

Plant Morphology Bio-Inspires The Design of Surfaces With Varying Wetting Properties, From Superhydrophilic to Superhydrophobic

Ivan Al-Jaf^{1,6} and Murat Kaya^{2,*}

¹Aksaray University, Molecular Biology and Genetics Department, Aksaray, Turkiye

²Istanbul Technical University, Molecular Biology and Genetics Department, Istanbul, Turkiye

Keywords

Plant, Surface Hydration,
Superhydrophilic,
Superhydrophobic

Article information

Received: Nov 17, 2023

Revised: Dec 12, 2023

Accepted: Dec 22, 2023

Online: Jun 03, 2024

Abstract

Plant surfaces have evolved many structures over approximately 460 million years, resulting in a wide range of highly adaptive features. Among these are plant cuticles that exhibit varying degrees of surface hydration—from hydrophilic to extremely water-repellent or superhydrophobic. This paper provides the fundamental architecture of plants with superhydrophobic surfaces, exploring the biological functions of these unique characteristics. Such plants can effectively repel water, making it look like they "dislike" water. Features like cellular etchings and microscopic surface details, such as epidermal cell folds or epicuticular waxes, play a significant role in controlling hydration levels. We also present an overview of the hierarchical and other structural adaptations contributing to plant surface hydrophobicity. Inspired by these plants, biomimetic engineering could lead to the creation of materials with similar water-repellent properties. This understanding could pave the way for developing disease-resistant crops in the agricultural sector. The paper also discusses the current and prospective applications of superhydrophobic surfaces, including self-cleaning capabilities, reduced hydrodynamic drag, capillary-based fluid transport, and other bio-inspired materials.

doi: [10.29002/asujse.1392277](https://doi.org/10.29002/asujse.1392277)

Bitki Morfolojisi, Süperhidrofilikten Süperhidrofobiye Kadar Değişen Islatma Özelliklerine Sahip Yüzeylerin Biyo-İlhamlı Tasarımı

Anahtar Kelimeler

Bitki, Yüzey Hidrasyonu,
Süperhidrofilik, Süperhidrofobik

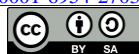
Özet

Bitki yüzeyleri, yaklaşık 460 milyon yıl boyunca pek çok yapıyı geliştirerek, çok çeşitli yüksek derecede uyarlanabilir özellikler ortaya çıkarmıştır. Bunlar arasında, hidrofilikten son derece su itici veya süperhidrofobikliğe kadar değişen derecelerde yüzey hidrasyonu sergileyen bitki kütikülleri vardır. Bu makale, süperhidrofobik yüzeylere sahip bitkilerin temel mimarisini sunarak, bu benzersiz özelliklerin biyolojik işlevlerini araştırmaktadır. Bu tür bitkiler suyu etkili bir şekilde itebilir ve sudan "hoşlanmadıkları" izlenimini verebilir. Hücresel gravürler ve epidermal hücre kıvrımları veya epikutikül gibi mikroskobik yüzey detayları gibi özellikler, hidrasyon seviyelerinin kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca bitki yüzeyi hidrofobikliğine katkıda bulunan hiyerarşik ve diğer yapısal adaptasyonlara genel bir bakış sunuyoruz. Bu bitkilerden ilham alan biyomimetik mühendislik, benzer su itici özelliklere sahip malzemelerin oluşturulmasına olanak sağlayabilir. Bu anlayış, tarım sektöründe hastalığa dayanıklı mahsullerin geliştirilmesinin önünü açmaktadır. Makalede ayrıca kendi kendini temizleme yetenekleri, azaltılmış hidrodinamik sürtünme, kılcal bazlı sıvı taşınması ve diğer biyo-ilhamlı malzemeler dahil olmak üzere süperhidrofobik yüzeylerin mevcut ve olası uygulamaları tartışılmaktadır.

1. Giriş

Milyonlarca yıl önce bitkiler sudan karaya uzanan devasa bir yolculuğa çıkmıştır ve bu geçiş, "kütikül" olarak bilinen dikkate değer bir savunma mekanizmasının evrimini hızlandırmıştır. Bu dış epidermal tabaka, yapraklar, gövdeler ve meyveler de dahil olmak üzere çoğu karasal bitkinin açıkta kalan kısımlarını saran koruyucu bir kalkan görevi görür. Öncelikle kütin adı verilen bir maddeden oluşan ve "balmumu" olarak adlandırılan esansiyel yağlarla tamamlanan bu

