T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI YÜZEYLER VE EĞİM AÇILARINDA DURGUN DAMLACIK BUHARLAŞMASININ DENEYSEL, SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Atalay YILDIRIM

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı Proses Programı

Danışman
Prof. Dr. Özden AĞRA

Şubat, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI YÜZEYLER VE EĞİM AÇILARINDA DURGUN DAMLACIK BUHARLAŞMASININ DENEYSEL, SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Atalay YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması 11.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Özden AĞRA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Hakan DEMİR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Nuri Alpay KÜREKCİ, Üye
Yıldız Teknikd Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Şule KAPKIN, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa _____

Danışmanım Prof. Dr. Özden AĞRA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan FARKLI YÜZEYLER VE EĞİM AÇILARINDA DURGUN DAMLACIK BUHARLAŞMASININ DENEYSEL, SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Atalay YILDIRIM

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FBA-2021-4731” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme
ve dostlarıma

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında emeği geçen ve destekleriyle yanımda olan herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, tez sürecimde beni yönlendiren, değerli bilgi ve tecrübeleriyle çalışmama rehberlik eden danışman hocam Sayın Prof. Dr. Özden AĞRA'ya sonsuz teşekkür ederim. Kendisi, akademik hayatımda olduğu kadar kişisel gelişimimde ve kariyer yolumda da önemli bir rol oynamıştır.

Tez çalışmalarım süresince çok kıymetli yorum ve fikirleri ile her daim yanımda olan, yol gösteren, çözüm üreten ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU ve Sayın Prof. Dr. Hakan DEMİR'e çok teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmam sırasında bilimsel görüşleriyle katkıda bulunan Dr. Mustafa Kemal SEVİNDİR ve Dr. Özlem EMANET'e, bana sağladıkları değerli geri bildirimler ve yol göstericilik için minnettarım.

Ayrıca, bu süreç boyunca yanımda olan, sabırla beni dinleyen, moral veren ve her adımda destek olan sevgili arkadaşlarım Hamdi ERGÖK, Eda KUTLU, M. Fatih ÇERMAOĞLU ve Gizem BATMAN'a da minnettarım. Hayatımı daha anlamlı ve keyifli kıldıkları için onlara gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, bu zorlu süreçte karşılaştığım tüm zorlukların üstesinden gelmemi sağlayan motivasyonumun kaynağı olan çok değerli ailem Müjgan YILDIRIM, Uğur YILDIRIM ve Zülal KIZILKAYA'ya en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Atalay YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 4

1.1.1 Temas Açısı 4

1.1.2 Difüzyon ve Damlacık Buharlaşması Kinetiği 7

1.1.3 Durgun Damlacık Buharlaşması İle İlgili Literatür Çalışmaları 9

1.2 Tezin Amacı 33

2 MATERYAL VE METOT 34

2.1 Deneysel Çalışma 34

2.1.1 Farklı Damlacık Hacimlerinde ve Açılı Cam Yüzeylerde Yapılan Deneyler 35

2.1.2 Farklı Malzemelerde Yapılan Deneysel Çalışmalar 42

2.2 Matematik Model 45

2.3 Sayısal Çalışma 47

3 BULGULAR VE TARTIŞMA 53

3.1 Dinamik Temas Açısı ve Damlacık Davranışı 53

3.2 Damlacıkların Buharlaşma Zamanının Doğrulanması 55

4 SONUÇ 59

KAYNAKÇA 61

A OPENFOAM ANALİZİ KAYNAK KODLARI **64**
A.1 Başlangıç Sınır Koşulları 64
A.2 Mesh 70
A.3 Sabitler 73
A.4 Sistem 76

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **83**

SİMGE LİSTESİ

A	Arayüz alanı
P	Basınç
$\dot{m}_E$	Buharlaşma hızı
$\dot{m}_v$	Buharlaşma hızı
t_e	Buharlaşma zamanı
V	Damlacık hacmi
m_{damla}	Damlacık kütlesi
R_0	Damlacık yarıçapı
h	Damlacık yüksekliği
D	Difüzyon sabiti
R_u	Gaz sabiti
h_{fg}	Gizli ısı
c_p	Isıl kapasite
h	Isı transfer katsayısı
k	Isı iletim katsayısı
α	Isıl difüzyon katsayısı
R	Isı transfer katsayısı
ν	Kinematik vizkozite
h_m	Kütle transfer katsayısı
J	Kütle akısı
C	Konsantrasyon
Le	Lewis sayısı
c_p	Isıl kapasite

Ma	Marangoni sayısı
M	Mol kütlesi
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
Ra	Rayleigh sayısı
Re	Reynolds sayısı
Sc	Schmidt sayısı
T	Sıcaklık
θ	Temas açısı
g	Yer çekemi ivmesi
ρ	Yoğunluk
γ	Yüzey gerilimi
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

ANOVA	Varyans analizi
CCA	Sabit temas açısı
CCR	Sabit temas yarıçapı
DC	Doğru akım
DNA	Deoksiriboz nükleik asit
DOE	Deney tasarımı
PCC	Phantom kamera kontrol
PTFE	Politetrafloroetilen
S/N	Sinyal/Gürültü Oranı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Doğada ve mühendislik uygulamalarında damlacık buharlaşması . 2
Şekil 1.2 Durgun damlacık buharlaşmasının yıllara göre Webofscience analizi 4
Şekil 1.3 Durgun damlacık buharlaşmasına etki eden parametreler 4
Şekil 1.4 Damlacık üzerindeki kuvvetler 5
Şekil 1.5 Farklı yüzeylerdeki damlacık şekilleri 6
Şekil 1.6 Gonyometre cihazı ile damlacığın temas açısı ölçümü 6
Şekil 1.7 Küresel damlacığın geometrik parametreleri 8
Şekil 1.8 Farklı yüzeylerdeki damlacık davranışları [3]. 10
Şekil 1.9 Popov'un çalışmasında modellediği damlacık [7]. 12
Şekil 1.10 Navaz'ın çalışmasındaki damlacık buharlaşma hızının zamana bağlı değişimi [8]. 13
Şekil 1.11 Belirli bir kalınlığa sahip yatay bir katı yüzey üzerinde küresel kep şeklindeki su damlacığının şematik gösterimi [11] 15
Şekil 1.12 Her fazdaki hesaplama alanı ve ağ yapısı: (a) hesaplama alanındaki toplam ağ yapısı, (b) farklı koordinat sistemlerindeki damlacık içi ve çevresindeki ağ yapısı [11] 16
Şekil 1.13 Farklı katı yüzey ısıl iletkenlikleri için sabitlenmiş ve sabitlenmemiş damlaların yüzey alanı değişimi [11] 16
Şekil 1.14 L=0.002, 0.03 ve 0.06 m'deki ortalama kurutma hızları [14] . . . 18
Şekil 1.15 Deney setinin şematik gösterimi ve fotoğrafı [15] 20
Şekil 1.16 2811 W/m^2 ısı akısında hidrofilik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde farklı boyutlardaki su damlacıklarının buharlaşmasına ait deney görüntüleri [16] 21
Şekil 1.17 Farklı alt tabaka sıcaklıklarında bir (Etanol 50% + Su 50%) damlacığının zamanla buharlaşması. Her panelde gösterilen ölçek çubuğunun uzunluğu 200 mikrometredir [18] 23
Şekil 1.18 Farklı boşluk oranları altında sıcaklık konturları. (a) boşluk oranı = 20, (b) boşluk oranı = 40, (c) boşluk oranı = 60, (d) boşluk oranı = 80 [19] 24
Şekil 1.19 Sayısal yarıçap (a) ve sıcaklık (b) verilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması [19] 24
Şekil 1.20 Damlacık buharlaşması için oluşturulan sayısal model [20] 25

Şekil 1.21 Buharlaşmanın başlangıcında izotermlerin değişimi. (a) zaman adımı=1000 (b) zaman adımı=5000 (c) zaman adımı=10000 (d) zaman adımı=20000 [20] 26
Şekil 1.22 Farklı yerel ısıtma koşulları altında, farklı temas açılarına sahip damlacıkların akış alanındaki sıcaklık dağılımı [20] 26
Şekil 1.23 (a) Bir ısıtıcı, paslanmaz çelik bir plaka üzerine yerleştirilmiş bir Politetrafloroetilen (PTFE) alt tabaka, bir ışık kaynağı, IR ve CMOS kameralardan oluşan deneysel kurulumun şeması. (b) Gerçek gonyometre kurulumunun bir resmi. Kutunun boyutu (kurulumu göstermek için önden açılır) 2424mm × 460mm × 530mm'dir [21] 27
Şekil 1.24 (E 20% + W 80%) damlacığının kesit görünümünün farklı alt tabaka sıcaklıkları için zamanla buharlaşması [21] 28
Şekil 1.25 Buğday (A), Teflon (B), Kapsikum (C) ve Parafilm (D) üzerindeki damlacık buharlaşması için damlacık hacmi (m^3) ve zamana (h) bağlı deneysel veriler [22] 28
Şekil 1.26 Buğday (A,B) ve kapsikum (D) üst yaprak yüzeylerindeki damlacıklar, Teflon (C) ve Parafilm (E). Sağdaki damlacık %1 S465, sonra (D) ve (E)'de %0,1 S465 ve sudur [22] 29
Şekil 1.27 Farklı yönlerde (x yönü ve z yönü) damlacık arayüzündeki boyutsal olmayan sıcaklık dağılımları: (a) Alt tabaka ısıtma $T = 0$°C ve eğim açısı $\alpha = 0$°'dir; (b) Alt tabaka ısıtma $T = 0$°C ve eğim açısı $\alpha = 90$ °'dir; (c) Alt tabaka ısıtma $T = 30$°C ve eğim açısı $\alpha = 0$°'dir; (d) Alt tabaka ısıtma $T = 30$°C ve eğim açısı $\alpha = 90$°'dir [23] 30
Şekil 1.28 Simetri düzleminde (z = 0) gaz alanındaki buhar kütle kesri dağılımı ve akış alanı: (a) Alt tabaka ısıtma $T = 0$°C'dir; (b) Alt tabaka ısıtma $T = 30$°C'dir [23] 31
Şekil 2.1 Deney tesisatının şematik gösterimi (1-Bilgisayar, 2-Yüksek Hızlı Kamera, 3-Sıcaklık Data Logger, 4-Sıcaklık-Bağıl Nem Probu, 5-Katı Yüzey, 6-Su Damlası, 7-Elektrikli Isıtıcı, 8-Işık Kaynağı, 9-DC Güç Kaynağı Kontrol Ünitesi, 10-İzolasyon, 11-Termokupllar) 35
Şekil 2.2 Üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip cam malzemeler 36
Şekil 2.3 Standart mikro zımpara kâğıdı (P600) 36
Şekil 2.4 Mahr marka profilometre 36
Şekil 2.5 3 µL damlacık için cam yüzeyler üzerinde su damlalarının başlangıç görüntüleri 37

Şekil 2.6 Zamana bağlı farklı katı yüzey açıları için damlacık buharlaşması görüntüleri (Damlacık parametreleri: 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC katı yüzey sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı) 38
Şekil 2.7 Regresyon denkleminin katsayıları 41
Şekil 2.8 Cam yüzeylerde yapılan deneylerde parametrelerin damlacık buharlaşmasına etkisi 42
Şekil 2.9 3 farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip plastik malzemeler 42
Şekil 2.10 3 farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip aluminyum malzemeler 43
Şekil 2.11 6 Parametreli regresyon denkleminin katsayıları 44
Şekil 2.12 Deneysel parametrelerin buharlaşma süresine etkisi 45
Şekil 2.13 İki boyutlu damlacık geometrisi 45
Şekil 2.14 Damlacık buharlaşması 47
Şekil 2.15 Sayısal çalışma için oluşturulan damlacık geometrisi 48
Şekil 2.16 Sayısal çalışma hesaplama alanları 48
Şekil 2.17 Sayısal çalışma için oluşturulan ağ yapısı 48
Şekil 2.18 Yatay yüzeyde 60°C sabit yüzey sıcaklığı için sayısal çalışma sonucuna göre 3 µL damlacığın zamana bağlı hacim değişimi . . . 49
Şekil 2.19 45° eğimli yüzeyde 60°C sabit yüzey sıcaklığı için sayısal çalışma sonucuna göre 3 µL damlacığın zamana bağlı hacim değişimi . . . 50
Şekil 2.20 75° eğimli yüzeyde 60°C sabit yüzey sıcaklığı için sayısal çalışma sonucuna göre 3 µL damlacığın zamana bağlı hacim değişimi . . . 51
Şekil 2.21 İlk 5 saniye boyunca damlacık ve etrafındaki akış alnının sıcaklık gradyeni 52
Şekil 3.1 Yatay yüzeylerde zamana bağlı temas açısı değerleri (damla parametreleri: 3 µL hacim, 30 °C başlangıç damla sıcaklığı, P0 yüzey pürüzlülüğü) 53
Şekil 3.2 Yatay yüzeylerde zamana bağlı temas açısı değerleri (damla parametreleri: 3 µL hacim, 30 °C başlangıç damla sıcaklığı, P600 yüzey pürüzlülüğü) 54
Şekil 3.3 Yatay yüzeylerde zamana bağlı temas açısı değerleri (damla parametreleri: 3 µL hacim, 30 °C başlangıç damla sıcaklığı, P60 yüzey pürüzlülüğü) 54
Şekil 3.4 Deneysel ve tahmin buharlaşma zamanlarının saçılım grafiği . . . 55
Şekil 3.5 Yatay cam katı yüzeyde; 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC taban sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı için analitik, deneysel ve sayısal sonuçlar 56

Şekil 3.6 45º eğik katı yüzeyde; 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC taban sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı için deneysel ve sayısal zamana bağlı hacim değişimi . . 57
Şekil 3.7 75º eğik katı yüzeyde; 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC taban sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı için deneysel ve sayısal zamana bağlı hacim değişimi . . 57
Şekil 3.8 Deneysel, analitik ve sayısal sonuçlar için saçılım grafiği 58
Şekil 3.9 Deneysel sonuçların literatür (Popov) ile doğrulanması 58

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Farklı ısıl iletkenliklerdeki katı yüzeyler üzerinde sabitlenmiş ve sabitlenmemiş damlacıkların buharlaşma hızı [11] 15
Tablo 2.1 3 farklı cam yüzey için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri . . 36
Tablo 2.2 Su damlacıklarının farklı cam yüzeyler üzerinde başlangıç temas açısı değerleri 37
Tablo 2.3 Deney parametrelerinin hesaplanan belirsizlikleri 38
Tablo 2.4 Deneysel parametrelerin seviyeleri 40
Tablo 2.5 Taguchi'nin L27 ortogonal matrisine göre deney setininin matrisi 40
Tablo 2.6 Deney parametreleri, çıktı ve tahmin sonuçları 41
Tablo 2.7 3 farklı plastik yüzey için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri . 43
Tablo 2.8 Üç farklı alüminyum yüzey için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 43
Tablo 2.9 Farklı katı yüzey malzemeleri ile yapılan deneylerin sonuçları . . 44
Tablo 2.10 Sayısal analiz sonuçlarına göre yatay katı yüzeyde zamana bağlı damlacığın sol ve sağ temas açıları 50
Tablo 2.11 Sayısal analiz sonuçlarına göre 45 derece eğimli katı yüzeyde zamana bağlı damlacığın sol ve sağ temas açıları 51
Tablo 2.12 Sayısal analiz sonuçlarına göre 75 derece eğimli katı yüzeyde zamana bağlı damlacığın sol ve sağ temas açıları 52
Tablo 3.1 5 Parametreli Anova analizi sonuçları 55
Tablo 3.2 5 Parametreli Anova analizi R^2 değerleri 55
Tablo 3.3 6 Parametreli Anova analizi sonuçları 56
Tablo 3.4 6 Parametreli Anova analizi R^2 değerleri 56

ÖZET

FARKLI YÜZEYLER VE EĞİM AÇILARINDA DURGUN DAMLACIK BUHARLAŞMASININ DENEYSEL, SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Atalay YILDIRIM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Özden AĞRA

Bu tez çalışmasında doğada ve birçok endüstriyel uygulamada etkili olan damlacık buharlaşması incelenmiştir. Durgun damlacık buharlaşması için matematik ve sayısal model oluşturulup sonuçlar deneysel çalışma ile de doğrulanmıştır. Matematik ve sayısal modellerde ısı ve kütle transferi analizleri yapılmıştır. Deneysel olarak, farklı yüzey pürüzlülük seviyelerine sahip üç farklı katı alt yüzey (cam, plastik ve aluminyum) üzerindeki sabit bir su damlasının buharlaşma karakteristiği araştırılmıştır. Buharlaşma süreci için altı parametrenin etkisi değerlendirildi, bunlar: katı yüzey sıcaklığı (30 °C, 45 °C ve 60 °C), yüzey pürüzlülüğü (P0, P600 ve P60), katı yüzey malzemesinin cinsi (cam, plastik ve aluminyum), damlacık hacmi (3, 5 ve 8 μL), su damlacıklarının başlangıç sıcaklığı (30 °C, 40 °C ve 60 °C) ve katı yüzey eğim açısı (0 derece, 45 derece ve 75 derece) şeklindedir. Taguchi'nin L27 ortogonal dizisi, deneysel çalışmalarda minimum test sayısını belirlemek için kullanılmıştır. Farklı şartlardaki durgun damlacıkların buharlaşma sürelerini belirlemek için Taguchi'den elde edilen veriler varyans analizinde (ANOVA) kullanıldı. Sonuçlar buharlaşma sürelerinin artan katı yüzey sıcaklıkları, artan katı yüzey eğim açısı ve artan başlangıç su damlacığı sıcaklıklarıyla azaldığını göstermektedir. Buna karşılık, buharlaşma sürelerinin artan yüzey pürüzlülüğü ve damlacık hacimleriyle arttığı görülmüştür. ANOVA analizi sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülük seviyeleri ve damlacık hacimleri, buharlaşma süresi üzerinde en etkili parametre olan katı yüzey sıcaklıklarından

sonra etkili parametreler olarak tespit edilmiştir. Öte yandan, başlangıç su damlacığı sıcaklıkları ve katı yüzey eğim açısının, damlacık buharlaşma süreleri dikkate alındığında daha az etkili olduğu görülmüştür. Buharlaşma süresi için ANOVA analizi ile doğrusal bir regresyon uyumu türetilmiş ve en iyi ortalama sapmanın %10 olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar önceki araştırmalarla karşılaştırılmış ve buharlaşma süresinin tüm parametrelerini göze alarak tahmin eden bir korelasyon türetilmiştir. Deneysel çalışmanın yanı sıra OpenFoam programında yatay ve açılı yüzeyler için zamana bağlı buharlaşma süresini hesaplayan bir model oluşturulmuştur. Tez çalışması kapsamında damlacık buharlaşmasına yönelik yapılan deneysel, sayısal ve analitik çalışmaların sonuçları birbiri ile ve literatürdeki çalışmalarla uyumlu sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Durgun damlacık buharlaşması, doe, anova.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL, NUMERICAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF SESSILE DROPLET EVAPORATION ON DIFFERENT SURFACES AND INCLINATION ANGLES

Atalay YILDIRIM

Department of Mechanical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Özden AĞRA

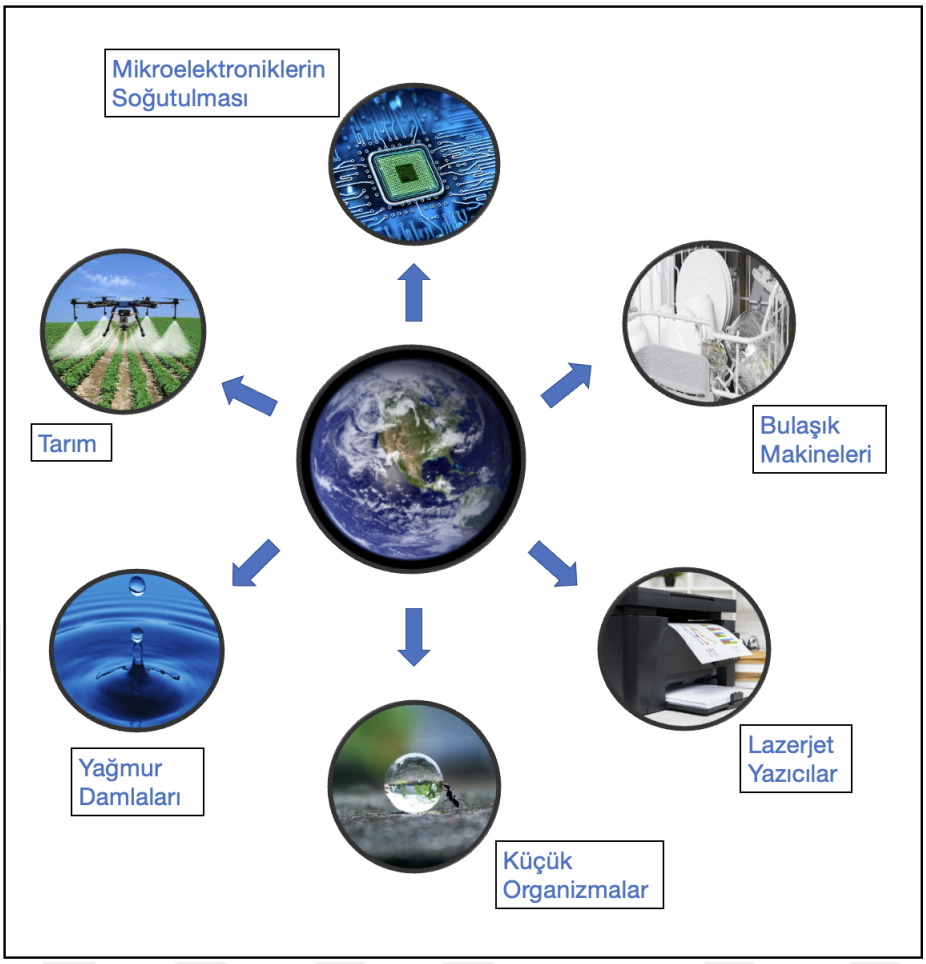
In this thesis, droplet evaporation, which is effective in nature and many industrial applications, was investigated. A mathematical and numerical model was created for sessile droplet evaporation and the results were also verified by experimental studies. Heat and mass transfer analyses were performed in mathematical and numerical models. Experimentally, the evaporation characteristics of a sessile water drop on three different solid substrates (glass, plastic and aluminum) with different surface roughness levels were investigated. The effects of six parameters for the evaporation process were evaluated, which are: solid surface temperature (30 °C, 45 °C and 60 °C), surface roughness (P0, P600 and P60), type of solid surface material (glass, plastic and aluminum), droplet volume (3, 5 and 8 μL), initial temperature of water droplets (30 °C, 40 °C and 60 °C) and solid surface inclination angle (0 degrees, 45 degrees and 75 degrees). Taguchi's L27 orthogonal array was used to determine the minimum number of tests in experimental studies. The data obtained from Taguchi were used in analysis of variance (ANOVA) to determine the evaporation times of sessile droplets under different conditions. The results showed that evaporation times decreased with increasing solid surface temperatures, increasing solid surface inclination angle and increasing initial water droplet temperatures. On the other hand, evaporation times increased with increasing surface roughness and droplet volumes. According to the ANOVA analysis results, surface roughness levels and droplet volumes were

determined as the most effective parameters after solid surface temperatures, which were the most effective parameters on evaporation time. On the other hand, it was observed that initial water droplet temperatures and solid surface inclination angle were less effective when droplet evaporation times were considered. A linear regression fit was derived for evaporation time with ANOVA analysis and the best mean deviation was found to be %10. Experimental results were compared with previous studies and a correlation was derived that estimated the evaporation time considering all parameters. In addition to the experimental study, a model was created in the OpenFoam program that calculates the evaporation time depending on time for horizontal and angled surfaces. The results of the experimental, numerical and analytical studies on droplet evaporation within the scope of the thesis study gave results that are compatible with each other and with the studies in the literature.

Keywords: Sessile droplet evaporation, doe, anova.

1
GİRİŞ

Damlacık buharlaşması, ısı transferi, enerji verimliliği ve çevresel sistemlerdeki etkileri nedeniyle mühendislik ve doğal bilimlerde önemli bir konu olmuştur. Yüzey üzerinde durgun bir damlacığın buharlaşması, sıvının yüzeyden çevre ortamına geçiş sürecini ifade eder. Damlacık buharlaşmasının uygulama alanları, çok çeşitli disiplinlerde hayati öneme sahiptir. Biyolojide, hücresel sıvılar üzerindeki buharlaşma çalışmaları, biyo-moleküllerin taşınımı ve hücre membranı üzerindeki etkiler gibi süreçleri anlamada kritik rol oynar. Kimya ve malzeme biliminde, ince film kaplama tekniklerinde ve nano-malzemelerin üretiminde damlacık buharlaşma dinamikleri önemlidir. Endüstriyel proseslerde, buharlaşma mekanizmaları ısı değişim sistemlerinin tasarımında, soğutma mekanizmalarının optimizasyonunda ve tarımsal sulamada su kaybını azaltmak için kullanılır. Ayrıca, mürekkep püskürtmeli yazıcılar ve mikro damlacık teknolojilerinde, sıvıların yüzeydeki davranışları buharlaşma süreçleriyle doğrudan ilişkilidir. Çevre bilimlerinde, damlacık buharlaşması atmosferik süreçler ve su döngüsü modellemelerinde önemlidir. Bu nedenle, damlacık buharlaşması, bilimsel ve teknolojik yeniliklerin temelinde yer alan bir olgudur (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Doğada ve mühendislik uygulamalarında damlacık buharlaşması

Damlacık buharlaşmasında incelenmesi gereken temel sorun, buharlaşma sürecini etkileyen fiziksel ve kimyasal mekanizmaların detaylı bir şekilde anlaşılması ve doğru bir şekilde modellenmesidir. Bu süreç, pek çok karmaşık faktörün bir araya geldiği bir olay olup, etkileyen parametreleri şöyle sıralayabiliriz.

• **Yüzey-Çevre Etkileşimleri**

Damlacığın buharlaşmasını belirleyen en önemli etkenlerden biri, sıvının temas ettiği yüzeyin özellikleridir. Yüzeyin pürüzlülüğü, hidrofobik veya hidrofilik yapısı ve termal iletkenliği, buharlaşma hızını doğrudan etkiler. Bu özelliklerin, buharlaşma dinamiklerine etkisinin doğru bir şekilde modellenmesi ve deneysel olarak doğrulanması önemlidir.

• **Buharlaşma Hızının Belirlenmesi**

Damlacığın buharlaşma hızı, difüzyon, konveksiyon ve marangoni akımları gibi faktörlerin karmaşık bir birleşimiyle kontrol edilir. Özellikle ortam koşullarına

(sıcaklık, nem, hava akımı) bağlı olarak değişen bu mekanizmaların birlikte nasıl çalıştığını anlamak önemlidir.

• Isıl ve Kütle Transferi Mekanizmaları

Buharlaşma sırasında damlacık ile çevresi arasında ısıl ve kütle transferi gerçekleşir. Isı transferinin yüzey sıcaklığına, kütle transferinin ise damlacığın şekline ve boyutuna bağlı olarak değişmesi, bu mekanizmaların incelenmesini zorlaştırır. Isı ve kütle transferinin birbiriyle olan ilişkisini çözmek, sürecin anlaşılması için kritik bir öneme sahiptir.

