

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVI MERMER DAMLASI SENTEZİ VE**  
**UYGULAMALARI**

**MERVE DANDAN**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANA BİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2008**

T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVI MERMER DAMLASI SENTEZİ VE  
UYGULAMALARI

MERVE DANDAN  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
Prof. Dr. H.Yıldırım ERBİL

GEBZE  
2008

|                                                                                                                             |                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <br>GEBZE YÜKSEK<br>TEKNOLOJİ<br>ENSTİTÜSÜ | MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ<br>JÜRİ ONAY FORMU |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|

### JÜRİ

ÜYE ( BAŞKAN) : Prof. Dr. H. Yıldırım Erbil

ÜYE : Prof. Dr. Mahmut Bayramoğlu

ÜYE : Prof. Dr. Oğuz Okay

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 10/01/2003 tarih ve 2003/2... sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen ...../...../..... tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans / Doktora öğrencisi .....Merve Dandan.....'ın çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu ...../...../..... tarih ve ....../...../..... sayılı kararıyla .....Kimya Mühendisliği.....Anabilim Dalında Yüksek Lisans / ~~Doktora~~ tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

**TEZ BAŞLIĞI:** Sıvı Mermer Damlası Sentezi ve Uygulamaları

**YAZAR ADI:** Merve DANDAN

Bir sıvı damlasının buharlaşması doğadaki temel olaydan biridir. Önemli bir rolü olduğu için sis ve bulut oluşumu, püskürtmeli benzin motorları, püskürtmeli yazıcılar, tarımsal ilaçlama gibi birçok karmaşık sistemlerde son birkaç yüzyıldır araştırmacıların ilgi odağı olan bir konu olmuştur.

Sıvı mermer damlası etrafı hidrofobik bir toz ile kaplanarak ıslatmayan yapılan su ve diğer sıvı damlalarıdır. Katı yüzeyler üzerinde katıyı ıslatmadan ve arkalarında kalıntı bırakmadan hızlıca taşınabilirler. Üzerlerinde bulundukları katı yüzey (substrat) ile temasın bulunmayışı kirlilik problemlerini önler ve yüksek yer değiştirme hızı oluşturur. Ayrıca, bir sıvı mermer damlasının hareketi için gerekli kuvvet oldukça küçüktür.

Sıvı mermer damlasının ömrü kullanılan hidrofobik toz ve sıvıya bağlıdır. Eğer kullanılan sıvı çok uçucu yani buharlaşması kolay olan bir sıvı ise zamanla sıvı buharlaştıkça sıvı mermer damlası da deformasyona uğrayacak ve sonunda yok olacaktır. Ama buharlaşması daha zor olan bir sıvı kullanıldığında sıvı mermer damlası da varlığını o derece koruyacaktır. O sebeple bir sıvı mermer damlasının kullanılacağı yere göre oluşturulacağı sıvının buharlaşma hızı önemlidir.

Bu çalışmada öncelikle su ve grafit kullanılarak ilk kez sıvı mermer damlası üretildi. Daha sonra grafit sıvı mermer damlası ile saf suyun aynı ortamdaki buharlaşmaları karşılaştırıldı. Bunun için farklı doygun tuz çözeltileri ile bağlı nemi sabitlenmiş hücre ortamı içerisinde su damlasının buharlaşması gözlemlendi. Daha sonra grafit tozu kullanılarak sentezlenen sıvı mermer damlaları aynı koşullarda buharlaştırıldı. Her iki buharlaşmada da literatürde mevcut difüzyonla buharlaşma modellerine göre incelendi ve bu denklemlerin, sıvı mermer damlaları için kullanılıp kullanılmayacağı araştırıldı ve sonuçlar buharlaşma direnci bakımından tartışıldı.

## SUMMARY

**TITLE OF THE THESIS:** Synthesis and Applications of Liquid Marbles

**AUTHOR:** Merve DANDAN

The evaporation of liquid droplets is a fundamental phenomenon in nature. Because of its important role in many complex systems such as clouds and fog, and fuel injection motors, inkjet printers and pesticide spray systems the evaporation of liquid droplets has been an interesting topic for researchers for several decades.

Liquid marbles are water or other liquid drops made non-wetting by the use of a hydrophobic powder which coats them. They can travel swiftly across solid surfaces without wetting them and without leaving any leakage behind them. The absence of contact with their substrate avoids contamination problems, and produces high displacement velocities. In addition the force needed to move these marbles is extremely small.

A life- time of a liquid marble depends on the powder and the liquid used to form it. If the liquid used is very volatile which evaporates easily, then the liquid marble will deform as the liquid evaporates by time and finally it will vanish. But if we use slowly evaporating liquids then the liquid marble will keep alive much longer.

In this work, the liquid marbles made of water and graphite powder was synthesized for the first time. Then their evaporation rates were compared with the rates of pure water droplets. For this purpose, the evaporation of water droplets in a closed chamber was monitored whose relative humidity is taken constant with different saturated salt solutions. Then liquid marbles which are made from graphite powder were evaporated in the same conditions. Both evaporation processes were modeled by using previously derived diffusion controlled evaporation equations and the results were compared in terms of evaporation resistance.

## TEŞEKKÜR

Başlamış olduğum bu yolda en başından sonuna dek engin bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, zorluklarda yılmamayı sonuna dek direnmeyi ve hedeflenene tek başına çalışarak ulaşmayı öğreten, örnek olan çok değerli sayın hocam Prof. Dr. H. Yıldırım Erbil'e,

Benden bugüne kadar hiçbir desteğini esirgemeyen, varlıklarını bütünüyle ruhumda hissettiren aileme; babam Abdullah DANDAN'a, annem Minnur DANDAN'a ve kardeşim Şenol DANDAN'a,

Mastıra başladığımdan bu yana her daim yanımda olup sıkıntılarımı paylaşan, desteğini esirgemeyen, değerli arkadaşım Arş. Grv. Erdinç Doğancı' ya,

Sıkıntılarımı ve en zor zamanlarımı paylaşan, tümüyle yalnız olmadığımı hissettiren ev arkadaşım Arş. Grv. Yasemin Katrancı' ya,

Her daim sıkıştığımda bilgisini ve desteğini benden esirgemeyen arkadaşlarım; Arş. Grv. C. Elif Özen Cansoy, Arş. Grv. İkrime Orkan Uçar' a; deney düzeneğimi kurarken yardımcı dokunan Uzman Ferit Fıçı' ya ve tüm çalışma arkadaşlarıma,

Sevgisini ve desteğini her zaman yanı başımda hissettiğim tüm arkadaşlarıma,

## SONSUZ TEŞEKKÜRLER,

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                    | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                               | iv                  |
| SUMMARY                                            | v                   |
| TEŞEKKÜR                                           | vi                  |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ                                 | vii                 |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                    | x                   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ                                  | xvi                 |
| 1. GİRİŞ                                           | 19                  |
| 2. SIVI MERMER DAMLASI (LIQUID MARBLE)             | 21                  |
| 2.1. Sıvı Mermer Damlası Tanımı                    | 21                  |
| 2.2. Sıvı Mermer Damlası Özellikleri               | 22                  |
| 2.3. Sıvı Mermer Damlası Kullanım Alanları         | 28                  |
| 2.4. Süperhidrofobik Yüzeyler                      | 29                  |
| 2.4.1. Nilüfer (Lotus) Etkisi                      | 30                  |
| 3. TEMAS AÇISI                                     | 33                  |
| 3.1. Yüzey Gerilimi                                | 33                  |
| 3.2. Temas Açısı                                   | 34                  |
| 3.3. Temas Açısı Karmaşası (Histeresiz)            | 38                  |
| 3.4. Temas Açısı Ölçümleri                         | 40                  |
| 3.4.1. Statik Optik Teleskop (Gonyometre)          | 40                  |
| 4. BUHARLAŞMA                                      | 42                  |
| 4.1. Nemli Havanın Özellikleri                     | 42                  |
| 4.1.1. Su Buharı Buhar Basıncı                     | 43                  |
| 4.1.2. Bağıl Nem ve Mutlak Nem                     | 43                  |
| 4.1.3. Şebnem Noktası (Çiğlenme Sıcaklığı)         | 45                  |
| 4.1.4. Hava Neminin Ölçüm Metodları                | 46                  |
| 4.1.4.1. Kuru- Yaş Termometre Metodu (Psikrometre) | 46                  |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.4.2. Çiğ Noktası Higrometresi                                       | 48  |
| 4.1.4.3. Saçlı Higrometre                                               | 49  |
| 4.1.5. Bağlı Nemin Sabitlenmesi                                         | 50  |
| 5. DİFÜZYON                                                             | 53  |
| 5.1. Difüzyon ve Sıvı Buharlaşması                                      | 53  |
| 5.2. Difüzyon Tipleri                                                   | 54  |
| 5.2.1. Gazlarda Difüzyon                                                | 54  |
| 5.3. Adolf Fick                                                         | 56  |
| 5.3.1. Fick'in 1. Difüzyon Kanunu                                       | 56  |
| 5.3.2. Fick'in 2. Kanunu                                                | 58  |
| 5.3.3. Difüzyon Dinamik Denge Hali (Steady- State)                      | 59  |
| 5.4. Sıvı Damlası Buharlaştırılması ile Difüzyon Sabitinin Belirlenmesi | 60  |
| 6. GRAFİT                                                               | 66  |
| 6.1. Grafitin Yapısı ve Genel Özellikleri                               | 66  |
| 6.2. Grafitin Elde Edilişi ve Tane Büyüklüğü                            | 68  |
| 6.3. Grafitin Kullanım Alanları                                         | 68  |
| 7. MATERYAL – METOT                                                     | 70  |
| 7.1. Sıvı Damlası Buharlaşması Denemeleri                               | 70  |
| 7.1.1. Bağlı Nemin Kontrol Edilmesi                                     | 71  |
| 7.2. Sıvı Mermer Damlası Sentezi                                        | 73  |
| 7.3. KSV CAM 200 Cihazı ile Buharlaştırma Denemeleri                    | 74  |
| 7.4. Görüntü İşleme ve Analiz Programı (UTHSCSA Image Tool Program)     | 76  |
| 8. BULGULAR VE TARTIŞMA                                                 | 77  |
| 8.1. Su Damlası Buharlaşması Bulguları                                  | 77  |
| 8.1.1. 5µL Su Damlası Bulguları                                         | 77  |
| 8.1.2. 10µL Su Damlası Bulguları                                        | 85  |
| 8.2. Sıvı Mermer Damlası Buharlaşması Bulguları                         | 95  |
| 8.2.1. 5µL Sıvı Mermer Damlası Bulguları                                | 95  |
| 8.2.2. 10µL Sıvı Mermer Damlası Bulguları                               | 104 |
| 8.3. Tartışma                                                           | 114 |

|             |     |
|-------------|-----|
| 9. SONUÇLAR | 123 |
| KAYNAKLAR   | 125 |
| ÖZGEÇMİŞ    | 128 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 2.1. Katı üzerinde duran bir sıvı mermer damlası [Aussillous and Quéré, 2001].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 21           |
| 2.2. Su havuzunda bir sıvı mermer damlası [Aussillous and Quéré, 2001].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 23           |
| 2.3. Bir sıvı mermer damlasının diğeri ile çarpışması, her fotoğraf 4 ms arayla çekilmiştir [[Aussillous and Quéré, 2006].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 24           |
| 2.4. Milimetrik bir su mermer damlasının bölünmesi [Aussillous and Quéré, 2006].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 24           |
| 2.5. Bir katı üzerinde bulunan sıvı mermer damlası için hidrofobik ve hidrofilik durumlardaki sıvı/ buhar ara fazı pozisyonu [Aussillous and Quéré, 2006].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 25           |
| 2.6. Elektrostatik alana maruz kalan likopodyum tanecikleri ile oluşturulmuş su mermer damlası. a) Damla substrat ve yüklü Teflon çubuk arasında ilerler, b) Çubuğa yakın yerde damlanın detaylı fotoğrafı, c) Yüklü çubuk önce sağa sonra sola hareket ettirilir, sıvı mermer damlasının hareketi sağlanmış olur. Her fotoğraf arasında 6, 2 ve 120 ms zaman vardır, sıvı mermer damlası ile çubuk arasındaki mesafe milimetrik düzeydedir [Aussillous and Quéré, 2006]. | 26           |
| 2.7. a) Likopodyum ve demir karışımı ile kaplanmış bir sıvı mermer damlası b) demir partikülleri içeren ve likopodyum ile kaplı bir sıvı mermer damlası, her iki durumda da sıvı mermer damlası üzerinde mıknatıs bulunmaktadır, fotoğraflar sırasıyla 6 ve 20 ms aralıklarla resmedilmiştir [Aussillous and Quéré, 2006].                                                                                                                                                | 27           |
| 2.8. Nilüfer yaprağı üzerindeki bir su damlası ile yaprağın genel ve mikroskopik görünüşü<br>( <a href="http://www.turi.org/content/download/1373/6419/file/Lotus%20Effect.pdf">www.turi.org/content/download/1373/6419/file/Lotus%20Effect.pdf</a> ).                                                                                                                                                                                                                    | 31           |
| 2.9. Bir damla nilüfer yaprağını kaplayan tozu alır<br>( <a href="http://en.percenta.com/nanotechnology-lotus-effect.php">en.percenta.com/nanotechnology-lotus-effect.php</a> ), b) ve c) hidrofobik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde nilüfer etkisinin şematik gösterimi.                                                                                                                                                                                                 | 31           |
| 2.10. Damlanın toz parçacıklarıyla kaplanması ( <a href="http://www.corporate.basf.com">www.corporate.basf.com</a> ).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 32           |
| 3.1. Yüzeydeki ve içteki bir sıvı molekülünün şematik gösterimi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 33           |

|      |                                                                                                                                                                                                   |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. | Bir katı yüzeyinde duran sıvı damlası (www.ksvltd.com).                                                                                                                                           | 35 |
| 3.3. | Farklı katı yüzeyler üzerinde sıvı damlasının oluşturduğu temas açıları.                                                                                                                          | 36 |
| 3.4. | Katı bir yüzeydeki bir sıvı damlasının yüzey gerilimi bileşenleri.                                                                                                                                | 36 |
| 3.5. | a) Düz bir zeminde oluşturulmuş ilerleyen temas açısı, b) gerileyen temas açısı (www.ksvltd.com).                                                                                                 | 38 |
| 3.6. | Su damlalarının eğimlendirilmiş bir yüzeyde temas açısı, damlalar temas açısı karmaşası yüzünden farklı davranırlar [Öner, 2000].                                                                 | 39 |
| 4.1. | Çiğlenme Sıcaklığı.                                                                                                                                                                               | 46 |
| 4.2. | Kuru- yaş hazneli psikrometri [Agarwal, 2006].                                                                                                                                                    | 47 |
| 4.3. | Saçlı higrometre [Agarwal, 2006].                                                                                                                                                                 | 49 |
| 5.1. | Birbiri ardından gelen çarpışmalar sonucu gaz molekülünün ilerlemesi.                                                                                                                             | 55 |
| 5.2. | Basit bir ikili gaz difüzyon denemesi.                                                                                                                                                            | 56 |
| 5.3. | Moleküler difüzyon olayının şematik gösterimi.                                                                                                                                                    | 57 |
| 5.4. | Küresel damla üzerindeki $h$ , $r_b$ , $R$ ve $\theta$ değerlerinin gösterilmesi ( <a href="http://mathworld.wolfram.com/SphericalCap.html">http://mathworld.wolfram.com/SphericalCap.html</a> ). | 60 |
| 5.5. | Katı bir yüzey üzerinde buharlaşan bir sıvı damlasına ait iki tip buharlaşma modeli [Picknett and Bexon, 1977].                                                                                   | 61 |
| 6.1. | a) Grafit yapısı. b) Elmas yapısı.                                                                                                                                                                | 66 |
| 7.1. | Plexiglass hücre.                                                                                                                                                                                 | 70 |
| 7.2. | Hücre içerisindeki bağıl nemin kontrolü için kullanılan TFA marka termo- higrometre.                                                                                                              | 72 |
| 7.3. | Testo 615 termo- higrometre.                                                                                                                                                                      | 73 |
| 7.4. | Hücre içerisinde oluşturulmuş sıvı mermer damlasının a) yandan ve b) üstten görünüşü.                                                                                                             | 74 |
| 7.5. | KSV CAM 200 cihazında yandan ve üstten görüntüleme sistemi b) KSV CAM 200 deney düzeneği.                                                                                                         | 75 |
| 7.6. | Örnek damla fotoğrafları a) %98 bağıl nem $10\mu\text{L}$ hacmindeki sıvı mermer damlası fotoğrafı b) %98 bağıl nem $10\mu\text{L}$ hacmindeki su damlası.                                        | 75 |
| 7.7. | Görüntü işleme ve analiz programında a) temas açısı ölçümü b) yükseklik, $h$ ve temas yarıçapı, $r_b$ ölçümü.                                                                                     | 76 |

- 8.1. 5µL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas 80  
yarıçapının değişim grafiği.
- 8.2. 5µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl 80  
nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.
- 8.3. 5µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas 81  
yarıçapının değişim grafiği.
- 8.4. 5µL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas 81  
açısının değişim grafiği.
- 8.5. 5µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl 82  
nemlerde zamana göre temas açılarının değişim grafiği.
- 8.6. 5µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas 82  
açısının değişim grafiği.
- 8.7. 5µL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre 83  
hacminin değişim grafiği.
- 8.8. 5µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl 83  
nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği.
- 8.9. 5µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre 84  
hacminin değişim grafiği.
- 8.10. 5µL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği. 84
- 8.11. 5µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %69- %79- %87 bağıl 85  
nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.
- 8.12. 5µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği. 85
- 8.13. %98 bağıl nemde 10µL su damlasının 0, 240, 480, 720, 960, 1200, 86  
1440, 1680, 1800. dk larda KSV CAM 200 cihazından yatay kamera  
ile çekilmiş buharlaşma görüntüleri.
- 8.14. 10µL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas 89  
yarıçapının değişim grafiği.
- 8.15. 10µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl 90  
nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.
- 8.16. 10µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas 90  
yarıçapının değişim grafiği.

- 8.17. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas 91  
açısının değişim grafiği.
- 8.18. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl 91  
nemlerde zamana göre temas açısının değişim grafiği.
- 8.19. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas 92  
açısının değişim grafiği.
- 8.20. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre 92  
hacminin değişim grafiği.
- 8.21. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl 93  
nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği.
- 8.22. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre 93  
hacminin değişim grafiği.
- 8.23. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği. 94
- 8.24. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %40- %52- %69- %79- %87 bağıl 94  
nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.
- 8.25. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği. 95
- 8.26. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana 98  
göre temas yarıçapının değişim grafiği.
- 8.27. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 99  
bağıl nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.
- 8.28. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana 99  
göre temas yarıçapının değişim grafiği.
- 8.29. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana 100  
göre temas açısının değişim grafiği.
- 8.30. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 100  
bağıl nemlerde zamana göre temas açısının değişim grafiği.
- 8.31. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana 101  
göre temas açısının değişim grafiği.
- 8.32. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana 101  
göre hacminin değişim grafiği.
- 8.33. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 102  
bağıl nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği.

- 8.34. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği. 102
- 8.35. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği. 103
- 8.36. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %69- %79 bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği. 103
- 8.37. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %87-%98 bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği. 104
- 8.38. %98 bağıl nemde 10µL sıvı mermer damlasının 0, 60, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300. dk larda KSV CAM 200 cihazında yatay kamera ile çekilmiş buharlaşma görüntüleri. 105
- 8.39. %98 bağıl nemde 10µL sıvı mermer damlasının 0, 60, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300. dk larda KSV CAM 200 cihazında üstten kamera ile çekilmiş buharlaşma görüntüleri. 105
- 8.40. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği. 108
- 8.41. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği. 109
- 8.42. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği. 109
- 8.43. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği. 110
- 8.44. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas açısının değişim grafiği. 110
- 8.45. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği. 111
- 8.46. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği. 111
- 8.47. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği. 112
- 8.48. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği. 112

- 8.49. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t 113  
grafiği.
- 8.50. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %69- %79 113  
bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.
- 8.51. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t 114  
grafiği.
- 8.52. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlası için bağıl neme karşı 121  
buharlaşma direnci dağılım grafiği.
- 8.53. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlası için bağıl neme karşı 122  
buharlaşma direnci dağılım grafiği.

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <b><u>Cizelge</u></b>                                                                                                                    | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 4.1. Kuru havanın özellikleri.                                                                                                           | 42                  |
| 4.2. Bazı doymuş tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri [Winston, 1960].                                          | 52                  |
| 6.1. Elmas ve grafitin karşılaştırılması [Carr, 1994].                                                                                   | 67                  |
| 7.1. Farklı damla boyutlarındaki su damlası ve sıvı mermer damlası denemeleri için cihazdan ölçülen sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri. | 72                  |
| 7.2. Kullanılan higrometrelerin sıcaklık ve bağıl nem değerleri.                                                                         | 73                  |
| 8.1. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.                                              | 77                  |
| 8.2. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.                                             | 78                  |
| 8.3. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.                                             | 78                  |
| 8.4. %68 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.                                             | 78                  |
| 8.5. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.                                             | 79                  |
| 8.6. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.                                             | 79                  |
| 8.7. %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.                                             | 79                  |
| 8.8. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10µL su damlası için deneysel veriler.                                             | 87                  |
| 8.9. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10µL su damlası için deneysel veriler.                                            | 87                  |
| 8.10. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10µL su damlası için deneysel veriler.                                           | 87                  |
| 8.11. %68 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10µL su damlası için deneysel veriler.                                           | 88                  |

- 8.12. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası 88  
için deneysel veriler.
- 8.13. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası 88  
için deneysel veriler.
- 8.14. %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası 89  
için deneysel veriler.
- 8.15. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer 96  
damlası için deneysel veriler.
- 8.16. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer 96  
damlası için deneysel veriler.
- 8.17. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer 96  
damlası için deneysel veriler.
- 8.18. %69 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer 97  
damlası için deneysel veriler.
- 8.19. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer 97  
damlası için deneysel veriler.
- 8.20. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer 97  
damlası için deneysel veriler.
- 8.21. %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer 98  
damlası için deneysel veriler.
- 8.22. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer 106  
damlası için deneysel veriler.
- 8.23. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı 106  
mermer damlası için deneysel veriler.
- 8.24. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer 106  
damlası için deneysel veriler.
- 8.25. %68 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı 107  
mermer damlası için deneysel veriler.
- 8.26. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer 107  
damlası için deneysel veriler.
- 8.27. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer 107  
damlası için deneysel veriler.

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.28. | %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.                                                                                                                                                              | 108 |
| 8.29. | 5 $\mu$ L su damlası için ölçülmüş deneme sıcaklıkları ve bağıl nem değerleri ile çizilen grafiklerinin eğimlerinden hesaplanan deneysel difüzyon sabiti değerleri.                                                                                                  | 114 |
| 8.30. | 10 $\mu$ L su damlası için ölçülmüş deneme sıcaklıkları ve bağıl nem değerleri ile çizilen grafiklerinin eğimlerinden hesaplanan deneysel difüzyon sabiti değerleri.                                                                                                 | 115 |
| 8.31. | Sıcaklık değişimine göre hesaplanan teorik difüzyon sabiti değerleri.                                                                                                                                                                                                | 115 |
| 8.32. | 5 $\mu$ L su damlası buharlaşmasının Teflon yüzeyi üzerindeki denemelerinde çalışılan sıcaklık ve bağıl nem değerleri için $r_b$ ve $\theta'$ nın sabit alındığı bölgelerde ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen $\Delta T$ ( $^{\circ}$ C) değerleri.  | 117 |
| 8.33. | 10 $\mu$ L su damlası buharlaşmasının Teflon yüzeyi üzerindeki denemelerinde çalışılan sıcaklık ve bağıl nem değerleri için $r_b$ ve $\theta'$ nın sabit alındığı bölgelerde ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen $\Delta T$ ( $^{\circ}$ C) değerleri. | 117 |
| 8.34. | Farklı bağıl nemlerde 5 $\mu$ L ve 10 $\mu$ L boyutlarındaki sıvı mermer damlası için bozulmaya başladığı ana kadar olan, su damlası için ise tüm buharlaşma sonuna kadar geçen süreler.                                                                             | 119 |
| 8.35. | 5 $\mu$ L su damlası ve sıvı mermer damlası için çalışılan deneme sıcaklığı ve bağıl nem için $dV/dt$ grafiğinin eğimleri.                                                                                                                                           | 119 |
| 8.36. | 10 $\mu$ L su damlası ve sıvı mermer damlası için çalışılan deneme sıcaklığı ve bağıl nem için $dV/dt$ grafiğinin eğimleri.                                                                                                                                          | 120 |
| 8.37. | 5 $\mu$ L sıvı mermer damlasının hesapla bulunan buharlaşma direnci.                                                                                                                                                                                                 | 120 |
| 8.38. | 10 $\mu$ L sıvı mermer damlasının hesapla bulunan buharlaşma direnci.                                                                                                                                                                                                | 121 |

# 1. GİRİŞ

Küçük bir miktar su veya herhangi bir sıvının bir katı üzerinde taşınımı, iki faz arasındaki temas özelliğinden dolayı kolay bir olay değildir. Bir sıvı damlasının hareketini ayarlamak ihmal edilemeyen kuvvetleri gerektirir ve genelde damlanın arkasında bir miktar sıvının bırakılmasıyla sonuçlanır. Bu sorunu aşmak için damlaların üzerlerini ıslatmadığı ve kirlilik problemlerinin de önüne geçildiği süperhidrofobik yüzeyler geliştirilmiş ve bu konuda birçok çalışma yapılmıştır.

2000 yılından sonra ise olaya farklı bir bakış açısıyla yaklaşan ve katı yüzeylerini modifiye etmek yerine sıvı yüzeylerinde bir takım değişiklikler yaparak bu kirlileme ve ıslatma probleminin önüne geçmek isteyen iki Fransız araştırmacı David Quéré ve Pascale Aussillous sıvı mermer damlalarını oluşturmuşlardır. Böylelikle mikroakışkan sistemlerinde ve farklı uygulamalarda da kullanılabilecek sıvı mermer damlaları üzerine olan çalışmalar önem kazanmıştır [Aussillous and Quéré, 2001].

Sıvı mermer damlası, üzerlerini kaplayan hidrofobik bir toz kullanılarak ıslatmayan yapılan sıvı damlalarıdır. Katı ile arasında değme temas çizgisinin bulunmayışından dolayı, sıvının çok küçük miktarlarında bile sızıntı yapmaksızın hızlı hareket edebilen mikro- su depoları olarak davranırlar. Substrat ile temasın bulunmayışı kirlilik problemlerini önler ve yapışkan türler olsa bile, yüksek yer değiştirme hızı oluşturur. Ayrıca, bir sıvı mermer damlasının hareketi için gerekli kuvvet oldukça küçüktür [Lerner, 2001; Aussillous and Quéré, 2006].

Sıvı mermer damlasının ömrü kullanılan hidrofobik toz ve sıvıya bağlıdır. Eğer kullanılan sıvı çok uçucu yani buharlaşması kolay olan bir sıvı ise zamanla sıvı buharlaştıkça sıvı mermer damlası da deformasyona uğrayacak ve sonunda yok olacaktır. Ama buharlaşması daha zor olan bir sıvı kullanıldığında sıvı mermer damlası da varlığını o derece koruyacaktır. O sebeple bir sıvı mermer damlasının kullanılacağı yere göre oluşturulacağı sıvının buharlaşma hızı önemlidir.

Sıvı mermer damlası oluşturulmasıyla içerde hapsolan suyun ve ya sıvının buharlaşıp gaz fazına geçmesi için bir direnç oluşturulmuş olur ve bu direnç

buharlaşma oranını azaltır. Böylelikle buharlaşma süresi uzamış olur. Mono tabaka olarak yağ asitleri ve ya farklı malzemeler kullanılarak suyun buharlaşma süresini uzatmak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır ve bu konuda çalışmalar sürmektedir [Hedestrand, 1924; Rideal, 1925; Archer, 1955; La Mer, 1963; La Mer, 1964, Gugliotti, 2005].

Katıların yüzey geriliminin tayini, üzerlerine konulan sıvı damlalarının değme açıları ölçülerek dolaylı olarak yapılabilmektedir. Ancak bu yöntem kullanılırken de, sıvı damlasının buharlaşma hızının değme açısı üzerine etkisinin bilinmesi önemlidir. Aksi takdirde ölçülen hangi aının bu amaçla kullanılabileceği kestirilemez [Erbil and Doğan, 2000]. Damlanın açık havada veya i şartların denetlendiği bir ortam içinde bulunmasına bağlı olarak, buharlaşma hızı değiştiğinden ölçülen değme açısı ilk saniyelerde bile çok farklı sonuç verebilir [Meriç and Erbil, 1998]. Öte yandan, literatürde yayınlanan su buharı difüzyon sabitlerinin sıcaklıkla değişim sonuçlarının da çok güvenilir olmaması yüzünden, hem sıvı damlasının hem de difüzyon sabitinin aynı hücre içinde aynı şartlarda tayin edilmesine gerek vardır. Diğer taraftan katı yüzeyin mevcudiyeti yüzünden damla sadece yukarıya doğru buharlaşabildiğinden bu  $f(\theta)$  faktörünün de hesaba alınması gereklidir [Erbil and Avcı, 2002].

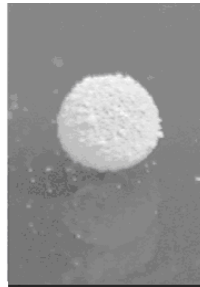
Bu çalışmada öncelikle PTFE (Teflon) yüzeyi üzerinde Hamilton şırınga yardımıyla oluşturulan su damlasının buharlaşması, bağlı nemi farklı doygun tuz çözeltileri kullanılmak suretiyle sabitlenmiş hücre ortamı içerisinde takip edildi. Daha sonra yine aynı koşullar altında grafit tozu kullanılarak sentezlenen sıvı mermer damlasının (grafit tozu içerisinde hapis olmuş su damlasının) buharlaşma hızının su damlasına göre ne kadar değiştiği ve mevcut difüzyon denklemlerine uyup uymadığı belirlendi.

Çalışmanın amacı grafit tozu ile literatürde ilk kez sıvı mermer damlası oluşturmak daha sonra bunun içindeki suyun difüzyonla buharlaşma hızının, su damlası difüzyon hızına oranını ve sıvı mermerin ömrünü saptamak, ayrıca damla boyutu etkisini incelemek ve sıvı mermer damlası için difüzyon denklemlerinin mevcut difüzyon denklemleri ile bağlantısını araştırmaktır.

## 2. SIVI MERMER DAMLASI (LIQUID MARBLE)

### 2.1. Sıvı Mermer Damlası Tanımı

Sıvı mermer damlası, üzerlerini kaplayan hidrofobik bir toz kullanılarak ıslatmayan yapılan sıvı damlalarıdır [Aussillous and Quéré, 2001; Vella, 2004]. Damlaların toz parçacıkları ile kaplanması artık onun yüzeye yapışmasını engellediğini gibi katı bir küre gibi yuvarlanarak hareket etmesini sağlar [Quéré, 2002; Mahadevan, 2001]. Katı ile arasında değme temas çizgisinin bulunmayışından dolayı, sıvının çok küçük miktarlarında bile sızıntı yapmaksızın hızlı hareket edebilen mikro- su depoları olarak davranırlar. Üzerinde bulunduğu katı yüzey ile sıvı damlasının temas etmemesi kirlilik problemlerini önler ve yapışkan polimerler kullanılsa bile, yüksek yer değiştirme hızı oluşturur. Ayrıca, bir sıvı mermer damlasının hareketi için gerekli kuvvet oldukça küçüktür [Quéré, 2002; Aussillous and Quéré, 2006].



Şekil 2.1. Katı üzerinde duran bir sıvı mermer damlası [Aussillous and Quéré, 2006].

Şekil 2.1’ de hidrofobik bir tozun su ile karıştırılması sonucu elde edilmiş sıvı mermer damlası görülmektedir. Aynı zamanda su- gliserol karışımı kullanılarak da elde edilebilir. Hidrofobikliklerinden dolayı toz tanecikleri su ile karışmaz, bunun yerine damlanın yüzeyini kaplarlar [Quéré, 2005].

Sıvı mermer damlaları su ve gliserin dışında iyonik sıvılar ile de oluşturulabilir. İyonik sıvılar uçucu değildir ve kimyasal reaksiyonlarda solvent olarak kullanılabilirler. Oldukça düşük buhar basıncı, geniş sıcaklık aralığı, termal denge ve iyonik iletkenliğe sahiptir. Bunlar su ile karışabilir hidrokarbonlar ile karışmazlar, bu gibi özellikleri sayesinde iyonik sıvılar ile oluşturulan sıvı mermer damlaları su ile oluşturulanlara göre daha dayanıklıdır ve farklı alanlarda kullanılmak üzere hazırlanabilirler [Gao, 2007].

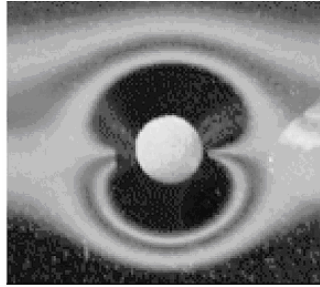
Küçük bir miktar sıvının bir katı üzerinde taşınımı, iki faz arasında temas oluşmasından dolayı zordur. Bir sıvı damlasının hareketini kontrol etmek yerçekimi gibi ihmal edilemeyen kuvvetleri gerektirir (çünkü temas açısı karmaşası harekete zıt bir kuvvet oluşturur) ve genelde damlanın arkasında bir miktar sıvının bırakılmasıyla sonuçlanır. Sıvı mermerler elektrostatik, elektromanyetik, ya da daha basit aerodinamik teknikler ile hareket ettirilir.

## 2.2. Sıvı Mermer Damlası Özellikleri

Islatmayan bir damla hafifçe eğim verilen bir yüzey üzerinde tıpkı katı bir küre gibi kaymadan ve yapışmadan yuvarlanma özelliğine sahiptir. Buna karşılık, kısmi ıslatan damlalar dikey vaziyette cam zemin üzerinde yapışır ve yuvarlanmak yerine kayarak yer değiştirirler.

Bir sıvı damlasının hidrofobik toz ile kaplanmasıyla oluşan sıvı mermer damlaları da katı küre gibi davranırlar ve katı yüzeyine karşı sıvılara göre daha az yapışma gösterirler. Hidrofobik toz kendiliğinden üzerinde yuvarlanan damlayı kaplar ve damlanın da hidrofobik özellik kazanmasını sağlar. Sonuçta oluşan damlanın hareketi yüzeyin eğimlendirilmesiyle veya elektriksel, yerçekimsel ve manyetik alanlar kullanılarak oluşturulabilir. Ayrıca bu sayede, damlanın geride sızıntı bırakmasına fırsat vermeyerek hızlı yer değiştirmesi sağlanabilir [Aussillous and Quéré, 2004; Quéré, 2005; McHale 2007; Newton, 2007].

Toz olarak kullanılacak maddeler hidrofobik özellik gösteren likopodyum (likopodyum adı verilen bir bitkinin sporlarından meydana gelen sarı renkli bir toz) tanecikleri gibi doğal maddeler ve ya hidrofobikleştirilmesi için florosilanla muamele edilmiş silika tanecikleri gibi yapay maddeler olabilir. Hidrofobik oldukları için toz parçacıkları ara fazda kalır, damlanın içine batmazlar. Tanecik boyutu, damla boyutundan küçük olacak şekilde 0,1- 100  $\mu\text{m}$  aralığında olabilir. Taneciklerden dolayı yuvarlanan sıvı mermer damlalarının bir inci ya da bilye şeklinde olduğu kabul edilir. Eğer kullanılan sıvı iyonik sıvılarda olduğu gibi buharlaşması zor olan bir sıvı ise damla uzun süre deformasyona uğramadan kalacaktır. Aksi takdirde kullanılan sıvı uçucu ise buharlaşma olacak ve sıvı mermer damlası zamanla deformasyona uğrayacaktır.

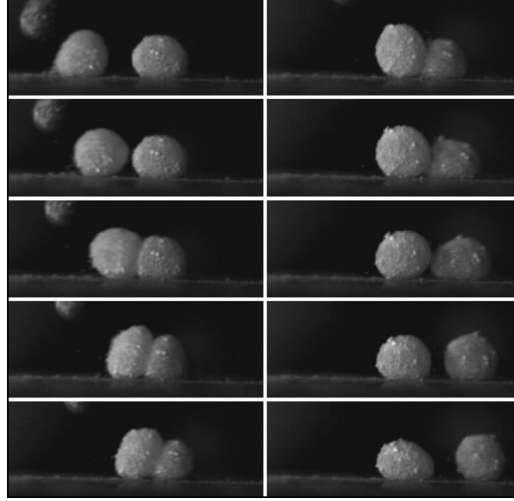


Şekil 2.2. Su havuzunda bir sıvı mermer damlası [Aussillous and Quéré, 2006].

