

Süperhidrofobik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde sıvı damlası gaz kabarcığı ve sıvı jeti dinamiğinin incelenmesi

An investigation of droplet bubble and liquid jet dynamics on superhydrophobic and hydrophobic surfaces

Ali KİBAR^{1*}

¹Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ali Rıza Veziroğlu MYO, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
alikibar@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.03.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 30.04.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.07088
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeylerin hidrofilik yüzeylerden farklılıkları ve bu yüzeyler üzerinde sıvı damlası, gaz kabarcığı ve sıvı jeti dinamiği incelenmiştir. Hidrofobik yüzeyler üzerinde sıvı/su damlası yüksek temas açısı ile durmasına karşılık gaz/hava kabarcığı yüzeyde yayılmaktadır. Süperhidrofobik yüzeyler için Cassie ve Wenzel olmak iki farklı durum mevcuttur. Her iki durumda da yüzeyin temas açısı yüksek olmasına karşılık Cassie durumunda temas açısı histerezisi düşük Wenzel durumda ise yüksek olmaktadır. Cassie durum süperhidrofobik yüzeyler üzerindeki sıvı damlası yüzeye çok az noktalarla temas etmesi sayesinde küçük bir dış kuvvet etkisiyle yüzeyden uzaklaştırılabilmektedir. Süperhidrofobik yüzeyler sıvı içerisine daldırıldıklarında etraflı ince bir hava filmi ile kaplanmaktadır. Bu şekildeki yüzeye alttan gönderilen hava kabarcığı yüzeydeki hava filmine nüfuz ederek kaybolmaktadır. Yüzey üzerindeki kabarcık ise yüzeyde yayılmaktadır. Süperhidrofobik yüzeyler donma/buzlanmasının önlenmesi, film/damla yağışmanın kontrolü, kaynamada oluşan hava kabarcık dinamiğinin kontrolü gibi birçok alanlarda uygulama alanları bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Süperhidrofobik yüzey, Temas açısı, Temas açısı histerezisi, Sıvı jeti, Sıvı damlası, Gaz kabarcığı

Abstract

In this study, the differences between the hydrophobic and superhydrophobic surfaces from the hydrophilic surfaces and dynamics of a liquid droplets, gas bubbles and liquid jets have been examined. For a droplet, there remains a large contact angle on the superhydrophobic surfaces, while the gas bubble spreads on the surface with a low contact angle. There are two different conditions for superhydrophobic surfaces (i.e., Cassie and Wenzel) and the contact angles are high for those two surfaces. However, contact angle hysteresis is low and high for the Cassie and Wenzel states, respectively. The droplet remains on the superhydrophobic surface touching a small area with the surface, and it can be removed from the surface by a very low external forces. When the superhydrophobic surfaces are submerged in a liquid, it is covered by a thin air layer. In this case, the air bubble, which is sent from underneath of the surface, bursts and disappears on the surface. The superhydrophobic surfaces have potential applications for icing, film/dropwise condensation and boiling.

Keywords: Superhydrophobic surfaces, Contact angle, Contact angle hysteresis, Liquid jet, Liquid droplet, Gas bubble

1 Giriş

Nanoteknolojinin bir ürünü olan süperhidrofobik yüzeyler endüstride birçok alanda kullanılmaktadır ve bu alanlara her geçen gün yenileri eklenmektedir. Süperhidrofobik yüzeye sahip cisimler ilk defa nilüfer çiçeği yaprağının sürekli temiz kalmasının nedeninin araştırılmasıyla ortaya çıkmıştır. Yaprak yüzeyi, serbest yüzey enerjisi düşük bir madde ile kaplı olmasının yanında nano mertebede pürüzlü bir yapıya sahiptir. Bu her iki özelliğin birleşimi sayesinde nilüfer çiçeği yaprak yüzeyinin süperhidrofobik özelliğe sahip olduğu tespit edilmiştir [1]. Böylece yüzeyinde bulunan sıvı damlası nano mertebedeki oyuklarda hapsolmuş hava sayesinde yüzeye çok az bir alanla temas etmektedir. Bu şekilde sıvı damlası, yüzey gerilimi sayesinde yüksek bir temas açısıyla küresel şekle yakın bir şekilde yüzeyde durabilmektedir. Ayrıca küçük bir eğimle yüzeyden yuvarlanabilmektedir. Sıvı damlası yuvarlanırken yüzeyde bulunan kir ve tozları içerisine alarak yüzeyi temizlemektedir [1]. Bu özelliklerinden dolayı süperhidrofobik/hidrofobik yüzeyler kendi kendini temizleme, buzlanma, korozyon ve buğulanmanın önlenmesi ve sürüklenme direncinin düşürülmesi gibi birçok alanda kullanılma potansiyeline sahiptir.

1.1 Hidrofobik yüzeylerin özellikleri

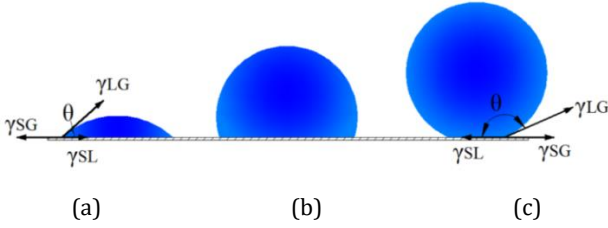
Kati yüzeylerin ıslanırılık özelliği için en önemli parametre serbest yüzey enerjisinin bir sonucu olan temas açısıdır. Yüzey üzerinde bulunan bir damlanın yayılma çevresi boyunca temas çizgisindeki denge Denklem (1)'de verilen Young eşitliği ile tanımlanmaktadır [2].

$$\cos \theta_E = (\gamma_{SG} - \gamma_{LS}) / \gamma_{GL} \quad (1)$$

denklemden kullanılan θ_E su damlasının pürüzsüz yüzeydeki denge temas açısını, γ_{SG} , γ_{LS} ve γ_{GL} sırasıyla katı-gaz, katı-sıvı, sıvı-gaz fazları arasındaki yüzey gerilimlerini ifade etmektedir. Yüzeyin temas açısına bağlı olarak katı yüzeylerin ıslanırılık özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Temas açısının ölçülmesi için kullanılan en yaygın yöntem, yüzey üzerine yerçekimi kuvvetinden etkilenmeyecek boyutta bırakılan sıvı damlasının yüzey ile yaptığı açının ölçülmesidir. Bunun yanında hava kabarcığı, Wilhelmy plaka ve kapiler yükselme gibi yöntemlerle de temas açısı ölçümleri yapılmaktadır.