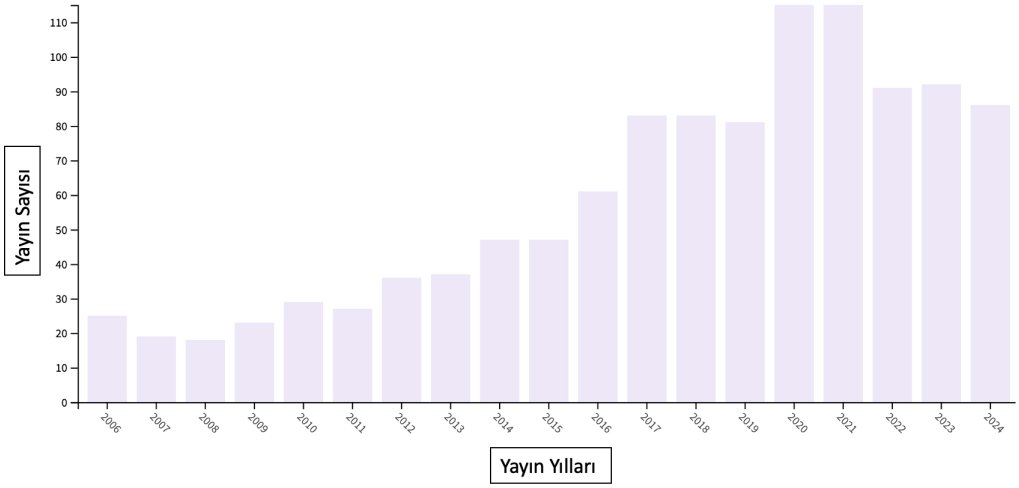
• Damlacık Şeklinin ve Dinamiğinin Etkisi

Damlacığın şekli, zamanla değişen bir özellik olup buharlaşma sürecinde önemli bir rol oynar. Buharlaşma sırasında damlacığın küçülmesi, şeklinin ve yüzeyle temas açısının değişimi, bu süreçlerin modellenmesi açısından temel bir sorundur.

Bu çalışmada damlacıkların buharlaşma prosesini etkileyen parametreler için matematik ve sayısal modeller oluşturulup, deneysel çalışma ile sonuçlar doğrulanmıştır. Daha sonra deneysel optimizasyon yöntemleri ile buharlaşma prosesine etki eden parametrelerin duyarlılık analizi yapılmıştır ve deney çalışmasının parametrik sınır şartları içerisinde kalan ve damlacık buharlaşma süresini hesaplayan bir korelasyon türetilmiştir.

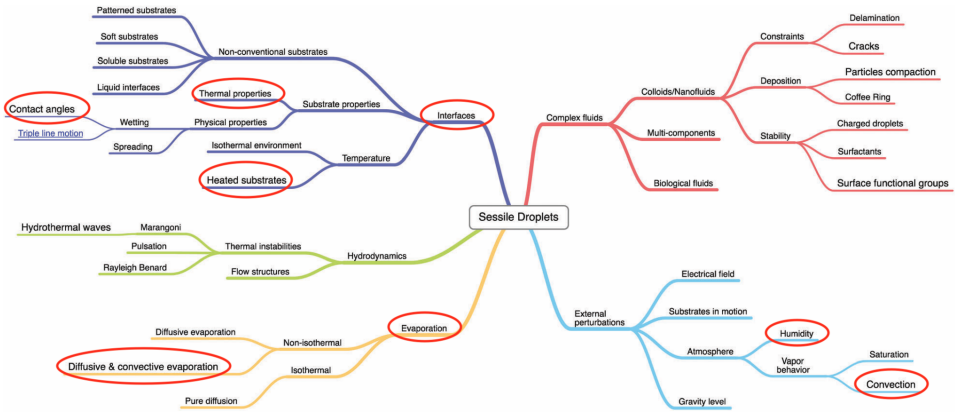
1.1 Literatür Özeti

Durgun damlacık buharlaşması literatürde araştırmacılar tarafından önemli bir çalışma konusu olmuştur. Endüstride ve doğada birçok uygulamanın temelinde damlacık buharlaşması olduğu için son yıllarda artan bir trend ile bu konunun araştırıldığı şekil 1.2'de görülen Webofscience analizinden anlaşılmaktadır.



Şekil 1.2 Durgun damlacık buharlaşmasının yıllara göre Webofscience analizi

Şekil 1.3'de durgun damlacık buharlaşmasına etki eden tüm parametrelere yer verilmiştir. En önemli parametreleri sıcaklık, bağıl nem, yüzey gerilimi, viskozite, damlacığın hacmi, yüzey alanı, kontak açısı ve yüzey özelliklerinin hidrofobik veya hidrofilik olması şeklinde sıralayabiliriz.

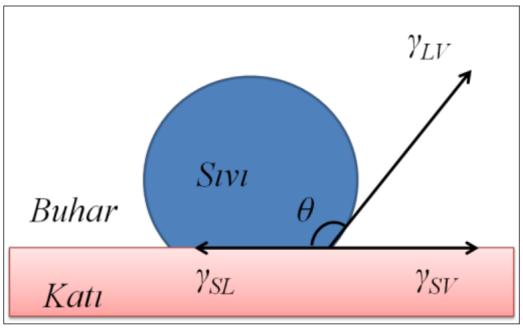


Şekil 1.3 Durgun damlacık buharlaşmasına etki eden parametreler

1.1.1 Temas Açısı

Temas açısı, bir sıvının katı yüzey üzerinde oluşturduğu damlacığın, yüzeyle yaptığı açıya verilen addır. Bu açı, sıvının yüzeyde nasıl davrandığını, yüzey enerjisini ve sıvı-katı ara yüzeydeki etkileşimlerin doğasını anlamak için önemli

bir parametredir. Yüzey üzerinde bulunan damlacık, şekil 1.4'de gösterildiği gibi üç farklı kuvvetin etkisi altındadır.



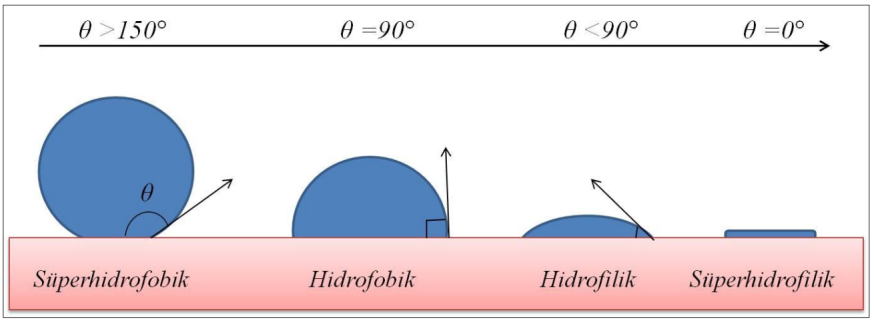
Şekil 1.4 Damlacık üzerindeki kuvvetler

Burada; γ_{SL} katı-sıvı, γ_{SV} katı-buhar ve γ_{LV} sıvı-buhar ara yüzey gerilimlerini ifade etmektedir.

Temas açısı Thomas Young tarafından tanımlanmış olup, (Denklem 1.1) bir sıvının sert, pürüzsüz bir katı yüzey üzerinde üçlü faz temas hattında yüzeyler arasındaki yüzey gerilimlerinin oluşturduğu üç vektörün toplamıdır [1].

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \tag{1.1}$$

Temas açısı, katı bir yüzeyin bir sıvı tarafından ne kadar ıslak olabileceğinin niceliksel bir ölçüsüdür. Bu değer, sıvının molekülleri arasındaki (bağlanma kuvvetleri) ve sıvı ile katı arasındaki (yapışma kuvvetleri) çekim kuvvetlerinin büyüklüğü ile belirlenir. Yapışma kuvveti, kohezyon kuvvetinden ne kadar büyük olursa, katı yüzey ile damlacık arasındaki temas açısı o kadar küçük olur. Böyle bir durumda katı yüzey ile sıvı teması çok fazla olur ve yüzey ıslanır. Bir yüzeyin temas açısı 90°'den az ise ıslanan (hidrofilik), 0° ile 5° arasında ise süperhidrofilik, 90° ile 150° arasında ise ıslanmayan (hidrofobik) yüzey olarak tanımlanır ve damlacıklar bu yüzey üzerinde küresel geometriye yakın davranış gösterirler. Farklı yüzeylerdeki damlacık şekilleri ve temas açıları şekil 1.5'te görülmektedir.



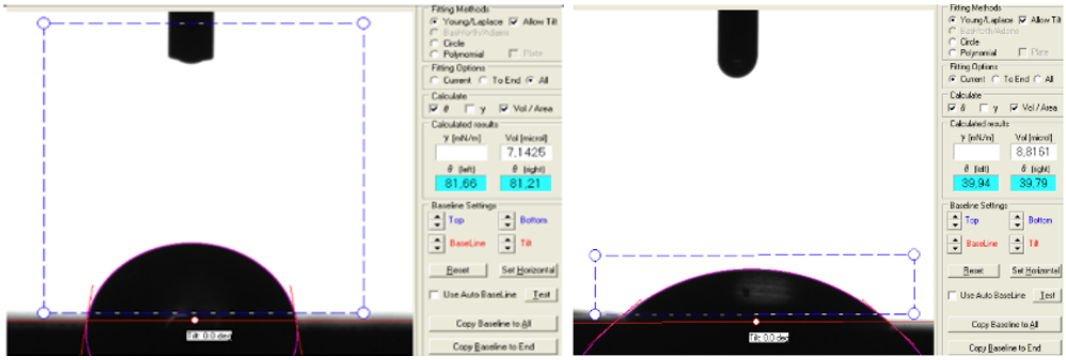
Şekil 1.5 Farklı yüzeylerdeki damlacık şekilleri

1.1.1.1 Temas Açısı Ölçme Yöntemleri

Günümüzde temas açılarını belirlemek için birçok yöntem olmasına karşın,statik temas açısı ve dinamik temas açısı belirleme yöntemi en yaygın kullanılan iki yöntemdir. Temas açısının belirlenmesinde ölçüm kalitesini etkileyen parametreleri; ölçülecek yüzeyin temizliği, kullanılan sıvının saflığı, ölçüm sırasında damlacığın buharlaşması, iğnenin damlacıkla temas halinde olup olmadığı ve iğnenin doğru bir şekilde konumlandırılması şeklinde sıralanabilir.

• Statik Temas Açısı Ölçme (Gonyometre Metodu)

Statik temas açısı ölçümleri için kullanılan gonyometre ile katı bir yüzey üzerindeki damlacığın düşüşü, belirli zaman aralıklarında video kamera ile kaydedilir. Gonyometre kayar bir sistem üzerinde bulunan video kamera, ışık kaynağı, istenen miktarda sıvıyı damlatabilen dispenser ve çekilen görüntülerin analizi için kullanılan bir yazılımdan oluşur.



Şekil 1.6 Gonyometre cihazı ile damlacığın temas açısı ölçümü

Bu yöntem, bir katı yüzey üzerine bırakılan bir damlanın görüntü analizi ile gerçekleştirilmektedir. Cihazın içerisindeki yazılım, damlanın üçlü faz temas çizgisi üzerindeki tanjantını alarak denge temas açısını, yani θ_e değerini hesaplar (Şekil 1.6). Denge temas açısı, Young Denklemi ile ilişkilidir. Young denklemi, pürüzsüz katı yüzeyler için tanımlanmıştır.

• **Dinamik Temas Açısı Ölçme (Tensiyometre Metodu)**

Dinamik temas açısı ile ölçme ise, katı bir yüzeyin test sıvısıyla etkileşime geçtiğinde, hareketli üç faz sınırındaki (katı/sıvı/gaz) mevcut kuvvetlerinin ölçümü ile gerçekleşir. Temas açısı, yüzey gerilimi ve yüzeyin geometrisi bilindiğinde etkileşim kuvvetleri tespit edilebilir.

1.1.2 Difüzyon ve Damlacık Buharlaşması Kinetiği

Difüzyon, maddelerin yüksek konsantrasyonlu bir ortamdan düşük konsantrasyonlu bir ortama doğru yayılması olayıdır. Enerji harcanmadan, moleküllerin rastgele hareketi ile gerçekleşir. Difüzyon ile gerçekleşen olaylara örnek olarak bir odada parfüm sıkıldığında, parfüm moleküllerinin havada difüzyon yoluyla yayılması, çay poşetinin sıcak suya atıldığında, çaydaki renk ve tat moleküllerinin suya difüzyonla yayılması gibi birçok örnek verilebilir.

Gazların difüzyonu en hızlı şekilde gerçekleşirken, sıvılarda ise bu süreç çok daha yavaştır. Gaz molekülleri, aralarındaki çekim kuvvetlerinden bağımsız olarak hızlı ve kolay bir şekilde difüze olurlar. Sıvılarda ise moleküller birbirleri üzerinde serbestçe hareket eder; ancak aralarındaki çekim kuvvetleri, onları yakın tutarak difüzyon hızlarını orta seviyede sınırlamaktadır. Katılarda difüzyon titreşimle gerçekleşirken hızı oldukça düşüktür.

Bir sıvının buharlaşması sırasında, sıvının içindeki moleküller, buharlaşma için gerekli olan enerjiyi içten veya dıştan alarak, sıvı yüzeyini buhar olarak terk edip gaz fazına geçerler. Bu olay sıvı yüzeyinin hemen üzerindeki gerçekleştiği için, buharlaşma difüzyona dayalı bir faz geçişidir. Difüzyon kinetik bir olgu olup Fick yasasıyla ifade edilebilir.

1.1.2.1 Fick Difüzyon Yasaları

Fick'in difüzyon ile ilgili iki ana kanunu bulunmaktadır. İlk olarak, Fick kanunu, difüzyonun tanımlanması ve difüzyon katsayısının tespit edilmesi ile ilgilidir. İkinci kanun ise, değişken koşullar altında difüzyonun yer ve zamana bağlı olarak değişimini gösterir.

• **1. Fick Yasası**

Durgun bir ortamda x doğrultusunda bir A kimyasal bileşeninin yayınım hızı dC/dx ile doğru orantılı olup Fick Yayınım kanunu ile Eşitlik 1.2'deki gibi ifade edilir.

$$J = -D\frac{dC}{dx} \quad \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right) \tag{1.2}$$

Burada, "J" buharlaşan toplam gaz debisini , "D" difüzyon sabitini ve kısmi diferansiyel içindeki "C" ise konsantrasyon gradyenini ifade eder.

• 2. Fick Yasası

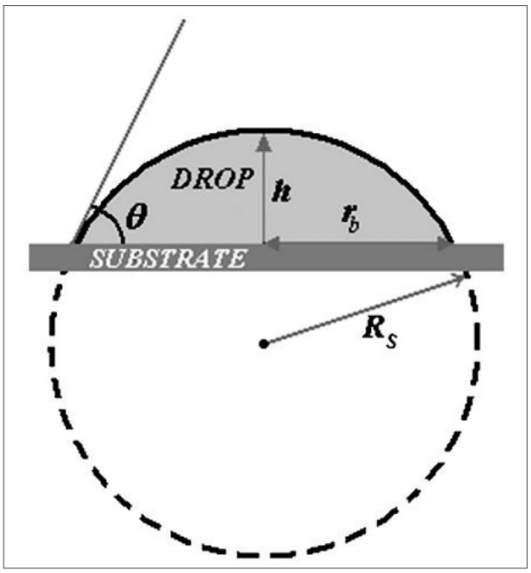
Fick'in ikinci yasası, bir maddenin konsantrasyonunun zamanla nasıl değiştiğini açıklar. Kısmi diferansiyel denklem olarak ifade edilir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{1.3}$$

Burada C konsantrasyon, t zaman, D difüzyon katsayısı ve $\partial^2 C/\partial x^2$ konsantrasyonun mesafeye göre ikinci türevini ifade etmektedir.

• Damlacık Buharlaşmasına Difüzyon Yasalarının Uygulanması

Katı bir yüzeye damlatılan bir sıvı damlası küresel bir form olarak değerlendirilir ve dört ayrı parametre ile tanımlanır. Bu parametreler; damlanın yüksekliği (h), temas yarıçapı (r_b), küresel damlanın yarıçapı (R_s) ve damlanın katı yüzey ile oluşturduğu temas açısıdır (θ) (Şekil 1.7).



Şekil 1.7 Küresel damlacığın geometrik parametreleri

Bir damlacık yeterince küçük ve küreselse, bu durumda yer çekimi kuvvetinin damla üzerinde etkisi ihmal edilebilir hale gelir. Bu nedenle, sıvı damlası küresel kep olarak adlandırılan bir şekil alır. r_b, R_s, θ ve h arasındaki ilişki Eşitlik 1.4 ve 1.6 ile gösterilmiştir.

$$r_b = R_s \sin\theta \tag{1.4}$$

$$h = R_s(1 - \cos\theta) \quad \text{ve} \quad h = r_b \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{1.5}$$

$$A_{SL} = \pi r_b^2 \quad \text{ve} \quad A_{LV} = 2\pi R_S^2(1 - \cos\theta) \tag{1.6}$$

Damlacık kütlesinin zamanla azalması Fick Yasası ile;

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = 4\pi R_S^2 D \frac{\partial c}{\partial R} \tag{1.7}$$

şeklinde ifade edilir. Ve son olarak küresel kep şeklindeki damlacığın hacmi;

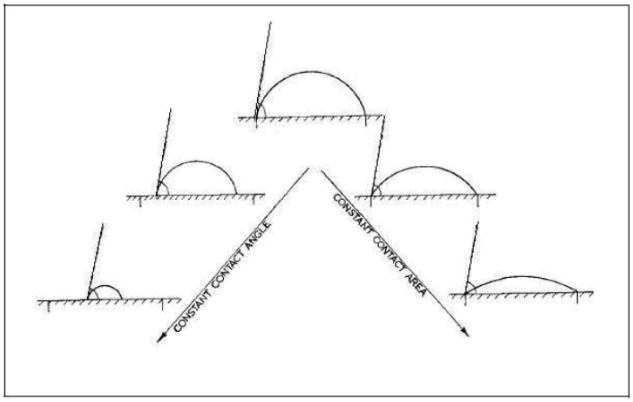
$$V = \frac{\pi r_b^2 h}{3} \frac{(2 + \cos\theta)}{(1 + \cos\theta)} \tag{1.8}$$

eşitliği ile hesaplanabilir [2].

1.1.3 Durgun Damlacık Buharlaşması İle İlgili Literatür Çalışmaları

Damlacık buharlaşması geçmişten günümüze araştırmacılar tarafından yoğun olarak araştırılan bir konu olmuş, giderek ilgi artmakta ve uygulama alanları çeşitlenmektedir. Bu çalışmalardan bazıları; Picknett ve Bexon, 1977 yılında düz bir yüzey üzerinde organik sıvılardan oluşan damlacıkların kütle ve damlacık profilindeki değişiklikleri izleyerek iki temel buharlaşma tekniği üzerine deneysel olarak çalışmışlardır. Bu modellerden ilki şekil 1.8'da görüldüğü gibi sabit temas açılı modeldir. Temas açısının sabit olduğu durumlarda temas açısı değişmez, şekli küre şeklinde kalır ve sıvı ile katı arasındaki temas alanı ve yüksekliği azalır. Bu durum her üç fazın dengede olduğu ideal bir sistemde beklenen davranıştır. Bir diğer model sabit temas yüzeyi modelidir ve bu modelde, yüzey ile sıvı arasındaki temas alanı sabit kalırken, buharlaşma süreci sırasında temas açısının azaldığı

tespit edilmiştir. Fakat damlanın küreselliği korunur. Sabit temas yarıçapı modeli, temas açısının karmaşık bir durum sergilediği durumlarda geçerlidir ve buharlaşma, gerileyen temas açısına ulaşana dek devam eder [3].



Şekil 1.8 Farklı yüzeylerdeki damlacık davranışları [3].

Birdi, 1989 yılında yaptığı çalışmalarında, temas açısının 90 dereceden küçük olduğu şartlarda buharlaşma süresince temas yarıçapının sabit kaldığını, ancak temas açısının azaldığını gözlemlemiştir. Bir diğer çalışmada Birdi ve ark. pürüzsüz ve pürüzlü yüzeyler üzerinde deneyler yapmışlar ve damlacık buharlaşma hızının yüzeyin ıslanabilirliğine bağlı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Buharlaşma sırasında damlacık temas açısının 90 dereceden küçük veya büyük olması halinde damlacığın şekil ve buharlaşma dinamiklerini önemli ölçüde etkilediği bildirilmiştir. Temas açısının 90 dereceden küçük olması durumunda; damlacık, yüzeye daha fazla yayıldığı, bu nedenle temas yüzeyinin arttığı ve bu durumda buharlaşma hızının doğrusal bir eğilim gösterdiği ve damlacığın küçülürken temas açısının zamanla azaldığı, buna bağlı olarak da damlacığın yayılma alanının genişlediği ve buharlaşmanın daha hızlı gerçekleşeceğini bildirmişlerdir. Bir diğer durumda, yani temas açısının 90 dereceden büyük olması durumunda damlacığın yüzeyde daha küresel bir şekil aldığı ve temas yüzeyinin daha küçüldüğü, buharlaşma hızının doğrusal olmayan bir davranış sergilediği ve damlacık küçülürken, temas açısının sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, buharlaşma sürecinde damlacığın şeklinin korunmasına yol açtığı da bildirilmiştir [4].

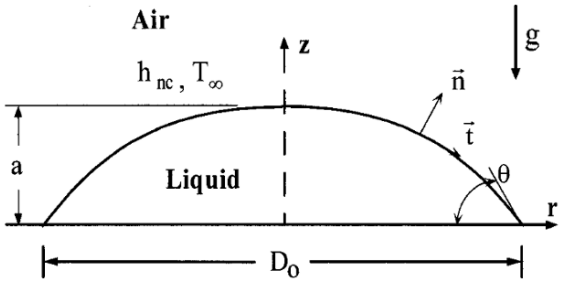
Shananan ve Bourges 1994 yılında yaptıkları çalışmada damlacık temas açısının polimer ve cam yüzeylerin buharlaşması üzerindeki etkisini araştırmış ve polietilen, epoksi reçine ve PTFE yüzeylerindeki su ve n-dekan damlacıklarının buharlaşmasını incelemişlerdir. Buharlaşma işleminin dış mekan koşullarında üç adımdan oluştuğunu, ilk olarak temas açısı (θ) ve damla yüksekliği (h) azaldığında, temas yarıçapının (r_b) sabit kaldığını, ikinci basamakta ise, h ve r_b eş zamanlı olarak azalırken, θ yüzeyin düzgünlüğüne bağlı olarak ya daha uzun ya da daha

kısa bir değer alarak sabit kaldığını belirtmişlerdir. Pürüzlü yüzeylerde ise bu aşama gözlemlenmemiştir. Son adımda h, r_b ve θ sıfıra yaklaşma eğiliminde olduğundan damlanın şekli giderek bozulmuş ve kaybolmuştur. Ayrıca çevredeki atmosfer buharlaşan sıvı buharla doyurulduğunda bile temas açısının sabit kaldığını göstermişlerdir. [5].

Crafton ve ark. 2004'te yaptıkları çalışmada, ısıtılmış metal yüzeylere yerleştirilen su ve n-heptan gibi küçük sıvı damlacıklarının buharlaşma oranları ve ısı transfer dinamiklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, damlacıkları sıvıların doyma sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda tutulan alüminyum ve bakır yüzeylerde buharlaştıkça damlacık geometrisindeki (çap, yükseklik ve temas açısı) değişiklikleri gözlemlemek ve ölçmek için deneyler yapmıştır. Su damlacıkları için ilk temas açısının 102-113° arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Su damlacığının yüksekliği ve temas açısı zamanla azalırken, çapın buharlaşmanın son aşamalarına kadar sabit kaldığını tespit etmişlerdir. Su damlacığının buharlaşma oranları, damlacık çapı arttıkça doğrusal olarak artmış ve deneysel çalışmada ısı akıları 0,05-0,25 W/mm^2 aralığında değişmiştir. Çalışmanın sonucunda, alüminyum ve bakır yüzeyler arasındaki su damlacıklarının davranışında çok az fark olduğunu bildirmişlerdir. Bunun aksine, n-heptan damlacıkları farklı özellikler sergilemiştir. Heptan damlacıklarının çapı ve yüksekliği buharlaşma sırasında sürekli olarak azalırken, temas açısı yaklaşık 15 derece civarında sabit kalmıştır. Heptan damlacıklarının buharlaşma oranları genellikle su damlacıklarından daha yüksek olup, çalışmadaki ısı akıları 0,0074-0,012 W/mm^2 aralığında değişmiştir. Bunun da nedeninin n-heptan damlacıklarının suya kıyasla çok daha düşük gizli buharlaşma ısısına sahip olması şeklinde açıklamışlardır. Hem su hem de n-heptan için deneysel sonuçlar, analitik modellerle karşılaştırmış ve ölçülen su damlacığı buharlaşma oranları, damlacık içindeki hem iletimi hem de taşınımı hesaba katan teorik bir modelle iyi bir şekilde eşleştiği ve zamanla damlacık hacminde neredeyse doğrusal bir azalma olduğu görülmüştür. Çalışma genel olarak, ısıtılmış metal yüzeyler üzerindeki küçük su ve hidrokarbon sıvı damlacıklarının buharlaşma dinamikleri ve ısı transferi karakteristiklerinin ayrıntılı deneysel gözlemlerini ve ölçümlerini sunarak, iki akışkan arasındaki farkları vurgulamaktadır [6].

Popov 2005 yılında yaptığı çalışmada, bir su damlacığının etrafındaki buhar yoğunluğu alanını analitik olarak çözmüş ve ısıtılmamış yatay bir alt tabaka üzerindeki farklı temas açıları için geçerli olan buharlaşma kütle transfer hızı ve buharlaşma süresi için formüller türetmiştir (Eşitlik 1.9 1.10 1.11).

$$h_m = \frac{h_{nc}}{\rho_{\text{air}} c_{p,\text{air}} \text{Le}^{2/3}} \tag{1.9}$$



Şekil 1.9 Popov'un çalışmasında modellediği damlacık [7].

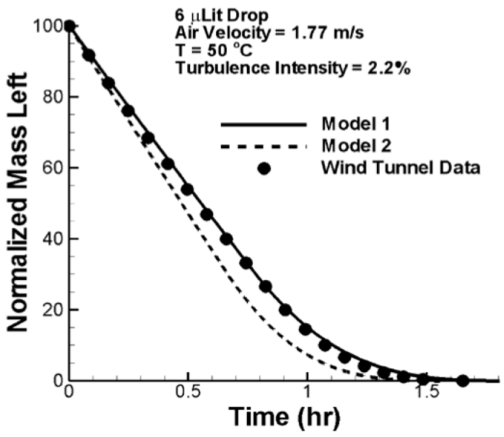
$$m'' = h_m \left(\rho_{\text{vap,sat}}(T) - \rho_{\text{vap},\infty}\right) \tag{1.10}$$

$$t_{\text{evap}} = \frac{R_o^2 \rho h_{fg}}{k\Delta T} \tag{1.11}$$

Burada h_m kütle transfer hızını, h_{nc} doğal taşınım ısı transfer katsayısını, ρ_{air} havanın yoğunluğunu, $c_{p,air}$ havanın özgül ısısını, Le Lewis sayısını, m" damlacığın yüzeyinden olan kütle akısını, R_o damlacığın ilk durumdaki yarıçapını, h_{fg} buharlaşma gizli ısısını ve k suyun iletim ısı transfer katsayısını ifade etmektedir [7].

Navaz ve ark. 2007 yılında katı yüzey üzerindeki durgun damlacıkların taşınımla buharlaşması için yarı analitik bir model geliştirmişlerdir. Türbülansın buharlaşma üzerindeki etkisi ve sürtünme hızının etkisi modele dahil edilmiştir. Modelde, sürtünme hızına dayalı Reynolds sayısının, serbest akış hızına dayalı Reynolds sayısından daha uygun olduğu için durgun damlacıklar için daha ilgili olduğu önerilmiştir. Bu şekilde formüle edilen model, model tahminleri ile deneysel ölçümler arasında rüzgar tüneli verileriyle doğrulanmıştır. Modelde tüm damlacık boyutları, serbest akış hızları, türbülans yoğunlukları ve çevre sıcaklıkları için normalize edilmiş ve buharlaşma kütlesi boyutsuz zamana bağlı bir eğri şeklinde ifade edilmiştir (Şekil 1.10) [8].

