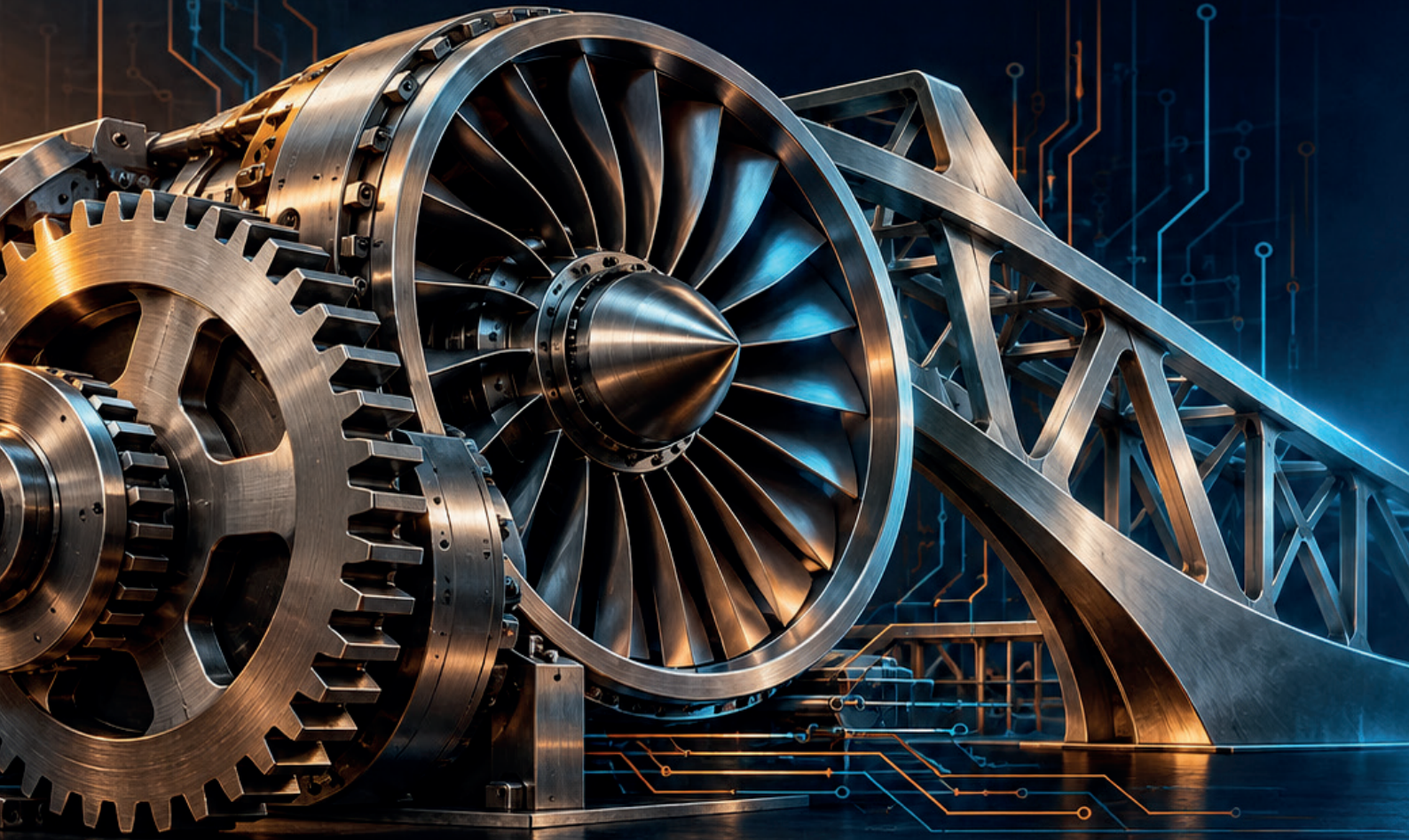


MÜHENDİSLİK

ALANINDA ARAŞTIRMALAR
VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026



EDİTÖR

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Ekim 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-304-6

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

0312 384 80 40

www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro

Sertifika No: 42488

**MÜHENDİSLİK
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

EKİM 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SÜPERHİDROFOBİK YÜZEYLER II: BİYOLOJİK ETKİLEŞİMLER VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Nurcan ÇALIŞ AÇIKBAŞ, Gökhan AÇIKBAŞ 7

BÖLÜM 2

MOLEKÜLER MARKÖRLERİN BİTKİLERDE GENETİK ÇEŞİTLİLİĞİN BELİRLENMESİNDE KULLANIMI

Begüm TERZİ AKSOY, Özlem ATEŞ SÖNMEZOĞLU 41

BÖLÜM 3

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SÜPERHİDROFOBİK YÜZEYLER I: TASARIM STRATEJİLERİ

Nurcan ÇALIŞ AÇIKBAŞ, Gökhan AÇIKBAŞ 55

BÖLÜM 4

BOR KARBÜR (B₄C) ÜRETİM SÜREÇLERİNDE TEKNOLOJİK TRENDLER VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Onur Yiğit ÖZGER, Edip AVŞAR 83

BÖLÜM 5

UZAKTAN ALGILAMA İLE SERA ALANLARININ TESPİTİ: İNDEKSLER, VERİ KAYNAKLARI VE ALGORİTMALAR ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Ramazan GÜNGÖR 105

BÖLÜM 6

İŞ SÜREÇ YÖNETİMİ(BPM) İLE ARAÇ ÇEKİCİ YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Tahsin ÇETİNYOKUŞ, Okan TÜREYYEN 122

BÖLÜM 1

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SÜPERHİDROFOBİK YÜZEYLER II: BİYOLOJİK ETKİLEŞİMLER VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Nurcan ÇALIŞ AÇIKBAŞ¹, Gökhan AÇIKBAŞ²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye; email: nurencalisacikbas@duzce.edu.tr

² Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye; email: gokhanacikbas@duzce.edu.tr

1. Giriş

Süperhidrofobik yüzeyler, yüksek su iticilikleri, düşük yüzey enerjileri ve karakteristik mikro/nano ölçekli hiyerarşik topografileri sayesinde son yıllarda biyomedikal mühendislik alanında giderek artan bir ilgi görmektedir. Doğadaki lotus yaprağının kendi kendini temizleme mekanizmasından ilham alınarak geliştirilen bu yüzeyler, yalnızca sıvıların yüzey üzerinde yayılmasını ve tutunmasını sınırlandırmakla kalmayıp, yüzey ile biyolojik çevre arasındaki etkileşimlerin kontrol edilmesi açısından da önemli bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Özellikle bakteriyel adezyonun ve biyofilm oluşumunun sınırlandırılması, protein adsorpsiyonunun kontrol edilmesi, sıvıların yüzey üzerinde taşınmasının kolaylaştırılması ve tıbbi cihazların yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gibi potansiyel avantajları, süperhidrofobik yüzeyleri biyomedikal uygulamalar açısından dikkat çekici hale getirmiştir [1].

Bununla birlikte, biyolojik ortamlar mühendislik uygulamalarında kullanılan basit sıvı sistemlerinden oldukça farklı ve karmaşık yapılardır. Kan, plazma, interstisyel sıvılar ve diğer biyolojik sıvılar; proteinler, lipidler, polisakkaritler, iyonlar ve hücreler gibi çok sayıda biyolojik bileşen içermektedir. Bir süperhidrofobik yüzey biyolojik bir ortama maruz kaldığında, yüzeyin başlangıçtaki su iticilik davranışı zaman içerisinde protein adsorpsiyonu, hücresel etkileşimler, iyonik ortam, mekanik aşınma ve yüzey kimyasındaki değişimler nedeniyle farklılaşabilmektedir. Bu nedenle, bir yüzeyin yalnızca yüksek su temasına sahip olması, onun biyomedikal açıdan başarılı olduğunu göstermek için yeterli değildir. Yüzeyin fizikokimyasal özellikleri ile biyolojik yanıt arasındaki ilişkinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir [2].