Şekil 2.2' de gösterildiği gibi bir su mermer damlası batma olmadığı için su havuzunun yüzeyinde hareket ettirilebilir. Bir dakika süreyle yüzebilir, bu bir havuz üzerine düşen su damlasına göre çok uzun bir süredir. Sıvı mermer damlasının ömrü kullanılan hidrofobik toz ve sıvıya, aynı zamanda damlanın havuz üzerine yerleştirilme şekline bağlıdır. OTFE (oligomeriktetrafloroetilen) kullanılarak iyonik sıvılarla oluşturulan sıvı mermer damlaları haftalarca su üzerinde bozulmadan kalabilmektedirler [Gao, 2007].

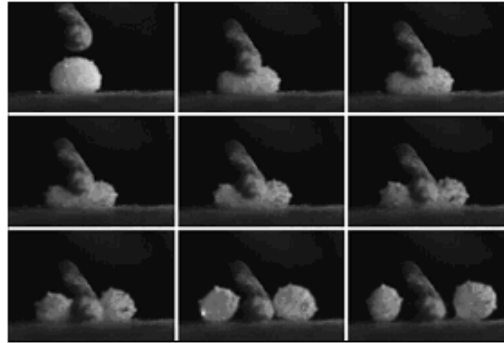
Sıvı mermer damlası tozlarının içine girebilecek bir sıvı havuzuna yerleştirildiğinde ise (yağ veya alkol gibi), damlanın bozulup yok olması daha hızlıdır. Bu özellikler belli bir yere kadar damlanın hareketini sağlayıp, daha sonra bozulması istendiği durumlarda kullanılabilir.

Kabul edilebilir bir hızda bir diğeriine çarpan mermer damlası çarpışma süresinde deformasyona uğrar, fakat sıvı mermer damlalarının birleşmesi veya patlaması gibi bir durum gerçekleşmez (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3. Bir sıvı mermer damlasının diğeri ile çarpışması, her fotoğraf 4 ms arayla çekilmiştir [Aussillous and Quéré, 2006].

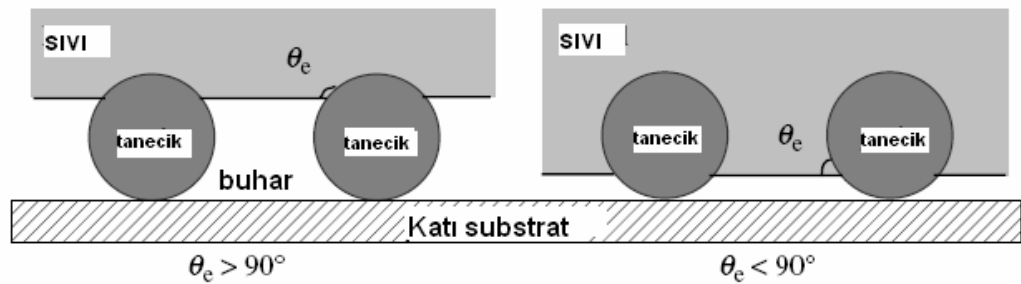
Milimetrik bir sıvı mermer damlası katı bir çubukla hatta parmakla bile iki küçük mermer damlasına bölünebilir. Şekil 2.4’ de böyle bir uygulama görülmektedir. Ancak bu uygulama ikinciye başarılmaz; çünkü her uygulamada toplam yüzeyi artırırken damlayı kaplamaya yetecek yeterli toz yoktur ve sonunda mermer damlası katı üzerine yayılır.



Şekil 2.4. Milimetrik bir su mermer damlasının bölünmesi [Aussillous and Quéré, 2006].

Hidroforbik bir toz düzlemsel bir hava/ su ara fazına yerleştirilirse, her bir tanecik ara fazda bir denge pozisyonu bulur. Milimetrik kapiler uzunluğundan daha küçük olan taneciğe yerçekimi kapiler kuvvet tarafından egemen olur. Tanecik ve sıvı arasındaki temas açısı  $\theta_e$  ise, hidroforbik materyaller için  $\theta_e > 90^\circ$  dir. Dengedeki sıvı/ tanecik sisteminin yüzey enerjisi  $\Delta E$ , sıvı yüzeyine teğet herhangi bir tanecik ile veya tamamen sıvıya daldırılmış bir tanecik ile kıyaslanarak değerlendirilebilir. Taneciklerin düzlemsel ve küresel olduğu ve yarıçapının  $R$  olduğu kabul edildiğinde,  $\gamma_{SV}$ ,  $\gamma_{SL}$  ve  $\gamma = \gamma_{LV}$  üç yüzey gerilimini temas açısına bağlayan  $\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma \cos \theta_e$  Young eşitliği ile klasik geometrik bağlantıları kullanarak  $\Delta E$  türetilebilir. İlk durumda (havadan gelen tanecik)  $\Delta E_1 = -\pi R^2 \gamma (1 + \cos \theta_e)^2$ , ikinci durumda ise (sıvıdan gelen tanecik)  $\Delta E_2 = -\pi R^2 \gamma (1 - \cos \theta_e)^2$  bulunur. Her iki durumda da, partiküller temas açısı fark etmez ara faza yapışarak kendi enerjilerini azaltırlar ve  $\theta_e$  büyük olduğundan enerji farkı  $\Delta E_2$  daha büyüktür.

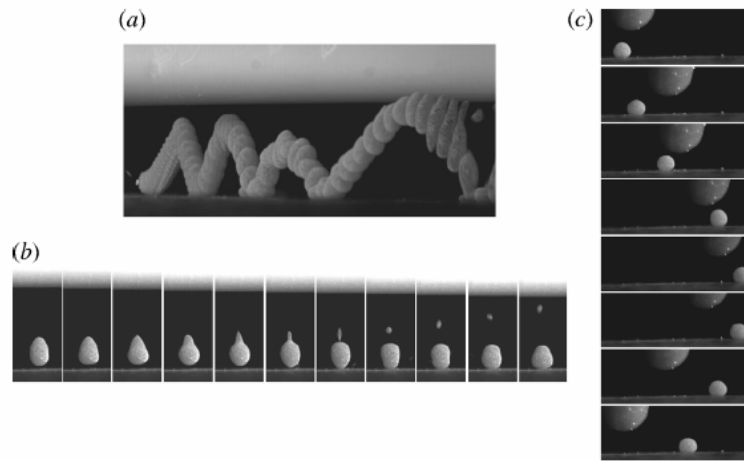
Ayrıca Şekil 2.5’ de gösterildiği gibi hidroforbik granülleri kullanmak sıvı mermer damlası bir katı üzerine yerleştirildiğinde sıvı/ buhar ara fazı ve katı arasındaki mesafeyi maksimize edecektir. Burada sıvı/ buhar ara fazı düzlemsel gösterilmektedir, tanecik ise damla boyutundan çok daha küçüktür [Zeng, 2006].



Şekil 2.5. Bir katı üzerinde bulunan sıvı mermer damlası için hidroforbik ve hidrofilik durumlardaki sıvı/ buhar ara fazı pozisyonu [Aussillous and Quéré, 2006].

### Elektrik Alan Etkisi:

Bir sıvı mermer damlası uygun bir şekilde hareketi sağlanabilen mikro- sıvı deposudur. Sıvı mermer damlalarının hareketini sağlamak üzere, hidrofobik bir substrat üzerindeki su damlasına da uygulanabilen, kontrollü elektrik alanı kullanılabilir. Elektrik alanının olası etkilerini incelemek için, bez parçasına sürtülmüş teflon bir çubuk sıvı mermer damlasına yaklaştırılmıştır.

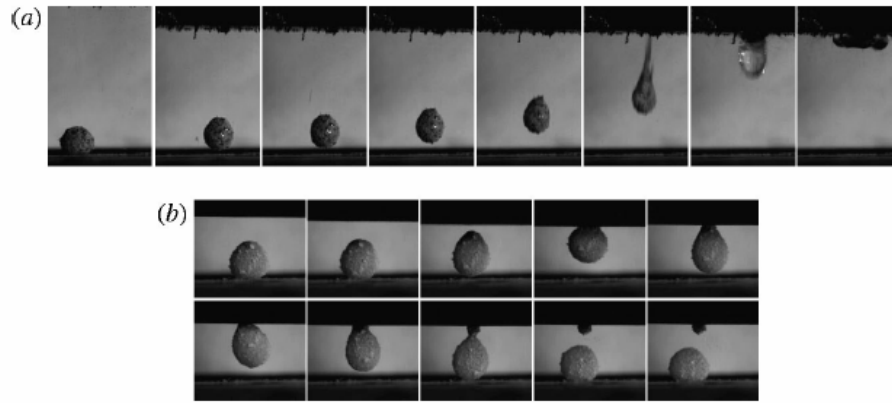


Şekil 2.6. Elektrostatik alana maruz kalan likopodyum tanecikleri ile oluşturulmuş su mermer damlası. a) Damla substrat ve yüklü Teflon çubuk arasında ilerler, b) Çubuğa yakın yerde damlanın detaylı fotoğrafı, c) Yüklü çubuk önce sağa sonra sola hareket ettirilir, sıvı mermer damlasının hareketi sağlanmış olur. Her fotoğraf arasında 6, 2 ve 120 ms zaman vardır, sıvı mermer damlası ile çubuk arasındaki mesafe milimetrik düzeydedir [Aussillous and Quéré, 2006].

Yüklü silindir Şekil 2.6.a' da gösterildiği gibi sıvı mermer damlasına yaklaştırıldığında sıçrama ile oluşan bir hareket elde edilir. Hareket boyunca da Şekil 2.6.b' deki gibi küçük damlaların fırladığı görülür. Eğer yüklü çubuk yeterince uzağa yerleştirilirse, sıvı mermer damlası küçük damlalar çıkarmadan yerini değiştirebilir, buda Şekil 2.6.c' de resmedilmiştir.

### Manyetik Alan Etkisi:

Manyetik alanın sıvı mermer damlası üzerine direk bir etkisi yoktur, farklı şekillerde etki oluşturulabilir. Bu etkiyi gözlemlemek için sıvı mermer damlası manyetik özellik gösteren bir materyal ile oluşturulabilir. Örneğin, hidrofobikleştirilmiş demir tozu ve likopodyum içeren bir karışım ile oluşturulan bir sıvı mermer damlası üzerine bir mıknatıs yaklaştırılırsa damla yerinden kalkacak ve Şekil 2.7.a’ da gösterildiği gibi mıknatısa yapışacaktır.



Şekil 2.7. a) Likopodyum ve demir karışımı ile kaplanmış bir sıvı mermer damlası b) demir partikülleri içeren ve likopodyum ile kaplı bir sıvı mermer damlası, her iki durumda da sıvı mermer damlası üzerinde mıknatıs bulunmaktadır, fotoğraflar sırasıyla 6 ve 20 ms aralıklarla çekilmiştir [Aussillous and Quéré, 2006].

İkinci bir durum olarak; demir tozları sıvı mermer damlası oluşturulacak sıvı içerisine konulduğunda da Şekil 2.7.b’ de gösterildiği gibi likopodyumla kaplı sıvı mermer damlası mıknatıs yaklaştırıldığında etkilenecektir. Yapışma kısa ömürlüdür, çünkü burada demir tozları mıknatıs üzerine taşınır ve sıvı mermer damlası bozularak mıknatıs üzerinden düşer. Ancak sıvı mermer damlası taşınmaya ve düşmeye karşı direnç gösterir.

Bir sıvı mermer damlası belirli bir yükseklikten bir katı üzerine bırakıldığında kullanılan sıvıya, toza, damlanın boyutuna ve çarpma hızına bağlı olarak damla

sıçrayabilir veya yapışabilir. Sıvı mermer damlası ne kadar küçükse, dayanıklılığı o kadar fazladır, deformasyon o kadar az olur ve damla hızlı hareket edebilir. Damlanın boyutu arttıkça temas alanı da artar ve hızı da o kadar azalır. Ayrıca kullanılan toz ne kadar inceyse, sıvı mermer damlası o kadar az kuvvetlidir.

Sıvı mermer damlalarının genel özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Sıvıyı çevresinden ve substrattan izole eden hidrofobik bir toz ile kaplı sıvı damlalarıdır. Normal bir sıvı damlasından farklı olarak, substratı ile minimum temas ve yapışma gösterirler. Bu yüzden, çok güçsüz alanlar substratın doğasından bağımsız elde edilen hareketi sağlar.
- Sıvı mermer damlası hareketlidir, substratı ile çok küçük miktarda temasta olduğu için, hızı normal damlalarla elde edilebilecek hızdan çok daha fazladır-örneğin 100- 1000 kere daha fazla.
- Bütün bir objedir; yüksek hızlarda toz damlayı korur ve hareketi süresince sızıntıyı önler. Burada yine, sıvı mermer damlası yeteri kadar hızlı hareket ettiklerinde arkalarında sıvı filmi bırakan normal damlalardan farklı davranırlar. Çarpışma durumlarında eğer hız 1 m/s den küçükse, damla içteki deformasyon sarsıntılarını absorplayarak bütünlüğünü korur ve geri sıçar.
- Hareket etmesi kolay objelerdir. Nispeten sağlamdır ve farklı etkiler kullanılarak (yerçekimi, elektrik, manyetik) taşınabilir. Böylelikle yönlendirilmiş yolda bir yerden bir yere taşınabilir [Aussillous and Quéré, 2006].

### 2.3. Sıvı Mermer Damlası Kullanım Alanları

Sıvı mermer damlası sistemleri yeni geliştirilen bir konu olduğu için geniş çaplı kullanım alanına sahip değildir. Her ne kadar, toz ile kaplama, damlanın hareketinden sonra tozun uzaklaştırılması açısından çoğu durumlarda zor olsa da,

farklı uygulamalarda kullanılabilir: Örneğin; damla, mikro kimyasal reaksiyonlarda katalizör olarak veya manyetik bir alan ile sıvı mermer damlasının hareketini sağlamak için manyetik tür olarak kullanılabilir. Sıvı yerine tozun hareketini sağlamak isteyen durumlarda kullanılabilir. Sıvı mermer damlası öncelikle hedefine ulaştırılır, daha sonra içerisindeki sıvı buharlaştırılabilir. Böylelikle hedefe ulaştırıldığı yerde sistemdeki toz bir araya gelir ve istenilen taşınma gerçekleştirilmiş olur [Aussillous and Quéré, 2006; Zhao, 2007].

Şu aşamada substratına temas etmeyen sıvının hareketi sağlanabildiği için mikro akışkan sistemlerinde kullanılabilmektedir. Mikro akışkan sistemleri normalde laboratuarda yürütülen geniş çaplı temel analitik fonksiyonların küçük bir cihazda yürütüldüğü lab-on-chips sistemleri ve toplam mikro analiz sistemleri (MicroTAS) için önemlidir. İleri derecede minimize edilmiş ve otomatikleştirilmiş, kompleks analizlerin tüm koşulları kontrol edilebilen kimyasal reaksiyonların adım adım yapıldığı, reaktif ve numunelerin taşınma, dağılma, depolanma gibi işlemlerinin kontrol edildiği sistemlerdir. Bu sistemlerde nano-biyoteknoloji başta olmak üzere yakıt hücreleri ve kimyada, cep telefonlarına integre edilmiş kameralar için değişken odaklı sıvı mikrolenslerde, tıpta DNA analizleri, biyoloji, biyoilaç gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Sıvı mermer damlalarının üretimi ve hareketindeki kolaylığı ile hız gerektiren uygulamalarda elektromekanik diskler ve valfler gibi sürtünmesiz mikro makinelerinde kullanım bulur. Diğer olası bir uygulama sınırlı emülsiyonlarda olduğu gibi veya tek bir sıvı bilyedeki gibi yağlama (kayganlaştırma) da kullanılabilir [Mahadevan, 2001]. Sızdırmayan mikro- su deposu olarak mikro akışkan sistemlerde, biyo-ilaçlarda, su yönetimi ve erezyondan koruma gibi alanlarda kullanılabilir [Lerner, 2001].

## 2.4. Süperhidrofobik Yüzeyler

150° den yüksek temas açısına sahip yüzeylere süperhidrofobik yüzeyler denir. Bu yüzeyler yapışmama, kirletmeme ve kendi kendini temizleme gibi üstün

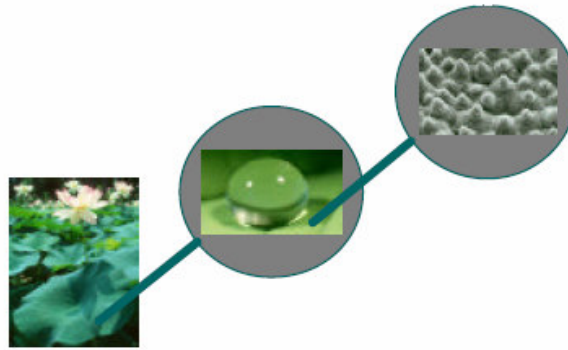
özelliklere sahiptirler. Bu özellikler gemiler için biyo-kirliliğe karşı kaplamalar, otomobiller için kendi kendini temizleyen camlar, metal saflaştırma, leke tutmayan kumaşlar, kirlenmez cephe kaplamaları gibi biyolojik ve endüstriyel birçok uygulamalara sahiptirler [Li, 2007].

Doğada nilüfer çiçeği, kelebek kanadı, su örümceğinin bacakları gibi birçok tür  $150^\circ$  den büyük su temas açısı veren bir yüzeye sahiptir. Bu yüzeyler ufak bir eğim verildiğinde su damlalarının yuvarlandığı ve yüzeydeki kirliliklerin uzaklaştırıldığı su iticiliğe sahiptir.

Bir yüzeyin ıslatılabilirliği yüzey üzerindeki su damlasının yüzeye verdiği temas açısı değeridir ve direk olarak yüzey enerjisi ile ilgilidir. Düşük yüzey enerjisine sahip materyaller, örneğin hegzagonal sık istiflenmiş  $-CF_3$  gruplarına sahip bir yüzey,  $120^\circ$  ye yakın su temas açısı verirler. Bu yüzeyler, kendi kendini temizleme özellikleri olmamasına rağmen temizlenmesi kolay ve sentetik olarak elde edilebilen yüzeylerdir.

#### **2.4.1. Nilüfer (Lotus) Etkisi**

Pek çok Asya kültüründe nilüfer çiçeği bitkisi saflığın ve temizliğin sembolü olarak bilinir. Bu düşüncenin temeli nilüfer bitkisi yapraklarının kendi kendini temizleme özelliğine dayanır. Bu kendi kendini temizleme özelliği tamamen araştırılmıştır ve yüzeyin yüksek derecede suyu itmesiyle sonuçlanan nilüfer yaprağının yüzeyi ile su arasındaki etkileşime bağlanmıştır. Yüksek derecede suyu itme karakteristiği ve kendi kendini temizlemenin nilüfer çiçeği bitkisi ile etkili biçimde gösterilmesine dayanarak Prof. Dr. W. Barthlott, bu etkileri Nilüfer (Lotus) Etkisi olarak tanımlamıştır [Lai, 2003].

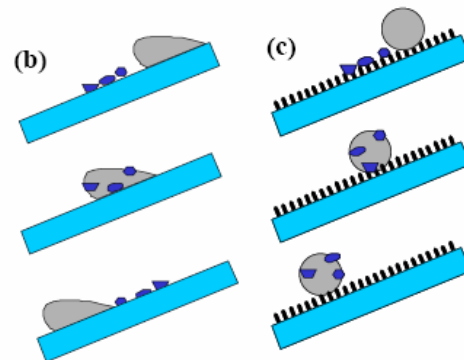


Şekil 2.8. Nilüfer yaprağı üzerindeki bir su damlası ile yaprağın genel ve mikroskopik görünüşü

([www.turi.org/content/download/1373/6419/file/Lotus%20Effect.pdf](http://www.turi.org/content/download/1373/6419/file/Lotus%20Effect.pdf)).

Nilüfer etkisinin bulunuşu büyük teknolojik ilgi alanlarına yol açmıştır. Bu etkinin yapay yüzeylere taşınması ile birçok teknik uygulamalar elde edilmiştir.

Nilüfer etkisi gösteren bir yüzey süperhidrofobiktir ve  $150^\circ$  den daha büyük temas açısını ifade eder. Süperhidrofobitesine dayanarak, yüzey hafifçe meyillendirildiğinde su yüzeyde kayar ve yolu üzerindeki kirlilikleri yüzey üzerinden temizler.



Şekil 2.9. Bir damla nilüfer yaprağını kaplayan tozu alır (en.percenta.com/nanotechnology-lotus-effect.php), b) ve c) hidrofilik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde nilüfer etkisinin şematik gösterimi.



Şekil 2.10. Damlanın toz parçacıklarıyla kaplanması (www.corporate.basf.com).

Nilüfer yaprağı bu süperhidrofobikliği nasıl kazanır? 1970 lerden sonra başlayarak biyolojik yüzeyler üzerindeki SEM (Taramalı Elektron Mikroskopi) çalışmaları geniş mikroyapısal farklılıkları göstermiştir. Birçok bitkinin yüzeyinde, yüzeyiyle temas haline gelebilecek herhangi bir şeyle temas alanını minimize eden mikro ve nano yapıların bir kombinasyonundan oluşturduğu gösterilmiştir. Bir nilüfer bitkisinin yaprakları mumsu kristalleri ile kaplı pürüzlü yüzeyinde epidermal hücreler gösterir.

Mumsu kristaller Wenzel ve Cassie modellerine göre yüzey pürüzlüğü tarafından oluşturulan, su itici bir katman oluşturur. Mumsu kristaller kötüce ıslatır. Bunun sonucu olarak, yüzeydeki su damlaları küresel bir damla oluşturarak, damla ve yüzey arasındaki teması minimize eder. Yüzeydeki kirlilikler genellikle yaprağın hücresel yapısından daha büyüktür ve yüzeyde uça kalır. Sonuç olarak, temas alanı ve ara yüzey etkileşimleri minimize edilmiştir. Su damlası kirlilik üzerinde yuvarlanırken, parçacık hidrofobik olduğundan, absorpsiyon sırasında enerji kazanılır. Su damlasına absorpsiyonla kazanılan enerji eğer parçacığın yapraktan taşınmasına mal olan enerjiden daha büyük ise parçacık yüzeyden taşınır.

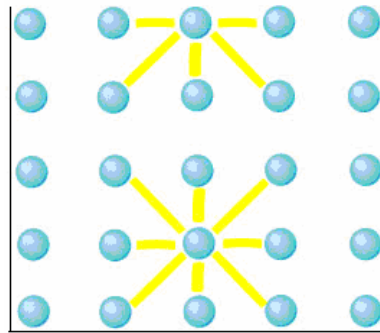
Nilüfer etkisi temel alınarak sentetik katı yüzeyler oluşturulmuş ve böylelikle süperhidrofobik yüzeyler elde edilebilmiştir [Erbil, 2003].

### 3. TEMAS AÇISI

#### 3.1. Yüzey Gerilimi

Sıvılarda kohezyon kuvvetleri molekülleri bir arada tutar. Şekil 3.1’ deki gibi sıvının bulk kısmında her bir molekül bir diğeriyle sarılı haldedir ve her yönden üzerine etkiyen toplam kuvvet vektörü sıfırdır. Bu da molekülün sıvı içerisinde kararlı bir halde olmasını sağlar. Bununla beraber, yüzeydeki moleküller içteki ve kendisine komşu olan moleküller tarafından çekilir. Fakat içteki çekişi dengeleyecek dışardan bir çekime sahip değildir. Çünkü dışarıda buhar fazında çok az molekül vardır. Bu yüzden yüzeydeki her bir molekül yüzeye dik güçlü bir etkileşime maruz kalır.

Yüzeydeki moleküller içteki moleküllerden daha hızlı ve sürekli bir şekilde içeriye doğru hareket eder. Bu olay yüzeydeki moleküllerin sayısını, bu da sıvının yüzey alanını azaltır. Bu yüzey daralması içteki yerleşme olası maksimum molekül sayısında olana kadar devam eder ve sıvının yüzeyinde bir gerilime sebep olur. Buna “sıvının yüzey gerilimi” denir.



Şekil 3.1. Yüzeydeki ve içteki bir sıvı molekülünün şematik gösterimi.

Düz bir yüzey için, yüzey gerilimi yüzeye paralel olarak hareket eden kuvvet olarak tanımlanabilir. Bu etkileşim sıvının etrafında sanki görünmez bir zar varmış

gibi davranmasına sebep olur. Gerçek sistemlerde böyle bir zar yoktur. Sıvılar doğal olarak yüzey alanlarını minimize etme eğilimindedir.

Termodinamik olarak da yüzey geriliminin sebebi, sıvının kendi yüzeyinin potansiyel enerjisini minimuma indirmeye çalışması yani, dolayısıyla sıvının yüzey alanını minimuma indirmeye çalışmasıdır. İşte bu yüzden bir küre, verilen bir hacim için en küçük yüzey alanına sahip olan geometrik şekil olduğundan, sıvı damlaları yüzey gerilimi etkisiyle küreseldir. Küçük bir damlacık için yüzey gerilimi, yüzeyde etkili kuvveti dengelemek üzere damlacık içerisindeki iç basıncın artmasına neden olur. Yüzey gerilimin etkisi altındaki sıvı yüzeyi öteki kısımlardan daha farklı özelliklere sahiptir.

Sıvı yüzeyinde alınan birim uzunluğu gergin tutan ve tek bir molekülü sıvı içine doğru çekmek için harcanması gereken kuvvete yüzey gerilim denir. Sıvı yüzeyini birim miktar arttırmak, yani bir yüzeyde yeni yüzey alanı yaratmak için gerekli olan işe de yüzey enerjisi denir. Yüzey enerjisi ve yüzey gerilimi nümerik olarak aynı değere sahiptir.

Yüzey gerilimi yalnız sıvılar için söz konusu değildir. Hem katıların yüzeyinde hem de çeşitli fazlar arasındaki bütün ara yüzeylerde yüzey gerilimi vardır. Yani “yüzeyler-arası gerilim” veya “yüzeyler arası serbest enerji” söz konusudur.

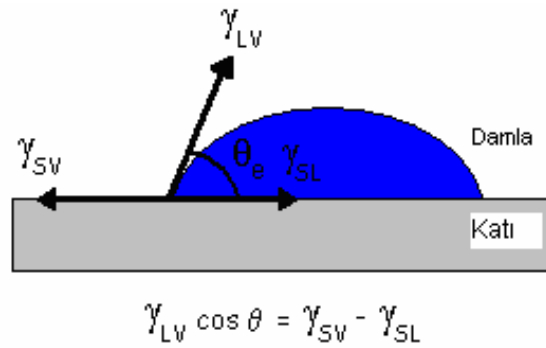
Sıvıların yüzey gerilimi doğrudan ölçülebilmektedir. Bunun için geliştirilmiş metotlar bulunmaktadır. Ancak katıların yüzey gerilimi ölçümünde sıvılardaki gibi direkt ölçüm metotları yoktur. Bu yüzden katıların yüzey gerilimi temas açısı ölçümüyle dolaylı olarak ölçülür [Erbil, 2006].

### 3.2. TEMAS AÇISI

Katı yüzeylerde de aynı sıvılardaki gibi, moleküllerdeki denkleşmemiş kuvvetlerin etkilerinden dolayı serbest bir enerji meydana gelir. Katı yüzeyindeki bu

serbest yüzey enerjisi her noktada aynı değildir. Sıvılarda yüzeyle sıvının içi arasında dinamik bir denge olduğundan, her noktada serbest yüzey enerjisi aynı değerdedir.

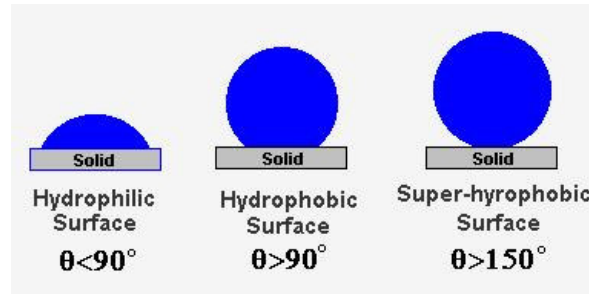
Katıların yüzey gerilimi sıvılarda olduğu gibi direk ölçülemez ve bu yüzden dolaylı yollardan ölçüm metotları gerektirir. Bir katıdaki yüzey moleküllerinin hareketi sıvılarla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür ve katı yüzeyleri serbest yüzey enerjisini minimize etmek için sıvılarda istenen yüzey özelliklerini göstermezler. Katı yüzey gerilimini belirlemenin tek yolu temastaki bir sıvıya karşı sergilediği davranışlarıdır.



Şekil 3.2. Bir katı yüzeyinde duran sıvı damlası (www.ksvltd.com).

Şekil 3.2' de gösterilen katı yüzeyinde duran sıvı damlası üzerine etkiyen üç kuvvet katı- sıvı arasındaki, SL; sıvı- buhar arasındaki, LV; katı- buhar arasındaki, SV yüzeyler arası gerilim etkisiyle dengededir. Temas açısı,  $\theta$ , katı, sıvı ve gaz fazlarının kesiştiği üçlü faz sınırında sıvı damlası tarafından oluşturulan açıdır. Katı ve sıvı yüzeyine teğet düzlem arasında, kesişme noktasında oluşur [Vafaei, 2004].

Temas açısı bir sıvı tarafından katının ıslatılabilirliğinin nicel ölçüsüdür. Çok fazla uçucu olmadıkça ve düşük bir viskoziteye sahip olan herhangi bir sıvı (cıva gibi sıvı metalleri dahil) sıvı damlası olarak kullanılabilir. Düşük  $\theta$  değerleri güçlü bir katı- sıvı etkileşmesini gösterir. Bu durumda sıvı katıyı iyi ıslatır ve katı üzerinde yayılır. Bununla beraber yüksek  $\theta$  değerleri zayıf etkileşim ve zayıf ıslatma gösterirler. Eğer  $\theta < 90^\circ$  ise sıvının katıyı ıslattığı söylenir. Sıfır temas açısı tamamen ıslatmayı gösterir. Eğer  $\theta > 90^\circ$  ise, sıvı katıyı ıslatmaz.

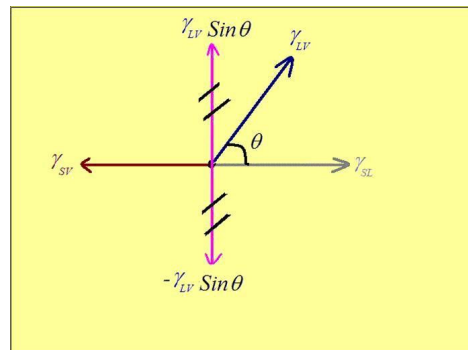


Şekil 3.3. Farklı katı yüzeyler üzerinde sıvı damlasının oluşturduğu temas açıları.

Temas açısını 1805 yılında ilk defa Thomas Young tanımlamıştır. Üçlü faz temas noktası olarak adlandırılan üç fazın kesişme noktasındaki kuvvetlerin vektörel toplamı Young eşitliği ile verilir:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (\text{Young Eşitliği}) \quad (3.1)$$

$\gamma$ , yüzey gerilimini (veya serbest yüzey enerjisi) verir. Eğer katının yüzey enerjisi yüksek ise, yani  $\gamma_{SV} > (\gamma_{SL} + \gamma_{LV})$  ise, Young eşitliği  $\theta=0$  olacağından, ( $\cos \theta=1$ ) olur ki bu da o katı üzerinde sıvının tamamen yayıldığını gösterir. Diğer taraftan, üçlü faz temas noktasında vektörel kuvvetleri dengelemek üzere, yukarı doğru bir ( $\gamma_{LV} \sin \theta$ ) bileşeni bulunur. Şekil 3.4’ de görüldüğü gibi bu kuvvet, katının yüzey alanı gerinimine karşılık gelen ( $-\gamma_{LV} \sin \theta$ ) kuvveti tarafından dengelenir.



Şekil 3.4. Katı bir yüzeydeki bir sıvı damlasının yüzey gerilimi bileşenleri.

Termodinamik olarak Young eşitliğinin türetilmesi mümkündür.  $\Delta A$  katı üzerinde temas eden sıvının alanındaki değişim ise, serbest yüzey enerjisindeki değişim  $\Delta G$ ;

$$\Delta G = \Delta A(\gamma_{SL} - \gamma_{SV}) + \Delta A \gamma_{LV} \cos(\theta - \Delta\theta) \quad (3.2)$$

Denge anında, yüzeyler arası alan sıfıra doğru limite giderken,

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta A} = 0 \quad (3.3)$$

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos \theta = 0 \quad (3.4)$$

veya

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (3.5)$$

yazılabilir. Young eşitliği 1869 yılında Dupré tarafından geliştirilmiştir.  $W_{SL}$ , sıvı ve katı arasındaki tersinir adezyon işi olmak üzere,

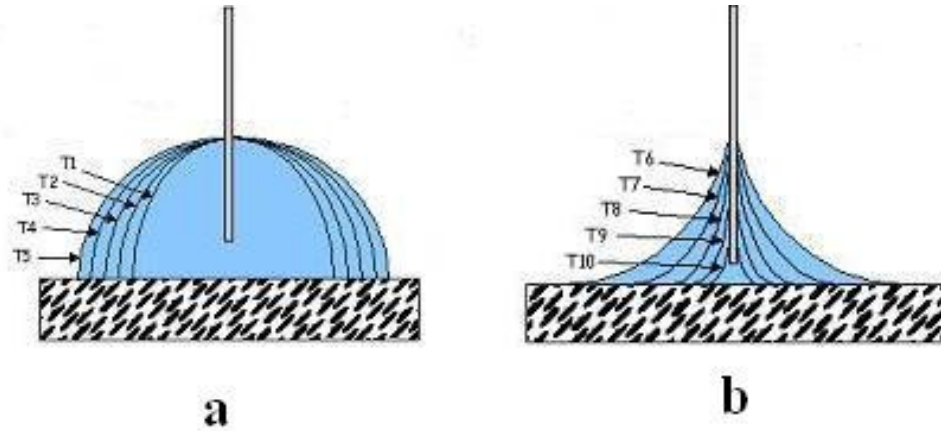
$$W_{SL} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (3.6)$$

$$W_{SL} = \gamma_{SV}(1 + \cos \theta) \quad \text{Young- Dupré eşitliği} \quad (3.7)$$

Bu eşitlik, temas açısının adezyonun yaptığı iş ve yüzeyler arası serbest enerji ile ilişkisini gösteren termodinamik eşitliktir.  $\theta$  değerleri küçük iken, adezyon işi küçüktür ve sıvıyı katıdan ayırmak için oldukça fazla enerji harcanması gerekmektedir.  $\theta=0^\circ$  ise  $W_{SL}=2\gamma_{LV}$ ;  $\theta=90^\circ$  ise  $W_{SL}=\gamma_{LV}$  ve  $\theta=180^\circ$  ise  $W_{SL}=0$  dır ki buda katının yüzeyinden tamamen küresel cıva damlasını ayırmak için yapılması gereken iş olmadığını gösterir.

### 3.3. Temas Açısı Karmaşası (Histeresiz)

Katı- sıvı etkileşimlerini karakterize etmek için tek bir statik temas açısı ölçümleri yeterli değildir. Çünkü pratikte bir katı yüzeyinde sadece denge temas açısı,  $\theta_e$ , yoktur. Young eşitliğinin türetilmesinde katı yüzeylerinin kimyasal homojen, atomik skalada düz ve ideal bir katı olduğu varsayılmıştır. Ancak gerçekte böyle bir yüzey yoktur, bütün katı yüzeyleri bir derece heterojenlik ve yüzey kusurları içerirler. Deneysel olarak standartize edilmiş 2 tip temas açısı ölçümü vardır, aşağıdaki şekille şematize edilmiştir:



Şekil 3.5. a) Düz bir zeminde oluşturulmuş ilerleyen temas açısı, b) gerileyen temas açısı (www.ksvltd.com).

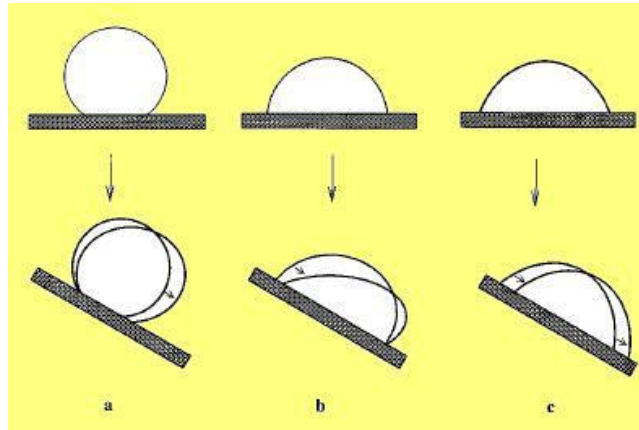
Sıvı damlası bir şırıngaya bağlı iğneden enjekte edilerek fresh bir katı üzerinde ilerlemesine izin verilerek oluşturulduğunda “ilerleyen temas açısı,  $\theta_a$ ” adını alır. Her damla- katı sistemi için üçlü faz çizgisi aşılmadan önce  $\theta_a$  nın maksimum bir değeri vardır.

Gerileyen temas açısı,  $\theta_r$ , substrat yüzeyi üzerinde henüz oluşturulmuş durağan bir damladan belli bir hacimde sıvı damlasının şırınga içine geri çekilmesiyle damlada büzülme olduğu zaman oluşur.  $\theta_r$  nin kesin ölçümü oldukça zordur.