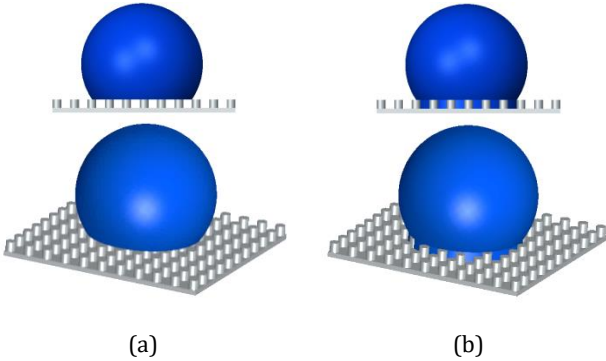
Islanırılık özelliklerinin belirlenmesi için sıvı damlasının yüzeydeki temas açısına bağlı olarak genel olarak üç farklı durum tanımlanmıştır. Eğer temas açısı 90°den küçük ise hidrofobik (ıslanır), 90° ile 150° arasında ise hidrofobik (ıslanmaz), 150°den büyük ise süperhidrofobik (süper ıslanmaz) yüzey olarak isimlendirilmektedir. Şekil 1'de bu üç farklı durum gösterilmiştir. Ayrıca sıvı yüzeyi tam olarak

ıslattığı durumda yani temas açısı 5°'den düşük olduğunda yüzey süperhidrofilik olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 1: (a): Hidrofilik, (b): Hidrofobik, (c): Süperhidrofobik yüzeylerin üzerinde sıvı damlasının genel görünüşü.

Pürüzsüz katı bir yüzeyde temas açısı en fazla ~120° değerine kadar çıkabilmektedir [3]. Bu durum serbest yüzey enerjisi çok düşük (örn. Teflon) olan malzeme yüzeylerinde mümkün olmaktadır. Bu değerden daha büyük bir temas açısı elde etmek için yüzeyin belli ölçülerde (mikro/nano) pürüzlü bir yapıya sahip olması gerekmektedir [3]. Bu şekilde yüzeyin serbest yüzey enerjisi daha fazla düşürülebilmektedir. Şekil 2a'da görüldüğü gibi süperhidrofobik yüzey üzerinde duran sıvı damlası, yüzey üzerinde bulunan mikro veya nano oyuklarda hapsolmuş hava paketçikleri sayesinde ve sıvının yüzey geriliminin etkisiyle, katı yüzey ile çok az noktalarından temas ederek durmaktadır. Bu yüzeyler Cassie durum hidrofofik/süperhidrofobik yüzeyler olarak isimlendirilmektedir. Eğer Şekil 2b'de görüldüğü gibi yüzey üzerinde bulunan oyuklara sıvı nüfus ederse, bu yüzeyler Wenzel durum hidrofofik yüzeyler olarak isimlendirilmektedir.

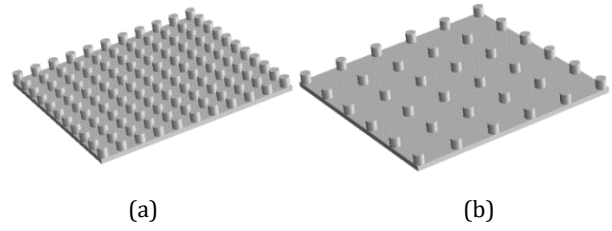


Şekil 2: Düzenli mikro yüzeye sahip hidrofofik yüzey üzerinde su damlasının, (a): Sütunların (pillars) üzerinde bulunduğu (Cassie Durum), (b): Sütunların arasına nüfus ettiği durum (Wenzel durum).

Hidrofofik yüzeylerin elde edilmesinde sprej, kaplama, mikro yüzey işleme ve düzenli yüzey fabrikasyonu gibi birçok yöntem kullanılmaktadır [4]. Süperhidrofobik yüzey elde etmek için temel hedef, yüzeyde mikro veya nano veyahut her ikisinin beraber bulunduğu yapıların elde edilmesi ve daha sonra yüzeyin serbest yüzey enerjisi düşük bir malzeme ile kaplanmasıdır. Diğer bir seçenek olarak serbest yüzey enerjisi düşük olan malzemelerin yüzeylerinde mikro/nano yapıların oluşturulmasıdır. Sprej, kaplama ve kimyasal yöntemlerle düzensiz yapı süperhidrofobik yüzeyler elde edilebilmektedir. Düzenli yüzey elde edilerek yapılan çalışmalarda yüzeyde bulunan sütunların şekli, boyutu, aralarındaki mesafeler ve kaplanan yüzey malzemesi gibi parametreler değiştirilerek farklı özelliklere sahip

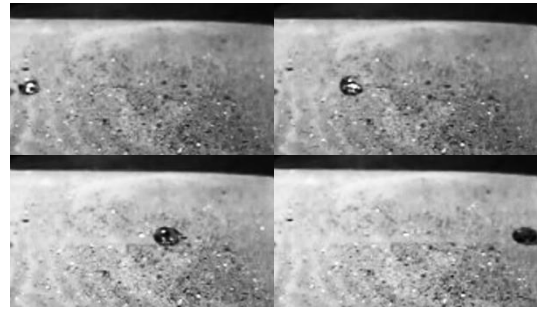
süperhidrofobik yüzeyler kontrollü bir şekilde elde edilebilmektedir.

Süperhidrofobik yüzeylerin serbest yüzey enerjisini etkileyen en önemli parametre yüzeyin katı fraksiyonudur [5]. Yüzeyin katı fraksiyonu azaldıkça temas açısının artmasının yanında ilerleyen ve gerileyen temas açısı arasındaki fark ile ifade edilen "temas açısı histerезisi" azalmaktadır [6]. Şekil 3'te farklı katı fraksiyonlarına sahip mikro sütunlardan oluşmuş yüzeylere örnekler görülmektedir. Sprej, kaplama ve diğer kimyasal yöntemlerle elde edilen süperhidrofobik yüzeyler geniş bir alana uygulanabilirken, düzenli ve homojen süperhidrofobik yüzeylerde bu durum bu güne kadar yapılan çalışmalarla küçük boyutlu yüzeylere uygulanabilmiştir.



Şekil 3: Katı fraksiyonu, (a): Yüksek ve (b): Düşük olan mikro sütunlarla oluşturulmuş düzenli yüzeyler.

Cassie durum süperhidrofobik yüzeylerin üzerinde bulunan sıvı damlasının yüksek temas açısıyla küresel bir şekilde durmasının yanında, yerçekimi ve rüzgâr gibi küçük bir dış kuvvet etkisiyle yüzeyden yuvarlanabilmesi en dikkat çeken özelliklerindedir. Sıvı damlası yüzey üzerinde yuvarlanırken yüzey geriliminin etkisiyle kirleri içerisine almaktadır [1]. Şekil 4'te su damlasının, küçük bir eğim açısıyla (~2°) duran bir süperhidrofobik yüzey üzerinde bulunan kirleri içerisine alarak yuvarlanması görülmektedir. Süperhidrofobik yüzeyler kendini temizleme özelliği ile gökdelen camları, balkon camları, otomobil camları ve aynaları, trafik ışıkları ve işaretçiler gibi alanlarda kullanım potansiyeline sahiptirler [7].