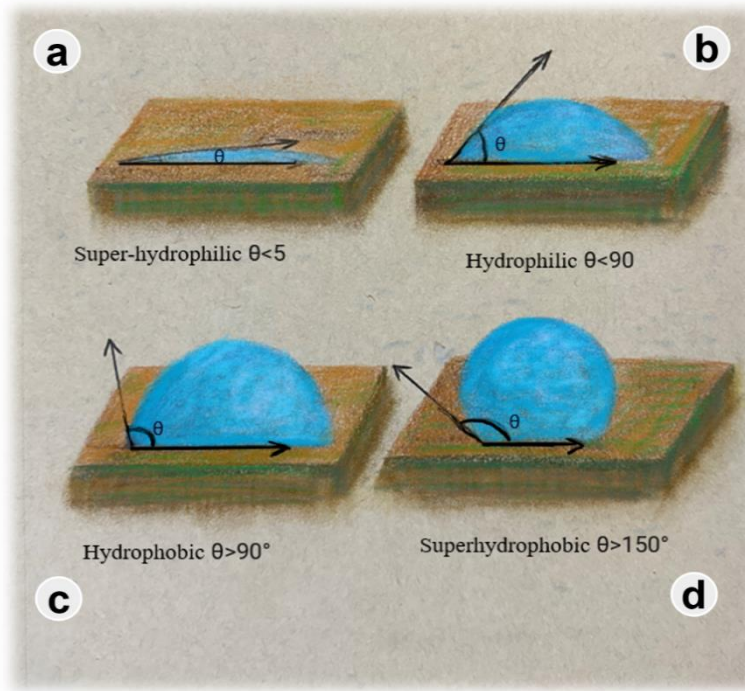
¹Corresponding Author: muratkaya3806@yahoo.com  0000-0001-6954-2703



kütikül, iki farklı bitki mumu kategorisine sahiptir ve bunlar yüzeyin altında gizlenen "intradermal mumlar" ve görünür bir dış yüzey oluşturan "epidermal mumlar" dır. Ayrıca bitki kütikülü, selüloz, hemiselüloz, lignin ve pektin gibi az miktarda kesik polisakarit fibrilleri dahil ederek birincil hücre duvarına bağlanır [1]. Bitki kütikülünün önemi, ışığın emilmesi ve dağıtılması yoluyla elde edilen, bitkilerin DNA'sını UV radyasyonunun ve ışık kaynaklı stresin tehlikelerine karşı korumadaki önemli rolüyle vurgulanmaktadır [2]. Hücre duvarlarıyla karşılaştırıldığında nispeten ince doğasına rağmen bitki kütikülü, bitki dokularının yapısal esnekliğine katkıda bulunur.

Son on yılda, bitkilerin, özellikle de süperhidrofobik ve kendi kendini temizleme özelliklerine sahip olanların yüzey özelliklerinin incelenmesi üzerine çalışmalar oldukça popüler hale gelmiştir. Bununla birlikte bitki yüzeyleri, "süperhidrofilik" olarak adlandırılan, suyu büyük bir ilgiyle çekerek zıt bir özellik sergiler. Bitki yüzeylerinin ıslanabilirliği, süperhidrofobikten süperhidrofilige kadar bir spektrumu kapsar ve bunların bileşiminden ve yüzey kimyasından büyük ölçüde etkilenir. Bitkilerdeki sayısız yüzey yapısı, hücre şekillerinin çeşitliliğinden, hücre yüzeylerindeki mikro ve nanoyapılardan ve karmaşık çok hücreli yapıların oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu çeşitli yapı dizisi, bitkilerin geniş kapsamlı yapısal ve işlevsel yüzey varyasyonlarının temelini oluşturur [3].

Patojenlere karşı savunmada önemli bir rol oynayan bitki yüzeylerinin nem tutma özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Aynı zamanda bitki yüzeylerinin kendi kendini temizleme özellikleri, anti-tümör, anti-viral, anti-inflamatuar ve antibiyotik etkilerinden dolayı çeşitli alanlarda umut verici uygulamalara sahip olabileceği ortaya konmuştur [4, 5]. Şekil 1'de, bitki yüzeyleri ve bunların su temas açılarındaki geçirgenliği gösterilmiştir. Bu inceleme, özellikle bu benzersiz yüzeylerin kullanımına ve araştırmacıların bunları modern uygulamalarda kullanmak için geliştirdiği yenilikçi yöntemlere odaklanarak mevcut literatürün kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır.



Şekil 1. a) Süper hidrofilik, b) hidrofilik, c) hidrofobik ve d) süperhidrofobik yüzeylerin şematik gösterimi.