Biyolojik etkileşimlerin ilk aşamalarından biri, yüzeyin biyolojik sıvılarla temas etmesiyle gerçekleşen protein adsorpsiyonudur. Yüzeyin kimyasal bileşimi, yüzey enerjisi, pürüzlülüğü ve ıslanabilirliği; proteinlerin yüzeye taşınmasını, adsorpsiyon miktarını ve yüzey üzerindeki konformasyonel değişimlerini etkileyebilmektedir. Adsorbe olan protein tabakası ise daha sonraki hücre adezyonu, bakteriyel tutunma ve immünolojik yanıt gibi biyolojik olayların belirleyicilerinden biri haline gelebilmektedir. Dolayısıyla süperhidrofobik yüzeylerin biyolojik performansı, yalnızca yüzey ile biyolojik türler arasındaki doğrudan etkileşimlerle değil, yüzey üzerinde oluşan biyomoleküler ara tabaka üzerinden gerçekleşen ikincil etkileşimlerle de şekillenmektedir [3,4]. Bu durum özellikle implantlar ve uzun süreli temas halinde bulunan tıbbi cihazlar açısından önem taşımaktadır. Bakterilerin yüzeye tutunması ve ardından biyofilm oluşturmaları, enfeksiyon riskini artırarak implant başarısını olumsuz etkileyebilen önemli sorunlardan biridir. Süperhidrofobik yüzeylerin düşük yüzey enerjisi ve karakteristik topografik özellikleri, bazı koşullarda bakteriyel tutunmayı ve sıvı içerisinde bulunan mikroorganizmaların yüzeye temasını azaltabilmektedir. Benzer şekilde, yüzeyin biyolojik sıvılarla etkileşiminin sınırlandırılması, antifouling ve antimikrobiyal yüzey tasarımları açısından önemli bir yaklaşım oluşturmaktadır. Ancak bu etkilerin yüzeyin kimyasal bileşimi, pürüzlülük ölçeği, yüzeydeki hava-sıvı arayüzünün kararlılığı ve maruz kalınan biyolojik ortam gibi birçok parametreye bağlı olduğu unutulmamalıdır [5-7].

Öte yandan, süperhidrofobik yüzeylerin biyolojik olarak her zaman avantajlı olması beklenmemelidir. Örneğin bazı biyomedikal uygulamalarda hücrelerin yüzeye kontrollü biçimde tutunması, yayılması ve farklılaşması istenirken, aşırı su itici bir yüzey bu süreçleri sınırlayabilmektedir. Bu nedenle geleceğin biyomedikal yüzey tasarımlarında temel hedef yalnızca maksimum hidrofobiklik elde etmek değil, **uygulamaya özgü ve kontrollü bir biyolojik yanıt oluşturabilen yüzeyler geliştirmek** olmalıdır. Bu yaklaşım, süperhidrofobik özelliklerin diğer yüzey fonksiyonlarıyla birlikte tasarlanmasını ve yüzeyin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin eş zamanlı olarak optimize edilmesini gerekli kılmaktadır [8].

Bu bölüm kapsamında, süperhidrofobik yüzeylerin biyolojik sistemlerle etkileşimleri; protein adsorpsiyonu, hücre-yüzey etkileşimleri, bakteriyel adezyon ve biyofilm oluşumu, kan uyumluluğu ve antifouling davranış gibi temel başlıklar üzerinden değerlendirilmiştir. Ardından, bu yüzeylerin implantlar, biyosensörler, mikroakışkan sistemler, kateterler ve diğer biyomedikal cihazlardaki

potansiyel uygulamaları ele alınmıştır. Son bölümde ise süperhidrofobik yüzeylerin pasif su itici yapılardan, biyolojik çevre ile kontrollü biçimde etkileşebilen ve belirli bir biyolojik işlevi yönlendirebilen çok işlevli yüzey platformlarına dönüşüm potansiyeli ortaya konulmuştur.

2. Süperhidrofobik Yüzeylerin Biyolojik Etkileşimleri

Bir malzemenin biyomedikal performansı, yalnızca mekanik, fiziksel veya kimyasal özellikleriyle değil, aynı zamanda biyolojik çevre ile oluşturduğu ara yüzün karakteriyle de belirlenmektedir. Biyomedikal bir cihaz veya implant vücut sıvılarıyla temas ettiğinde, yüzey ile biyolojik ortam arasında çok kısa zaman ölçeklerinde başlayan ve zaman içerisinde karmaşıklaşan bir dizi etkileşim meydana gelir. Bu süreç; proteinlerin yüzeye adsorpsiyonu, hücrelerin yüzeye yaklaşması ve tutunması, bakteriyel adezyon, biyofilm oluşumu, inflamatuvar yanıt ve kan ile temas eden sistemlerde koagülasyon gibi birbirini takip eden veya eş zamanlı gerçekleşen olayları içerebilir. Dolayısıyla bir yüzeyin biyomedikal başarısı, yalnızca başlangıçtaki yüzey özellikleriyle değil, biyolojik ortamla temas sonrasında bu özelliklerin nasıl değiştiği ve biyolojik yanıtı nasıl yönlendirdiği ile birlikte değerlendirilmelidir [9].

Süperhidrofobik yüzeyler bu açıdan dikkat çekici bir yaklaşım sunmaktadır. Düşük yüzey enerjisi ve mikro/nano ölçekli hiyerarşik topografiler, yüzey ile sıvı arasındaki gerçek temas alanını azaltarak biyolojik sıvıların yüzeyle etkileşim biçimini değiştirebilir. Özellikle Cassie–Baxter durumunun korunabildiği yüzeylerde, sıvının mikro/nano yapılar arasında hapsolmuş hava ile birlikte bulunması, katı–sıvı temas alanının azalmasına neden olabilir. Bu durum, biyomoleküllerin ve mikroorganizmaların yüzeye ulaşmasını ve yüzey üzerinde kalıcı etkileşimler oluşturmalarını sınırlandırma açısından avantaj sağlayabilir. Bununla birlikte, biyolojik sıvıların karmaşık bileşimi ve yüzeylerin gerçek kullanım koşullarındaki mekanik ve kimyasal maruziyeti nedeniyle, laboratuvar ortamında belirlenen süperhidrofobik davranışın biyolojik sistemlerde aynı şekilde korunması her zaman mümkün olmayabilir [10,11].

Biyolojik etkileşimlerin değerlendirilmesinde bu nedenle yalnızca statik su temas açısı gibi tek bir yüzey parametresine odaklanmak yeterli değildir. Yüzey pürüzlülüğü, topografik özelliklerin ölçeği, yüzey kimyası, yüzey enerjisi, sıvının bileşimi, protein içeriği, iyonik kuvvet, pH, sıcaklık ve maruziyet süresi gibi birçok parametre yüzey–biyoloji etkileşimini birlikte belirlemektedir. Özellikle biyolojik sıvıların yüzeye temas etmesiyle meydana gelen ilk olaylardan biri olan protein adsorpsiyonu, daha sonraki hücrel ve mikrobiyal yanıtların şekillenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

2.1. Protein Adsorpsiyonu ve Biyomoleküler Etkileşimler

Protein adsorpsiyonu, biyolojik bir ortam ile katı yüzey arasındaki etkileşimlerin en erken ve en önemli aşamalarından biridir. Kan, plazma, interstisyel sıvı veya hücre kültür ortamı gibi protein içeren bir sıvı yüzeyle temas ettiğinde, çözeltide bulunan proteinler yüzeye doğru taşınabilir ve yüzey üzerinde adsorbe olabilir. Bu olay yalnızca yüzeyde bulunan protein miktarını değiştirmekle kalmaz; aynı zamanda proteinlerin konformasyonunda, yöneliminde ve biyolojik aktivitesinde meydana gelebilecek değişiklikler nedeniyle yüzeyin sonraki biyolojik davranışını da etkileyebilir [12].

Protein adsorpsiyonu genel olarak yüzey ile protein arasındaki hidrojen bağları, elektrostatik etkileşimler, van der Waals kuvvetleri, hidrofobik etkileşimler ve diğer fizikokimyasal mekanizmaların ortak etkisiyle belirlenmektedir. Yüzeyin kimyasal bileşimi ve yüzey enerjisi bu etkileşimlerin şiddetini ve niteliğini değiştirebilir. Bunun yanında yüzey topografisi ve pürüzlülüğü de proteinlerin yüzeye erişebileceği alanı, adsorpsiyon bölgelerinin dağılımını ve proteinlerin yüzey üzerindeki konformasyonel durumunu etkileyebilmektedir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerde gözlenen biyolojik yanıt, yalnızca yüzeyin “hidrofobik” karakterinden değil, hidrofobiklik ile topografik özelliklerin birlikte oluşturduğu ara yüzeyden kaynaklanmaktadır [13].

