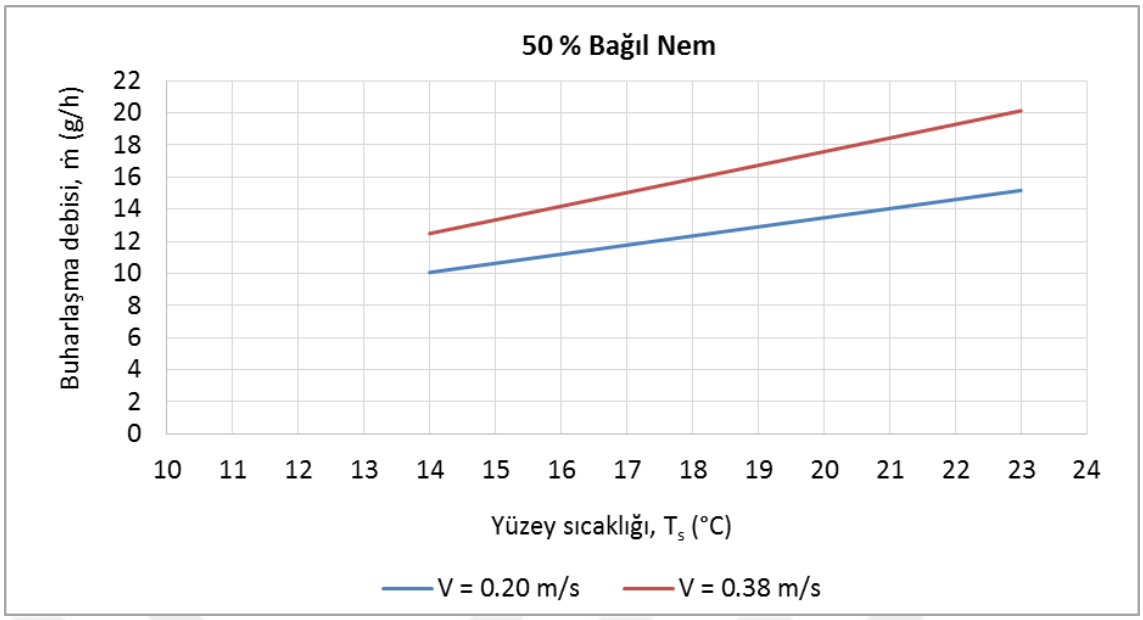
Şekil 3.8’ e bakıldığında, her bir parametrenin serbest yüzeyden suyun buharlaşması üzerindeki ana etkileri görülmektedir. Hava akış hızının artmasıyla hava-su arayüzeyinde kütle transfer katsayısı ile zorlanmış taşınım etkinliği artacağından buharlaşma akısı da lineere yakın bir artış göstermiştir. Bunun yanında, ortam havasının sıcaklığını artırmak arayüzeyde kısmi buhar basınç farkının artmasına neden olacağından buharlaşma akısı da artmaktadır. Fakat, bağıl nem için tersi bir durum geçerlidir. Bağıl nemi artırmak havanın su buharına doygunluğunu artırmak anlamına gelir ki bu da ortamlar arası kısmi buhar basınç farkını azalttığından sudan havaya kütle transferi zorlaşır ve buharlaşma akısı azalır.

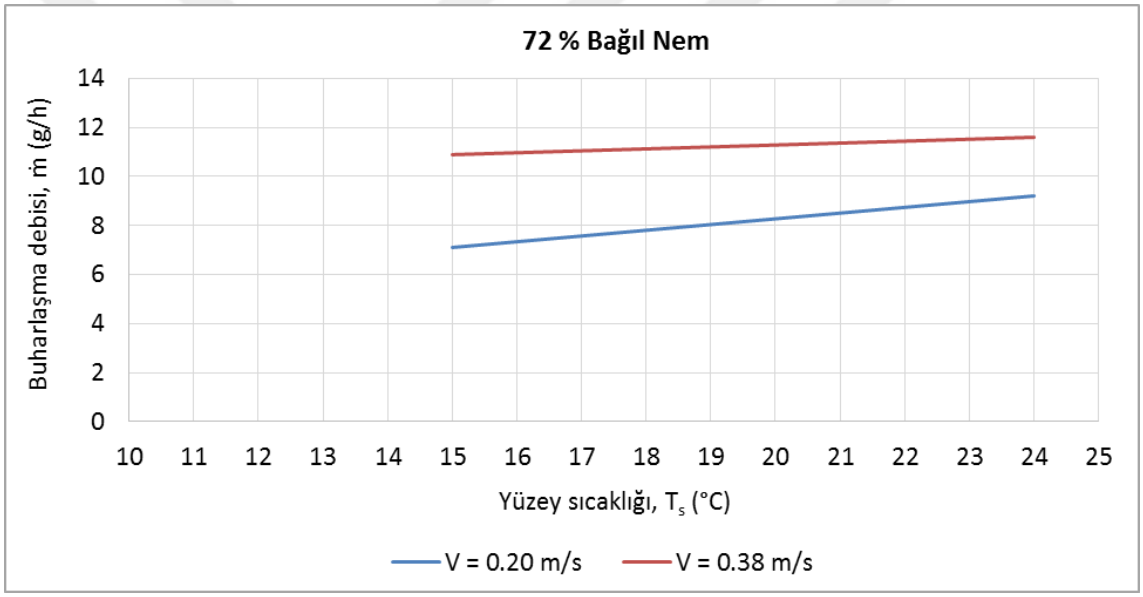


Şekil 3. 8 Parametrelerin serbest su yüzeyinden buharlaşma akısı üzerindeki ana etkileri

Hava akış hızı sabit tutulduğunda, hava sıcaklığı artırılıp bağıl nem düşürülürse kısmi buhar basınç farkının artmasıyla yüzeyden su kaybı da artmaktadır. Bağıl nem sabit tutulduğunda ise hava akış hızı ile birlikte hava sıcaklığının artması buharlaşmayı artıracaktır. İlk durum doğal taşınımlı buharlaşma prosesinin sonucu iken ikinci durum doğal taşınım ve zorlanmış taşınımlı buharlaşmanın kombinasyonu ile oluşmuştur.

Sonuç olarak; en fazla buharlaşma 117,38 g/m^{2}h ile hava sıcaklığı 26 °C, bağıl nem 50 % ve yüzey üzeri ortalama hava akış hızı 0,38 m/s iken gerçekleşmiştir. Tersine en az buharlaşma ise 41,46 g/m^{2}h ile hava sıcaklığı 16 °C, bağıl nem 70 % ve yüzey üzeri ortalama hava akış hızının 0,20 m/s olduğu durumda meydana gelmiştir.





Şekil 3. 9 Yüzey sıcaklığına göre buharlaşma akısı değişimi

Deneysel çalışmalar boyunca yüzey sıcaklığının istenilen değerde tutulması için ayrı bir ısıtma veya soğutma cihazı kullanılmamıştır. Isı odasında hava sıcaklığının set edildiği değere göre değişim gösteren serbest su yüzey sıcaklığı buharlaşma prosesinde önemli bir yer tutmaktadır. Şekil 3.9' daki grafiklerden de görüleceği üzere, su yüzey sıcaklığı arttıkça kısmı buhar basınç farkının da artmasına bağlı olarak buharlaşma debisi artma eğilimi göstermiştir. Bağıl nem artırıldığında hava neme doymaya yakın bir duruma geldiğinden su yüzey sıcaklığının artmasının buharlaşmaya etkisi çok düşük seviyededir.

BÖLÜM 4

GÖZENEKLİ ISLATILMIŞ YÜZEYDEN BUHARLAŞMA DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Gözenekli ıslatılmış yüzeylerden buharlaşma olayına çevremizde sıkça rastlanmaktadır. Özellikle; pasif soğıutma sistemlerinde, evsel tip kurutucularda ve doğada tarımsal alanlarda görülen buharlaşma birçok çevresel faktörden etkilenmektedir. İklimsel koşullar olan hava sıcaklığı ve bağıl nemin yanında yüzey üzeri hava akış hızları buharlaşmaya sebep olan en önemli parametrelerdir. Ayrıca, geçmişte yapılan çalışmalara bakıldığında gözenekli ortamın yüzdesel su içeriğinin de kütle transferine etkisinin olduğu ifade edilmiştir.

Bir önceki bölümde deneysel çalışma yöntemi ve sonuçları paylaşılan yatay serbest bir su yüzeyinden buharlaşma konusu gözenekli ortamdan buharlaşma testleri için temel oluşturmaktadır. Aynı deney düzeneği ve deney yöntemi gözenekli yüzey çalışmaları için de kullanılmıştır. Çizelge 4.1' de verilen deney matrisine göre deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4. 1 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma deneysel çalışmalarında uygulanan parametrik deney matrisi

Hava Akış Hızı (m/s)	Hava Sıcaklığı (°C)	Havanın Bağıl Nemi (%)	Gözenekli Ortam Su İçeriği (%)
0,20	16	50	41
0,29	21	61	49
0,38	26	72	57

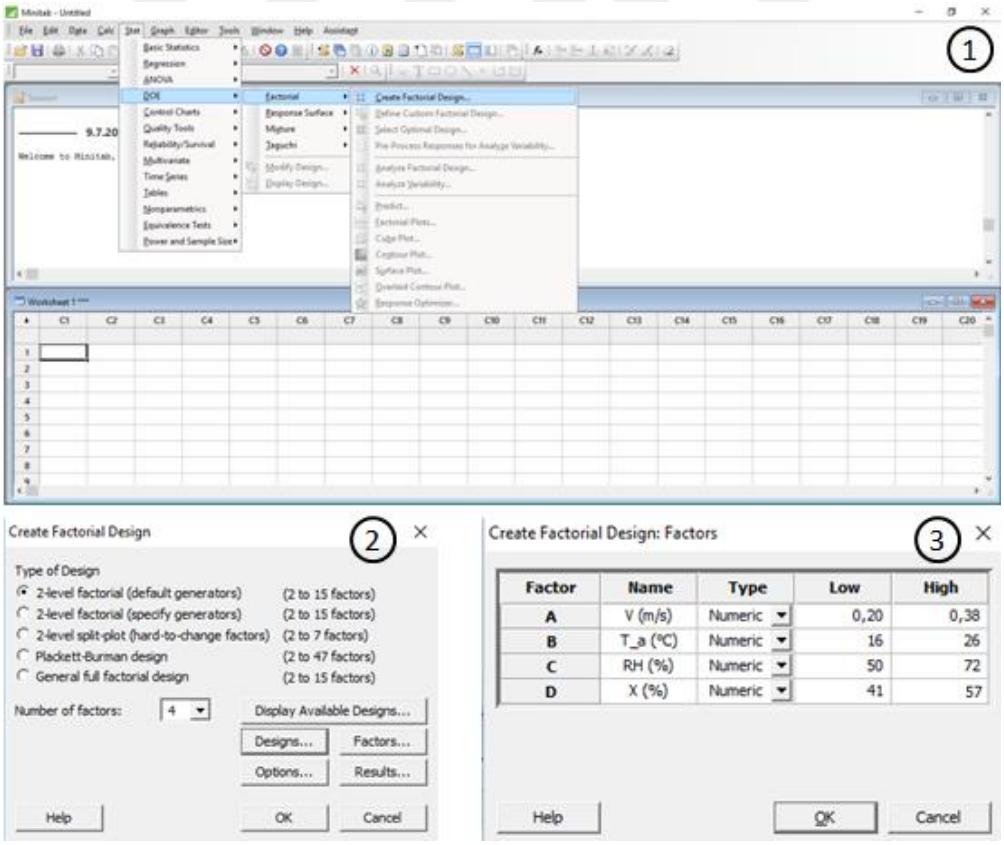
Parametrik deney matrisinde yer alan gözenekli ortam başlangıç su içeriği (IWC) Eşitlik (4.1) ile ifade edimektedir.

$$X = \frac{M_{su}}{M_{toplam}} = \frac{M_{su}}{M_{su} + M_{ortam}} \tag{4.1}$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan X (%) başlangıç su içeriğinin yüzdesel karşılığı olarak tanımlanmaktadır. M_{toplam} gözenekli kuru ortamın kütlesi (gr), M_{su} ise ortam içindeki suyun kütlesi (gr) olarak simgelenmiştir.