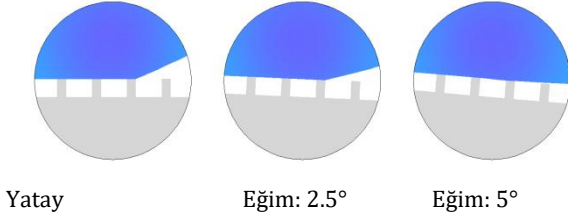


Şekil 4: Su damlasının küçük bir eğimle duran bir süperhidrofobik yüzey üzerindeki kirleri içerisine alarak yuvarlanması.

Statik temas açısı hidrofofik yüzeyler üzerindeki akış davranışlarında tek başına belirleyici bir özelliğe sahip değildir. Statik temas açısına ek olarak; ilerleyen ve gerileyen temas açısı, damla yuvarlanma açısı ve ıslatma hızı gibi parametreler göz önüne alınması gerekmektedir [8]. Cassie durum süperhidrofobik yüzeyde temas açısı yüksek olmasının yanında temas açısı histerезisi küçüktür. Böylece sıvı damlası çok küçük bir eğim açısında bile bu yüzeyler üzerinde yuvarlanabilmektedir.

Görüntüleme tekniklerindeki gelişmeyle birlikte süperhidrofobik yüzeylerde sıvı damlasının dinamik davranışı

daha ayrıntılı olarak gözlemlenebilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi yüzeyde hareket eden sıvı damlasının çevresel temas çizgisinin ön tarafı ilerlerken yüzeydeki pürüzlü yapı üzerine sünenek bir sonraki yapının üzerine yerleştiği tespit edilmiştir [6]. Bu sayede yüzeyde hareket eden damlanın ilerleyen temas açısının mikroskobik seviyede 180°'ye yakın olduğu gözlemlenmiştir [6]. Hâlbuki bu değer makroskobik olarak gonyometre cihazı ile yapılan ölçümlerde daha düşük seviyelerde elde edilmektedir.



Şekil 5: Yuvarlanma açısı 5° olan bir süperhidrofobik yüzey üzerindeki sıvı damlasının ön tarafının hareketinin şematik görüntüsü.

1.2 Hidrofobik yüzeylerin uygulama alanları

Cassie durum süperhidrofobik yüzeyler önceki bölümde bahsedilen özellikleri sayesinde; yüzeyin kendiliğinden temizlenmesi (ör. yağmur damlalarıyla), buzlanmanın önlenmesi, paslanmanın önlenmesi, sürüklenme direncinin düşürülmesi, yoğuşma/kaynama ve mikro cihazlar gibi alanlarda uygulama potansiyeline sahiptirler [5].

Sürüklenme direncinin düşürülmesi; boru hatları, gemi, denizaltı ve torpido gibi yüzeyi sıvı ile temas eden yerlerde önem arz etmektedir [9]. Bu maksat için geçmişteki bazı çalışmalarda katı yüzey üzerine sürekli hava kabarcığı gönderilmiştir. Böylece yüzey ile sıvı arasındaki temas alanının azaltılması ile sürüklenme direncinin düşürülmesi hedeflenmiştir [10]. Daha sonra süperhidrofobik yüzeylerin keşfi ile birlikte, bu yüzeylerin suyun içerisine daldırıldıklarında üzerlerinin ince bir hava filmi tabakası ile kaplandıkları gözlenmiştir (Şekil 12b, 14). Sıvı ile yüzey arasında viskozitesi sudan daha düşük olan hava filmi bulunmasıyla, aralarındaki temas alanı büyük oranda azalmaktadır. Böylece sıvı içerisinde hareket eden süperhidrofobik yüzeylerde meydana gelen viskoz yüzey sürtünmesi önemli oranlarda düşürülebilmektedir [9].

Literatürde, süperhidrofobik yüzey ile sıvı arasında bulunan hava tabakasının, dinamik şartlar altında (özellikle yüksek Reynolds sayılarında) sıvıya karışarak yüzeyin Wenzel durum haline geldiği rapor edilmiştir [9]. Yüzeydeki mikro/nano oyuklarda bulunan hava ile sıvının yer değiştirmesiyle oyuklar sıvı ile dolmaktadır. Aljallis ve diğ. [9] yaptıkları deneysel çalışmada yüzeyde bulunan hava filminin yüksek Reynolds sayılarında kaybolmasını engelleyecek süperhidrofobik yüzey elde etmişlerdir ve bu yüzeyi kullanarak yaptıkları deneylerde yaklaşık olarak %35 oranında sürüklenme direncini düşürmüşlerdir. Ayrıca hava filminin yüzeyde uzun süre kalması için süperhidrofobik yüzeyin, yüksek temas açısına ve düşük temas açısı histerezisine sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir. Diğer bazı çalışmalarda araştırmacılar yüzeydeki hava filminin devamlılığını sağlamak için yüzeye sürekli hava göndermişler veya elektroliz yöntemiyle yüzey üzerinde hava kabarcığı oluşturmuşlardır [11].

Süperhidrofobik yüzeyler, buz adezyonunu düşürerek üzerinde buz birikmesine izin vermemesi özelliği ile rüzgâr

türbinleri, uçak gövdeleri, fotovoltaik cihazlar, gemi gövdeleri, telekomünikasyon sistemleri gibi yerlerde kullanım potansiyeline sahiptirler [12]. Bunlar gibi buz birikmesi istenmeyen yerlerde daha önceleri elektrikli ısıtıcı, sıcak hava ve buz önleyici sıvılar kullanılmıştır [4]. Süperhidrofobik yüzey kullanılarak yapılan buz önleme uygulamalarındaki öncül çalışmalar yüzeyin statik temas açısı dikkate alınarak yapılmıştır [13]. Daha sonraki çalışmalarda buz önlenmesinde en önemli faktörün, statik temas açısından ziyade gerileyen (receding) temas açısının olduğu tespit edilmiştir [4],[9]. Gerileyen temas açısının düşürülmesine paralel olarak buz birikmesi de azalmaktadır [4]. Bu sebeple buz birikmesinin önlenmesi için gerileyen temas açısının düşük olduğu yüzeylerin elde edilmesi önem kazanmıştır.