İlerleyen ve gerileyen temas açıları arasındaki fark “temas açısı karmaşası” olarak adlandırılır.

$$H = \theta_a - \theta_r \quad (3.8)$$

$\theta_a$  ve  $\theta_r$  her ikisinde yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyin kimyasal heterojen olmasına bağlıdır.



Şekil 3.6. Su damlalarının eğimlendirilmiş bir yüzeyde temas açısı, damlalar temas açısı karmaşası yüzünden farklı davranırlar [Öner, 2000].

Yatay bir yüzey üzerinde duran su damlası yüzey eğimlendirildiğinde farklı yüzeylerde farklı davranır. Şekil 3.6 bu olayı şematik olarak göstermektedir. a’ da alt kısımda damla ilerleyebilmekte, ancak üst kısım gerileyen temas açısına ulaşana kadar yüzeye bitişik kalmaktadır. Damlanın şeklinin değişmesinden dolayı ilerlemeye karşı bir bariyer vardır. Hacim sabit kalmakta, fakat hava- su ara yüzey alanı artmaktadır. Şekil 3.6.b’ deki yüzeyde tam tersi durum söz konusudur. Üst kısım geri çekilmekte, alt kısım ise ilerleyen açığa ulaşana kadar bitişik kalmaktadır. Burada da şekil değişikliğinden dolayı geri çekilmeye karşı bir bariyer vardır. c’ deki yüzeyde ise damla şeklinde değişme olmaksızın kendiliğinden ilerleyebilmekte ve gerileyebilmektedir [Quéré, 1998; Mahadevan, 2001; Öner, 2000].

Pratikte ilerleyen temas açısı gerileyen temas açısından büyüktür, denge temas açısı ise ilerleyen ve gerileyen temas açılarının arasında bir değerdedir. Yüzey ne kadar temiz ve ideale yakın olursa, ilerleme ve gerileme açıları arasındaki fark o kadar az olur. Heterojenliğin olmadığı, tamamen homojen ve pürüzsüz yüzeylerde (ideal yüzeylerde) ilerleyen ve gerileyen temas açıları birbirine eşittir.

Yüzey pürüzlülüğü ve katı yüzeyindeki mikroskopik kimyasal heterojenlik temas açısı karmaşasını etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunun yanında kirlilik, damla boyutu etkisi, yüzeydeki moleküler yer değiştirme ve deformasyon, gözenekler arasına giren sıvı moleküllerinin boyutu ve katı yüzeyindeki yarıklar karmaşayı etkileyen diğer faktörlerdendir.

### **3.4. Temas Açısı Ölçümleri**

Temas açısı ölçümleri için bugüne kadar pek çok farklı yöntemler geliştirilmiştir, ancak günümüzde bir kaçı yoğun olarak kullanılmaktadır. Bunlardan tercih dilen ikisi; gözeneksiz düz bir katı üzerindeki damlanın statik temas açısının video kamera kullanarak veya optik teleskop –gonyometre- ile ölçümü ve diğeri dinamik (hareket eden) katı bir levhanın bir test sıvısı içine daldırılmasıyla etkileşim kuvvetlerini ölçen tensiyometre kullanarak dinamik temas açısının ölçümüdür. Her iki yaklaşımda avantaj ve dezavantajları vardır [Lai, 2003].

#### **3.4.1. Statik Optik Teleskop (Gonyometre)**

Gonyometrik yaklaşımda temel, damlanın şeklinin analiz edilmesidir. Düz bir katı yüzey üzerindeki durgun bir damlanın temas açısı gonyometre- açölçer göz merceği bulunan mikroskop kullanarak veya son zamanlarda daha geliştirilmiş uygun büyütme lensi olan, çektiği resimde tanjant değerini belirleyen resim- analiz yazılımı ile bilgisayar kontrollü bir video kamera kullanarak ölçülebilir.

Gonyometrik olarak temas açısı iki şekilde ölçülür. Durgun damla yöntemi ve yakalanmış kabarcık yöntemi.

Durgun damla yöntemi katı- sıvı faz sisteminden oluşur. Damla profili fotoğraflanır, üçlü faz temas noktasındaki durağan damlanın tanjantı alınarak temas açısı hesaplanır. Statik temas açısı ölçümü yanında ilerleyen ve gerileyen temas açılarının ölçümleri de yapılabilmektedir.

Yakalanmış kabarcık yöntemi ise üçlü faz dengesine dayanmaktadır. Yakalanmış hava kabarcığı, katı ile temas eden sıvı içerisinde, katının alt yüzeyinde ucu kıvrık mikrometre şırınga yardımıyla oluşturulur. Temas açısı gonyometrik mikroskop veya video kamera ile ölçülür.

Statik temas açısı ölçüm yöntemlerinin birçok avantajları vardır. En önemlisi kullanımı çok basit bir yöntemdir. Ölçüm almaya yeterli derecede düz olan ve cihaza yerleştirilebilecek şekilde herhangi bir katı ile ölçüm alınabilir. Denemeler çok az miktarda sıvı kullanılarak yapılabilir.

Bunların yanında yöntemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ölçümlerde tanjant çizgisinin belirlenmesi araştırmacının subjektifliğine ve tutarlığına bağlıdır. Bu hatalı ölçüm alınmasına sebep olabilir. Bir diğer olumsuzluk da, (fiber) tellerin ölçümlerinde uygulanan yüzeye yeterince küçük damla damlatılamamasından kaynaklanır.

## 4. BUHARLAŞMA

### 4.1. Nemli Havanın Özellikleri

Kuru hava, bir takım gazların karışımından meydana gelir. Ortalama molekül ağırlığı 28,966 g/mol olan kuru havanın içinde bulunan başlıca gazlar, karışım içindeki mol oranına göre tablodaki gibidir:

Çizelge 4.1. Kuru havanın özellikleri.

| Gaz                   | Formül          | Oran (%) |
|-----------------------|-----------------|----------|
| <u>Nitrojen</u>       | N <sub>2</sub>  | 78.084   |
| <u>Oksijen</u>        | O <sub>2</sub>  | 20.946   |
| <u>Argon</u>          | Ar              | 0.930    |
| <u>Karbondiyoksit</u> | CO <sub>2</sub> | 0.034    |

Hava, sıcaklığa bağlı olarak belirli bir miktarda buharı bünyesinde tutabilir. Hava+ su buharı karışımına "nemli hava" denir. Havanın içerdiği su buharına "nem" denir. Hava içindeki su buharı miktarı çevre şartlarına ve meteorolojik faktörlere bağlı olarak değişir. Su her sıcaklıkta buharlaşabildiği için havada her zaman su buharı bulunur.

Nemli havanın özelliklerinin incelenmesi “psikrometri” adı verilen termodinamiğin özel bir dalının konusu olmaktadır.

#### 4.1.1. Su Buharı Buhar Basıncı

Sıvılar her sıcaklıkta buharlaşabilmektedirler. Kapalı bir kaba konulan sıvı ise kabın içinde buharlaşmakta ve oluşan bu sıvı buharı kabın çeperlerine bir baskı yapmaktadır. Bu basınca “sıvının buhar basıncı” denir. Buhar basıncı, belli bir sıcaklıkta, buhar ve sıvı yüzeyi arasındaki buharlaşan ve yoğunlaşan moleküllerin sayısı arasında bir dengeye varılınca, o sıcaklık için sabit bir değere ulaşır ve buna da “sıvının doymuş buhar basıncı” denilir. Her sıvının doymuş buhar basıncı sıcaklığın yükselmesi ile artar.

#### 4.1.2. Bağlı Nem ve Mutlak Nem

Havanın içerdiği su buharı miktarına havanın nemi denir. Havanın nemi iki şekilde ifade edilir:

1. Bağlı nem
2. Mutlak nem

Bağlı nem, 1 m<sup>3</sup> nemli havanın içerdiği su buharı miktarının aynı sıcaklık ve aynı toplam basınçta içerebileceği maksimum su buharı miktarına oranına denir. % ile tanımlanır.

Bağlı nem havadaki nemin mutlak miktarını göstermez. Havanın neme ne oranda doymuş olduğunu gösterir. Bağlı nem, herhangi bir sıcaklıkta havanın buharlaşma ile yoğunlaşmanın ne kadar dengede olduğunu gösterir. Diğer bir deyişle havanın denge buhar basıncına olan uzaklığı veya yakınlığı hakkında fikir verir.

Bağlı nem %100 olduğunda su, buharıyla dinamik dengede demektir. %70 bağlı nem ise, havanın doymuş hale gelebilmesi için gerekli su buharının %70 'ini içeriyor demektir. Isı derecesi arttıkça aynı hacimdeki havanın doyma oranı da yükselir. Aksine ısı derecesi düşünce daha az oranda doyar.

Termodinamik olarak, bağıl nem (RH), havadaki su buharı kısmi basıncının ( $P_v$ ), verilen sıcaklık ve basınçta doymuş durumdaki havanın kısmi buhar basıncına ( $P_{vs}$ ) oranı olarak verilir.

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad \text{bağıl nem} \quad (4.2)$$

Tam kuru hava için  $P_v=0$  olduğundan  $RH=\% 0$ , doymuş nemli havada  $P_v = P_{vs}$  olduğundan  $RH=\% 100$  ve doymamış nemli havada ise  $P_v < P_{vs}$  olduğundan  $\% 0 < RH < \% 100$  değerleri elde edilir.

Sıcaklık arttıkça bağıl nem azalır. Bunun nedeni ısınan havanın hacmi genişler ve alabileceği nem artar. Sıcaklık azaldıkça, havanın hacmi daralır ve alabileceği nem azalır. Böylece havanın nem açığı azalır.

Mutlak nem, 1 m<sup>3</sup> nemli havanın içerdiği su buharı miktarının g olarak, kuru hava miktarına oranına (w) denir. 1 kg kuru havanın içerdiği su buharı miktarı olarak da tanımlanabilir. (W= g su buharı / g kuru hava)

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (4.3)$$

Aynı zamanda spesifik nem olarak da adlandırılan mutlak nem, kuru hava ve su buharının kısmi basınçları ve molekül ağırlıkları cinsinden de yazılabilir.

$$m_v = \frac{P_v V}{R_v T} = \frac{P_v V M_v}{\bar{R} T} \quad m_a = \frac{P_a V}{R_a T} = \frac{P_a V M_a}{\bar{R} T} \quad (4.4)$$

$$w = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{R_a P_v}{R_v P_a} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} \quad (4.5)$$

Bir gaz karışımının basıncı, karışımı oluşturan gazların toplamına eşit olacağından  $P = P_a + P_v$  ve  $P_a = P - P_v$  eşitlikte yazılırsa ve su buharının molekül ağırlığının kuru havanın molekül ağırlığına oranı 0,622 yerine yazılırsa;

$$w = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (4.6)$$

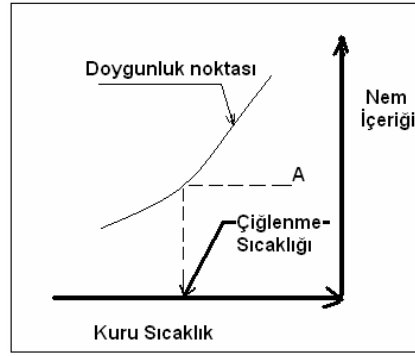
Mutlak nem, bağıl nem değerini içerecek şekilde yazılabilir. Daha önce belirtildiği gibi nem ( $RH = P_v/P_{vs}$ ) şeklinde ifade edilip bu eşitlikten ( $P_v$ ) bulunur ve (4.6) numaralı eşitlikte yerine konulursa

$$w = 0,6219 \frac{RH (P_{vs})}{P - RH (P_{vs})} \quad \text{elde edilir.} \quad (4.7)$$

#### 4.1.3. Şebnem Noktası (Çiğlenme Sıcaklığı)

Hava doygun halde bulunmadığı takdirde soğutulması halinde belli bir sıcaklığa ulaşıncaya kadar yoğunlaşma meydana gelmez. Su buharı kısmi basıncı, bu sıcaklıkta doygun haldeki su buharı basıncına eşit olduğu anda yoğunlaşma başlar. Şebnem noktası, sabit basınçta soğutulan nemli havanın içerdiği su buharının yoğunlaşmaya başladığı sıcaklığa denir. Bu sıcaklıkta hava su buharı ile doygun hale gelmiştir.

% 100 bağıl nem oranında, gerçek sıcaklık ve çiğlenme sıcaklıkları aynıdır. Bağıl nem havadaki nemin nasıl olduğunun bir ölçüsü ise, çiğlenme sıcaklığı havadaki su buharının ne kadar olduğunun kesin bir ölçüsüdür.



Şekil 4.1. Çiğlenme Sıcaklığı.

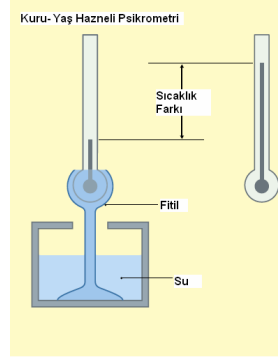
Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi başlangıç durumu A olan nemli hava ile doldurulmuş bir kap, sabit nem içeriğinde, sabit buhar basıncında soğutulursa, sıcaklık doygunluk çizgisine ulaşacaktır ve bu noktada su buharı yoğunlaşacaktır. Çiğlenme sıcaklığı doygunluk noktasına ulaşmadan önceki yoğunlaşmanın başladığı ilk sıcaklıktır.

#### 4.1.4. Hava Neminin Ölçüm Metodları

Havanın nemini ölçen cihazlara Higrometre adı verilir. Aşağıda havanın bağıl nemini ölçmek için kullanılan bazı yöntemler anlatılmaktadır.

##### 4.1.4.1. Kuru- Yaş Termometre Metodu (Psikrometre)

Higrometre, havanın veya herhangi bir gaz karışımının nemini veya neme doygunluğunu ölçmeye yarayan alettir. En iyi bilineni bir tarafta kuru diğer tarafta yaş hazneye sahip “kuru-yaş hazneli psikrometri”lerdir. Biri normal havaya açık ve diğeri sulu bir haznede damıtık suyla sürekli ıslak tutulan bir fitille kaplı iki ayrı termometreden oluşur. Buna göre kuru termometre ile nemli havanın sıcaklığı ölçülürken yaş termometre ile doyma anındaki sıcaklık ölçülmektedir.



Şekil 4.2. Kuru- yaş hazneli psikrometri [Agarwal, 2006].

Eğer hava doymun değilse, ıslak haznedeki fitilin suyu buharlaşır ve hava içine difüze olur. Fitilde kalan suyun sıcaklığı, sudan havaya ısı iletimi olduğundan soğur, bu nedenle kuru- haznedeki sıcaklığın altına düşer.

Hava ve suyun sıcaklıkları eşit olduğu anda ısı iletimi sona erer, fakat hava su buharı ile doymun hale ulaşmamış ise buharlaşma devam eder. Böylece suyun sıcaklığı havanın sıcaklığının altına düşer. Bu halde havadan suya ısı iletimi başlar. Havadan nemli fitile ısı geçişi aralarında bir sıcaklık dengesi kuruluncaya kadar devam eder. Bu anda konveksiyonla iletilen ısı, fitilden suyun buharlaşması için gerekli gizli ısıya eşittir.

Denge durumunun olduğu andaki sıcaklık atmosferik şartlara ve fitilin üstünden geçen gaz akış hızına bağlıdır. Bu sırada ölçülen denge sıcaklığı Psikrometrik Yaş Termometre Sıcaklığı ( $t_s$ ) olarak adlandırılır. Yaş termometre sıcaklığı nemli fitil ve hava arasındaki kütle ve ısı transferi oranlarına dayanır. Üzerinden hava cereyanı geçirmek suretiyle su en fazla bu sıcaklığa kadar soğutulabilir. Hava su buharına doymun hale geldiğinde ise ıslak fitilden su buharlaşmaz. Bu durumda  $t_k = t_s$  dir.

Buna göre doymamış nemli hava için her durumda yaş termometre sıcaklığı, kuru termometre sıcaklığından daha düşük olup buharlaşma hızı havanın kuruluğuna bağlıdır. Nem yüksek olduğu zaman buharlaşma oranı düşüktür ve iki termometre

sıcaklıkları arasındaki fark da düşüktür. İki termometre değeri arasındaki fark ne kadar fazlaysa hava o kadar kuru, ne kadar azsa hava o kadar nemli olur.

Yaş ve kuru termometre sıcaklıklarına göre havanın bağıl nemi;

$$RH = \frac{P_{vs}(t_s) - \frac{1}{2} \Delta t}{P_{vs}(t_k)} \quad (4.8)$$

$$\Delta t = t_k - t_s \quad (4.9)$$

Eşitliği ile hesaplanabilir.

Kuru ve yaş termometre sıcaklıklarından yararlanılarak bağıl nemin belirlenmesi işleminin kolaylaştırılabilmesi için bazı özel çizelgeler hazırlanmıştır. Bu çizelgeler yardımıyla, kuru termometre sıcaklığı ile kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki farktan yararlanılarak basınç değerleri de göz önüne alınarak bağıl nem bulunabilir [Yağcıoğlu, 1999].

#### 4.1.4.2. Çiğ Noktası Higrometresi

Belli bir sıcaklıktaki havayı basıncını ve içindeki su buharı miktarını değiştirmeden nem ile doyana kadar soğutursak ulaştığımız sıcaklık çiğ noktası sıcaklığıdır. Havanın belli sıcaklıkta tutacağı azami nem oranı sabittir. Havayı nem miktarını değiştirmeden soğutarak ya da nem ilave ederek bu sınır aşılsa yoğunlaşma meydana gelir.

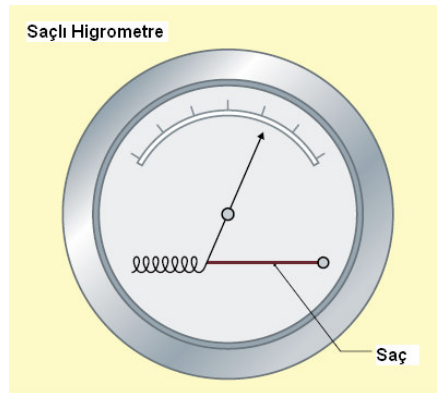
En doğru bağıl nem tayin etme metodu çiğ noktası sıcaklığını ölçmektir. Bağıl nem havada bulunan su buharının kısmı basıncının ( $P_v$ ), doymuş durumdaki havanın kısmı buhar basıncına ( $P_{vs}$ ), oranıdır.  $P_{vs}$  basıncı değişik sıcaklıklar için doymuş su

buharının denge basıncını veren tablolardan kolayca bulunmaktadır. Havada bulunan su buharı kısmı basıncının ( $P_v$ ) bulunması ise daha zordur. Çiğ noktası higrometresi ile  $P_v$  değeri bulunmakta buradan da bağıl neme geçilmektedir [Drigo ve Alocco, 1955].

Higrometrenin çalışma prensibi parlatılmış ve açık renk bir yüzeyi, etraftaki havada mevcut su buharının bu yüzey üzerinde yoğunlaşmasını sağlayacak sıcaklığa kadar soğutmaktan ibarettir. Bu sıcaklığa inilince nem parlatılmış yüzey üzerine çöker ve kendini ince bir buğu tabakası şeklinde gösterir. Yoğunlaşan nemlerde yüzey matlaşınca yüzeyin sıcaklığı ölçülür. Bu ölçülen sıcaklığa karşılık gelen buhar basıncı tablolardan bulunur, buradan da bağıl neme geçilir.

#### 4.1.4.3. Saçlı Higrometre

Diğer tip bir higrometre de nem doygunluğunu belirlemek için insan saçını kullanır. Mekanik higrometre olarak da adlandırılır ve bağıl neme bağlı olarak saç telinin kısılması veya genleşmesi prensibine dayanır. Saç tellerinin boyu havadaki nem miktarı ile orantılı olarak artar. Bu değişimlerde higrometrede kullanılan ibreyi hareket ettirir. İbrenin ucu kalibre edilmiş bölmeler karşısında durur ve buradan bağıl nem okunur.



Şekil 4.3. Saçlı higrometre [Agarwal, 2006].

#### 4.1.5. Bağlı Nemin Sabitlenmesi

Ortamın bağli nemi farklı konsantrasyonlardaki potasyum hidroksit, sülfürik asit ve doygun tuz çözeltileri hazırlanarak sabitlenebilir. Doygun tuz çözeltileri kullanılarak bağli nemin sabitlenmesi hem daha ekonomik, hem de daha kolaydır. Özel doygun tuz çözeltileri üstlerindeki alanın nemini hep aynı değerde tutarlar. Nem sadece sıcaklıktan etkilenir [Carr, 1949].

Karışımındaki bir bileşen için bileşenin kısmi buhar basıncının bileşenin denge buhar basıncına oranı ( $P_A/P_A^*$ ), sıvı karışımındaki ilgili bileşenin mol kesrine yaklaşık olarak eşittir. Buna Rault Yasası adı verilir.

$$P_A = X_A P_A^* \quad \text{Rault Yasası} \quad (4.10)$$

Rault yasasına uyan çözeltilere ideal çözeltiler denir. Rault yasası, moleküllerin sıvı fazdan ayrılma ve geri dönme hızları dikkate alınarak moleküler düzeyde açıklanırsa, bir ikinci bileşen varlığında A moleküllerinin sıvı yüzeyinden ayrılma hızının azaldığını, fakat sıvı faza geri dönme hızının etkilenmediğini ifade eder.

A moleküllerinin yüzeyden ayrılma hızı, bu moleküllerin yüzeydeki sayısı ile, buda A'nın mol kesri ile orantılıdır. Orantı sabiti k olmak üzere buharlaşma hızı,

$$\text{Buharlaşma hızı} = kX_A \quad (4.11)$$

olur. Moleküllerin yoğunlaşma hızı, gaz fazındaki bu moleküllerin derişimi ile, buda bileşenin kısmi basıncı ile orantılıdır. Orantı sabiti k' olmak üzere, yoğunlaşma hızı,

$$\text{Yoğunlaşma hızı} = k'P_A \quad (4.12)$$

olur. Denge durumunda buharlaşma ve yoğunlaşma hızları birbirine eşit olur.

$$k'P_A = kX_A \quad (4.13)$$

$$P_A = \frac{k}{k'} X_A \quad (4.14)$$

Saf sıvı için  $X_A=1,0$  olduğu için, bilinen denge buhar basıncı

$$P_A^* = \frac{k}{k'} \quad (4.15)$$

Bu bağıntı eşitlik (4.13) ile birleştirildiğinde eşitlik (4.10) yani Rault yasası elde edilmiş olur [Atkins, 1998].

Çözünen uçucu olmadığına çözeltinin  $P_A$  buhar basıncı çözücünün çözeltideki  $P_A^*$  kısmi buhar basıncına eşittir. Rault yasasına göre saf haldeki çözücünün  $P_A^*$  buhar basıncı daima çözeltideki çözücünün  $P_A$  kısmi buhar basıncından yüksek olacağından dolayı çözeltinin buhar basıncı saf çözücüye göre düşmüştür. Buna buhar basıncı düşmesi denir.

Çözeltiler üstlerindeki atmosferin bağıl nemini sabit tutarlar. Çünkü verilen sıcaklıkta uçucu olmayan herhangi bir maddenin sulu çözeltisi buhar fazı ile dengede olduğunda belirli bir su buharı basıncına sahip olacaktır. İçinde aşırı katı olan doymuş çözeltiler (süper doymuş da denilmektedir) değişen nem koşulları altında sabit buhar basıncı değerini koruyabilir. Çünkü suyun fazlası bir miktar katının çözeltiye geçmesine sebep olur ve sudaki kayıp çözünmeyen katının çökmesini sağlar. Katı üzerinde fazla sıvı kalmadığı zaman sıvı içine difüzyon çok yavaştır ve koşulları değişmeden kalacaktır. Böylelikle, buhar basıncını değiştirmeksizin önemli miktarda su kazanılıp kaybedilebilir.

Uçucu olmayan katı bir maddenin sulu çözeltisinin belirli bir sıcaklıktaki buhar basıncı saf suyunkinden daha düşüktür. Buhar basıncındaki bu düşüş çözelti konsantrasyonunun artmasıyla daha büyük hale gelir. Doymuş bir tuz çözeltisi hava

ile temas halinde bırakıldığında havanın nemi katının yüzeyinde yoğunlaşır. Bu buharlaşma ortamın buhar basıncı doymuş tuz çözeltisinin buhar basıncının altına düşene kadar devam eder. Çözeltilerin buhar basınçları sıvılarının buhar basınçlarından daha düşük olacağından doymuş tuz çözeltisinin buhar basıncı da suyunkinden düşüktür. Bu durumda doymuş tuz çözeltisinin yüzeyinde toplanan su ancak ortamın sıcaklığında doymuş çözeltinin buhar basıncına uygun düşen bağıl nem değerinde buharlaşır [Adams, 1929; O'Brien, 1948].

Çizelge 4.2. Bazı doymuş tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri [Winston, 1960].

| Doygun Tuz Çözeltileri                               | 2°C | 10°C | 20°C | 25°C | 30°C | 50°C |
|------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O                 | 35  | 34   | 33   | 32,5 | 32,5 | 31,5 |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O | 66  | ...  | 55,5 | 50,5 | 47   | ...  |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                      | ... | 75   | 65,5 | 62,5 | 59,5 | 48   |
| NaNO <sub>3</sub>                                    | ... | 77,5 | 76   | 74   | 72,5 | 67,5 |
| KCl                                                  | 88  | 88   | 85   | 85   | 84,5 | 80,5 |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                      | ... | 98   | 96,5 | 96   | 93,5 | 92,5 |

## 5. DİFÜZYON

### 5.1. Difüzyon ve Sıvı Buharlaşması

Difüzyon, gaz, sıvı veya katı bir maddenin dışardan etki olmaksızın konsantrasyon farklılığı, sıcaklık ve basınç gibi sadece ortam koşullarına bağlı olarak başka bir gaz, sıvı veya katı bir madde içerisinde kendiliğinden rastgele hareket etmesi olayıdır. Dış ortam buna uygun ise, bir sıvının o dış ortam içinde kendiliğinden buharlaşması ile oluşan buharın moleküler göçüdür.

Sıvı buharlaşması termodinamik bir prosestir, bu proseste sıvı molekülleri yeterli enerjiyi dıştan veya kendi içlerinden alarak, sıvı yüzeyini buhar halinde terk edip gaz fazına geçerler. Buharlaşma prosesi sıvı yüzeyinin hemen üzerindeki gaz ortamında gerçekleştiğinden, ancak orada mevcut olan buharın difüzyonla uzaklaşması, yeni sıvı moleküllerinin buharlaşmasını sağlayacağından, buharlaşma hızı difüzyona bağlıdır.

Kısaca tanımlanırsa, difüzyon konsantrasyon gradientine (bir ortamda uzaklığa göre konsantrasyonun düzgün değişimi) ve zamana bağlı olarak dışardan hiçbir etki olmadan kendiliğinden meydana gelen moleküler hareket olayıdır, esasında bir kütle transferidir.

Örneğin, içinde kolonya bulunan bir şişenin ağzını açtığımızda kolonya kokusu odanın her tarafına yayılacak ve şişeden en uzakta olan köşede bile kolonyanın kokusu hissedilecektir. Kolonya kokusunu odanın en uzak köşesine kadar götüren olay difüzyondur.

Difüzyon, duruma bağlı olarak çok yavaş gerçekleşen bir olay olabilir. Gazlar için difüzyon hızı saniyede 0,16 cm, sıvılarda ise  $8 \times 10^{-4}$  cm/saniye, katılarda ise;

$1,6 \times 10^{-7}$  cm/saniyedir. Bu değerler sabit değildir, sıcaklık ve moleküllerin cinsiyle değişen değerlerdir.

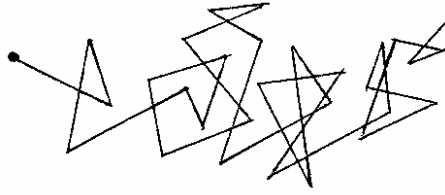
## 5.2. Difüzyon Tipleri

Difüzyon olayı, katı, sıvı ve gaz ortamlarında olabilir, bunlardan “gaz difüzyonu” bizim için daha önemli olduğundan üzerinde daha çok durulacaktır.

### 5.2.1. Gazlarda Difüzyon

Her gaz molekülü diğer gaz molekülleriyle sık sık çarpışır ve bunun sonucu olarak yön değiştirir. Gaz molekülleri, gaz içinde bir noktadan diğerine ulaşmayı yavaşlatan zik-zaklı bir yol izler. Buna rağmen, gaz moleküllerinin belirli bir yöndeki net hızı, ortalama hızlarına bağlıdır. Termodinamik olarak, gazlar kapladıkları hacim içinde homojen bir dağılım göstermiyorlarsa, bu farkı giderecek ve kendi konsantrasyonunu kabın her tarafına eşit yapacak şekilde hareket ederler. Bu olaya “gazların difüzyonu” denir. Difüzyon bir konsantrasyon farkından başlatıldığı gibi bir sıcaklık ve ya basınç farkı da bu olayı başlatabilir.

Gaz difüzyonu, gaz moleküllerinin bir başka gaz molekülleri içinde karmaşık hareket ile ilerlerken her iki gazın özelliklerine göre ve belli bir düzene göre adım adım karışımıdır. Moleküler hız çok büyük olmasına rağmen gaz difüzyonunun tamamlanması bu hıza nazaran uzun zaman alır. Gazın yavaşça yayılmasının nedeni Şekil 5.1’ de gösterildiği gibi çeşitli moleküller arası çarpışmalardan kaynaklanır ki, bu olayda karmaşık moleküler hareket olarak tanımlanır. Difüze olan maddenin hem kendi molekülleri ile, hem de eğer sistem içinde başka maddeler varsa bu maddelerin buhar halindeki molekülleri ile çarpışıp zig-zaglı yol izlemesi, difüzyon olayının yavaşlamasına neden olur. Molekülün ilerlemesi sonucu aldığı ortalama mesafeye “ortalama serbest yol” denir.



Şekil 5.1. Birbiri ardından gelen çarpışmalar sonucu gaz molekülünün ilerlemesi.

Hafif gazların difüzyon hızı ağır gazlardan daha fazladır. Thomas Graham, aynı basınç ve sıcaklık altında gazların difüzyon hızlarının, molar kütlelerinin karekökü ile ters orantılı olduğunu bulmuştur. Bu “Graham’ ın difüzyon kanunu” olarak bilinir ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{M_{w2}}{M_{w1}}} \quad (5.1)$$

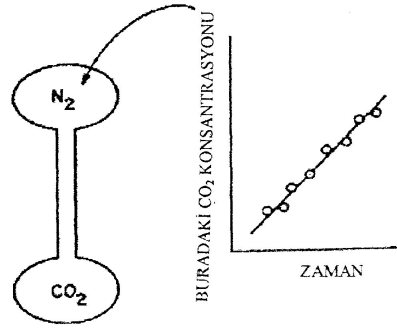
$v_1$  ve  $v_2$ , 1. ve 2. gazların difüzyon hızı;  $M_{w1}$  ve  $M_{w2}$  ise bunların molar kütleleridir. Bu eşitlik deneysel sonuçlardan çıkarıldığı gibi gazların kinetik teorisinden de çıkartılabilir. Herhangi iki gaz aynı sıcaklıkta ise, bunlar aynı kinetik enerjiye sahip olacaklardır varsayımından yola çıkılarak;

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (5.2)$$

Buradan, 1 mol gaz için  $m_1 = M_{w1}$  alınarak, (5.1) eşitliği elde edilir. Difüzyon hızı, difüzlenen molekülün hareketinin hızı, dolayısıyla da molar kütlesi ile orantılıdır.

Difüzyonun matematiksel tanımları ve temelleri Fick’ in difüzyon kanunları üzerine kurulmuştur. Bir denemeyle açıklanırsa; Şekil 5.2’ deki iki ampul başlangıçta farklı gazlar içermektedir. Bu ampuller bir kapiler cam boruyla birbirlerine

bağlanmışır. Ampuller, sabit sıcaklık ve basınçta ve eşit hacimdedirler, fakat bir ampul karbondioksit ve diğeri de nitrojen gazıyla doldurulmuştur. İki gazın birbiri içinde nasıl bir hızla karıştığını bulmak için  $\text{CO}_2$  gazının konsantrasyonu ampulde başlangıç olarak sadece azot gazı varken  $\text{CO}_2$  ölçülür ki bu konsantrasyon yani  $\text{CO}_2$ 'nin başlangıç konsantrasyonu sıfır iken daha sonra çeşitli zamanlardaki  $\text{CO}_2$  gazının konsantrasyonu ölçülür ve bu gazın konsantrasyonunun zamanla lineer değişimi bulunur [Cussler, 1997].



Şekil 5.2. Basit bir ikili gaz difüzyon denemesi.

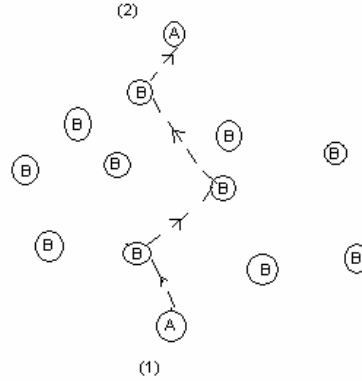
### 5.3. Adolf Fick

Fick'in difüzyon kanununda difüze olan maddenin akış hızı ile bu akıştan sorumlu konsantrasyon gradientine (ortamda uzaklığa göre konsantrasyonun düzgün değişimi) birleştirilmiştir. Fick'in difüzyonla ilgili iki temel kanunu vardır.

#### 5.3.1. Fick'in 1. Difüzyon Kanunu

Bir özelliğin göçme hızı, verilen bir zamanda verilen bir alandan geçen özellik miktarının zamana ve alana bölünmesiyle elde edilen akı (J) ile ölçülür. Akan madde ise (difüzyondaki gibi), saniyede  $\text{m}^2$  başına ne kadar molekül bir madde akışı olduğundan söz edilir.

Moleküler difüzyon veya moleküler taşınım, bir akışkan içerisinde her bir tek molekülün rastgele hareketlerle bir yerden bir yere taşınması veya difüzlenmesi olarak tanımlanabilir. Moleküllerin sadece düz çizgiler boyunca hareket ettiğini ve çarpışmadan sonra diğer molekülleri sektirerek yer değiştirdiklerini düşünebiliriz.



Şekil 5.3. Moleküler difüzyon olayının şematik gösterimi [Geankoplis, 2003].

Şekil 5.3' de moleküler difüzyon olayı şematik olarak gösterilmektedir. (1) noktasından (2) noktasına B molekülleri içerisinde difüze olan A molekülünün alabileceği düzensiz A yolu gösterilmiştir. (1) noktası civarında (2) dekinden daha fazla A molekülü olsaydı, moleküller her iki yönde rastgele difüze olurken A molekülü (1) den (2) ye, (2) den (1) noktasına göre daha fazla difüze olacaktı. A'nın net difüzyonu yüksek konsantrasyon bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine doğrudur [Geankoplis, 2003] .

Moleküllerin difüzyonu bir konsantrasyon gradientine bağlıdır. İkili bir A ve B karışımı için genel Fick Kanunu şu şekilde gösterilir:

$$J_A^* = -cD_{AB} \frac{dX_A}{dz} \quad (5.3)$$

J=toplam gaz debisi (kg/s), c= A ve B nin kgmol(A+B)/m<sup>3</sup> cinsinden toplam konsantrasyonu, X<sub>A</sub> ise A ve B karışımındaki A'nın mol fraksiyonu. C' nin sabit olduğu kabul edilirse C<sub>A</sub>=C.X<sub>A</sub> olduğundan,

$$cdX_A = d(cX_A) = dc_A \quad (5.4)$$

$$J_A^* = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (5.5)$$

Fick'in ilk kanununda gaz debisinin konsantrasyon gradienti ve alan ile bağlantılı olduğu görülür.  $D_{AB}$  ile verilen difüzyon sabiti, maddenin cinsine bağlıdır ve aynı sıcaklık ve basınç için sabittir.

Fick kanununda ifade edilen  $\frac{dc_A}{dz}$ , sabit değildir. Zaten sabit konsantrasyon koşulları altında difüzyonu belirlemek mümkün değildir.

### 5.3.2. Fick'in 2. Kanunu

$$\frac{dc}{dt} = D_{AB} \left( \frac{d^2c}{dz^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \frac{dc}{dz} \right) \quad (5.6)$$

Fick'in ikinci kanununda formülden de görüldüğü gibi konsantrasyonun zamanla ve yerle değişimi verilmektedir. Birinci kanunda bu gösterim yoktur, konsantrasyonun sadece z mesafesi boyunca değişimi vardır, yani;  $j = -D_{AB} \left( \frac{dc}{dz} \right)$  idi.

Buna göre tüpteki buharın konsantrasyonunun buharın bulunduğu yere göre z doğrultusu boyunca değişimi  $\left( \frac{dc}{dz} \right)$  ile gösterilir. Kararlı denge halinin olmadığı durumlarda tüpteki buharın konsantrasyonunun zamanla değişimini bulmak için c-t grafiği çizilir ve hangi zamanda hangi konsantrasyonda olduğu bulunur.