Kelly-Zion ve ark. 2011 yılında yaptığı deneylerde durgun damlacıkların buharlaşma modelleri için yaygın olarak kullanılan buhar difüzyonu varsayımının uygulanabilirlik aralığını araştırmışlardır. 3-metilpentan, hekzan, siklohekzan ve heptanın durgun damlacıkların buharlaşma hızları ölçülmüştür. Damlacık temas hattının yarıçapı ölçümler sırasında sabit tutulmuş ve 1 mm ile 22 mm arasındaki yarıçaptaki damlacıklar incelenmiştir. Difüzyon kontrollü bir buharlaşma modelinin, damla boyutuna bağlı olarak buharlaşma hızını yüzde 36 ile 80 arasında eksik tahmin ettiği bulunmuştur. Buharlaşma hızındaki artış, ikinci



Şekil 1.10 Navaz'ın çalışmasındaki damlacık buharlaşma hızının zamana bağlı değişimi [8].

bir taşınım mekanizması olan doğal taşınıma bağlanmış, difüzyon ve taşınımın bir arada olduğu koşullar için deneysel bir model geliştirmişlerdir (Eşitlik 1.12). Böylece hesaplanan buharlaşma hızındaki hatayı yüzde 6'dan daha küçük bir değere indirmişlerdir [9].

$$E_{dc} = \frac{4DMP_{\nu}zR}{R_uT}\left\{1 + 0.310\left[\frac{P_{\nu}Mg}{(P_A - P_{\nu})M_a v_a^2}\right]^{0.216} R^{0.648}\right\} \tag{1.12}$$

Yıldırım Erbil 2012 yılında yaptığı çalışmada uzun yıllar boyunca damlacık buharlaşması üzerine yapılan çalışmaları derlemiş ve her çalışmanın metotları ve sonuçlarına değindikten sonra genel bir sonuç çıkararak görüşlerini bildirmiştir.

Durgun havada veya kontrollü atmosferik koşullardaki damlacık buharlaşmasının katı yüzey üzerindeki incelemelerinde, buharlaşma hızını kontrol edebilecek faktörlerin anlaşılması ve belirtilmesini bu çalışmada ele almıştır. Yapılan çalışmada milimetre ve hatta mikrometre boyutlarında olabilen damlacıkların buharlaşması, ilk temas açısı, alt tabaka ısıl iletkenliği ve damlacık buharlaşması esnasında gerçekleşen Marangoni akışı içeren temel teori tartışılmıştır.

Damlacık buharlaşması ile ilgili yayınlanan makalelerde ilk temas açısının ve alt tabakadan ısı transferinin varlığı ya da yokluğunun belirtilmesinin daha önemli olduğunu tespit etmiştir. Örnek olarak bir sıvı damlası 10°'den daha az bir temas açısıyla yüzeyi tamamen ıslattığında katı ve sıvı arasındaki güçlü etkileşim buharlaşma sürecine müdahale eder ve bu durumun artık damlacık buharlaşması olarak düşünülemeyeceğini belirtmiştir. Yayınlanmış makalelerde diğer bir sorun ise buharlaşmanın deneysel olarak izlenmesinde bağıl nem bilgisinin olmamasıdır. Bağıl nem ve sıcaklık ölçümünün damlacık buharlaşması sırasında kontrol edilmesi

gereken önemli parametrelerden olduğunu ortaya koymuştur çünkü küçük bir bağıl nem değişiminin buharlaşma hızına etkisinin büyük olduğunu göstermiştir [10].

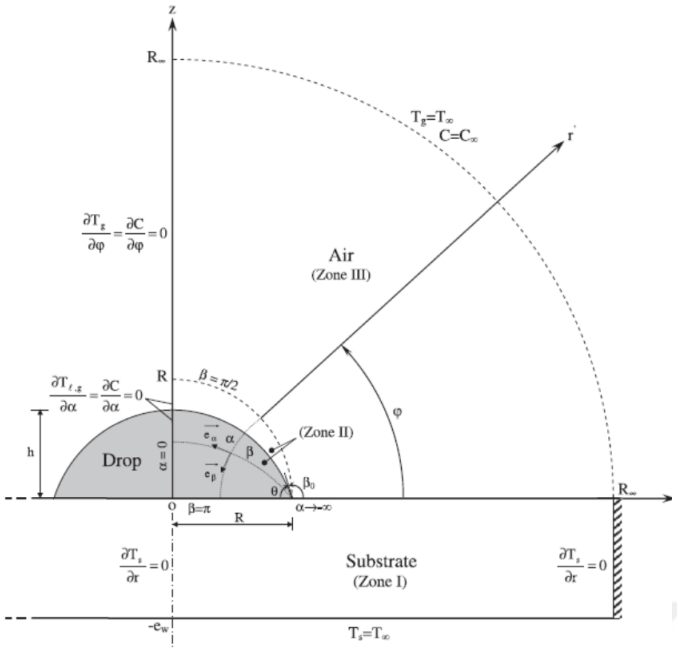
Saada ve arkadaşlarının 2012'deki çalışmalarında katı yüzeyin termofiziksel özelliklerinin nemli hava ile çevrelenmiş bir durgun su damlacığının buharlaşması üzerindeki etkisi, yarı-sabit durum difüzyon modeli ile araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sayısal yaklaşım, havanın su buharı difüzyon denklemini ve gerçekleşen üç fazın hepsinde ısı iletim denklemini çözerek üç faz arasında tam bir bağlantı sağlamıştır. Sonuçlar katı yüzeyin termal iletkenliğinde bir azalmanın veya kalınlığındaki artışın damla üzerinde soğutma etkisine sahip olduğunu göstermiştir. Maksimum buharlaşma hızı için çok yüksek bir termal iletkenliğe sahip bir katı yüzey ya da çok ince bir katı yüzey gerekmektedir. Minimum buharlaşma hızı için ise mükemmel şekilde yalıtılmış bir katı yüzey ya da çok kalın bir katı yüzey gerekmektedir. Buharlaşma için gerekli enerji esas olarak gaz fazından alınır.

Şekil 1.11'de 10 mm^3 saf su damlacığı ısıtılmamış e_w kalınlığında ve ısıl iletkenliği k_s olan yatay bir katı yüzey üzerinde durmaktadır. Durgun damlacığın buharlaşması T_∞=25°C ve bağıl nem yüzde 40 iken gerçekleşmektedir. Alt tabaka, çok geniş yarıçapa sahip bir disk şeklindedir ve ısıl olarak yalıtılmış yan duvarla çevrelenmiştir. Katı yüzeyin üst yüzeyi, θ_0= 78° bir başlangıç temas açısı verecek şekilde alüminyum katman ile kaplanmıştır. İlk hacim V_0 ve temas açısı θ_0 bilindiğinde ilk temas yarıçapı R_0 eşitlik 1.13'ten hesaplamak mümkündür:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3\sin^3\theta_0}{\pi(1-\cos\theta_0)^2(2+\cos\theta_0)}V_0} \tag{1.13}$$

Durgun damlacığın buharlaşmasını doğru bir şekilde simüle edebilmek için yeterli sayıdaki boyutlarda bir ağ yapısı tanımlanmıştır (Şekil 1.12). Hem sabitlenmiş hem de gerileyen temas hattı durumları için damla buharlaşma süresi ele alınmıştır. Damla hacmi sıfıra eşit olana kadar buharlaşma süresini hesaplamanın mümkün olamayacağını ancak minimum bir hacim değerine ulaştıktan sonra buharlaşma süresi tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca tablo 1.1'de verildiği gibi sabitlenmiş bir damla için, katı yüzeyin termal iletkenliği arttığında buharlaşma süresinin azaldığı gösterilmektedir. Adyabatik bir katı yüzey üzerinde (k_s = 0) buharlaşma süresinin 11300 saniyeye eşit olduğu, izotermal bir katı yüzey üzerinde ise (k_s = ∞) 3300 saniyeye eşit olduğu görülmüştür.

Damlacık buharlaşma süresi, farklı ısıl iletkenliklere sahip katı yüzeyler üzerindeki sabitlenmiş ve sabitlenmemiş damla arasında çok fazla sapma göstermezken damlacık geometrisi iki durumda özellikle yüzey alanı için farklı şekilde



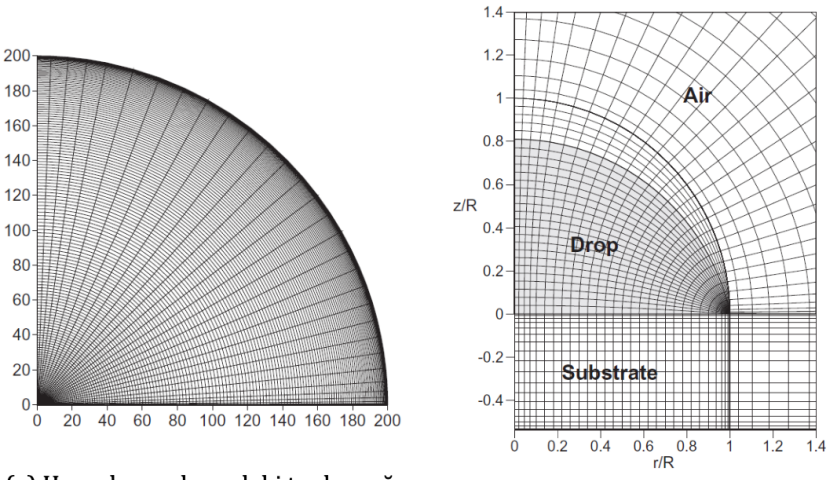
Şekil 1.11 Belirli bir kalınlığa sahip yatay bir katı yüzey üzerinde küresel kep şeklindeki su damlacığının şematik gösterimi [11]

Tablo 1.1 Farklı ısıl iletkenliklerdeki katı yüzeyler üzerinde sabitlenmiş ve sabitlenmemiş damlacıkların buharlaşma hızı [11]

k_s (W/m K)	Buharlaşma süresi (s)		Fark (%)
	Sabit Damla	Sabitlenmemiş Damla	
≈ 0	11300	13130	16.2
0.025	6000	7600	26.7
0.25	3780	4750	25.7
∞	3300	4000	21.2

gelişir(Şekil 1.13). Bu farklı şekilde gelişen yüzey alanları, temas hattının kütle transferindeki rolü ile açıklanmıştır. Buharlaşma hızı, temas hattına yakın olan ve uzaktaki yüzey alanı tarafından kontrol edilir.

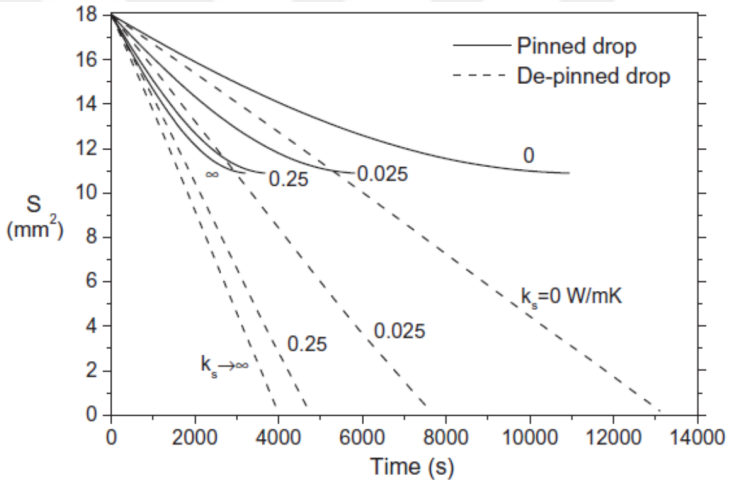
Sonuç olarak, maksimum buharlaşma hızına, ısı akısı katı yüzey üzerinden sağlandığında ulaşılırken; damla çevresindeki havadan enerji aldığında minimum olmuştur. Bir yalıtım katı yüzeyi söz konusu olduğunda buharlaşma hızına gazdaki ısı iletiminin etkisi göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür, dolayısıyla gazdaki ısı iletiminin ihmal edilemeyeceği kanıtlamışlardır. Sabitlenmiş ve sabitlenmemiş damlalar karşılaştırılırsa farklı buharlaşma hızı ve buharlaşma akışı sergiler. Sabitlenmemiş damlacığın buharlaşma süresi sabitlenmiş damlaya göre daha yüksektir. Bu fark tüm katı yüzeyler için yüzde 27'yi geçmemiştir [11].



(a) Hesaplama alanındaki toplam ağ

(b) Farklı koordinat sistemlerindeki damlacık içi ve

Şekil 1.12 Her fazdaki hesaplama alanı ve ağ yapısı: (a) hesaplama alanındaki toplam ağ yapısı, (b) farklı koordinat sistemlerindeki damlacık içi ve çevresindeki ağ yapısı [11]



Şekil 1.13 Farklı katı yüzey ısıl iletkenlikleri için sabitlenmiş ve sabitlenmemiş damlaların yüzey alanı değişimi [11]

Lopes ve ark. 2013 yılında, farklı termal özelliklere sahip ancak benzer ıslanabilirlikteki katı yüzeyler üzerindeki durgun damlacıkların buharlaşması incelenmiştir. Araştırmacılar, polistirenden yapılmış bir filmle kaplanmış cam ve silikon katı yüzeyler üzerinde farklı boyutlardaki saf su damlalarıyla 30 buharlaştırma deneyi gerçekleştirmiştir. Çalışma, katı yüzeyin termal özelliklerinin durgun bir damlacığın buharlaşma süresini önemli ölçüde etkilediğini, silikonun daha yüksek ısıl iletkenliğinin damla buharlaşmasını cama kıyasla %10'dan fazla hızlandırdığını bulmuştur.

Damlacık ve katı yüzeydeki ısı iletimini ve gazdaki buhar difüzyonunu tanımlayan

sayısal bir model geliştirilmiş ve damlacık buharlaşması tahminleri, deneysel verilerle iyi bir uyum göstermiştir. Sonuçlar, zamana bağlı ısı taşınımının ve damla yüzeyindeki sıcaklık dağılımının damlacık buharlaşma hızını büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Özellikle buharlaşmanın, alt tabakanın arka tarafındaki sıcaklık dağılımının termal özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiği, cam alt tabakanın doğrusal olmayan bir sıcaklık gradyeni gösterdiği ve silikon alt tabakanın neredeyse izotermal bir sıcaklık dağılımı sergilediği bulunmuştur.

Çalışmada ayrıca farklı termal özelliklerin damlacık buharlaşma dinamikleri üzerindeki etkisini araştırmak için simülasyonlar kullanılmıştır. Daha yüksek termal yayılıma sahip malzemenin, alt tabaka ve damlacıktaki hızlı ve lineer sıcaklık düşüşü nedeniyle daha yavaş buharlaştığı bulunmuştur. Dahası, düşük termal iletkenliğe ve difüziviteye sahip malzeme, yüksek termal yayılıma sahip malzemeye benzer damla buharlaşma dinamikleri sergilemiştir.

Sonuç olarak, araştırma, alt tabaka termal özelliklerinin durgun damlacıkların buharlaşma davranışı üzerindeki önemli etkisini göstermektedir. Bulgular, alt tabaka termal özellikleri ile damlacık buharlaşma dinamikleri arasındaki etkileşime dair önemli bilgiler sağlamıştır. Kurutma süreçleri ve enerji tasarruflu bulaşık makineleri gibi çeşitli pratik uygulamalar için çıkarımlar sunmuştur [12].

Stauber ve ark. 2014 yılında katı bir alt tabaka üzerindeki buharlaşan damlacıkların ömrünü incelemişlerdir ve özellikle buharlaşmanın 'yapışma-kayma' moduna odaklanmışlardır. 'Yapışma ve kayma' modundaki damlacıkların ömrü ile sabit temas yarıçapı ve sabit temas açısı modlarındaki damlacıkların ömrü arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışma, böcek ilacı püskürtme, DNA mikro dizi analizi, mürekkep püskürtmeli baskı, mikrofabrikasyon ve püskürtme soğutma gibi damlacık buharlaşmasının temel bilimsel ilgisi ve pratik uygulamalarından ilham almıştır.

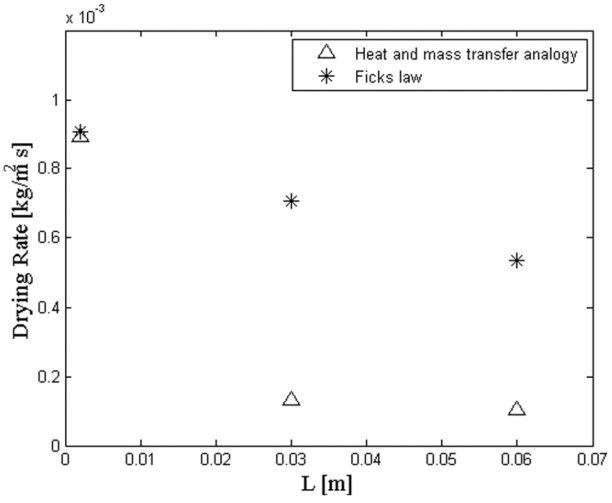
Araştırma, damlacık buharlaşmasının iki farklı modunu açıklamaktadır - temas açısının zamanla azaldığı ancak temas yarıçapının sabit kaldığı 'sabit temas yarıçapı' (CCR) modu ve temas yarıçapının azaldığı ancak temas açısının sabit kaldığı 'sabit temas açısı' (CCA) modu. Çalışma ayrıca, sabitlenmiş 'yapışma' fazları ve sabitlenmemiş 'kayma' fazlarını içeren 'yapışma ve kayma' modunu da tanıtmaktadır. Yapışma ve kayma modu için bir model önerilmiş ve bunu literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırmalar yoluyla doğrulamışlardır.

Damlacıkların buharlaşmasını tanımlamak için difüzyon sınırlı bir model sunmuşlardır; burada damlacık hacminin zamana göre değişim hızı; difüzyon katsayısı, buhar konsantrasyonu ve diğer parametrelerin bir fonksiyonudur. Makale,

sabit temas yarıçapı, sabit temas açısı ve yapışma ve kayma modlarındaki damlacıkların yaşam süreleri için teorik tahminler türetmekte ve modeli deneysel verilerle karşılaştırma yoluyla doğrulamaktadır.

Özetle, bu makale farklı modlarda buharlaşan damlacıkların toplam buharlaşma süreleri hakkında kapsamlı bir anlayış sunmakta ve yapışma-kayma modundaki ve uç modlardaki damlacıkların buharlaşma süreleri arasındaki karmaşık ilişkiyi gösteren bir ana diyagram sunmaktadır. Bulguların, damlacık buharlaşmasını içeren çok çeşitli pratik uygulamalar için önemli çıkarımları bulunmaktadır [13].

Ljung ve Lundström 2018 yılında yaptıkları çalışmada bir plakanın genişliğinin bir damlacık etrafındaki doğal taşınımı nasıl etkilediğini sayısal olarak araştırmışlardır. Sıcak yüzeyler üzerinde buharlaşan damlacıklar, bulaşık ve boya kurutma dahil olmak üzere birçok uygulamaya sahiptir. Buharlaşma hızı ve sıvıda tutulan parçacıkların birikmesi, her iki durumda da büyük önem taşır. Kurutma hızı ve biriktirme mekanizmalarının nasıl kontrol edilebileceğini araştırmak için ilk adım olarak, bu çalışma, bir su damlasının etrafındaki dış akışın buharlaşma hızını nasıl etkilediğini araştırmayı amaçlamıştır. Damlacığın üzerinde durduğu sıcak plakanın neden olduğu doğal taşınım dikkate alınıp farklı genişliklerin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, plakanın damlacığın ötesine uzatılmasının, doğal taşınım nedeniyle alandaki maksimum hızı artıracağını, yüzeye yakın akışın ise kaymama koşulu ve sıcaklık gradyanı nedeniyle azalacağını göstermektedir. Bu nedenle, plaka damlacığın ötesine uzatıldığında, plaka ve damlacık aynı çapa sahip olduğundaki duruma kıyasla buharlaşma hızında bir azalma gözlemlenmektedir. Simülasyonlar ayrıca ısı ve kütle transferi analojisinden elde edilen sonuçların, yalnızca damlacık ve plaka aynı genişliğe sahip olduğunda Fick yasasının sonuçlarıyla iyi karşılaştırılabildiğini göstermiştir [14].



Şekil 1.14 L=0.002, 0.03 ve 0.06 m'deki ortalama kurutma hızları [14]

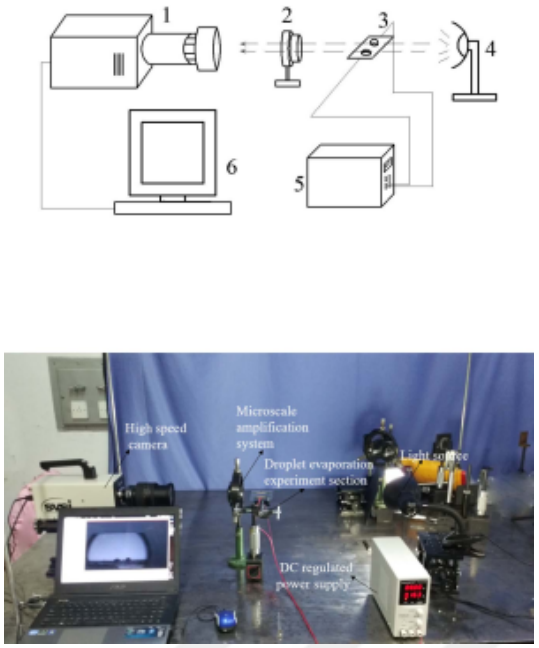
Gao ve ark 2017'de, sabit ısı akısı koşulları altında, ısıtılmış hidrofilik ve hidrofobik yüzeylerinde 3 µl saf su damlacıklarının buharlaşmasını incelemişlerdir. Çalışmanın amacı damlacık yüksekliğini, dinamik temas açısını, damlacık temas çapını, buharlaşma modunu ve buharlaşma hızını incelemektir. Araştırmacılar, yüksek hızlı bir kamera kullanarak hidrofilik ve hidrofobik yüzeylerdeki iki sabit damlacığın değişen şekillerini kaydetmişlerdir. Çalışmada, sayısal tahminlerle uyumlu olan temas açısını, sıvı hacmini ve damlacık yüksekliğini ölçmüşlerdir. Buharlaşma süresinin hidrofobik yüzeylerde daha uzun olduğunu ve süper-hidrofobik yüzeylerde, hidrofobik yüzeylerde tipik olarak gözlemlenen belirgin aşamaların olmadığı bulunmuştur. Araştırmacılar daha önce damlacık buharlaşma hızlarını incelemiş, damlacık buharlaşma hızının V/V_0 ile t/t_a kullanarak temsil etmiş, temas açıları ve damlacık hacimlerinden etkilenen farklı eğilimler bulmuşlardır.

Damlacık buharlaşmasıyla ilgili önceki deneysel çalışmalar çoğunlukla sabit sıcaklığa sahip yüzeylerde yürütülmüştür. Çalışma, sabit ısı akısı altındaki ısıtma yüzeyinde damlacık buharlaşmasını inceleyerek boşluğu doldurmaya çalışmıştır. Deneysel çalışma, 1153 W/m^2 ile 6919 W/m^2 arasında değişen ısı akısı için damlacıkların hidrofilik ve hidrofobik yüzeylerdeki şekillerini kaydetmeyi içeriyordu. Buharlaşma süresinin ısı akışının artmasıyla azaldığı ve damlacıkların buharlaşma süresinin hidrofobik yüzeylerde daha uzun olduğunu gözlemlemişlerdir. Ek olarak, buharlaşma modunun başlangıç aşamasında sabit temas yarıçapı(CCR) modunda olduğu, ardından buharlaşma süresinin sonunda bir karışım modunda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Bulgular ayrıca, farklı ısı akılarında hidrofilik ve hidrofobik yüzeylerde farklı temas açılarının gözlemlendiği yüzey ıslanabilirliğinin temas açıları üzerindeki etkisini vurgulamıştır. Çalışma, temas çapı ve damlacık yüksekliğindeki değişikliklerin yanı sıra buharlaşma süresinin sonunda yapışma-kayma modunun etkilerinin varlığını göstermiştir.

Çalışmanın sonuçları, damlacık buharlaşmasının buharlaşma süresinin çoğunda sabit temas yarıçapı(CCR) modunda ilerlediğini ve sonunda bir karışım moduna geçtiğini vurgulamıştır. Ayrıca boyutsuz damlacık hacmindeki boyutsuz zamanla doğrusal azalmayı vurgulamıştır. Bulgular, sabit ısı akısı koşulları altında damlacık buharlaşmasını anlamaya katkıda bulunmuştur ve çeşitli pratik uygulamalar için çıkarımlara sahiptir [15].

Gao ve ark. bir yıl sonra yayınladıkları çalışmada, sabit ısı akısı koşulları altında bir ısıtma yüzeyinde farklı hacimlere sahip durgun damlacıkların buharlaşma dinamiklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deney, iki durgun damlacığın



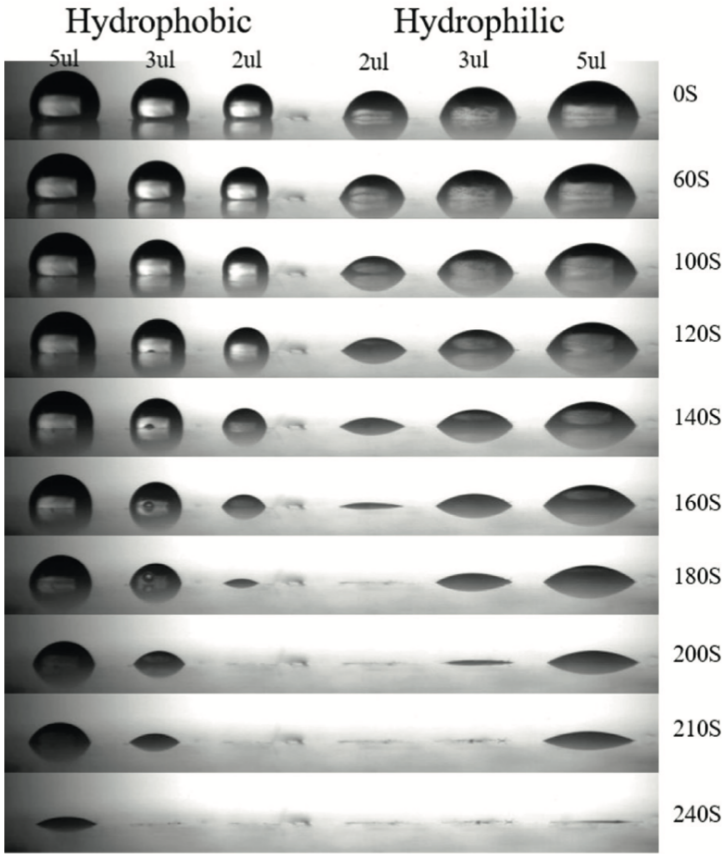
Şekil 1.15 Deney setinin şematik gösterimi ve fotoğrafı [15]

hidrofilik ve hidrofobik bir ısıtma yüzeyine yan yana yerleştirilmesini içermektedir. Damlacık boyutları 2 µl ile 5 µl arasında değişmekte olup, ısı akısı 1272 W/m^2 ile 7810 W/m^2 arasında değişmektedir. Damlacıkların değişen şekillerini kaydetmek için yüksek hızlı bir kamera kullanılmış ve damlacık boyutunun boyutsuz temas açısı, boyutsuz temas çapı, boyutsuz damlacık yüksekliği ve boyutsuz buharlaşma hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma ayrıca buharlaşma modlarını, hızlarını, yüzey ıslanabilirliğinin ve ısı akısının buharlaşma süreci üzerindeki etkisini incelemiştir.

Makalede damlacık buharlaşması üzerine daha önce yapılmış araştırmalar incelenmekte olup sabit temas yarıçapı (CCR) modu ve sabit temas açısı (CCA) modu gibi gözlemlenen farklı buharlaşma modları vurgulanmakta ve çeşitli araştırmacılar tarafından gözlemlenen karışık ve yapışma-kayma modlarından bahsedilmektedir. Alt tabaka sıcaklığının ve yüzey özelliklerinin damlacık buharlaşması üzerindeki etkisi de tartışılmıştır.