4.1 Deneysel Tasarım Sisteminin Oluşturulması

Deneysel çalışmalar boyunca toplam deney sayısı çok olduğundan bu sayıyı azaltmak ve doğru bir deney stratejisi oluşturmak amacıyla DOE (Design of Experiment) yöntemi kullanılmıştır. Bu sebeple, serbest su yüzeyi çalışmasında olduğu gibi tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Deney tasarımını oluşturmak ve sonrasında sonuçları analiz etmek için Minitab 17.0 istatistiksel analiz programından yararlanılmıştır.



Şekil 4. 1 Gözenekli ıslatılmış yüzey deneysel tam faktöriyel tasarımın oluşturulması

Deneysel çalışmalar öncesinde gerçekleştirilmesi gereken deney setleri her seviyenin düşük ve yüksek değerlerinin çaprazlanmasıyla oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Bir adet de her seviyenin orta değerleri kullanılarak orta nokta deneyi yapılmıştır. $2^4 + 1 = 17$ adet deney iki tekrarlı olarak yapılmıştır.

4.2 Deney Koşulları ve Başlangıç Şartları

Tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanan bu çalışmada serbest su yüzeyi için şartlandırılan yalıtımlı ısı odası gözenekli ıslatılmış yüzey için de aynı sıcaklık ve bağıl nem değerlerine set edilmiştir. Havanın sıcaklık set değerleri 16 °C - 21 °C - 26 °C ve bağıl nem set değerleri %50 - %61 - %72' dir.

Yüzey üzeri ortalama hava akış hızları 2.4.1.1 bölümünde anlatıldığı üzere PIV tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Tam faktöriyel tasarımda düşük seviye olarak 0,20 m/s, yüksek seviye olarak 0,38 m/s ve orta nokta olarak ise 0,29 m/s hava akış hızları kullanılmıştır.

Deney düzeneğinin geçerliliğinin test edilmesi amacıyla yapılan serbest su yüzeyinden buharlaşma çalışmalarındaki deney başlangıç ve bitiş koşulları bu çalışmada da kullanılmıştır. Tez kapsamında araştırılmak istenen gözenekli yüzeyden buharlaşma etkinliği için gözenekli ortam farklı su kütleleriyle karıştırılmıştır. Yüzdesel olarak verilen başlangıç su içeriği parametresi her deney öncesinde istenilen değere ayarlanır. Çizelge 4.2' de kuru ortam ve su kütlesine bağlı IWC değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4. 2 Deneylerde kullanılan başlangıç su içeriği yüzdeleri

Gözenekli Kuru Ortam Kütlesi (gr)	Su Kütlesi (gr)	Başlangıç Su İçeriği (IWC) (%)
500	350	41
500	480	49
500	660	57

Buharlaşma haznesi yukarıdaki çizelgede verilen yüzdelere göre homojen olarak ıslatılmış gözenekli ortam ile doldurulmuştur. Yüzeye termoeleman sıcaklık gridi yerleştirilip tünel yan kapağı kapatılmıştır.

Deneyler, hava ve ortam yüzeyi arasında sıcaklık farkının dengede olduğu anda başlatılıp 3 saat süreyle sıcaklık, bağıl nem ve ağırlık ölçüm değerleri HP VEE programı vasıtasıyla kaydedilmiştir.

4.3 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi

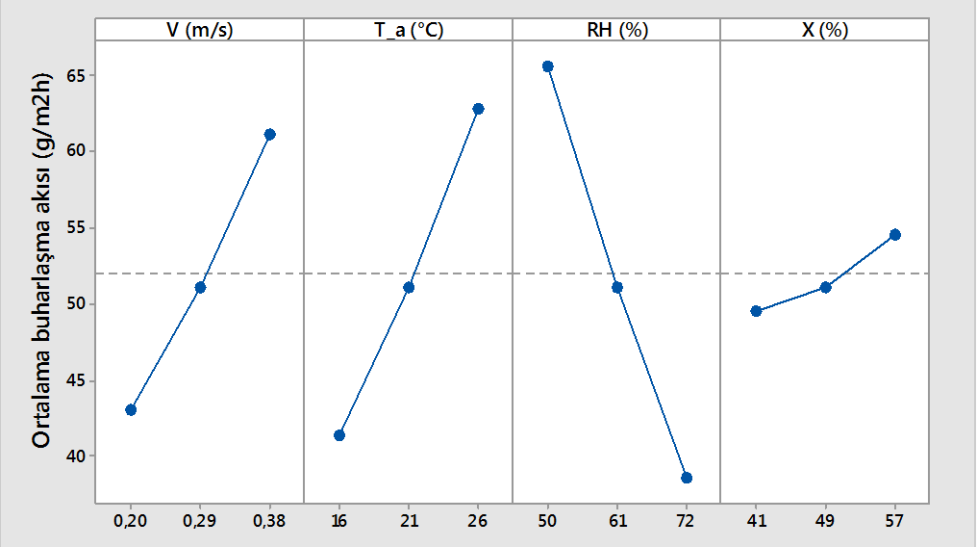
Islatılmış yatay gözenekli ortam başlangıç su içeriğinin farklı yüzdesel değerlerde ve çevre havasının farklı sıcaklık ve bağıl nemde olduğu durumda yüzey üzeri ortalama hava akış hızının değiştirilmesiyle elde edilen deneysel buharlaşma hızı ve buharlaşma akısı sonuçları Çizelge 4.3' te verilmiştir. Sonuçlar, hava-su arayüzeyinde oluşan sıcaklık farkı ve havanın bağıl neminin, başka bir ifadeyle kısmi buhar basınç farkının dengede olduğu durumda elde edilmiştir. Su kaybı değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiş ve akı değerleri 0,1715 m^2 kütle transfer yüzey alanı için değerlendirilmiştir.

Çizelge 4. 3 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden parametrik buharlaşma sonuçları

Test No	V (m/s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	ϕ (%)	X (%)	$\dot{m}$ (g/h)	E (g/m^2h)
1	0,20	14,5	16	50	41	7,503	43,749
2	0,38	14,5	16	50	41	9,300	54,227
3	0,20	23,5	26	50	41	10,753	62,700
4	0,38	23,5	26	50	41	15,230	88,805
5	0,20	15	16	72	41	3,653	21,300
6	0,38	15	16	72	41	6,113	35,644
7	0,20	24,4	26	72	41	6,620	38,601
8	0,38	24,4	26	72	41	8,820	51,429
9	0,20	14,5	16	50	57	8,023	46,781
10	0,38	14,5	16	50	57	10,757	62,723
11	0,20	23,5	26	50	57	11,127	64,480
12	0,38	23,5	26	50	57	17,363	101,244
13	0,20	15	16	72	57	4,213	24,566
14	0,38	15	16	72	57	7,223	42,117
15	0,20	24,4	26	72	57	7,183	41,883
16	0,38	24,4	26	72	57	9,080	52,945
17	0,29	19	21	61	49	8,775	51,165

Dört farklı parametrenin buharlaşma akısına ana etkileri Şekil 4.2' deki grafikte açıkça görülmektedir. Ortalama hava akış hızının artması çevre havası ile gözenekli yüzey arasında zorlanmış taşınımı artıracağından buharlaşma akısı da lineer bir artış göstermiştir. Hava sıcaklığının artması ile arayüzde kısmi buhar basıncı artar ve buharlaşma akısı da artar. Bağıl nemde ise bahsedilen ilk iki parametrenin gösterdiği etkinin tam tersi gerçekleşmektedir. Gözenekli yüzey üzerinden geçen havanın bağıl nemi ne kadar düşük olursa derişiklik farkı yükselir ve buharlaşma etkinliği artar.

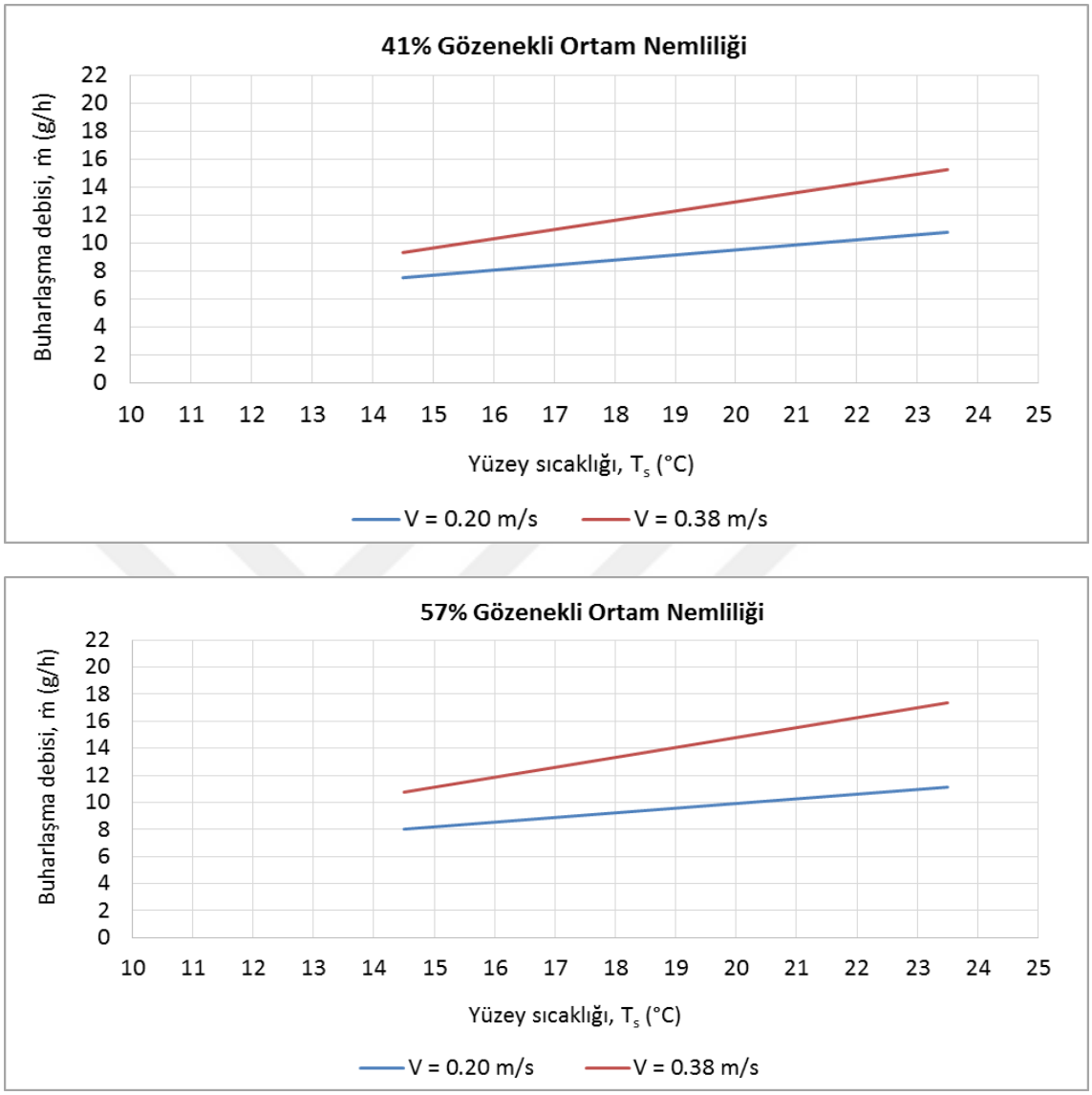
Gözenekli ortam, su tutma kapasitesi yüksek bir malzeme olduğundan içerdiği su miktarını artırmak buharlaşma üzerinde anlamlı bir etkiye sebep olmamıştır. Bu da, zamanla buharlaşmanın artmasının istenmediği durumlar için uygun bir malzeme olduğunu bizlere ispatlamaktadır.