Katı yüzeylerin ıslanırılık özelliği, sahip oldukları serbest yüzey enerjilerine bağlı olduğu ve Denklem (1)'de gösterilen Young eşitliği ile tanımlandığından bahsedilmiştir [2]. Adezyon işi ise, iki faz arasındaki ara yüzeylerin değişimi ile tanımlanmaktadır. Bu ifade yüzey buzlanma çalışmalarında buz adezyon mukavemeti olarak ifade edilmektedir. Denklem (2)'de Gao ve McCarthy [14] tarafından tanımlanan adezyon işi denklemleri verilmiştir. Denklemden de görüleceği üzere, adezyon işi için en önemli parametre gerileyen temas açısıdır. Antonini ve diğ. [15] rüzgâr tüneline yerleştirdikleri uçak kanadı ile yaptıkları deneysel çalışmada, gerileyen temas açısı düşük olan bir süperhidrofobik malzeme ile kaplanmış uçak kanadının üzerinde %80 oranında daha az buz birikmesi oluştuğunu rapor etmişlerdir.

$$W_{adh} = \gamma_{LG}(1 + \cos \theta_{rec}) \quad (2)$$

denklemden kullanılan W_{adh} adezyon işi ve θ_{rec} gerileyen temas açısını ifade etmektedir.

Yoğuşma, endüstride ısı değiştirgeçleri ve soğutma sistemleri başta olmak üzere birçok alanda karşılaşılan bir durumdur. Özellikle film tip yoğuşma, yüzeydeki ısı transferini düşürdüğünden dolayı çoğu zaman istenmeyen bir durumdur. Isı transfer katsayısı, damla tip yoğuşmada film tip yoğuşmaya kıyasla 5-7 kat daha fazla olmaktadır [12]. Hidrofobik yüzeyler üzerinde film tip yoğuşma yerine damla tip yoğuşma meydana gelmektedir. Böylece, yüzeyde oluşan damlalar yüzeyden yerçekimi veya küçük bir dış kuvvet etkisiyle uzaklaştırılabilmektedir [16]. Miljkovic ve Wang, [17] hidrofobik, süperhidrofobik ve süperhidrofobik yüzey kullanarak bakır boru etrafında oluşan yoğuşmayı incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada hidrofobik boru yüzeyinin film tip yoğuşma sayesinde sıvı ile kaplandığı halde, yüzeye hidrofobiklik özelliği kazandırıldığında damla tip yoğuşmanın oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Süperhidrofobik yüzey kullanıldığında ise yüzeyde yoğuşma ile oluşan damlacıkların yüzeyden sıçrayarak ayrıldığı rapor etmişlerdir. Bu durumda yine yüzeyin statik temas açısının yüksek olmasının yanında temas açısı histerezisinin düşük olmasının sıvı damlalarının uzaklaştırılmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Chen ve diğ. [18] yaptıkları deneysel çalışmada, nano veya mikro olarak sadece birisiyle elde edilen süperhidrofobik yüzeylerde, yoğuşan sıvının yüzeydeki oyuklara daha kolay nüfuz ettiğini, fakat nano ve mikro boyutlardaki yapıların beraber kullanılarak elde edilen yüzeylerde ise yoğuşan sıvının yüzeydeki oyuklara kolayca nüfuz etmediğini belirtmişlerdir. Bu durum yüzeyin Cassie durum özelliğini uzun süre koruyabilmesine imkân sağlamaktadır. Böylece

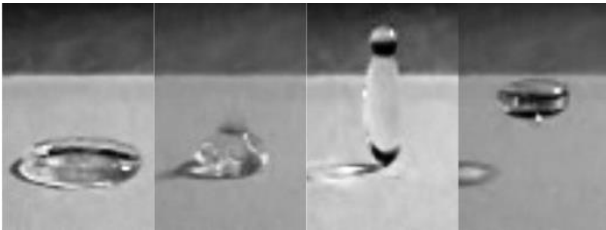
damla tip yoğuşma ile oluşan sıvı damlacıkları düşük temas açısı histerezisi sayesinde yüzeyden kolayca uzaklaştırılabilir. Bu nedenle yüzeyden kolayca uzaklaştırılabilir.

2 Bulgular ve sonuçlar

2.1 Hidrofobik yüzeyler üzerinde sıvı damlası/jeti dinamiği

Hidrofobik yüzeyler sahip oldukları düşük yüzey enerjileri sayesinde kazandıkları ıslanmazlık özelliği ile akışkan dinamiği uygulamalarında oldukça fazla uygulama alanına sahip olmuşlardır. Cassie durum süperhidrofobik yüzeylerin üzerinde bulunan bir damlanın küçük bir dış kuvvet etkisiyle kolayca uzaklaştırılabilmesinin yanında yüzeye çarpan su damlası yüzeyden sıçrama yapmaktadır. Şekil 6'da temas açısı 161° olan yatay bir süperhidrofobik yüzeye dikey olarak çarpan su damlasının davranışı verilmiştir. Damlanın davranışı atalet, yüzey gerilimi ve viskoz kuvvetler tarafından yönetilmektedir. Böylece damlanın hareketinde Weber ve Reynolds sayıları etkin olmaktadır.

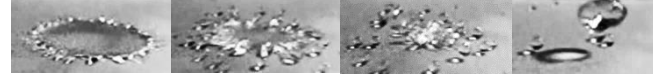
Yüzeye çarpan su damlası yüzeyde atalet kuvvetlerinin etkisiyle yayılmaktadır. Süperhidrofobik yüzey ile su damlası arasındaki moleküler çekim kuvveti düşük olduğundan dolayı, yüzey gerilim kuvvetleri dominant olmaktadır. Su damlası yüzeyde yayılırken atalet kuvvetleri yüzey gerilim kuvvetlerine dönüşmektedir [19]. Bir kısım enerji de suyun içerisinde ve su ile yüzey arasında meydana gelen viskoz sürtünmeler ile kayıp enerji tabiri edilen kullanılmayan enerji türlerine dönüşmektedir (ısı, ses vb.). Damlanın dönüşecek ataleti kalmadığında ise yayılması durmaktadır. Bu durumda damla maksimum yayılma genişliğine ulaşmaktadır. Su damlasının maksimum genişlikte sahip olduğu enerjinin değeri Denklem (3)'te verilen eşitlik ile ifade edilmektedir. Bu enerjinin oluşumunda damlanın yüzey alanı ile yayıldığı alan arasındaki oran etkili olmaktadır. Bu oran için de etkin parametre yüzeyin sahip olduğu temas açısıdır. Damlanın maksimum genişliğe (yayılma alanı) ulaşmasından sonra tersi bir dönüşüm olmakta ve bu sefer yüzey gerilim kuvvetleri atalet kuvvetlerine dönüşmektedir. Bu şekilde, su damlası geri toplanarak yüzeyden sıçrama hareketi yapmaktadır [20]. Meydana gelen kayıp enerjilerden dolayı damlanın sıçrama mesafesi bırakıldığı mesafeden daha düşük seviyede olmaktadır. Süperhidrofobik yüzeye sıvı damlası çarpması çalışmalarında damlanın davranışı; yayılma, yapışma, sıçrama, parçalanma, serpişme gibi sınıflara ayrılmıştır [21].



Şekil 6: Süperhidrofobik yüzeye çarpan su damlasının yüzeyde yayılıp tekrar geri sıçraması.