Süperhidrofobik yüzeylerin protein adsorpsiyonuna etkisi oldukça karmaşık bir konudur. Bir taraftan düşük yüzey enerjisi ve azaltılmış katı–sıvı temas alanı, proteinlerin yüzeye erişimini ve yüzeyde kalıcı

olarak tutunmasını sınırlandırabilir. Özellikle kararlı bir Cassie–Baxter ıslanma durumunun sürdürülebildiği hiyerarşik yüzeylerde, sıvının yüzey topografisinin tamamını ıslatamaması, biyomoleküller açısından erişilebilir yüzey alanını azaltabilir. Bu durum, protein-repellent veya antifouling yüzeylerin geliştirilmesi açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir [14].

Bununla birlikte, düşük protein adsorpsiyonu ile biyolojik olarak olumlu bir yüzey davranışı arasında doğrudan ve genel bir ilişki kurmak mümkün değildir. Bazı biyomedikal uygulamalarda protein adsorpsiyonunun sınırlandırılması istenirken, bazı uygulamalarda belirli proteinlerin kontrollü biçimde yüzeye bağlanması ve biyolojik işlevlerini koruması gerekebilir. Örneğin doku mühendisliği ve rejeneratif tıp uygulamalarında hücrelerin yüzeye tutunması ve davranışlarının yönlendirilmesi için uygun bir protein ara tabakasının oluşması yararlı olabilir. Buna karşılık, kanla temas eden cihazlarda istenmeyen protein adsorpsiyonu ve bunu takip eden trombosit aktivasyonu, yüzey performansını olumsuz etkileyebilir. Dolayısıyla ideal yüzey tasarımı, uygulamanın gerektirdiği biyolojik yanıt doğrultusunda **protein adsorpsiyonunu tamamen ortadan kaldırmak yerine kontrol etmeyi** hedeflemelidir [15-17].

Proteinlerin yüzeye adsorpsiyonundan sonra meydana gelen konformasyonel değişiklikler de biyolojik açıdan önemlidir. Bir protein yüzeye bağlandığında, yüzey ile etkileşimini artırmak amacıyla üç boyutlu yapısında yeniden düzenlenmeler meydana gelebilir. Bu değişiklikler proteinin biyolojik olarak aktif bölgelerini açığa çıkarabilir veya maskeleyebilir ve böylece hücre reseptörleri ya da diğer biyomoleküller tarafından tanınmasını değiştirebilir. Sonuç olarak, hücrelerin bir yüzeye verdiği yanıt çoğu zaman yüzeyin kendisinden ziyade yüzey üzerinde oluşan protein tabakasının özellikleri tarafından belirlenebilmektedir. Bu durum, süperhidrofobik yüzeylerin biyolojik performansını değerlendirirken yüzey karakterizasyonunun protein–yüzey etkileşimleriyle birlikte ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır [18].

Bir diğer önemli konu ise proteinlerin yüzeye ulaşma ve adsorbe olma süreçlerinin zaman içerisinde değişmesidir. Biyolojik bir sıvı içerisinde çok sayıda farklı protein bulunduğundan, yüzey ile ilk temas eden protein türleri zaman içerisinde daha yüksek yüzey afinitesine sahip proteinler tarafından yer değiştirebilir. Bu dinamik süreç, literatürde sıklıkla **Vroman etkisi** ile ilişkilendirilmektedir. Özellikle kanla temas eden biyomalzemelerde albümin, fibrinojen, immünoglobulinler ve diğer plazma proteinlerinin yüzeye zamana bağlı olarak farklı oranlarda adsorbe olması, sonraki trombosit ve hücre etkileşimlerinin belirlenmesinde önemli rol oynayabilir [19].

Süperhidrofobik yüzeylerde ise bu dinamik protein adsorpsiyon süreci, yüzey topografisinin kararlılığı ile doğrudan ilişkilidir. Başlangıçta hava kapanmasını sağlayan mikro/nano yapılar biyolojik sıvı altında zaman içerisinde çöker, ıslanır veya mekanik olarak hasar görürse, yüzeyin gerçek katı–sıvı temas alanı artabilir. Böylece başlangıçta gözlenen düşük protein adsorpsiyon davranışı zaman içerisinde değişebilir. Bu nedenle biyomedikal uygulamalar için süperhidrofobik yüzey tasarımında yalnızca yüksek temas açısının elde edilmesi değil, **biyolojik ortamda uzun süre korunabilen bir ıslanma durumu ve yüzey mimarisinin oluşturulması** temel tasarım kriterlerinden biri olmalıdır [20].

Sonuç olarak, protein adsorpsiyonu süperhidrofobik yüzeylerin biyolojik performansını belirleyen temel ara aşamalardan biridir. Yüzey kimyası, yüzey enerjisi ve mikro/nano ölçekli topografyanın birlikte düzenlenmesi, proteinlerin yüzeye taşınmasını, adsorpsiyon miktarını ve konformasyonel durumunu etkileyebilir. Bununla birlikte, biyomedikal açıdan başarılı bir süperhidrofobik yüzey için amaç her durumda minimum protein adsorpsiyonu elde etmek değil, **uygulamaya özgü biyolojik yanıtı sağlayacak kontrollü bir protein–yüzey etkileşimi** oluşturmaktır. Bu yaklaşım, süperhidrofobik yüzeylerin yalnızca fiziksel olarak su itici yapılar olarak değil, biyolojik olayların başlangıç aşamalarını yönlendirebilen fonksiyonel biyomalzeme arayüzleri olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir.

2.2. Hücre–Yüzey Etkileşimleri

Biyomedikal malzemelerin hücrelerle etkileşimi, bir yüzeyin biyolojik performansını belirleyen temel süreçlerden biridir. Bir implant, tıbbi cihaz veya doku mühendisliği iskelesi biyolojik ortamla temas ettiğinde, yüzeyin fizikokimyasal özellikleri hücrelerin yüzeye yaklaşmasını, tutunmasını, yayılmasını, proliferasyonunu ve farklılaşmasını etkileyebilmektedir. Süperhidrofobik yüzeylerde bu süreçler, yüzeyin düşük yüzey enerjisi ve yüksek su iticiliğinin yanı sıra mikro/nano ölçekli hiyerarşik topografya, yüzey kimyası ve biyolojik ortamda oluşan protein tabakası tarafından birlikte belirlenmektedir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin hücresel davranış üzerindeki etkisinin yalnızca temas açısı üzerinden değerlendirilmesi yeterli değildir [21].

Hücrelerin bir yüzeye doğrudan temas etmesinden önce yüzey üzerinde proteinler ve diğer biyomoleküllerden oluşan bir ara tabaka meydana gelmektedir. Bu biyomoleküler tabaka, hücrelerin yüzeyle doğrudan fiziksel temasından ziyade, hücre membranındaki reseptörlerin adsorbe olmuş proteinleri tanınması yoluyla hücre–yüzey etkileşimini yönlendirebilmektedir. Özellikle fibronektin, vitronektin ve kollajen gibi hücre adezyonunda rol oynayan proteinlerin yüzey üzerindeki miktarı, yönlenmesi ve konformasyonu hücrelerin tutunma davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Dolayısıyla süperhidrofobik bir yüzeyin hücrelerle etkileşimi, yüzeyin başlangıçtaki ıslanabilirliğinden ziyade biyolojik ortam içerisinde oluşan dinamik biyomoleküler ara yüzün özellikleri tarafından da şekillendirilmektedir [22].

Hücre adezyonunun ilk aşaması, hücrelerin yüzeye yaklaşması ve yüzey üzerinde geçici etkileşimler oluşturmalarıdır. Bunu takiben integrinler gibi hücre membranı reseptörleri aracılığıyla ekstraselüler matriks proteinlerinin tanınması ve daha kararlı adezyon noktalarının oluşması gerçekleşmektedir. Hücrenin yüzeye tutunmasıyla birlikte aktin sitoskeletonunun yeniden düzenlenmesi, hücrenin yayılması ve hücre-matriks adezyon komplekslerinin gelişmesi meydana gelir. Bu süreçlerin tamamı yüzeyin kimyasal bileşimi, topografyası, mekanik özellikleri ve ıslanabilirliği tarafından etkilenebilmektedir [23].