Şekil 4. 2 Parametrelerin gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma akısı üzerindeki ana etkileri

En fazla buharlaşma 101,24 g/m^{2}h ile hava sıcaklığı 26 °C, bağıl nem 50%, yüzey üzeri ortalama hava akış hızı 0,38 m/s ve gözenekli ortam başlangıç su içeriği 57% iken gerçekleşmiştir. Fiziksel etkiler anlamında bakıldığında, hava sıcaklığını yüksek tutup bağıl nem yüzdesini kuru havaya yaklaştırmak doğal taşınımlı kütle transferini artırmıştır. Hava akış hızının yüksek olması ise zorlanmış taşınımlı buharlaşmayı artırır. Buharlaşma yüzeyden gerçekleşen bir durum olduğu için gözenekli ortamın su içeriğinin artması yüzeydeki su içeriğini artırır, bu nedenle diğer set durumlarına göre aynı deney süresinde buharlaşma akısı artar. Tersine en az buharlaşma ise 21,30 g/m^{2}h

ile hava sıcaklığı 16 °C, bağıl nem 70%, yüzey üzeri ortalama hava akış hızının 0,20 m/s ve gözenekli ortam başlangıç su içeriği 41% olduğu durumda meydana gelmiştir.



Şekil 4. 3 Farklı gözenekli ortam nemliliğinde yüzey sıcaklığının buharlaşma akısına etkisi

Serbest su yüzeyi çalışmalarında incelenen yüzey sıcaklığının buharlaşma akısına etkisi Şekil 4.3' te gözenekli ortam için de irdelenmiştir. 50% bağıl nem durumu için oluşturulan grafiklere bakıldığında, gözenekli ortam yüzey sıcaklığı 14.5°C' tan 23.5 °C' ye geldiğinde buharlaşma akısını artırmıştır. Yüzey sıcaklığının artması doyma basıncının artması anlamına gelir ki bu da hava-su arayüzeyinde kısmi buhar basınç farkını artırmaktadır. Buharlaşmanın temel mekenizması olan doğal taşınım etkilerinin incelenmesi adına yüzey sıcaklığının farkı koşullar için irdelenmesi gerekmektedir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL HATALAR VE BELİRSİZLİK ANALİZİ

Deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin doğruluğunu bilmek çok önemlidir. Testler esnasında çeşitli sebeplerden dolayı hatalar ortaya çıkmaktadır. Bu hataları en aza indirgemek yapılan çalışmanın güvenilirliğini artıracaktır.

Deneysel çalışma hataları üç şekilde ortaya çıkabilir. Bunlardan ilki, ölçüm yapan kişilerden kaynaklanan hatalardır. Deneyleri gerçekleştiren araştırmacının o anki ruh hali, teknik bilgisi ve fiziksel durumu bu tarz hatalarda etkildir. Dikkatli ve özenli bir şekilde testlerini yapan kişiler için bu hatalar ihmal edilebilir. İkincisi, ölçülen özellikten oluşan hatalardır. Ölçülmesi amaçlanan özelliğin tam olarak tanımının yapılması gereklidir. Son olarak ise, ölçüm cihazlarından kaynaklanan hatalardır ki bu hataların giderilmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Çünkü, ölçümlerde kullanılan bu cihazların kendi yapısı gereği belli hataları vardır.

Ölçüm cihazlarından kaynaklanan hataların giderilmesi belirsizlik tespitinde en önemli unsurdur. Bu hatalar da kendi arasında üçe ayrılmaktadır. İlk olarak, deneysel ölçüm cihazlarının üretiminden kaynaklanan hatalardır ve doğru yapılırsa ihmal edilir. Diğer ikisi, ölçüm sonucunda aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında oluşan sabit hatalar ve elektronik salınımlar sebebiyle ortaya çıkan rastgele hatalardır. Sabit hatalar bir kalibrasyon işlemi ile giderilebilir. Sabit ve rastgele hatalar belirlenip deneysel sonuçlar üzerindeki etkisi ortaya konmalıdır.

Deney tesisatı kurulmadan önce çalışma parametrelerine uygun olarak ölçüm araçlarının seçilmesi ve belirsizlik analizinin yapılması sonuçlarda oluşabilecek belirsizlik oranını minimuma indirmek için önemlidir.

Deneysel verilerin kullanılarak hata oranlarının belirlenebilmesi için birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bu deneysel çalışmadaki hata analizinde, diğerlerine göre daha hassas bir yöntem olan Kline ve McClintock [27] tarafından ortaya atılan belirsizlik analizi yöntemi kullanılmıştır.

5.1 Belirsizlik Analizi Yöntemi

Deney düzeneğinde ölçümler yapılarak tespit edilmesi gereken büyüklükler P ve bu büyüklüğe etki eden bağımsız değişkenler $(x_{1,}x_2, x_3, ..., x_n)$ ile ifade edilmektedir. Bu durumda,

$$P = P(x_{1,}x_2, x_3, ..., x_n) \tag{5.1}$$

olarak yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, ..., w_n$ ve P büyüklüğünün hata oranı w_p ise, Kline ve McClintock belirsizlik analizi yöntemi;

$$w_p = \pm\left[\left(\frac{\partial P}{\partial x_1}w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_2}w_2\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_3}w_3\right)^2 + ... + \left(\frac{\partial P}{\partial x_n}w_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.2}$$

eşitliği ile matematiksel olarak ifade edilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluk değerleri Çizelge 5.1' de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluk değerleri

Ölçüm Cihazı	Doğruluk Değerleri
Isıl çift (Termoeleman)	± 0,2°C
Nem Sensörü	± 3%
Elektronik hassas terazi	± 0,05 g

5.2 Belirsizliklerin Tespiti

Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında öncelikle serbest su yüzeyinden buharlaşma parametrik koşullar altında değerlendirilip literatürdeki serbest su yüzeyi çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Yine parametrik bir düzende gözenekli ıslatılmış bir yüzeyden buharlaşma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

İki grup deneyde hataya neden olan bağımsız değişkenler aynı olmaktadır. Elektronik hassas teraziden ölçülen değerlerin zamana bağlı kaydedildiği sistemde ağırlık ölçümünün belirsizliği Çizelge 5.1' de belirtildiği üzere ± 0,05 g' dır. Buna bağlı olarak kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısının belirsizlikleri Kline ve McClintock yöntemine göre tespit edilmiştir.

5.2.1 Kütle Transfer Katsayısı İçin Belirsizliklerin Tespiti

Deneylerde hataya neden olan bağımsız değişkenler genel olarak; elektronik hassas terazi $\dot{m}_b$, yerel yüzey sıcaklıkları T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, ortam havası tünel giriş sıcaklıkları T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13} şeklinde seçilirse hava-su arayüzeyindeki kütle transfer katsayısı için oluşturulabilecek belirsizlikler şu şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{m}_b = h_m A_s \left(\rho_s - \rho_\infty\right) \tag{5.3}$$

(5.3)' te verilen kütle transfer eşitliğinden h_m (m/s) çekilerek (5.4) elde edilir.

$$h_m = \frac{\dot{m}_b}{A(\rho_s - \rho_\infty)} \tag{5.4}$$

Hava ve yüzey tarafı yoğunluk değerleri aşağıdaki gibi belirtilebilir. Yüzeyde bağıl nem ölçümü yapılmadan ϕ=1 kabul edilerek hesaplamalar yapıldığından $P_s = P_{s,d}$ olur. Doyma basıncı değerleri P_s ve P_∞ tablo değeri olarak alındığından bağımsız değişken olarak değerlendirilmemiştir.

$$\rho_s = \frac{P_s}{R_v T_s} = \frac{P_s}{\frac{8,314}{18}\left(T_s + 273\right)} \tag{5.5}$$

$$\rho_\infty = \frac{P_\infty}{R_v T_\infty} = \frac{\phi P_\infty}{\frac{8,314}{18}\left(T_\infty + 273\right)} \tag{5.6}$$

T_s ortalama yüzey sıcaklığı yerel sıcaklık değerlerinin ortalaması olup aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_s = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9}{9} \tag{5.7}$$

$$w_{T_s} = \pm\left[\left(\frac{\partial T_s}{\partial T_1} w_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_2} w_{T_2}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_9} w_{T_9}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.8}$$

veya

$$w_{T_s} = \pm\left[\left(\frac{1}{9} w_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{9} w_{T_2}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{1}{9} w_{T_9}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.9}$$

Ortam havası sıcaklığı T_∞ tünel giriş bölgesine yerleştirilen yerel sıcaklık değerlerinin ortalaması olup aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_\infty = \frac{T_{10} + T_{11} + T_{12} + T_{13}}{4} \tag{5.10}$$

$$w_{T_\infty} = \pm\left[\left(\frac{\partial T_\infty}{\partial T_{10}} w_{T_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_\infty}{\partial T_{11}} w_{T_{11}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_\infty}{\partial T_{12}} w_{T_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_\infty}{\partial T_{13}} w_{T_{13}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.11}$$

veya

$$w_{T_\infty} = \pm\left[\left(\frac{1}{4} w_{T_{10}}\right)^2 + \left(\frac{1}{4} w_{T_{11}}\right)^2 + \left(\frac{1}{4} w_{T_{12}}\right)^2 + \left(\frac{1}{4} w_{T_{13}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.12}$$

Ortam havasının bağıl nemi ϕ tünel giriş bölgesine yerleştirilen yerel nem değerlerinin ortalaması olup aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\phi = \frac{RH_1 + RH_2 + RH_3 + RH_4}{4} \tag{5.13}$$

$$w_\phi = \pm\left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial RH_1} w_{RH_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial RH_2} w_{RH_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial RH_3} w_{RH_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial RH_4} w_{RH_4}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.14}$$

veya

$$w_\phi = \pm\left[\left(\frac{1}{4} w_{RH_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{4} w_{RH_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{4} w_{RH_3}\right)^2 + \left(\frac{1}{4} w_{RH_4}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.15}$$

Eşitlik (5.4) yeniden düzenlenirse (5.16) denklemi elde edilir.

$$h_m = \frac{\dot{m}_b}{A\left(\frac{8,314}{18}\frac{P_s}{(T_s+273)} - \frac{8,314}{18}\phi\frac{P_\infty}{(T_\infty+273)}\right)} \tag{5.16}$$

$$w_{h_m} = \pm\left[\left(\frac{\partial h_m}{\partial \dot{m}_b} w_{\dot{m}_b}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_m}{\partial T_s} w_{T_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_m}{\partial T_\infty} w_{T_\infty}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_m}{\partial \phi} w_\phi\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.17}$$

Uzunluk ölçümlerinden oluşabilecek hatalar ihmal edilerek kütle transfer katsayısı belirsizlik denklemi elde edilir.

5.2.2 Boyutsuz Sherwood Sayısı İçin Belirsizliklerin Tespiti

Kütle transfer katsayısında bağımsız değişkenlerin sebep olduğu belirsizlikler Sherwood sayısına direkt etki etmektedir. Uzunluk ölçümlerinden oluşabilecek hataların ihmal edildiği belirsizlik denklemlerinde ikili yayınım katsayısı D_{AB} tablo değeri olarak alındığından bağımsız değişken olarak değerlendirilmemiştir.

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \tag{5.18}$$

$$w_{Sh} = \pm\left[\left(\frac{\partial Sh}{\partial h_m} w_{h_m}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.19}$$

$$w_{Sh} = \pm\left[\left(\frac{L}{D_{AB}} w_{h_m}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.20}$$

Çizelge 5. 2 Örnek bir deneydeki hesaplanan parametrelerin nominal değerleri ve belirsizlikleri

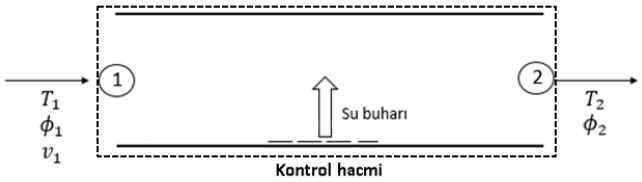
	T_s (°C)	T_∞ (°C)	ϕ (-)	m (g/h)	h_m (m/s)	Sh (-)
±w	0,100	0,066	0,00758	0,050	0,000203	4,011
%w	0,384	0,297	1,500	0,330	4,814	4,815

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLARIN TEORİK İNCELENMESİ VE REGRESYON MODELİ İLE KORELASYON OLUŞTURULMASI

Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen sonuçları teorik incelemek için bazı kabuller yapılmıştır:

- Dış ortam ile buharlaşma haznesinde bulunan su veya gözenekli ortam arasındaki ısı ve kütle geçişi sadece hava-su arayüzeyinde olmuştur.
- Atmosfer basıncı 1 bar alınmıştır.
- Kontrol hacmindeki termofiziksel özellikler homojendir.
- İletim ve ışınımla olan ısı transferi etkileri ihmal edilmiştir.
- Su buharı mükemmel gaz olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6. 1 Hava-su arayüzeyinde kontrol hacmi

6.1 Kütle Transfer Katsayısı ve Sherwood Sayısının Belirlenmesi

Deneylerde oluşturulan zorlanmış taşınım koşullarında Şekil 6.1' deki kontrol hacminde hava-su arayüzeyinde oluşan kısmi buhar basınç farkları buharlaşma mekanizmasının gerçekleşmesine olanak sağlamıştır. (1.32) numarasına sahip $n_A = \frac{\overline{h_m} A_s}{R_v}\left(\frac{P_{v,s}}{T_s} - \frac{P_{v,\infty}}{T_\infty}\right)$ eşitliği buharlaşma oranı (g/s) değerlerini vermektedir [5].