### 5.3.3. Difüzyon Dinamik Denge Hali (Steady- State)

Bu hal, difüzyonun durduğu kararlı halin olduğu durumdur. Bu durumda maddenin buharlaşma ve yoğunlaşma hızı birbirine eşittir. Kararlı denge halinde zamanla konsantrasyon değişimi yoktur, yani;

$$\left(\frac{dc}{dt}\right) = 0 \quad (5.7)$$

silindirik tüp için kesit alanı (A) sabit olacağından  $dA = 0$  olur. Fick'in 2. teorisi;

$$\frac{dc}{dt} = D \left( \frac{d^2c}{dz^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \frac{dc}{dz} \right) \text{ ve } dA = 0 \text{ olduğundan;}$$

$$\frac{dc}{dt} = D \left( \frac{d^2c}{dz^2} \right) \quad (5.8)$$

kararlı halde konsantrasyon değişimi zamanla sıfır olduğundan;  $\frac{dc}{dt} = 0$  olur ve,

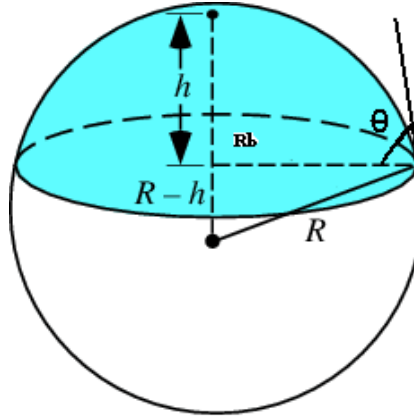
$$0 = D \left( \frac{d^2c}{dz^2} \right) \quad (5.9)$$

yazılır. Ancak bir sabit sayının türevi sıfır olacağından;  $\left(\frac{dc}{dz}\right) = 0$  sabit olmalıdır.

Kararlı halin diğer koşulu da budur [Cussler, 1997].

## 5.4. Sıvı Damlası Buharlaştırılması ile Difüzyon Sabitinin Belirlenmesi

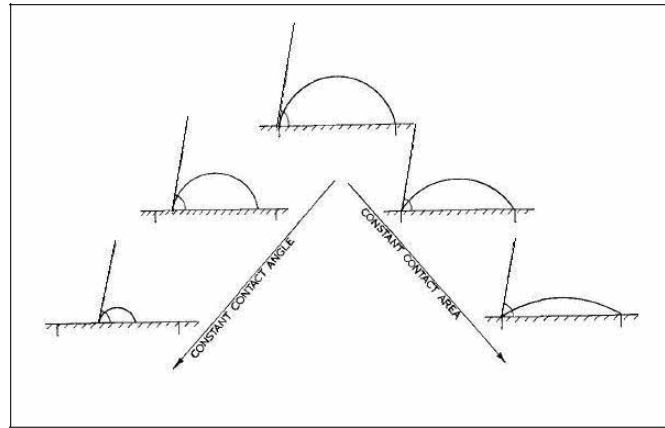
Katı üzerine damlatılan sıvı damlasının modellenmesi için yapılan çalışmalar bu sıvı damlasının küresel olduğu varsayımına dayanılarak yapılmıştır. [Picknett and Bexon, 1977; Rowan and McHale at all, 1995]. Küresellikten sapan damlalar için çeşitli düzeltme faktörleri hesaba katılarak yeni modellemeler yapılmıştır [Erbil and Meric, 1997; Meric and Erbil, 1998; Erbil et al, 2001]. Yatay bir katı üzerine damlatılan damla yeterince küçük ve küresel ise, o zaman bu damla üzerine etkili olacak ve onu küresellikten saptıracak yerçekimi kuvveti damlanın yeterince küçük olmasından dolayı ihmal edilebilir. Bu damla dört parametre ile şekillendirilebilir. Bunlar; damlanın yüksekliği ( $h$ ), temas yarıçapı ( $r_b$ ), küresel damlanın yarıçapı ( $R$ ) ve damlanın katı ile yaptığı temas açısıdır ( $\theta$ ) [Erbil and Meric, 1997].



Şekil 5.4. Küresel damla üzerindeki  $h$ ,  $r_b$ ,  $R$  ve  $\theta$  değerlerinin gösterilmesi (<http://mathworld.wolfram.com/SphericalCap.html>).

Zamanla katı üzerindeki sıvının buharlaşması sonucu damla küçülür. Sıvı damlasının buharlaşması iki tiptir (Şekil 5.5): Sabit temas açısı modeli olarak adlandırılan birinci tipte, damlanın değme açısı sabitken, damlanın yüksekliği ve

değme yarıçapı zamanla azalır. Sabit temas yarıçapı modelinde ise, buharlaşma sırasında sıvı ile yüzey arasındaki değme yarıçapı sabitken, değme açısı ve damla yüksekliği zamanla azalır. Birinci tip buharlaşma yüzey gerilimi düşük, ilerleme ve gerileme temas açıları arasında fark olmayan katı, sıvı ve gaz arasındaki dengenin sağlandığı ideal kabul edilebilen (mesela Teflon gibi) yüzeylerde ve sadece bazı sıvılar için gözlenmekte iken, ikinci tip buharlaşma su damlası ve birçok diğer sıvı damlasının polimerler üzerindeki buharlaşmalarında (değme açısı  $90^\circ$  altında iken) gözlenir.



Şekil 5.5. Katı bir yüzey üzerinde buharlaşan bir sıvı damlasına ait iki tip buharlaşma modeli [Picknett and Bexon, 1977].

Üç boyutlu geometriden bildiğimiz gibi  $r_b$  ve  $R$  yarıçapları, temas açısı ve yükseklik arasındaki ilişki şu denklemlerle verilir [Birdi, 1989; Bourges- Monnier, 1995; Erbil, 1997; McHale, 1998, Erbil, 2002; Panwar, 2003; Fang, 2005; McHale, 2005; Kim, 2007] :

$$r_b = R \sin \theta \quad \text{ve} \quad R = \left( \frac{3V}{\pi\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.10)$$

$$\beta = 2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta = (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (5.11)$$

V, küre parçasının hacmidir. İki yarıçapa bağlı yükseklik ise,

$$h = R(1 - \cos \theta) \quad \text{ve} \quad h = r_b \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5.12)$$

Damla kütesinin zamanla azalması Fick Kanununa dayanır ve,

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = 4\pi R^2 D \frac{\partial c}{\partial R} \quad \text{şeklinde ifade edilir.} \quad (5.13)$$

$$\text{burada} \quad \left(\frac{\partial c}{\partial R}\right) = \left(\frac{c_o - c_v}{R}\right) \quad \text{olduğundan;} \quad (5.14)$$

(5.13) numaralı eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = -\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right) \rho_L = 4RD\pi(c_o - c_v) \quad (5.15)$$

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{4\pi RD(c_o - c_v)}{\rho_L} \quad \text{yazılır,} \quad (5.16)$$

Bu ifade de yer alan  $c_o$  damlanın hemen üzerindeki buhar konsantrasyonudur. Damlanın yüzey sıcaklığındaki doymuş buhar basıncı kullanılarak bulunur. İdeal gaz kanununda;

$$PV = nRT \quad \text{ve} \quad c_o = \frac{W}{V} \quad \text{alınarak} \quad (5.17)$$

$$c_o = \frac{P_{vs} M_w}{RT} \quad \text{eşitliğinden bulunur.} \quad (5.18)$$

$c_v$  ise ortamın buhar konsantrasyonudur. Çalışılan sıvının su olmasından dolayı ortamın bağıl neminin bilinmesi önemlidir.

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad \text{eşittir.} \quad (4.2)$$

$$P_v = RH \times P_{vs} \quad \text{eşitliğinden bulunur. Buradan} \quad (5.19)$$

$$c_v = \frac{P_v M_w}{R T} \quad \text{olarak bulunur.} \quad (5.20)$$

$$\text{Üç boyutlu geometriden; } V_3 = \frac{\pi r_b}{3} \frac{(1 - \cos\theta^2)(2 + \cos\theta^2)}{\sin^3\theta} \quad \text{yazılır.} \quad (5.21)$$

Bu eşitlikte yer alan;

$$R = \frac{r_b}{\sin\theta} \quad \text{ve} \quad (5.10)$$

$$\beta = (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad \text{alınarak} \quad (5.11)$$

$$R = \left( \frac{3 V_3}{\pi \beta} \right)^{1/3} \quad \text{yazıldığından ve,} \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = \frac{4\pi D}{\rho_L} \left( \frac{3 V_3}{\pi \beta} \right)^{1/3} (c_o - c_v) = K_1 V_3^{1/3} \quad (5.23)$$

$$\text{burada, } K_1 = \frac{4\pi^{2/3} 3^{1/3} D (c_o - c_v)}{\rho_L \beta^{1/3}} \quad \text{dır,} \quad (5.24)$$

Ancak, katının varlığı nedeniyle damla sadece yukarıya doğru buharlaşabildiğinden  $f(\theta)$  faktörünün de hesaba katılması gerekmektedir. Bu durumda;

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = K_I V_3^{1/3} f(\theta) \quad (5.25)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadenin integrali alınır,

$$V_3^{2/3} = V_{3i}^{2/3} - \frac{2}{3} K_I f(\theta) t \quad (5.26)$$

şeklini alır. Grafiğindeki eğim  $= -\frac{2}{3} K_I f(\theta)$  eşit olur.

$V_3$  değeri [Meriç and Erbil, 1998];

$$V_3 = \frac{\pi r_b^2 h}{3} \frac{(2 + \cos\theta)}{(1 + \cos\theta)} \quad \text{olarak ifade edilir.} \quad (5.27)$$

Picknett ve Bexon tarafından;

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \left[ \frac{C}{R_S} \right] \quad [\text{Picknet and Bexon, 1997}] \quad (5.28)$$

olarak verilir. 10 °C- 180 °C arasındaki sıcaklıklar için;

$$\frac{C}{R_S} = 0,00008957 + 0,6333 \theta_{\text{rad}} + 0,1160 \theta_{\text{rad}}^2 - 0,08878 \theta_{\text{rad}}^3 + 0,01033 \theta_{\text{rad}}^4 \quad (5.29)$$

olarak ifade edilir. Buradan suyun difüzyon sabiti aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$D = \frac{K \rho_L \beta^{1/3}}{4 \pi^{2/3} 3^{1/3} D (c_o - c_v)} \quad (5.30)$$

Mono tabaka olarak uzun zincirli yağ asitleri, alkoller, esterler veya farklı malzemeler kullanılarak suyun buharlaşmasının engellenmesi veya buharlaşma süresinin uzatılması konusunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [Hedestrand, 1924; Rosano, 1956; La Mer, 1958; La Mer, 1962; La Mer, 1963; McNamee, 1998]. Bu gibi materyaller kullanılarak suyun buharlaşıp gaz fazına geçişinde bir direnç oluşturulmaktadır. Spesifik buharlaşma direnci ( $r$ ) olarak adlandırılan bu direnç;

$$r = A(C_0 - C_v) \left( \frac{dt}{dm_m} - \frac{dt}{dm_s} \right) \quad (5.31)$$

ve

$$A = \pi(r_b^2 + h^2) \quad [\text{Meriç and Erbil, 1998}] \quad (5.32)$$

$$\left( \frac{dt}{dm} \right) = \left[ \frac{1}{(dV/dt)} \right] \left( \frac{1}{\rho_L} \right) \quad (5.33)$$

denklemleri ile verilmektedir.

Burada  $A$ , buharlaşması engellenen sıvının yüzey alanı ( $\text{cm}^2$ );  $dt/dm_m$  ve  $dt/dm_s$  sırasıyla monotabaka ile kaplı olan ve kaplı olmayan yüzeylerin buharlaşma oranını ( $\text{s/g}$ ) olarak ifade etmektedir. Spesifik buharlaşma direnci ( $r$ ) ise ( $\text{s/cm}$ ) birimi ile verilmektedir.

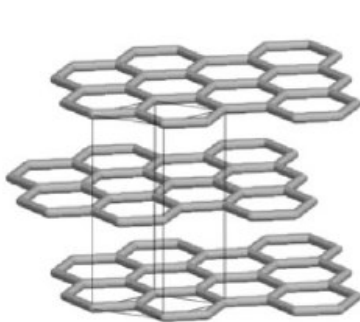
## 6. GRAFİT

### 6.1. Grafitin Yapısı ve Genel Özellikleri

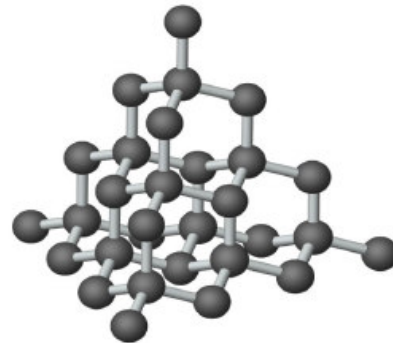
Grafit saf karbondan oluşur ve karbon atomunun iki önemli allotropundan biridir. Allotrop, aynı maddenin değişik kristal biçimlerine denir. Karbonun allotropları elmas ve grafitir.

Elmasta her bir atom dört başka atoma bağlanarak üç boyutlu katı bir yapı oluşturur. 1, 2 ve 3 atomları bir düzlemde bulunur. 4. atom bu düzlemin üzerindedir. 1, 2, 3 ve 5 atomları 4 atomunu merkez kabul eden bir düzgün dörtyüzlünün köşelerindedir. Bu yapı  $sp^3$  melezleşmesine karşılık gelir. Elmas bilinen en sert maddedir. Elması çizmek ya da kırmak kovalent bağların kopmasını gerektirmektedir. Elektriği iletmez ve çok yüksek sıcaklıklara çıkılmadıkça erimez ve süblimleşmez. Ancak 3500 °C nin üzerinde erir.

Grafitte ise karbon atomları, üst üste yığılmış geniş, yassı levhalar oluşturacak biçimde, iki boyutlu düzlemde birbirine bağlanmıştır. Karbon atomları  $sp^2$  melezlenmesi yapmışlardır. Üç  $sp^2$  melez orbitali bir düzlem oluşturur ve aralarındaki açı 120° dir. Melezleşmeye girmeyen p orbitali bu düzleme diktir.



Şekil 6.1. a) Grafit yapısı.



b) Elmas yapısı.

Atomların bu orbitaller üzerinden bağlanması Şekil 6.1.a' daki kristal yapısını verir. Her karbon atomu, aynı düzlemdeki üç komşu karbon atomuyla kuvvetli kovalent bağlar oluşturur, bu bağlanmalar altıgen yapısında karbon tabakaları verir. Bu karbon tabakalarının  $\pi$  elektronları delokalizedir. Tabakalar içi bağlar kuvvetlidir, fakat tabakalar arası bağlar çok zayıftır. Tabaka içinde C-C bağ uzunluğu 142 pm, tabakalar arasında ise 335 pm dir.

Çizelge 6.1. Elmas ve grafitin karşılaştırılması [Carr,1994].

| Özellikler               | Elmas                                                                           | Grafit                                                                                                   |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kimya                    | C, karbon elementi                                                              | C, karbon elementi                                                                                       |
| Kullanıldığı alanlar     | Mücevher, matkap ucu ve kesici                                                  | Kurşun kalemlerde<br>Çeliğin sertleştirilmesinde<br>Pota ve elektrot yapımında<br>Lubrikasyonda (kaygan) |
| Sertlik                  | En sert mineral (10)                                                            | En yumuşaklardan biri (1-2)                                                                              |
| Elektriksel iletkenlik   | Mükemmel yalıtkan                                                               | Orta düzeyde iletken                                                                                     |
| Erime Noktası            | 3823 K ( 3550 C)                                                                | 3823 K (3550 C)                                                                                          |
| Yoğunluğu                | 3.5 g/cm <sup>3</sup>                                                           | 2.2 g/cm <sup>3</sup>                                                                                    |
| Saydamlık ve renk        | Saydam, çok farklı renklerde                                                    | Opak, gümüş siyah                                                                                        |
| Kristal sistemi          | Kübik, 4/m                                                                      | HCP, 6/m,2/m                                                                                             |
| Cleavege (kesme düzlemi) | 4 yönde mükemmel                                                                | 1 yönde mükemmel, yaprak şeklinde (flake) kopma                                                          |
| Dönüşüm/Kararlılık       | Elmas, dünyanın yüzeye yakın yerlerinde çok yavaş olarak grafitte dönüşmektedir | Karbonun karalı hali                                                                                     |

### Grafitin Özellikleri:

Grafit, gayet yumuşak, dokunumu yağsı ve ince levhalar halinde bükülme özelliğine sahip, bir karbon mineralidir. Sertliği 1, yoğunluğu 2' dir. Rengi siyah ve gri, çizgi rengi kül rengine ve yağlıcadır. Doğada; kristal, pul ve amorf diye tanımlanan şekilleri mevcut olup, en iyi formu kristal grafitir.

Grafitin bileşimi saf karbondur. Hegzagonal kristal şekline sahip olup, büyük ısı iletkenliğine sahiptir. Normal kimyasal reaksiyonlara karşı duyarsızdır. Yaklaşık 3500 °C de yanmaya başlar ve yaklaşık 4500 °C de buharlaşır. Oksijenli ortamda 600° - 1100 °C de yanar. Normal sıcaklıklarda kararlı ve kimyasal bozunmaya karşı dirençlidir. Saf grafit hidroflorik ve hidroklorik asitte erimez. Asit, baz, ve tuzlara karşı dirençlidir. Doğada grafit nadir olarak saf bulunur. Kül miktarı % 10- 20 arasında değişir.

Grafit demir siyahından, siyaha kadar renklere sahiptir. Çizgi rengi parlak siyahtır. Metalik parlaklığı olan grafitin, kriptokristalin taneleri mattır. Optik işareti negatif olup, kırılma indeksi 1,93- 2,07' dir. Sertliği 1' dir. En önemli özelliklerinden biriside elektrik iletkenliğidir. Grafit yapay olarak da elde edilebilmektedir. Bu tür grafitler  $\text{Na}_2 \text{SO}_4$  ile reaksiyona girerler. Doğal grafitle farklarından biriside budur.

## 6.2. Grafitin Elde Edilişi ve Tane Büyüklüğü

Grafit doğada yüksek sıcaklık etkisiyle oluşur. Çeşitli mağmatik kayalarda da grafit oluşumu görülmektedir. Grafit, yapay olarak, örneğin antrasit kömürü gibi karbon içeren herhangi bir maddeden elde edilebilir. Bunun için, karbon içeriği yüksek olan bir madde bir elektrik fırınında 3000 °C dolayındaki bir sıcaklığa ısıtılır. Grafit ayrıca petrolden de elde edilebilir. Bu yoldan yapılan grafitte % 99' un üstünde karbon bulunabilir. Sentetik grafitin doğal grafitte göre saflığı daha yüksektir, ancak kristalitesi ve iletkenliği daha düşüktür.

Grafiti belirli tanecik boyutunda elde etmek mümkün değildir. Genelde tanecik boyutu belirli aralıklarda verilir.

## 6.3. Grafitin Kullanım Alanları

Grafit kuru olsa bile, mükemmel yağlama özelliğine sahiptir. Bunun nedeni, karbon atomu tabakalarının birbirlerini oldukça zayıf kuvvetle çekmeleri olup

birbirleri üzerinde kolayca kayabilmeleridir. Grafit bu özelliğinden dolayı kurşun kalem yapımında kullanılır. Eğer bir grafit parçasına hafifçe bastırılırsa grafit tabakaları hemen kat kat ayrılır. Grafit ve kil karışımından yapılan ve ince bir çubuk şeklinde dökülen kurşun kalem kağıt üzerine sıvanarak yazıyı oluşturur.

$\pi$  elektronları delokalizedir ve bir elektrik alanı uygulandığında bu elektronlar karbon düzlemleri boyunca göçerler. Bu yüzden grafit elektriği iletir. Bu özelliğinden dolayı grafit, pilde ve endüstriyel elektroliz işlemlerinde elektrot olarak kullanılmaktadır. Elmas ise elektriği iletmez. Çünkü tüm değerlik elektronları kovalent bağlarda lokalize olmuş, yani sabitleşmiştir [Petrucchi, 1994].

Grafit lifleri değişik plastiklerin karışımından çok dayanıklı hafif alaşımların yapımında kullanılır. Bu alaşımlar, tenis racketlerinden hafif uçaklara kadar birçok üründe kullanılır.

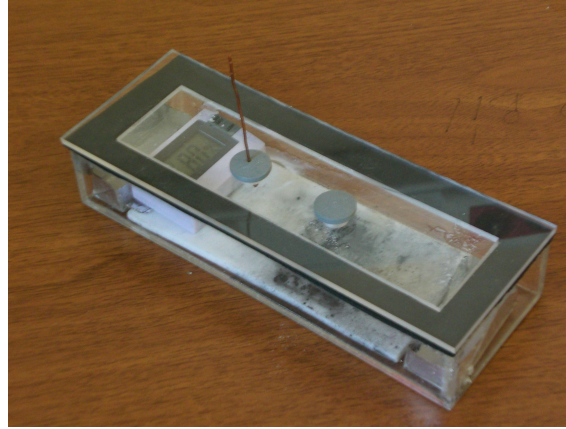
Grafitin döküm kalıplarında, fırınlarda ve diğer yüksek sıcaklıklı ortamlarda kullanılması, onun yüksek sıcaklıklara dayanma yeteneğinden kaynaklanır. Grafit sadece oda sıcaklığında değil, 3000 °C ye yakın sıcaklık bölgesinde ve  $10^4$  atm ve daha yüksek basınçlarda bile kararlıdır. 1000- 2000 °C sıcaklık aralığında ısıtılmış grafitte, 100.000 atm veya daha yüksek bir basınç uygulanarak elmas elde edilebilir. Genellikle grafit, demir gibi bir metal ile karıştırılır. Bu sırada metal erirken grafit sıvı metal içinde elmasa dönüşür. Sonra elmas katılaşmış metalden ayrılabilir.

Özellikleri nedeni ile, grafitin kullanım alanları çok geniştir. Yumuşaklığı nedeniyle, hareketli metal aksamalarının yağlanması işlemlerinde, ateşe ve asitlere karşı dayanıklılığı nedeniyle de döküm ve refrakter sanayiinde, pota ve laboratuvar malzemeleri imalinde kullanılır. Siyah renkli ateşe dayanıklı boyalar da genellikle grafitten yapılır. İyi elektrik iletkenliği dolayısı ile elektrod, motor fırçaları, pil çubukları ve elektronik aletlerin imalinde kullanılmaktadır. Grafit ayrıca lastik, araba balataları, kibrit ve motor yağlarında katkı malzemesi olarak ta kullanılmaktadır.

## 7. MATERYAL – METOT

### 7.1. Sıvı Damlası Buharlaşması Denemeleri

Suyun buharlaşma hızından su buharının hava içindeki difüzyon sabitinin belirlenmesi için yapılan bütün denemelerde saf su (Merck: 1.15333.2500 kodlu) kullanıldı. Buharlaşma denemeleri Şekil 7.1’ de gösterilen şeffaf “plexiglass” malzemeden yapılmış 20x7x3 cm’lik boyutlarda üstten kapaklı bir hücre içerisinde gerçekleştirildi. Hücrenin üzerine, hücre ile kapak arasında izolasyonu sağlaması ve dışarıdan içeri girebilecek her türlü hava akımını engellemesi için lastik kauçuk Bally yapıştırıcısı kullanılarak yapıştırıldı.



Şekil 7.1. Plexiglass hücre.

Hücrenin plexiglass kapağı, hücrenin içine sıvı damlasını verebilmek için delindi. Buraya septum takılarak, içinden su verilen iğne bu septuma saplanmak suretiyle kullanıldı. Böylece içeriye hava sızması önlenmiş oldu. Su hücreden içeriye Hamilton marka şırınga kullanılarak 5 ve 10 mikrolitre hacimlerinde verildi.

Substrat malzemesi olarak Gülbirfaz firmasının bir ürünü olan TEFLON (politetrafloroetilen) plaka kullanılmış, hücre içerisine girebilecek ebatlarda kesilmiştir. Teflon plaka kullanılmadan önce, sabunlu su, daha sonra aseton, sonra

etil alkol ve ardından saf su ile yıkanarak iyice temizlenmiştir. 50°C' ye ısıtılmış etüvde kurutulmuş ve ardından soğutulmuştur. Tüm çalışmalar henüz yıkanıp kurutulmuş Teflon ile yapılmıştır. Aksi takdirde yıkanıp bekletilmiş Teflon üzerine başta havadan nem olmak üzere çeşitli maddelerin buharı adsorblanabileceğinden su ile vermesi gereken açıdan sapan bir açı verecektir. Su damlası çok temiz Teflon üzerine damlatılmıştır.

### **7.1.1. Bağlı Nemin Kontrol Edilmesi**

Difüzyon sabitinin belirlenmesi denemelerinde buharlaşması takip edilen sıvımızın su olması nedeniyle o esnada hava içinde su buharı halinde bulunan nem miktarının bilinmesi önemlidir. Bu nedenle denemelere geçmeden önce hücrelerin içindeki havanın bağlı neminin sabitlemesi gerekmektedir.

Hücre içerisinde bağlı nemi sabitlemek üzere doymuş tuz çözeltileri kullanıldı. Doymuş tuz çözeltilerini hücre içerisine koymak için Alüminyum folyo kaplar kullanıldı, bunlar hücre içerisine girecek ebatlarda şekillendirildi. Kenarlarından sızmayı önlemek için 80 °C de parafin çözeltisine daldırılarak kaplama yapıldı. Temizlendikten sonra içlerine belli miktarlarda hazırlanan doymuş tuz çözeltilerinden koyuldu ve hücrenin kapağı kapatıldı.

Bağlı nemi % 5'e sabitleyebilmek için hücrelerin içine etüvde 110 °C de on iki saat bekletilmiş kurutulmuş silikajel yerleştirildi. Diğer sabit bağlı nemleri elde etmek için kullandığımız doymuş tuz çözeltilerinin çalışılan sıcaklık için kullandığımız higrometre ile ölçülen bağlı nemleri Tablo 7.1' de verilmektedir. Doymuş tuz çözeltileri hücrelerin içerisine yerleştirildikten sonra sabit bağlı nem değerine gelmeleri için yirmi dört saat boyunca beklenildi.

Çizelge 7.1. Farklı damla boyutlarındaki su damlası ve sıvı mermer damlası denemeleri için cihazdan ölçülen sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri.

| Doygun tuz çözeltisi                                 | Deneme                   | T(°C) | RH (%) |
|------------------------------------------------------|--------------------------|-------|--------|
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                      | 5mL- su damlası          | 23 °C | 98%    |
|                                                      | 10mL-su damlası          | 22°C  | 98%    |
|                                                      | 5mL-sıvı mermer damlası  | 23°C  | 95%    |
|                                                      | 10mL-sıvı mermer damlası | 23°C  | 96%    |
| KCl                                                  | 5mL- su damlası          | 23°C  | 87%    |
|                                                      | 10mL-su damlası          | 21°C  | 88%    |
|                                                      | 5mL-sıvı mermer damlası  | 23°C  | 88%    |
|                                                      | 10mL-sıvı mermer damlası | 21°C  | 87%    |
| NaNO <sub>3</sub>                                    | 5mL- su damlası          | 24°C  | 79%    |
|                                                      | 10mL-su damlası          | 25°C  | 78%    |
|                                                      | 5mL-sıvı mermer damlası  | 24°C  | 79%    |
|                                                      | 10mL-sıvı mermer damlası | 23°C  | 78%    |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                      | 5mL- su damlası          | 22°C  | 68%    |
|                                                      | 10mL-su damlası          | 25°C  | 68%    |
|                                                      | 5mL-sıvı mermer damlası  | 22°C  | 69%    |
|                                                      | 10mL-sıvı mermer damlası | 22°C  | 69%    |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O | 5mL- su damlası          | 24°C  | 52%    |
|                                                      | 10mL-su damlası          | 24°C  | 52%    |
|                                                      | 5mL-sıvı mermer damlası  | 25°C  | 53%    |
|                                                      | 10mL-sıvı mermer damlası | 25°C  | 52%    |
| MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O                 | 5mL- su damlası          | 26°C  | 40%    |
|                                                      | 10mL-su damlası          | 24°C  | 40%    |
|                                                      | 5mL-sıvı mermer damlası  | 24°C  | 40%    |
|                                                      | 10mL-sıvı mermer damlası | 24°C  | 40%    |
| Silika -jel                                          | 5mL- su damlası          | 24,4C | 5,20%  |
|                                                      | 10mL-su damlası          | 20,4C | 5,40%  |
|                                                      | 5mL-sıvı mermer damlası  | 25C   | 5,90%  |
|                                                      | 10mL-sıvı mermer damlası | 21Cc  | 5,60%  |

Bağıl nemin ve sıcaklığın kontrolü için TFA marka termo- higrometre kullanıldı. Hücre içerisine girebilecek şekilde 52 x 39 x 15 mm ebatlarında, 30 g ağırlığındadır. Sıcaklık çalışma aralığı -10°C ile 60°C, bağıl nem çalışma aralığı ise 10%- 99% aralığındadır.



Şekil 7.2. Hücre içerisindeki bağıl nemin kontrolü için kullanılan TFA marka termo- higrometre.

Ayrıca daha hassas bir ölçüm aralığı gerektiren %5 bağıl nem denemeleri için TESTO 615 marka termo- higrometre kullanılmıştır. Sıcaklık çalışma aralığı 0 °C ile 50 °C, bağıl nem çalışma aralığı ise 5%- 95% aralığındadır. Higrometrelerin sıcaklık ve bağıl nem değerleri Tablo 7.2' de gösterilmektedir.

Çizelge 7.2. Kullanılan higrometrelerin sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

|           | Sıcaklık |        | Bağıl Nem |     |
|-----------|----------|--------|-----------|-----|
| TFA       | -10 °C   | +60 °C | 10%       | 90% |
| TESTO 615 | 0 °C     | 50 °C  | 5%        | 95% |

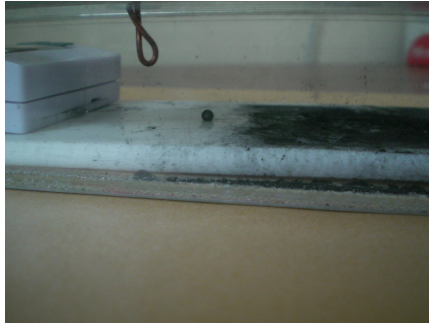


Şekil 7.3. Testo 615 termo- higrometre.

## 7.2. Sıvı Mermer Damlası Sentezi

Sıvı mermer damlası, içeriye hava giriş çıkışları engellenmiş bağıl nemi kontrol edilen hücre içerisinde oluşturuldu. Substrat olarak kullanılan Teflon plaka üzerine yeterli miktarda (sıvı mermer damlası oluşturmaya yetecek kadar) grafit konularak toz fazlalıkları üzerinden alındı. Teflon plaka daha sonra hücreye yerleştirilerek bağıl nemin dengeye gelmesi için 1 gece bekledi. İstenilen bağıl nem sağlandıktan sonra yukarıdan sıvı damlası verilerek, grafit üzerinde damlanın yuvarlanmasıyla sıvı mermer damlası oluşturuldu. Kullanılan toz hidrofobik özellik gösterdiği için üzerine gelen su damlası toz parçacıkları üzerinden yuvarlanmakta ve sıvı mermer damlasını

oluşturmaktadır. Şekil 7.2' de hücre içerisinde oluşturulmuş bir sıvı mermer damlasının yandan ve üstten çekilmiş fotoğrafları görülmektedir.



a)



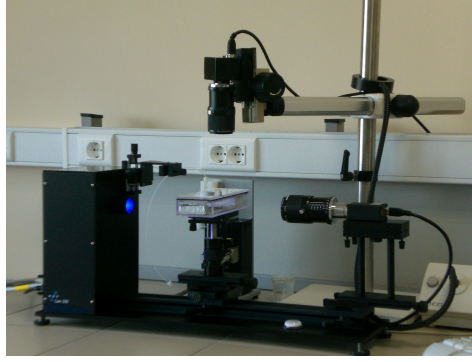
b)

Şekil 7.4. Hücre içerisinde oluşturulmuş sıvı mermer damlasının a) yandan ve b) üstten görünüşü.

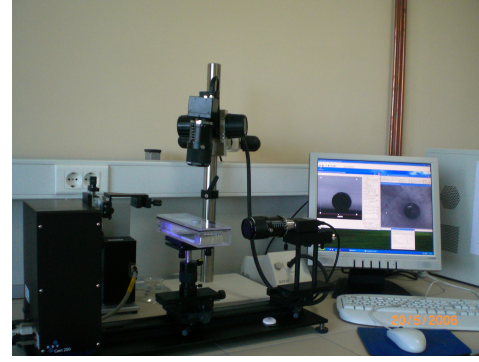
### 7.3. KSV CAM 200 Cihazı İle Buharlaştırma Denemeleri

Bu çalışmada öncelikle su damlasının bağıl nemi kontrol edilen hücre ortamı içerisinde Teflon yüzeyi üzerinde Hamilton şırınga yardımıyla oluşturulmasından sonra damlanın buharlaşma hızından difüzyon sabitleri belirlendi. Daha sonra yine aynı koşullar altında grafit tozu kullanılarak sentezlenen sıvı mermer damlasının buharlaşma hızının su damlasına göre ne kadar değiştiği ve mevcut difüzyon denklemlerine ne derece uyduğu belirlendi.

Katı üzerine damlatılan sıvının buharlaşması çeşitli zaman aralıklarında alttan ve üstten iki kamera ile fotoğraflanarak izlenmiştir. Bunun için KSV - CAM 200 temas açısı ölçüm cihazı kullanılmıştır.



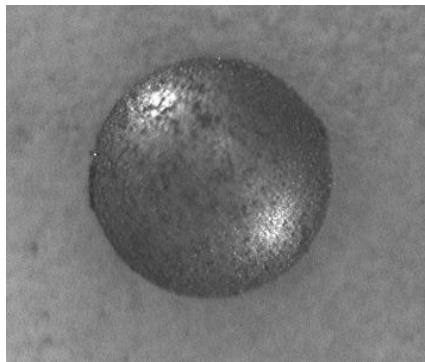
a)



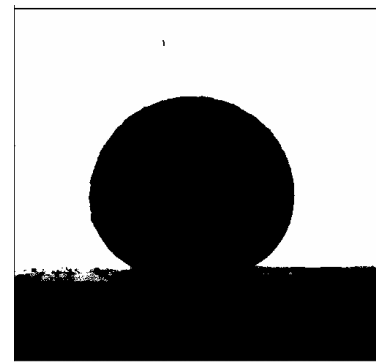
b)

Şekil 7.5. KSV CAM 200 cihazında yandan ve üstten görüntüleme sistemi b) KSV CAM 200 deney düzeneği.

Cihaza istenilen değerlerin girilmesiyle hücre içine su damlası verildiği andan itibaren fotoğraflama yapılmıştır. Ortamın bağıl nemine bağlı olarak ve damlanın buharlaşma hızı göz önünde bulundurularak farklı saniyelik aralıklarla fotoğraflar çekildi. Düşük bağıl nemde buharlaşma hızı daha fazla olacağından düşük, yüksek bağıl nemde ise buharlaşma hızı yavaş olacağından geniş zaman aralıklarında fotoğraf çekilmesi tercih edildi. Şekil 7.4' de %98 bağıl nemde oluşturulmuş 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlası ve su damlasına ait ilk anda çekilmiş fotoğraflar görülmektedir.



a)



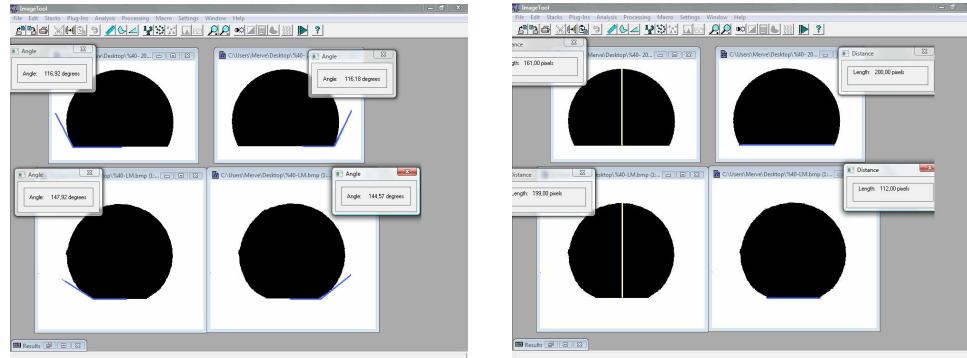
b)

Şekil 7.6. Örnek damla fotoğrafları a) %98 bağıl nem 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlası fotoğrafı b) %98 bağıl nem 10 $\mu$ L hacmindeki su damlası.

Tüm temas açısı tespitleri çekilen damla fotoğraflarının bir şekil analiz programında değerlendirilmesi ile gerçekleştirildi. KSV programının sonuçları ile karşılaştırıldı. Her bir fotoğraf için damlanın ve sıvı mermer damlasının Teflon üzerinde yaptığı açı, damlanın yüksekliği, temas yarıçapı ve hacmi belirlenerek bunların zamana karşı grafikleri çizilmiştir.