Deney setinde, yüksek hızlı bir kamera, bir mikro ölçekli amplifikasyon sistemi ve saf su damlacıklarının hidrofilik ve hidrofobik yüzeylere yerleştirildiği sabit ısı akısına sahip bir damlacık buharlaşması deney bölümü içermektedir. Deneysel sonuçlar, damlacık buharlaşmasının ısı akısı, damlacık boyutu ve yüzey ıslanabilirliğinden güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermiştir. Sonuçlar, buharlaşma süresinin ve boyutsuz dinamik temas açısının ısı akısının artmasıyla azaldığını göstermiştir. Ek olarak, buharlaşma süresi aynı uygulanan ısı akısında hidrofilik yüzeylere kıyasla hidrofobik yüzeylerde daha uzun sürmüştür. Makale,

farklı ısı akılarında hidrofilik ve hidrofobik yüzeylerdeki boyutsuz temas çapı, damlacık yüksekliği ve damlacık hacminin zamana bağlı değişimini ayrıntılı olarak açıklayarak, iki yüzey arasındaki buharlaşma dinamikleri ve buharlaşma modundaki farklılıkları vurgulamaktadır.



Şekil 1.16 2811 W/m^2 ısı akısında hidrofilik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde farklı boyutlardaki su damlacıklarının buharlaşmasına ait deney görüntüleri [16]

Çalışma, ısı akısının boyutsuz parametreler üzerindeki etkisinin damlacık boyutunun etkisinden daha büyük olduğu ve boyut temas çapındaki değişim hızının hidrofilik yüzeylerde hidrofobik yüzeylere göre daha hızlı olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca, makale buharlaşma sürecinin çeşitli aşamalarını ve deney sırasında gözlemlenen baskın buharlaşma modlarını sunmaktadır. Sonuçlar, sabit ısı akısı koşulları altında farklı ısıtma yüzeylerindeki sabit damlacıkların buharlaşma dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur [16].

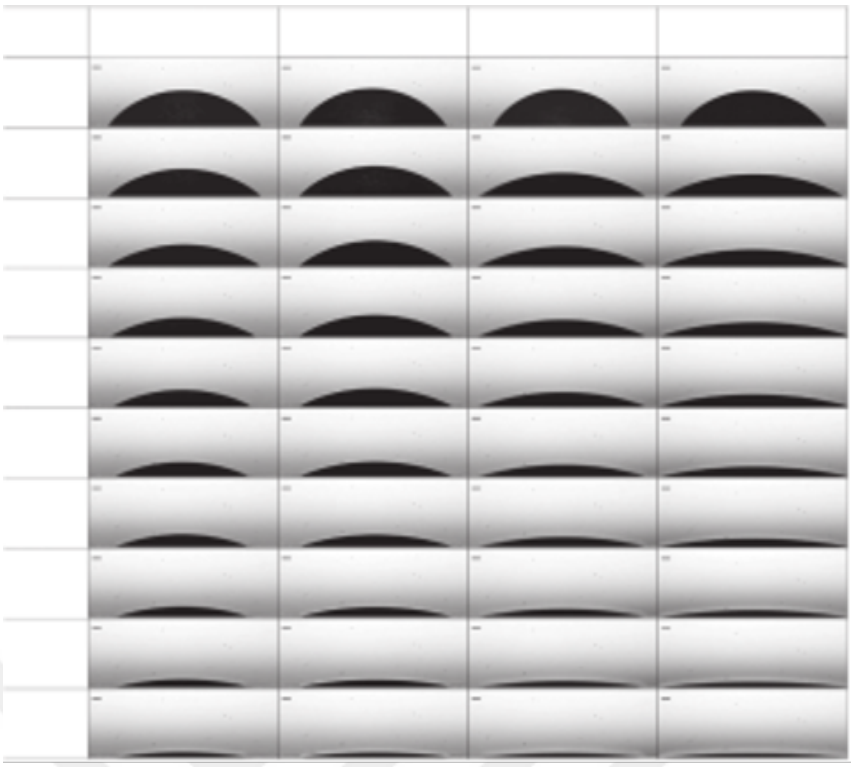
Kumar ve ark 2018'de, ısıtılmış hidrofilik bir katı yüzey üzerinde durgun bir su damlasının buharlaşması üzerine sayısal ve deneysel bir araştırma yapmıştır. Araştırmacılar, damlacık ve alt tabakadaki ısının birleşik taşınımını ve çevredeki ortamdaki sıvı buharının kütlesini çözmek için iki boyutlu eksenel simetrik koordinatlarda sonlu eleman modeli geliştirmektedir. Model, damlacığın difüzyonla sınırlı ve yarı sabit buharlaştığını kabul etmiştir.

Deneylerde, farklı alt tabaka sıcaklıklarında yüksek hızlı bir kamera kullanarak buharlaşan mikrolitre boyutlarındaki su damlacığının yandan görünümünü görselleştirmişlerdir ve kızılötesi bir kamera kullanarak sıvı-gaz arayüzünün sıcaklığını üstten kaydetmişlerdir. Sıvı-gaz arayüzü boyunca sıcaklık profilinin alt tabaka kalınlığının ıslatılmış yarıçapa oranına, alt tabakanın termal iletkenliğinin damlacığın termal iletkenliğine oranına ve temas açısına bağımlılığını incelemişlerdir.

Ölçülen buharlaşma kütle hızının farklı alt tabaka sıcaklıklarında hesaplanan değerlerle karşılaştırılması, buharlaşma kütle hızının alt tabaka sıcaklığına göre doğrusal olmayan bir şekilde arttığını ve sonlu elemanlar modelinin bu değerleri deneysel verilere yakın tahmin ettiğini göstermiştir. Önceki ve mevcut modeller tarafından elde edilen zaman ortalamalı buharlaşma kütle hızının ölçümlerle karşılaştırılması, ölçümleri doğru bir şekilde yakalamak için arayüzdeki buharlaşmalı soğumanın ve difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişiminin modelde dikkate alınması gerektiğini önermişleridir. Yazarlar ayrıca sıvı-gaz arayüzü boyunca zamanla değişen damlacık boyutlarının ve sıcaklık profilinin ölçümlerini sayısal sonuçlarla karşılaştırmış ve iyi uyumlar bulmuşlardır [17].

Gurrala ve ark 2019 yılında, farklı katı yüzey sıcaklıklarında etanol-su ikili karışımlarının buharlaşma dinamiklerini araştırmışlardır. Deney, ikili karışımın farklı bileşimlerini ele almış ve katı yüzey sıcaklığındaki artışla logaritmik olarak azalan damlacıkların ömrünü gözlemlemiştir. Yüksek bir katı yüzey sıcaklığında, ikili damlacıkların ömrünün hızla azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yüksek katı yüzey sıcaklıklarında farklı bileşimler için buharlaşma dinamiklerinin, tüm buharlaşma süreci için sabit bir hacimsel buharlaşma hızı gösteren bir eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışma, yüksek katı yüzey sıcaklığındaki ikili bir damlacığın buharlaşma dinamiklerinin, oda sıcaklığında daha yüksek uçuculuğa sahip başka bir saf sıvınınkine eşdeğer olduğunu bulmuştur. Ek olarak, damlacığın ömrünün, ikili karışımdaki etanol konsantrasyonunda bir artışla monoton olmayan bir eğilim gösterdiğini ve bunun su-etanol ikili karışımlarının ideal olmayan davranışıyla ilişkili olduğunu belirtmektedir. Bu gözlemler, farklı alt tabaka sıcaklıklarında ve bileşimlerinde ikili damlacıkların buharlaşma dinamikleri hakkında değerli bilgiler sağlamıştır.

Ayrıca, çalışmada yüksek katı yüzey sıcaklıklarında damlacık ömründe monoton olmayan bir eğilim tespit etmişlerdir; burada damlacık ömrü başlangıçta artan sıcaklıkla azalmış ve daha sonra daha da yüksek sıcaklıklarda artmıştır. Bu davranış, buharlaşma süreci sırasında termofiziksel özellikler ve kütle transfer mekanizmasının karmaşık etkileşimine bağlanmıştır. Ek olarak,



Şekil 1.17 Farklı alt tabaka sıcaklıklarında bir (Etanol 50% + Su 50%) damlacığının zamanla buharlaşması. Her panelde gösterilen ölçek çubuğunun uzunluğu 200 mikrometredir [18]

araştırmacılar 60°C'lik bir katı yüzey sıcaklığında farklı bileşimler için buharlaşma dinamiklerinde kendi kendine benzer bir eğilim gözlemlemiştir. Bu kendi kendine benzer doğa, farklı bileşimler için normalize edilmiş hacim ile normalize edilmiş zaman eğrilerinin değişimlerinde yansımıştır ve belirli katı yüzey sıcaklığında değişen etanol-su oranlarında tutarlı buharlaşma davranışı olduğunu göstermiştir.

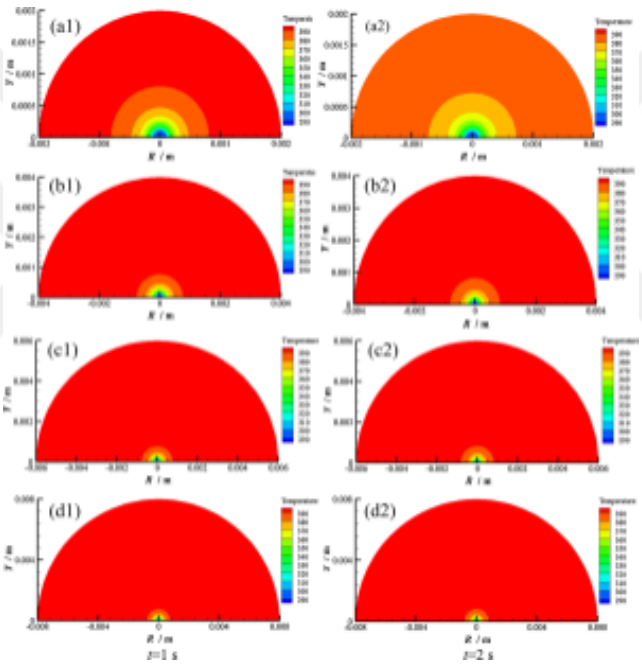
Deneysel bulguların teorik bir modelle karşılaştırılması, difüzyon, konsantrasyon gradyanı zorlanmış taşınım ve doğal taşınımın etkilerini birleştiren teorik kütle akısı modellerinin, normalize edilmiş hacim ile normalize edilmiş zaman arasındaki deneysel olarak gözlemlenen eğilimlerle iyi bir şekilde uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu, teorik modelin, etanol-su ikili karışım damlacıklarının alt tabaka üzerindeki buharlaşma sürecinde yer alan karmaşık mekanizmaları etkili bir şekilde yakaladığını göstermiştir [18].

Zhao ve ark. 2019 yılında buharlaşan bir damlacık ile çevresindeki gaz arasındaki arayüz mekanizmasını incelemiştir. Damlacığın akışkan alanı üzerindeki etkisi incelenip, damlacığı çevreleyen belirli akışkan alanı bölgesine ve buharlaşan damlacığın etki bölgesine odaklanmışlardır.

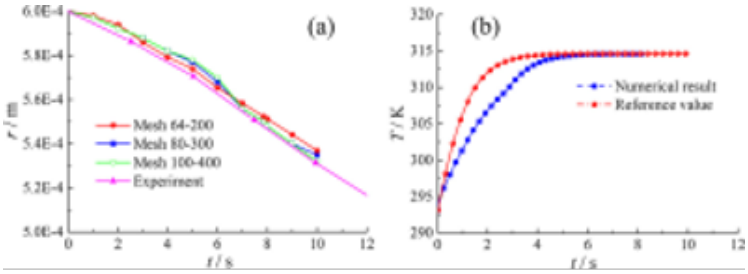
Çalışma, yarıçap, sıcaklık farkı, çalışma basıncı ve hava nemi dahil olmak üzere etki

bölgesinin faktörlerini analiz etmek için VOF modeline dayalı olarak sıcak havada su damlacığı buharlaşmasının sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, yalnızca damlacığı çevreleyen belirli akışkan alanı bölgesinin damlacık tarafından etkilenebileceğini ortaya koymuştur. Analiz ayrıca etki bölgesi yarıçapının artan damlacık yarıçapı, sıcaklık farkı, azalan çalışma basıncı ve hava nemi ile arttığını göstermiştir.

Makalede, sıcaklık farkı, hava nemi ve çalışma basıncına dayalı etki bölgesinin boyutsuz yarıçapı için veri tahmin etme yoluyla ifadeyi türeterek sona erer. Genel olarak, makale buharlaşan bir damlacığın çevredeki gaz üzerindeki etkisine ilişkin önemli bilgiler sağlamakta ve iki fazlı akış senaryolarında ısı ve kütle transferi için karmaşık arayüz mekanizmasının anlaşılmasına katkıda bulunmuştur [19].



Şekil 1.18 Farklı boşluk oranları altında sıcaklık konturları. (a) boşluk oranı = 20, (b) boşluk oranı = 40, (c) boşluk oranı = 60, (d) boşluk oranı = 80 [19]

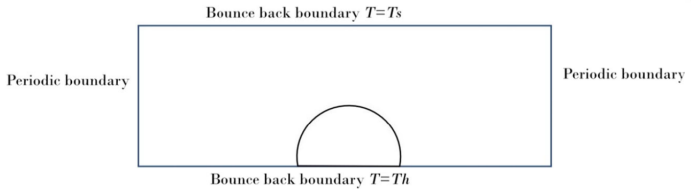


Şekil 1.19 Sayısal yarıçap (a) ve sıcaklık (b) verilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması [19]

Li Wang ve ark. 2020 yılında yaptıkları çalışmada damlacık yüzeyinde karmaşık bir sıcaklık dağılımı sağlamak için yerel ısıtma kullanmışlar ve Marangoni akışının

damlacık buharlaşma davranışı üzerindeki etkisini ele almak için ayrıntılı bir sayısal araştırma yapılmıştır. Sonuçlar, özellikle süper hidrofilik yüzeyler için asimetrik ısı kaynağı kullanıldığında su damlacığının konumunun değiştiği gözlemlenmiştir. Bu kayma davranışı, hem ısı kaynağının konumundan hem de yüzey ıslanabilirliğinden etkilenmiştir. Buharlaşma hızı hem ısı kaynağı konumundan hem de damlacık temas açısından etkilenebilir. Pürüzsüz bir alt tabaka üzerine yerleştirildiğinde, damlacık asimetrik ısıtma koşulunun bir sonucu olarak yatay olarak kayacaktır. Kayma davranışı hem ısı kaynağı konumundan hem de yüzey ıslanabilirliğinden etkilenir. Damlacık içindeki akışların düzeni ve sıcaklık dağılımının yanı sıra damlacık morfolojisi ve buharlaşma hızı da incelenmiştir. Ayrıca asimetrik bir şekilde yerleştirilmiş ısıtma kaynağının neden olduğu damlacık kaymasına da dikkat edilmiştir.

Yerel ısıtma çalışması için bir referans sunmak üzere damlacık buharlaşması için bir sayısal model oluşturmuşlardır (Şekil 1.20). Bu modelde sırasıyla 30°, 60 ° ve 90 °'lik olmak üzere üç farklı temas açısı sağlayan katı yüzeylere bir su damlası yerleştirilmiştir. Isı kaynağı, alt tabaka üzerine eşit olarak dağıtılmıştır, bu da alt tabakanın daha yüksek T_h sıcaklıkta olduğu anlamına gelir. İlk ortam sıcaklığı, katı yüzey sıcaklığından daha düşük olacak şekilde ayarlanmıştır.

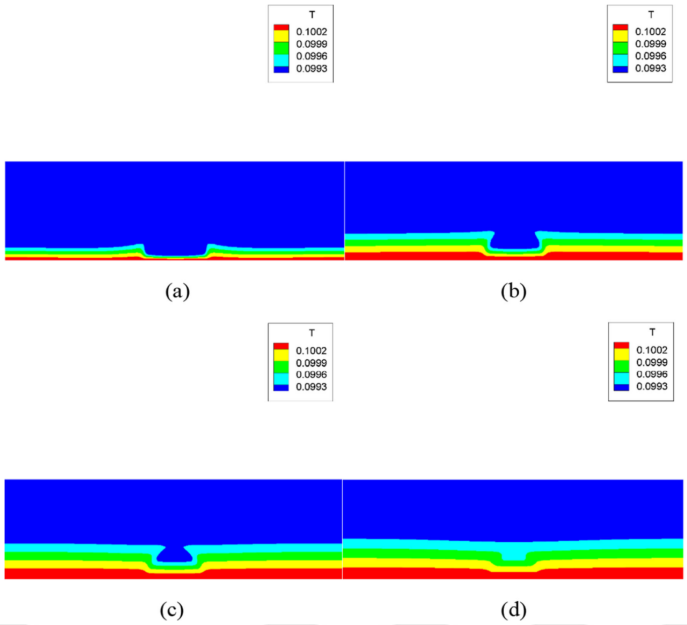


Şekil 1.20 Damlacık buharlaşması için oluşturulan sayısal model [20]

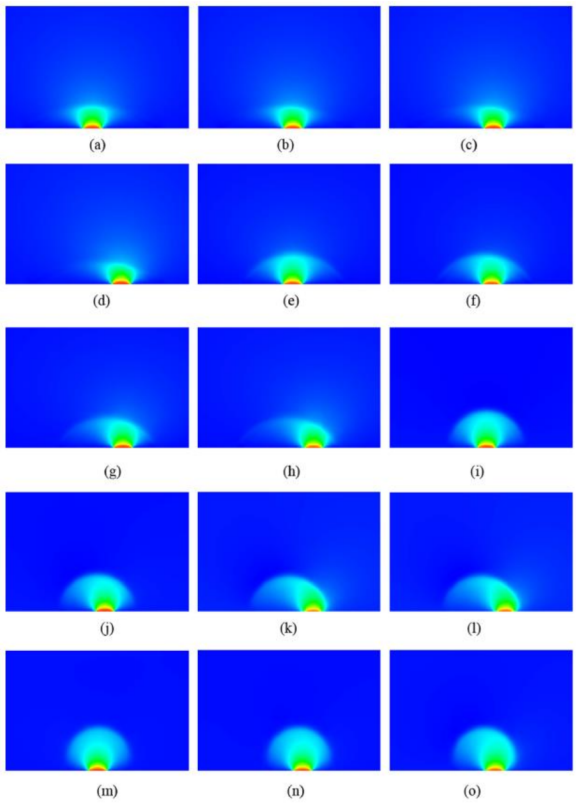
Buharlaşmanın ilk aşamasında, sıvı ve gaz fazının ısı kapasitesi ve yoğunluğundaki farklılık nedeniyle damlaların denge sıcaklığına ulaşması daha uzun sürer. Şekil 1.21 'te, buharlaşma işleminin başlangıç aşamasında izotermlerin değişimi gösterilmiştir. Sistemin yeterince yakınsamasını ve hatayı azaltmasını sağlamak için, 40.000. zaman adımından sonra yerçekimi ve 80.000. zaman adımından sonra ısı kaynağı eklenmiştir. Veriler, bu araştırmada 80.000. zaman adımından sonra toplanmıştır.

Damlacık yüzeyindeki en yüksek sıcaklık, karşılık gelen şekilde ısıtma kaynağının üzerinde bulunur ve iki akışkan arasında ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi farkı olduğu için damlacık ara yüzünde gözle görülür bir sıcaklık sıçraması oluşur. Damlacık ara yüzünde daha ayrıntılı sıcaklık dağılımı Şekil 1.22'de verilmiştir.

Asimetrik yerel ısıtma koşulları, damlalar halinde asimetrik akış düzenlerine ve



Şekil 1.21 Buharlaşmanın başlangıcında izotermlerin değişimi. (a) zaman adımı=1000 (b) zaman adımı=5000 (c) zaman adımı=10000 (d) zaman adımı=20000 [20]

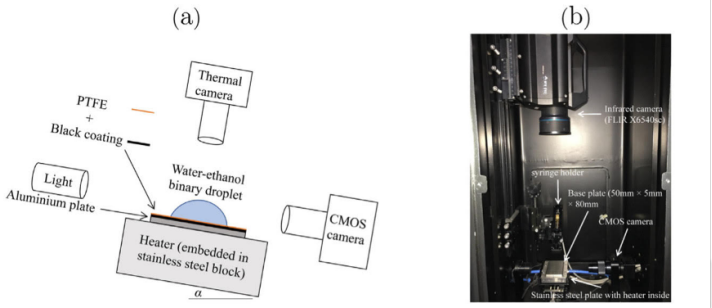


Şekil 1.22 Farklı yerel ısıtma koşulları altında, farklı temas açılarına sahip damlacıkların akış alanındaki sıcaklık dağılımı [20]

sıcaklık dağılımlarına neden olabilir ve damlacık şeklinin asimetrik olmasına neden olmuştur. Bu, süperhidrofilik katı yüzeyler üzerindeki damlacıklar için daha

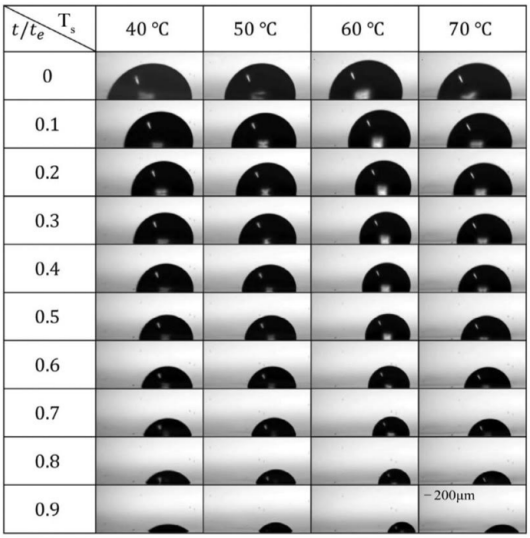
belirgindir. Isı kaynağı üç fazlı temas noktasına daha yakın yerleştirildiğinde daha yüksek buharlaşma hızı elde edilir. Aynı ısı kaynağı konumu için, daha küçük temas açılarına sahip bir damlacık daha yüksek buharlaşma oranlarına sahiptir. Asimetrik bir yerel ısıtma koşulu uygulandığında damlacık katı yüzey üzerinde yatay olarak kaymaya başlar. Kayma davranışı hem damlacık temas açısından hem de ısıtma kaynağı konumundan etkileneceğini göstermişleridir [20].

Katre ve ark. 2020 yılında buharlaşma dinamikleri özelindeki çalışmasında, kritik kayma açısının hemen altındaki farklı alt tabaka sıcaklıklarında, eğimli bir alt tabaka üzerindeki ikili (etanol-su) durgun bir damlacığın buharlaşma dinamiklerini araştırmışlardır. Bu araştırma kapsamında mürekkep püskürtmeli baskı ve mikro akışkanlar gibi uygulamalarda önemli etkileri olan eğimli ısıtılmış yüzeylerdeki ikili damlacıkların buharlaşma dinamikleri hakkında ayrıntılı bilgiler sunmuşlardır.



Şekil 1.23 (a) Bir ısıtıcı, paslanmaz çelik bir plaka üzerine yerleştirilmiş bir Politetrafloroetilen (PTFE) alt tabaka, bir ışık kaynağı, IR ve CMOS kameralardan oluşan deneysel kurulumun şeması. (b) Gerçek gonyometre kurulumunun bir resmi. Kutunun boyutu (kurulumu göstermek için önden açılır) 2424mm × 460mm × 530mm'dir [21]

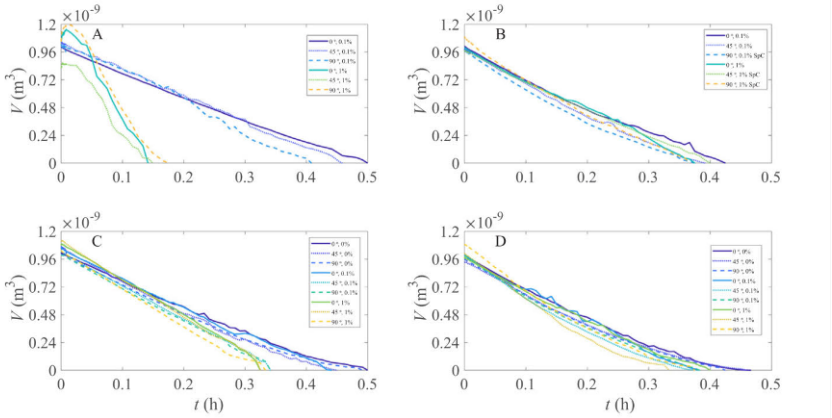
Deneyler sonucunda; ikili damlacığın hareket etmeye başladığı kritik eğim açısı, artan alt tabaka sıcaklığı ile artmaktadır. Saf su damlacığı ile karşılaştırıldığında, ikili damlacık buharlaşmanın erken evresinde ilerleyen temas hattı etrafında su açısından zengin iki farklı salınımlı soğuk bölge ile karmaşık termo-çözünür Marangoni taşınımı sergilemektedir. Daha uçucu ve daha hafif olan etanol damlacığı, arka tarafın yakınında daha sıcak ve hızla buharlaşan bir hücre oluşturmaktadır. Etanol damlacığı buharlaşma tarafında ise, etanol bakımından zengin hücreler çökerek eğim boyunca termal titreşimler üretmektedir. Üretilen bu durumlarda salınımlı termo-çözünür taşınım ve termal titreşimler, daha yüksek alt tabaka sıcaklıklarında daha yoğun ve daha uzun süreli hale gelmektedir. Karmaşık taşınıma rağmen, buharlaşma hızı, normalize edilmiş zaman diliminde erken (etanol ağırlıklı) ve geç (su ağırlıklı) aşamalarda doğrusal uyumlarla temsil edilebilen bir doğrusal davranış sergilemekte ve alt tabaka sıcaklığının artırılması, damlacığa ısı aktarım hızını ve ısı akışını artırmaktadır [21].



Şekil 1.24 (E 20% + W 80%) damlacığının kesit görünümünün farklı alt tabaka sıcaklıkları için zamanla buharlaşması [21]

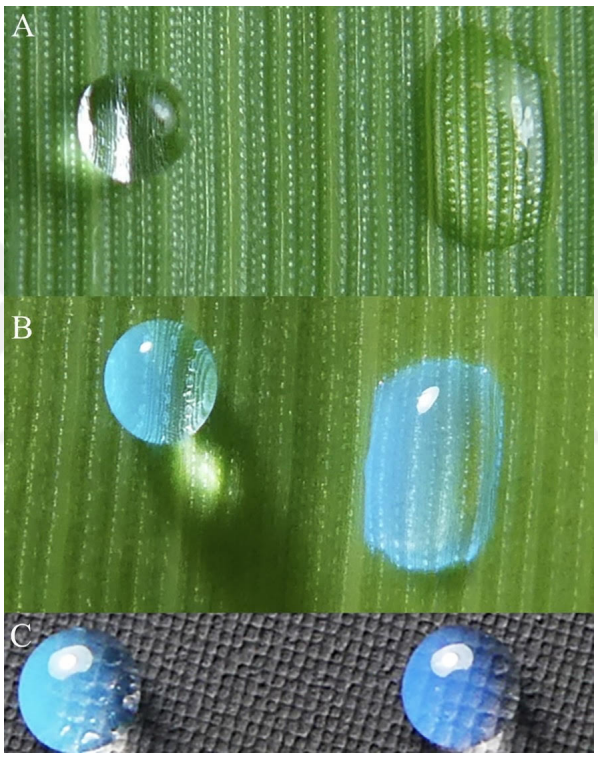
Tredenik ve ark. 2021 yılında, bitki ve sentetik yüzeylerdeki aktif madde damlacıklarının buharlaşması araştırılması kapsamında farklı kanopi(kubbe) mimarilerine ve farklı ıslanabilirliğe sahip iki bitki türü olan buğday ve kapsikum cinsi kırmızı biber üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Bitki yapraklarındaki damlacıkların buharlaşması, Teflon ve parafilm gibi sentetik yüzeylerdeki buharlaşma ile karşılaştırılmakta ve sentetik yüzeylerin bitki yapraklarındaki damlacık buharlaşmasını ne kadar iyi taklit edebildiği belirlenmiştir.

Araştırmada farklı yüzeylerdeki 90 dereceye kadar eğim açılarında buharlaşan damlacıkların temas açıları, yüksekliği, hacmi ve temas yarıçapı zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Deneyleri simüle etmek için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiş ve kullanılmıştır.