Tez boyunca yapılan deneylerde 3 saat sürede buharlaşan su miktarı değerleri elektronik terazide zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Birim alan başına elde edilen akı değerleri Bölüm 3 ve Bölüm 4' te sunulmuştur. (1.32)' de kullanılan su buharı gaz sabiti çalışmada uygulanan hava şartları için aynı kabul edilmiştir. Termoelemanlar yardımıyla hava ve yüzey tarafında ölçülen sıcaklık değerleri ve o değerlerdeki suyun doyma basıncı da eşitlikte yerine koyulunca kütle transfer katsayısı bulunmaktadır. Bu katsayısı kütle taşınımının bir ölçüsüdür ve artması buharlaşmanın da arttığı anlamına gelir. Ayrıca, yüzeydeki boyutsuz derişiklik gradyanını belirlemek için Sherwood sayısı hesaplanmıştır. Serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslatılmış yüzeyden deneysel buharlaşma miktarları göz önüne alınarak teorik kütle transfer katsayı ve Sherwood sayısı aşağıdaki örnek hesaplamadaki gibi belirlenmiştir.

$$\overline{h_m} = n_A \frac{R_v}{A_s\left(\frac{P_{v,s}}{T_s} - \frac{P_{v,\infty}}{T_\infty}\right)} \tag{6.1}$$

Örneğin; serbest su yüzeyi çalışmalarında Çizelge 3.2' de verilen deneysel buharlaşma sonuçlarına göre hava akış hızının 0.20 m/s, hava sıcaklığının 16°C ve bağıl nemin %50 olduğu durumda buharlaşma akısı (A= 0.1715 m^2 için) 58.665 g/m^2h çıkmıştır. Su yüzey sıcaklığı ise hava sıcaklığı 16°C iken ortalama 14°C olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklıklarda suyun doyma basıncı serbest su yüzeyinde ve gözenekli ıslatılmış yüzeyde kısmi buhar basıncı olarak alınabilir; fakat hava tarafındaki kısmi buhar basıncının bulunabilmesi için, $P_{v,\infty} = \phi P_{v,d}$ eşitliğindeki gibi havanın bağıl nemi ile o sıcaklıktaki suyun doyma basınç değeri çarpılmalıdır.

$$h_m = (58.665\frac{g}{m^2 h})\frac{\left(0.4615 kPa\frac{m^3}{kgK}\right)}{\left[\frac{1.610 kPa}{(273+14K)} - 0.50\frac{1.832 kPa}{(273+16K)}\right]}\left(\frac{1h}{3600s}\right)\left(\frac{1kg}{1000g}\right) \tag{6.2}$$

$$h_m = 0.00308 m/s \tag{6.3}$$

Yatay serbest su yüzeyinden buharlaşmada yukarıdaki hava akış koşullarında kütle transfer katsayısı 0.00308 m/s olarak elde edilmiştir. Yüzeyde derişiklik gradyanını belirlemek için ise aynı koşullarda boyutsuz Sherwood hesaplanır.

Sherwood sayısı; taşınımsal kütle transfer katsayısının difüzyon oranına bölümü ile elde edilir. Difüzyon oranı ise hava-su arayüzeyinde birim karakteristik uzunluk başına difüzyon katsayısı olarak tanımlanır. Bu katsayı için tabloda arayüzeydeki film sıcaklığı esas alınır.

$T_f = (14+16)/2 = 15°C$ için $D_{AB} = 2.33\times10^{-5} m^2/s$ ' dir.

$$Sh = \frac{h_m}{D_{AB}/L} \tag{6.4}$$

$$Sh = \frac{(0.00308 m/s)(0.49m)}{(2.33\times10^{-5} m^2/s)} = 64.77 \tag{6.5}$$

olarak elde edilmiştir. Çizelge 6.1 ve 6.2' de sırasıyla serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma sonucu elde edilen kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı değerleri görülmektedir. Kütle transfer katsayısı, taşınımla buharlaşmanın temel göstergesidir ve Sherwood sayısı da bu katsayıya bağlı olarak artmaktadır.

Çizelge 6. 1 Serbest su yüzeyinden buharlaşmada kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı değerleri

Test No	V (m/s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	Φ (%)	E (g/m²h)	h_m (m/s)	Sh (-)
1	0.20	14	16	50	58.665	0.00308	64.81
2	0.38	14	16	50	72.770	0.00382	80.40
3	0.20	23	26	50	88.437	0.00289	56.83
4	0.38	23	26	50	117.376	0.00383	75.43
5	0.20	15	16	72	41.458	0.00392	82.34
6	0.38	15	16	72	63.516	0.00463	90.74
7	0.20	24	26	72	53.720	0.00351	68.81
8	0.38	24	26	72	67.656	0.00442	86.66
9	0.29	19	21	61	60.426	0.00326	65.93

Çizelge 6. 2 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşmada kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı değerleri

Test No	V (m/s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	Φ (%)	X (%)	E (g/m^2h)	h_m (m/s)	Sh (-)
1	0.20	14.5	16	50	41	43.749	0.00216	45.34
2	0.38	14.5	16	50	41	54.227	0.00268	56.20
3	0.20	23.5	26	50	41	62.700	0.00192	37.66
4	0.38	23.5	26	50	41	88.805	0.00272	53.34
5	0.20	15	16	72	41	21.300	0.00201	42.14
6	0.38	15	16	72	41	35.644	0.00337	70.52
7	0.20	24.4	26	72	41	38.601	0.00228	44.60
8	0.38	24.4	26	72	41	51.429	0.00304	59.42
9	0.20	14.5	16	50	57	46.781	0.00231	48.48
10	0.38	14.5	16	50	57	62.723	0.00310	65.00
11	0.20	23.5	26	50	57	64.880	0.00199	38.97
12	0.38	23.5	26	50	57	101.244	0.00310	60.81
13	0.20	15	16	72	57	24.566	0.00232	48.60
14	0.38	15	16	72	57	42.117	0.00398	83.32
15	0.20	24.4	26	72	57	41.883	0.00247	48.39
16	0.38	24.4	26	72	57	52.945	0.00313	61.17
17	0.29	19	21	61	49	54.985	0.00296	59.99

6.2 Doğrusal Olmayan Regresyon Analizi ile Korelasyon Eldesi

Regresyon analizi, iki veya daha fazla bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenin birbirleri arasındaki ilişkiyi tahmin ve yaklaşımlarda bulunarak şekillendiren bir istatistiksel analiz metodudur. Regresyon modeli içerisinde, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin net bir biçimde ayırt edilmiş olması, gerek modelin gerekse problemin sağlıklı bir çözümü için gerekli bir şarttır [3].

Literatürde yer alan serbest su yüzeyinden buharlaşma çalışmalarında genellikle karşılaşılan deneysel korelasyon yapısı (6.6)' daki gibidir. Konu hakkında çalışmalar yapan araştırmacılar kendi deney şartlarına göre A ve B sabitlerini elde edip farklı korelasyonlar önermişlerdir. Fakat, son yıllarda yapılan çalışmalarda kısmi buhar basınç farkının n kuvvet katsayısı ile düzeltilmesi tahminlere yakın sonuçlar vermiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde tam faktöriyel deneysel tasarım sonucu elde edilen korelasyonların yanı sıra serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma konusunda (6.6) eşitliği yapısındaki korelasyonların önerilmesi amaçlanmıştır.

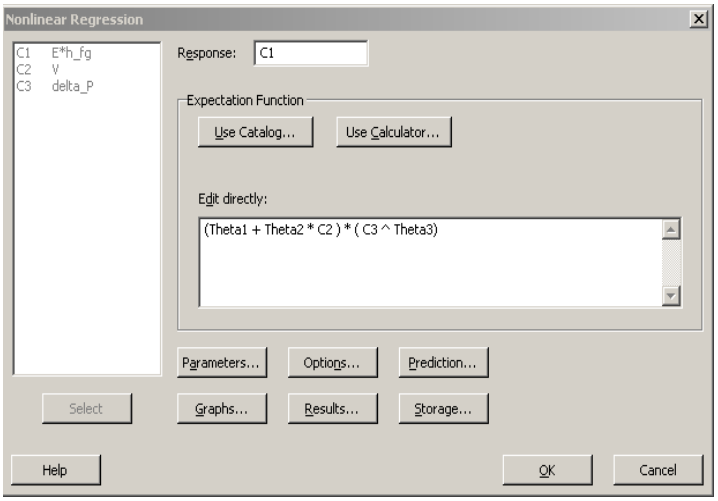
Minitab 17.0 programındaki doğrusal olmayan regresyon (Nonlinear regression analysis) modülü yardımı ile analiz gerçekleştirilmiştir.

$$E = \left(A + BV\right)\frac{\left(P_s - \phi P_\infty\right)^n}{h_{fg}} \tag{6.6}$$

Doğrusal olmayan regresyon analizi ile korelasyon elde etmek için öncelikle deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen veriler toplanmaktadır. Örneğin; E (g/m^2h) buharlaşma akısı terazi ölçümleri, V (m/s) hava akış hızı ise PIV yöntemiyle deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, testler boyunca kaydedilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerine göre kısmi buhar basınç farkı (P_s - $\emptyset P_\infty$) (Pa) ve buharlaşma gizli ısısı h_{fg} (kJ/kg) doymuş su tablosu esas alınarak hesaplanmıştır. (6.6)' ya bakıldığında, A ve B sabitleri ile n katsayısını bulmak için bilinen bu değerlere uygun regresyon modeli oluşturmak gerekir. (6.6) düzenlenirse (6.7) eşitliği elde edilir ve buna göre oluşturulan model (6.8)' de ve program arayüzü Şekil 6.2' de görülmektedir.

$$E \times h_{fg} = \left(A + BV\right)\left(P_s - \phi P_\infty\right)^n \tag{6.7}$$

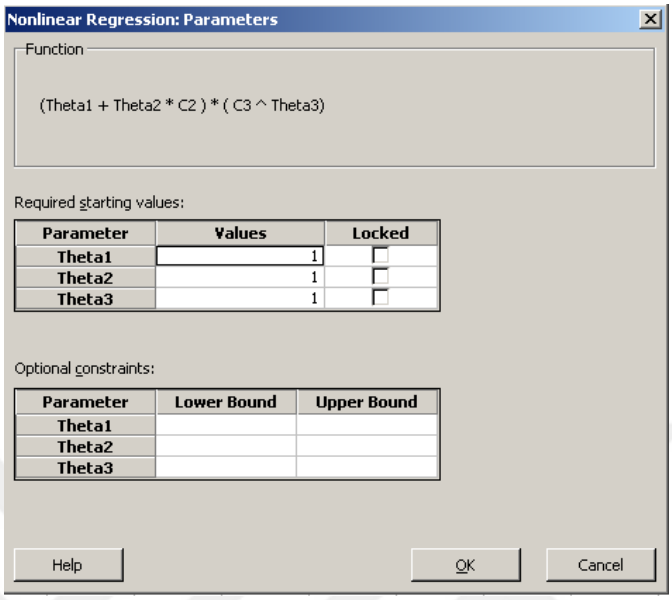
$$E \times h_{fg} = \left(Theta1 + Theta2 \times V\right)\left(\Delta P \wedge Theta3\right) \tag{6.8}$$



Şekil 6. 2 Korelasyon modeli oluşturulması, Minitab 17.0

Veritabanında çeşitli istatistiksel hesaplamalar yer alan doğrusal olmayan regresyon analizi için önerilen Gauss-Newton algoritması ile maksimum 200 iterasyonda, yakınsama toleransı 0,00001 olacak şekilde %95 güven aralığında serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma için (6.8) modeli kullanılarak analizler

gerçekleştirilmiştir. Analiz başlatılmadan her bir bilinmeyen için belli bir değer atanması gerekmektedir. Şekil 6.3, her bir bilinmeyene ‘‘1’’ değeri atandığını göstermektedir.