Bu çalışma, değişen su geçirme özelliklerine sahip bitki yüzeylerine yönelik son biyoteknolojik araştırmaların önemini ve bunların moda tasarımı, kirlilik kontrol malzemeleri, tarım, inşaat mühendisliği, tıp ve ileri teknoloji gibi alanlardaki potansiyel uygulamalarına ışık tutmaya çalışmaktadır. Dahası, karasal ekosistemlerdeki bu bol doğal yüzeylerden değerli bir biyoteknolojik kaynak olarak yararlanmanın önemini vurgulamak için hazırlanmıştır.

2. Bitkilerden Esinlenilerek Elde Edilen Ürünlerin Kullanım Yerlerine Göre Özellikleri

2.1. Kendi kendini temizleme özellikleri

Araştırmacılar, suya son derece dayanıklı üç yüzeyin "nilüfer etkisi" olarak bilinen kendi kendini temizleme ve suya dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Bu araştırmanın sonucunda, özel mikro yapıya sahip silikon levhalar, ticari olarak satılan kağıt levhalar ve metal levhalar hidrofobik kaplamalar kullanılmışlardır. İnce ve yakın aralıklı çıkıntılara

sahip silikon plakaların su damlacıklarını kolayca ittiğini ve boyutları 8 ila 20 mikrometre arasında olan damlacıklar içeren ince su spreyi ile etkili bir şekilde temizlenebileceğini keşfettiler. Bazı ticari folyo ve kağıt numuneleri, tam temizlik için daha yüksek kinetik enerjiye sahip su damlacıkları gerektiren daha pürüzlü yüzeylere sahiptir. 5 mikrometreden küçük mikro yapıya sahip olmayan yüzeyler temizlenemez ve sürekli bir su tabakası oluşturmaktadır [6].

2.2. Kılcal tabanlı sıvı taşınması

Çeşitli yerçekimi koşullarında çalışan otomatik bir su sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem yörünge ötesi uzay aracında ve dünya, ay ve Mars'taki yüzey laboratuvarlarında kullanılmıştır. Bu çalışmada, su ve besinlerin pasif iletimini sağlamak, stabil sıvı muhafazasını sağlamak, akışı düzenlemek ve havalandırmayı ve kabarcık ayrılmasını kolaylaştırmak için kılcal akışkan bileşenleri kullanılmışlardır. Dalgalandıran büyüme döngüleri boyunca bitki besin maddesi dağıtımını kontrol etmek için pasif yöntemler geliştirmek de dahil olmak üzere çeşitli zorlukları ele alınmıştır [7].

2.3. Hidrodinamik sürtünmenin azaltılması

Salvinia molesta'dan ilham alan sentetik bir yaprak, mikro sütun dizisinin kılcal kuvvetle indüklenen montajı yardımıyla geleneksel yumuşak litografi yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada açıklanan üretim tekniği, Salvinia'dan ilham alan tasarımların hidrodinamik sürtünmeyi azaltan özelliklerini taklit eden yüzeyler üretmek için büyük umut oluşturduğu gösterilmiştir. Yüzen bir su eğreltiotu olan Salvinia molesta yapraklarının yüzeylerinde benzersiz yumurta çırpıcı şeklindeki piramidal şekiller bulunmaktadır. Bu trikoların karmaşık yapısı ve özel ıslanabilirlikleri sayesinde bitki, suya batırıldığında sabit bir hava katmanını koruyabilir. Bu özelliğe genellikle "Salvinia etkisi" adı verilir ve hidrodinamik sürüklenme azaltma uygulamalarında oldukça uygulanabilir olduğu düşünülmektedir [8].

2.4. Diğer biyo-ilhamlı uygulamalar

Lotus yaprakları, gül yaprakları, çeşitli canlıların kanatları ve kabukları gibi doğal yapıları taklit eden biyo-esinli polimerik malzemelerdeki son gelişmeler araştırılmıştır. Bu malzemeler süperhidrofilik, süperhidrofobik ve oleofobik özellikler sergiler. Çok sayıda araştırma, bu ıslanabilirlik özelliklerinin elde edilmesinde yüzey kimyasının ve yüzey deseninin kritik rolünün olduğu vurgulanmıştır ve bunlardan esinlenerek polimerik temelli yeni materyaller tasarlanmıştır. Ayrıca biyo-esinli bu malzemelerin çeşitli insan faaliyetlerindeki uygulamaları da araştırılmıştır [9].