## 7.4. Görüntü İşleme ve Analiz Programı (UTHSCSA Image Tool Program)

UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programı Microsoft Windows 9x, Windows ME veya Windows NT işletim sistemi ile uyumlu bağımsız şekilleri işleme ve analiz programıdır. Gri ölçekli ve renkli şekiller programda açılabilir, ekranda görüntülenir, işlenir, analiz edilir, sıkıştırıp kaydedilir ve çıktı alınabilir.



Şekil 7.7. Görüntü işleme ve analiz programında a) temas açısı ölçümü b) yükseklik, h ve temas yarıçapı,  $r_b$  ölçümü.

Bu program kullanılarak damlaların temas yarıçapı, açıları ve yükseklikleri belirlenmiş, daha sonra gerekli hesaplamalar yapılarak grafikler çizilmiştir. Şekil 7.3' de örnek bir ölçüm görülmektedir.

## 8. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 8.1. Su Damlası Buharlaşması Bulguları

#### 8.1.1. 5µL Su Damlası Bulguları

Farklı bağıl nemlerde Teflon yüzeyi üzerindeki 5µL su damlasının buharlaşması için KSV Cam 200 cihazı ve Görüntü İşleme ve Analiz Programından elde edilmiş deneysel veriler (8.1) ve (8.7) numaralı çizelgelerde verilmektedir. Yer sıkıntısı olduğundan dolayı tüm veriler çizelgelerde gösterilememiştir. Ancak çizilen grafikler tüm analiz edilen verileri kapsamaktadır.

Bütün analiz edilmiş veriler kullanılarak 5µL su damlası için çizilen ( $r_b$ -t), ( $\theta$ -t), ( $V$ -t) ve ( $V^{2/3}$ -t) grafikleri (8.1)- (8.12) numaralı şekillerde gösterilmektedir.

Su damlasının hacminin hesaplanması için eşitlik (5.27) kullanılmıştır.

Çizelge 8.1. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5µL su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V (µL)   | $V^{2/3}$ |
|--------|------------|----------|--------------|----------|-----------|
| 0      | 1,158338   | 1,42715  | 105          | 4,722097 | 2,814643  |
| 5      | 1,148563   | 1,27075  | 99           | 3,812361 | 2,440409  |
| 10     | 1,138788   | 1,1339   | 91           | 3,092693 | 2,122713  |
| 15     | 1,129013   | 0,928625 | 80           | 2,295609 | 1,740198  |
| 20     | 1,124125   | 0,772225 | 68           | 1,763862 | 1,459855  |
| 25     | 1,099688   | 0,6256   | 61           | 1,326849 | 1,207483  |
| 30     | 0,972613   | 0,5083   | 57           | 0,829345 | 0,882721  |
| 35     | 0,728238   | 0,361675 | 56           | 0,329082 | 0,476653  |

Çizelge 8.2. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 0,9775     | 1,573775 | 120          | 4,691882     | 2,802623    |
| 5      | 0,9775     | 1,495575 | 116          | 4,179342     | 2,594609    |
| 10     | 0,9775     | 1,378275 | 111          | 3,53851      | 2,322097    |
| 15     | 0,9775     | 1,280525 | 105          | 3,013647     | 2,086387    |
| 20     | 0,967725   | 1,1339   | 97           | 2,388353     | 1,786758    |
| 30     | 0,948175   | 0,8211   | 80           | 1,42624      | 1,267054    |
| 40     | 0,782      | 0,557175 | 73           | 0,632759     | 0,737042    |
| 50     | 0,518075   | 0,1564   | 32           | 0,067662     | 0,166047    |

Çizelge 8.3. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,021488   | 1,593325 | 120          | 5,260072     | 3,024552    |
| 10     | 1,021488   | 1,417375 | 114          | 4,122277     | 2,570937    |
| 20     | 1,0166     | 1,260975 | 106          | 3,262153     | 2,199562    |
| 30     | 1,006825   | 1,104575 | 98           | 2,525949     | 1,85474     |
| 40     | 1,001938   | 0,8993   | 87           | 1,838728     | 1,500877    |
| 50     | 0,992163   | 0,68425  | 73           | 1,247695     | 1,15897     |
| 60     | 0,889525   | 0,48875  | 61           | 0,676724     | 0,770799    |
| 70     | 0,532738   | 0,107525 | 44           | 0,050484     | 0,136594    |

Çizelge 8.4. %68 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,045925   | 1,564    | 118          | 5,157116     | 2,984956    |
| 10     | 1,045925   | 1,436925 | 112          | 4,306357     | 2,646915    |
| 20     | 1,045925   | 1,339175 | 108          | 3,728326     | 2,404414    |
| 40     | 1,041038   | 1,07525  | 96           | 2,580451     | 1,881325    |
| 60     | 1,011713   | 0,830875 | 80           | 1,64905      | 1,395798    |
| 80     | 0,835763   | 0,615825 | 74           | 0,80472      | 0,86516     |
| 90     | 0,747788   | 0,498525 | 67           | 0,500817     | 0,630647    |
| 100    | 0,5865     | 0,3519   | 61           | 0,212068     | 0,355618    |

Çizelge 8.5. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

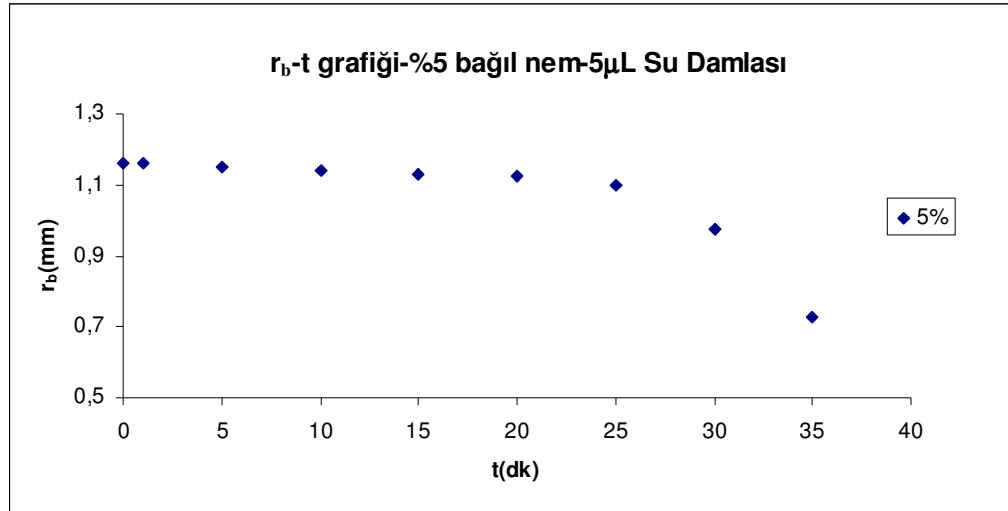
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,0557     | 1,58355  | 116          | 5,119484     | 2,970417    |
| 20     | 1,045925   | 1,436925 | 110          | 4,162687     | 2,587711    |
| 40     | 1,03615    | 1,30985  | 105          | 3,442683     | 2,279982    |
| 60     | 1,03615    | 1,163225 | 98           | 2,822365     | 1,997141    |
| 80     | 1,021488   | 1,0166   | 91           | 2,230729     | 1,707253    |
| 100    | 0,972613   | 0,8211   | 81           | 1,516555     | 1,319995    |
| 120    | 0,835763   | 0,76245  | 85           | 1,072134     | 1,047529    |
| 140    | 0,689138   | 0,64515  | 87           | 0,625016     | 0,731017    |
| 160    | 0,591388   | 0,459425 | 77           | 0,305375     | 0,453477    |
| 180    | 0,405663   | 0,166175 | 40           | 0,044868     | 0,126267    |

Çizelge 8.6. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

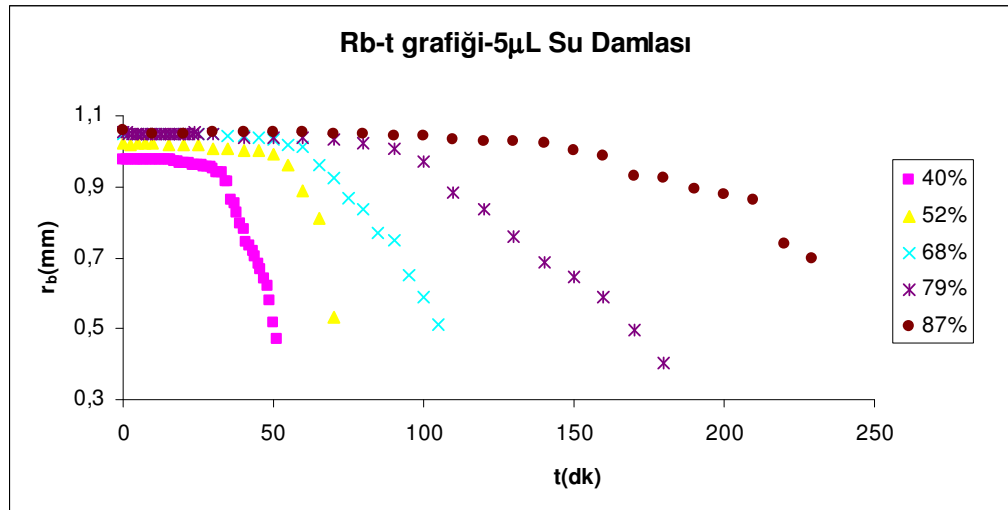
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,060588   | 1,58355  | 115          | 4,786874     | 2,840325    |
| 10     | 1,045925   | 1,534675 | 113          | 4,45002      | 2,705461    |
| 50     | 1,0557     | 1,3685   | 105          | 3,569375     | 2,33558     |
| 100    | 1,041038   | 1,124125 | 94           | 2,52905      | 1,856258    |
| 150    | 1,001938   | 0,8211   | 78           | 1,576099     | 1,354323    |
| 200    | 0,87975    | 0,5083   | 59           | 0,776762     | 0,845004    |
| 220    | 0,738013   | 0,342125 | 52           | 0,427499     | 0,567489    |
| 229    | 0,698913   | 0,25415  | 42           | 0,292856     | 0,440998    |

Çizelge 8.7. %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

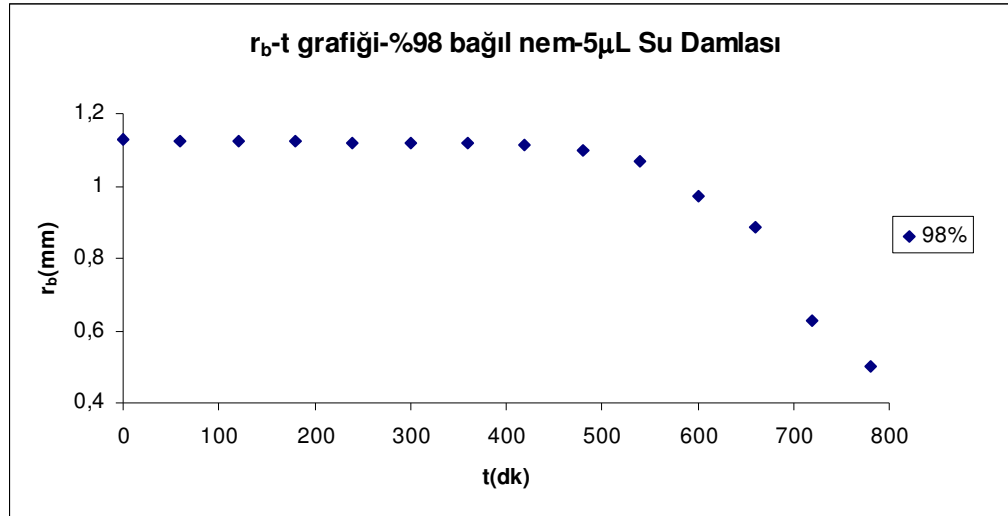
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,129013   | 1,54445  | 110          | 5,198252     | 3,000808    |
| 60     | 1,124125   | 1,4858   | 107          | 4,767261     | 2,832561    |
| 180    | 1,124125   | 1,339175 | 102          | 3,985056     | 2,513562    |
| 300    | 1,119238   | 1,163225 | 93           | 3,144583     | 2,14639     |
| 420    | 1,11435    | 0,91885  | 81           | 2,226493     | 1,705091    |
| 540    | 1,070363   | 0,674475 | 71           | 1,416331     | 1,261179    |
| 660    | 0,884638   | 0,4692   | 64           | 0,652567     | 0,752345    |
| 780    | 0,503413   | 0,0782   | 17           | 0,031347     | 0,099419    |



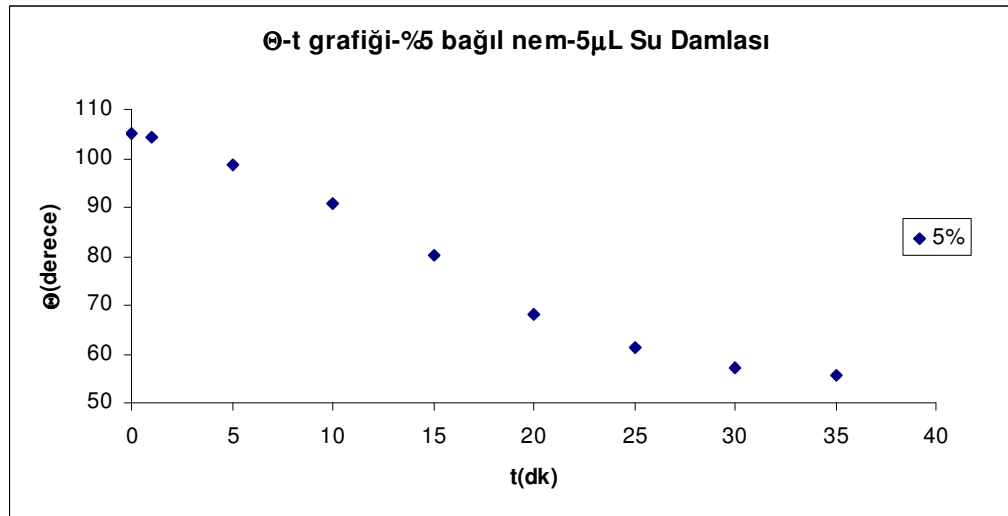
Şekil 8.1. 5 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



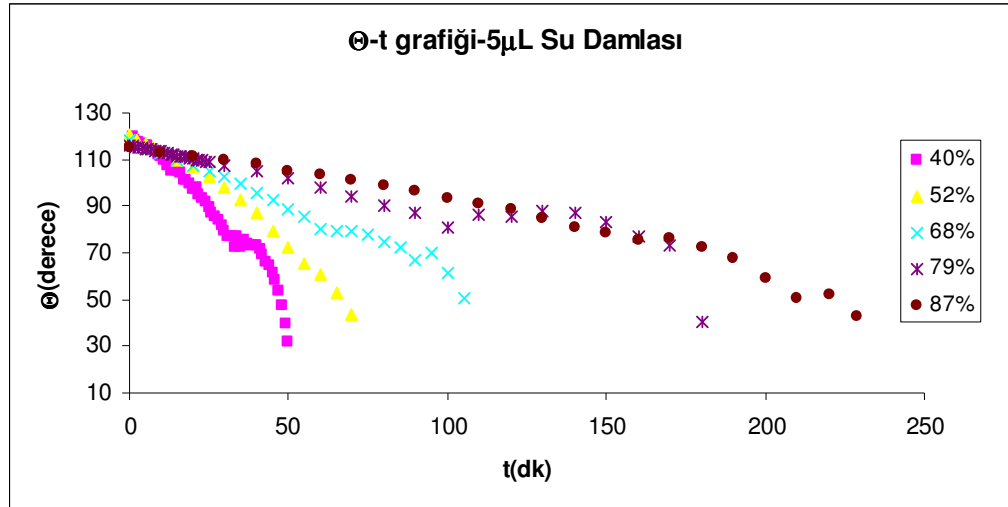
Şekil 8.2. 5 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



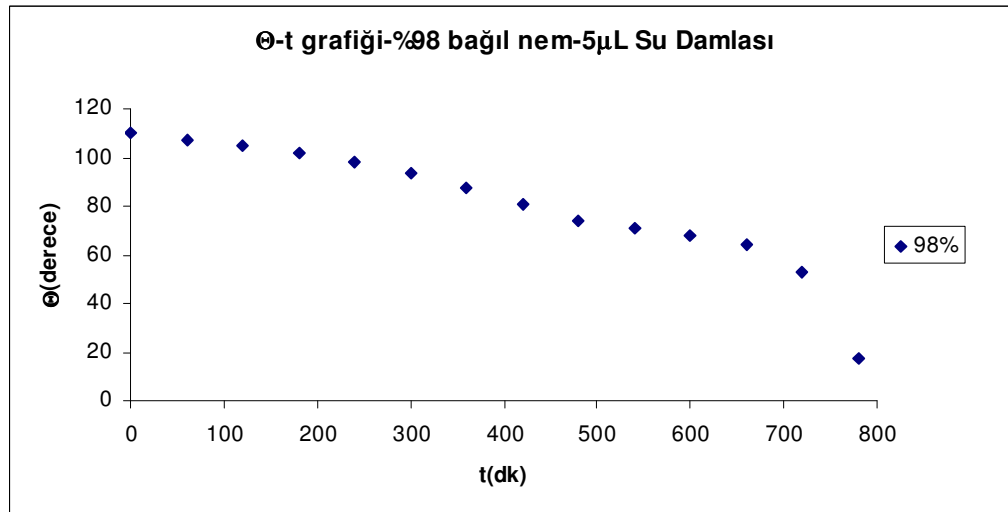
Şekil 8.3. 5 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



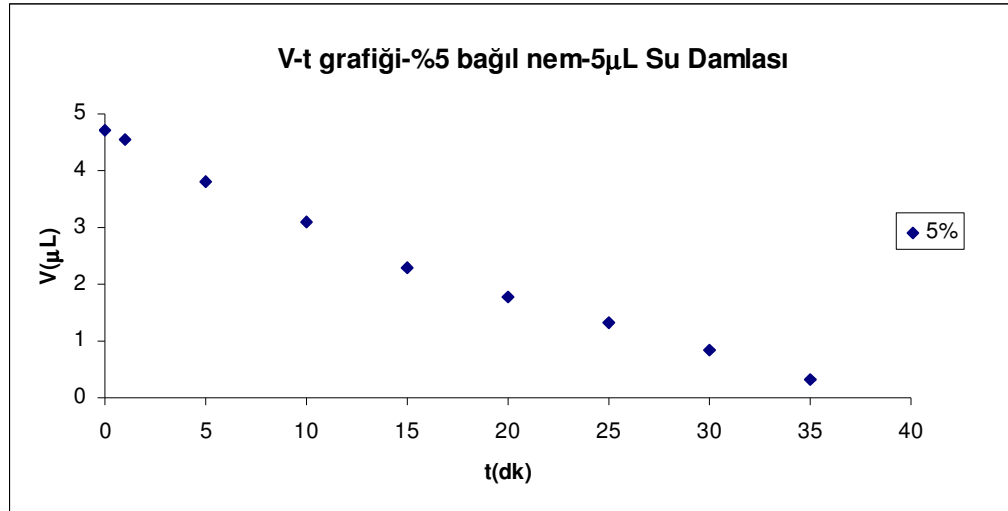
Şekil 8.4. 5 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



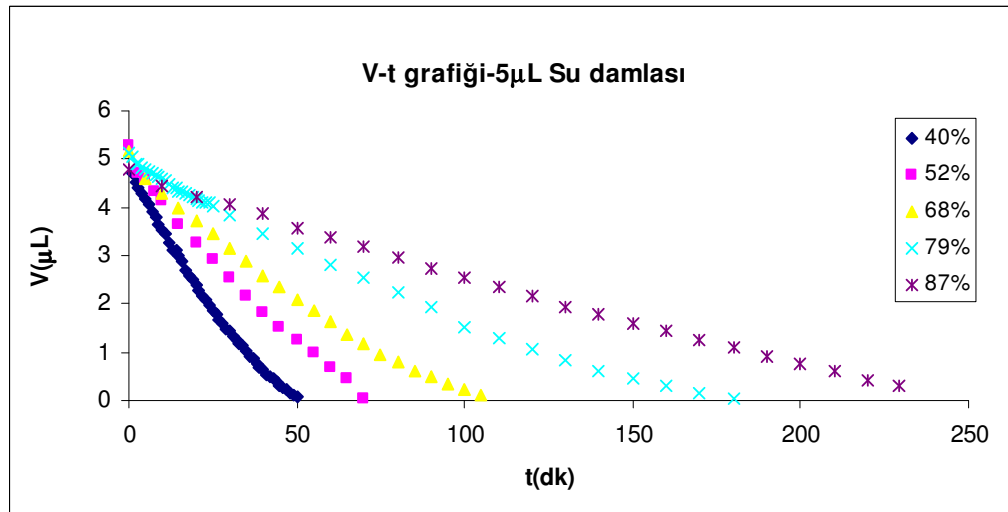
Şekil 8.5. 5µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas açılarının değişim grafiği.



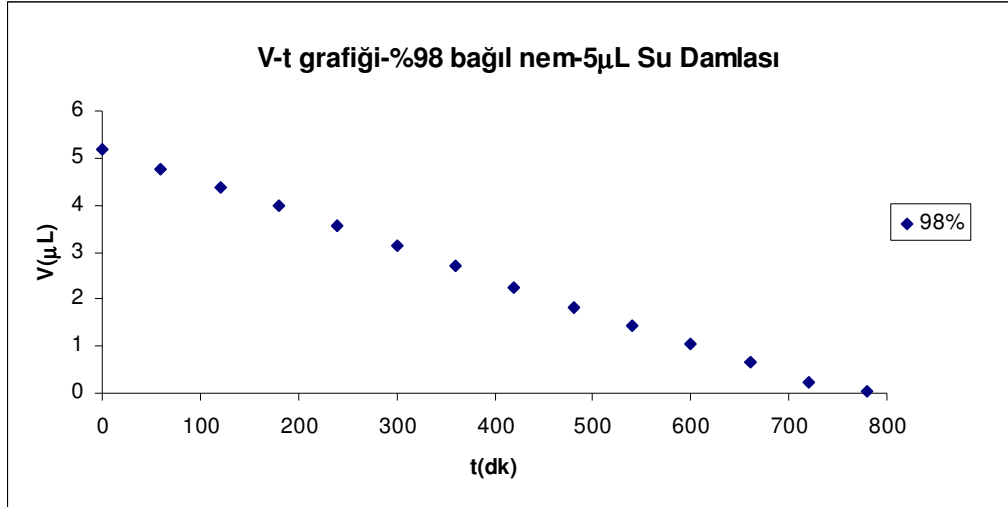
Şekil 8.6. 5µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



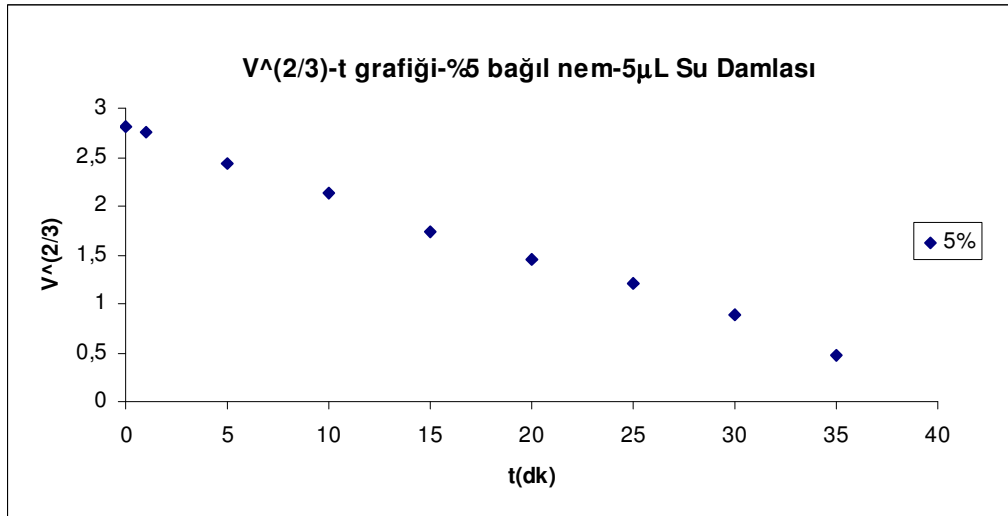
Şekil 8.7. 5µL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



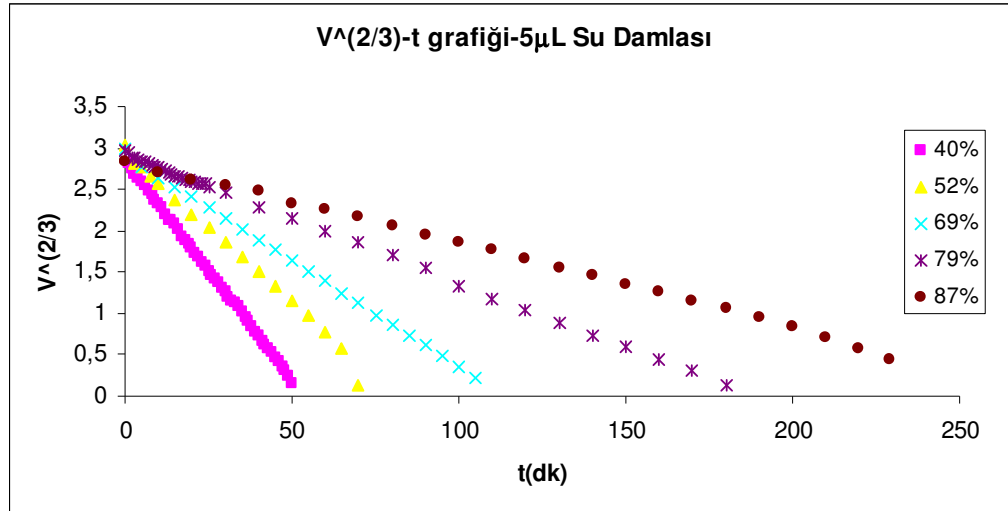
Şekil 8.8. 5µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği.



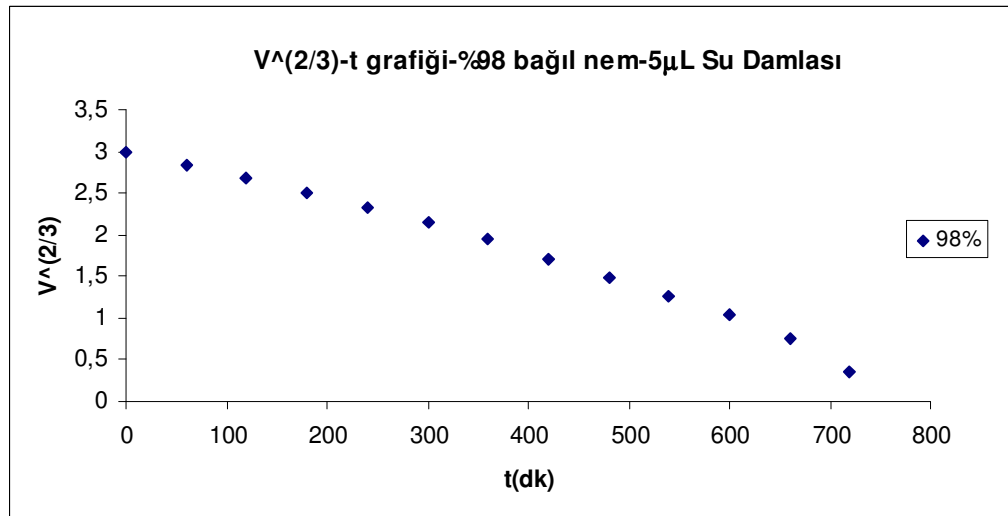
Şekil 8.9. 5 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



Şekil 8.10. 5 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



Şekil 8.11. 5µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %69- %79- %87 bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



Şekil 8.12. 5µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.

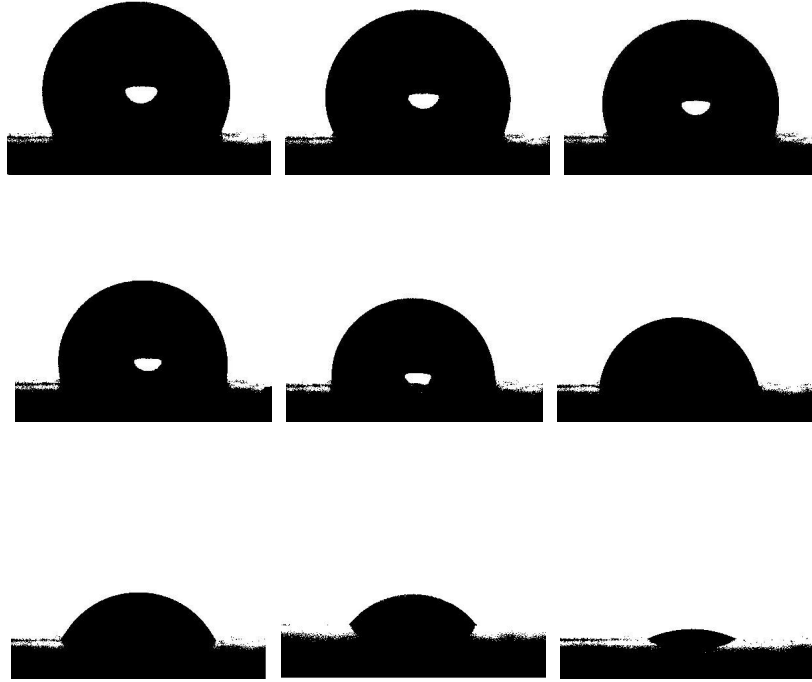
### 8.1.2. 10µL Su Damlası Bulguları

Farklı bağıl nemlerde Teflon yüzeyi üzerindeki 10µL su damlasının buharlaşması için KSV Cam 200 cihazı ve Görüntü İşleme ve Analiz Programından elde edilmiş deneysel veriler (8.8) ve (8.14) numaralı çizelgelerde verilmektedir. Yer

sıkıntısı olduğundan dolayı tüm veriler çizelgelerde gösterilememiştir. Ancak çizilen grafikler tüm analiz edilen verileri kapsamaktadır.

Bütün analiz edilmiş veriler kullanılarak 10 $\mu$ L su damlası için çizilen ( $r_b$ -t), ( $\theta$ -t), (V-t) ve ( $V^{2/3}$ -t) grafikleri (8.14)- (8.25) numaralı şekillerde gösterilmektedir.

%98 bağıl nemdeki 10 $\mu$ L su damlasının farklı zamanlarda buharlaşmasına ait KSV CAM 200 cihazı yatay kamera ile çekilmiş fotoğrafları Şekil 8.13' de görülmektedir.



Şekil 8.13. %98 bağıl nemde 10 $\mu$ L su damlasının 0, 240, 480, 720, 960, 1200, 1440, 1680, 1800. dk larda KSV CAM 200 cihazından yatay kamera ile çekilmiş buharlaşma görüntüleri.

Çizelge 8.8. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,300075   | 1,593325 | 109          | 7,003988     | 3,660695    |
| 10     | 1,285413   | 1,4076   | 100          | 5,398123     | 3,077244    |
| 20     | 1,280525   | 1,23165  | 92           | 4,293028     | 2,641451    |
| 30     | 1,275638   | 1,026375 | 81           | 3,262524     | 2,199729    |
| 40     | 1,236538   | 0,8602   | 73           | 2,435454     | 1,810172    |
| 50     | 1,109463   | 0,733125 | 70           | 1,643811     | 1,39284     |
| 60     | 0,948175   | 0,596275 | 67           | 0,962337     | 0,974731    |
| 70     | 0,80155    | 0,37145  | 51           | 0,403393     | 0,545949    |

Çizelge 8.9. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,280525   | 2,05275  | 123          | 11,26356     | 5,02478     |
| 10     | 1,260975   | 1,8768   | 118          | 8,959258     | 4,313681    |
| 20     | 1,260975   | 1,7204   | 112          | 7,389739     | 3,793902    |
| 30     | 1,260975   | 1,54445  | 104          | 5,97409      | 3,292414    |
| 40     | 1,256088   | 1,34895  | 95           | 4,678211     | 2,797177    |
| 50     | 1,246313   | 1,124125 | 84           | 3,476006     | 2,294671    |
| 60     | 1,168113   | 0,8993   | 77           | 2,327339     | 1,756197    |
| 70     | 0,99705    | 0,733125 | 75           | 1,370504     | 1,233825    |
| 80     | 0,8602     | 0,5083   | 61           | 0,659207     | 0,757439    |
| 90     | 0,581613   | 0,09775  | 19           | 0,052388     | 0,140009    |

Çizelge 8.10. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,319625   | 1,97455  | 119          | 10,53851     | 4,806763    |
| 20     | 1,314738   | 1,73995  | 111          | 8,014911     | 4,004969    |
| 40     | 1,314738   | 1,50535  | 101          | 6,084946     | 3,333019    |
| 60     | 1,295188   | 1,221875 | 89           | 4,24754      | 2,622759    |
| 80     | 1,187663   | 0,95795  | 80           | 2,610059     | 1,895688    |
| 100    | 0,943288   | 0,772225 | 80           | 1,332316     | 1,210797    |
| 120    | 0,777113   | 0,439875 | 61           | 0,464366     | 0,599663    |
| 130    | 0,601163   | 0,224825 | 38           | 0,132606     | 0,260041    |

Çizelge 8.11. %68 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{2/3}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-----------|
| 0      | 1,436925   | 1,847475 | 111          | 10,25689     | 4,720743  |
| 20     | 1,436925   | 1,6422   | 103          | 8,154021     | 4,051177  |
| 40     | 1,432038   | 1,417375 | 94           | 6,293106     | 3,408605  |
| 60     | 1,38805    | 1,182775 | 85           | 4,584303     | 2,759618  |
| 80     | 1,2512     | 0,909075 | 75           | 2,674404     | 1,926717  |
| 100    | 1,060588   | 0,7038   | 71           | 1,4526       | 1,282618  |
| 120    | 0,953063   | 0,391    | 41           | 0,58405      | 0,698715  |
| 130    | 0,884638   | 0,1564   | 20           | 0,194072     | 0,335204  |

Çizelge 8.12. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

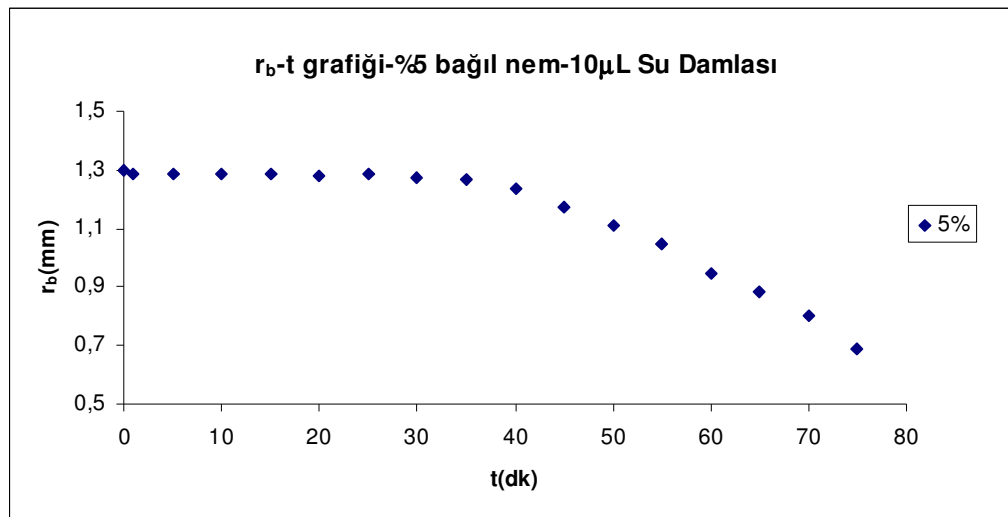
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{2/3}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-----------|
| 0      | 1,432038   | 1,867025 | 110          | 10,13307     | 4,682676  |
| 20     | 1,422263   | 1,7204   | 105          | 8,596833     | 4,196549  |
| 40     | 1,422263   | 1,573775 | 99,4         | 7,312366     | 3,767373  |
| 60     | 1,417375   | 1,4076   | 92,6         | 6,057404     | 3,322954  |
| 100    | 1,339175   | 1,085025 | 79,3         | 3,754177     | 2,415516  |
| 120    | 1,182775   | 0,948175 | 79,7         | 2,565536     | 1,874068  |
| 140    | 1,065475   | 0,80155  | 75,4         | 1,713083     | 1,431701  |
| 180    | 0,884638   | 0,361675 | 39,8         | 0,463725     | 0,599111  |

Çizelge 8.13. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

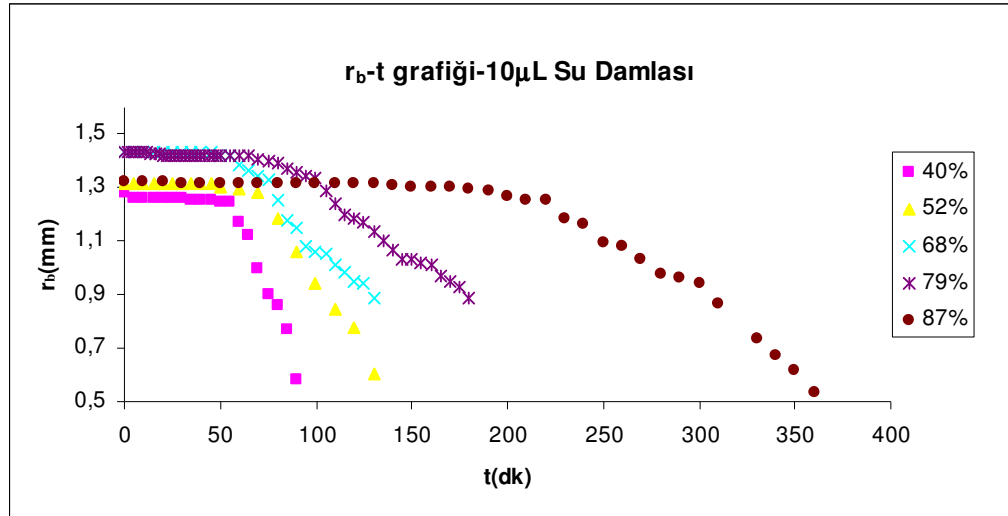
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{2/3}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-----------|
| 0      | 1,324513   | 1,964775 | 122          | 11,30229     | 5,036293  |
| 50     | 1,319625   | 1,81815  | 117          | 9,339015     | 4,434732  |
| 100    | 1,319625   | 1,6422   | 108          | 7,317438     | 3,769115  |
| 150    | 1,304963   | 1,436925 | 99           | 5,584866     | 3,14781   |
| 200    | 1,27075    | 1,182775 | 88           | 3,925085     | 2,488281  |
| 250    | 1,0948     | 0,95795  | 84           | 2,287035     | 1,735862  |
| 300    | 0,943288   | 0,68425  | 72           | 1,122505     | 1,080088  |
| 350    | 0,620713   | 0,2737   | 59           | 0,183466     | 0,322877  |

Çizelge 8.14. %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L su damlası için deneysel veriler.