Süperhidrofobik yüzeylerin düşük yüzey enerjisi, hücrelerin yüzeye tutunmasını bazı koşullarda sınırlandırabilmektedir. Özellikle hücre adezyon proteinlerinin yüzeye yeterli miktarda ve biyolojik aktivitelerini koruyacak şekilde adsorbe olamaması, hücrelerin yüzey üzerinde yayılmasını azaltabilir. Bunun sonucunda hücreler daha yuvarlak bir morfoloji gösterebilir ve hücre–yüzey adezyonlarının sayısı azalabilir. Bu özellik, hücre tutunmasının istenmediği uygulamalarda avantaj sağlayabilir. Örneğin biyomedikal cihazların belirli bölgelerinde hücre birikiminin veya biyolojik kirlenmenin azaltılması hedefleniyorsa, düşük hücre adezyonuna sahip süperhidrofobik yüzeyler işlevsel bir yaklaşım sunabilir [4].

Bununla birlikte, hücre adezyonunun sınırlandırılması tüm biyomedikal uygulamalar açısından arzu edilen bir sonuç değildir. Özellikle implant yüzeylerinde, doku mühendisliği iskelelerinde ve rejeneratif tıp uygulamalarında hücrelerin kontrollü biçimde yüzeye tutunması, yayılması ve çoğalması çoğu zaman istenmektedir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin hücre adezyonunu azaltabilme özelliği, uygulamanın gereksinimine bağlı olarak bir avantaj veya dezavantaj haline gelebilir. Buradaki temel tasarım problemi, yüzeyin mümkün olan en yüksek hidrofobikliğe ulaşmasından ziyade, **hedeflenen hücresel yanıtı sağlayacak uygun yüzey özelliklerinin belirlenmesidir.**

Yüzey topografyası, süperhidrofobik yüzeylerin hücresel davranışını belirleyen bir diğer önemli parametredir. Mikro ve nano ölçekli yapıların boyutu, geometrisi, aralığı ve yönlenmesi, hücrelerin yüzey üzerinde oluşturduğu adezyon noktalarının dağılımını etkileyebilmektedir. Hücreler yalnızca yüzeyin kimyasal özelliklerini değil, aynı zamanda fiziksel topografyasını da algılayabilmektedir. Hücre membranındaki adezyon reseptörleri ve sitoskeletal yapılar, yüzeydeki mikro/nano ölçekli geometrik özelliklere karşı mekanik ve biyokimyasal yanıt oluşturabilir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerde hidrofobiklik ile topografyanın etkilerini birbirinden tamamen bağımsız olarak değerlendirmek çoğu zaman mümkün değildir [24].

Özellikle hiyerarşik mikro/nano yapıların kullanıldığı yüzeylerde, hücrelerin yüzeye temas ettiği gerçek alan ile makroskopik ölçekte belirlenen geometrik yüzey alanı arasında önemli farklılıklar oluşabilir. Hücrenin boyutu ile yüzey yapılarının karakteristik boyutları arasındaki ilişki, hücrenin yüzey üzerindeki tutunma noktalarını ve yayılma biçimini değiştirebilir. Örneğin daha büyük mikro yapılara sahip yüzeyler hücrenin belirli bölgelerde fiziksel olarak desteklenmesine olanak sağlarken, nanoskopik yapıların hücre membranı ve adezyon proteinleriyle etkileşimleri farklı mekanizmalar üzerinden gerçekleşebilir. Bu nedenle yüzey topografyasının tasarımında yalnızca süperhidrofobikliği artırmak değil, hücre boyutu ve hedeflenen hücresel yanıt da dikkate alınmalıdır [25, 26].

Süperhidrofobik yüzeylerin hücre davranışı üzerindeki etkisi hücre tipine bağlı olarak da değişebilmektedir. Fibroblastlar, osteoblastlar, endotelial hücreler, epitelyal hücreler ve kök hücreler gibi farklı hücre tipleri yüzey özelliklerine farklı duyarlılıklar gösterebilir. Örneğin kemik implantlarında osteoblastların yüzeye tutunması ve yeni kemik oluşumunu desteklemesi istenirken, kanla temas eden bazı cihazlarda hücre ve protein tutunmasının sınırlandırılması daha uygun olabilir. Bu nedenle tek bir “ideal” yüzey ıslanabilirliğinden söz etmek yerine, uygulamaya ve hücre tipine özgü yüzey tasarımı yaklaşımı benimsenmelidir [27].

Bu noktada **yüzey desenleme ve bölgesel ıslanabilirlik kontrolü** önemli bir strateji sunmaktadır. Süperhidrofobik ve hidrofilik bölgelerin aynı yüzey üzerinde kontrollü biçimde oluşturulması, hücrelerin belirli alanlarda tutulmasına veya belirli bölgelerden uzaklaştırılmasına olanak sağlayabilir. Bu tür heterojen yüzeyler, hücrelerin mekânsal organizasyonunun kontrol edilmesi, biyolojik sinyallerin belirli bölgelere yönlendirilmesi ve çok işlevli biyomedikal cihazların geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Böylece yüzeyin tamamının süperhidrofobik hale getirilmesi yerine, uygulamanın gerektirdiği bölgelerde farklı ıslanabilirlik özelliklerinin bir arada kullanılması mümkün olmaktadır.

Daha ileri bir yaklaşım ise hücre davranışını yalnızca statik yüzey özellikleriyle değil, **dinamik ve uyaranlara yanıt veren yüzeylerle** kontrol etmektir. Çevresel pH, sıcaklık, ışık, elektriksel uyarı veya mekanik etki gibi dış uyaranlara yanıt olarak yüzey ıslanabilirliğini değiştirebilen akıllı yüzeyler, hücrelerin yüzeye tutunma ve ayrılma davranışının kontrollü biçimde değiştirilmesine olanak sağlayabilir. Örneğin başlangıçta hücrelerin tutunmasını destekleyen daha hidrofilik bir yüzeyin, belirli bir uyaran sonrasında daha hidrofobik hale getirilmesiyle hücrelerin yüzeyden kontrollü olarak ayrılması teorik olarak mümkün olabilir. Bu yaklaşım, özellikle hücre kültürü, biyosensörler, rejeneratif tıp ve hücre temelli biyoteknolojik sistemlerde yeni uygulama olanakları sunmaktadır [28-30].

Bununla birlikte, süperhidrofobik yüzeylerin hücre davranış üzerindeki etkileri değerlendirilirken **yüzeyin uzun dönem kararlılığı** da dikkate alınmalıdır. Biyolojik ortamda protein birikimi, hücre materyalin yüzeyde birikmesi, mekanik aşınma ve mikro/nano yapıların deformasyonu, başlangıçta elde edilen süperhidrofobik karakterin zaman içerisinde değişmesine neden olabilir. Buna bağlı olarak hücrelerin yüzeye etkileşim biçimi de değişebilir. Bu durum, kısa süreli hücre kültürü deneylerinde elde edilen sonuçların uzun süreli implantasyon veya gerçek biyolojik ortam koşullarına doğrudan aktarılmasında dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir [2].

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeylerin hücre-yüzey etkileşimleri üzerindeki etkisi, basit biçimde “yüksek hidrofobiklik = düşük hücre adezyonu” şeklinde açıklanamayacak kadar karmaşıktır. **Yüzey kimyası, mikro/nano topografya, protein adsorpsiyonu, yüzeyin mekanik özellikleri ve biyolojik ortamın özellikleri** hücresel yanıtı birlikte belirlemektedir. Bu nedenle geleceğin biyomedikal süperhidrofobik yüzeylerinde temel hedef, yalnızca hücre adezyonunu azaltmak veya artırmak değil, **uygulamaya özgü hücresel davranışı kontrollü biçimde yönlendirebilen yüzeylerin geliştirilmesi** olacaktır. Bu yaklaşım, süperhidrofobik yüzeyleri pasif biyomalzeme yüzeylerinden, hücresel mikroçevreyi aktif biçimde düzenleyebilen fonksiyonel biyolojik arayüzlere dönüştürme potansiyeline sahiptir.

2.3. Bakteriyel Adezyon ve Biyofilm Oluşumu

Biyomedikal cihaz ve implantların biyolojik performansını sınırlayan en önemli sorunlardan biri, mikroorganizmaların yüzeye tutunması ve zaman içerisinde biyofilm oluşturmalarıdır. Özellikle kateterler, ortopedik ve dental implantlar, kardiyovasküler cihazlar ve diğer uzun süreli biyomedikal materyaller, vücut sıvıları ve dokularla sürekli temas halinde olduklarından mikrobiyal kolonizasyon açısından risk taşımaktadır. Bakterilerin bir yüzeye tutunması yalnızca yüzeyde mikroorganizmaların bulunması anlamına gelmemekte; yüzeye geri dönüşümsüz olarak bağlanmaları, çoğalmaları ve hücre dışı polimerik maddeler üretmeleri sonucunda karmaşık ve organize biyofilm yapısının gelişmesine zemin hazırlamaktadır. Oluşan biyofilmler, bakterilerin çevresel streslere ve antimikrobiyal ajanlara karşı toleransını artırarak enfeksiyonların kontrolünü güçleştirebilmektedir [31].