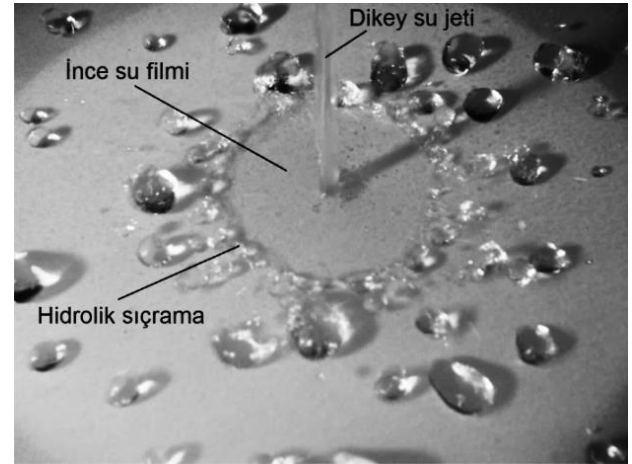
Süperhidrofobik yüzeye yüksek hızla çarpan bir su damlasının davranışına bir örnek Şekil 7'de verilmiştir. Yüksek hızla yüzeye çarpan ve bu sayede yüksek bir atalete sahip olan su damlası, Şekil 7'deki ilk resimde görüldüğü gibi yüzeyde geniş bir alana yayılmaktadır. Yüzeyde yayılırken yine düşük hızla çarpma olduğu gibi atalet kuvvetleri yüzey gerilim kuvvetlerine dönüşmektedir. Fakat bu sefer yüksek hızdan dolayı atalet kuvvetlerinin tamamı yüzey gerilim kuvvetlerine

dönüşmemektedir. Böylece bu arta kalan atalet kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerini yenmesiyle yüzeyde yayılmış olan su damlasından küçük damlacıklar koparak ayrılmaktadır. Bu ayrılan damlacıklar yüzeyde yuvarlanarak hareketine devam etmektedir. Su damlasının bir kısmı da Şekil 7'deki son şekilde görüldüğü gibi tekrar geri toplanarak yüzeyden geri sıçrama hareketi yapmaktadır. Fakat kayıp enerji büyük değerlerde olduğu için bu sıçrama hareketi düşük bir mesafede olmaktadır.



Şekil 7: Süperhidrofobik yüzeye yüksek hızla çarpan su damlasının yüzeyde küçük damlacıklar halinde parçalanması.

Hidrofilik yüzeye çarpan sıvı jeti yüzeyde atalet kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine dönüşmesiyle ince bir film halinde yayılmaktadır. Daha sonra çarpma bölgesinden belli bir mesafede bu ince sıvı filminin kalınlığı aniden artmaktadır. Bu olaya "hidrolik sıçrama" adı verilmektedir. Dikey sıvı jeti yatay bir yüzeye çarptığında sıçramanın şekli dairesel olmakta ve "dairesel hidrolik sıçrama" olarak isimlendirilmektedir [22]. Aralarındaki açı dik olmadığı durumlarda ise sıvı jeti dairesel olmayan hidrolik sıçrama yapmaktadır [23]. Süperhidrofobik yüzeylere çarpan sıvı jeti ise hidrofilik yüzeylerden farklı davranışlar göstermektedir. Örneğin, sıvı jeti süperhidrofobik yüzeye Şekil 8'de görüldüğü gibi dikey olarak çarptığında ince bir tabaka halinde yayılan sıvı, hidrolik sıçrama yaptıktan sonra damlacıklar haline dönüşerek yüzeyden uzaklaşmaktadır [24], [25]. Belli bir açıyla çarptığında ise, yüzeyde bir miktar yayılıp tekrar bir araya toplanan sıvı jeti daha sonra Şekil 9'a'da görüldüğü gibi yüzeyden yansıma hareketi yapmaktadır [26].



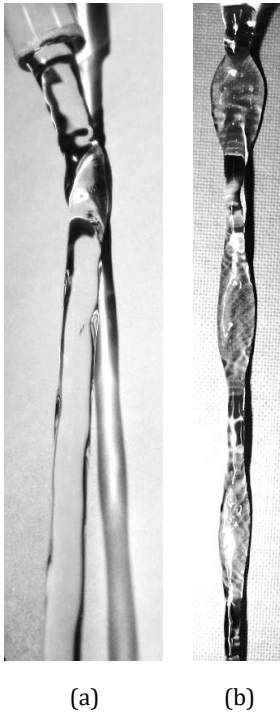
Şekil 8: Yatay bir şekilde duran süperhidrofobik yüzeye dikey olarak çarpan su jetinin yüzeyde yayılması.

Yansıma olayında, yüzey geriliminin etkisiyle (yüksek temas açısına bağlı olarak) çok fazla bir alana yayılmayan sıvının, hava ile temas eden yüzey alanı (serbest yüzey alanı) ile yayıldığı alan arasındaki oranın düşük olması etkili olmaktadır [27]. Böylece Denklem (3)'te verilen yüzey enerjisi (E_γ) süperhidrofobik yüzey için yüksek değerlerde olmaktadır. Sıvı jeti yüzeyden bu enerji sayesinde yansıma yapmaktadır. Hidrofobik yüzeyde ise, yüzeye açılı bir şekilde çarpan sıvı jeti süperhidrofobik yüzeye oranla daha fazla bir alana yayılmaktadır. Bu durum serbest yüzey alanı ile yayılma alanı arasındaki oranın düşmesine sebep olmaktadır. Böylece

yansıma sebebi olan yüzey gerilim enerjisi azalmaktadır. Ayrıca sıvının yayıldığı alanının artmasıyla yayılma süresi ve dolayısıyla katı ile temas süresi artmaktadır. Bu durum kayıp enerjinin artmasına sebep olmaktadır. Böylece sıvının yüzeyde yayıldıktan sonra tekrar bir araya geldiği noktadaki ataleti daha düşük seviyelerde olmaktadır [27], [28]. Sıvı jeti bu daha düşük seviyedeki yüzey enerjisi ile yüzeyden dışarıya doğru bir atalet kazansa da Şekil 9b’de görüldüğü gibi yüzeyden ayrılamayarak tekrar yüzeye yönelmekte ve yüzeyde ikinci bir yayılma gerçekleştirmektedir [26]. Bu olay literatürde örgülü (braiding) akış olarak isimlendirilmektedir [29]. Bu ardı sıra meydana gelen yayılma alanları viskoz kayıplar nedeniyle akış boyunca azalmaktadır (Şekil 9b).

$$E_Y = \gamma_{GL}[A_{GL} - (A_{LS} \cos \theta)] \quad (3)$$

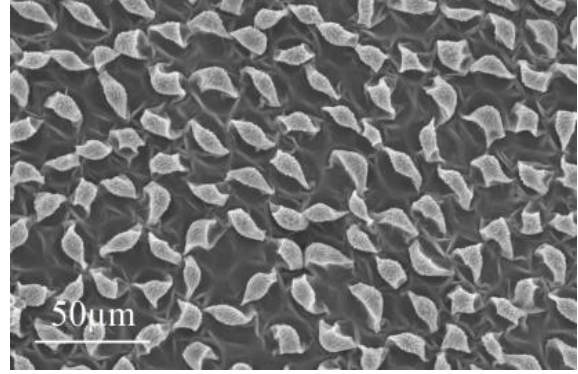
denklemden verilen A_{GL} ve A_{LS} sırasıyla sıvının, hava ve katı yüzey ile ara yüzey alanlarıdır.