3. Hidrofobiklik Özelliklerine Göre Bitkilerin Yüzeyleri

3.1. Süperhidrofilik yüzeyler

Suya karşı güçlü bir ilgiye sahip olacak şekilde tasarlanmış, çoğunlukla suya temas açısı sıfıra yakın olan malzemeler veya kaplamalardır. Bu monarşiye kimyasal modifikasyon, mikro/nano ölçekli sentez veya bunların bir kombinasyonu yoluyla ulaşılabilmektedir. Yüksek derecede hidrofilik membranlar, su arıtma ve tıbbi cihazlarda, bakteriyel yapışmayı azaltarak ve kateterlerde olduğu gibi biyoyuymuluğu artırarak uygulama alanı bulur. Süperhidrofilik yüzeylerin diğer uygulamaları şunlardır:

- Ruelia diffusiana yaprakları son derece hidrofilik ve süperoleofilik yüzeylerdir ve bu sonuçlara dayanarak araştırmacılar bu yapıyı yapay yüzeyler üzerinde kopyalamıştır [10].
- Böcekleri yakalamak için etçil bitkilerle dolu ıslak yüzeylerin kullanılması amaçlanmıştır [11].
- kendi kendini temizleyen ve termohidrolik uygulamalar için nanotüpler ve nanopartiküller kullanarak titanyum yüzeyleri geliştirilmiştir [12].
- Yüzey morfolojisinin rolüne vurgu yaparak ultra hızlı lazerler kullanarak süper hidrofilik alümina seramik yüzeyler oluşturulmuştur [13].
- Plazma ile işlenmiş yüzeyler tasarlanmıştır [14].
- Fonksiyonel gruplara sahip silikon levhalar [15].
- Kitosan-vailin kaplamalar yapılmıştır [16].

3.2. Hidrofilik yüzeyler

Hidrofilik yüzeyler suya yatkın yüzeylerdir. Su, hidrofilik bir yüzeye temas ettiğinde yayılır ve topaklanmak yerine ince bir film oluşturur. Bu özellik su ve yüzey aktif maddeler arasındaki moleküler etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Bu önleyici kaplamalar, su arıtma membranları ve tıbbi cihazlar gibi uygulamalarda kullanılabilmektedir. Birçok mühendislik malzemesi gibi biyolojik yüzey de bir dereceye kadar hidrofiliktir. Hidrofiliklik, bir su damlacığının yüzeye olduğu temas açısıyla ölçülür. Düşük temas açısı (sıfır dereceye yakın) genellikle hidrofilik bir yüzeye işaret eder. Hidrofilik yüzeyler, tekstillerin ıslanabilirliğini ve altın yüzeylerin temizliğini arttırmak, polimer ıslanabilirliğini ve metallere yapışmasını geliştirmek, tekdüze baskı ve kaplama difüzyonunu sağlamak ve biyomedikal cihazlarda hücre bağlanmasını

kolaylaştırmak gibi çeşitli uygulamalara sahiptir. Ayrıca bitkinin su alımı ve biyolojik sistemlerdeki sıvı hareketi gibi doğal süreçlerde de hayati öneme sahiptirler [17, 18].

3.3. Hidrofobik yüzeyler

Hidrofobik yüzeyler suyla olumlu etkileşime girmeme eğiliminde olduğundan damlacıkların kolayca yayılmak yerine yüzeyden yuvarlanmasına neden olur. Hidrofobik yüzeylerde temas açısı genellikle 90 dereceden büyüktür ve genellikle teflon'dan yapılır veya balmumu, silikon veya floropolimerler gibi hidrofobik malzeme katmanlarıyla kaplanır.

Hidrofobik yüzeyler,

1- yağmur suyunun kirinin pencerelere ve dış mekan yüzeylerine yapışmasını engelleyerek kendi kendini temizleyen malzemeler olarak kullanılır [19].

2- Tıbbi amaçlarla kullanılmaktadır. Bazı tıbbi alet ve cihazlara bakteriyel yapışmayı önlemek ve temizliği kolaylaştırmak için su geçirmez yüzeyler tasarlanmaktadır [20].

3- Elektronik sektöründe kullanılmaktadır [21].

4- Bitki zararlılarını ve hastalıklarını kontrol etme amaçlı kullanılmaktadır [22].

5- Bitki yapraklarının hidrofobik özelliklerini, ultraviyole nanoimprint litografi (UV-NIL) kullanarak UV ile kürlenebilen bir polimer filmde mikro/nanoyapılarını yeniden oluşturarak taklit edilmesi amaçlı kullanılmaktadır [23].