Şekil 6. 3 Korelasyondaki bilinmeyenlere değer atanması, Minitab 17.0

Hava akış hızı, kısmi buhar basınç farkı ve buharlaşma gizli ısısına bağlı geliştirilen yeni korelasyonlar aşağıdaki şartlarda geçerlidir. (6.9) serbest su yüzeyinden buharlaşma akısını, (6.10) ve (6.11) ise sırasıyla başlangıç su içeriği %41 ve %57 olan gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma akısını vermektedir.

16 °C ≤ T_{hava} ≤ 26 °C

%50 ≤ RH ≤ %70

0,20 m/s ≤ V ≤ 0,38 m/s

$$E = \left(0.280 + 0.784V\right)\frac{\left(P_s - \phi P_\infty\right)^{0.695}}{h_{fg}} \tag{6.9}$$

$$E = \left(0.0899 + 0.313V\right)\frac{\left(P_s - \phi P_\infty\right)^{0.795}}{h_{fg}} \tag{6.10}$$

$$E = \left(0.0752 + 0.393V\right)\frac{\left(P_s - \phi P_\infty\right)^{0.801}}{h_{fg}} \tag{6.11}$$

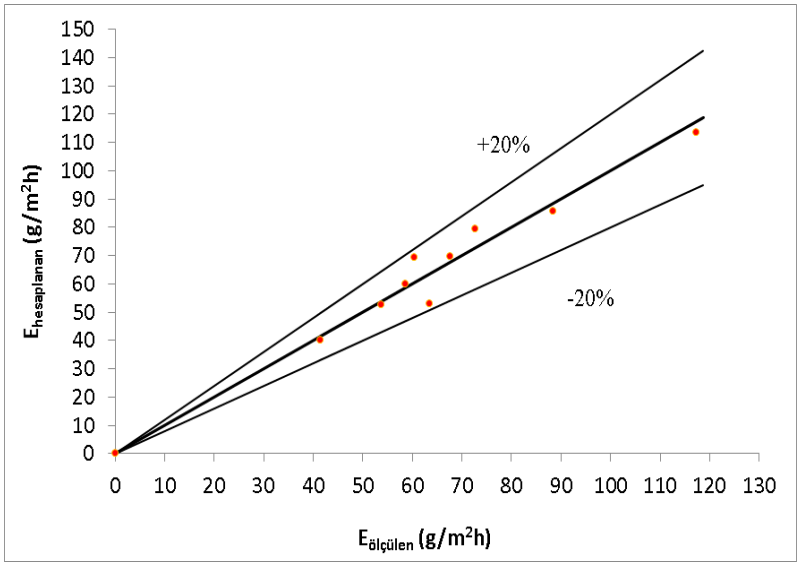
Regresyon sonuçları ile ilgili detaylı bilgilere ve çözüm analizi dokümanlarına EK-C Bölümü’ nden ulaşılabilir.

Analiz sonunda oluşturulan deneysel korelasyonlar ile ölçüm sonuçlarını karşılaştırmak ve yüzdesel sapma oranlarını belirlemek gerekmektedir. Çizelge 6.3' te serbest su yüzeyinden buharlaşmada oluşan sapma değerlerinin 16.71% ile -14.77% arasında kaldığı gözlenirken, ± 20 % hata bandında uyum sağlandığı Şekil 6.4' teki grafikte görülmektedir.

Çizelge 6. 3 Serbest su yüzeyinden buharlaşma akıları ve sapma değerleri (Ölçülen ile Eşitlik 6.9 arasında)

Deney No	V (m/s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	ϕ (%)	$P_s - \phi P_\infty$ (Pa)	$E_{ölçülen}$ (g/m^2h)	$E_{hesaplanan}$ (g/m^2h)	δ (%)
1	0.20	14	16	50	693.98	58.665	60.014	-2.30
2	0.38	14	16	50	693.98	72.770	79.381	-9.09
3	0.20	23	26	50	1144.95	88.437	85.711	3.08
4	0.38	23	26	50	1144.95	117.376	113.372	3.41
5	0.20	15	16	72	386.37	41.458	39.996	3.53
6	0.38	15	16	72	386.37	63.516	52.904	16.71
7	0.20	24	26	72	566.32	53.720	52.617	2.05
8	0.38	24	26	72	566.32	67.656	69.597	-2.87
9	0.29	19	21	61	684.25	60.426	69.351	-14.77

Tez çalışmasının ana konusu olan gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma için oluşturulan regresyon modeli ile elde edilen deneysel korelayonlar (Eşitlik 6.10 ve 6.11) sonucu buharlaşma akıları Çizelge 6.4' te verilmiştir. Gözenekli ortam başlangıç su içeriği X=41% iken, yüzdesel sapma değeri 2.33% ile -19.47% aralığında çıkmıştır. X=57% olduğunda ise, 7.93% ile -9.74% aralığında sapma yüzdeleri elde edilmiştir. Serbest su yüzeyi için çizilen hata bandı grafikleri bu şartlar için de oluşturulduğunda (Şekil 6.5 ve 6.6) ± 20 % skalasında uyum sağlandığı söylenebilir.



Şekil 6. 4 ±20 hata bandında ölçülen ve Eşitlik 6.9 ile hesaplanan buharlaşma akıları

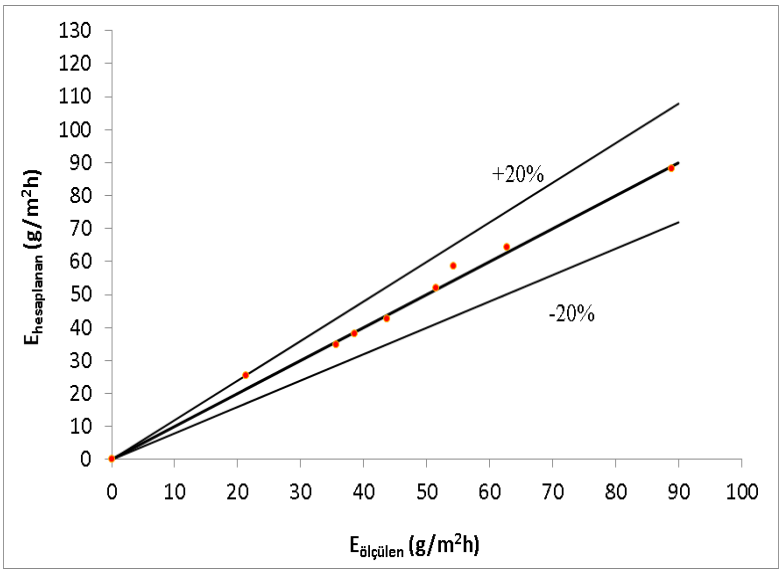
Çizelge 6. 4 Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma akıları ve sapma değerleri (X=41% için; ölçülen ile Eşitlik 6.10, X=57% için; ölçülen ile Eşitlik 6.11 arasında)

X = %41

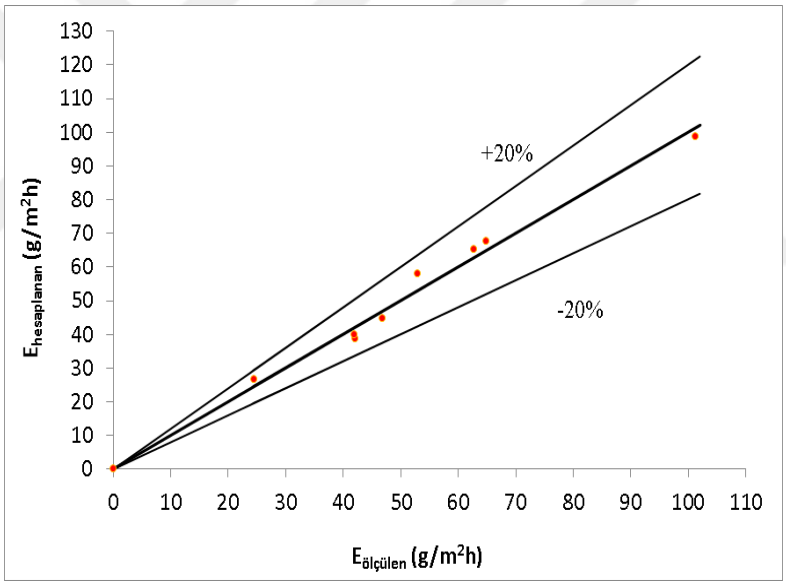
Deney No	V (m/s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	ϕ (%)	$P_s - \phi P_\infty$ (Pa)	$E_{ölçülen}$ (g/m²h)	$E_{hesaplanan}$ (g/m²h)	δ (%)
1	0.20	14,5	16	50	741.74	43.749	42.730	2.33
2	0.38	14,5	16	50	741.74	54.227	58.518	-7.91
3	0.20	23,5	26	50	1228.01	62.700	64.367	-2.66
4	0.38	23,5	26	50	1228.01	88.805	88.151	0.74
5	0.20	15	16	72	386.37	21.300	25.447	-19.47
6	0.38	15	16	72	386.37	35.644	34.850	2.23
7	0.20	24,4	26	72	632.77	38.601	38.018	1.51
8	0.38	24,4	26	72	632.77	51.429	52.066	-1.24

X = %57

Deney No	V (m/s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	ϕ (%)	$P_s - \phi P_\infty$ (Pa)	$E_{ölçülen}$ (g/m²h)	$E_{hesaplanan}$ (g/m²h)	δ (%)
1	0,20	14,5	16	50	741.74	46.781	44.773	4.29
2	0,38	14,5	16	50	741.74	62.723	65.364	-4.21
3	0,20	23,5	26	50	1228.01	64.880	67.646	-4.26
4	0,38	23,5	26	50	1228.01	101.244	98.756	2.46
5	0,20	15	16	72	386.37	24.566	26.561	-8.12
6	0,38	15	16	72	386.37	42.117	38.777	7.93
7	0,20	24,4	26	72	632.77	41.883	39.799	4.98
8	0,38	24,4	26	72	632.77	52.945	58.102	-9.74

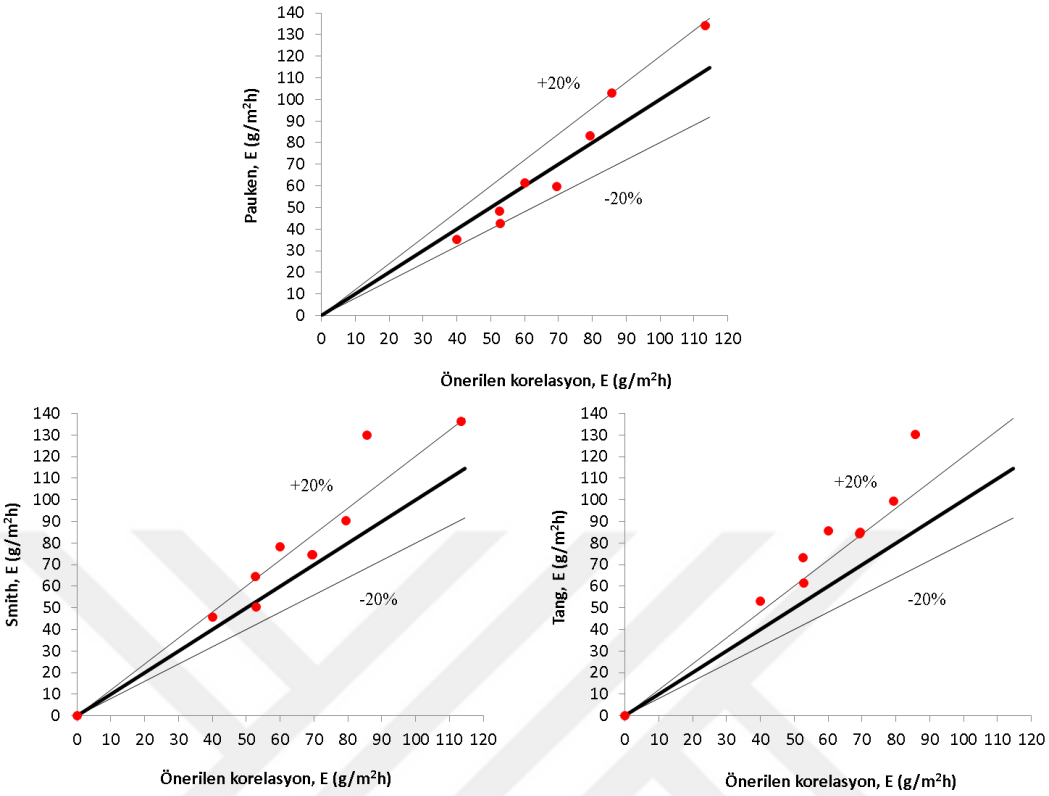


Şekil 6. 5 ±20 hata bandında ölçülen ve Eşitlik 6.10 ile hesaplanan buharlaşma akıları