Şekil 1.25 Buğday (A), Teflon (B), Kapsikum (C) ve Parafilm (D) üzerindeki damlacık buharlaşması için damlacık hacmi (m^3) ve zamana (h) bağlı deneysel veriler [22]

Düşük yüzey aktif madde konsantrasyonları (%0,1 S465) için, buğday ve teflon üzerindeki buharlaşması sırasında, 90 derecelik eğimlerde sabit temas yarıçapı (CCR) modunu takip ettiği gözlemlenmiştir. Bu, temas hattının çok zor ıslanan yüzeylerde sabit kalma eğiliminin güçlü olduğunu göstermektedir. Sentetik teflon yüzeyin bu durumlarda buğday için uygun bir yüzey olduğu saptanmıştır. Ancak buğdayda yüksek yüzey aktif madde konsantrasyonları (%1 S465) için buharlaşma davranışının çok farklı olduğu, damlacığın uzamış göründüğü ve beklenenden çok daha hızlı buharlaştığı belirlenmiştir. Bu standart dışı davranışın matematiksel modellerle iyi bir şekilde yakalanamadığı tespit edilmiş ve bu durumun yüzey aktif madde adsorpsiyonu, yüzey pürüzlülüğü ve gözenek etkileşimlerinden kaynaklandığı düşünülmüştür.



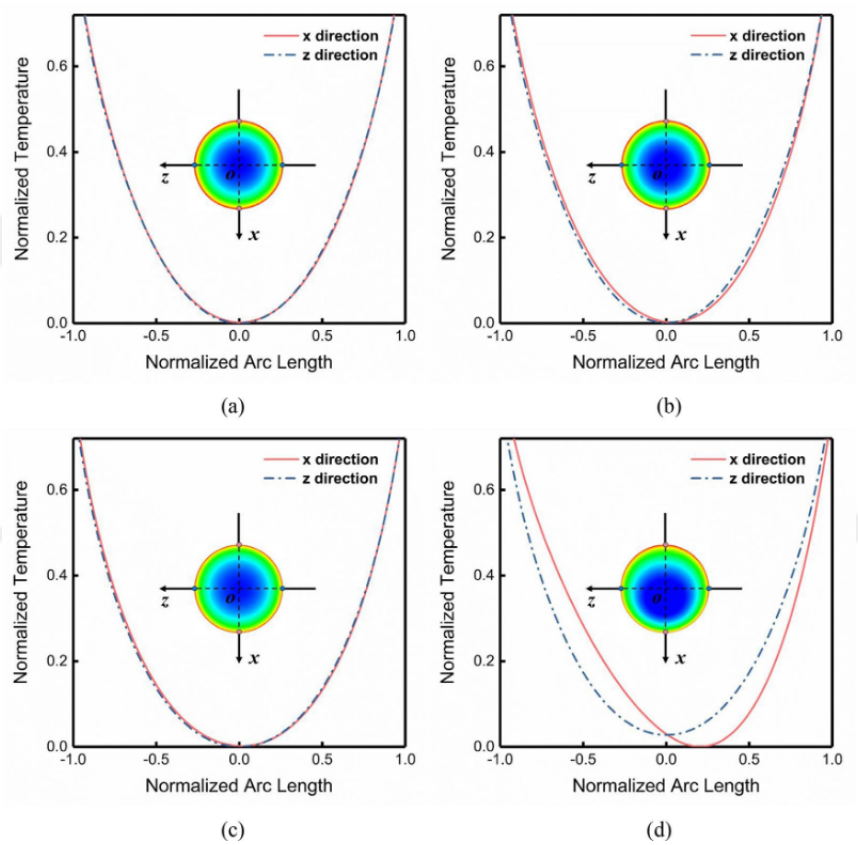
Şekil 1.26 Buğday (A,B) ve kapsikum (D) üst yaprak yüzeylerindeki damlacıklar, Teflon (C) ve Parafilm (E). Sağdaki damlacık %1 S465, sonra (D) ve (E)'de %0,1 S465 ve sudur [22]

Deneyler sonucunda, düşük yüzey aktif madde konsantrasyonları için sentetik yüzeylerin bitki yapraklarındaki buharlaşmayı iyi şekilde taklit edebileceğini göstermiştir. Yüksek yüzey aktif madde seviyeleri için; yüzey aktif madde, yüzey özellikleri ve damlacık geometrisi arasındaki karmaşık etkileşimin daha basit sentetik yüzeylerde kolayca kopyalanamayan standart dışı buharlaşma davranışına yol açtığı bulunmuştur [22].

Zhenhai Pan ve Yu Wang 2021 yılında yaptıkları çalışmada, eğimli yüzeyler üzerinde hareketsiz duran küçük bir su damlacığının buharlaşmasının üç boyutlu

sayısal incelemesini sunmuşlardır. Transport mekanizmaları araştırılırken, sayısal model doğrulanmakta ve eğim açısının buharlaşma hızı, akış modelleri ve buharlaşma özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

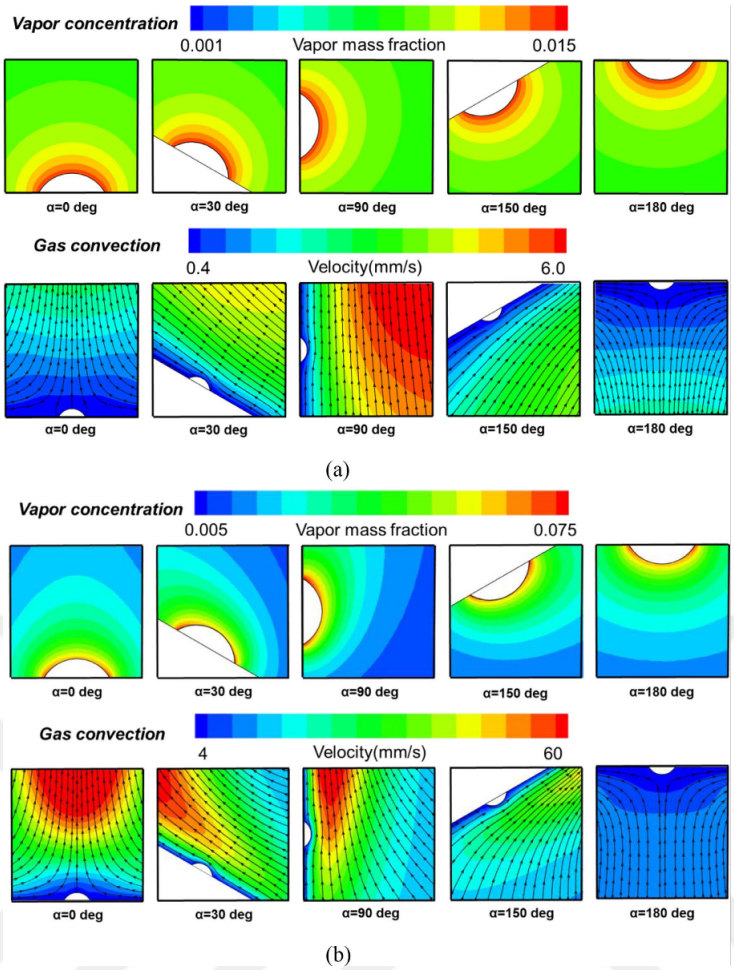
Araştırmacıların analizler sonucunda ulaştıkları temel bulgular; evaporatif soğutma, eğim açısı arttıkça damlacık arayüzünde asimetrik bir sıcaklık dağılımına yol açmıştır. En düşük sıcaklık noktası ise şekil 1.27'de görüldüğü gibi x yönünde kaymaktadır. Alt tabaka ısıtması ne kadar yüksek olursa, asimetri ve minimum sıcaklık noktası kaymasının da o kadar büyük olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 1.27 Farklı yönlerde (x yönü ve z yönü) damlacık arayüzündeki boyutsal olmayan sıcaklık dağılımları: (a) Alt tabaka ısıtma $T = 0$°C ve eğim açısı $\alpha = 0$°'dir; (b) Alt tabaka ısıtma $T = 0$°C ve eğim açısı $\alpha = 90$ °'dir; (c) Alt tabaka ısıtma $T = 30$°C ve eğim açısı $\alpha = 0$°'dir; (d) Alt tabaka ısıtma $T = 30$°C ve eğim açısı $\alpha = 90$°'dir [23]

Gaz bölgesindeki akış alanı, eğim açısı arttıkça simetriden asimetriye geçiş yapmakta ve damlacığın yakınındaki akış yoğunluğu artarak buharlaşmayı hızlandırmaktadır. Yerel buharlaşma akısı dağılımı da simetriden asimetriye kaymakta ve en düşük buharlaşma akısı damlacığın tepesinden orta kısmına doğru hareket etmektedir.

Damlacık içindeki akış davranışı eğim açısı ile önemli ölçüde değişirken açı



Şekil 1.28 Simetri düzleminde (z = 0) gaz alanındaki buhar kütle kesri dağılımı ve akış alanı: (a) Alt tabaka ısıtma $T = 0$°C'dir; (b) Alt tabaka ısıtma $T = 30$°C'dir [23]

0°'den 180°'ye arttıkça simetrik çift girdaplı akıştan asimetrik tek girdaplı akışa ve ardından tekrar simetrik çift girdaplı akış oluşmaktadır. Akış hızı büyüklüğünün, katı yüzey açısı 0°'den 90°'ye arttıkça önemli ölçüde artmakta olduğu gözlenmiştir.

Evaporatif soğutma ve doğal taşınımın birleşik etkisi altında, katı yüzey eğim açısı 0°'den 75°'ye kadar arttıkça buharlaşma hızı artarken, eğim açısının daha da artmasıyla buharlaşma hızı azalmaktadır. Yatay yüzeylerle karşılaştırıldığında, alt tabaka sıcaklığı ortamdan 40°C daha yüksek olduğunda dikey yüzeylerdeki buharlaşma hızının %9,38'e kadar daha yüksek olabileceği saptanmıştır.

Özetle, bu çalışma eğimli yüzeylerdeki durgun damlacıkların taşınım mekanizmaları ve buharlaşma özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak, katı yüzey eğim açısı ve alt tabaka ısıtmasının termal, akış ve buharlaşma modelleri üzerindeki önemli etkisini ortaya koymuştur [23].

Tüm bu çalışmalardan anlaşılacağı üzere literatürdeki damlacık buharlaşması ile ilgili sayısal çalışmaların çoğu yatay yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmaların içinde zamana bağlı çözüm yapan kısıtlı sayıda yayın bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan sayısal çalışmalarda katı yüzey üzerinde bulunan damlacığın zamana bağlı buharlaşması hem yatay yüzey üzerinde hem de iki farklı (45° ve 75°) katı yüzey eğim açısında çalışılmıştır ve sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile de doğrulanmıştır.

Sonuç olarak yapılan çalışmada su damlacıklarının buharlaşma süreci, 3 farklı malzeme (cam, plastik ve alüminyum) üzerindeki katı yüzey malzeme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, başlangıç damlacık sıcaklığı, damlacık hacmi ve katı yüzey eğim açıları olmak üzere 6 farklı parametre ile değerlendirilip oldukça geniş sınır şartlarına sahip bir çalışma yürütülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Durgun damlacık buharlaşması üzerine yapılan literatür çalışmalarının büyük çoğunluğu, yatay yüzeylerde gerçekleşen buharlaşma süreçlerine odaklanmış ve genellikle ısıtılmış veya ısıtılmamış yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ancak, eğimli ve dikey yüzeylerde damlacık buharlaşması ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, literatürdeki bu boşluğu doldurmak üzere, deney tasarımı (DOE) ve varyans analizi (ANOVA) yöntemlerini kullanarak su damlacıklarının buharlaşma sürelerini etkileyen çoklu parametrelerin incelendiği kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirmektir. 0°, 45° ve 75° eğim açısına sahip katı yüzeylerde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları, hem yatay yüzeylerdeki hem de literatürde mevcut analitik çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, damlacık buharlaşma parametreleri için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Ayrıca, ANOVA analizi yardımıyla buharlaşma süresine ilişkin bir tahmin korelasyonu önerilmiş ve damlacık buharlaşma süreci sayısal yöntemlerle modellenmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçları, hem yatay hem de eğimli yüzeyler için deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu tez çalışmasının temel amaçları şunlardır:

- Farklı malzemeler için, alt tabakanın eğim açısının, yüzey pürüzlülük seviyelerinin, alt tabaka sıcaklığının, damlacıkların başlangıç sıcaklığının ve hacmin damlacıkların buharlaşma süresi üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmak;
- Buharlaşma sırasında hem yatay hem de eğimli yüzeylerde temas açısının belirlenmesi;
- Durgun damlacık buharlaşmasını zamana bağlı olarak sayısal olarak modelleyip hem yatay hem de açılı yüzeylerde analiz etmek;
- ANOVA analizi ile çok parametreli etkiler göz önünde bulundurularak su damlacıklarının buharlaşma süresi için korelasyon türetmek;
- ANOVA analizinden elde edilen damla buharlaşma süresi korelasyonunun damlaların ömrünü doğru bir şekilde tahmin ettiğini analitik ve deneysel olarak doğrulamak.

2
MATERYAL VE METOT

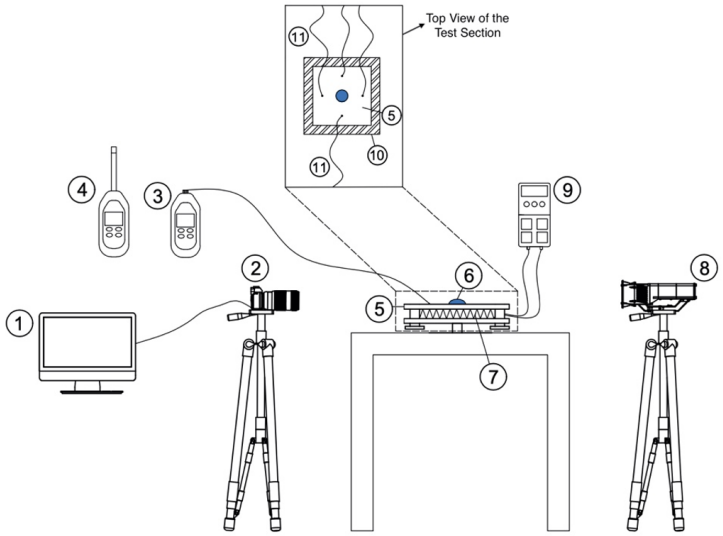
Bu tez çalışmasında durgun damlacık buharlaşması deneysel, sayısal ve analitik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar planlanırken deney tasarımı (DOE) metodundan faydalanılmıştır. Bu sayede hem birçok farklı parametre için deney matrisleri optimize edilmiş hem de deneysel çalışmada kullanılan parametrelerin damlacık buharlaşmasına ne derecede etki ettiği belirlenmiştir.

Daha sonra deneysel çalışmada kullanılan damlacık geometrisi ve fiziği baz alınarak bir matematik model oluşturulmuştur. Bu matematik modelde su damlacığı yarım küresel kep olarak modellenmiştir. Son olarak da aynı geometri için "OpenFoam" açık kaynaklı analiz programında damlacık buharlaşması sayısal olarak modellenmiştir.

2.1 Deneysel Çalışma

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışma için şekil 2.1'de görülen deney tesisatı kurulmuştur. Deneysel çalışmada ortam havası sıcaklık ve bağıl nem verileri, Testo 605i sıcaklık-nem probu yardımıyla sürekli olarak toplandı ve ortam sıcaklığı 27°C ± 0,5°C ve bağıl nemi %55 ± 5 mertebelerinde tutulması sağlandı. Su damlacığının koyulacağı katı yüzeyin sıcaklığını sabit tutmak için elektrikli ısıtıcıya bağlı DC kontrol ünitesi kullanılmıştır. Test bölümü 150 mm x 150 mm boyutlarında olup deneysel çalışmada kullanılan cam, plastik ve alüminyum katı yüzeylerin elektrikli ısıtıcının yüzey alanının aynı boyutlarında olması sağlandı ve elektrikli ısıtıcı ile malzemelerin arasında boşluk kalmamasına dikkat edildi. Elektrikli ısıtıcının altı ve yanları verilen ısının direkt olarak katı yüzeye gitmesi için yalıtım malzemesi ile kaplandı. Deneylerde, istenen damlacık hacimlerini elde etmek için farklı iç iğne çaplarına sahip standart hassas şırıngalar kullanılmıştır. Çalışmada 3 µL, 5 µL ve 8 µL ± 0,1 µL olmak üzere üç farklı damlacık hacmi dikkate alındı. Deneylere başlandığında ilk olarak sıcak katı yüzey üzerine su damlacıkları damlatıldı ve saniyede 10 kare hızında görüntü çeken yüksek hızlı

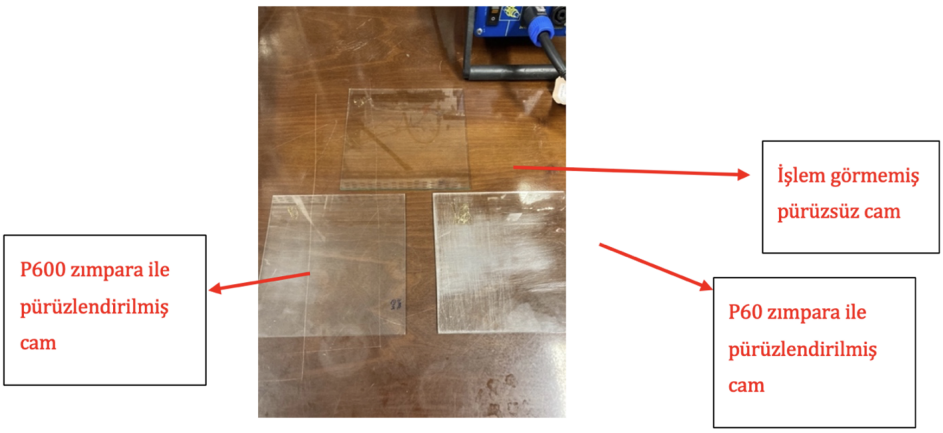
kamera (Phantom Miro, eX4) ile damlacığın buharlaşma sırasındaki değişimi tespit edilmiştir. Yapılan her deney, doğruluk ve tekrarlanabilirlik adına 5 kez tekrarlanmıştır. Phantom Camera Control (PCC) yazılımındaki damlacık boyutları için ölçümleri kalibre etmek üzere standart bir grafitin enine kesit çapı referans olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.1 Deney tesisatının şematik gösterimi (1-Bilgisayar, 2-Yüksek Hızlı Kamera, 3-Sıcaklık Data Logger, 4-Sıcaklık-Bağıl Nem Probu, 5-Katı Yüzey, 6-Su Damlası, 7-Elektrikli Isıtıcı, 8-Işık Kaynağı, 9-DC Güç Kaynağı Kontrol Ünitesi, 10-İzolasyon, 11-Termokupllar)

2.1.1 Farklı Damlacık Hacimlerinde ve Açılı Cam Yüzeylerde Yapılan Deneyler

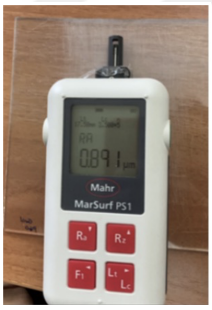
Deneysel çalışmaya ilk olarak cam yüzey ile başlanmış olup, farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip üç farklı cam kullanılmıştır. Şekil 2.2'de farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip cam malzemeler görülmektedir. Cam yüzeyler üzerinde orta seviye yüzey pürüzlülüğü elde etmek için P600 (mikro zımpara kâğıdı) ve yüksek seviyelerde yüzey pürüzlülüğü elde etmek için P60 (makro zımpara kâğıdı) standart zımpara kağıtları kullanılmıştır. Şekil 2.3'te kullanılan mikro zımpara kâğıdı görülmektedir. Katı yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmek için şekil 2.4'de görülen Mahr marka MarSurf PS1 model profilometre kullanılmıştır. Katı yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini belirlemek için 3 farklı yönden ölçümler yapılmıştır ve tablo 2.1'de deneylerde kullanılan cam yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.



Şekil 2.2 Üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip cam malzemeler



Şekil 2.3 Standart mikro zımpara kâğıdı (P600)

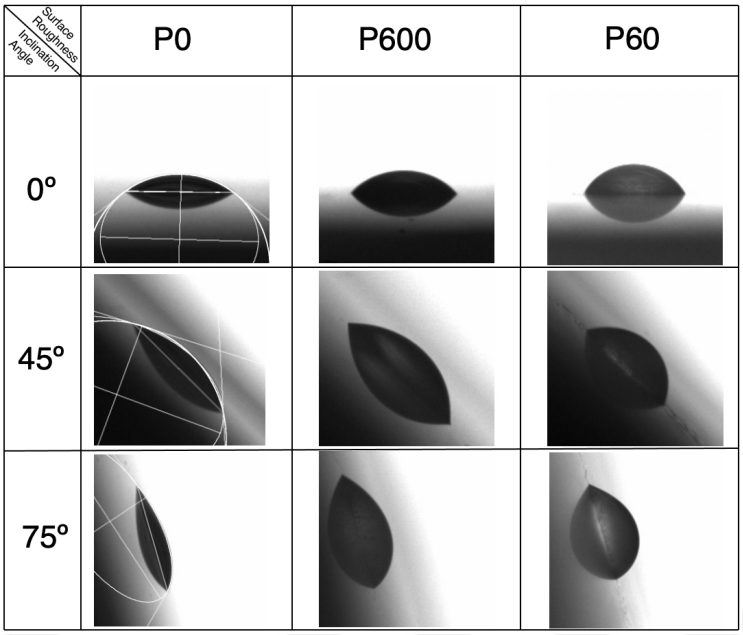


Şekil 2.4 Mahr marka profilometre

Tablo 2.1 3 farklı cam yüzey için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Seviyesi	**Ra Değeri**
İşlem Görmemiş Pürüzsüz Cam	0,018
P600 standart zımpara kağıdı ile işlenmiş cam yüzey	0,274
P60 standart zımpara kağıdı ile işlenmiş cam yüzey	1,150
Not: Lt=17,3mm ve Lc=2,5 mm dir.	

Cam yüzey için deneyler; yatay, 45º ve 75º olmak üzere üç farklı yüzey açısında yapılmıştır. Şekil 2.5'de 3µL damlacık hacmi için damlacıkların yatay ve açılı yüzeylerde farklı yüzey pürüzlülüklerindeki başlangıç görüntüleri verilmiştir. Tablo 2.2'de ise bu damlacıkların başlangıç temas açılarının değerleri görülmektedir. Bu açılar "ImageJ" programı yardımıyla görüntülerin işlenmesi ile hassas bir şekilde belirlenmiştir.

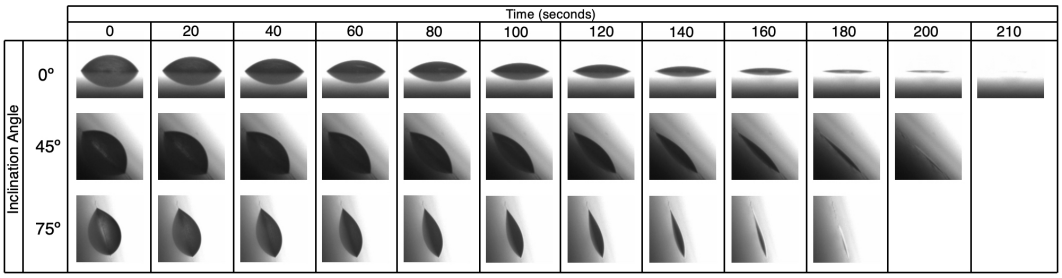


Şekil 2.5 3 µL damlacık için cam yüzeyler üzerinde su damlalarının başlangıç görüntüleri

Tablo 2.2 Su damlacıklarının farklı cam yüzeyler üzerinde başlangıç temas açısı değerleri

Yüzeyin Yatay ile Açısı	Yüzey Pürüzlülüğü	Başlangıç Temas Açısı	
		Sol	Sağ
0°	P0	37,5	37,4
0°	P600	49,2	49,0
0°	P60	60,4	60,3
45°	P0	29,9	44,1
45°	P600	44,2	51,2
45°	P60	54,5	62,0
75°	P0	21,8	41,6
75°	P600	44,6	67,3
75°	P60	54,6	73,3

Şekil 2.6'da damlacıkların zamana bağlı olarak farklı katı yüzey açılarındaki kesit görüntüleri verilmiştir. Buradaki deney için en uzun süre yatay yüzeyde 210 saniye olarak ölçülürken en kısa süre 176 saniye olarak 75º açılı yüzeyde tespit edilmiştir.



Şekil 2.6 Zamana bağlı farklı katı yüzey açıları için damlacık buharlaşması görüntüleri (Damlacık parametreleri: 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC katı yüzey sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı)

Bu çalışmada DOE aracılığıyla yapılan deneysel verilerdeki belirsizlikler Moffat'ın metodolojisi kullanılarak hesaplanmıştır [24]. Tablo 2.3'de belirsizlik değerleri görülmektedir.

Tablo 2.3 Deney parametrelerinin hesaplanan belirsizlikleri

Ana Ölçüm Parametreleri		**Hesaplanan değerler**	
Parametre	**Belirsizlik**	**Parametre**	**Belirsizlik**
V (damlacık hacmi)	± 0.1 µL	Ra (Rayleigh Sayısı)	$\pm 0.18\%$
T (termokupl)	± 0.15 °C	m_e (buharlaşma hızı)	$\pm 0.29\%$
RH (bağıl nem)	$\pm 10\%$	t_e (buharlaşma zamanı)	$\pm 3.15\%$
D (damlacık çapı)	± 0.1 mm		

• Deney Tasarımı Yöntemi (DOE) ve Anova Analizi

Deneysel çalışmada optimum deney sayısını belirlemek için Taguchi ve ANOVA analizi kullanıldı. Bu teknikler çeşitli mühendislik ortamlarında sıklıkla kullanılan deneysel optimizasyon teknikleridir. Özellikle deneysel araştırmalarda deneme sayısını azaltarak kaynak ve zamandan tasarruf sağlar. Taguchi tekniği, belirli bir durum için en uygun çözümü belirlemek amacıyla ortogonal dizileri kullanır ki bu diziler, geleneksel deneysel tasarıma kıyasla yapılması gereken deney sayısını azaltan dizi türüdür. Bağımsız faktörlerin sayısı ve seviyeleri ortogonal diziyi belirler [25]. Testlerin yürütülmesi ortogonal dizi tarafından yönetilir. Bu denemelerin sonuçları daha sonra üç kriterden birine göre değerlendirilir: "daha büyük daha iyidir", "daha küçük daha iyidir" veya "nominal daha iyidir". [26]. Logaritmik bir fonksiyon olan sinyal-gürültü (S/N) oranı, bu durumların her birini karakterize eder. Hangi girdilerin hedef fonksiyonunu en çok etkilediğini keşfetmek için, birkaç test yürütmek ve her girdi için ortalama S/N oranlarını karşılaştırmak önemlidir.

S/N oranı, istenen sinyalin gücünü arka plan gürültüsünün derecesiyle karşılaştıran

bilimsel ve mühendislik metriğidir [27]. S/N oranında S sinyal faktörünü, N ise gürültü faktörünü ifade eder.

Sistemden elde edilen gerçek değere “sinyal faktörü” denirken, “gürültü faktörü” deneyin tasarımına dahil edilmeyen ancak sonucunu etkileyen değişkenleri ifade eder. Hedeflenen performans özelliklerinin hedef değerden farklı olmasına neden olan tüm faktörler gürültü kaynağı olarak kabul edilir.

Gürültü bileşenlerini gösteren N değeri küçüldükçe S/N oranı ideal hedef değerine daha yakın olacaktır. Buna göre, bu çalışmanın amacı S/N oranını en aza indirmektir. [28]. Bu çalışma, tepki değerini (damlacık buharlaşma süresi) mümkün olduğunca düşük tutmayı amaçladığından, S/N oranı hesaplaması üç farklı değerlendirme kriterinden olan "daha küçük, daha iyi" seçilmiştir. S/N oranı için kullanılan formül, eşitlik 2.1’de görülmektedir:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{2.1}$$

Burada “i” gözlem değerini, “y_i” buharlaşma süresini ve “n” bu çalışmaya uygulanan deneyleri ifade etmektedir.