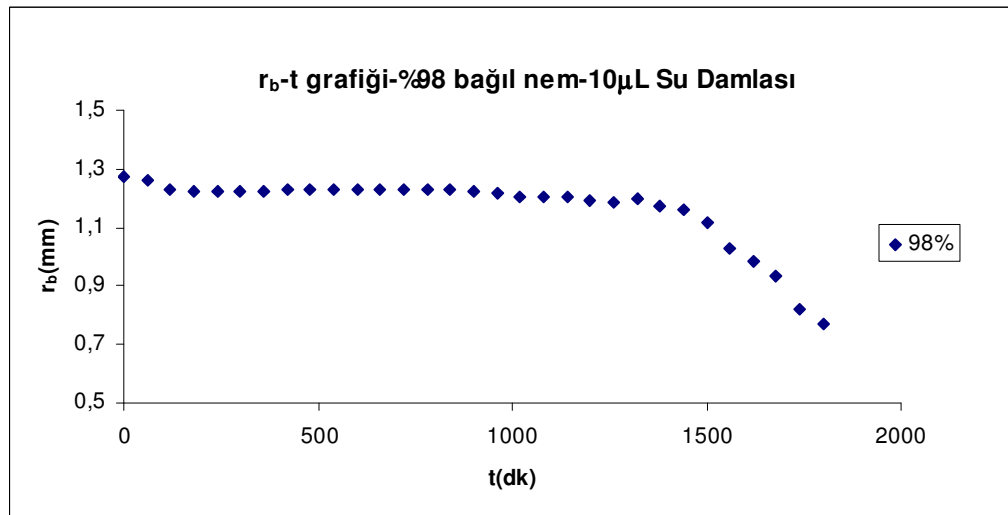
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 1,275638   | 1,984325 | 123,634      | 10,94006     | 4,928103    |
| 120    | 1,23165    | 1,964775 | 123,234      | 10,0083      | 4,644158    |
| 240    | 1,221875   | 1,89635  | 120,423      | 8,955443     | 4,312456    |
| 480    | 1,23165    | 1,710625 | 113,925      | 7,277919     | 3,755532    |
| 960    | 1,216988   | 1,280525 | 94,981       | 4,156823     | 2,58528     |
| 1200   | 1,19255    | 1,0166   | 81,324       | 2,827346     | 1,99949     |
| 1440   | 1,158338   | 0,713575 | 64,505       | 1,702433     | 1,425761    |
| 1800   | 0,772225   | 0,2346   | 34,828       | 0,226837     | 0,371942    |



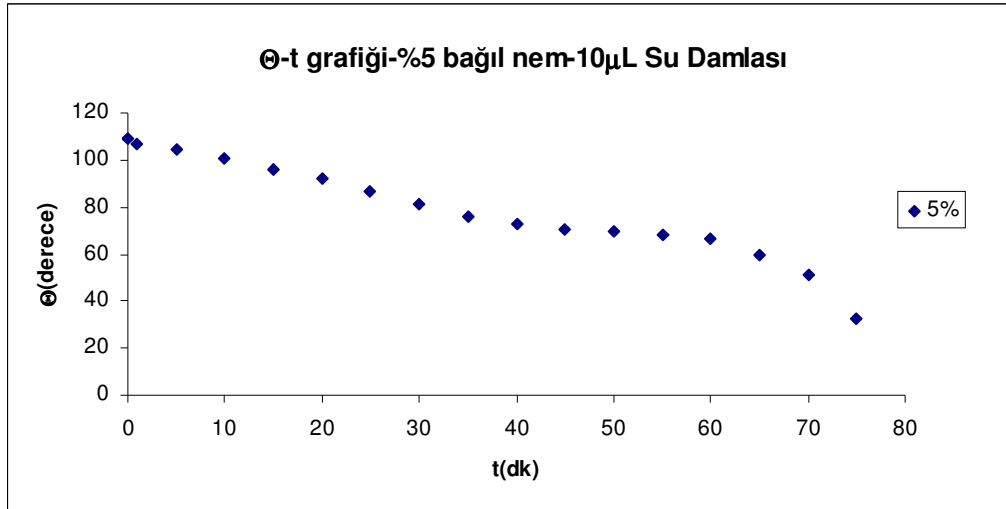
Şekil 8.14. 10 $\mu$ L hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



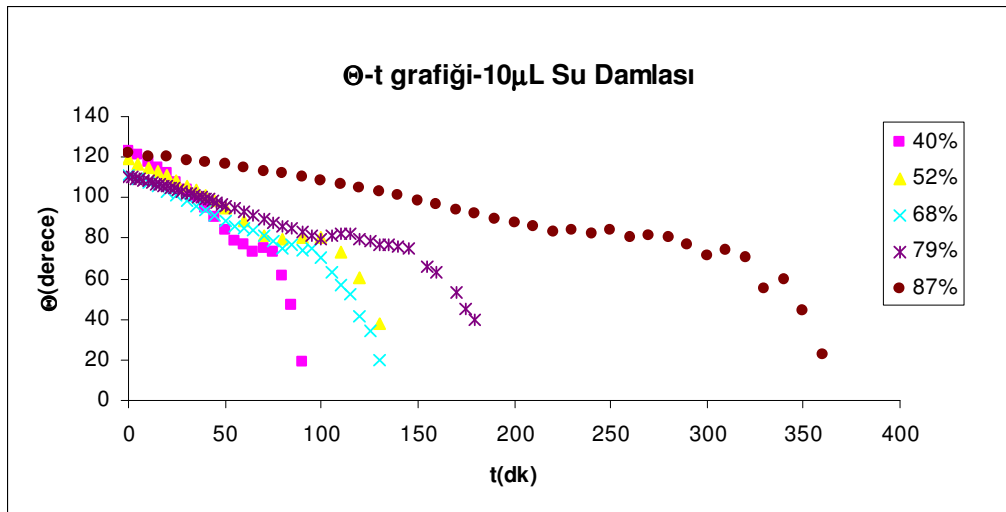
Şekil 8.15. 10µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



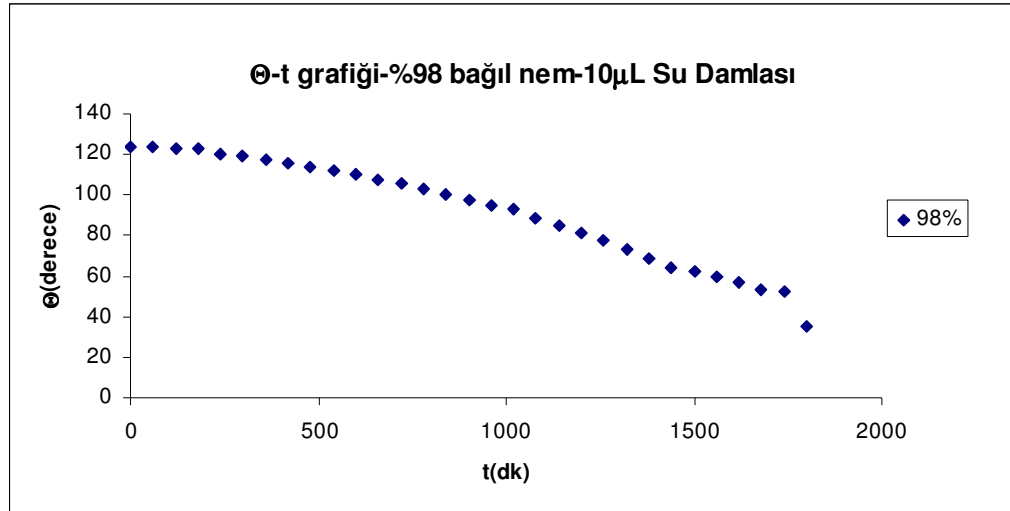
Şekil 8.16. 10µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



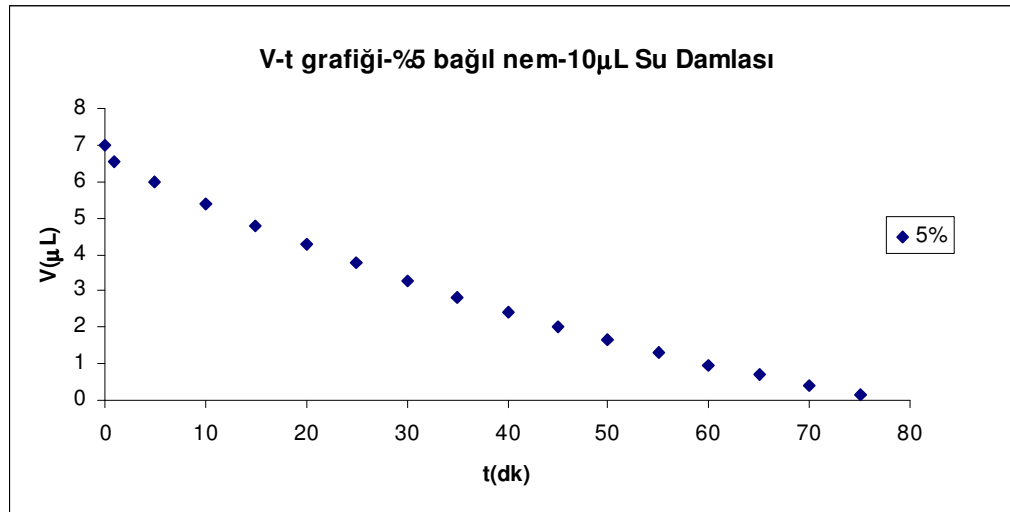
Şekil 8.17. 10μL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



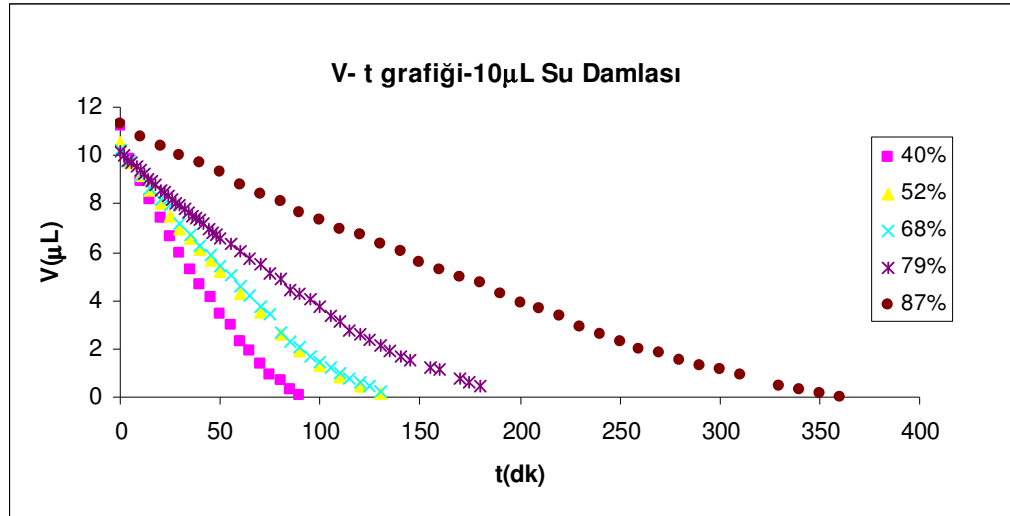
Şekil 8.18. 10μL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



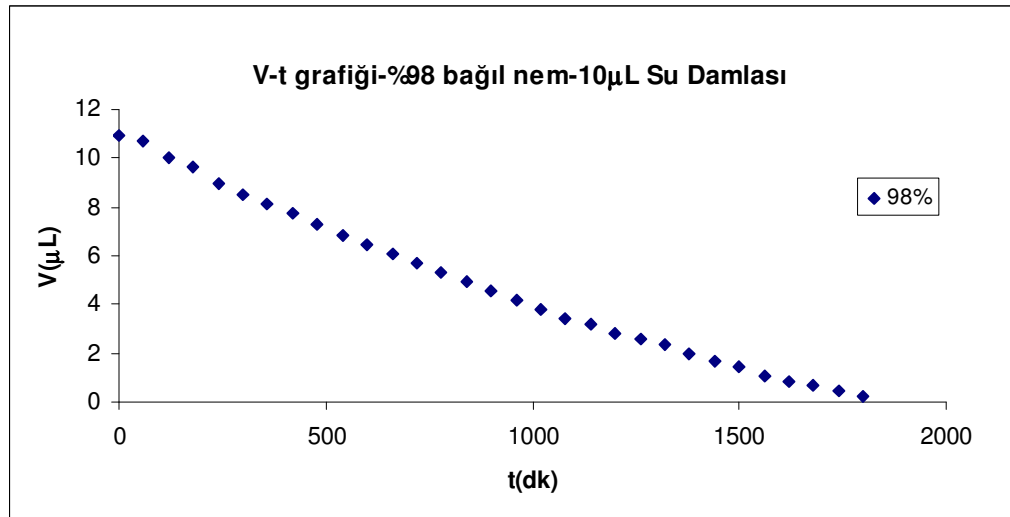
Şekil 8.19. 10μL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



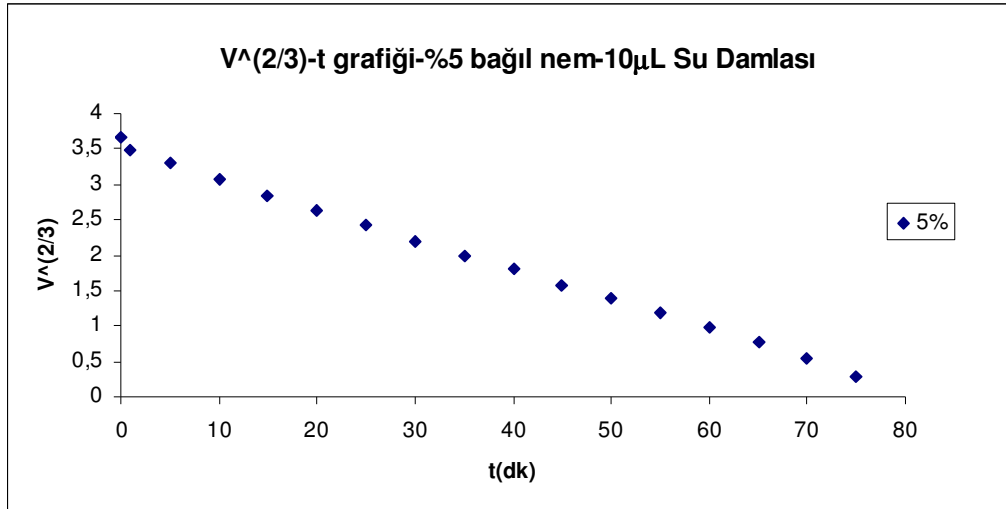
Şekil 8.20. 10μL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



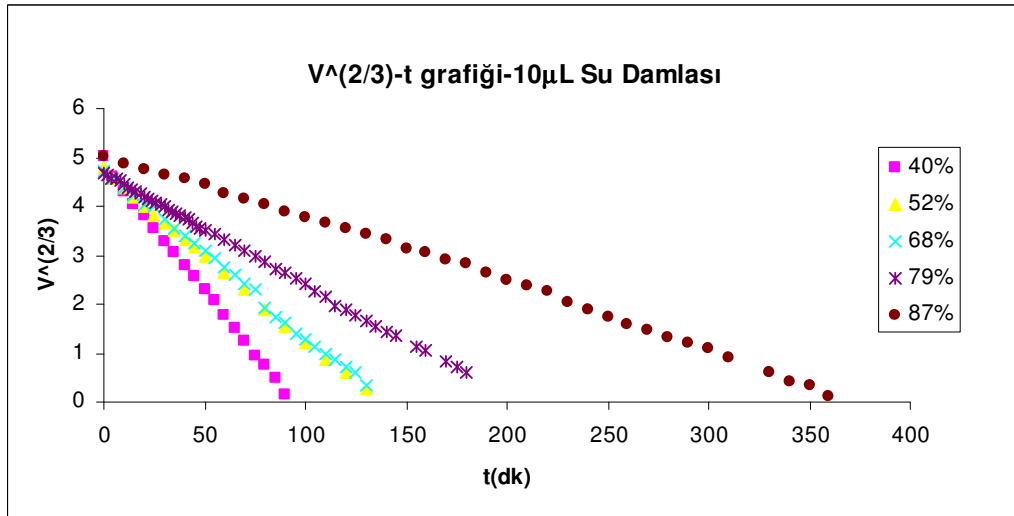
Şekil 8.21. 10µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği.



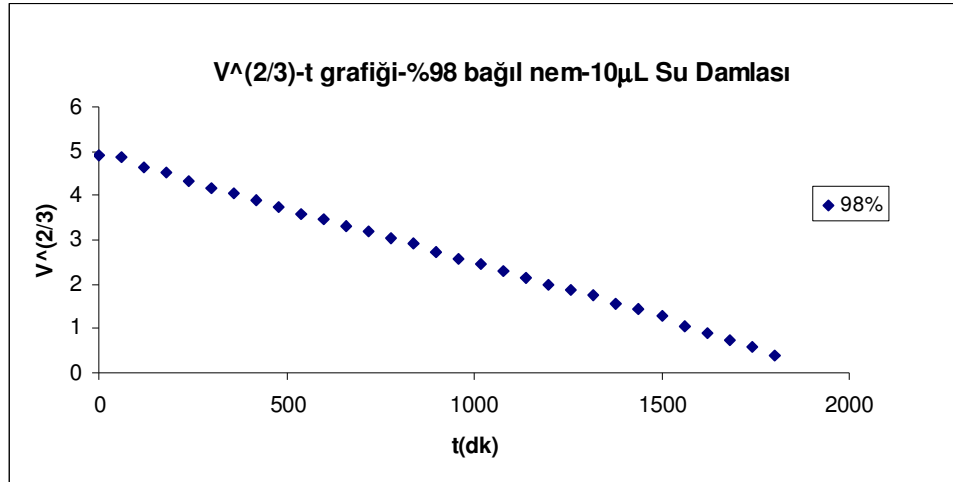
Şekil 8.22. 10µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



Şekil 8.23. 10µL hacmindeki su damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



Şekil 8.24. 10µL hacmindeki su damlasının %40- %52- %69- %79- %87 bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



Şekil 8.25. 10µL hacmindeki su damlasının %98 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.

## 8.2. Sıvı Mermer Damlası Buharlaşması bulguları

### 8.2.1. 5µL Sıvı Mermer Damlası Bulguları

Farklı bağıl nemlerde Teflon yüzeyi üzerindeki 5µL sıvı mermer damlasının buharlaşması için KSV Cam 200 cihazı ve Görüntü İşleme ve Analiz Programından elde edilmiş deneysel veriler (8.15) ve (8.21) numaralı çizelgelerde verilmektedir. Yer sıkıntısı olduğundan dolayı tüm veriler çizelgelerde gösterilememiştir. Ancak çizilen grafikler tüm analiz edilen verileri kapsamaktadır.

Bütün analiz edilmiş veriler kullanılarak 5µL sıvı mermer damlası için çizilen  $(r_b-t)$ ,  $(\theta-t)$ ,  $(V-t)$  ve  $(V^{2/3}-t)$  grafikleri (8.26)- (8.37) numaralı şekillerde gösterilmektedir.

Çizelge 8.15. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,56695    | 1,9159   | 146          | 4,647272     | 2,78483     |
| 1      | 0,615825   | 1,8768   | 143          | 4,577112     | 2,756731    |
| 2      | 0,669588   | 1,827925 | 140          | 4,48303      | 2,718824    |
| 2,5    | 0,68425    | 1,788825 | 138          | 4,3105       | 2,648613    |
| 3      | 0,7038     | 1,769275 | 132          | 4,274362     | 2,633788    |
| 4      | 0,806438   | 1,671525 | 125          | 4,150776     | 2,582773    |
| 5      | 0,850425   | 1,62265  | 116          | 4,078357     | 2,552643    |

Çizelge 8.16. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,552288   | 1,945225 | 147,285      | 4,783551     | 2,83901     |
| 2      | 0,56695    | 1,9159   | 144,3125     | 4,647272     | 2,78483     |
| 4      | 0,591388   | 1,886575 | 140,9675     | 4,549891     | 2,74579     |
| 6      | 0,610938   | 1,8377   | 141,2425     | 4,324778     | 2,654458    |
| 8      | 0,674475   | 1,77905  | 135,23       | 4,217378     | 2,610328    |
| 10     | 0,738013   | 1,7204   | 126,81       | 4,135961     | 2,576624    |
| 12     | 0,76245    | 1,651975 | 123,12       | 3,867069     | 2,463701    |
| 13     | 0,825988   | 1,6031   | 116,765      | 3,873203     | 2,466305    |

Çizelge 8.17. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,474088   | 1,8377   | 157          | 3,896369     | 2,47613     |
| 3      | 0,503413   | 1,7986   | 155          | 3,760584     | 2,418263    |
| 6      | 0,542513   | 1,749725 | 149          | 3,611934     | 2,354109    |
| 9      | 0,581613   | 1,70085  | 147          | 3,478298     | 2,295679    |
| 12     | 0,64515    | 1,632425 | 145          | 3,343284     | 2,235882    |
| 15     | 0,689138   | 1,573775 | 135          | 3,21331      | 2,177551    |
| 16     | 0,738013   | 1,5249   | 141          | 3,15965      | 2,153241    |
| 17     | 0,772225   | 1,495575 | 121          | 3,150882     | 2,149256    |

Çizelge 8.18. %69 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,493638   | 1,9159   | 155          | 4,41339      | 2,690594    |
| 3      | 0,498525   | 1,906125 | 152          | 4,368116     | 2,672162    |
| 6      | 0,542513   | 1,867025 | 147          | 4,268595     | 2,631419    |
| 9      | 0,576725   | 1,827925 | 145          | 4,150887     | 2,582819    |
| 12     | 0,596275   | 1,808375 | 141          | 4,104322     | 2,563467    |
| 15     | 0,635375   | 1,769275 | 138          | 4,019827     | 2,528162    |
| 18     | 0,669588   | 1,73995  | 134          | 3,981455     | 2,512048    |
| 19     | 0,674475   | 1,730175 | 136          | 3,946218     | 2,497204    |

Çizelge 8.19. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

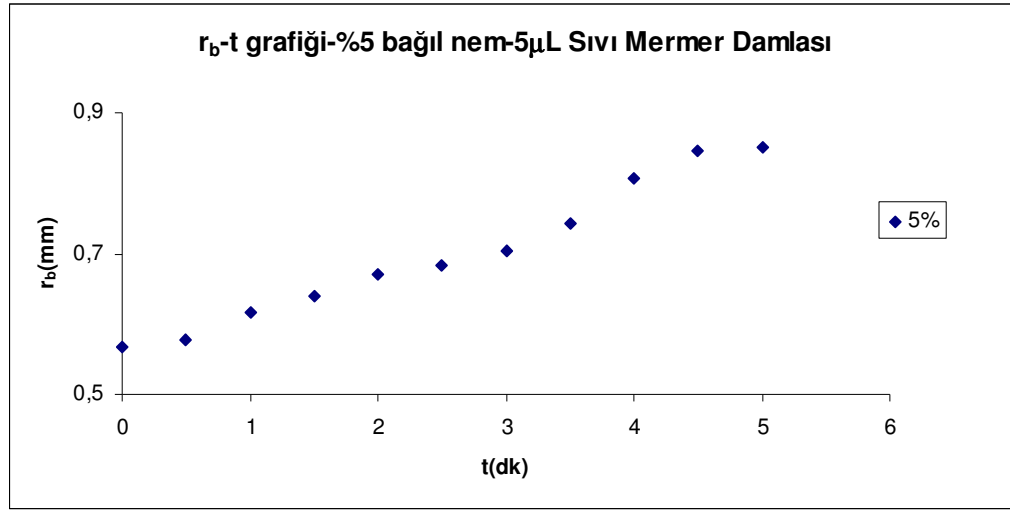
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,518075   | 1,925675 | 151          | 4,548498     | 2,74523     |
| 3      | 0,52785    | 1,906125 | 150          | 4,45819      | 2,708771    |
| 6      | 0,596275   | 1,8768   | 143          | 4,507289     | 2,728623    |
| 9      | 0,620713   | 1,8377   | 141          | 4,359514     | 2,668653    |
| 12     | 0,669588   | 1,7986   | 134          | 4,311008     | 2,648821    |
| 15     | 0,7038     | 1,77905  | 127          | 4,33027      | 2,656705    |
| 18     | 0,713575   | 1,710625 | 130          | 3,987168     | 2,51445     |
| 21     | 0,796663   | 1,66175  | 122          | 4,057284     | 2,543843    |

Çizelge 8.20. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

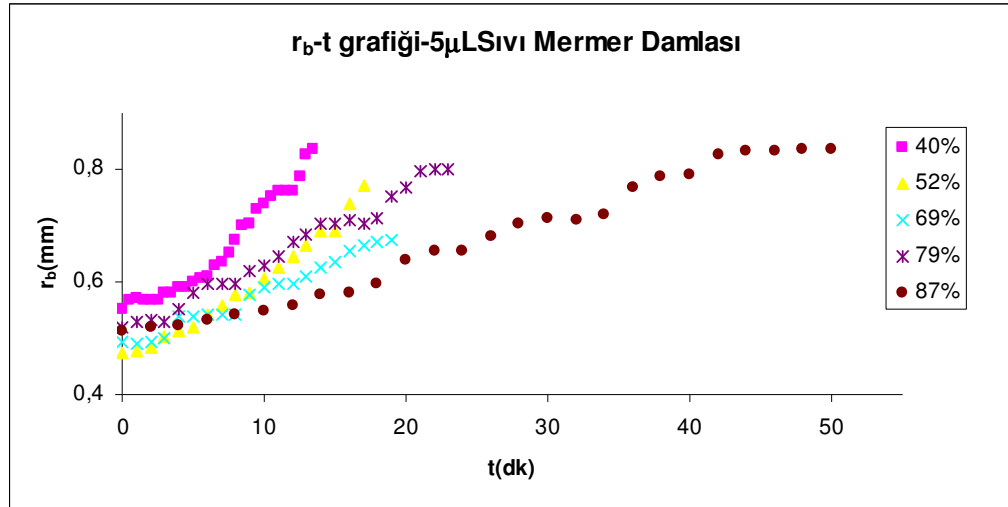
| t(dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|-------|------------|----------|--------------|-------------|-------------|
| 0     | 0,513188   | 1,93545  | 152          | 4,5945      | 2,763708    |
| 6     | 0,532738   | 1,9159   | 150          | 4,534104    | 2,739435    |
| 12    | 0,557175   | 1,89635  | 149          | 4,493171    | 2,722923    |
| 18    | 0,596275   | 1,85725  | 147          | 4,389384    | 2,680829    |
| 24    | 0,654925   | 1,81815  | 141          | 4,369709    | 2,672812    |
| 30    | 0,713575   | 1,77905  | 133          | 4,368968    | 2,672509    |
| 36    | 0,767338   | 1,7204   | 128          | 4,255197    | 2,625909    |
| 42    | 0,825988   | 1,671525 | 124          | 4,234528    | 2,617399    |
| 48    | 0,835763   | 1,632425 | 125          | 4,066743    | 2,547795    |

Çizelge 8.21. %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

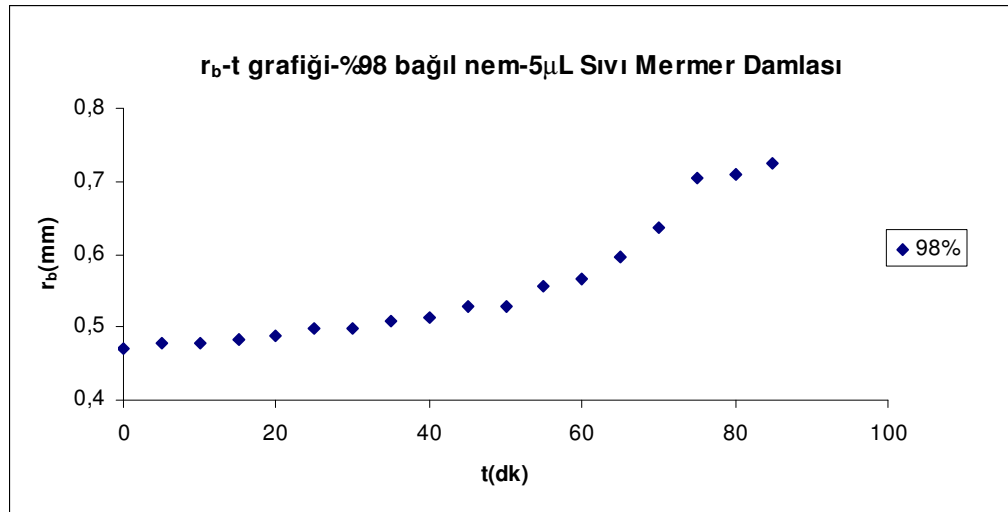
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V (mL)   | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|----------|-------------|
| 0      | 0,4692     | 1,945225 | 154          | 4,524349 | 2,735504    |
| 10     | 0,478975   | 1,9159   | 151          | 4,370494 | 2,673132    |
| 20     | 0,48875    | 1,89635  | 147          | 4,280096 | 2,636143    |
| 30     | 0,498525   | 1,8377   | 146          | 3,964945 | 2,505098    |
| 40     | 0,513188   | 1,808375 | 146          | 3,842603 | 2,453298    |
| 50     | 0,52785    | 1,788825 | 147          | 3,778095 | 2,425764    |
| 60     | 0,56695    | 1,730175 | 144          | 3,583625 | 2,341792    |
| 70     | 0,635375   | 1,6813   | 140          | 3,552846 | 2,328364    |
| 80     | 0,708688   | 1,612875 | 124          | 3,467512 | 2,290931    |



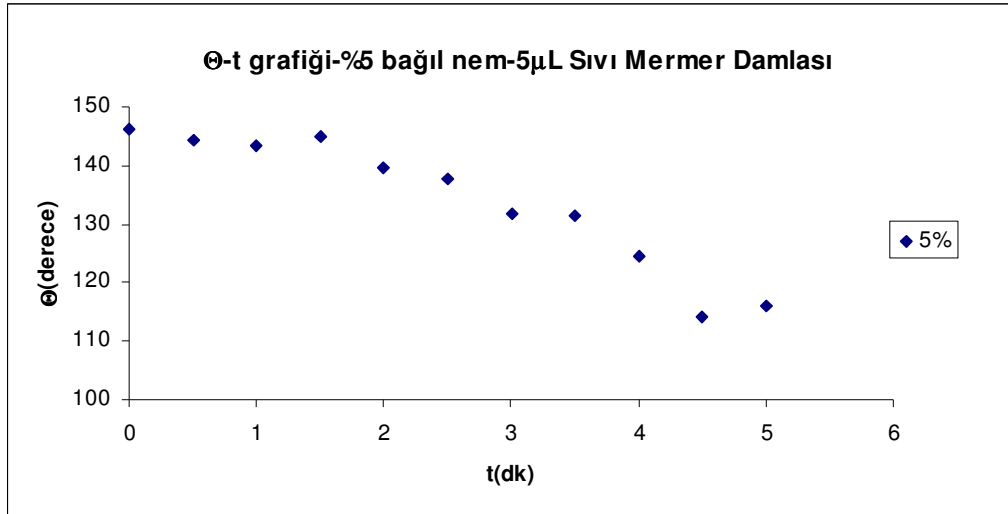
Şekil 8.26. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



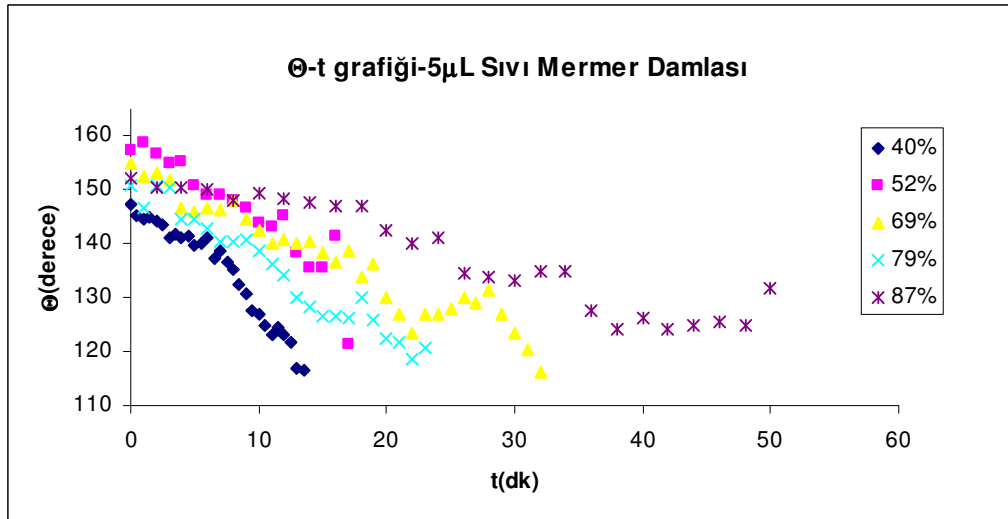
Şekil 8.27. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



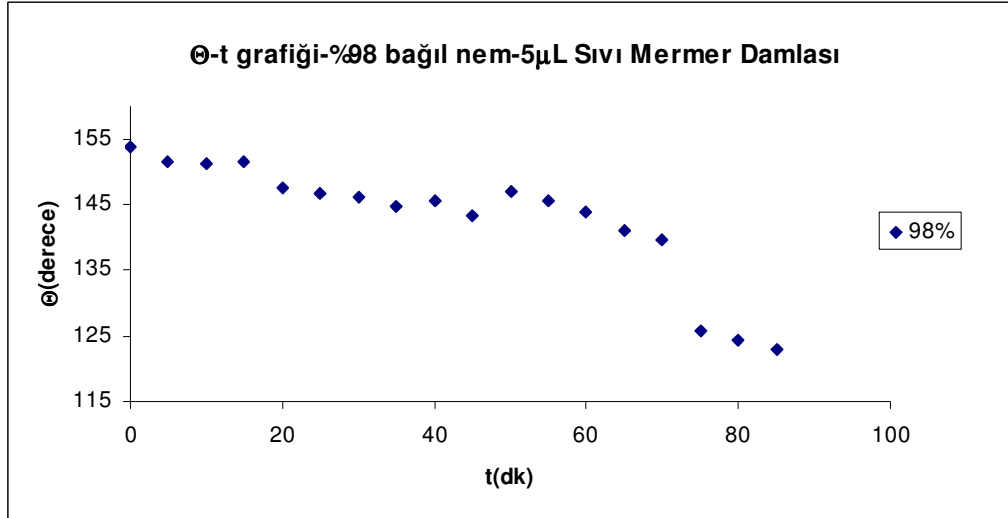
Şekil 8.28. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