Şekil 6. 6 ±20 hata bandında ölçülen ve Eşitlik 6.11 ile hesaplanan buharlaşma akıları

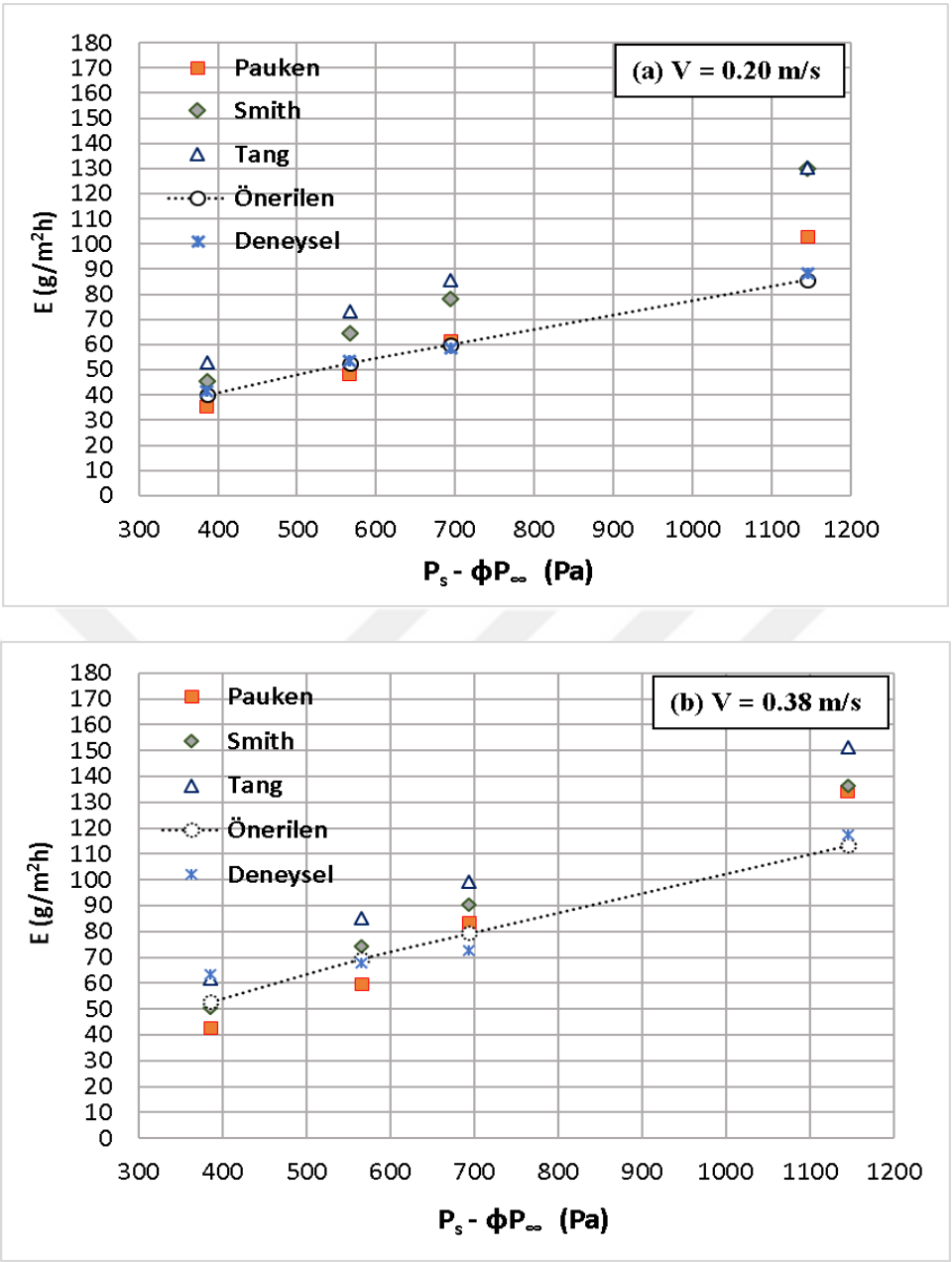
Literatürde serbest yüzeyden suyun buharlaşmasına dair çokça deneysel çalışma yapılmış ve korelasyonlar üretilmiştir. Konunun öncül çalışanlarından Carrier [6]' ın önerdiği korelasyon Smith [8] tarafından tahminlerin üstünde sonuçlar içerdiğinden üstel faktör ile düzelmiştir. Himus ve Hincley [11] ve Rowher' in [12] çalışma sonuçları ise diğer yazarların elde ettikleri sonuçlardan %100' den fazla sapma göstermektedir. Özellikle, bu konu hakkında çalışma yapan araştırmacılar birbirleri arasında yüksek sapmalar gözlemlemişlerdir.



Şekil 6. 7 ±20 hata bandında önerilen korelasyon sonuçlarının literatür verileriyle karşılaştırılması, (a) Pauken (b) Smith (c) Tang

Şekil 6.7' de sunulduğu üzere, 3 farklı araştırmacının deneysel korelasyonları ve bu çalışmada önerilen deneysel korelasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Aralarında tezde önerilen korelasyon ile en iyi uyumu Pauken' in [13] önerdiği korelasyon sonuçları göstermiştir. Smith [8] ve Tang vd.' nin [20] korelasyon sonuçları ±20 bandının dışında kalmıştır; ama diğer araştırmacılar kadar yüksek sapmalar ortaya çıkmamıştır.

Testler boyunca, literatürdeki çalışmalarda kullanılan hava akış hızlarına görece daha düşük hızlarda çalışılmıştır. Bu sebeple, kısmi buhar basınç farkının sonuçlara olan etkisi daha yüksektir. Şekil 6.8' de görüldüğü üzere, hava-su arayüzeyinde kısmi buhar basınç farkının buharlaşma akısına etkisi farklı hava akış hızlarında belirtilmiştir. Önerilen deneysel korelasyon sonuçları, deneysel ölçüm ve literatürdeki korelasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Pauken' in [13] korelasyon sonuçlarının bu çalışmada önerilen sonuçlarla büyük oranda örtüştüğü anlaşılmaktadır. Buhar basınç farkının üstel etkisiyle ise buharlaşma akısının değiştiği grafikten açıkça görülmektedir.



Şekil 6. 8 Kısmi buhar basınç farkına göre farklı hızlarda deneysel ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırılması

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, yalıtımlı bir ısı odasında istenilen hava şartlarının sağlandığı, ek olarak hava akış hızının rüzgar tüneli vasıtasıyla ayarlanabildiği bir sistemde serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslak bir yüzeyden suyun buharlaşması prosesini inceleme amaçlanmıştır. Farklı proses parametrelerinin (hava hızı, hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi, gözenekli ortam başlangıç su içeriği) incelendiği bu çalışmada buharlaşma hızı ve akısı değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar Arçelik Ar-Ge laboratuarında bulunan sıcaklık ve bağıl nem değerleri hassas olarak ayarlanabilen test odasında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak belirlenen teorik hesap yöntemi ile kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı her deney için hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda buharlaşma akısını veren yeni korelasyonlar elde edilmiştir. Serbest yüzeyden buharlaşma korelasyon sonuçları önceki araştırmacıların önerdiği korelasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve daha sonra yapılabilecek çalışmalarla ilgili öneriler aşağıda verilmiştir.

- Buharlaşma, hava-su arayüzeyinde oluşan kısmi buhar basınç farkının doğal taşınım etkisi ile hava akış hızının zorlanmış taşınım etkisinin beraber görüldüğü bir mekanizmadır. Bu sebeple, yüzey üzeri dış akış Reynolds sayısı değerleri 6274 – 12667 aralığında değişen bir kare kesitli rüzgar tüneli kurulmuştur. Yapılan PIV ve debi ölçümleri vasıtasıyla yüzey üzeri hava akış hızı 0.20 – 0.38 m/s, tünel içi debi değerleri 25-85 l/s aralığında belirlenmiştir.

- Gözenekli ortamdan buharlaşma deneysel çalışmalarını gerçekleştirmeden önce literatürde sıkça karşılaşılan serbest su yüzeyinden buharlaşma için testler yapıldı ve deney düzeneğinin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.
- Serbest su yüzeyi ve gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma deneysel çalışmalarını analiz etmek ve etkin bir deney tasarım sistemi oluşturmak için Minitab 17.0 istatistiksel analiz programından yararlanılmıştır. Tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanan her iki durum için parametrelerin buharlaşma akısına ana etkileri ve optimizasyonu incelenmiştir.
- Buharlaşma, yüzeydeki suyun kısmi buhar basıncıyla üstündeki havanın kısmi buhar basıncı arasındaki farklı ile orantılı olduğundan sabit bağıl nem ve hava akış hızı koşullarında hava sıcaklığı arttıkça havanın su buharı emme kapasitesi de artacağından buharlaşmanın doğal taşınım yoluyla her iki durum (serbest yüzey, gözenekli yüzey) için de lineere yakın bir şekilde arttığı gözlenmiştir.
- Hava bağıl nemi arttırıldığında havanın su buharı emme gücü azalmaktadır. Sabit hava sıcaklığı ve hava akış hızlarında ortam nemliliğini artırmak hava-su arayüzeyinde buhar derişiklik farkını düşürdüğünden her iki yüzey çeşidinde de buharlaşma doğal taşınım yoluyla azalma göstermiştir.
- Serbest su yüzeyi ve gözenekli ortam yüzeyinden buharlaşmada etken temel parametrelerden biri yüzey sıcaklığıdır. Bu çalışma kapsamında, yüzey sıcaklığı testlerde havanın ısı odası set değerine göre değişmektedir. Artan yüzey sıcaklığı ile doyma basıncının arttığı ve kontrol hacminde kısmi buhar basınç farkının azaldığı görülmüştür. Doğal taşınım etkilerini karakterize eden yüzey sıcaklığının artışı buharlaşmayı artıran bir durumdur.
- Buharlaşma haznesinden havaya transfer olan su buharı yüzeyden uzaklaşmadığı takdirde hava-su arayüzeyinde kısmi buhar basınç farkı azalacak ve bu da doğal taşınımlı buharlaşmayı azaltacaktır. Buharlaşmanın devam etmesi için difüzyon veya taşınım yoluyla su buharının yüzeyden uzaklaşması gerekmektedir. Deneysel çalışmalar boyunca bir doğru akımlı fan yardımıyla hava hızları değiştirilmiştir. Her iki yüzey koşulunda da hava akış hızının artmasının buharlaşma akısını artırdığı gözlenmiştir.