Taguchi’den alınan sonuçların varyans analizi ve sistemin girdileri ile çıktıları arasındaki korelasyonun oluşturulmasını için ANOVA analizi kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada toplam buharlaşma süresi beş farklı girdi parametresine göre değerlendirilmiştir. Tablo2.4’de deneyler için girdi parametreleri ve her parametrenin seviyeleri görülmektedir.

Tez kapsamında az sayıda deney yaparken mümkün olduğunca fazla veri toplamak için üç seviyeli ortogonal dizi olan Taguchi’nin L27 dizisi kullanılmıştır. Sonuçta bu çalışma için 27 deney yapılmıştır.

Tablo 2.5’te Taguchi’nin L27 5 parametreli 3 seviyeli ortogonal matrisi ile minimum deney sayısında çıktının değerlendirilmesi sağlanmış ve parametrelerin duyarlılık analizleri verilmiştir.

Tablo 2.4 Deneysel parametrelerin seviyeleri

Deney Parametreleri	**Sembol**	**Seviyeler**		
		1	**2**	**3**
Yüzey Sıcaklığı (°C)	A	30	45	60
Yüzey Pürüzlülüğü	B	P0	P600	P60
Damla Başlangıç Sıcaklığı (°C)	C	30	40	60
Damla Hacmi (µL)	D	3	5	8
Yüzeyin Yatay ile Açısı (°)	E	0	45	75

Tablo 2.5 Taguchi'nin L27 ortogonal matrisine göre deney setininin matrisi

Deney	Parametrelerin Sembolleri				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	3
4	1	2	2	2	1
5	1	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3
7	1	3	3	3	1
8	1	3	3	3	2
9	1	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1
11	2	1	2	3	2
12	2	1	2	3	3
13	2	2	3	1	1
14	2	2	3	1	2
15	2	2	3	1	3
16	2	3	1	2	1
17	2	3	1	2	2
18	2	3	1	2	3
19	3	1	3	2	1
20	3	1	3	2	2
21	3	1	3	2	3
22	3	2	1	3	1
23	3	2	1	3	2
24	3	2	1	3	3
25	3	3	2	1	1
26	3	3	2	1	2
27	3	3	2	1	3

Deneysel optimizasyon ve ANOVA (Analysis of varience) ile deney setinin sonuçlarından bir regresyon denklemi elde edilmiştir ve bu korelasyona göre tahminleme çalışması yapılmıştır. Tablo 2.6'te deneylerin gerçek değerleri ile ANOVA analizinin tahmin ettiği değerler yer almaktadır. Eşitlik 2.2 regresyon denklemi ve şekil 2.7'de bu denklemin katsayıları yer almaktadır.

Tablo 2.6 Deney parametreleri, çıktı ve tahmin sonuçları

Deney	Yüzey Sıcaklığı	Yüzey Pürüzlülüğü	Damla Başlangıç Sıcaklığı	Damla Hacmi	Yüzeyin Yatay ile Açısı	Buharlaşma Süresi - Deneysel [saniye]	Buharlaşma Süresi - Tahmin [saniye]
1	1	1	1	1	1	1393	1305,3
2	1	1	1	1	2	1230	1232,9
3	1	1	1	1	3	1045	1129,9
4	1	2	2	2	1	1600	1507,6
5	1	2	2	2	2	1375	1435,2
6	1	2	2	2	3	1300	1332,2
7	1	3	3	3	1	2490	2329,6
8	1	3	3	3	2	2385	2257,2
9	1	3	3	3	3	1866	2154,2
10	2	1	2	3	1	425	446,0
11	2	1	2	3	2	335	373,5
12	2	1	2	3	3	330	270,5
14	2	2	3	1	2	320	331,9
15	2	2	3	1	3	315	228,9
16	2	3	1	2	1	515	566,0
17	2	3	1	2	2	490	493,5
18	2	3	1	2	3	445	390,5
19	3	1	3	2	1	182	243,0
20	3	1	3	2	2	164	170,5
21	3	1	3	2	3	135	67,5
22	3	2	1	3	1	300	366,0
23	3	2	1	3	2	290	293,5
24	3	2	1	3	3	260	190,5
25	3	3	2	1	1	210	277,3
26	3	3	2	1	2	204	204,9
27	3	3	2	1	3	170	101,9

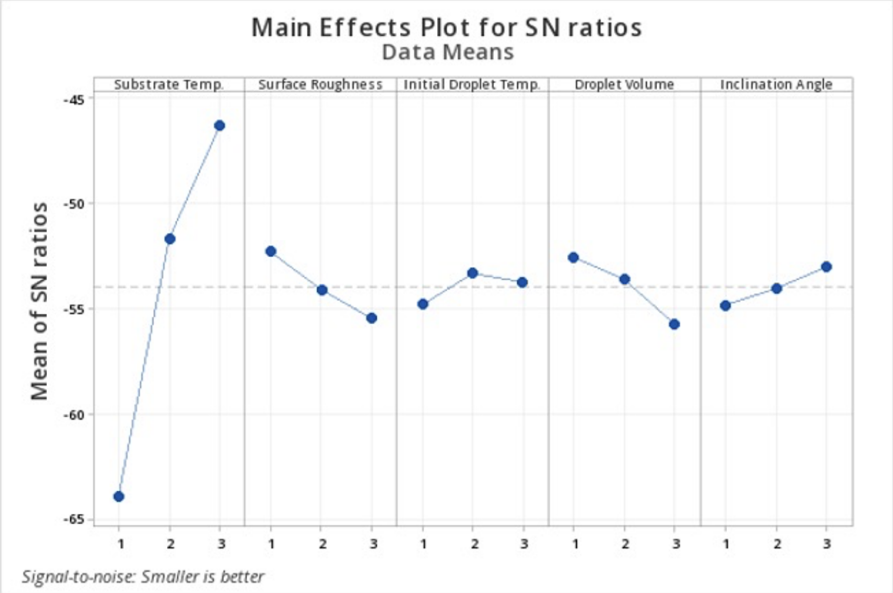
$$t_e = 744.6 + [A]_{1,2,3} + [B]_{1,2,3} + [C]_{1,2,3} + [D]_{1,2,3} + [E]_{1,2,3} \tag{2.2}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ C_1 & C_2 & C_3 \\ D_1 & D_2 & D_3 \\ E_1 & E_2 & E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 887{,}0 & -355{,}1 & -531{,}8 \\ -162{,}5 & -67{,}9 & 230{,}4 \\ -81{,}5 & -83{,}6 & 165{,}1 \\ -164{,}9 & -55{,}0 & 220{,}0 \\ 82{,}6 & 10{,}2 & -92{,}8 \end{bmatrix}$$

Şekil 2.7 Regresyon denkleminin katsayıları

Buharlaşma süresini eşitlik 2.2'den herhangi bir damlacık parametreleri için hesaplayabiliriz, örneğin: 60°C yüzey sıcaklığı, P600 yüzey pürüzlülük seviyesi, 30°C başlangıç damlacık sıcaklığı, 8 µL damlacık hacmi ve 45° eğim açısı girdi parametreleri için hesap yapılacak olursa, sırasıyla takip eden katsayıları seçerek; A_3, B_2, C_1, D_3 ve E_2;

$t_e = 744.6 + [A]_{1,2,3} + [B]_{1,2,3} + [C]_{1,2,3} + [D]_{1,2,3} + [E]_{1,2,3} = 293,6s$ hesaplanır.

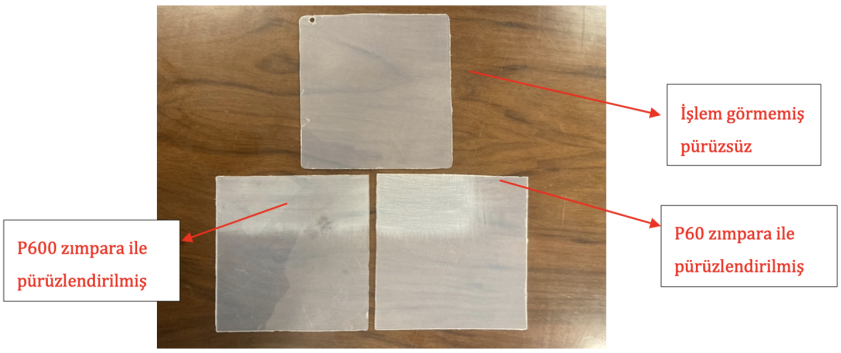


Şekil 2.8 Cam yüzeylerde yapılan deneylerde parametrelerin damlacık buharlaşmasına etkisi

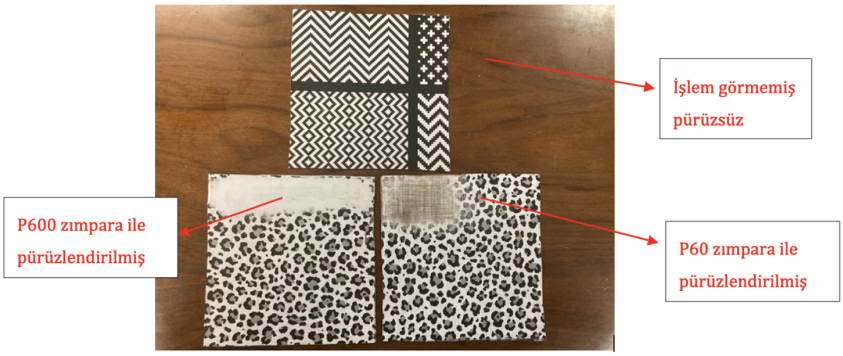
Şekil 2.8'de pürüzlü ve pürüzsüz cam yüzeylerde gerçekleştirilen deneyler için buharlaşma zamanına etki eden 5 parametrenin etkisi gözükmektedir. Şekilde de görüleceği üzere buharlaşma süresine en fazla katı yüzey sıcaklığı, en az damlacık başlangıç sıcaklığının etki ettiği belirlenmiştir. Damlacık buharlaşmasına 2. olarak en fazla etki eden parametre damlacık hacmi, 3. yüzey pürüzlülüğü ve son olarak da katı yüzey açısının etkilediği tespit edilmiştir.

2.1.2 Farklı Malzemelerde Yapılan Deneysel Çalışmalar

Bölüm 2.1.1'de cam malzeme ile yapılan deneysel çalışma, plastik ve alüminyum malzeme ile de gerçekleştirilmiştir. Malzemeler cam malzemede olduğu gibi mikro zımpara kâğıdı (P600) ve makro zımpara kâğıdı (P60) ile pürüzlendirilmiştir. Şekil 2.9 ve 2.10'de sırasıyla plastik ve alüminyum katı malzemeler görülmektedir. Tablo 2.7 ve 2.8'de ise plastik ve alüminyum malzemelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.



Şekil 2.9 3 farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip plastik malzemeler



Şekil 2.10 3 farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip aluminyum malzemeler

Tablo 2.7 3 farklı plastik yüzey için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Seviyesi	**Ra Değeri**
İşlem Görmemiş Plasyik Yüzey	0,046
P600 standart zımpara kağıdı ile işlenmiş plastik yüzey	1,040
P60 standart zımpara kağıdı ile işlenmiş plastik yüzey	10,144
Not: Lt=17,3mm ve Lc=2,5 mm dir.	

Tablo 2.8 Üç farklı alüminyum yüzey için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Seviyesi	**Ra Değeri**
İşlem Görmemiş Plastik Yüzey	0,732
P600 standart zımpara kağıdı ile işlenmiş alüminyum yüzey	1,050
P60 standart zımpara kağıdı ile işlenmiş alüminyum yüzey	2,574
Not: Lt=17,3mm ve Lc=2,5 mm dir.	

Tablo 2.9'da plastik ve alüminyum malzemelerinde deney parametresi olarak dahil edildiği L27 Taguchi ortogonal deney matrisi verilmiştir. Burada bu deney tasarımı için en uzun buharlaşma zamanı 3160 saniye ile plastik malzemede, 30°C katı yüzey sıcaklığında, P60 yüzey pürüzlülüğünde, 60°C damlacık başlangıç sıcaklığında, 5 µL damla hacminde ve yatay yüzeyde gerçekleşirken; en kısa buharlaşma zamanı 150 saniye ile alüminyum malzemede, 60°C katı yüzey sıcaklığında, P60 yüzey pürüzlülüğünde, 40°C damlacık başlangıç sıcaklığında, 3 µL damla hacminde ve yatay yüzeyde gerçekleşmiştir. Eşitlik 2.3'de katı yüzey malzemesinin de etkisinin dahil edildiği regresyon denklemine ve şekil 2.11'de bu denklemin katsayılarına yer verilmiştir.

Tablo 2.9 Farklı katı yüzey malzemeleri ile yapılan deneylerin sonuçları

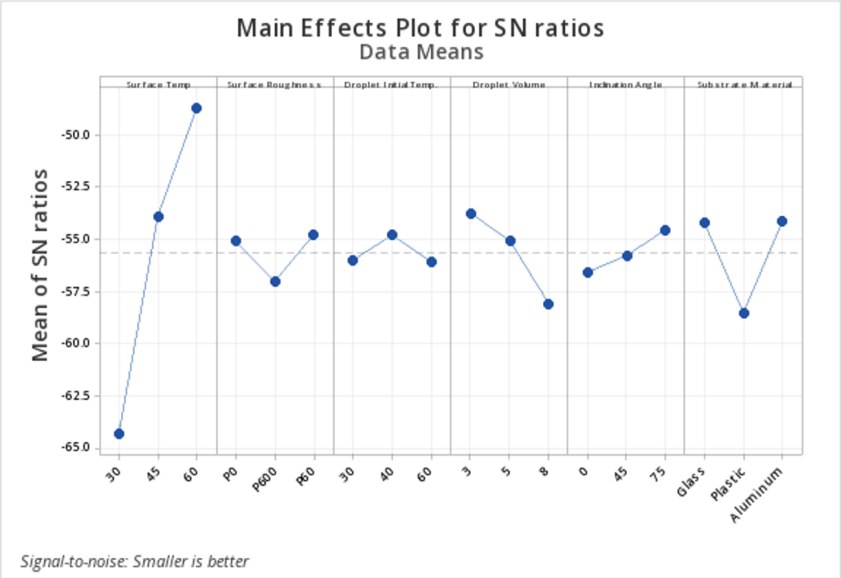
Deney	Yüzey Sıcaklığı	Yüzey Pürüzlülüğü	Damla Başlangıç Sıcaklığı	Damla Hacmi	Yüzeyin Yatay ile Açısı	Katı Yüzey Malzemesi	Buharlaşma Süresi - Deneysel [saniye]	Buharlaşma Süresi - Tahmin [saniye]
1	30	P0	30	3	0	Cam	1393	1350
2	30	P0	30	3	45	Plastik	1668	1790
3	30	P0	30	3	75	Alüminyum	947	868
4	30	P600	40	5	0	Cam	1600	1697
5	30	P600	40	5	45	Plastik	2190	2137
6	30	P600	40	5	75	Alüminyum	1259	1215
7	30	P60	60	8	0	Cam	2490	2281
8	30	P60	60	8	45	Plastik	3160	2722
9	30	P60	60	8	75	Alüminyum	1152	1200
10	45	P0	40	8	0	Plastik	1023	1008
11	45	P0	40	8	45	Alüminyum	519	528
12	45	P0	40	8	75	Cam	330	336
13	45	P600	60	3	0	Plastik	743	908
14	45	P600	60	3	45	Alüminyum	513	428
15	45	P600	60	3	75	Cam	315	235
16	45	P60	30	5	0	Plastik	450	500
17	45	P60	30	5	45	Alüminyum	422	343
18	45	P60	30	5	75	Cam	445	364
19	60	P0	60	5	0	Alüminyum	259	190
20	60	P0	60	5	45	Cam	164	180
21	60	P0	60	5	75	Plastik	376	348
22	60	P600	30	8	0	Alüminyum	390	314
23	60	P600	30	8	45	Cam	290	314
24	60	P600	30	8	75	Plastik	760	689
25	60	P60	40	3	0	Alüminyum	150	132
26	60	P60	40	3	45	Cam	204	230
27	60	P60	40	3	75	Plastik	192	220

$$t_e = 866.8 + [A]_{1,2,3} + [B]_{1,2,3} + [C]_{1,2,3} + [D]_{1,2,3} + [E]_{1,2,3} + [F]_{1,2,3} \qquad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ C_1 & C_2 & C_3 \\ D_1 & D_2 & D_3 \\ E_1 & E_2 & E_3 \\ F_1 & F_2 & F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 895{,}3 & -337{,}9 & -557{,}4 \\ -124{,}7 & 28{,}7 & 96 \\ -115{,}1 & -37{,}1 & 152{,}3 \\ 186{,}3 & -70{,}7 & 257 \\ 77{,}4 & 147{,}6 & -225 \\ -63{,}4 & 306{,}7 & -243{,}4 \end{bmatrix}$$

Şekil 2.11 6 Parametreli regresyon denkleminin katsayıları

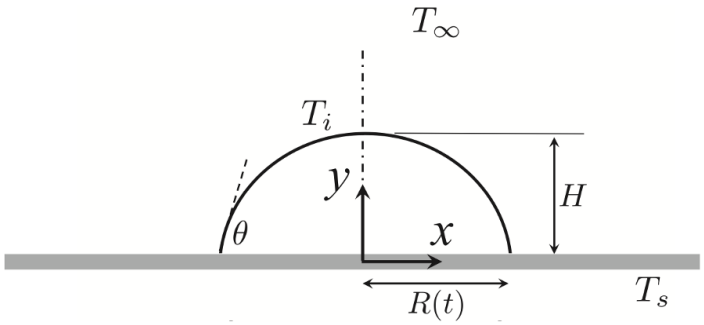
Şekil 2.12'de buharlaşma süresine etki eden parametreler verilmiştir. Burada katı yüzey malzemesi de deney parametrelerine eklenmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere bu deney tasarımına göre damlacık buharlaşmasına etki eden parametreleri, etkisi en fazla olandan en az olana doğru sıralayacak olursak; katı yüzey sıcaklığı, katı yüzeyin malzemesi, damlacık hacmi, yüzey pürüzlülüğü, katı yüzeyin eğim açısı ve damlacığın başlangıç sıcaklığı olarak sıralayabiliriz. Katı yüzey malzemesinin cinsinin damlacık buharlaşmasına en fazla etki eden ikinci parametre olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.12 Deneysel parametrelerin buharlaşma süresine etkisi

2.2 Matematik Model

Deneysel çalışmanın yanı sıra, damlacık buharlaşmasının matematik modeli oluşturulurken geometri şekil 2.13'de görüldüğü gibi yarım küre olarak düşünülmüştür. Burada H damlacığın yüksekliği, R damlacığın yarıçapı ve θ damlacığın temas açısını ifade etmektedir.



Şekil 2.13 İki boyutlu damlacık geometrisi

Anlık temas açısına göre damlacık hacmi değişimi eşitlik 2.4'den;

$$V(t) = \frac{\pi R^3}{3} \frac{(1-\cos\theta)^2(2+\cos\theta)}{\sin^3\theta} \tag{2.4}$$

Anlık temas açısına göre damlacık yüzey alanı değişimi eşitlik 2.5'ten;

$$A_s = \frac{2\pi R^2}{1+\cos\theta} \tag{2.5}$$

hesaplanmıştır [7].

Liu ve ark. [29] tarafından yapılan derleme çalışmasında, yarım küreler etrafındaki doğal taşınımlı ısı transferini hesaplamak için bir model çalışılmıştır. Bu derleme çalışmasına göre, Mathers ve ark. [30], çalışmalarında verilen Rayleigh sayısı aralıklarını dikkate alarak kendi çalışmalarında bu korelasyonları kullanmışlardır. Nusselt sayıları, Ra sayıları farklı aralıklar için eşitlik 2.6'den hesaplanabilir [31]. Kütle transfer katsayısı hesaplanırken difüzyonla kütle transferinin etkileri, taşınımla olan kütle transferinin yanında çok küçük kaldığından dolayı bu tez çalışmasında kütle transfer hızı hesaplanırken ihmal edilmiştir.

$$\begin{cases} \overline{Nu} = 2 + 0.282 \cdot Ra^{0.25}, & Ra \leq 10^2 \\ \overline{Nu} = 2 + 0.5 \cdot Ra^{0.25}, & 10^2 \leq Ra \leq 10^6 \end{cases} \tag{2.6}$$

Burada Ra sayısı;

$$Ra = \left(\frac{g \cdot (\rho_\infty - \rho_s) \cdot D^3}{\rho \cdot \vartheta^2} \right) \times Pr \tag{2.7}$$

"D" damlanın çapıdır. Isı transfer katsayısı eşitlik 2.8 ile hesaplanmıştır;

$$h_{\text{ısıl}} = \frac{\text{Nu} \cdot k}{D} \tag{2.8}$$

Damlacık etrafındaki doğal taşınım şekil 2.14'de gösterilmiştir.

Yarım küre şeklindeki damlacık için kütle transfer hızını hesaplamak amacıyla Chilton-Colburn benzeşimi [31] kullanılmıştır.

$$\frac{h_{\text{ısıl}}}{h_{\text{kütle}}} = \rho \cdot c_p \left(\frac{\text{Sc}}{\text{Pr}} \right)^{2/3} = \rho \cdot c_p \left(\frac{\alpha}{D_{AB}} \right) = \rho \cdot c_p \cdot \text{Le}^{2/3} \tag{2.9}$$

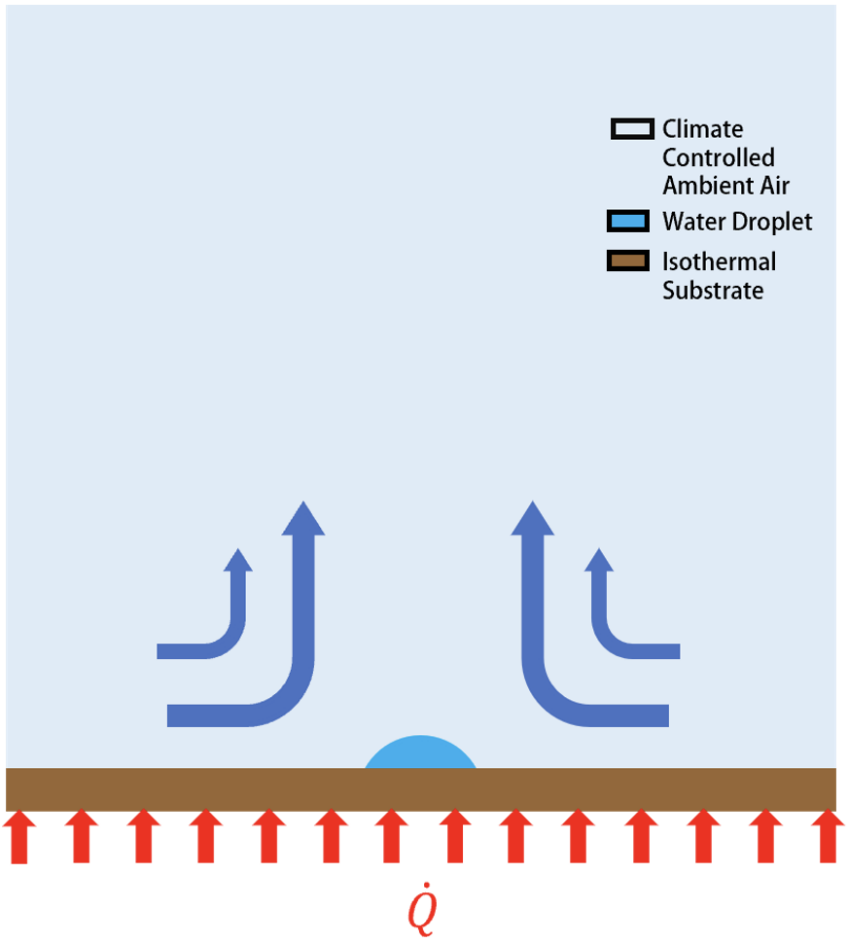
Burada D_{AB} kütle difüzyon katsayısı, α termal difüzyon katsayısı ve Le Lewis sayısıdır. Kütle transfer katsayısı hesaplandıktan sonra damlacıktan buharlaşma hızı eşitlik 2.10 ile hesaplanır.

$$\dot{m}_v = h_{\text{kütle}} \cdot A_s \cdot (\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}) \, [\text{kg/s}] \tag{2.10}$$

Burada A_s damlacık yüzey alanı, $\rho_{v,s}$ damlacık yakınındaki buhar yoğunluğu ve $\rho_{v,\infty}$ ortam havasının buhar yoğunluğudur.

Katı yüzey üzerine damlatılan damlacık kütlesi eşitlik 2.11 ile hesaplanır;

$$m_{\text{damla}} = V_{\text{damla}} \cdot \rho_{\text{su}} \tag{2.11}$$



Şekil 2.14 Damlacık buharlaşması

Eşitlik 2.10 ve eşitlik 2.11ile damlacığın buharlaşma süresi eşitlik 2.12 ile analitik olarak hesaplanabilir;

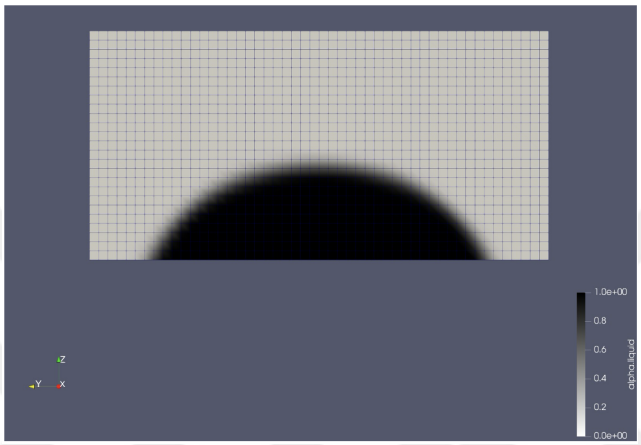
$$t_e = \dot{m}_v \cdot m_{\text{damla}} \,[\text{saniye}] \tag{2.12}$$

2.3 Sayısal Çalışma

Tez kapsamında yapılan sayısal çalışmalarda OpenFoam programı kullanılmıştır. Programda akışkan olarak; damlacık için su ve etrafındaki akış alanı için hava tanımlanmıştır. Taban sıcaklığı sabit yüzey sıcaklığı kabul edilip doğal taşınım ısı transfer mekanizması tanımlanmıştır. Şekil 2.15'te buharlaşacak olan damlacığın 3 boyutlu görseli ve fiziksel özellikleri görülmektedir. Şekil 2.16'da ise oluşturulan sayısal modelin çözüm alanları verilmiştir. Kütle transferi ve hacim oranı hesapları için "Euler" modeli "explicit" yöntemle kullanılmıştır. Akış alanında akış tipi laminar, alt tabaka sıcaklığı sabit 333 K olarak tanımlanmıştır. Çözücü açık kaynak kodlarına ve kullanılan sabitlere Ek-A'da detaylı bir şekilde yer verilmiştir.

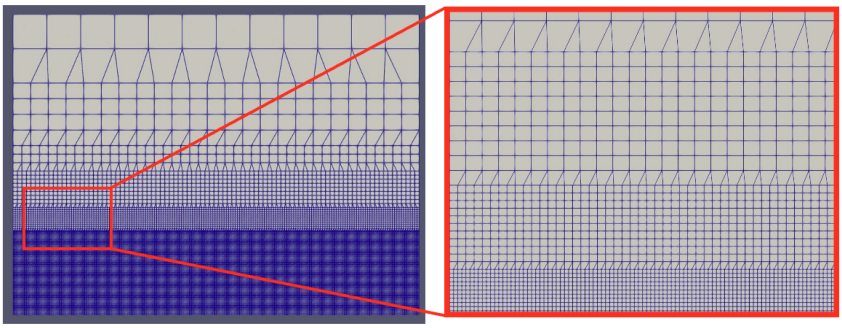


Şekil 2.15 Sayısal çalışma için oluşturulan damlacık geometrisi



Şekil 2.16 Sayısal çalışma hesaplama alanları

Şekil 2.17'da verilen akış alanı açık kaynaklı "Salome 9.10" programında oluşturulup görsel "Paraview 5" üzerinden alınmıştır. Damlacık geometrisi akış alanına analiz başlangıcında "patch-yama" yöntemi ile tanımlanmıştır. Çözüm ağında toplam 30564 eleman olup bunlardan 30214'ü hexahedral, 350'si prizmatik geometriye sahiptir. Ağ yapısının "skewness" değeri maksimum 0,33 ve ortalaması 3e10-5'dir.