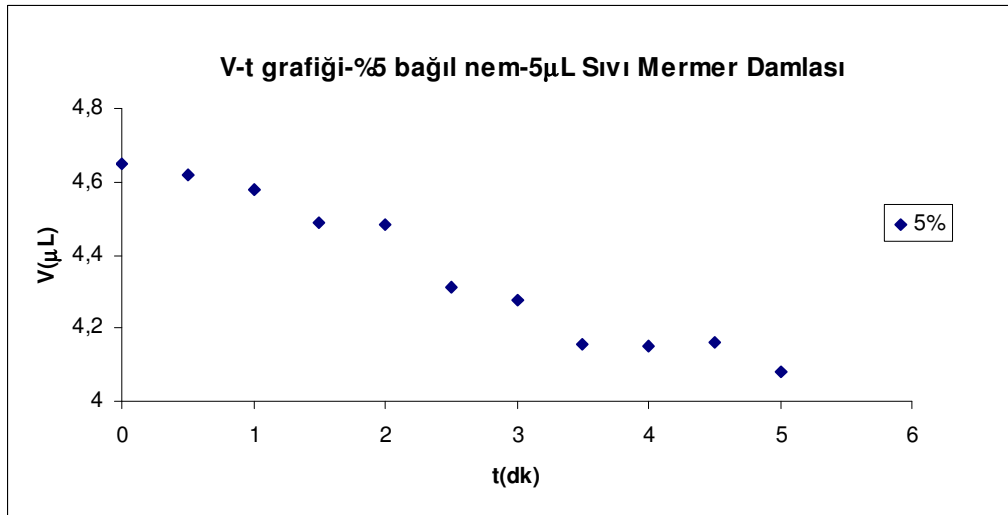
Şekil 8.29. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



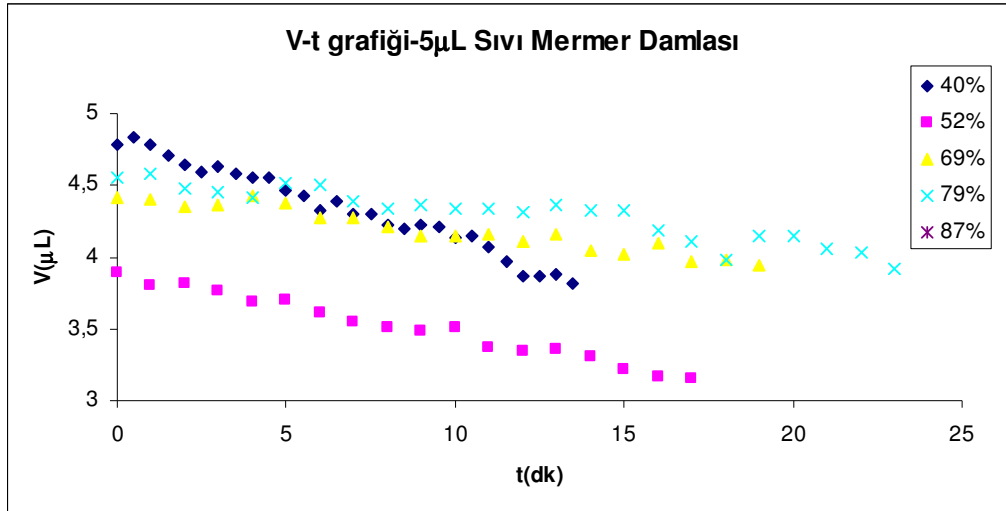
Şekil 8.30. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



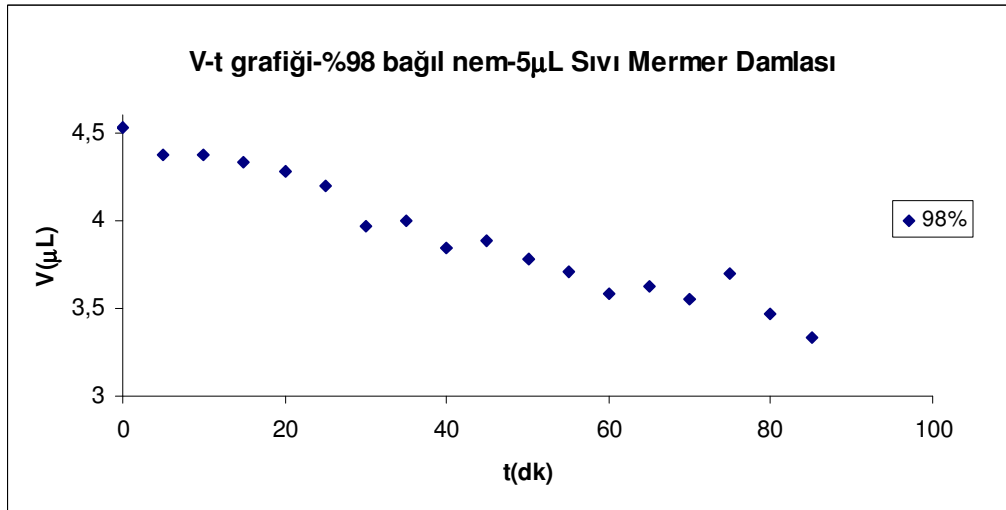
Şekil 8.31. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



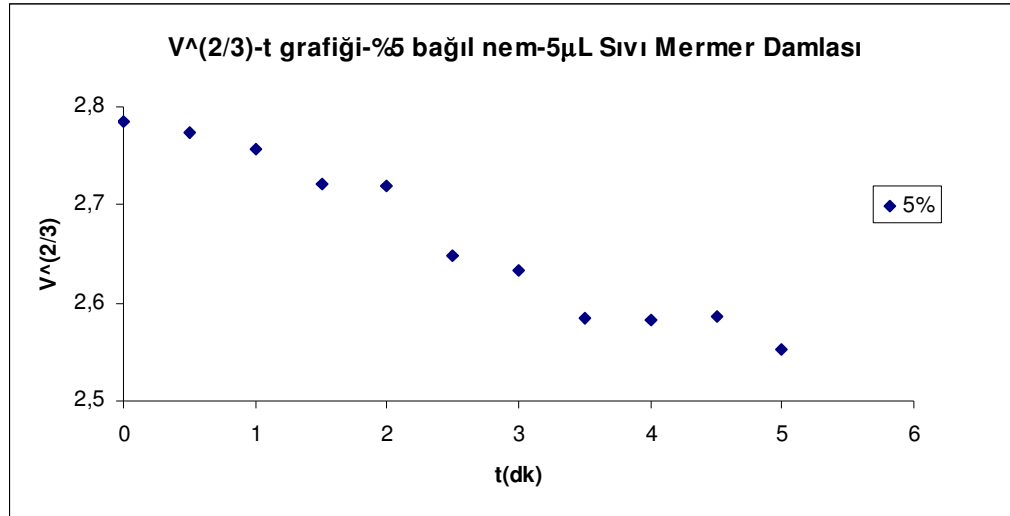
Şekil 8.32. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



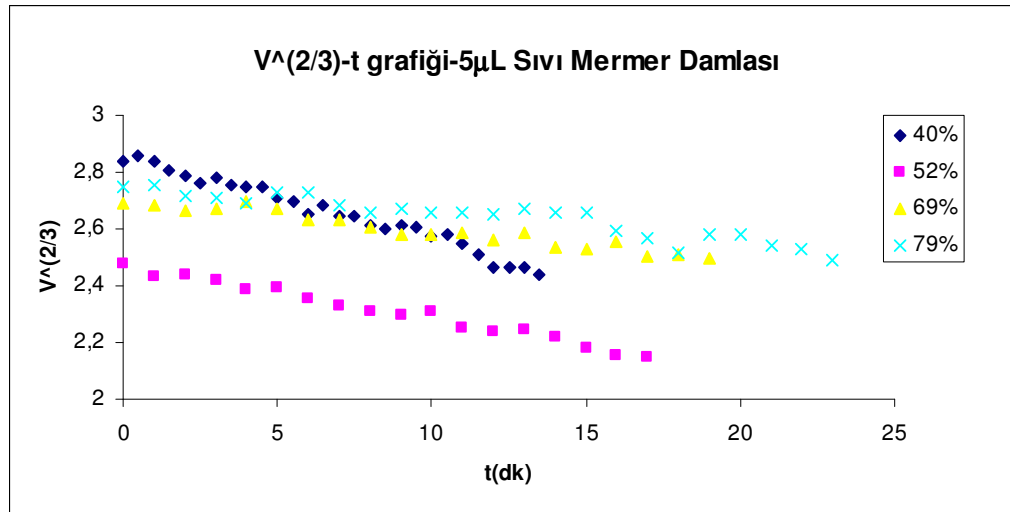
Şekil 8.33. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği.



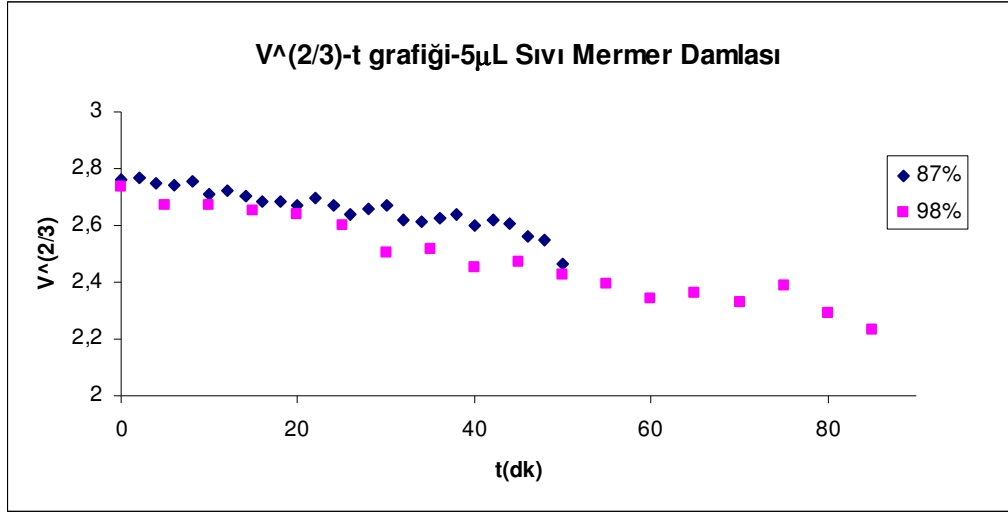
Şekil 8.34. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



Şekil 8.35. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



Şekil 8.36. 5 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %69- %79 bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



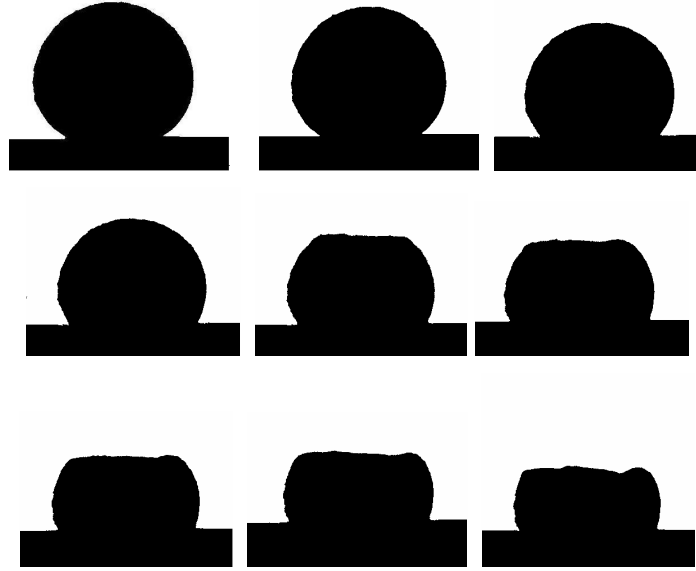
Şekil 8.37. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %87-%98 bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.

### 8.2.2. 10µL Sıvı Mermer Damlası Bulguları

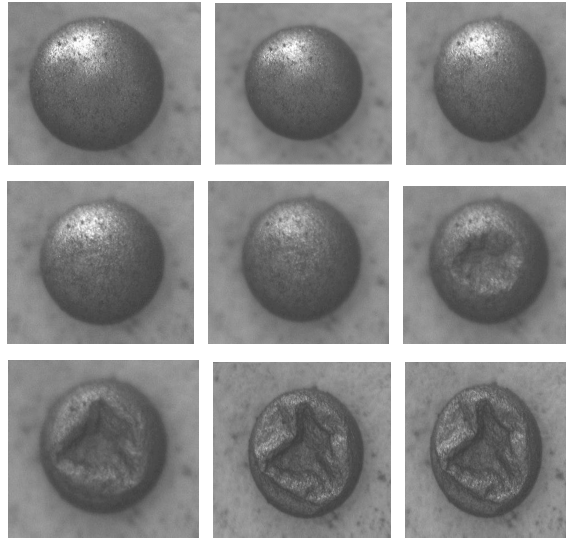
Farklı bağıl nemlerde Teflon yüzeyi üzerindeki 10µL sıvı mermer damlasının buharlaşması için KSV Cam 200 cihazı ve Görüntü İşleme ve Analiz Programından elde edilmiş deneysel veriler (8.22) ve (8.28) numaralı çizelgelerde verilmektedir. Yer sıkıntısı olduğundan dolayı tüm veriler çizelgelerde gösterilememiştir. Ancak çizilen grafikler tüm analiz edilen verileri kapsamaktadır.

Bütün analiz edilmiş veriler kullanılarak 10µL sıvı mermer damlası için çizilen  $(r_b-t)$ ,  $(\theta-t)$ ,  $(V-t)$  ve  $(V^{2/3}-t)$  grafikleri (8.40)- (8.51) numaralı şekillerde gösterilmektedir.

%98 bağıl nemdeki 10µL sıvı mermer damlasının farklı zamanlarda buharlaşmasına ait KSV CAM 200 cihazı yatay kamera ile çekilmiş fotoğrafları Şekil 8.37' de ve üstten kamera ile çekilmiş görüntüleri ise Şekil 8.38' de görülmektedir.



Şekil 8.38. %98 bağıl nemde 10µL sıvı mermer damlasının 0, 60, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300. dk larda KSV CAM 200 cihazında yatay kamera ile çekilmiş buharlaşma görüntüleri.



Şekil 8.39. %98 bağıl nemde 10µL sıvı mermer damlasının 0, 60, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300. dk larda KSV CAM 200 cihazında üstten kamera ile çekilmiş buharlaşma görüntüleri.

Çizelge 8.22. %5 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,782      | 2,32645  | 150          | 8,823215     | 4,269902    |
| 1      | 0,850425   | 2,297125 | 142          | 8,951841     | 4,3113      |
| 2      | 0,904188   | 2,258025 | 139          | 8,923419     | 4,30217     |
| 3      | 0,923738   | 2,218925 | 137          | 8,690121     | 4,226854    |
| 4      | 0,948175   | 2,1896   | 136          | 8,584389     | 4,192499    |
| 5      | 0,987275   | 2,160275 | 134          | 8,581873     | 4,191679    |
| 6      | 1,03615    | 2,121175 | 131          | 8,570056     | 4,187831    |
| 7      | 1,065475   | 2,101625 | 125          | 8,603622     | 4,198758    |

Çizelge 8.23. %40 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,728238   | 2,346    | 152          | 8,710454     | 4,233444    |
| 2      | 0,752675   | 2,3069   | 146          | 8,476715     | 4,157367    |
| 4      | 0,76245    | 2,277575 | 143          | 8,261676     | 4,086757    |
| 6      | 0,816213   | 2,2287   | 137          | 8,124479     | 4,041386    |
| 8      | 0,884638   | 2,17005  | 134          | 8,014199     | 4,004731    |
| 10     | 0,923738   | 2,121175 | 131          | 7,83635      | 3,945262    |
| 12     | 0,987275   | 2,05275  | 128          | 7,668069     | 3,888577    |
| 14     | 1,021488   | 1,984325 | 124          | 7,33971      | 3,776759    |
| 16     | 1,085025   | 1,9159   | 120          | 7,221628     | 3,736142    |

Çizelge 8.24. %52 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,698913   | 2,36555  | 155          | 8,74164      | 4,243543    |
| 3      | 0,782      | 2,3069   | 149          | 8,639713     | 4,210492    |
| 6      | 0,87975    | 2,238475 | 141          | 8,58997      | 4,194315    |
| 9      | 0,95795    | 2,179825 | 133          | 8,561108     | 4,184915    |
| 12     | 1,03615    | 2,1114   | 129          | 8,484847     | 4,160026    |
| 15     | 1,07525    | 2,0332   | 129          | 8,089257     | 4,029697    |
| 18     | 1,109463   | 1,97455  | 126          | 7,844731     | 3,948075    |
| 20     | 1,148563   | 1,925675 | 120          | 7,725374     | 3,907926    |

Çizelge 8.25. %68 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{2/3}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-----------|
| 0      | 0,811325   | 2,28735  | 144          | 8,626773     | 4,206287  |
| 10     | 0,8211     | 2,2287   | 149          | 8,15248      | 4,050667  |
| 20     | 0,806438   | 2,1896   | 146          | 7,729459     | 3,909304  |
| 30     | 0,811325   | 2,121175 | 145          | 7,18681      | 3,724124  |
| 40     | 0,816213   | 2,062525 | 145          | 6,749001     | 3,5713    |
| 50     | 0,865088   | 1,984325 | 144          | 6,420482     | 3,454446  |
| 60     | 0,9384     | 1,8768   | 138          | 6,054391     | 3,321852  |
| 70     | 1,011713   | 1,769275 | 132          | 5,741653     | 3,206451  |
| 80     | 1,104575   | 1,651975 | 125          | 5,523746     | 3,124802  |

Çizelge 8.26. %79 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

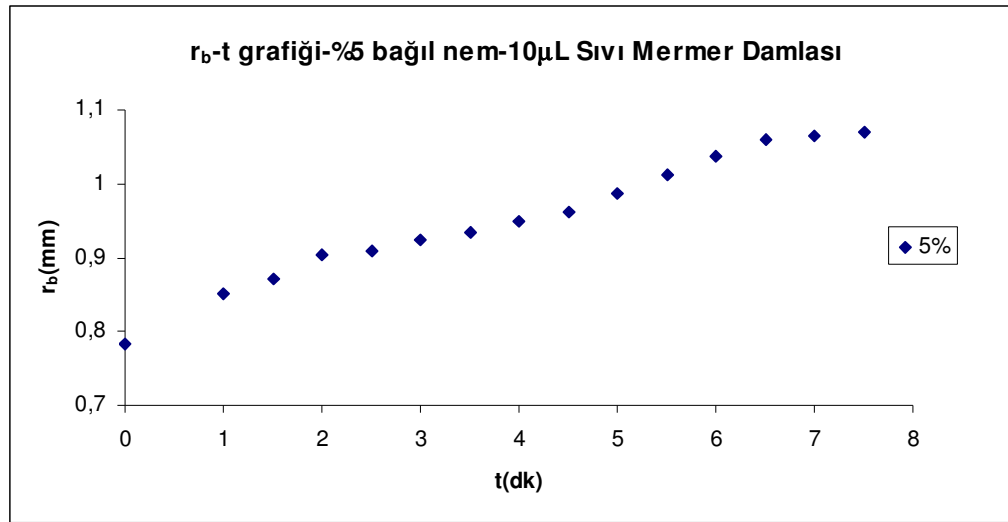
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V (mL)   | $V^{2/3}$ |
|--------|------------|----------|--------------|----------|-----------|
| 0      | 0,728238   | 2,336225 | 161          | 8,618202 | 4,203501  |
| 10     | 0,8211     | 2,2678   | 155          | 8,504164 | 4,166337  |
| 20     | 0,91885    | 2,1896   | 146          | 8,396175 | 4,130992  |
| 25     | 0,962838   | 2,1505   | 140          | 8,334718 | 4,110809  |
| 30     | 1,006825   | 2,101625 | 135          | 8,202594 | 4,067249  |
| 40     | 1,104575   | 2,003875 | 130          | 8,049541 | 4,016497  |
| 50     | 1,163225   | 1,906125 | 123          | 7,673656 | 3,890465  |

Çizelge 8.27. %87 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

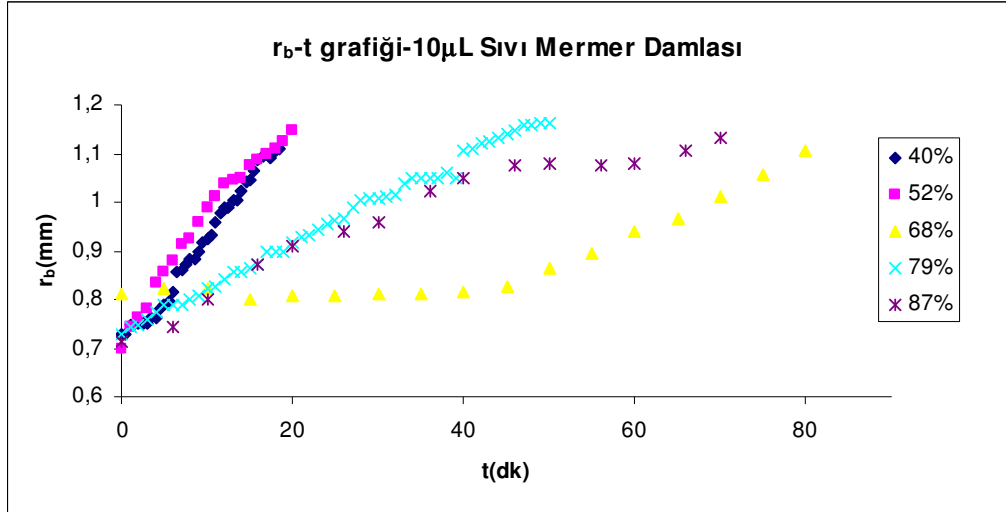
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{2/3}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-----------|
| 0      | 0,713575   | 2,277575 | 149          | 8,003716     | 4,001238  |
| 10     | 0,80155    | 2,2287   | 145          | 8,04148      | 4,013815  |
| 20     | 0,909075   | 2,179825 | 130          | 8,248818     | 4,082515  |
| 30     | 0,95795    | 2,1114   | 130          | 7,967926     | 3,989301  |
| 40     | 1,050813   | 2,062525 | 114          | 8,16733      | 4,055584  |
| 50     | 1,080138   | 2,003875 | 113          | 7,881575     | 3,960427  |
| 60     | 1,080138   | 1,93545  | 120          | 7,339427     | 3,776662  |
| 70     | 1,1339     | 1,906125 | 117          | 7,472064     | 3,822027  |

Çizelge 8.28. %98 bağıl nemde teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası için deneysel veriler.

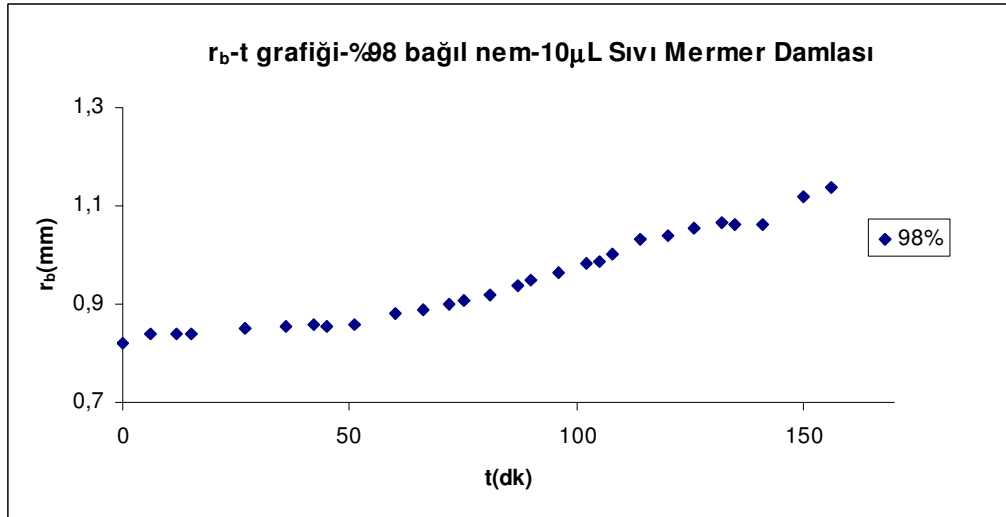
| t (dk) | $r_b$ (mm) | h (mm)   | $\Theta$ (°) | V ( $\mu$ L) | $V^{(2/3)}$ |
|--------|------------|----------|--------------|--------------|-------------|
| 0      | 0,8211     | 2,297125 | 146          | 8,775061     | 4,254352    |
| 6      | 0,84065    | 2,277575 | 145          | 8,709946     | 4,23328     |
| 36     | 0,855313   | 2,258025 | 143          | 8,618556     | 4,203616    |
| 60     | 0,87975    | 2,218925 | 139          | 8,413755     | 4,136756    |
| 66     | 0,889525   | 2,20915  | 137          | 8,386633     | 4,127861    |
| 96     | 0,962838   | 2,101625 | 132          | 7,916719     | 3,972191    |
| 126    | 1,0557     | 1,984325 | 123          | 7,561107     | 3,852331    |
| 156    | 1,138788   | 1,85725  | 113          | 7,134084     | 3,705887    |



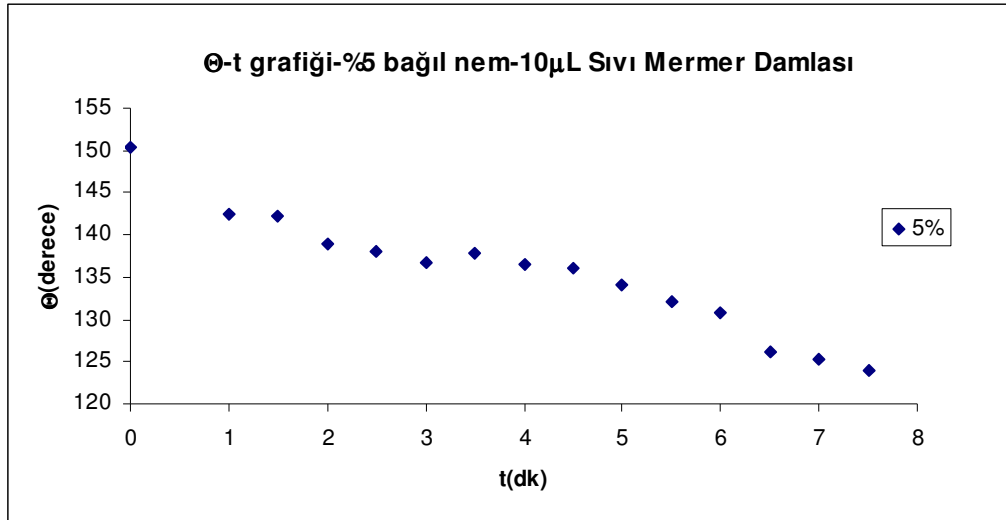
Şekil 8.40. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



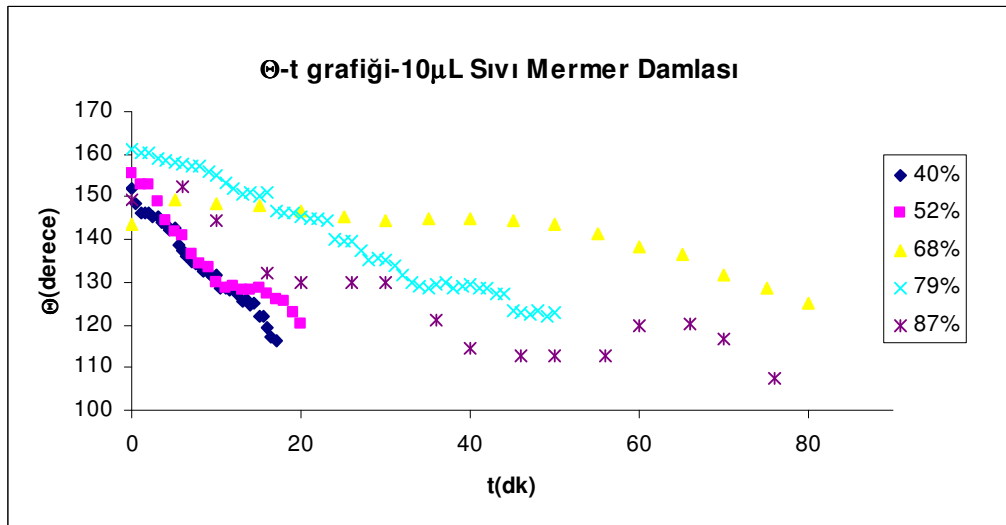
Şekil 8.41. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



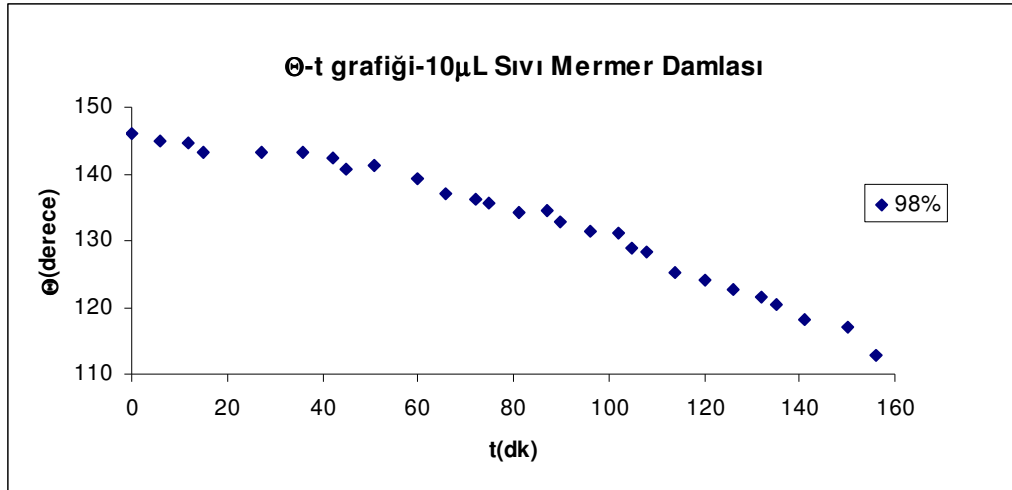
Şekil 8.42. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas yarıçapının değişim grafiği.



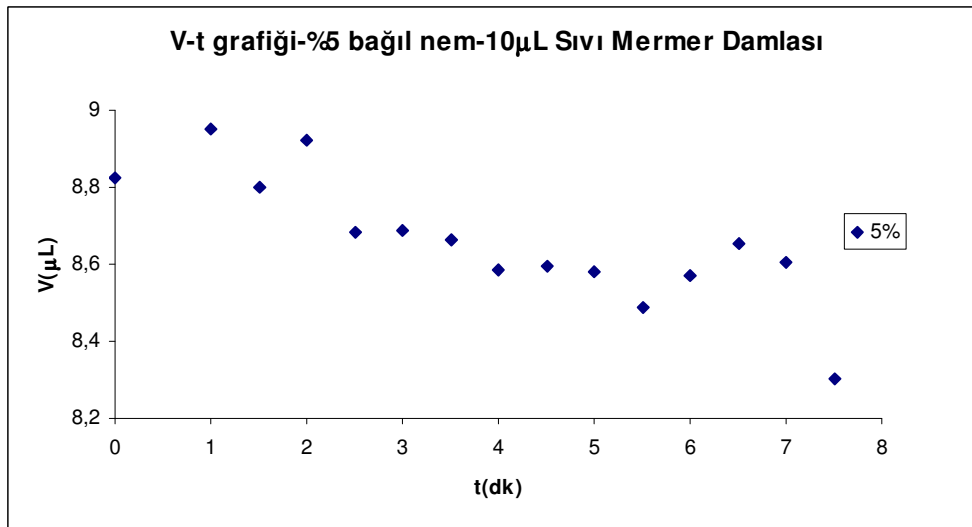
Şekil 8.43. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



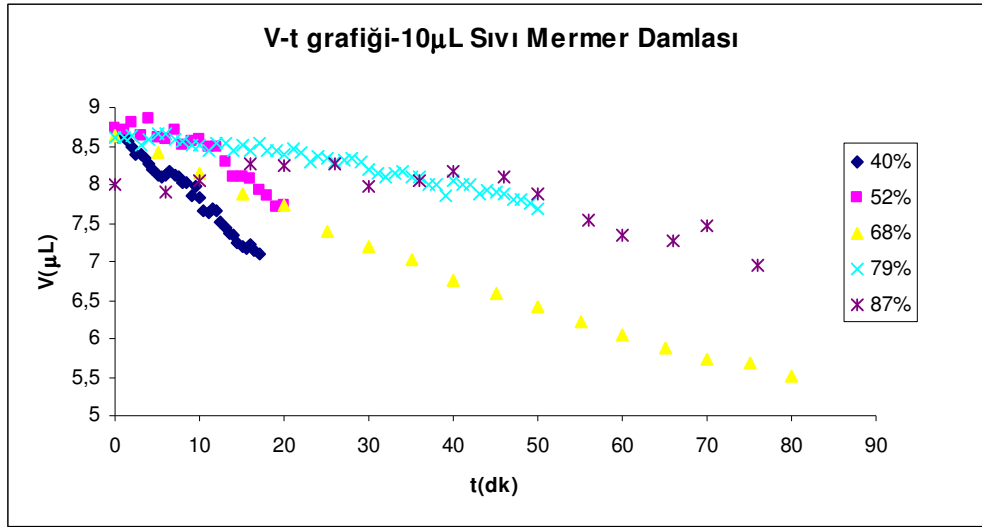
Şekil 8.44. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



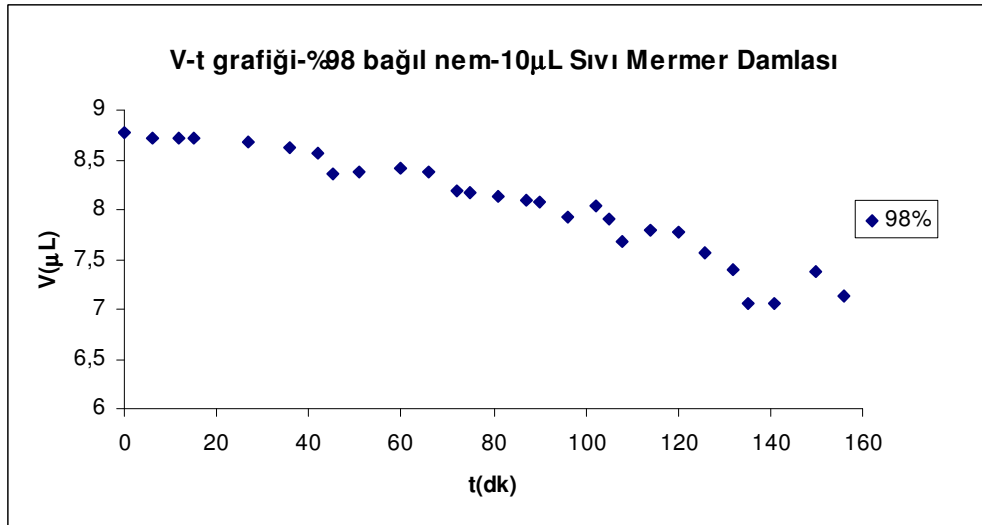
Şekil 8.45. 10μL hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre temas açısının değişim grafiği.



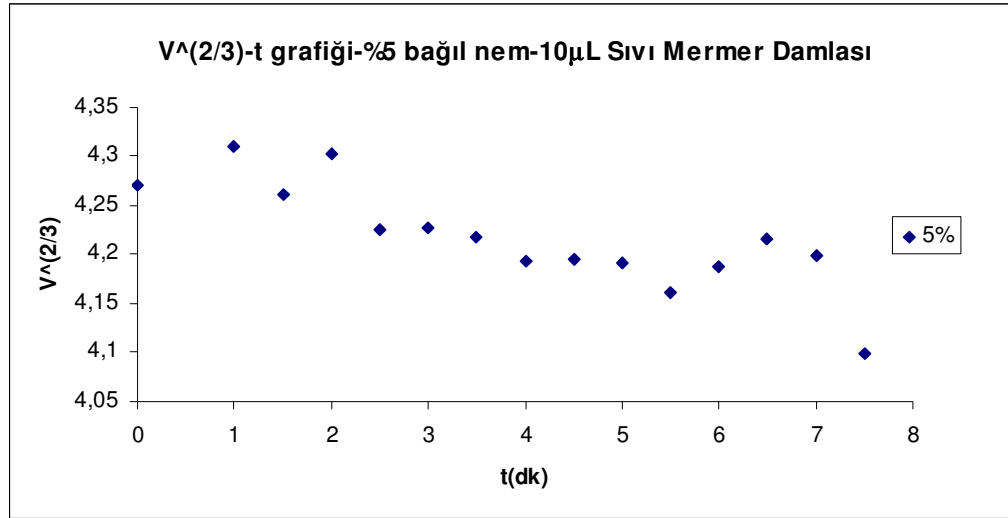
Şekil 8.46. 10μL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



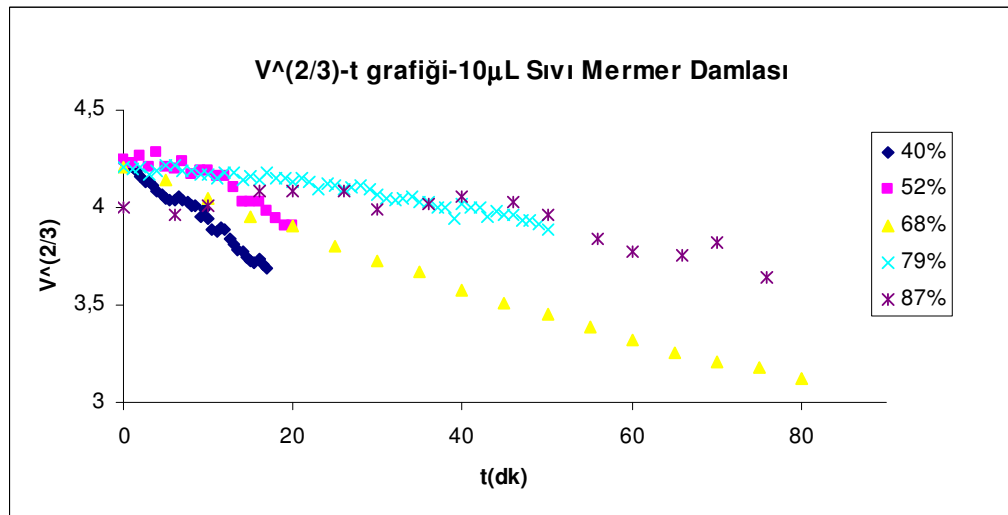
Şekil 8.47. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %68- %79- %87 bağıl nemlerde zamana göre hacminin değişim grafiği.