Hidrofobiteyi anlamak ve kullanmak adına malzeme biliminde devam eden bir araştırma alanıdır ve sürekli olarak yeni uygulamalar geliştirilmektedir.

3.4. Süperhidrofobik yüzeyler

Süperhidrofobik yüzeyler suyu güçlü bir şekilde iten yüzeylerdir. Hidrofobiklik derecesi, bir su damlacığının yüzeydeki temas açısı ile ölçülebilir; burada temas açısı 150 dereceden büyüktür. Hidrofobik yüzeyler genellikle nilüfer yaprakları gibi bitkilerde veya su üzerinde yürüyen böcekler gibi hayvanlarda bulunan doğal olayları taklit eder. Özelliklerini mikro veya nano yapıların ve hidrofobik ve sıklıkla kendi kendini temizleyen kimyasalların birleşimi yoluyla elde etmektedir. Bu yüzeylerin çeşitli alanlarda uygulamaları vardır; örneğin, 1- bitki yapraklarından esinlenerek yüksek derecede hidrofobik yüzeylerin üretimi [24]. 2- kendi kendini temizleyen pencerelerin oluşturulması, bina ve tuvalet inşaatı, metalik boyalar mimari koruma ve fotovoltaj cihazlar (güneş pillerinin yanı sıra tekstil endüstrisi). Ayrıca su geçirmez giysiler [25]. 3- Tekneler için kirlenme önleyici kaplamaların imalatı [26]. 4- Uzayda uçaklarda donmayı önlemek için kullanılabilirler [27]. 5- Gelişmiş malzemelerin tasarımında ve üretiminde [28] ve sayısız diğer uygulamalarda kullanılabilirler.

4. Literatür Özeti

Doğal olarak oluşan süperhidrofobik yüzeylerin dikkat çekici özelliklerini ve bunların çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamaları üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Doğal bitkilerin yapraklarının süper hidrofobikliği araştırılmış ve yaprakların mikroskobik yapılarını analiz etmek için temas açısı ölçümleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi analizler yapılmıştır. Bitki yapraklarında iki ana süperhidrofobik yüzey yapısı tanımlanmıştır. Bunlar ince yapıları içeren ikili yapı ve nanoyapı ve doğrusal mikroyapılarla karakterize edilen üniter yapıdır. Yapraklara yapışan su damlacıklarının bir amortisör görevi görerek yanar su hareketini dikey harekete dönüştürebileceği öne sürülmüştür. Bu sonuçlarda, güneş panelleri ve mikroakışkan cihazların kaplanması gibi düz yüzeylerdeki su artırımında da benzer prensiplerin uygulanabileceğini göstermektedir. Biyolojik yüzeylerin kendi kendini temizleme özellikleri de araştırılmıştır ve üç kritik faktöre odaklanılmıştır. Bunlar yüzey dokusu, düşük parçacık yapışması ve su iticiliğidir. Yaygın olarak lotus bitkisi olarak bilinen *Nelumbo nucifera* gibi suya dayanıklı bitkilerin, yaygın olarak "nilüfer etkisi" olarak bilinen bir fenomen olan olağanüstü kendi kendini temizleme yeteneğine sahiptir. Bu özellik biyolojik araştırma ve teknolojik yeniliklerde umut verici uygulamalara sahiptir. Daha ileri araştırmalar, kendi kendini temizleme yeteneğinin genellikle balmumu kristallerinin suyu iten ve yabancı parçacıkların yapışmasını azaltan karmaşık yüzey yapılarından kaynaklandığını ortaya koymuştur [29-35].

Zeiger ve arkadaşları 2016 yılında [36] yaptıkları çalışmada, su marulu ve nilüfer yapraklarının yanı sıra dört tür salvinyanın da yağ emme yetenekleri araştırılmıştır. Araştırma, *Salvinia molesta* yapraklarının ve *Bestia* istatistiklerinin, sentetik malzemelere benzer yağ emme oranları gösterdiğini keşfetmiştir. Bu bitkiler, petrol sızıntısı durumlarında petrolün emilmesine karşı çevre dostu bir alternatif olabilir. Araştırma ayrıca yağ yoğunluğunun ve viskozitesinin emme verimliliği üzerindeki etkisini de araştırmıştır. *Salvinia tricolor*'un farklı formları, yağ emilimindeki rollerini anlamak için karşılaştırmışlardır. *Salvinia* yaprakları, yağı seçici olarak emmelerine ve suyu itmelerine olanak tanıyan benzersiz özelliklere sahip olduğunu belirlemişler, bu da onları biyolojik yağ emme uygulamaları için ideal bir aday haline getirdiğini bildirmişlerdir.