Bakteriyel adezyon, yüzey ile mikroorganizma arasındaki fizikokimyasal ve biyolojik etkileşimlerin bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Bakterilerin yüzeye ilk yaklaşması; elektrostatik kuvvetler, van der Waals etkileşimleri, hidrofobik etkileşimler ve sıvı ortamındaki hidrodinamik koşullar tarafından etkilenmektedir. İlk temasın ardından bakteriyel hücre yüzeyinde bulunan proteinler, polisakkaritler, fimbrial yapılar ve diğer adezyon bileşenleri yüzeye daha güçlü etkileşimler oluşturabilmektedir. Bu nedenle bakteriyel adezyon, tek bir mekanizma ile açıklanamayacak çok aşamalı ve dinamik bir süreçtir [31].

Bir biyomalzemenin **yüzey ıslanabilirliği**, bakteriyel adezyon davranışını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Süperhidrofobik yüzeylerde düşük yüzey enerjisi ve mikro/nano ölçekli hiyerarşik yapıların oluşturduğu düşük gerçek temas alanı, bakterilerin yüzeye etkileşimini bazı koşullarda sınırlandırabilmektedir. Özellikle Cassie–Baxter ıslanma durumunun kararlı olduğu yüzeylerde mikro/nano yapılar arasında hapsolan hava, katı yüzey ile bakteriyel hücre arasındaki doğrudan temas alanını azaltabilir. Böylece bakterilerin yüzeye ulaşması, yüzey üzerinde tutunması veya yüzeye yeterli sayıda güçlü adezyon noktası oluşturmaları zorlaşabilir [32].

Bununla birlikte, **bakteriyel adezyon ile yüzey hidrofobikliği arasındaki ilişki doğrusal değildir**. Bakterilerin kendi hücre yüzeyleri de farklı düzeylerde hidrofobik veya hidrofilik karakter gösterebilmekte ve bakteriyel türler arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü, topografik yapıların boyutu, yüzey kimyası, elektriksel yük ve biyolojik sıvının bileşimi gibi parametreler, ıslanabilirliğin etkisini değiştirebilmektedir. Bu nedenle yüksek temas açısına sahip her yüzeyin aynı ölçüde bakteriyel adezyon direnci göstereceği söylenemez [33].

Süperhidrofobik yüzeylerin bakteriyel adezyon üzerindeki etkisinin anlaşılmasında “yüzey topografyası” özel bir öneme sahiptir. Mikro/nano hiyerarşik yapılar, bakterilerin yüzey üzerinde temas edebileceği alanın geometrisini değiştirebilir. Yapıların yüksekliği, aralığı, şekli ve yönlmesi; bakterinin yüzeye fiziksel olarak yaklaşmasını ve tutunma noktalarının oluşmasını etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, uygun olmayan bir topografya bakterilerin yüzey yapıları arasındaki boşluklarda mekanik olarak korunmasına veya lokal olarak birikmesine de neden olabilir. Bu nedenle yalnızca yüzey pürüzlülüğünü artırmak yerine, topografyanın bakterinin boyutu ve morfolojisiyle olan ilişkisi dikkate alınmalıdır [34].

Süperhidrofobik yüzeylerde bakteriyel adezyonun azaltılmasında önemli mekanizmalardan biri, yüzey ile sıvı arasındaki temasın sınırlandırılmasıdır. Kararlı bir hava tabakasının yüzey üzerinde korunması, bakterilerin katı yüzeye doğrudan temasını azaltabilir. Bu özellik özellikle sıvı akışının bulunduğu sistemlerde önem kazanabilir. Bununla birlikte, biyolojik ortamda proteinler, lipidler ve diğer biyomoleküllerin yüzeye adsorbe olması, hava-sıvı ara yüzünün kararlılığını değiştirebilir. Benzer şekilde mekanik basınç, yüzey aşınması veya uzun süreli sıvı maruziyeti sonucunda yüzey mikro/nano yapıları arasındaki hava cepleri kaybolabilir. Böyle bir durumda yüzeyin Cassie–Baxter durumundan Wenzel benzeri bir ıslanma durumuna geçmesi ve buna bağlı olarak bakteriyel adezyon davranışının değişmesi mümkündür [35,36].

Bakteriyel adezyonun ilk aşamasının kontrol edilmesi, biyofilm oluşumunun önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bakteriler yüzeye yeterince güçlü biçimde tutunduktan sonra hücre dışı polimerik

maddeler üretmeye başlayarak yüzey üzerinde daha kararlı bir biyolojik yapı oluşturabilir. Bu matriks; polisakkaritler, proteinler, nükleik asitler ve diğer hücrel bileşenlerden oluşmakta ve bakterilerin yüzey üzerinde tutulmasını kolaylaştırmaktadır. Biyofilmin gelişmesiyle birlikte mikroorganizmalar dış çevresel koşullardan kısmen korunmakta ve antimikrobiyal ajanların etkisine karşı daha yüksek tolerans gösterebilmektedir. Bu nedenle yüzey tasarımında yalnızca başlangıçtaki bakteriyel tutunmanın azaltılması değil, tutunma sonrasında biyofilm gelişiminin de sınırlandırılması hedeflenmelidir [37].

Bu bağlamda süperhidrofobik yüzeyler ile **antifouling** ve **antimikrobiyal** yüzey kavramlarının birbirinden ayrılması önemlidir. Antifouling bir yüzey, proteinler, hücreler veya mikroorganizmalar gibi biyolojik bileşenlerin yüzeye tutunmasını sınırlandırmayı amaçlarken, antimikrobiyal bir yüzey bakterilerin canlılığını doğrudan azaltmayı veya ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Süperhidrofobik yüzeyler çoğunlukla pasif bir fiziksel bariyer oluşturarak bakteriyel temas ve adezyonu azaltma potansiyeline sahiptir. Buna karşılık yüzeye antibakteriyel nanopartiküller, metal iyonları, fotokatalitik bileşenler veya diğer aktif ajanların eklenmesi, yüzeye doğrudan mikrobiyal öldürücü özellik kazandırabilir. Böylece fiziksel adezyon direnci ile aktif antimikrobiyal mekanizma aynı yüzey tasarımında birleştirilebilir [38].

Süperhidrofobik–antimikrobiyal hibrit yüzeyler**, özellikle enfeksiyon riskinin yüksek olduğu biyomedikal uygulamalar açısından dikkat çekici bir yaklaşım oluşturmaktadır. Bu tür yüzeylerde süperhidrofobik mikro/nano topografya bakterilerin yüzeye ulaşmasını ve tutunmasını sınırlandırırken, yüzeye dahil edilen antimikrobiyal bileşenler tutunmayı başaran mikroorganizmaların canlılığını azaltabilir. Bununla birlikte, aktif antimikrobiyal ajanların kullanımı biyoyumluluk, sitotoksite, ajan salınımının kontrolü ve uzun dönem stabilite açısından ayrıca değerlendirilmelidir. Özellikle nanopartiküllerin veya metal iyonlarının biyolojik ortama kontrolsüz biçimde salınması, hedeflenen antimikrobiyal etkinin yanında istenmeyen biyolojik yanıtların ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle geleceğin yüzey tasarımlarında yalnızca yüksek antibakteriyel etkinlik değil, aynı zamanda kontrollü ve güvenli biyolojik etkileşim hedeflenmelidir [38].

Bakteriyel adezyonun değerlendirilmesinde deneysel koşulların da önemli olduğu unutulmamalıdır. Statik temas açısı ölçümleri, bakteriyel adezyon testleri, canlı/ölü bakteri analizleri ve biyofilm miktarının belirlenmesine yönelik yöntemler farklı biyolojik süreçleri değerlendirmektedir. Ayrıca kullanılan bakteri türü, kültür ortamı, inkübasyon süresi, sıvı akış koşulları, protein içeriği ve yüzeyin ön koşullandırılması gibi deneysel parametreler sonuçları önemli ölçüde değiştirebilir. Bu nedenle farklı çalışmaların sonuçlarının yalnızca temas açısı veya yüzey pürüzlülüğü gibi tek bir parametre üzerinden karşılaştırılması yanıltıcı olabilir [39].