- Tez çalışmasının ana konusu olan gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşma için serbest yüzey parametrelerine ek olarak gözenekli ortamın yüzdesel başlangıç su içeriği (X) eklenmiştir. Ortamın yüzdesel nemliliğini gösteren bu ifadeyi X=41%' den X=57%' ye artırmak buharlaşmada düşük bir miktar da olsa artmaya sebep olmaktadır. Buharlaşma yüzeyden olduğu için birim zamanda aynı çevresel koşullar altında yüzeyi daha fazla ıslatmanın su buharının havaya transferini artırdığı görülmüştür.
- Çalışmanın en önemli çıktılarından biri de gözenekli ortamın buharlaşma verilerinin serbest su yüzey durumuna göre her deney adımında düşük olmasıdır. Bunun sebebi, kullanılan gözenekli ortamın su tutma kapasitesi ile ilişkilidir. Serbest yüzey durumunda su buharı havaya hızla geçmek isterken, gözenekli ortam suyu daha uzun süre tutmak ister. Bu tür maddelerin kurutma alanlarında kullanılması önerilmezken, tarımsal alanlarda bitki suya ihtiyaç duyduğundan kullanılması çok elverişli olabilir.
- Deneysel ölçüm verileri ile yapılan teorik hesaplama sonucu kütle taşınımının etkinliğini gösteren kütle transfer katsayısı ve boyutsuz Sherwood sayısı elde edilmiştir. Serbest su yüzeyinden buharlaşmada h_m değerleri 0.00289 ile 0.00460 arasında değişirken, Sh sayısı 56.83 ile 90.74 arasında değişmektedir. Gözenekli yüzeyden buharlaşmada ise taşınım etkinliği serbest su yüzeyi durumuna göre düşmektedir. Gözenekli ortam için ise h_m değerleri 0.00192 ile 0.00398 arasında değişirken, Sh sayısı 37.66 ile 83.32 arasında değişmektedir.
- Literatürde yer alan serbest su yüzeyinden buharlaşma çalışmalarında hava akış hızı V ile kısmı buhar basınç farkına ($P_s - \Phi P_\infty$) bağlı deneysel korelasyonlar üretilmiştir. Konu hakkında çalışmalar yapan araştırmacılar kendi deney şartlarına göre A ve B sabitlerini elde edip farklı korelasyonlar önermişlerdir. Fakat, son yıllarda yapılan çalışmalarda kısmi buhar basınç farkının n kuvvet katsayısı ile düzeltilmesi tahminlere yakın sonuçlar vermiştir. Bu sebeple, tam faktöriyel tasarım analizi sonunda elde edilen korelasyonlara ek olarak literatürde yer alan yapıdaki korelasyon her iki yüzey durumu için de oluşturulmuştur.

- Korelasyon modelinde başlangıç su içeriği ile ilgili bir ifade yer almadığından X=41% ve X=57% için ayrı deneysel korelasyonlar önerilmiştir. Sırasıyla serbest su yüzeyi, başlangıç su içeriği 41% ve 57% durumları için oluşturulan korelasyonlarda kısmi buhar basıncı n kuvvet katsayısı 0.695 – 0.795 – 0.801 olarak elde edilmiştir.

  16 °C ≤ T_{hava} ≤ 26 °C

  %50 ≤ RH ≤ %70

  0,20 m/s ≤ V ≤ 0,38 m/s şartları için önerilen korelasyonlar;

$$E = (0.280 + 0.784V)\frac{(P_s - \phi P_\infty)^{0.695}}{h_{fg}}$$

$$E = (0.0899 + 0.313V)\frac{(P_s - \phi P_\infty)^{0.795}}{h_{fg}}$$

$$E = (0.0752 + 0.393V)\frac{(P_s - \phi P_\infty)^{0.801}}{h_{fg}}$$

- Serbest su yüzeyinden buharlaşmada oluşan sapma değerlerinin 16.71% ile -14.77% arasında kaldığı görülürken; gözenekli ortam başlangıç su içeriği X=41% iken, yüzdesel sapma değeri 2.33% ile -19.47% aralığında, X=57% olduğunda ise 7.93% ile -9.74% aralığında sapma yüzdeleri elde edilmiştir.
- Literatürde sıkça çalışılmış olan serbest su yüzeyinden buharlaşma konusunda tezde önerilen korelasyon ile en iyi uyumu Pauken' in [13] önerdiği korelasyon sonuçları göstermektedir. Smith [8] ve Tang vd.' nin [20] korelasyon sonuçları ±20 bandının dışında kalmıştır; ama diğer araştırmacılar kadar yüksek sapmalar ortaya çıkmamıştır.
- Testler boyunca, literatürdeki çalışmalarda kullanılan hava akış hızlarına görece daha düşük hızlarda çalışılmıştır. Bu sebeple, kısmi buhar basınç farkının sonuçlara olan etkisi daha yüksektir. Hava-su arayüzeyinde kısmi buhar basınç farkının buharlaşma akısına etkisi farklı hava akış hızlarında belirtilmiştir. Pauken' in [13] korelasyon sonuçlarının bu çalışmada önerilen sonuçlarla büyük oranda örtüştüğü anlaşılmaktadır. Buhar basınç farkının üstel etkisiyle ise buharlaşma akısının değiştiği grafikten açıkça görülmektedir.

Tezde küçük kesit alanına ve yüzey üzeri düşük hava akış hızlarına sahip hazneler içindeki ortamdan buharlaşma etkinliği, belirlenen parametrelere göre incelenmiştir. Daha detaylı çalışmaların yapılması için önerilen çalışmalar ise aşağıda sıralanmıştır.

- Büyük ve farklı geometrili kesit alanları için deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir. Farklı koşullardaki deneysel korelasyonlar elde edilebilir.
- Taşınım etkilerinin yanında difüzyonun dahil edilidiği gözenekli ortamdan buharlaşma için nümerik analizler zamana bağlı olarak çalışılabilir.
- Farklı gözenekli ortamlar buharlaşma akısı açısından deneysel ve teorik olarak karşılaştırılabilir. Başlangıç su içeriğinin etkisi daha net ortaya konabilir.
- Bu yüksek lisans tezinde yüzeyi üzeri dış akışta laminer akım koşullarında buharlaşma incelendi. Türbülanslı akışın, aynı sıcaklık ve bağıl nemdeğerlerinde buharlaşmaya olan etkileri çalışılabilir.

KAYNAKLAR

[1] T.C Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Buharlaşma Rasatlarının Değerlendirmesi, www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme, 2014.

[2] Bayazıt, M., (1999). Hidroloji, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, Sayı:1605, 242s. İstanbul.

[3] Apaydın, T., (2009). Alttan Isıtılan/Isıtılmayan Kabın İçindeki Suyun Buharlaşmasını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] İpek, M., (2015). Kanal İçinde Yoğuşmanın Sayısal Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] Incropera, F. P., Dewitt, P. D., Bergman, T. L. ve Lavine, A. S., (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New Jersey.

[6] Carrier, W.H., (1918). The temperature of evaporation, ASHVE Transactions 24, 25-50.

[7] ASHRAE Handbook, (2007). Section 5: Ventilation and Air Distribution, ASHRAE, Atlanta.

[8] Smith, C. C., Lof, G. ve Jones, R., (1994). Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swmming pool, Solar Energy 53-1, 3-7.

[9] Sodha, M. S., Kaushik N. D. ve Rao, S. K., (1981). Thermal analysis of three zone solar pond, Energy Res. 5, 321-340.

[10] Ali, H. M., (1989). Potential of solar ponds in hot climates, Solar and Wind Technology 6-2, 137-141.

[11] Himus, G. W. ve Hinchley, J. W., (1924). The effect of a current of air on the rate of evaporation of water below the boiling point, Journal of the Society of Chemical Industry 43-34, 840-845.

[12] Rowher, C., (1931). Evaporation from free water surface, US Department of Agriculture in Cooperation with Colorado Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin number 271.

[13] Pauken, M. T., (1999). An experimental investigation of combined turbulent free and forced evaporation, Experimental Thermal and Fluid Science 18, 334-340.

[14] Sartori, E., (2000). A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces, Solar Energy 68, 77-89.

[15] Raimundo, M. A., Gaspar, R. A., Oliveira, A. V. ve Quintela, A. D., (2014). Wind tunnel measurements and numerical simulations of water evaporation in forced convection airflow, International Journal of Thermal Sciences 86,28-40.

[16] Chieng, C. C. ve Launder, B. E., (1980). On the calculation of turbulent heat transport downstream from an abrupt pipe expansion, Numerical Heat Transfer 3, 189-207.

[17] Asdrubali, F., (2009). A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools, Energy and Buildings 41, 311-319.

[18] ASHRAE, (1989). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE Standard 62-89, Atlanta, USA.

[19] Treybal, R. E., (1981). Mass Transfer, Mc-Graw Hill International Editions

[20] Tang, R. ve Etzion, Y., (2004). Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that a free water surface, Building and Environment 39, 77-86.

[21] Donnarumma, D., Tomaiuolo, G., Caserta, S., Gizaw, Y. ve Guido, S., (2015). Water evaporation from porous media by Dynamic Vapor Sorption, Colloids and Surfaces: Physicochem. Eng. Aspects 480, 159-164.

[22] Carter, D. L., Draper, M. C., Peterson, R.N. ve Shah, D.O., (2005). Importance of dynamic surface tension to the residual water content of fabrics, Langmuir 21, 101006-10111.

[23] Nahar, N. M., Sharma, P. ve Purohit, M. M., (1999). Studies on solar passive cooling techniques for arid areas, Energy Conversion & Management 40, 89-85.

[24] Nahar, N. M., Sharma, P. ve Purohit, M. M., (2003). Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions, Building and Environment 38, 109-116.

[25] Filkov, A. I., Grishin, A. M. ve Gladky, D. A., (2011). Mathematical research into moisture evaporation in a peat layer, International Symposium of Combustion, Italy, MSC 7, 11-15.

[26] ANSI-AMCA 210, ANSI-ASHRAE 51 (2007). Laboratory methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating, Air Movement Control and Association, USA.

[27] Kline, S. J., ve F. A. McClintock, (1953). Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, No. 1, 3-8.

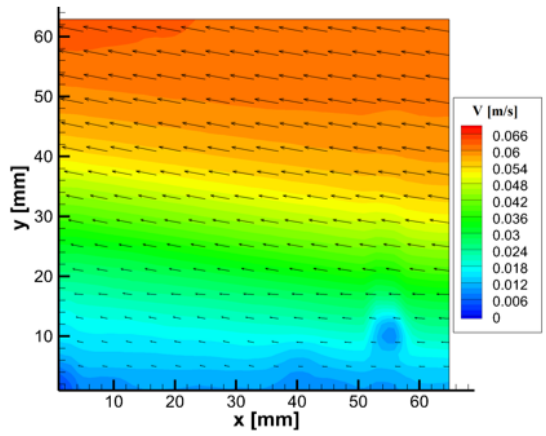
[28] Minitab Statistical Software User Guide for Release 17.3.0., https://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/Minitab17_GettingStarted-en.pdf , 2016

EK-A

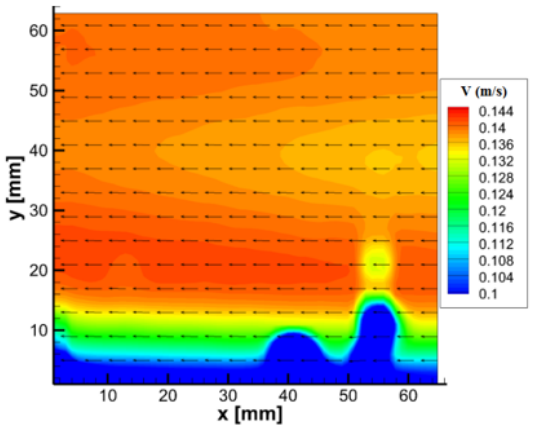
HAVA AKIŞ HIZI DAĞILIMLARI

Farklı fan geriliminde gözenekli ıslak yüzey üzeri hava akış hızı dağılımları (4V, 5V, 6V, 7V, 8V, 9V, 10V, 11V, 12V) koordinatlar [x = 0 – 60 mm] [y = 0 – 60 mm] için aşağıdaki gibi verilmiştir.