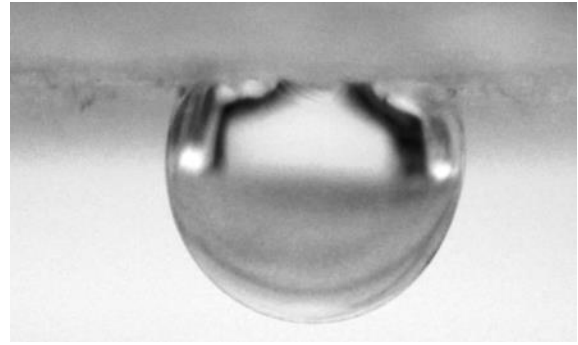
Şekil 9: (a): Süperhidrofobik ve (b): hidrofobik yüzeye eğimli gönderilen su jetinin davranışı.

Süperhidrofobik yüzeylere diğer bir örnek yapışkan (sticky) süperhidrofobik yüzeylerdir. Bu yüzeylere en bilinen yaygın örnek gül yaprağıdır. Şekil 10’da bir gül yaprağının taramalı elektronik mikroskobu ile görüntüsü verilmiştir. Şekilde görülen gri kısımlar hidrofobik özelliğe sahip olup diğer koyu renkli kısımlar hidrofilik özelliğe sahiptir. Sıvı damlası yüzey üzerinde yüksek temas açısı ile durmasına rağmen, Şekil 11’de görüldüğü gibi yüzey ters çevrildi bile yüzeyden ayrılmamaktadır. Bu yüzeyler üzerindeki pürüzlü mikro/nano yapı kısmen Wenzel durumu olmaktadır. Yani yüzeyde bulunan mikro/nano oyuklara kısmen nüfus eden sıvı, yüzeye bu noktalardan tutunmaktadır (Şekil 10’daki koyu renkli kısımlar). Diğer kısımlarda ise sıvı ile yüzey arasında hava paketçikleri bulunmaktadır (Şekil 10’daki gri renkli kısımlar). Bu hava paketçikleri ve yüzeyin kısmen düşük yüzey enerjisine sahip malzeme ile kaplı olması sayesinde bu yüzeyler yüksek temas açısına sahip olabilmektedir. Bunun

yanında sıvı damlası kısmen Wenzel olduğu kısımlardan yüzeye tutunmaktadır. Bu sebeple temas açısı histerezisi ve özellikle gerileyen temas açısı büyük değerlerde olmaktadır. Yapışkan süperhidrofobik yüzeyler sprey ve boyama uygulamalarında, mikro cihazlarda, mürekkep püskürtmeli baskı ve sıvı transfer uygulamalarında kullanım potansiyeline sahiptirler [5].



Şekil 10: Gül yaprağının taramalı elektronik mikroskop ile görüntüsü.



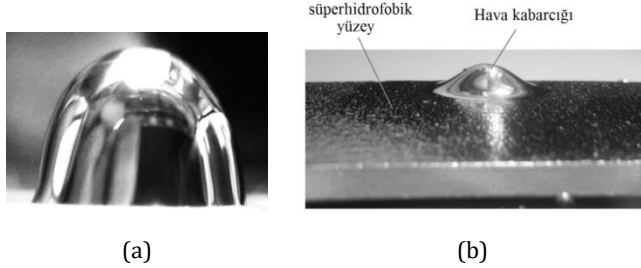
Şekil 11: Ters çevrilmiş bir gül yaprağının üzerinde yüzeye tutunmuş bir şekilde duran su damlası.

2.2 Hidrofobik yüzeylerin sıvı içerisindeki davranış özellikleri

Süperhidrofobik yüzeyler daha önce bahsedildiği gibi düşük yüzey enerjileri sayesinde sıvı fazındaki akışkanlarla aralarındaki moleküler çekim gücü düşük olmaktadır. Böylece üzerine bırakılan sıvı damlası yüzey geriliminin etkisiyle yüksek temas açısıyla durmaktadır (Şekil 2). Bu olayın tam tersi olarak, sıvının içerisine daldırılmış bir şekilde duran bir hidrofobik/süperhidrofobik yüzey üzerine bırakılan gaz kabarcığı yüzeyde yayılarak düşük bir temas açısıyla durmaktadır [30]. Şekil 12a’da suyun içerisinde yatay bir şekilde duran pürüzsüz bir hidrofobik yüzeyin üzerinde duran hava kabarcığı görülmektedir. Hava kabarcığı yüzey üzerinde çevresel temas çizgisi boyunca meydana gelen adezyon kuvvetinin etkisiyle durmaktadır.

Şekil 12b’de süperhidrofobik yüzey üzerinde duran hava kabarcığı görülmektedir. Süperhidrofobik yüzeyler suya daldırıldıklarında üzerlerinde bulunan mikro oyuklara sıvı nüfus edememektedir. Bu sayede Şekil 12b’de görüldüğü gibi yüzeyin üzeri ince bir hava filmi ile kaplanarak parlak bir görünüm kazanmaktadır. Böylece suyun içerisindeki bir süperhidrofobik yüzey üzerindeki hava kabarcığı yüzeyde yayılarak düşük temas açısıyla durmaktadır. Şekil 12a’da gösterilen pürüzsüz hidrofobik yüzeyin aksine süperhidrofobik yüzeyde kabarcık, hava filmi ile kesintisiz bir

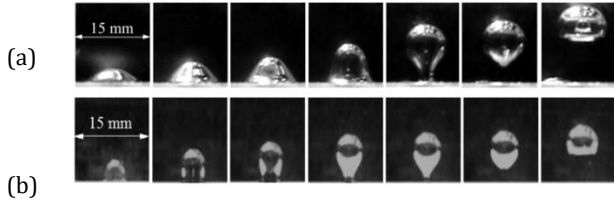
temas oluşturarak yüzey gerilim kuvveti ile yüzeyde durmaktadır (Şekil 12b). Sıvı, katı yüzey ile çevresel temas çizgisi boyunca çok az noktalardan temas etmektedir. Hidrolik (hidrostatik) basınç hava filminin basıncından daha büyük bir değerde olduğunda, mikro oyuklara sıvının nüfus etmesiyle yüzey Wenzel durum halini almaktadır [31].