Biyomedikal uygulamalarda daha başarılı bir yaklaşım, bakteriyel adezyon, biyofilm oluşumu ve yüzeyin uzun dönem stabilitesinin birlikte değerlendirilmesidir. Özellikle implant veya cihaz yüzeylerinde başlangıçta yüksek süperhidrofobiklik elde edilmesine rağmen zaman içerisinde yüzeyin proteinlerle kaplanması, mekanik aşınması veya nano/mikroyapıların bozulması, antibakteriyel performansın azalmasına yol açabilir. Bu nedenle **mekanik olarak dayanıklı, biyolojik ortamda ıslanabilirlik özelliklerini koruyabilen ve aynı zamanda antibakteriyel/antifouling fonksiyonlarını sürdürebilen çok işlevli yüzeylerin geliştirilmesi** önemli bir araştırma hedefidir [40-42].

Gelecekte bu yaklaşımın, statik süperhidrofobik yüzeylerden dinamik ve uyaranlara yanıt verebilen antibakteriyel yüzeylere doğru gelişmesi beklenmektedir. Örneğin çevresel koşullardaki değişimlere bağlı olarak ıslanabilirliğini değiştirebilen veya kontrollü biçimde antimikrobiyal ajan salıyabilen yüzeyler, bakteriyel kolonizasyonun farklı aşamalarına müdahale edilmesini sağlayabilir. Benzer şekilde, hidrofilik ve süperhidrofobik bölgelerin mikro/nano ölçekte desenlenmesi, bakterilerin belirli bölgelerde toplanmasının veya biyofilm gelişiminin mekânsal olarak kontrol edilmesinde kullanılabilir. Bu tür yaklaşımlar, süperhidrofobik yüzeylerin yalnızca pasif bir bariyer olarak değil, biyolojik kolonizasyonu aktif biçimde yöneten fonksiyonel bir arayüz olarak tasarlanmasına olanak sağlayabilir.

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeylerin bakteriyel adezyon ve biyofilm oluşumunu sınırlandırma potansiyeli; düşük yüzey enerjisi, azaltılmış gerçek temas alanı, hiyerarşik mikro/nano topografya ve kararlı hava-sıvı ara yüzü gibi birbirleriyle ilişkili mekanizmaların bir sonucu olarak ortaya çıkabilmektedir. Ancak bu etkinin yüzeyin kimyasal ve geometrik özellikleri, bakteriyel tür, biyolojik ortam ve maruziyet koşullarına güçlü biçimde bağlı olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle ****süperhidrofobiklik tek başına antibakteriyel bir özellik olarak değerlendirilmemeli; bakteriyel adezyon ve biyofilm oluşumunun kontrolü, yüzey kimyası, topografya, biyoyumluluk, mekanik dayanıklılık ve uzun dönem stabilite ile birlikte ele alınmalıdır.**** Bu bütüncül yaklaşım, enfeksiyon riskini azaltmaya yönelik yeni nesil biyomedikal yüzeylerin geliştirilmesinde temel tasarım prensiplerinden biri olacaktır.

2.4. Kan-Yüzey Etkileşimleri ve Hemokompatibilite

Kan ile doğrudan veya dolaylı olarak temas eden biyomedikal cihazların güvenli ve uzun süreli kullanımı, yüzey özelliklerinin kan bileşenleriyle etkileşiminin kontrol edilmesine bağlıdır. Kateterler, vasküler greftler, stentler, kalp kapakları, kan pompaları, ekstrakorporeal dolaşım sistemleri ve çeşitli biyosensörler gibi birçok tıbbi cihaz, kullanım sırasında kanla temas etmektedir. Bu tür sistemlerde yüzey ile kan arasındaki etkileşim; protein adsorpsiyonu, trombosit adezyonu ve aktivasyonu, koagülasyon sistemi, eritrosit ve lökosit etkileşimleri ile inflamatuvar yanıt gibi birbiriyle ilişkili biyolojik süreçleri başlatabilmektedir. Bu nedenle kanla temas eden bir biyomalzemenin yalnızca fiziksel ve mekanik özellikleri değil, aynı zamanda **hemokompatibilitesi**, yani kan bileşenleriyle istenmeyen biyolojik etkileşimleri mümkün olduğunca sınırlandırabilme kapasitesi de dikkate alınmalıdır [43].

Kan-yüzey etkileşiminin ilk aşamalarından biri, kan plazmasında bulunan proteinlerin yüzeye adsorbe olmasıdır. Albümin, fibrinojen, immünoglobulinler ve diğer plazma proteinleri yüzeye temas ettikten sonra yüzeyin fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak farklı miktarlarda adsorbe olabilir. Daha önce belirtildiği gibi, adsorpsiyon yalnızca yüzeyde bir protein tabakasının oluşması anlamına gelmemekte; proteinlerin yüzey üzerindeki konformasyonu ve biyolojik aktivitelerinin değişmesi de önem taşımaktadır. Özellikle fibrinojen gibi koagülasyon ve trombosit etkileşimlerinde rol oynayan proteinlerin yüzey üzerindeki davranışı, sonraki kan uyumluluğu süreçleri açısından kritik hale gelmektedir [43].

Protein adsorpsiyonunun ardından trombositlerin yüzeye yaklaşması, tutunması ve aktive olması hemokompatibilite açısından önemli bir aşamadır. Trombositlerin yüzey üzerinde aktive olması, şekil değişiklikleri ve çeşitli biyolojik moleküllerin salınımı ile birlikte gerçekleşebilmekte ve koagülasyon süreçlerini tetikleyebilmektedir. Yüzey üzerinde yoğun trombosit birikimi ve aktivasyonu, fibrin oluşumu ile birlikte trombus gelişimine neden olabilir. Bu nedenle kanla temas eden biyomalzemelerde amaç, yalnızca protein adsorpsiyonunu azaltmak değil, aynı zamanda adsorbe olan proteinlerin trombojenik bir biyolojik yanıt oluşturmamasını da sınırlandırmaktır [43].

Süperhidrofobik yüzeyler, düşük yüzey enerjileri ve mikro/nano ölçekli hiyerarşik yapıları nedeniyle kan-yüzey etkileşimlerinin kontrol edilmesi açısından ilgi çekici bir yaklaşım sunmaktadır. Yüzey üzerinde oluşturulan mikro/nano yapılar, sıvının gerçek temas alanını azaltarak kan bileşenlerinin katı yüzeye doğrudan etkileşimini sınırlandırabilir. Özellikle kararlı Cassie-Baxter ıslanma durumunda mikro/nano yapılar arasında hapsolan hava, kanın yüzeye temas ettiği alanı azaltabilir ve böylece proteinlerin, hücrelerin veya trombositlerin yüzeye ulaşmasını fiziksel olarak zorlaştırabilir. Bu mekanizma, süperhidrofobik yüzeylerin antifouling ve potansiyel olarak antitrombojenik özellikler geliştirmesinde temel yaklaşımlardan biri olarak değerlendirilmektedir [44].

Bununla birlikte, kan gibi karmaşık biyolojik sıvılarda süperhidrofobik durumun korunması önemli bir tasarım problemidir. Kanın içerdiği proteinler, lipidler ve hücresel bileşenler yüzey üzerinde birikerek başlangıçtaki yüzey özelliklerini değiştirebilir. Ayrıca kan akışı sırasında oluşan basınç ve kesme gerilmeleri, mikro/nano yapılar arasındaki hava ceplerinin kararlılığını etkileyebilir. Hava tabakasının

kısmen veya tamamen kaybolmasıyla sıvının yüzey yapıları arasındaki boşluklara nüfuz etmesi mümkün hale gelebilir. Bu durumda yüzeyin başlangıçtaki Cassie–Baxter durumundan daha fazla ıslanmış bir duruma geçmesi ve buna bağlı olarak protein ve hücre etkileşimlerinin artması söz konusu olabilir [44].

Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin hemokompatibilitesini değerlendirirken yalnızca başlangıçtaki statik su temas açısının dikkate alınması yeterli değildir. **Kan altında ıslanabilirlik kararlılığı, dinamik temas açısı, yüzeyin mekanik dayanıklılığı, protein adsorpsiyonu, trombosit adezyonu ve aktivasyonu, hemoliz ve koagülasyon yanıtı** birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle uzun süreli kan temasının söz konusu olduğu uygulamalarda yüzeyin ilk günlerdeki performansı kadar, zaman içerisinde özelliklerini koruyabilmesi de önem taşımaktadır.