Şekil 2.17 Sayısal çalışma için oluşturulan ağ yapısı

Sayısal çalışmada kütle transfer hızını hesaplamak için eşitlik 2.13 ve 2.14 kullanılmıştır;

$$R = \frac{2c}{2-c} \cdot \frac{h_e^2}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \frac{\rho_V}{T_{\text{sat}}^{1.5}} \tag{2.13}$$

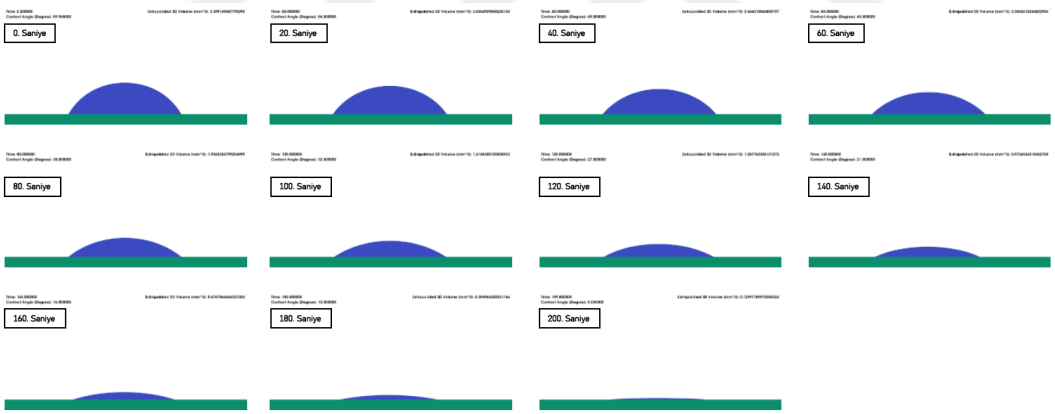
Burada;

R buharlaşma hesaplarında kullanılan bir katsayı olup birimi "kg/s^3K", ρ_V buharın yoğunluğu, r gaz sabiti, h_e buharlaşma entalpisi, c accommodation sabiti (bu değer 0 ile 1 arasında bir sabittir ve deney verisi ile korele edilmiştir) ve T_{sat} doyma sıcaklığını ifade etmektedir.

Daha sonra sayısal buharlaşma kütle transfer hızının belirlenmesi için eşitlik 2.14 kullanılmıştır.

$$\dot{m}_E = \frac{A \cdot R \cdot \Delta(T - T_{sat})}{h_{gizli}} \tag{2.14}$$

Şekil 2.18'de yatay katı yüzey üzerinde analiz sonuçlarına göre zamana bağlı olarak 60°C katı yüzey sıcaklığında 3 µL su damlacığının hacimsel değişimi verilmiştir. Tablo 2.10'da ise zamana göre yine bu şartlarda buharlaşan damlacığın temas açısı değişimi verilmiştir.

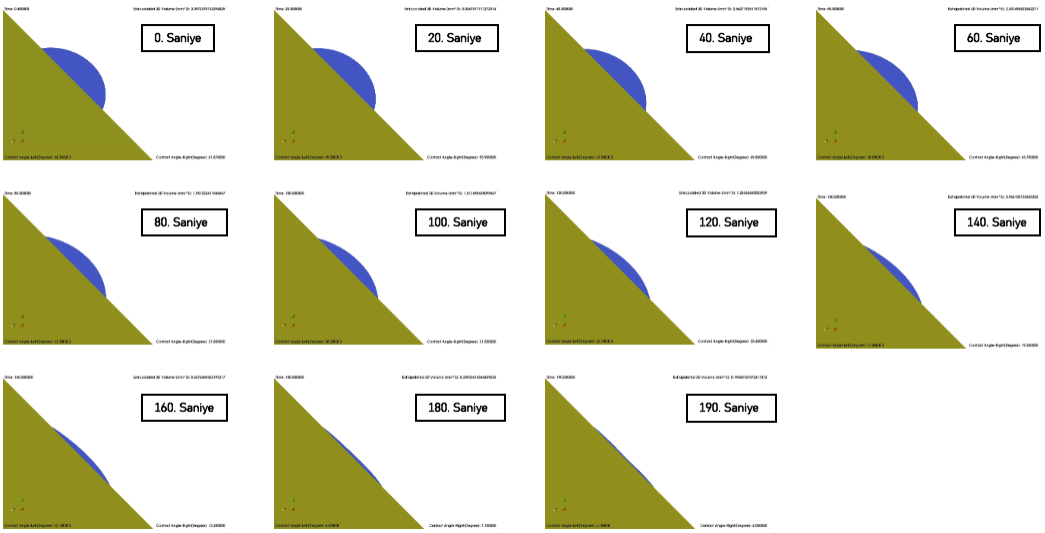


Şekil 2.18 Yatay yüzeyde 60°C sabit yüzey sıcaklığı için sayısal çalışma sonucuna göre 3 µL damlacığın zamana bağlı hacim değişimi

Tablo 2.10 Sayısal analiz sonuçlarına göre yatay katı yüzeyde zamana bağlı damlacığın sol ve sağ temas açıları

Zaman (Saniye)	Temas Açısı
0	60,00
20	54,50
40	49,00
60	43,50
80	38,00
100	32,50
120	27,00
140	21,50
160	16,00
180	10,50
200	5,05
210	0,00

Şekil 2.19'de görülen 45 derece eğimli katı yüzey üzerindeki analiz sonuçlarına göre zamana bağlı olarak 60°C katı yüzey sıcaklığında 3 µL su damlacığının hacimsel değişimi verilmiştir. Tablo 2.11'da ise zamana göre yine bu şartlarda buharlaşan damlacığın temas açısı değişimi görülmektedir.

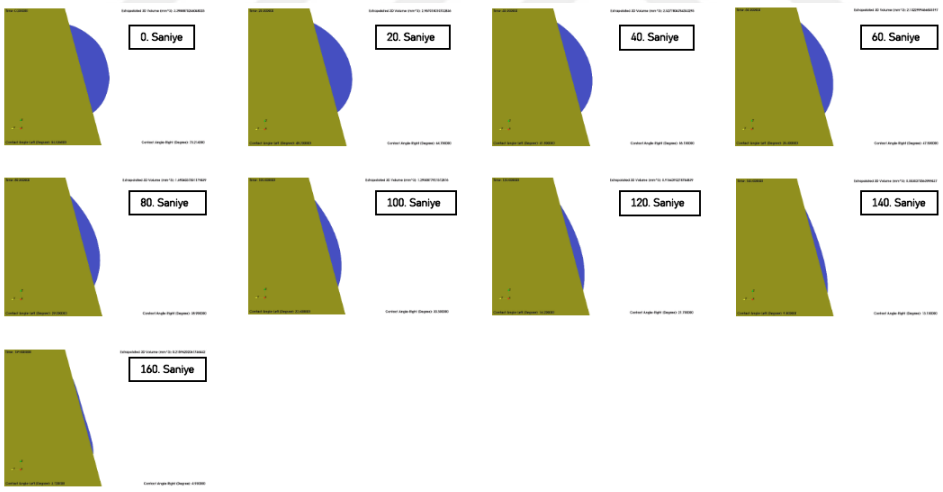


Şekil 2.19 45° eğimli yüzeyde 60°C sabit yüzey sıcaklığı için sayısal çalışma sonucuna göre 3 µL damlacığın zamana bağlı hacim değişimi

Tablo 2.11 Sayısal analiz sonuçlarına göre 45 derece eğimli katı yüzeyde zamana bağlı damlacığın sol ve sağ temas açıları

Zaman (Saniye)	Temas Açısı	
	Sol	Sağ
0	54,40	61,90
20	49,20	55,90
40	43,90	49,80
60	38,60	43,70
80	33,30	37,60
100	28,00	31,50
120	22,70	25,40
140	17,40	19,30
160	12,10	13,20
180	6,80	7,10
190	4,15	4,05
200	0,00	0,00

Şekil 2.20'de görülen 75 derece eğimli yatay katı yüzey üzerinde analiz sonuçlarına göre zamana bağlı olarak 60°C katı yüzey sıcaklığında 3 µL su damlacığının hacimsel değişimi verilmiştir. Tablo 2.12'da ise zamana göre yine bu şartlarda buharlaşan damlacığın temas açısı değişimi verilmiştir.

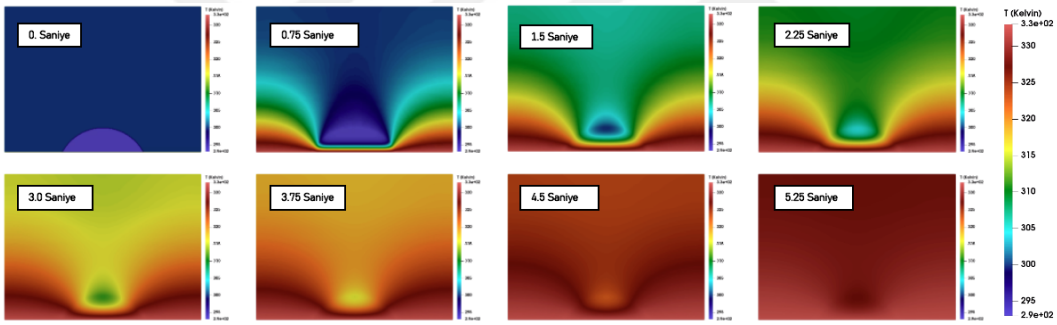


Şekil 2.20 75° eğimli yüzeyde 60°C sabit yüzey sıcaklığı için sayısal çalışma sonucuna göre 3 µL damlacığın zamana bağlı hacim değişimi

Tablo 2.12 Sayısal analiz sonuçlarına göre 75 derece eğimli katı yüzeyde zamana bağlı damlacığın sol ve sağ temas açıları

Zaman (Saniye)	Temas Açısı	
	Sol	Sağ
0	54,60	73,25
20	48,20	64,70
40	41,80	56,10
60	35,40	47,50
80	29,00	38,90
100	22,60	30,30
120	16,20	21,70
140	9,80	13,10
160	3,70	4,90
170	0,00	0,00

Şekil 2.21'de OpenFoam açık kaynaklı programında yapılan sayısal analizlerin ilk 5 saniyesi boyunca 333 K sabit katı yüzey sıcaklığı için çözüm alanının sıcaklık gradyeni değişimi verilmiştir.

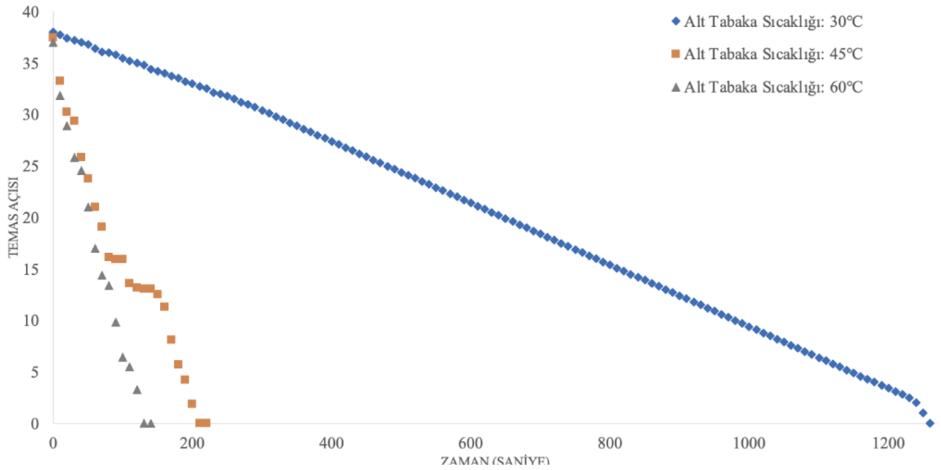


Şekil 2.21 İlk 5 saniye boyunca damlacık ve etrafındaki akış alnının sıcaklık gradyeni

3
BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Dinamik Temas Açısı ve Damlacık Davranışı

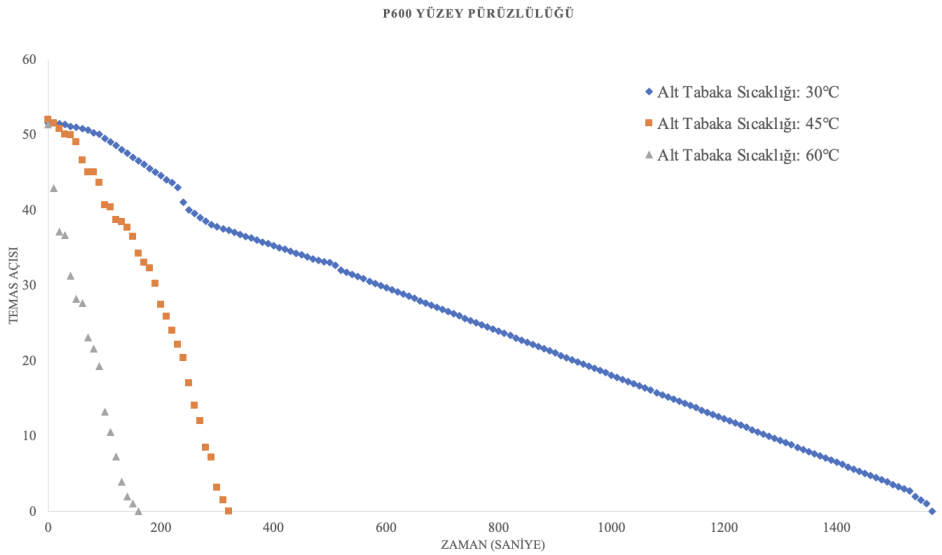
Şekil 3.1, 3.2, 3.3, cam katı yüzey malzemesinde 30, 45 ve 60 derecelerindeki üç farklı yüzey sıcaklığında ve P0, P600, P60 üç farklı yüzey pürüzlülük seviyesinde 3 µL su damlacıklarının buharlaşması sırasından zamana bağlı olarak temas açılarının değişimi (bir damlacığın buharlaşmasının başlangıcından tamamen kaybolana kadar geçen tüm zaman aralığı) göstermektedir. Yüzey sıcaklıklarındaki artışla damlacıkların buharlaşma sürelerinin önemli ölçüde azaldığı görülebilir.



Şekil 3.1 Yatay yüzeylerde zamana bağlı temas açısı değerleri (damla parametreleri: 3 µL hacim, 30 °C başlangıç damla sıcaklığı, P0 yüzey pürüzlülüğü)

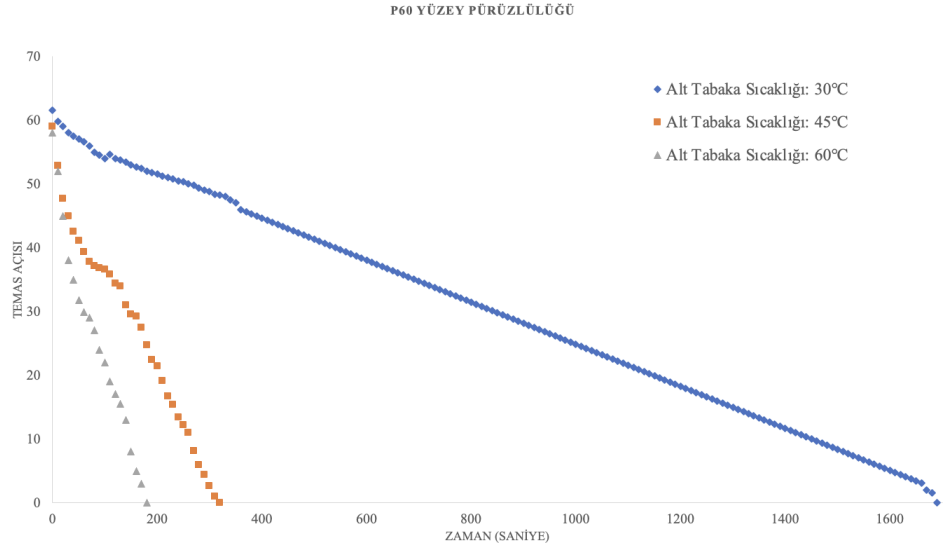
Katı yüzeyin eğim açısının artırılması, Şekil 2.6'da görülebileceği gibi damlacıkların buharlaşma süresini kısaltmıştır. Öte yandan, katı yüzeyin yüzey pürüzlülük seviyelerinin artırılması, katı yüzeyin daha çok hidrofilik bir yüzeye benzemesine neden olur ve bu da daha yüksek ilk temas açısı değerleri ve daha yüksek buharlaşma süreleri ile sonuçlandığı tespit edilmiştir. Tüm zamana bağlı veriler PCC yazılımından toplandı ve yüksek doğrulukla ölçmek için "IMAGE J" paket programının temas açısı eklentisiyle hesaplanmıştır. Görüntüler saniyede on kare ile kaydedilmiştir ve kamera yazılımını kalibre etmek için boyutları bilinen bir nesne damlacıkların yakınına yerleştirilmiştir.

Bu çalışmadaki buharlaşma sürelerinin literatürdeki deneysel çalışmalar göz



Şekil 3.2 Yatay yüzeylerde zamana bağlı temas açısı değerleri (damla parametreleri: 3 µL hacim, 30 °C başlangıç damla sıcaklığı, P600 yüzey pürüzlülüğü)

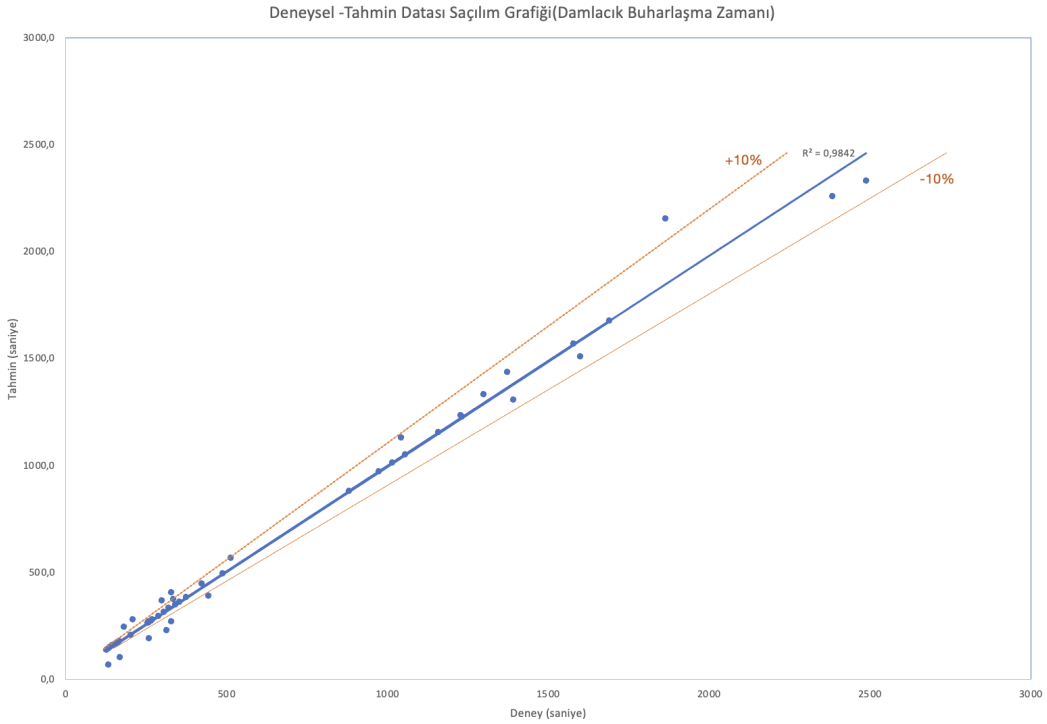
önüne alındığında yüksek bir aralık olan 135 ila 2490 saniye arasında değiştiği görülmüştür. Önceki literatür çalışmaları çoğunlukla ısıtılmamış katı yüzeyler için yüksek buharlaşma sürelerini veya ısıtılmış katı yüzeyler için kısa buharlaşma sürelerini araştırmıştır. Çalışmanın geniş bir yelpazede yapılmış olması, hem literatüre katkı sağlamasını hem de günlük yaşam ve endüstriyel ortamlarda geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmasını sağlayacaktır.



Şekil 3.3 Yatay yüzeylerde zamana bağlı temas açısı değerleri (damla parametreleri: 3 µL hacim, 30 °C başlangıç damla sıcaklığı, P60 yüzey pürüzlülüğü)

3.2 Damlacıkların Buharlaşma Zamanının Doğrulanması

Şekil 3.4'te yapılan deneysel ve Anova analizinden elde edilen sonuçların yüzde ±10 ile yakınsadığını gösteren saçılım grafiğine yer verilmiştir. Tablo 3.1 ve 3.2'de 5 parametreli Anova analizinin istatistiksel sonuçları ve R^2 yakınsama değerleri gözükmektedir. Tablo 3.3 ve 3.4'de ise 6 parametreli Anova analizinin istatistiksel sonuçları ve R^2 yakınsama değerleri gözükmektedir.



Şekil 3.4 Deneysel ve tahmin buharlaşma zamanlarının saçılım grafiği

Tablo 3.1 5 Parametreli Anova analizi sonuçları

Source	**DF**	**Seq SS**	**Adj SS**	**Adj MS**	**F**	**P**
Yüzey Sıc,	2	1468,72	1468,72	734,360	3071,89	0,000
Yüzey Pürüz	2	45,49	45,49	22,746	95,15	0,000
Damla Başlangıç Sıc,	2	10,58	10,58	5,290	22,13	0,000
Damla Hacmi	2	47,42	47,42	23,711	99,18	0,000
Yüzey Açısı	2	14,95	14,95	7,477	31,28	0,000
Hata	16	3,82	3,82	0,239		
Toplam	26	1590,99				

Tablo 3.2 5 Parametreli Anova analizi R^2 değerleri

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
112,914	98,42%	97,44%	95,51%

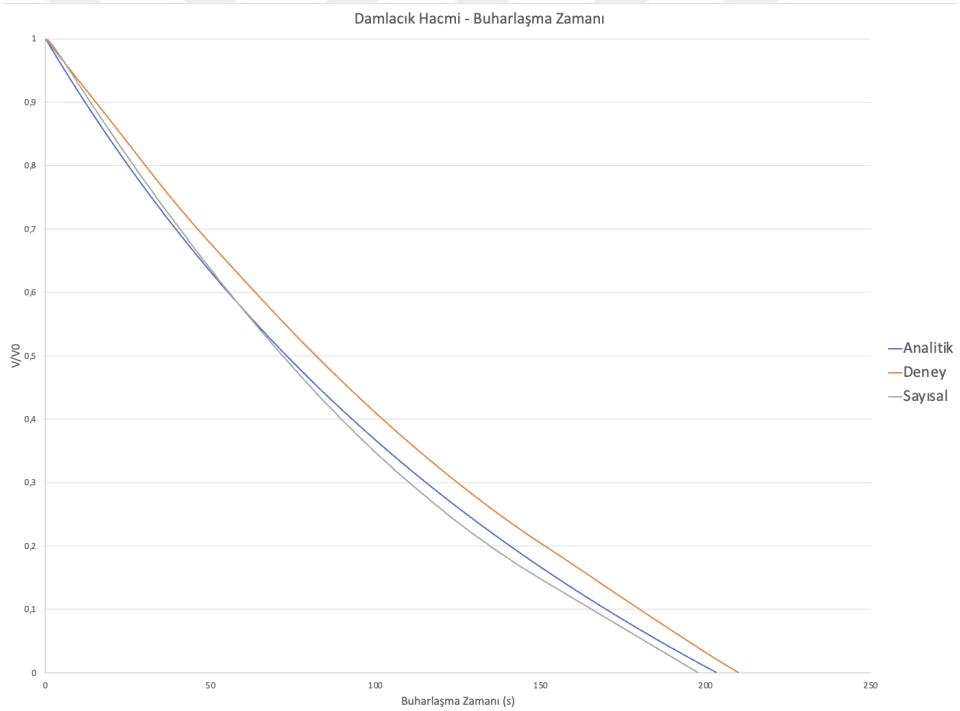
Örnek olarak şekil 3.5'te cam katı yüzey üzerindeki damlacık buharlaşması için aynı şartlarda gerçekleştirilen analitik, deneysel ve sayısal sonuçların zamana göre damlacık hacminin değişimi verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere yapılan deneysel çalışmalar analitik ve sayısal sonuçları doğrulamıştır.

Tablo 3.3 6 Parametreli Anova analizi sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Yüzey Sıc,	2	11037700	5518850	65,89	0,000
Yüzey Pürüz	2	230273	115137	1,37	0,285
Damla Başlangıç Sıc,	2	340499	170250	2,03	0,168
Damla Hacmi	2	951493	475747	5,68	0,0016
Yüzey Açısı	2	705853	352926	4,21	0,0037
Malzeme	2	1416013	708007	8,45	0,004
Hata	14	1172676	83763		
Toplam	26	15854508			

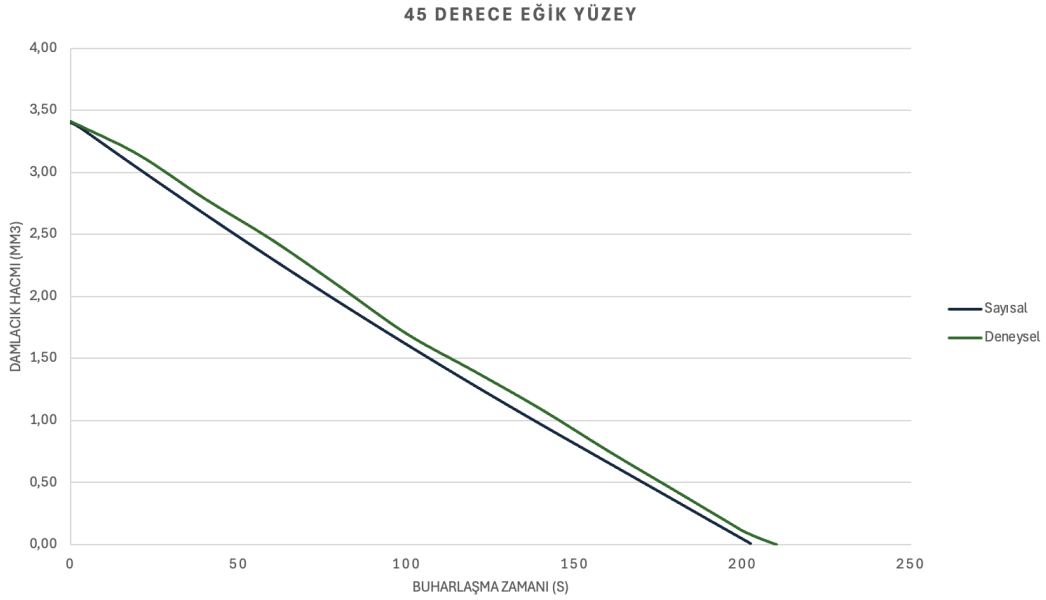
Tablo 3.4 6 Parametreli Anova analizi R^2 değerleri

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
289,418	92,60%	86,26%	72,50%

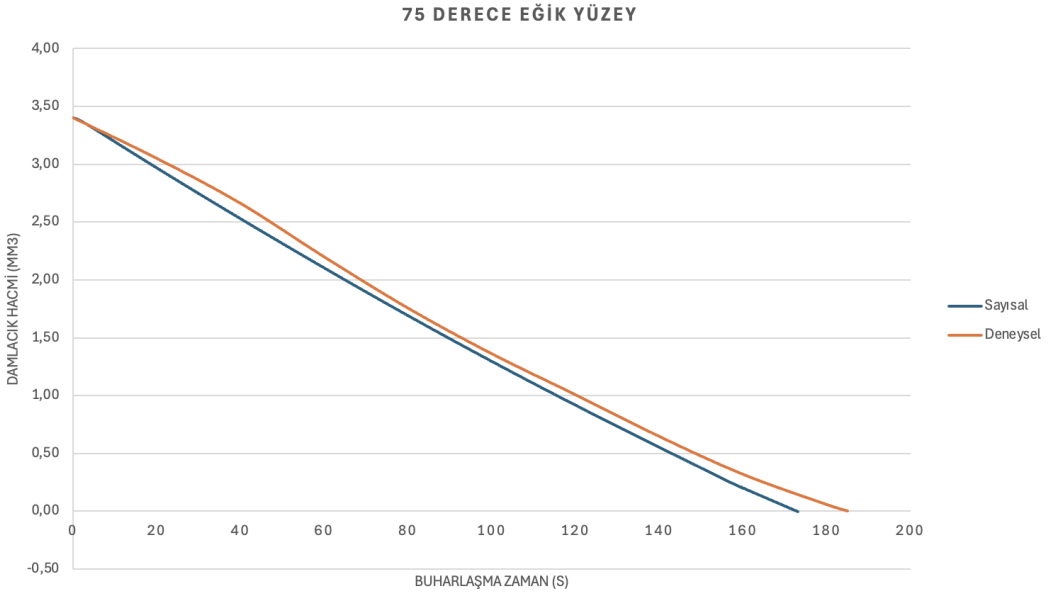


Şekil 3.5 Yatay cam katı yüzeyde; 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC taban sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı için analitik, deneysel ve sayısal sonuçlar

Şekil 3.6 ve 3.7'de sırasıyla 45º ve 75º eğik katı yüzeyler üzerindeki 3 µL, 60ºC sabit taban sıcaklığındaki damlacık için zamana bağlı hacim değişimi verilmiştir.