Şekil 12: Suyun içerisinde yatay bir şekilde duran, (a): Hidrofobik, (b): Süperhidrofobik yüzeyin üzerinde hava kabarcığının görüntüsü.

Kibar ve diğ. [32] suya daldırılmış pürüzsüz bir hidrofobik yüzeyin üst ve alt taraflarında hava kabarcığının hareketini incelemişlerdir. Kabarcık yüzeyin alt tarafında kaldırma kuvvetinin etkisiyle üst tarafa kıyasla daha fazla bir alana yayılmaktadır. Kabarcığın yayılma alanının artmasıyla adezyon kuvvetleri artırmaktadır. Böylece kabarcık hidrofobik yüzeyin üst tarafında alt tarafa oranla daha düşük bir eğim açısında hareket etmeye başlamaktadır [32]. Yani büyük değerde olan adezyon kuvvetini yenmek için daha büyük teğetsel kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da yüksek eğim açısıyla mümkün olmaktadır.

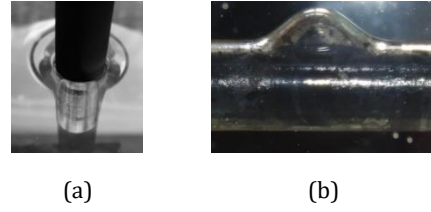
Şekil 13a'da süperhidrofobik yüzeyden hava kabarcığının ayrılması zamana bağlı olarak verilmiştir. Şekildeki hava kabarcığı yüzeydeki delikten basınçlı hava gönderilerek elde edilmiştir. Kabarcığa etki eden dikey net kuvvet kabarcığın yayıldığı dairesel çizgi boyunca yüzey gerilim kuvveti tarafından karşılanmaktadır. Hava kabarcığı süperhidrofobik yüzeylerde geniş bir alana yayıldığı için Şekil 13a'da görüldüğü gibi bu yüzeylerde büyük bir hava kabarcığı elde edilebilmektedir. Kabarcığın yayıldığı çevre boyunca oluşan yüzey gerilim kuvveti, kabarcığa etkiyen dikey kuvveti karşılayamadığı durumlarda kabarcık yüzeyden ayrılarak sıvının yüzeyine doğru hareket etmektedir. Şekil 13b'de ise aynı şartlarda pürüzsüz bir hidrofobik yüzeyden hava kabarcığının ayrılışı verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi süperhidrofobik yüzeye oranla daha küçük bir hacimde kabarcık yüzeyden ayrılmaktadır. Yüzey pürüzsüz olduğu için kabarcık yüzeye yayılma çevresi boyunca tutunmaktadır.



Şekil 13: Bir hava kabarcığının, (a): süperhidrofobik, (b): hidrofobik yüzeyden ayrılması.

Şekil 14'te süperhidrofobik kaplı silindirik çubukların suyun içerisindeki durumları verilmiştir. Süperhidrofobik çubuk suya daldırılırken çubuğun etrafı ince bir hava filmi ile kaplanmaktadır. Şekil 14a'da görüldüğü gibi suyun içerisine dikey olarak yarı daldırılmış çubuk, kapiler kuvvetten dolayı

(yüksek temas açısına bağlı olarak) su yüzeyinde boşluk oluşmaktadır. Böylece çubuk ile suyun yüzeyi arasında yüksek temas açısı oluşmaktadır (Şekil 14a). Çubuk tekrar geri çekildiğinde ıslanmadan kuru kalmaktadır. Suya tamamen daldırılmış bir şekilde bulunan süperhidrofobik çubuğa hava kabarcığı gönderildiğinde, kabarcık yüzeyin etrafındaki hava filmine nüfus etmektedir. Kabarcık Şekil 14b'de görüldüğü gibi kaldırma kuvvetinin etkisiyle çubuğun üst tarafında toplanmaktadır. Bu şekilde sıvı, katı yüzeyle üç faz temas çizgisinde çok az bölgelerden temas etmektedir. Böylece hava kabarcığı yüzeydeki hava filmi ile hemen hemen kesintisiz bir temas oluşturmaktadır. Bu şekilde kabarcık yüzeye küçük bir eğim verildiğinde bile yüzey üzerinde hareket etmektedir.



Şekil 14: Suyun içerisine daldırılmış süperhidrofobik yüzeylerin üzerinde hava filmi ve hava kabarcığının davranışı, (a): Suyun içerisine dikey olarak yarı daldırılmış süperhidrofobik kaplı çubuk (çubuk çapı: 10 mm), (b): Suyun içerisinde yatay bir şekilde duran süperhidrofobik yüzeye gönderilmiş olan hava kabarcığı (çubuk çapı: 10 mm).

3 Sonuç ve değerlendirme

Bu çalışmada hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeylerin sahip oldukları özellikler ve bu özellikler kullanılarak yapılan çalışmalardan sıvı damlası, gaz kabarcığı ve sıvı jeti çalışmaları incelenmiştir. Düşük serbest yüzey enerjisine sahip olan bu yüzeyler sıvı damlasını itmelerine rağmen gaz kabarcığını çekme eğilimindedirler. Bu yüzden süperhidrofobik yüzeye bırakılan bir sıvı damlası yüzeyde çok az bir alana yayılarak küreye yakın bir şekilde durmasına rağmen, sıvının içerisine daldırılmış yüzey üzerine bırakılan gaz kabarcığı yüzeyde yayılmakta ve küçük bir temas açısı ile durmaktadır.

Süperhidrofobik yüzeylerdeki dinamik akış davranışlarında statik temas açısından ziyade temas açısı histerezisi önem arz etmektedir. Düşük temas açısı histerezisinin elde edilmesinde en önemli parametre gerileyen temas açısıdır. Düşük histerezise sahip yüzeylerin üzerinde duran sıvı damlası yüzeyden düşük bir dış kuvvet ile uzaklaşabilmektedir. Bu şekilde yüzeyden küçük bir kuvvet ile yuvarlanan su damlası yüzeydeki kirleri içerisine almaktadır. Aynı durum süperhidrofobik yüzeye çarpan sıvı damlası ve sıvı jeti içinde geçerli olmaktadır.

Süperhidrofobik yüzeylere çarpan sıvı damlası atalet kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine dönüşmesiyle yüzeyde yayılmaktadır. Maksimum genişlikteki yüzey alanı ile yayılma alanı arasındaki oran yüzey enerjisini meydana getirmektedir ve damla bu enerji sayesinde yüzeyden geri sıçrama yapmaktadır. Aynı durum süperhidrofobik yüzeye çarpan sıvı jeti için de geçerli olmaktadır. Yüzeye açılı çarpan sıvı jetinin yüzey enerjisi yeterli seviyede olduğu zaman yüzeyden geri yansıma yapmaktadır. Aksi halde yüzeyden yükseklik kazanan sıvı tekrar yüzeye doğru yönleneren örgülü akış olarak isimlendirilen ikinci bir yayılma gerçekleştirilmektedir.