Süperhidrofobik yüzeylerin hemokompatibilitesini belirleyen önemli parametrelerden biri de **yüzey topografyasıdır**. Mikro ve nano yapıların geometrisi, trombositlerin yüzeye temas edeceği alanı ve proteinlerin yüzey üzerinde organize olma biçimini değiştirebilir. Bununla birlikte, çok yüksek yüzey pürüzlülüğünün her durumda olumlu sonuç vermesi beklenmemelidir. Uygun olmayan mikro/nano yapılar kan bileşenlerinin yüzeyde mekanik olarak tutulmasına veya lokal akış koşullarının değişmesine neden olabilir. Bu nedenle yüzey topografyasının tasarımı, yalnızca temas açısını artırmaya yönelik değil, kan akışı ve hücresel bileşenlerin boyutları da dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir [44].

Kanla temas eden sistemlerde yüzey kimyası ile topografyanın birlikte **tasarlanması** bu nedenle büyük önem taşımaktadır. Düşük yüzey enerjili bir kimyasal yapı, mikro/nano hiyerarşik topografya ile birleştirilerek yüzeyin sıvı iticiliği artırılabilir. Bununla birlikte, hemokompatibilitenin yalnızca hidrofobiklik derecesiyle açıklanamayacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bazı durumlarda proteinlerin yüzey üzerindeki miktarından çok, adsorbe olan proteinlerin konformasyonu ve biyolojik aktivitesi kan yanıtını belirleyebilmektedir. Bu nedenle geleceğin yüzey tasarımlarında yüzey enerjisi, ıslanabilirlik, protein–yüzey etkileşimi ve hücresel yanıtın birlikte optimize edilmesi gerekmektedir [44].

Bu bağlamda **süperhidrofobik–antifouling hibrit yüzeyler**, kanla temas eden biyomedikal cihazlar için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Süperhidrofobik yapı, kan bileşenlerinin yüzeye fiziksel temasını sınırlandırırken; antifouling özellik sağlayan polimerik veya biyomimetik yüzey bileşenleri protein ve hücre birikimini azaltmaya katkıda bulunabilir. Benzer şekilde, antitrombojenik biyomoleküllerin veya kontrollü biyolojik fonksiyon gösteren yüzey bileşenlerinin süperhidrofobik yapılarla birleştirilmesi, yüzeyin yalnızca pasif bir sıvı bariyeri olmaktan çıkarak daha işlevsel bir kan–malzeme arayüzüne dönüşmesini sağlayabilir [45].

Özellikle vasküler uygulamalarda kan akışının dinamik yapısı nedeniyle yüzeyin **mekanik ve hidrodinamik kararlılığı** kritik öneme sahiptir. Sürekli kan akışı altında yüzey mikro/nano yapılarının aşınması veya deformasyonu, süperhidrofobik davranışın zamanla azalmasına neden olabilir. Ayrıca yüzeyin pürüzlülüğünün ve geometrisinin kan akışını lokal olarak değiştirmesi, istenmeyen hücresel veya trombotik süreçleri etkileyebilir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin biyomedikal cihazlara entegrasyonunda yüzey özellikleri ile cihazın çalışma koşulları birlikte değerlendirilmelidir [45].

Hemokompatibilitenin değerlendirilmesi de çok parametrelili bir yaklaşım gerektirmektedir. Protein adsorpsiyonu, trombosit adezyonu ve aktivasyonu, koagülasyon zamanı, fibrin oluşumu, hemoliz ve kompleman aktivasyonu gibi farklı biyolojik göstergeler, yüzeyin kanla uyumluluğu hakkında birbirini tamamlayan bilgiler sağlamaktadır. Örneğin düşük protein adsorpsiyonu gösteren bir yüzeyin mutlaka düşük trombosit aktivasyonuna sahip olması beklenmeyebilir. Benzer şekilde, başlangıçta yüksek süperhidrofobiklik gösteren bir yüzey, uzun süreli kan temasından sonra yüzey kontaminasyonu veya topografik bozulma nedeniyle farklı bir biyolojik yanıt oluşturabilir. Bu nedenle hemokompatibilite değerlendirmelerinde tek bir parametreye dayalı sonuçlardan kaçınılmalıdır.

Süperhidrofobik yüzeylerin kanla etkileşimlerinde önemli bir diğer konu, **hemoliz** olarak tanımlanan eritrositlerin hasar görmesi ve hemoglobinin açığa çıkmasıdır. Yüzey kimyası ve topografyasının yanı sıra cihaz geometrisi ve akış koşulları eritrositlerin yüzeye ve birbirleriyle etkileşimlerini etkileyebilir. Özellikle yüksek kesme gerilmelerinin bulunduğu kan pompası ve ekstrakorporeal dolaşım sistemleri gibi uygulamalarda yüzey tasarımının yalnızca trombosit ve protein etkileşimleri açısından değil, eritrosit bütünlüğü açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir [46].

Bu açıdan bakıldığında, süperhidrofobik yüzeylerin hemokompatibilite alanındaki potansiyeli, yüksek temas açısı elde edilmesinden çok daha geniş bir çerçevede ele alınmalıdır. İdeal bir kanla temas eden yüzey; protein adsorpsiyonunu, trombosit adezyonunu ve aktivasyonunu, koagülasyon süreçlerini ve hücresel hasarı mümkün olduğunca sınırlandırırken, uzun süreli kullanım sırasında mekanik ve kimyasal özelliklerini koruyabilmelidir. Bu hedef ise yalnızca süperhidrofobiklik ile değil, **antifouling, antitrombojenik, mekanik olarak dayanıklı ve biyolojik olarak güvenli yüzey fonksiyonlarının birlikte tasarlanmasıyla** gerçekleştirilebilir.

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeyler kan-malzeme etkileşimlerinin kontrol edilmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak bu potansiyelin gerçek biyomedikal uygulamalara aktarılabilmesi için yüzeyin yalnızca başlangıçtaki ıslanabilirlik özelliklerinin değil, biyolojik ortam içerisindeki uzun dönem davranışının da dikkate alınması gerekmektedir. **Kanla temas eden süperhidrofobik yüzeylerin gelecekteki tasarımında temel hedef, statik bir su iticilik özelliği oluşturmak yerine, protein adsorpsiyonu, trombosit aktivasyonu, koagülasyon ve hücresel yanıtı kontrollü biçimde düzenleyebilen dinamik ve çok işlevli biyolojik arayüzlerin geliştirilmesi olacaktır.**

3. Biyomedikal Uygulamalarda Süperhidrofobik Yüzeyler

Süperhidrofobik yüzeylerin biyomedikal alandaki uygulama potansiyeli, yüzeyin yalnızca yüksek su iticiliğinden değil, sıvı-yüzey etkileşimlerinin, biyomoleküler adsorpsiyonun, hücresel davranışın ve mikrobiyal kolonizasyonun kontrol edilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Önceki bölümlerde ele alındığı üzere, yüzey kimyası, mikro/nano ölçekli topografya ve yüzeyin ıslanabilirlik özellikleri; protein adsorpsiyonu, hücre adezyonu, bakteriyel tutunma ve kan-yüzey etkileşimleri gibi biyolojik süreçleri etkileyebilmektedir. Bu özellikler, süperhidrofobik yüzeyleri implantlar ve tıbbi cihazlar açısından potansiyel olarak işlevsel bir yüzey mühendisliği yaklaşımı haline getirmektedir [1].

Biyomedikal uygulamalarda süperhidrofobik yüzeylerden beklenen temel fonksiyonlar uygulamanın türüne göre değişmektedir. Bazı sistemlerde amaç bakteriyel adezyonu ve biyofilm oluşumunu azaltmak iken, kanla temas eden cihazlarda protein ve trombosit etkileşimlerinin sınırlandırılması ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık doku ile bütünleşmesi beklenen implantlarda hücre adezyonu ve doku oluşumunun desteklenmesi gerekebilir. Bu nedenle tüm biyomedikal cihazlar için tek bir ideal süperhidrofobik yüzey tasarımından söz etmek mümkün değildir. Yüzey özelliklerinin, cihazın biyolojik ortamı, kullanım süresi, mekanik yükleri ve hedeflenen biyolojik yanıtı dikkate alınarak uygulamaya özgü biçimde tasarlanması gerekmektedir [1].