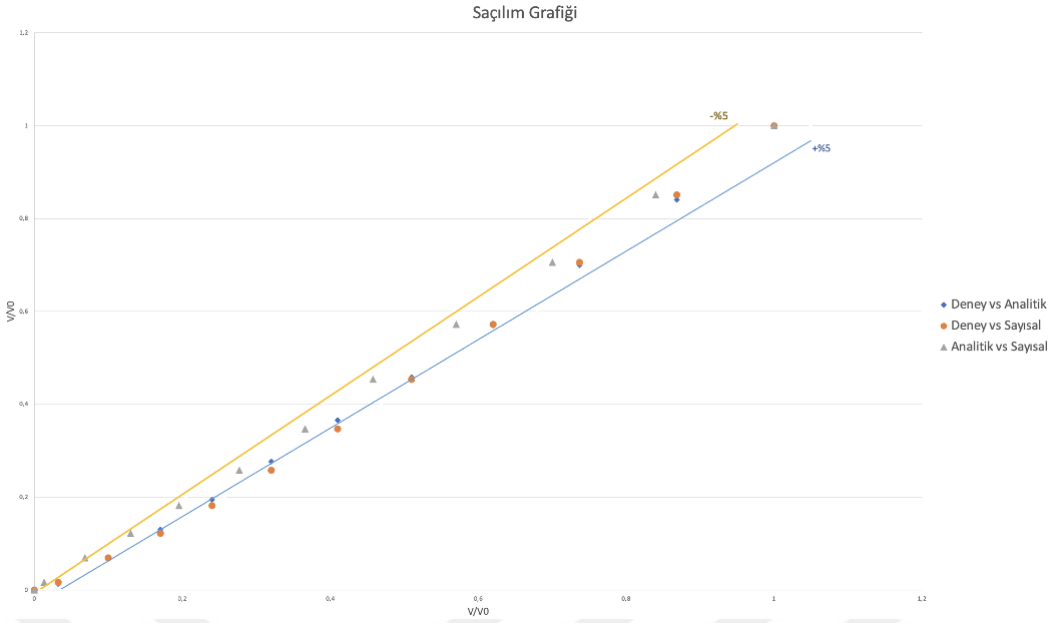


Şekil 3.6 45º eğik katı yüzeyde; 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC taban sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı için deneysel ve sayısal zamana bağlı hacim değişimi



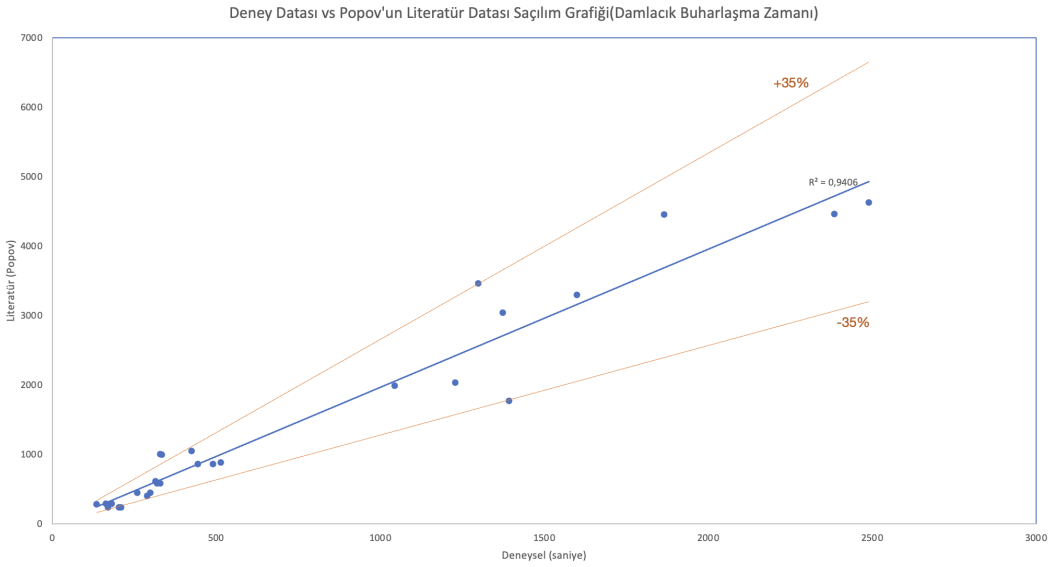
Şekil 3.7 75º eğik katı yüzeyde; 3 µL damlacık hacmi, P600 yüzey pürüzlülüğü, 60ºC taban sıcaklığı ve 30ºC damlacık başlangıç sıcaklığı için deneysel ve sayısal zamana bağlı hacim değişimi

Şekil 3.8'de de analitik, sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının ±5% aralığında olduğunu gösteren saçılım grafiğine yer verilmiştir.



Şekil 3.8 Deneysel, analitik ve sayısal sonuçlar için saçılım grafiği

Son olarak yapılan deneysel çalışmaları literatür ile karşılaştırdığımız sonuçlara şekil 3.9'daki saçılım grafiğinde yer verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere deneysel çalışmaları karşılaştırmak için literatürde kabul görmüş Popov'un [7] çalışması referans alınmıştır ve sonuçlar birbirine ±35% oranında yakınsamıştır.



Şekil 3.9 Deneysel sonuçların literatür (Popov) ile doğrulanması

4
SONUÇ

Bu tez kapsamında, su damlacıklarının buharlaşma süreçleri, katı yüzey malzeme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, başlangıç damlacık sıcaklığı, damlacık hacmi ve yüzey eğim açısı olmak üzere altı farklı parametre açısından, üç farklı malzeme üzerinde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatürde sınırlı sayıda çalışılmış olan yüzey eğim açısının bu parametreler üzerindeki etkilerinin sistematik olarak analiz edilmesi bu çalışmanın temel amaçlarından biridir. Tez çalışması, deneysel, sayısal ve analitik olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda ölçüm ve analiz hassasiyetini artırmak amacıyla Taguchi ve ANOVA yöntemleri kullanılarak istatistiksel deneysel optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde ise OpenFOAM açık kaynaklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, deneysel, sayısal ve analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen bulgular:

- İstatistiksel optimizasyon yöntemleri sonucunda elde edilen veriler, buharlaşma süresi üzerindeki etkilerine göre en fazla etkili parametreden en az etkili parametreye doğru sıralanmıştır. Bu parametreler sırasıyla; katı yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, damlacık hacmi, katı yüzey malzemesi, yüzey eğim açısı ve damlacıkların başlangıç sıcaklığıdır.
- Her bir parametrenin buharlaşma süresi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelendiğinde,
  - Damlacık başlangıç sıcaklığının, katı yüzey sıcaklığının ve yüzey eğim açısının artışı, buharlaşma süresinin azalmasına neden olmaktadır.
  - Buna karşın, yüzey üzerine bırakılan damlacık hacminin ve yüzey pürüzlülüğünün artışı, buharlaşma süresini uzatmaktadır.
  - Yüzey eğim açısının buharlaşma süresi üzerindeki etkisi, yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve damlacık hacmi gibi diğer parametrelerden daha düşük olmasına rağmen, buharlaşma süresi açısından ihmal edilemeyecek bir öneme sahiptir.
- Damlacık buharlaşması ile ilgili literatür araştırmasında eğimli yüzeyler üzerindeki damlacık buharlaşması konusundaki çalışmaların sınırlı olduğu tespit edilmiş olup bu tez çalışması, bu alandaki boşluğu doldurmayı

amaçlayarak, 3 farklı malzeme için çok parametreli ANOVA analizine dayalı bir regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu model ile geniş bir aralık için yaklaşık %5 hata ile tahminleme yapılabilmektedir.

Sonuç olarak, yapılan tez çalışması ile farklı katı yüzey malzemeleri (cam, plastik ve alüminyum) üzerinde eğim açısı da dahil olmak üzere geniş parametre aralığında detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, eğimli yüzeyler için literatürde yer almayan yeni bir korelasyon geliştirilmiş ve damlacık buharlaşma süresi, katı yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, damlacık hacmi, yüzey eğim açısı, malzeme cinsi ve damlacık başlangıç sıcaklığı olmak üzere altı farklı parametrenin etkisi dikkate alınarak modellenmiştir. Geliştirilen regresyon modeli, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında yüksek doğruluk ve güvenilirlik sergilemiştir. Bunun yanında tez çalışması kapsamında damlacık buharlaşması süresinin belirlenmesine yönelik sayısal ve analitik çalışmalar zamana bağlı olarak yapılmış olup literatürdeki çalışmalar ile yaklaşık %10 bandında yakınsamıştır. Literatürdeki sayısal damlacık buharlaşması çalışmalarının büyük bir kısmı, genellikle yatay yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında ise farklı eğim açılarında (0°, 45° ve 75°) zamana bağlı damlacık buharlaşma süreçleri detaylı bir şekilde modellenmiş ve analiz edilmiştir.

Gelecekte mevcut çalışmada kullanılan üç malzeme dışında, hidrofobik, süperhidrofobik ve hidrofobik kaplamalı yüzeyler gibi farklı malzeme türlerinin buharlaşma süreçlerine etkileri analiz edilebilir. Yüzey sıcaklığı, pürüzlülük ve eğim açısının buharlaşma süresi üzerindeki etkileri göz önüne alınarak, termal radyasyon veya hava akımı gibi diğer kurutma yöntemleri ile hibrit sistemler geliştirilebilir. Daha geniş veri setleri kullanılarak yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri ile buharlaşma süresinin tahminine yönelik daha hassas modeller geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

[1] T. Young, "An essay on the cohesion of fluids," *Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, The Royal Society London, 1832, ss. 171–172.

[2] H. Y. Erbil, "Determination of the peripheral contact angle of sessile drops on solids from the rate of drop evaporation," *The Journal of Physical Chemistry B*, c. 102, no. 46, ss. 9234–9238, 1998.

[3] R. Picknett R. Bexon, "The evaporation of sessile or pendant drops in still air," *Journal of colloid and Interface Science*, c. 61, no. 2, ss. 336–350, 1977.

[4] K. Birdi D. Vu, "Wettability and the evaporation rates of fluids from solid surfaces," *Journal of adhesion science and technology*, c. 7, no. 6, ss. 485–493, 1993.

[5] M. Shanahan C. Bourges, "Effects of evaporation on contact angles on polymer surfaces," *International journal of adhesion and adhesives*, c. 14, no. 3, ss. 201–205, 1994.

[6] E. F. Crafton W. Black, "Heat transfer and evaporation rates of small liquid droplets on heated horizontal surfaces," *International journal of heat and mass transfer*, c. 47, no. 6-7, ss. 1187–1200, 2004.

[7] Y. O. Popov, "Evaporative deposition patterns: spatial dimensions of the deposit," *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, c. 71, no. 3, s. 036 313, 2005.

[8] L. Suárez-Navaz, R. Maciá Pareja Á. Moreno García, "Las luchas de los sin papeles y la extensión de la ciudadanía," *Madrid: Traficantes de Sueños*, 2007.

[9] P. Kelly-Zion, C. Pursell, S. Vaidya J. Batra, "Evaporation of sessile drops under combined diffusion and natural convection," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, c. 381, no. 1-3, ss. 31–36, 2011.

[10] H. Y. Erbil, "Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: A review," *Advances in colloid and interface science*, c. 170, no. 1-2, ss. 67–86, 2012.

[11] M. A. Saada, S. Chikh L. Tadrist, "Evaporation of a sessile drop with pinned or receding contact line on a substrate with different thermophysical properties," *International journal of heat and mass transfer*, c. 58, no. 1-2, ss. 197–208, 2013.

[12] M. C. Lopes, E. Bonaccurso, T. Gambaryan-Roisman P. Stephan, “Influence of the substrate thermal properties on sessile droplet evaporation: Effect of transient heat transport,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, c. 432, ss. 64–70, 2013.

[13] J. M. Stauber, S. K. Wilson, B. R. Duffy K. Sefiane, “On the lifetimes of evaporating droplets,” *Journal of Fluid Mechanics*, c. 744, R2, 2014.

[14] A.-L. Ljung T. Staffan Lundström, “Evaporation of a sessile water droplet subjected to forced convection in humid environment,” *Drying Technology*, c. 37, no. 1, ss. 129–138, 2019.

[15] M. Gao, P. Kong, L.-X. Zhang J.-N. Liu, “An experimental investigation of sessile droplets evaporation on hydrophilic and hydrophobic heating surface with constant heat flux,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, c. 88, ss. 262–268, 2017.

[16] M. Gao, P. Kong L.-x. Zhang, “Evaporation dynamics of different sizes sessile droplets on hydrophilic and hydrophobic heating surface under constant wall heat fluxes conditions,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, c. 93, ss. 93–99, 2018.

[17] M. Kumar R. Bhardwaj, “A combined computational and experimental investigation on evaporation of a sessile water droplet on a heated hydrophilic substrate,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, c. 122, ss. 1223–1238, 2018.

[18] P. Gurrala, P. Katre, S. Balusamy, S. Banerjee K. C. Sahu, “Evaporation of ethanol-water sessile droplet of different compositions at an elevated substrate temperature,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, c. 145, s. 118 770, 2019.

[19] F. Zhao, Q. Liu, C. Zhao H. Bo, “Influence region theory of the evaporating droplet,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, c. 129, ss. 827–841, 2019.

[20] L. Wang, Z. Liu, X. Wang Y. Yan, “Investigation on the droplet evaporation process on local heated substrates with different wettability,” *Heat and Mass Transfer*, ss. 1–13, 2020.

[21] P. Katre, P. Gurrala, S. Balusamy, S. Banerjee K. C. Sahu, “Evaporation of sessile ethanol-water droplets on a critically inclined heated surface,” *International Journal of Multiphase Flow*, c. 131, s. 103 368, 2020.

[22] E. C. Tredenick, W. A. Forster, R. Pethiyagoda, R. M. van Leeuwen S. W. McCue, “Evaporating droplets on inclined plant leaves and synthetic surfaces: Experiments and mathematical models,” *Journal of Colloid and Interface Science*, c. 592, ss. 329–341, 2021.

[23] Z. Pan Y. Wang, “Evaporation of a small water droplet sessile on inclined surfaces,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, c. 184, s. 122 330, 2022.

[24] R. J. Moffat, “Describing the uncertainties in experimental results,” *Experimental thermal and fluid science*, c. 1, no. 1, ss. 3–17, 1988.

[25] A. N. Mustapha, Y. Zhang, Z. Zhang, Y. Ding, Q. Yuan Y. Li, "Taguchi and ANOVA analysis for the optimization of the microencapsulation of a volatile phase change material," *journal of materials research and technology*, c. 11, ss. 667–680, 2021.

[26] W.-H. Chen, C.-J. Chen C.-I. Hung, "Taguchi approach for co-gasification optimization of torrefied biomass and coal," *Bioresource technology*, c. 144, ss. 615–622, 2013.

[27] H. Kır S. Apay, "Elektrolitik yöntemle sert krom kaplanan yapı çeliğinde kaplama parametrelerinin taguchi metodu ile optimizasyonu," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 10, no. 1, ss. 7–14, 2020.

[28] H. Serencam M. Uçurum, "Taguchi Deney Tasarimi Kullanilarak Uçucu Kül İle Ni (II) Gideriminde Bazi Adsorpsiyon Parametrelerinin Etkinliğinin İrdelenmesi," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 8, no. 1, ss. 336–344, 2019.

[29] J. Liu, C.-J. Zhao, H. Liu W.-Q. Lu, "Numerical study of laminar natural convection heat transfer from a hemisphere with adiabatic plane and isothermal hemispherical surface," *International Journal of Thermal Sciences*, c. 131, ss. 132–143, 2018.

[30] W. Mathers, A. Madden E. L. Piret, "Simultaneous heat and mass transfer in free convection," *Industrial & Engineering Chemistry*, c. 49, no. 6, ss. 961–968, 1957.

[31] Y. Çengel, *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach* (Heat and mass transfer: a practical approach). McGraw-Hill, 2007.

A
OPENFOAM ANALİZİ KAYNAK KODLARI

A.1 Başlangıç Sınır Koşulları

• Alpha.liquid:

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
| \\      /  F ield               | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration           | Version:  2312
|   \\  /    A nd                 | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation        |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       volScalarField;
    location    "0";
    object      alpha.liquid;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   nonuniform List<scalar>
30564
(
boundaryField
{
    bottom1
    {
        type            timeVaryingAlphaContactAngle;
        t0              0;
        thetaT0         72;
        te              180;
        thetaTe         0;
        limit           gradient;
```

```
        value           nonuniform List<scalar>
181
    }
    bottom2
    {
        type            timeVaryingAlphaContactAngle;
        t0              0;
        thetaT0         53;
        te              180;
        thetaTe         0;
        limit           gradient;
        value           nonuniform List<scalar>
181
    }
    left
    {
        type            zeroGradient;
    }
    right
    {
        type            zeroGradient;
    }
    top
    {
        type            zeroGradient;
    }
    defaultFaces
    {
        type            empty;
    }
}
```

- **P:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       volScalarField;
```

```
    location    "0";
    object      p;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 100000;

boundaryField
{
    bottom1
    {
        type            zeroGradient;
    }
    bottom2
    {
        type            zeroGradient;
    }
    left
    {
        type            zeroGradient;
    }
    right
    {
        type            zeroGradient;
    }
    top
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 100000;
    }
    defaultFaces
    {
        type            empty;
    }
}
```

- $\mathbf{P}_{rgh}$:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
```

```
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       volScalarField;
    location    "0";
    object      p_rgh;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 100000;

boundaryField
{
    bottom1
    {
        type            fixedFluxPressure;
        gradient        uniform 0;
        value           uniform 100000;
    }
    bottom2
    {
        type            fixedFluxPressure;
        gradient        uniform 0;
        value           uniform 100000;
    }
    left
    {
        type            fixedFluxPressure;
        gradient        uniform 0;
        value           uniform 100000;
    }
    right
    {
        type            fixedFluxPressure;
        gradient        uniform 0;
        value           uniform 100000;
    }
    top
    {
        type            totalPressure;
        rho             rho;
        psi             none;
        gamma           1;
        p0              uniform 100000;
```

```
        value           uniform 100000;
    }
    defaultFaces
    {
        type            empty;
    }
}
```

- **T:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       volScalarField;
    location    "0";
    object      T;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];

internalField   nonuniform List<scalar>

boundaryField
{
    bottom1
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 333;
    }
    bottom2
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 333;
    }
    left
    {
        type            zeroGradient;
```

```
    }
    right
    {
        type            zeroGradient;
    }
    top
    {
        type            zeroGradient;
    }
    defaultFaces
    {
        type            empty;
    }
}
```

- **U:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       volScalarField;
    location    "0";
    object      U;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    bottom1
    {
        type            noSlip;
    }
    bottom2
    {
```

```
        type            noSlip;
    }
    left
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      uniform (0 0 0);
        value           uniform (0 0 0);
    }
    right
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      uniform (0 0 0);
        value           uniform (0 0 0);
    }
    top
    {
        type            pressureInletOutletVelocity;
        value           uniform (0 0 0);
    }
    defaultFaces
    {
        type            empty;
    }
}
```

A.2 Mesh

• Boundry:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       polyBoundaryMesh;
    location    "constant/polyMesh";
    object      boundary;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
```

```
6
(
    bottom1
    {
        type            wall;
        inGroups        1(wall);
        nFaces          181;
        startFace       60662;
    }
    bottom2
    {
        type            wall;
        inGroups        1(wall);
        nFaces          181;
        startFace       60843;
    }
    left
    {
        type            patch;
        nFaces          104;
        startFace       61024;
    }
    right
    {
        type            patch;
        nFaces          104;
        startFace       61128;
    }
    top
    {
        type            patch;
        nFaces          12;
        startFace       61232;
    }
    defaultFaces
    {
        type            empty;
        inGroups        1(empty);
        nFaces          61128;
        startFace       61244;
    }
)
```

- **cellZones:**

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
```

```
| \\      /  F ield          | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration      | Version:  2312
|   \\  /    A nd           | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation  |
\*---------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       regIOobject;
    location    "constant/polyMesh";
    object      cellZones;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

0()
```

- **faceZones:**

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
| \\      /  F ield          | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration      | Version:  2312
|   \\  /    A nd           | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation  |
\*---------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      binary;
    arch        "LSB;label=32;scalar=64";
    class       regIOobject;
    location    "constant/polyMesh";
    object      faceZones;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

0()
```

A.3 Sabitler

• g (Gravity):

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
| \\      /  F ield               | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration           | Version:  2312
|   \\  /    A nd                 | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation        |
\*-----------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       uniformDimensionedVectorField;
    object      g;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //

dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];
value           (0 0 -9.81);

// ************************************ //
```

• Faz Değişim Özellikleri:

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
| \\      /  F ield               | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration           | Version:  2312
|   \\  /    A nd                 | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation        |
\*-----------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      phaseChangeProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //

phaseChangeTwoPhaseModel interfaceHeatResistance;

R 0.11505;
spread 3;

// ************************************ //
```

• **Termofiziksel Özellikler:**

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
| \\      /  F ield               | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration           | Version:  2312
|   \\  /    A nd                 | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation        |
\*-------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      thermophysicalProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //

TSat            273;   // saturation temperature

// ********************************* //
```

• **Transport Özellikleri:**

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
| \\      /  F ield               | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration           | Version:  2312
|   \\  /    A nd                 | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation        |
\*-------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      transportProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //

phases          (liquid vapour); // FC-72

sigma           0.07;

liquid
{
    transportModel  Newtonian;
```

```
    nu              2.5e-3;
    rho             1000;

    Cp              4216;
    Cv              4216;    // assume Cp for liquid
    kappa           0.6;
    hf              0;
}

vapour
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              2.5e-2;
    rho             0.8;

    Cp              2030;       // FC72 vapour
    Cv              2000;       // Cv = Cp - R/w
    kappa           0.02;        // FC72 vapour
    hf              2.45e6;
}

Prt             6.7;

// ************************************ //
```

• **Türbülans Özellikler:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      turbulenceProperties.air;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //

simulationType      laminar;

// ************************************ //
```

A.4 Sistem

• controlDict:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      controlDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //

application     interCondensatingEvaporatingFoam;

startFrom       latestTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         180;

deltaT          1e-6;

writeControl    adjustable;

writeInterval   0.2;

purgeWrite      0;

writeFormat     binary;

writePrecision  7;

writeCompression off;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable yes;
```

```
adjustTimeStep   yes;

maxCo            0.1;

maxAlphaCo       0.1;

maxDeltaT        1;

// ************************************ //
```

• **decomposeParDict:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      decomposeParDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //

numberOfSubdomains  4;

method  scotch;

// ************************************ //
```

• **fieldMinMax:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
Description
    Calculates the mimima and maxima of fields
```

```
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //
type            fieldMinMax;
libs            (fieldFunctionObjects);
fields          (".*");
executeControl  writeTime;
writeControl writeTime;

// ************************************ //
```

- **fvSchemes:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      fvSchemes;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //
ddtSchemes
{
    default         Euler;
}

gradSchemes
{
    default         cellLimited Gauss linear 0.01 ;
 grad(U) cellLimited Gauss linear 1;
}

divSchemes
{
    default Gauss upwind;

    div(rhoPhi,U)          Gauss upwind;
    div(rhoCpPhi,T)          Gauss limitedLinear 0.5;
    div(phi,alpha)          Gauss  vanLeer;
    div(phirb,alpha)          Gauss vanLeer;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
    div((muEff*dev(T(grad(U))))    Gauss linear;
```

```
    div((interpolate(cp)*rhoPhi),T)
Gauss limitedLinear 0.99;
}

laplacianSchemes
{
    default         Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default         linear;
}

snGradSchemes
{
    default         corrected;
}

// ************************************ //
```

• **fvSolution:**

```
/*---------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                       |
| \\      /  F ield               | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration           | Version:  2312
|   \\  /    A nd                 | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation        |
\*-----------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      fvSolution;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //
solvers
{

 ".*(mDotSmear|mDotSmearFinal)"
    {
        solver          PCG;
        tolerance       1e-7;
        preconditioner  DIC;
```

```
        relTol          0.00;
       //smoother       DIC;
    }


    ".*(rho|rhoFinal)"
    {
        solver          PBiCGStab;
    }

    "alpha.liquid.*"
    {
        cAlpha          20;
        nAlphaCorr      1;
        nAlphaSubCycles 3;
        nLimiterIter 5;
        MULESCorr       yes;
        solver          PBiCGStab;
        preconditioner  DILU;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0;
}

    "U.*"
    {
        solver          PBiCGStab;
        preconditioner  DILU;
        tolerance       1e-7;
        relTol          0;
         minIter 1;
        maxIter 150;
};

    p_rgh
    {
      solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-7;
        relTol          0;
        minIter 1;
        maxIter 300;
};
     p_rghFinal
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-07;
        relTol          0;
```

```
        minIter 1;
        maxIter 300;
};

    "pcorr.*"
    {
        $p_rgh;
        relTol          0;
    };

    "T.*"
    {
        solver          PBiCGStab;
        preconditioner  DILU;
        tolerance       1e-07;
        relTol          0;
    }

    "Theta.*"
    {
        solver          PBiCGStab;
        preconditioner  DILU;
        tolerance       1e-7;
        relTol          0;

}
}
PIMPLE
{
    momentumPredictor   no;
    nOuterCcorrectors   1;
    nCorrectors         3;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}
// ************************************ //
```

- **setFieldsDict:**

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------*\
| =========                      |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: Open Source CFD
|  \\    /   O peration          | Version:  2312
|   \\  /    A nd                | Website:  openfoam.com
|    \\/     M anipulation       |
\*---------------------------------------------------*/
FoamFile
{
```

```
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      setFieldsDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *  //
defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.liquid 0

);

regions
(
   sphereToCell
    {
        source      sphereToCell;
    origin      (0 0 -0.00079);
    radius      0.001677;
        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.liquid 1
            volScalarFieldValue T 293
        );
    }
      /*zone droplet;
        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.liquid 1

        );
*/

);
// ************************************** //
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. A.Yıldırım, Ö. Ağra, M.K.Sevindir, "Experimental Investigation of the Water Droplet Evaporation on Inclined Surfaces by Taguchi and ANOVA Optimization Analysis," J. Thermal Sci. Eng. Appl., 16(1): 011003, 2024.

Konferans Bildirisi

1. A.Yıldırım, Ö. Ağra, M.K. Sevindir, "Experimental Study Of Water Droplet Evaporation On Inclined Surfaces And Contact Angle Determination," 12. International Summit Scientific Research Congress, 29 Mayıs 2024, Gaziantep, Türkiye.

Proje

1. Ö. Ağra, M.K. Sevindir, A.Yıldırım, "Ev Tipi Bulaşık Makinesinde Kurutma Prosesinin İyileştirilmesi," Genel Araştırma Projesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, 2021-2024.