Yapılan bir derleme çalışmasında [37], bazı bitki yüzeylerinin aşırı su itici doğasının ardındaki bilimi araştırmışlar ve süperhidrofobik özelliklerinin teknolojik kullanımlar için çeşitli biyomimetik malzemelere nasıl dönüştürülebileceği hakkında bilgiler ortaya koymuştur. Bitki yüzeyleri kendi içinde üç iyi bilinen etkiyle belirlenmiştir ve bunlar: Lotus Etkisi, Salvinia Etkisi ve Petal Etkisi, dirç Tüm bu yüzeyler suya oldukça dayanıklı biyomimetik malzemelerin işlenmesine yönelik yenilikçi yöntemlere dair fikirler vermektedir. Yapılan bu derleme çalışmasında [37], hızla gelişen bu alandaki beklentileri ve engelleri tartışmıştır. Nilüfer yaprakları ve nilüferler gibi bitkilerin ve kelebekler gibi canlıların benzersiz mikro yapıları nedeniyle su itici özellikler sergiledikleri doğadan ipuçları alan araştırmacılar ve endüstriler, sentetik süperhidrofobik yüzeyler oluşturmaya olanak sağlayacağını bildirmişlerdir. Bu özelliklerin anahtarı kimyasal yapıda ve yüzey mimarisinde yatmaktadır. Bu değişkenleri, yani yüzey pürüzlülüğünü ve yüzey serbest enerjisini titizlikle kontrol ederek, olağanüstü suya dayanıklı biyomimetik yüzeyler geliştirmek mümkün hale gelebilmektedir. Diğer bazı çalışmalarda süperhidrofobik yüzeylerin faydaları kendi kendini temizleme, biyolojik kirlilik önleme ve korozyon önleme amacıyla incelenmiştir. Korozyonun olumsuz sonuçları, endüstriyel tesislerin kapanmasına, değerli kaynakların israfına, verimliliğin azalmasına, ürünlerin kaybolmasına veya kirlenmesine ve çevreye zarar verilmesine yol açan ciddi ve yaygın bir sorundur. Doğadan ilham alan süperhidrofobik yüzeyler, metallerin korozyona karşı korunmasını iyileştirmenin alternatif bir yolu olarak düşünülebilir. Sıvılar ve yüzey arasındaki temas alanı azaltılabildiğinden, yüksek derecede hidrofobik yüzeyler korozyona karşı önemli bir direnç sağlayabilir ve araştırma, kendi kendini temizleme özellikleriyle bilinen nilüfer ve taro yapraklarında bulunan hiyerarşik yapıların taklit edilmesine odaklanmıştır. Bu yapılar farklı şekil ve boyutlarda üst üste binen balmumu kristallerine sahip epidermal hücrelerden oluşur. Çalışma, yüksek derecede hidrofobik özellikler elde etmek için nilüfer yapraklarından ilham alan iki hiyerarşik yapının oluşturulmasını içermektedir. Bu yapıların nano ve mikro desenlerle karşılaştırıldığında daha etkili olduğu kanıtlanmıştır. İslatma sürecini anlamak için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonları kullanılmıştır ve bu simülasyonlar deneysel sonuçlarla benzer özellikler göstermiştir. Çalışma aynı zamanda havayı hapsettiği ve onu hidrofobik yüzeyler geliştirmek için umut verici bir aday haline getirdiği bilinen Salvinia minima bitkisinin karmaşık hiyerarşik yapısını da araştırmıştır [38, 39].

5. Sonuç

Literatürdeki son araştırmalar, milyonlarca yıl boyunca gelişen bitkilerin karmaşık yüzey yapılarından elde edilen desen ve yapıların ilham ve yenilik potansiyelini vurgulamaktadır. Lotus yapraklarının su itici özelliklerinden bitki kılıplarının etkileyici su emme yeteneklerine kadar uzanan bu adaptasyonlar, çeşitli uygulamalarda birçok avantaj sunmaktadır. Bu çalışmamızda, bitki yüzey yapılarının işlevselliğini açıklamakta ve bunların çeşitli alanlarda kullanılmasına yönelik bir stratejinin ana hatlarını çizmektedir. Kendi kendini temizleme özelliklerine sahip olmalarına rağmen bu yapıların yalnızca su direncini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda endüstriyel sistemlerde sıvı yönetimi verimliliğini de arttırdığını belirtmekte fayda var. Ayrıca bu doğal harika yüzeyler, yoğunlaşma yoluyla damlacık oluşumunu engelleyerek yüzey temizliğinin korunmasında çok önemli bir rol oynar. Yakın gelecekte, bitkilerin yüzeylerindeki bu eşsiz tasarım sayesinde pek çok alanda daha etkin ve çevre dostu çözümler ortaya konacaktır.