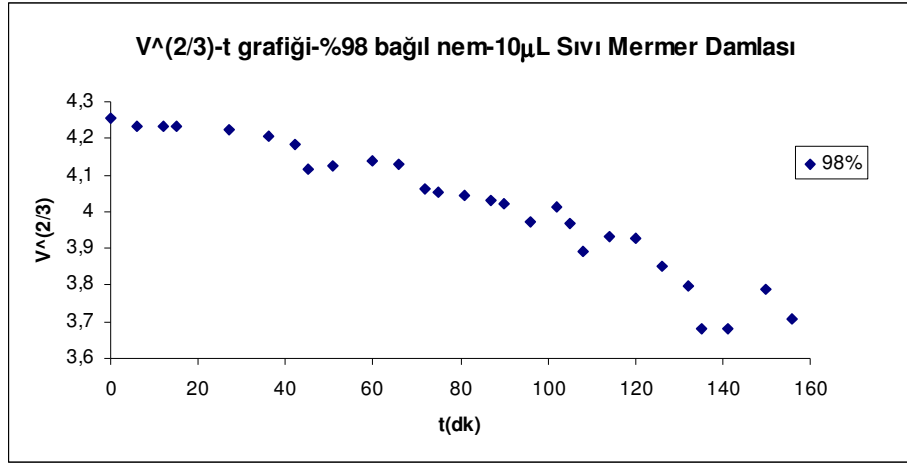
Şekil 8.48. 10 $\mu$ L hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde zamana göre hacminin değişim grafiği.



Şekil 8.49. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %5 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



Şekil 8.50. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %40- %52- %69- %79 bağıl nemlerde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.



Şekil 8.51. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlasının %98 bağıl nemde  $V^{(2/3)}$ -t grafiği.

### 8.3. TARTIŞMA

Teflon yüzeyindeki su damlası buharlaşması denemeleri sonucunda elde edilen deneysel veriler ve çizilen grafikler ile ortamın bağıl nemi ve sıcaklığı esas alınarak difüzyon sabiti hesabı için (5.30) numaralı denklem ve  $f(\theta)$  hesabı için ise (5.28) ve (5.29) numaralı denklemler kullanılmıştır. Bu hesaplamalar için  $V^{(2/3)}$ - t grafiğinin  $\theta =$  sabit olduğu bölgelerdeki eğimi esas alınmıştır.

Çizelge 8.29. 5µL su damlası için ölçülmüş deneme sıcaklıkları ve bağıl nem değerleri ile çizilen grafiklerinin eğimlerinden hesaplanan deneysel difüzyon sabiti değerleri.

| RH % | T (K) | $\theta_{sbt}$ | $dV^{2/3}/dt$ | $D(\text{cm}^2/\text{s})$ |
|------|-------|----------------|---------------|---------------------------|
| 5    | 297,4 | 58             | 0,0652        | 0,172842227               |
| 40   | 299   | 74             | 0,053         | 0,202444994               |
| 52   | 297   | 60             | 0,0373        | 0,182489829               |
| 68   | 295   | 79             | 0,0257        | 0,225588096               |
| 79   | 297   | 85             | 0,0155        | 0,173137041               |
| 87   | 296   | 75             | 0,0101        | 0,194238112               |
| 98   | 296   | 69             | 0,0037        | 0,243284837               |

Çizelge 8.30. 10µL su damlası için ölçülmüş deneme sıcaklıkları ve bağıl nem değerleri ile çizilen grafiklerinin eğimlerinden hesaplanan deneysel difüzyon sabiti değerleri.

| RH % | T (K) | $\theta_{sbt}$ | $dV^{2/3}/dt$ | D(cm <sup>2</sup> /s) |
|------|-------|----------------|---------------|-----------------------|
| 5,4  | 293,4 | 69             | 0,0429        | 0,12580739            |
| 40   | 297   | 75             | 0,052         | 0,215536429           |
| 52   | 297   | 80             | 0,0348        | 0,184556796           |
| 68   | 298   | 75             | 0,0341        | 0,220825283           |
| 78   | 298   | 78             | 0,0228        | 0,254286779           |
| 88   | 294   | 82             | 0,0135        | 0,261640214           |
| 98   | 295   | 58             | 0,0025        | 0,300147253           |

Literatürde, buharlaşan sıvıların difüzyon sabitinin sıcaklıkla değişimi,

$$\frac{D_1}{D_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{1,89} \quad (8.1)$$

genel denklemiyle verilmiştir.

Deneysel verilerden elde edilen difüzyon sabiti değerlerinde sapmalar görüldüğü için ortam sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki farkı veren  $\Delta T$  değerlerinin hesabında buradan hesaplanan teorik difüzyon sabiti değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 8.31. Sıcaklık değişimine göre hesaplanan teorik difüzyon sabiti değerleri.

| T (°C) | T (K) | D (cm <sup>2</sup> /s) |
|--------|-------|------------------------|
| 20     | 293   | 0,248023101            |
| 21     | 294   | 0,249625407            |
| 22     | 295   | 0,25123257             |
| 23     | 296   | 0,25284459             |
| 24     | 297   | 0,254461463            |
| 25     | 298   | 0,256083189            |
| 26     | 299   | 0,257709766            |

Yüzey sıcaklığına geçilmesi için iki türlü hesap yapılmış elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Temas açısının sabit olduğu bölgeler ve temas yarıçapının sabit olduğu bölgeler esas alınarak hesaplama yapılmıştır.

Temas açısının sabit olduğu bölgedeki hesap için (5.30) denkleminde;

$$D = \frac{K \rho_L \beta^{1/3}}{4 \pi^{2/3} 3^{1/3} D (c_o - c_v)} \quad (5.30)$$

(5.18) ve (5.20) numaralı denklemlerin birleştirilmesiyle elde edilen

$$c_o - c_v = \frac{\Delta P M_w}{RT} \quad (8.2)$$

Denklemini yazılıp  $D\Delta P$  çekildiğinde

$$D \Delta P = \frac{K \rho \beta^{\frac{1}{3}} RT}{4 \pi^{\frac{2}{3}} 3^{\frac{1}{3}} M_w} \quad (8.3)$$

denkleminde  $\Delta P$  değerine geçildi.

$$\Delta P = P_{vs} - P_v \quad (8.4)$$

Denklemini ise (5.19) denklemini ile birleştirildiğinde

$$\Delta P = P_{vs} (1 - RH) \quad (8.5)$$

elde edilir. Buradan  $P_{vs}$  değeri bulundu.  $P_{vs}$  'ye karşılık gelen sıcaklıklar "CRC handbook" da ki sıcaklık değişimine karşı suyun buhar basıncını veren tablodan belirlendi.

Temas yarıçapının sabit olduğu bölgedeki hesap için [Erbil, 1998] makalesi referans alınmıştır. Buna göre;

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{(D\Delta P_v)M}{\rho_L R T r_b} (A_i \sin \theta_i) \quad (8.6)$$

$$\frac{6V_i}{(A_i \sin \theta_i) r_b} = \frac{(2 + \cos \theta_i)}{(1 + \cos \theta_i)} \quad (8.7)$$

denklemleri kullanılarak aynı şekilde hesap yapılmış ve  $\Delta T$  değerleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler 5 $\mu$ L ve 10 $\mu$ L su damlaları için Çizelge (8.32) ve (8.33)' de verilmiştir.

Çizelge 8.32. 5 $\mu$ L su damlası buharlaşmasının Teflon yüzeyi üzerindeki denemelerinde çalışılan sıcaklık ve bağıl nem değerleri için  $r_b$  ve  $\theta'$  nın sabit alındığı bölgelerde ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen  $\Delta T$  ( $^{\circ}$ C) değerleri.

| 5 $\mu$ L- Su damlası | Sabit $\theta$ değerlerine göre     |            | Sabit $r_b$ değerlerine göre        |            |
|-----------------------|-------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------|
|                       | D $\Delta P$ (Pacm <sup>2</sup> /s) | $\Delta T$ | D $\Delta P$ (Pacm <sup>2</sup> /s) | $\Delta T$ |
| 23C-%98               | 27,3491082                          | -0,3       | 16,24988195                         | 0          |
| 23C-%87               | 70,96528267                         | 0,5        | 53,3882622                          | 0,94       |
| 24C-%79               | 108,530954                          | 1,25       | 80,03082099                         | 1,82       |
| 22C-%68               | 190,9161082                         | 0,5        | 134,909246                          | 2          |
| 24C-%52               | 261,4714271                         | 2,4        | 179,7200572                         | 4,57       |
| 26C-%40               | 408,4813631                         | 2,313      | 261,2594024                         | 5,875      |
| 24,4C-%5,2            | 490,1373463                         | 6,2        | 379,2147901                         | 9,9        |

Tablo 8.33. 10 $\mu$ L su damlası buharlaşmasının Teflon yüzeyi üzerindeki denemelerinde çalışılan sıcaklık ve bağıl nem değerleri için  $r_b$  ve  $\theta'$  nın sabit alındığı bölgelerde ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen  $\Delta T$  ( $^{\circ}$ C) değerleri.

| 10 $\mu$ L- Su damlası | Sabit $\theta$ değerlerine göre     |            | Sabit $r_b$ değerlerine göre        |            |
|------------------------|-------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------|
|                        | D $\Delta P$ (Pacm <sup>2</sup> /s) | $\Delta T$ | D $\Delta P$ (Pacm <sup>2</sup> /s) | $\Delta T$ |
| 22C-%98                | 15,87598882                         | -0,06      | 12,07040937                         | 0,03       |
| 21C-%88                | 95,53852458                         | -0,56      | 67,54691864                         | 0,25       |
| 25C-%78                | 159,3996671                         | 0,4        | 132,3555342                         | 0,9        |
| 25C-%68                | 223,9345027                         | 0,76       | 187,1948462                         | 1,57       |
| 24C-%52                | 264,4329776                         | 2,34       | 186,7927563                         | 4,37       |
| 24C-%40                | 386,0257444                         | 1,56       | 251,4264208                         | 5,1        |
| 20,4C-%5,4             | 278,3494541                         | 10,17      | 254,5461413                         | 11,28      |

Çalışılan sıcaklık aralığını oda sıcaklığı olarak sabit kabul edersek bağıl nemin artması ile  $\Delta T$  değerlerinde azalmalar görülmektedir. Ortamın bağıl nemi arttıkça buharlaşma hızı yavaşlamaktadır. Buda damla yüzeyindeki sıcaklık düşüşünün daha az olmasını sağlamaktadır.

Sıvı mermer damlasının buharlaşması sonucunda elde edilen verilere göre su damlası için mevcut olan difüzyon denklemlerine uymadığı görülmektedir.

Sıvı mermer damlası buharlaşırken temas yarıçapı değerleri teoriye uygun olmayarak beklenmeyen şekilde artış göstermektedir. Bu da sıvı mermer damlasını kaplayan tozların içindeki su buharlaştıkça damlanın yere daha çok oturmasından kaynaklanmaktadır. Su buharlaştıkça damlanın üstündeki tozlar Şekil 8.38’de de gösterildiği gibi üstten içe doğru çökmekte, bu da damlanın katı ile olan temasını arttırmaktadır. Aynı zamanda sabit bir temas yarıçapı bölgesi olmadığı için difüzyon için kabul edilen modellerden biri olan sabit yarıçapı modeline uymamaktadır.

Yine aynı sebepten dolayı damlanın katı ile yaptığı temas açısında da düzenli bir azalış görülmemekte ve damlanın sağ ve sol açıları arasında farklar oluşarak düzensiz artış ve azalmaların olduğu gözlenmektedir. Sağ ve sol açılarında farklı değerler vermesi damlanın o anda her iki tarafındaki çöken tozun aynı miktarda olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu şekilde sıvı mermer damlasının buharlaşması sabit temas açısı difüzyon modeli ile de açıklanamamaktadır.

Sıvı mermer damlasının buharlaşması hakkında bilgi sahibi olabilmek için aynı koşullarda ve aynı zaman aralığındaki su damlasının difüzyon hızını veren hacim-zaman grafiklerinin eğimlerini karşılaştırabiliriz. Sıvı mermer damlası zamanla buharlaşırken küresel şeklini kaybetmektedir, o zamanda mevcut denklemlere uyarlanamadığı için hacim hesabı yapılamamaktadır. Bu sebeple sıvı mermer damlasının şeklinin bozulmaya başladığı ilk ana kadar olan zamanda su damlası verileri de o aralıkta alınarak karşılaştırma yapılabilir. Sıvı mermer damlasının ilk bozulmaya başladığı ana kadar ve su damlalarının tüm buharlaşma süreleri Çizelge (8.34)’ de gösterilmiştir.

Çizelge 8.34. Farklı bağıl nemlerde 5 $\mu$ L ve 10 $\mu$ L boyutlarındaki sıvı mermer damlası için bozulmaya başladığı ana kadar olan, su damlası için ise tüm buharlaşma sonuna kadar geçen süreler.

| RH % | 5 $\mu$ L-Su | 5 $\mu$ L-Sıvı mermer damlası | 10 $\mu$ L-Su | 10 $\mu$ L-Sıvı mermer damlası |
|------|--------------|-------------------------------|---------------|--------------------------------|
|      | t (dk)       | İlk bozulma (dk)              | t (dk)        | İlk bozulma (dk)               |
| 98   | 780          | 85.dk                         | 1830          | 156.dk                         |
| 87   | 229          | 50.dk                         | 361           | 70.dk                          |
| 79   | 134,5        | 23.dk                         | 183           | 49.dk                          |
| 69   | 105          | 19.dk                         | 138           | 81.dk                          |
| 52   | 76           | 17. dk                        | 133           | 26.dk                          |
| 40   | 52           | 13,5.dk                       | 90,5          | 17.dk                          |
| 5    | 40           | 5. dk                         | 77,5          | 7,5. dk                        |

5 $\mu$ L ve 10 $\mu$ L su damlası ve sıvı mermer damlası için dV/dt değerleri karşılaştırma sonuçları Çizelge (8.35) ve (8.36)' de verilmiştir.

Çizelge 8.35. 5 $\mu$ L su damlası ve sıvı mermer damlası için çalışılan deneme sıcaklığı ve bağıl nem için dV/dt grafiğinin eğimleri (sıvı mermer damlasının bozulmaya başladığı süre için alınan değerler karşılaştırılmıştır).

| 5 $\mu$ L Su damlası |       |        | 5 $\mu$ L Sıvı mermer damlası |       |        |
|----------------------|-------|--------|-------------------------------|-------|--------|
| RH %                 | T (K) | dV/dt  | RH %                          | T (K) | dV/dt  |
| 5                    | 297,4 | 0,1645 | 5,9                           | 298   | 0,1243 |
| 40                   | 299   | 0,1248 | 40                            | 297   | 0,0732 |
| 52                   | 297   | 0,0943 | 53                            | 298   | 0,0432 |
| 68                   | 295   | 0,0692 | 69                            | 295   | 0,0261 |
| 79                   | 297   | 0,0431 | 79                            | 297   | 0,0246 |
| 87                   | 296   | 0,0227 | 88                            | 296   | 0,011  |

Çizelge 8.36. 10 $\mu$ L su damlası ve sıvı mermer damlası için çalışılan deneme sıcaklığı ve bağıl nem için dV/dt grafiğinin eğimleri (sıvı mermer damlasının bozulmaya başladığı süre için alınan değerler karşılaştırılmıştır).

| 10 $\mu$ L Su damlası |       |        | 10 $\mu$ L Sıvı mermer damlası |       |        |
|-----------------------|-------|--------|--------------------------------|-------|--------|
| RH %                  | T (K) | dV/dt  | RH %                           | T (K) | dV/dt  |
| 5,4                   | 293,4 | 0,1492 | 5,6                            | 294   | 0,0604 |
| 40                    | 297   | 0,189  | 40                             | 297   | 0,0941 |
| 52                    | 297   | 0,1248 | 52                             | 298   | 0,0551 |
| 68                    | 298   | 0,0915 | 69                             | 295   | 0,0395 |
| 78                    | 298   | 0,0605 | 78                             | 296   | 0,036  |
| 88                    | 294   | 0,0397 | 87                             | 294   | 0,0108 |

Buradan özellikle 10 $\mu$ L su damlası ve sıvı mermer damlası arasında yarı yarıya yakın bir azalma olduğu görülmektedir. Su damlasının toz ile kaplanmasının buharlaşma hızını yarı yarıya azalttığını söyleyebiliriz. Ancak 5 $\mu$ L için düzgün bir azalış yoktur.

Su damlasının grafit tozu ile kaplanmasıyla oluşan sıvı mermer damlasının buharlaşmaya karşı oluşturduğu direncin, (r) hesaplanması için (5.31) numaralı denklem kullanılmıştır. Buna göre 5 $\mu$ L ve 10 $\mu$ L sıvı mermer damlası verileri ve elde edilen buharlaşma direnci değerleri Çizelge (8.37) ve (8.38)' de verilmiştir.

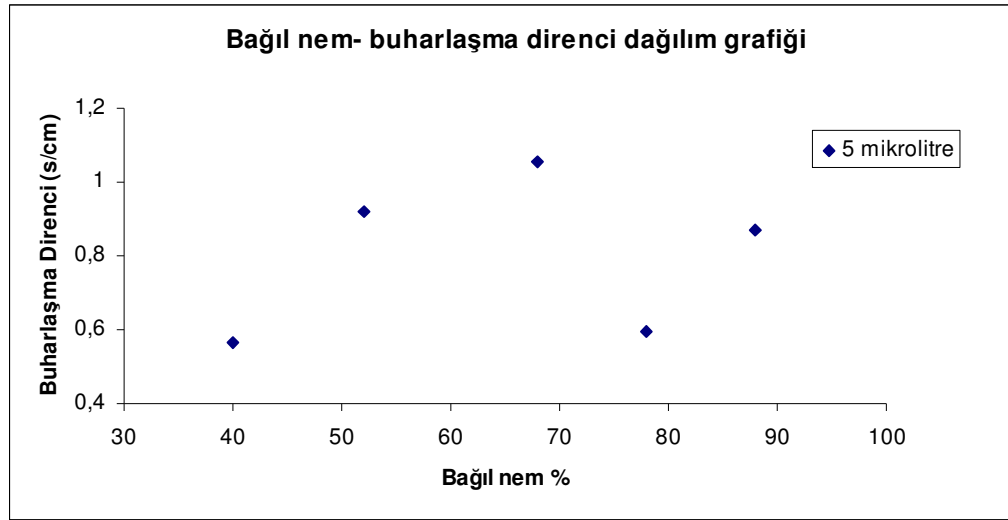
Çizelge 8.37. 5 $\mu$ L sıvı mermer damlasının hesapla bulunan buharlaşma direnci.

| 5 $\mu$ L Su damlası |                            |             | 5 $\mu$ L Sıvı Mermer Damlası |                            |             |                      |                                 |          |
|----------------------|----------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|-------------|----------------------|---------------------------------|----------|
| RH %                 | dt/dV (s/cm <sup>3</sup> ) | dt/dm (s/g) | RH %                          | dt/dV (s/cm <sup>3</sup> ) | dt/dm (s/g) | A (cm <sup>2</sup> ) | $\Delta C$ (g/cm <sup>3</sup> ) | r (s/cm) |
| 5                    | 364741641,3                | 363664924   | 5,9                           | 482703137,6                | 481278198   | 0,125352             | 2,17E-08                        | 0,319663 |
| 40                   | 480769230,8                | 479350000   | 40                            | 819672131,1                | 817252459   | 0,128392             | 1,31E-08                        | 0,566863 |
| 52                   | 636267232,2                | 634388971,4 | 53                            | 1388888889                 | 1384788889  | 0,1131               | 1,08E-08                        | 0,919109 |
| 68                   | 867052023,1                | 864492485,5 | 69                            | 2298850575                 | 2292064368  | 0,122911             | 6,02E-09                        | 1,056605 |
| 79                   | 1392111369                 | 1388001856  | 79                            | 2439024390                 | 2431824390  | 0,124866             | 4,57E-09                        | 0,596056 |
| 87                   | 2643171806                 | 2635369163  | 88                            | 5454545455                 | 5438443636  | 0,125893             | 2,47E-09                        | 0,87117  |

Çizelge 8.38. 10µL sıvı mermer damlasının hesapla bulunan buharlaşma direnci.

| 10 µL Su damlası |                            |             | 10µL Sıvı mermer damlası |                            |             |                      |                         |          |
|------------------|----------------------------|-------------|--------------------------|----------------------------|-------------|----------------------|-------------------------|----------|
| RH %             | dt/dV (s/cm <sup>3</sup> ) | dt/dm (s/g) | RH %                     | dt/dV (s/cm <sup>3</sup> ) | dt/dm (s/g) | A (cm <sup>2</sup> ) | ΔC (g/cm <sup>3</sup> ) | r (s/cm) |
| 5,4              | 402144772,1                | 403335418,3 | 5,4                      | 993377483,4                | 996318616   | 0,18915              | 1,73E-08                | 1,941249 |
| 40               | 317460317,5                | 318400235   | 40                       | 637619553,7                | 639507379   | 0,189469             | 1,31E-08                | 0,794944 |
| 52               | 480769230,8                | 482192663,5 | 52                       | 1088929220                 | 1092153256  | 0,191047             | 1,11E-08                | 1,288839 |
| 68               | 655737704,9                | 657679173,8 | 68                       | 1518987342                 | 1523484669  | 0,184953             | 6,02E-09                | 0,964288 |
| 78               | 991735537,2                | 994671808,4 | 78                       | 1666666667                 | 1671601234  | 0,188032             | 4,53E-09                | 0,57608  |
| 88               | 1511335013                 | 1515809683  | 88                       | 5555555556                 | 5572004112  | 0,178871             | 2,38E-09                | 1,729269 |

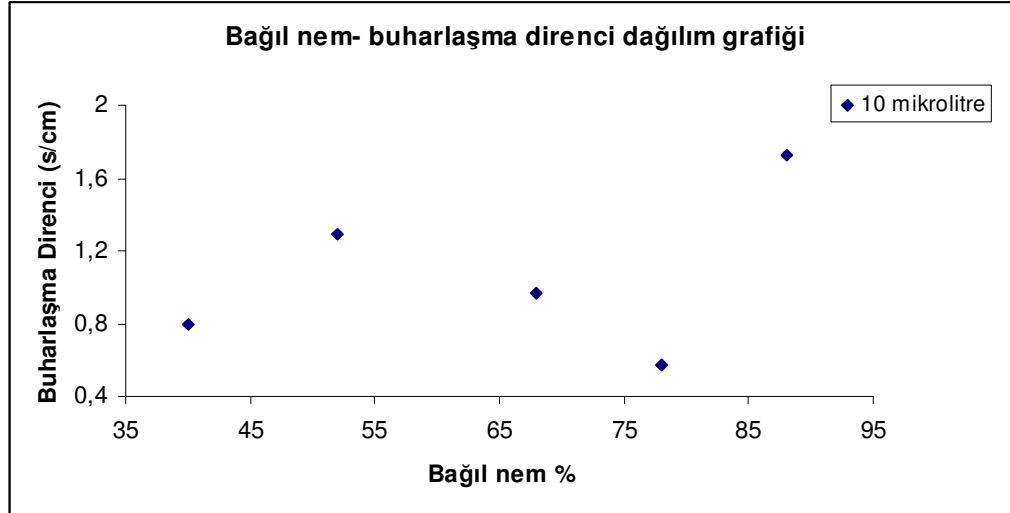
Değişen bağıl neme karşı çizilen buharlaşma direnci grafiği 5µL ve 10µL hacmindeki damlalar için sırasıyla Şekil 8.52 ve 8.53’ de görülmektedir.



Şekil 8.52. 5µL hacmindeki sıvı mermer damlası için bağıl neme karşı buharlaşma direnci dağılım grafiği.

Bu sonuçlara göre %5 ve %98 bağıl nem için fazla sapmalar görülmektedir. Bu deneme sonuçlarını ihmal edersek, 5µL grafit sıvı mermer damlası için buharlaşma direncini  $r = 0,94 \pm 0,13$  (s/cm) olarak hesaplarız. Bu kadar zor bir denemede hem

5µl hacme sahip sıvı mermerler için sadece % 14 sapma ile hep aynı sonucun bulunmuş olması deneme hassasiyetini göstermektedir.



Şekil 8.53. 10µL hacmindeki sıvı mermer damlası için bağıl neme karşı buharlaşma direnci dağılım grafiği.

Bu sonuçlara göre ise %5 ve %98 deneme sonuçlarını ihmal edildiğinde, 10µL grafit sıvı mermer damlası için buharlaşma direncini  $r = 1,15 \pm 0,57$  (s/cm) olarak hesaplarız. Damla hacmi büyüdükçe kontrolü daha zor olmakta ve hata payı artmaktadır.

## 9. SONUÇLAR

Bu çalışmada literatürde ilk kez grafit mikropowder kullanılarak sıvı mermer damlası üretilmiştir, ve uzun ömürlü olduğu saptanmıştır. Daha sonra bunların saf su damlasına nazaran ne kadar sürede buharlaştığı saptanmıştır.

Teflon yüzeyi üzerinde buharlaşan 5 $\mu$ L ve 10 $\mu$ L su damlası buharlaşması önce sabit temas yarıçapı modeline göre daha sonra belli bir zamandan sonra sabit temas açısı modeline göre buharlaşmaktadır. Hesapla bulunan ( $V^{2/3}$ -t) grafiklerinin yüksek regrasyon vererek doğrusal çıkması denemedeki damlaların hacminin  $V = f(\theta, r_b, h)$  küresel geometriye uyduğunu ve yapılan denemenin hassasiyetini göstermektedir.

Ancak kullanılan katı yüzeyin saf Teflon ve düz olmamasından kaynaklanan problemler mevcuttur. Bu yüzden başlangıç su temas açısı 110- 120° arasında değişmekte olduğu gibi, damla buharlaşması beklendiği gibi sabit temas açısı modeline başlangıçta uymamakta ancak önemli miktar su buharlaştıktan sonra sabit temas açısı prosesi başlamaktadır ve bu açı da damlanın konulduğu bölgeye bağlı olarak farklılıklar göstermiştir.

Buharlaşan su damlasının, buharlaşma hızından hesapla bulunan difüzyon sabitleri  $f(\theta)$  faktörü hesaba katıldığında teoriye çok daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu da damla buharlaşmalarında alttaki yüzeyin varlığından kaynaklanan difüzyonun engellenmesini gösteren  $f(\theta)$  faktörünün önemini vurgulamaktadır.

Ortamin bağıl nemi arttıkça beklendiği gibi buharlaşma hızı yavaşlamaktadır. Bu da damla yüzeyindeki sıcaklık düşüşünün ( $\Delta T$ ) daha az olmasını sağlamaktadır. Deneyssel olarak bulunan  $\Delta T$  değerlerinin bağıl nemin artması ile azaldığı görülmüştür, bu da literatürde daha önce verilmemiştir, ilk kez bu çalışmada saptanmıştır.

5 $\mu$ L ve 10 $\mu$ L su damlası buharlaşmasında damla boyutunun artması buharlaşma süresinin artmasına sebep olmaktadır.

Sıvı mermer damlalarının buharlaşması su damlasına kıyasla daha uzun olmaktadır. Ancak sıvı mermer damlası buharlaşması sırasında damlanın şekli bozulmakta ve küresel geometriden uzaklaştığı için tüm buharlaşma sürecinin analiz edilmesi mümkün olmamaktadır.

Sıvı mermer damlalarının buharlaşması mevcut difüzyon denklemleri ile modellenememektedir. Bunun nedeni damlanın etrafını kaplayan tozların zamanla içerdeki su buharlaştıkça alt tabakadaki tozların üzerine çökmeye başlayarak sıvı mermerin profilinin deforme olmasıdır. Bu proses damla buharlaşması teorisine uygun olmayarak temas yarıçapında düzenli olmayan bir artışa ve temas açısında yine düzenli olmayan bir azalışa sebep olduğundan buharlaşmanın modellenmesi için gerekli sabit temas yarıçapı veya temas açısı bölgesi oluşturmamaktadır. Bu nedenle, karşılaştırma yapabilecek tek yöntem olarak, su ve sıvı mermer buharlaşma hızları ( $dV/dt$ ) La Mer tarafından önerilen “buharlaşma direnci” denklemine uygulanarak buharlaşma direnci tayin edilmiş ve grafit için hem 5 $\mu$ L damlalar için buharlaşma direnci,  $r = 0,94 \pm 0,13$  bulunmuştur ki kontrolü bu kadar zor denemelerde % 14 lük bir sapma iyi bir sonuçtur.

## KAYNAKLAR

1. Aussillous P., Quéré D., (2001), Nature, 411, 924- 927.
2. Mahadevan L., (2001), Nature, 411, 895-896.
3. Lerner E. J., (2001), The Industrial Physicist, 8-9.
4. Pike N., Richard D., Foster D., Mahadevan, L., (2002), Proc. R. Soc. Lond. B, 269, 1211–15.
5. Quéré D., (2002), Physica A, 313, 32 – 46.
6. Quéré D., (2002), Nature, 1, 14 – 15.
7. Quéré D., (1998), Langmuir, 14, 2213- 2216.
8. Bico J., Marzolin C., Quéré D., (1999), Europhys. Lett., 47 (2), 220-226.
9. Mahadevan L., Pomeau Y., (1999), Phys. Fluids, 11, 2449–2453.
10. Lai, S. C. S., (2003), Universtiet Leiden, <http://home.wanadoo.nl/scslai/lotus.doc>.
11. Aussillous P., Quéré D., (2004), J. Fluid Mech., 512, 133–151.
12. Vella D., Aussillous P., Mahadevan L., (2004), Europhys. Lett., 68 (2), 212–218.
13. Quéré D., (2005), Rep. Prog. Phys. 68, 2495–2532.
14. Aussillous P., Quéré D., (2006), Proc. R. Soc. A, 462, 973–999.
15. Forny L., Pezron I., Saleh K., Guigon P., Komunjer L., (2006), Powder Technology, 171, 15–24.
16. McHale G., Herbertson D. L., Elliott S. J., Shirtcliffe N. J., Newton M. I., (2007), Langmuir, 23 (2), 918- 924.
17. Newton M. I., Herbertson D. L., Elliott S. J., Shirtcliffe N. J., McHale G., (2007), J. Phys. D: Appl. Phys. 40, 20– 24.
18. Quéré D., Ajdari A., (2006), Nature, 5, 429-430.
19. Vafaei S., Borca-Tasciuc T., Podowski M. Z., Purkayastha A., Ramanath G., Ajayan P. M., (2006), Nanotechnology, 17, 2523–2527.
20. Zeng C., Bissig H., Dinsmore A. D., (2006), Solid State Communications, 139, 547–556.
21. Gao L., McCarthy T. J., (2007), Langmuir, (Letter), 23 (21), 10445- 10447.
22. Gao, L.; McCarthy, T. J., (2007), Langmuir, 23, 9125-9127.
23. McHale G., Shirtcliffe N. J., Newton M. I., Pyatt F. B., (2007), App. Phys.

- Letters, 90, 054110.
24. McHale G., Shirtcliffe N. J., Newton M. I., Pyatt F. B., (2007), *Hydrol. Process.*, 21, 2229–2238.
  25. Zhao N., Zhang Xiao-Yan, Li Yan-Fang, Lu Xiao-Ying., Sheng Si-Lu, Zhang Xiao-Li, Xu J., (2007), *Cell Biochem Biophys*, 49, 91–97.
  26. Erbil H. Y., (2006), *Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces*, Blackwell Publishing, Ch 9, 308.
  27. Geankoplis C. J., (2003), *Transport Processes and Seperation Process Principles*, Prentice Hall, Ch 6, 410- 428.
  28. Petrucci R. H., Harwood W. S., Genel Kimya Prensipler ve Modern Uygulamalar: Çeviri Editörü, Uyar Tahsin, Palme Yayıncılık, (1994), Sayfa ( 456-457).
  29. Carr D.D. (Editor) ,(1994), *Industrial Minerals and Rocks*, Society for Mining ,Metallurgy and Exploration Inc. Colorado, 561570.
  30. Picknett R. G.; Bexon R., (1977), *J. Colloid Interface Sci.*, 61,336.
  31. Rideal, E.; (1925), *J. Phys. Chem.* , 29, 1585.
  32. Hedestrand, G. (1924), *J. Phys. Chem.*, 29, 1585.
  33. Archer R. J., La Mer V. K.; (1955), *J. Phys. Chem.*, 59, 200.
  34. La Mer V. K., Aylmore L. A. G., Healy T. W., (1963), *J. Phys. Chem.*, 67, 2793-2795.
  35. La Mer V. K.; Healy, T. W.; (1964), *Science*, 148, 36.
  36. Lunckerheiman K., Zembala M., (1997), *J. Coll. Inter. Sci.*,188, 363- 371.
  37. Birdi K. S., Vu D. T., Winter A., (1989), *J. Phys. Chem.* 93, 3102- 3703.
  38. Bourges-Monnier C., Shanahan M. E. R., (1995), *Langmuir*, 11, 2820- 2829.
  39. Rowan S. M., Newton M. I., McHale G., (1995), *J. Phys. Chem.*, 99, 13268-13271.
  40. Erbil H. Y., (1997), *J. Phys. Chem. B*, 101, 6867- 6873.
  41. Erbil H. Y., (1998), *J. Phys. Chem. B*, 102, 9234-9238.
  42. McHale G., Rowan S. M., Newton M. I., Banerjee M. K., (1998), *J. Phys. Chem. B*, 102, 1964- 1967.
  43. Meriç R.A., Erbil H. Y., (1998), *Langmuir*, 14, 1915-1920.
  44. Erbil H. Y., G. McHale, Rowan S. M., Newton M. I., (1999), *Langmuir*, 15, 7378-7385.
  45. Erbil H. Y., Doğan M., (2000), *Langmuir*, 16, 9267-9273.

46. McHale G., Erbil H. Y., Newton M. I., Natterer S., Langmuir, (2001), 17, 6995- 6998.
47. Erbil H. Y., G. McHale, M. I. Newton,(2002), Langmuir, 18, 2636-2641.
48. Erbil H. Y., Avcı Y., (2002), Langmuir, 18, 5113- 5119.
49. Panwar A. K., Barthwal S. K., Ray S., (2003), J. Adhesion Sci. Technol., 17, 1321-1329.
50. Fang X., Li B., Petersen E., Ji Y., Sokolov J. C., Rafailovich M. H., (2005), J. Phys. Chem. B, 109, 20554- 20557.
51. Gugliotti M., Baptista M. S., Politi M. J., (2005), J. Braz. Chem. Soc., 16, No. 6A, 1186- 1190.
52. G. McHale, S. Aqil, N. J. Shirtcliffe, M. I. Newton, H. Y. Erbil, (2005), Langmuir, 21, 11053- 11060.
53. Kim J.-H., Ahn S. II, Kim J. H., Zin W.-C., (2007), Langmuir, 23, 6163- 6169.
54. Oner D., McCarthy T. J., (2000), Langmuir, 16, 7777- 782.
55. J. Richard Adams, Albert R. Merz, (1929), Ind. and Eng. Chem., 21, 305.
56. O'Brien F. E. M., (1948), Jour. Sci. Instruments., 25, 73- 76.
57. D. S. Carr, B. L. Harris, (1949), Ind. and Eng. Chem., 2014-2015.
58. Winston P. W., Bates D. H., (1960), Ecology, 41, 232- 237.
59. Agarwal M., Griffiths R., (2006), Physics, 95- 96.
60. Eroğlu A., (2003), Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
61. Erbil, H. Y., A. L. Demirel, Y. Avcı and O. Mert, (2003), Science, 299, 1377- 1380.
62. La Mer V. K., Robbins M. L.,(1958), J. Phys. Chem., 62, 1291-1295.
63. La Mer V. K., Aylmore L. A. G., (1962), Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 48, 316- 324.
64. La Mer V. K., Aylmore L. A. G., Healy T. W., (1963), J. Phys. Chem.,67, 2793- 2795.
65. McNamee C.E., Barnes G.T., Gentle I. R.; Peng B. J., Steitz R., Probert R., (1998), J. Coll. Inter. Sci., 207, 258-263.

## ÖZGEÇMİŞ

Merve DANDAN 1984 yılında Sakarya’da doğdu. İlköğrenimini 50. Yıl İlkokulu’nda, orta öğrenimini Erenler Ortaokulu’nda ve lise öğrenimini 2001 yılında Adapazarı Atatürk Süper Lisesi’nde tamamladı. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü’nde üniversite eğitime başladı. 2005 yılında mezun oldu ve aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitime başladı.