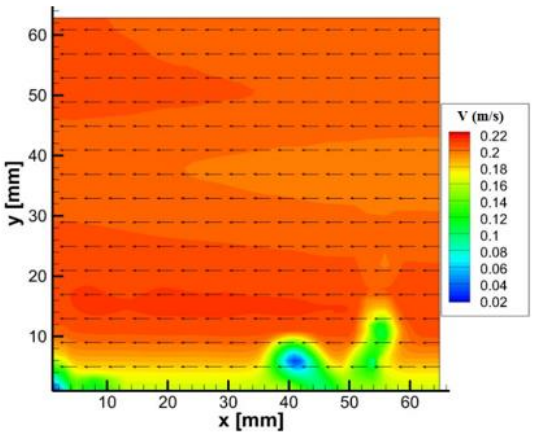
- Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 4V)



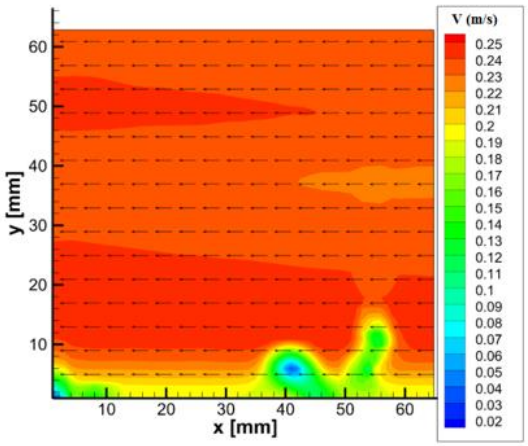
- Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 5V)



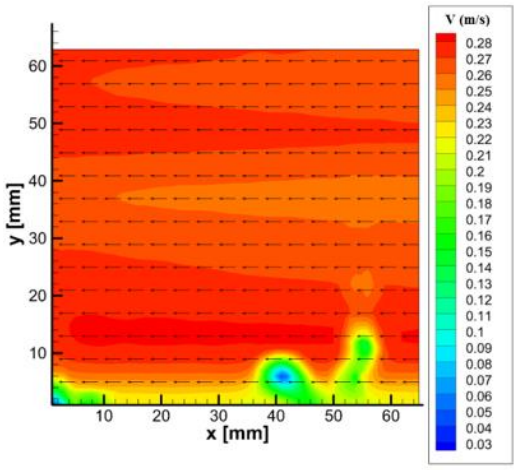
- Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 6V)



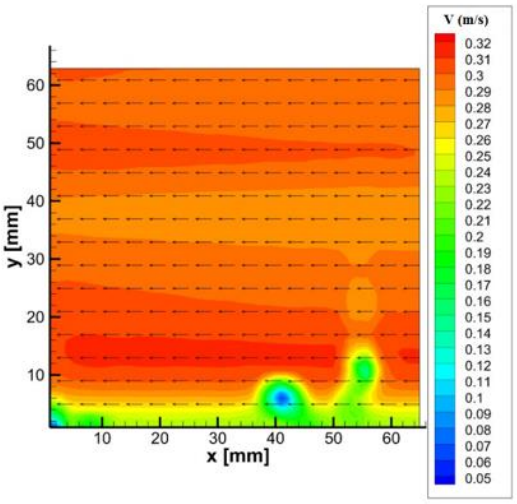
- Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 7V)



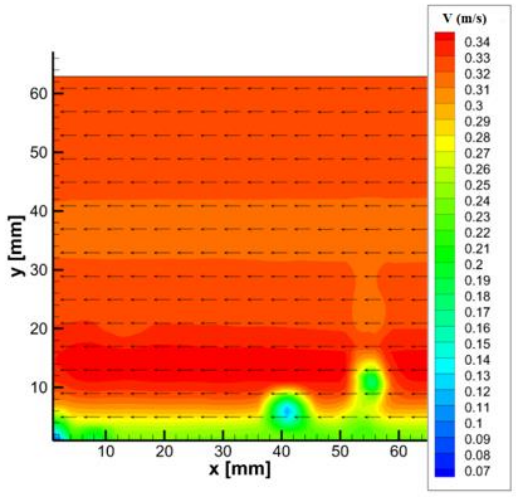
• Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 8V)



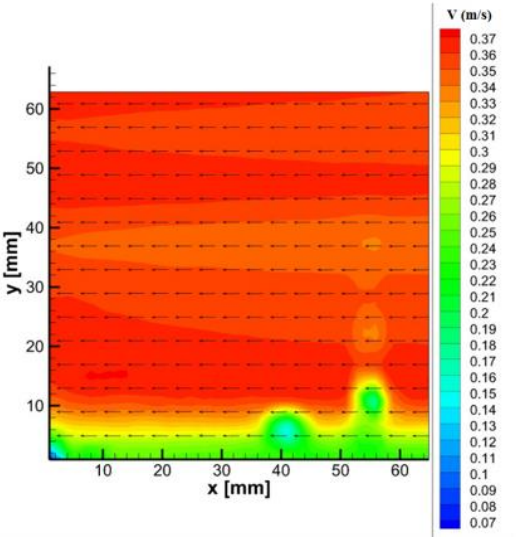
• Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 9V)



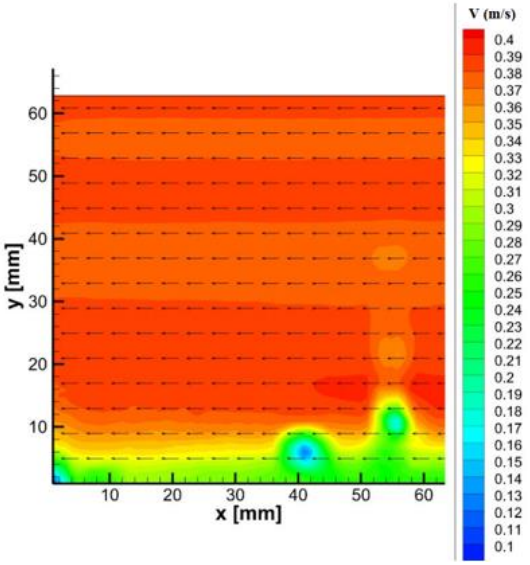
• Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 10V)



• Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 11V)



• Hava akış hızı dağılımı (Fan gerilimi 12V)



EK-B

KALİBRASYON EĞRİLERİ

TERMOELEMAN KALİBRASYON VERİLERİ		
KANAL NO	**ÖLÇÜM NOKTASI İSMİ**	**KALİBRASYON EĞRİSİ**
1	Buharlaşma Haznesi Matris-1	y = 1,0000x + 0,042
2	Buharlaşma Haznesi Matris-2	y = 1,0000x - 0,037
3	Buharlaşma Haznesi Matris-3	y = 1,0000x - 0,033
4	Buharlaşma Haznesi Matris-4	y = 1,0000x - 0,031
5	Buharlaşma Haznesi Matris-5	y = 1,0000x - 0,045
6	Buharlaşma Haznesi Matris-6	y = 1,0000x - 0,046
7	Buharlaşma Haznesi Matris-7	y = 0,9999x + 0,011
8	Buharlaşma Haznesi Matris-8	y = 1,0000x - 0,050
10	Buharlaşma Haznesi Matris-9	y = 1,0000x - 0,053
11	Tünel Hava Giriş-1	y = 1,0000x - 0,032
12	Tünel Hava Giriş-2	y = 1,0000x - 0,040
13	Tünel Hava Giriş-3	y = 1,0000x - 0,045
14	Tünel Hava Giriş-4	y = 1,0000x - 0,043
15	Tünel Hava Çıkış-1	y = 1,0000x - 0,035
17	Tünel Hava Çıkış-2	y = 1,0000x - 0,039

18	Tünel Hava Çıkış-3	y = 1,0000x - 0,068
19	Tünel Hava Çıkış-4	y = 1,0000x - 0,059
20	Tünel Ortam	y = 1,0000x - 0,053
21	Oda Ortam	y = 1,0000x - 0,054
NEM SENSÖRÜ KALİBRASYON VERİLERİ		
513	Tünel Hava Giriş-1	y = 1,1203x - 4,8137
514	Tünel Hava Giriş-2	y = 1,0014x + 0,406
515	Tünel Hava Giriş-3	y = 0,9612x + 0,1078
516	Tünel Hava Giriş-4	y = 0,9806x - 0,1489
506	Tünel Hava Çıkış-1	y = 0,9844x + 0,4132
507	Tünel Hava Çıkış-2	y = 1,003x - 1,4886
508	Tünel Hava Çıkış-3	y = 1,0025x - 0,6903
509	Tünel Hava Çıkış-4	y = 1,0088x - 0,6216
510	Tünel Ortam	y = 0,9709x + 1,3432

MINITAB 17.0 REGREGYON ANALİZİ ÇÖZÜM RAPORU

- Serbest su yüzeyinden buharlaşma için;

Nonlinear Regression: E*h_fg = (Theta1 + Theta2 * V) * 'delta_P' ^ Theta3

```
Method
Algorithm          Gauss-Newton
Max iterations              200
Tolerance               0,00001

Starting Values for Parameters

Parameter  Value
Theta1         1
Theta2         1
Theta3         1

Equation
E*h_fg = (0,280547 + 0,784173 * V) * 'delta_P' ^ 0,694526

Parameter Estimates

Parameter  Estimate  SE Estimate          95% CI
Theta1     0,280547     0,169436  (0,058850; 1,23928)
Theta2     0,784173     0,485793  (0,153591; 3,59594)
Theta3     0,694526     0,085608  (0,480488; 0,91483)
```

```
E*h_fg = (Theta1 + Theta2 * V) * 'delta_P' ^ Theta3
Lack of Fit
There are no replicates.
Minitab cannot do the lack of fit test based on pure error.

Summary
Final SSE   125,425
DFE               6
MSE         20,9041
S           4,57210
```

- Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşmada X = 41% için;

Nonlinear Regression: E*h_fg = (Theta1 + Theta2 * V) * 'delta_P' ^ Theta3

```
Method
Algorithm        Gauss-Newton
Max iterations            200
Tolerance             0,00001

Starting Values for Parameters

Parameter  Value
Theta1         1
Theta2         1
Theta3         1

Equation
E*h_fg = (0,0899244 + 0,313177 * V) * 'delta_P' ^ 0,795429

Parameter Estimates

Parameter  Estimate  SE Estimate         95% CI
Theta1     0,089924     0,044773  (       *; 0,29348)
Theta2     0,313177     0,155898  (       *; 1,02259)
Theta3     0,795429     0,068966  (0,630154; 0,96623)

E*h_fg = (Theta1 + Theta2 * V) * 'delta_P' ^ Theta3
```

```
Lack of Fit
There are no replicates.
Minitab cannot do the lack of fit test based on pure error.

Summary
Final SSE   44,1041
DFE               6
MSE         7,35069
S           2,71122
```

- Gözenekli ıslatılmış yüzeyden buharlaşmada X = 57% için;

Nonlinear Regression: E*h_fg = (Theta1 + Theta2 * V) * 'delta_P' ^ Theta3

```
Method
Algorithm        Gauss-Newton
Max iterations            200
Tolerance             0,00001

Starting Values for Parameters

Parameter  Value
Theta1         1
Theta2         1
Theta3         1

Equation
E*h_fg = (0,0751823 + 0,392793 * V) * 'delta_P' ^ 0,801331


Parameter Estimates

Parameter  Estimate  SE Estimate         95% CI
Theta1     0,075182     0,032687  (0,024572; 0,21400)
Theta2     0,392793     0,162071  (0,140028; 1,05991)
Theta3     0,801331     0,058172  (0,659989; 0,94670)

E*h_fg = (Theta1 + Theta2 * V) * 'delta_P' ^ Theta3
```

Lack of Fit

There are no replicates.

Minitab cannot do the lack of fit test based on pure error.

Summary

Final SSE	37,4816
DFE	6
MSE	6,24693
S	2,49939

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet İNAN

Doğum Tarihi ve Yeri : 17.04.1992 / TEKİRDAĞ

Yabancı Dili : İNGİLİZCE

E-posta : mehhmetinan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Makine Müh. / Isı-Proses	Yıldız Teknik Üniversitesi	Devam ediyor
Lisans	Makine Müh. / Isı-Proses	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Edirne Anadolu Öğretmen Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2014-2016	Arçelik A.Ş. Akışkanlar Dinamiği & Termodinamik Teknolojileri Ailesi	Ar-Ge Proje Mühendisi
2016-Devam ediyor	Arçelik A.Ş Kurutma Makinesi İşletmesi	Ar-Ge Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. İnan, M. ve Atayilmaz Ş. Ö., (2017). Experimental investigation of evaporation from a horizontal free water surface, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 119-131.

Bildiri

1. İnan, M. ve Atayilmaz Ş. Ö., (2017). An experimental study on water evaporation using climatic test chamber, International Conference On Advances in Science and Arts, 29-31 March 2017, İstanbul