Teşekkür

Akademik yolculuğumda ve bu tezin tamamlanmasında emeği geçen birçok kişiye en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

References

- [1] Koch, K. and Ensikat, H. J. (2008). The hydrophobic coatings of plant surfaces: epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity, and molecular self-assembly, *Micron*, 39(7), 759-772.
- [2] J. D. Barnes and J. Cardoso-Vilhena, (1996). Interactions between electromagnetic radiation and the plant cuticle, *Plant cuticles: an integrated functional approach*. 157, 170.
- [3] Koch, K. and Barthlott, W. (2009). Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1487-1509.
- [4] Nosonovsky, M. and Bhushan, B. (2007). Lotus effect: roughness-induced superhydrophobicity, In *Applied Scanning Probe Methods VII: Biomimetics and Industrial Applications* (pp. 1-40), Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [5] Neinhuis, C. and Barthlott, W. (1997). Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces, *Annals of Botany*, 79(6), 667-677.
- [6] Fürstner, R., Barthlott, W., Neinhuis, C., and Walzel, P. (2005). Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 21(3), 956-961.

- [7] Torres, L., Jenson, R., and Weislogel, M. (2020). Capillary Hydroponic Plant Watering System for Spacecraft, 2020 *International Conference on Environmental Systems*. ICES-2020-172, <https://hdl.handle.net/2346/8634>
- [8] Kim, M., Yoo, S., Jeong, H. E. and Kwak, M. K. (2022). Fabrication of Salvinia-inspired surfaces for hydrodynamic drag reduction by capillary-force-induced clustering, *Nature Communications*, 13(1), 5181.
- [9] Pan, Z., Cheng, F., Zhao, B. (2017). Bio-inspired polymeric structures with special wettability and their applications: An overview, *Polymers*, 9(12), 725.
- [10] Koch, K., Blecher, I. C., König, G., Kehraus, S., and Barthlott, W. (2009). The superhydrophilic and superoleophilic leaf surface of *Ruellia devosiana* (Acanthaceae): a biological model for spreading of water and oil on surfaces. *Functional Plant Biology*, 36(4), 339-350.
- [11] Zhang, L., Zhao, N., and Xu, J. (2014). Fabrication and application of superhydrophilic surfaces: a review, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(8-9), 769-790.
- [12] Prakash, C. J., Raj, C. C., and Prasanth, R. (2017). Fabrication of zero contact angle ultra-super hydrophilic surfaces, *Journal of colloid and interface science*, 496, 300-310.
- [13] Cao, Z., Wang, W. Y. Fabrication of super hydrophilic surface on alumina ceramic by ultrafast laser microprocessing. *Applied Surface Science*, 557, 149842.
- [14] Tsougeni, K., Vourdas, A., Tserepi, N., Gogolides, E., and Cardinaud, C. (2009). Mechanisms of oxygen plasma nanotexturing of organic polymer surfaces: from stable super hydrophilic to superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 25,19, 11748-11759.
- [15] Zeiger, C., da Silva, I. C. R., Mail, M., Kavalenka, M. N., Barthlott, W., Hölscher, H. (2016). Microstructures of superhydrophobic plant leaves-inspiration for efficient oil spill cleanup materials, *Bioinspiration and biomimetics*, 11(5), 056003.
- [16] Michailidou, G., Koukaras, E. N., Bikiaris, D. N. (2021). Vanillin chitosan miscible hydrogel blends and their prospects for 3D printing biomedical applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 1266-1275.
- [17] Smith, T. (1980). The hydrophilic nature of a clean gold surface, *Journal of Colloid and Interface Science*, 75(1), 51-55.
- [18] Cho, J. S., Beag, Y. W., Han, S., Kim, K. H., Cho, J., Koh, S. K. (2000). Hydrophilic surface formation on materials and its applications, *Surface and Coatings Technology*, 128, 66-70.
- [19] Wang, T., Si, Y., Luo, S., Dong, Z., Jiang, L. (2019). Wettability manipulation of overflow behavior via vesicle surfactant for waterproof surface cleaning, *Materials Horizons*, 6, 2, 294-301.
- [20] Wang, G., Wang, J., Wu, W., Tony To, S. S., Zhao, H., Wang, J. (2015). Advances in lipid-based drug delivery: enhancing efficiency for hydrophobic drugs, *Expert opinion on drug delivery*, 12, 9, 1475-1499.
- [21] Zhao, J., Wang, X., Liu, L., Yu, J., Ding, B. (2018). Human skin-like, robust, waterproof, and highly breathable fibrous membranes with short perfluorobutyl chains for eco-friendly protective textiles, *ACS applied materials & interfaces*, 10, 36, 30887-30894.
- [22] Glenn, D. M., Puterka, G. J., Vanderzwet, T., Byers, R. E., Feldhake, C. (1999). Hydrophobic particle films: a new paradigm for suppression of arthropod pests and plant diseases, *Journal of Economic Entomology*, 92, 4, 759-771.
- [23] Lee, S. M. and Kwon, T. H. (2006). Mass-producible replication of highly hydrophobic surfaces from plant leaves, *Nanotechnology*, 17, 13, 3189.
- [24] Lee, S. M., Lee, H. S., Kim, D. S., Kwon, T. H. (2006). Fabrication of hydrophobic films replicated from plant leaves in nature, *Surface and Coatings Technology*, 201,(3-4), 553-559.
- [25] Dalawai, S. P., Aly, M. A. S., Lathe, S. S., Xing, R., Sutar, R. S., Nagappan, S., Liu, S. (2020). Recent advances in the durability of superhydrophobic self-cleaning technology: a critical review, *Progress in Organic Coatings*, 138, 105381.