Cassie durum süperhidrofobik yüzeyler sıvı içerisinde daldırıldıklarında üzerleri ince bir hava filmi tabakası ile kaplanmaktadır. Hava filminin sürekliliği kullanım alanları için önemli olmaktadır. Bu yüzeylerde hava kabarcığı yüzeyde hava filmi ile kesintisiz temas ederek durmaktadır ve böylece adezyon kuvvetleri büyük oranda düşürülebilmektedir. Ayrıca bu yüzeylerde büyük bir hacimde gaz kabarcığı oluşturulabilmektedir.

4 Kaynaklar

- [1] Neinhuis C, Barthlott W. "Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces". *Annals of Botany*, 79(6), 667-677, 1997.
- [2] Young T. "An Essay on the cohesion of fluids". *Philosophical Transactions of the Royal of London*, 95, 65-87, 1804.
- [3] Erbil HY, Demirel AL, Avci Y, Mert O. "Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface". *Science*, 299(5611), 1377-1380, 2003.
- [4] He Y, Jiang C, Cao X, Chen J, Tian W, Yuan W. "Reducing ice adhesion by hierarchical micro-nano-pillars". *Applied Surface Science*, 305, 589-595, 2014.
- [5] Xu W, Choi CH. "From sticky to slippery droplets: Dynamics of contact line depinning on superhydrophobic surfaces". *Physical Review Letters*, 109(2), 1-5, 2012.
- [6] Dorrer C, Rühle J. "Micro to nano: Surface size scale and superhydrophobicity". *Beilstein Journal of Nanotechnol*, 2, 327-332, 2011.
- [7] Latthe SS, Terashima C, Nakata K, Sakai M, Fujishima A. "Development of sol-gel processed semi-transparent and self-cleaning superhydrophobic coatings". *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 5548-5553, 2014.
- [8] Blake TD. "The physics of moving wetting lines". *Journal of Colloid and Interface Sciences*, 299(1), 1-13, 2006.
- [9] Aljallis E, Sarshar MA, Datla R, Sikka V, Jones A, Choi CH. "Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds number boundary layer flow". *Physics of Fluids*, 25(2), 1-14, 2013.
- [10] Merkle CL, Deutsch S. "Drag reduction in liquid boundary layers by gas injection. Viscous Drag Reduct Bound Layers". Washington, USA, Fluid Mechanics and Heat Transfer, A91-12688 02-34, 1990.
- [11] Stephani KA, Goldstein DB. "An Examination of trapped bubbles for viscous drag reduction on submerged surfaces". *Journal of Fluids Engineering*, 132(4), 41303-41311, 2010.
- [12] Zhang P, Lv FY. "A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications". *Energy*, 82, 1068-1087, 2015.
- [13] Dotan A, Dodiuk H, Laforte C, Kenig S. "The relationship between water wetting and ice adhesion". *Journal of Adhesion Sciences Technology*, 23(15), 1907-1915, 2009.
- [14] Gao L, McCarthy TJ. "Teflon is hydrophilic. Comments on definitions of hydrophobic, shear versus tensile hydrophobicity, and wettability characterization". *Langmuir*, 24(17), 9183-9188, 2008.
- [15] Antonini C, Innocenti M, Horn T, Marengo M, Amirfazli A. "Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems". *Cold Regions Science and Technology*, 67(1-2), 58-67, 2011.
- [16] Bisetto A, Torresin D, Tiwari MK, Del Col D, Poulikakos D. "Dropwise condensation on superhydrophobic nanostructured surfaces: literature review and experimental analysis". *Journal of Physics Conferences Series*, 501, 1-10, 2014.
- [17] Miljkovic N, Wang EN. "Condensation heat transfer on superhydrophobic surfaces". *MRS Bulletin*, 38(5), 397-406, 2013.
- [18] Chen CH, Cai Q, Tsai C, Chen CL, Xiong G, Yu Y, et al. "Dropwise condensation on superhydrophobic surfaces with two-tier roughness". *Applied Physics Letters*, 90, 173108-173110, 2007.
- [19] Khoufch A, Benali M, Saleh K. "Influence of liquid formulation and impact conditions on the coating of hydrophobic surfaces". *Powder Technology*, 270, 599-611, 2015.
- [20] Richard D, Quéré D. "Bouncing water drops". *Europhysics Letters*, 50(6), 769-775, 2000.
- [21] Yarin AL. "Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing". *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 38, 159-192, 2006.
- [22] Craik ADD, Latham RC, Fawkes MJ, Gribbon PWF. "The circular hydraulic jump". *Journal Fluid Mechanics*, 112, 347-362, 1981.
- [23] Kate RP, Das PK, Chakraborty S. "Hydraulic jumps due to oblique impingement of circular liquid jets on a flat horizontal surface". *Journal of Fluid Mechanics*, 573, 247-263, 2007.
- [24] Maynes D, Johnson M, Webb BW. "Free-surface liquid jet impingement on rib patterned superhydrophobic surfaces". *Physics of Fluids*, 23(5), 52104, 2011.
- [25] Prince JF, Maynes D, Crockett J. "On jet impingement and thin film breakup on a horizontal superhydrophobic surface". *Physics of Fluids*, 27(11), 112108, 2015.
- [26] Kibar A, Karabay H, Yiğit KS, Ucar IO, Erbil HY. "Experimental investigation of inclined liquid water jet flow onto vertically located superhydrophobic surfaces". *Experiments in Fluids*, 49(5), 1135-1145, 2010.
- [27] Kibar A. "Experimental and numerical investigations of the impingement of an oblique liquid jet onto a superhydrophobic surface: energy transformation". *Fluid Dynamics Research*, 48, 015501, 2016.
- [28] Kibar A. "Experimental and numerical investigation of liquid jet impingement on superhydrophobic and hydrophobic convex surfaces". *Fluid Dynamics Research*, 49, 015502, 2017.
- [29] Mertens K, Putkaradze V, Vorobieff P. "Morphology of a stream flowing down an inclined plane. Part 1. Braiding". *Journal of Fluid Mechanics*, 531, 49-58, 2005.
- [30] Ozbay R, Kibar A, Choi CH. *Bubble adhesion to superhydrophilic surfaces*. Editor: Mittal KL. Advances in. Contact Angle, Wettability and Cohesion, Vol. Two, 149-162, Hoboken, USA, Wiley-Scrivener, 2015.
- [31] Sheng X, Zhang J. "Air layer on superhydrophobic surface underwater". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 377(1-3), 374-378, 2011.
- [32] Kibar A, Ozbay R, Sarshar MA, Kang YT, Choi CH. "Air bubble movement over and under hydrophobic surfaces in water". *8th International Conference on Multiphase Flow ICMF*, Jeju, Korea, 26-31 May 2013.