- [26] Wang, M., Zi, Y., Zhu, J., Huang, W., Zhang, Z., Zhang, H. (2021). Construction of super-hydrophobic PDMS@MOF@Cu mesh for reduced drag, anti-fouling, and self-cleaning towards marine vehicle applications, *Chemical Engineering Journal*, 417, 129265.
- [27] Piscitelli, F., Tescione, F., Mazzola, L., Bruno, G., Lavorgna, M. (2019). On a simplified method to produce hydrophobic coatings for aeronautical applications, *Applied Surface Science*, 472, 71-81.
- [28] Yang, C., Jing, X., Wang, F., Ehmann, K. F., Tian, Y., Pu, Z. (2019). Fabrication of controllable wettability of crystalline silicon surfaces by laser surface texturing and silanization, *Applied Surface Science*, 497, 143805.
- [29] Guo, Z., Liu, W. (2007). Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure, *Plant Science*, 172, 6, 1103-1112.
- [30] Shirtcliffe, N. J., McHale, G., and Newton, M. I. (2009). Learning from superhydrophobic plants: The use of hydrophilic areas on superhydrophobic surfaces for droplet control, *Langmuir*, 25, 24, 14121-14128.
- [31] Barthlott, W., Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, 202, 1, 1-8.
- [32] Bhushan, B., Jung, Y. C. (2011). Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction, *Progress in Materials Science*, 56, 1, 1-108.
- [33] Koch, K., Bohn, H. F., Barthlott, W. (2009). Hierarchically sculptured plant surfaces and superhydrophobicity, *Langmuir*, 25, 24, 14116-14120.
- [34] Webb, H. K., Crawford, R. J., Ivanova, E. P. (2014). Wettability of natural superhydrophobic surfaces, *Advances in colloid and interface science*, 210, 58-64.
- [35] Sam, E. K., Sam, D. K., Lv, X., Liu, B., Xiao, X., Gong, S., Liu, J. (2019). Recent development in the fabrication of self-healing superhydrophobic surfaces, *Chemical Engineering Journal*, 373, 531-546.
- [36] Zeiger, C., da Silva, I. C. R., Mail, M., Kavalenka, M. N., Barthlott, W., Hölscher, H. (2016). Microstructures of superhydrophobic plant leaves-inspiration for efficient oil spill cleanup materials, *Bioinspiration and biomimetics*, 11, 5, 056003.
- [37] Wang, G., Guo, Z., Liu, W. (2014). Interfacial effects of superhydrophobic plant surfaces: A review, *Journal of Bionic Engineering*, 11, 3, 325-345.
- [38] Grewal, H. S., Cho, I. J., Yoon, E. S. (2015). The role of bio-inspired hierarchical structures in wetting, *Bioinspiration and Biomimetics*, 10, 2, 026009.
- [39] Vazirinasab, E., Jafari, R., Momen, G. (2018). Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review, *Surface and Coatings Technology*, 341, 40-56.