3.1. İmplant ve Tıbbi Cihaz Yüzeyleri

İmplant ve tıbbi cihazların yüzeyleri, malzemenin biyolojik ortamla doğrudan etkileşime girdiği kritik ara yüzlerdir. İmplantın veya cihazın hacimsel özellikleri mekanik performansı belirlerken, yüzey özellikleri büyük ölçüde biyolojik yanıtı şekillendirmektedir. Bu nedenle yüzey mühendisliği, biyomalzemelerin fonksiyonel performansının geliştirilmesinde temel yaklaşımlardan biri haline gelmiştir. Süperhidrofobik yüzeyler ise düşük yüzey enerjileri, azaltılmış sıvı-katı temas alanı ve mikro/nano ölçekli hiyerarşik yapıları sayesinde implant ve cihaz yüzeylerinde biyolojik kirlenme, bakteriyel kolonizasyon ve istenmeyen biyomoleküler etkileşimlerin azaltılması açısından araştırılmaktadır [47].

3.1.1. Ortopedik ve Dental İmplantlar

Ortopedik ve dental implantların uzun dönem başarısında yüzey özellikleri kritik bir rol oynamaktadır. İmplant yüzeyinin çevresindeki biyolojik ortamla etkileşimi; protein adsorpsiyonu, hücre adezyonu, inflamatuvar yanıt, bakteriyel kolonizasyon ve yeni doku oluşumu gibi birbirini takip eden süreçleri etkileyebilmektedir. Özellikle implantasyon sonrasında yüzeyin bakteriler tarafından kolonize edilmesi, biyofilm oluşumu ve buna bağlı enfeksiyonlar implant başarısını tehdit eden önemli sorunlar arasında yer almaktadır [48].

Süperhidrofobik yüzeyler bu açıdan, bakterilerin implant yüzeyine ilk tutunmasını sınırlandırmaya yönelik pasif bir yüzey mühendisliği yaklaşımı sunabilmektedir. Mikro/nano ölçekli hiyerarşik yapıların oluşturduğu düşük gerçek temas alanı ve yüzeyde kararlı hava ceplerinin bulunması, bakterilerin katı yüzeyle doğrudan temasını azaltabilir. Bu özellik özellikle implantın erken döneminde bakteriyel kolonizasyonun sınırlandırılması açısından potansiyel bir avantaj sağlayabilir. Bununla birlikte, ortopedik ve dental implantlarda enfeksiyonun önlenmesi tek başına yeterli değildir; implantın çevre dokuyla uygun biçimde bütünleşmesi ve gerekli hücresel yanıtın oluşturulması da gerekmektedir [49].

Bu durum süperhidrofobik implant yüzeyleri açısından önemli bir tasarım paradoksu ortaya çıkarmaktadır. Bakteriyel adezyonun azaltılması çoğu zaman düşük hücre adezyonu ile aynı yönde gerçekleşebilirken, implantın kemik veya yumuşak doku ile bütünleşebilmesi için belirli düzeyde hücre tutunması ve proliferasyonu gerekebilir. Özellikle osteointegrasyonun hedeflendiği dental ve ortopedik implantlarda, yüzeyin tamamen hücre-repellent hale getirilmesi istenmeyebilir. Bu nedenle implant yüzeylerinde süperhidrofobikliğin doğrudan maksimum düzeye çıkarılması yerine, bakteriyel kolonizasyonu sınırlandırırken hedeflenen doku yanıtını koruyabilecek dengeli bir yüzey tasarımı daha uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [49].

Bu amaçla süperhidrofobik özelliklerin yüzeyin yalnızca belirli bölgelerinde oluşturulması veya hidrofilik ve süperhidrofobik bölgelerin birlikte kullanılması önemli bir strateji sunmaktadır. Örneğin bakteriyel kolonizasyon riskinin yüksek olduğu bölgelerde düşük adezyon sağlayan süperhidrofobik özellikler kullanılırken, hücrelerin ve dokunun implantla etkileşmesi istenen bölgelerde daha uygun ıslanabilirlik ve yüzey kimyası sağlanabilir. Böyle bir mekânsal yüzey tasarımı, implantın farklı bölgelerinden beklenen biyolojik işlevlerin birbirinden bağımsız biçimde optimize edilmesine olanak sağlayabilir.

Dental implantlarda bu yaklaşım özellikle önemlidir. Ağız boşluğu, bakteriler, proteinler, tükürük bileşenleri ve mekanik kuvvetler açısından son derece karmaşık bir biyolojik ortamdır. İmplant yüzeyinde oluşabilecek biyofilm, peri-implant dokularda inflamatuvar süreçlerin gelişmesine katkıda bulunabilir. Süperhidrofobik yüzeyler bakteriyel tutunmayı ve biyofilm gelişimini sınırlandırma potansiyeline sahip olmakla birlikte, çiğneme kuvvetleri ve sürekli mekanik temas nedeniyle yüzey mikro/nano yapılarının uzun dönem stabilitesi önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle dental implantlarda süperhidrofobik yüzey tasarımı, antibakteriyel etkinlik ile mekanik dayanıklılığın birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Ortopedik implantlarda ise yüzey tasarımının mekanik yük taşıma ve kemik–implant etkileşimi ile birlikte değerlendirilmesi gerekir. Yüzeyin mikro/nano topografyası osteoblastların davranışını etkileyebilirken, aşırı su itici özellikler hücrelerin yüzeye tutunmasını sınırlayabilir. Bu nedenle osteointegrasyonun kritik olduğu uygulamalarda süperhidrofobik yüzeyler, tek başına bir hedef olmaktan ziyade belirli bölgelerde veya diğer biyofonksiyonel yüzey özellikleriyle birlikte kullanılacak tamamlayıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir [50].

3.1.2. Kateterler ve Kanla Temas Eden Tıbbi Cihazlar

Kateterler, damar içi sistemler ve kanla temas eden diğer tıbbi cihazlarda temel yüzey problemlerinden biri biyolojik kirlenme ve mikrobiyal kolonizasyondur. Kateter yüzeyine proteinlerin ve hücrelerin

adsorbe olması, yüzeyde mikroorganizmaların tutunmasını kolaylaştırabilir. Zaman içerisinde gelişen biyofilm ise cihaz kaynaklı enfeksiyonların ortaya çıkmasına katkıda bulunabilir. Bu nedenle kateter ve benzeri cihazların yüzeylerinde hem bakteriyel adezyonun hem de biyolojik kirlenmenin azaltılması önemli bir tasarım hedefidir [51-53].

Süperhidrofobik yüzeylerin düşük gerçek temas alanı ve sıvı itici karakteri, kateter yüzeylerinin biyolojik bileşenlerle etkileşimini sınırlandırmak açısından potansiyel sunmaktadır. Özellikle sıvı akışının bulunduğu kateterlerde yüzeyin düşük adezyon karakteri, protein ve mikrobiyal birikimin azaltılmasına katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, kateterlerin esnek yapısı ve kullanım sırasında maruz kaldıkları bükülme, sürtünme ve mekanik deformasyonlar, mikro/nano yüzey yapılarının bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle kateter uygulamalarında süperhidrofobik yüzeylerin mekanik esnekliği ve tekrarlanan deformasyonlar altındaki performansı kritik önem taşımaktadır.

Kanla temas eden cihazlarda ise yüzey tasarımının bir diğer temel amacı trombosit aktivasyonu ve trombüs oluşumunun sınırlandırılmasıdır. Süperhidrofobik yapıların kanın katı yüzeyle temasını azaltması, uygun koşullarda protein ve trombosit etkileşimlerini sınırlama potansiyeline sahiptir. Ancak kan akışı altında hava-sıvı ara yüzünün kararlılığı, yüzeyin mikro/nano yapılarının mekanik dayanıklılığı ve kan proteinlerinin yüzey üzerinde birikmesi, bu etkinin uzun süre devam edip etmeyeceğini belirleyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle kanla temas eden cihazlarda süperhidrofobiklik, antifouling ve antitrombojenik yüzey özellikleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

3.1.3. Kardiyovasküler Cihazlar

Kardiyovasküler sistemde kullanılan stentler, vasküler greftler, kalp kapakları ve kan pompaları gibi cihazlar, kan ile sürekli veya tekrarlayan biçimde temas etmektedir. Bu sistemlerde yüzey-kan etkileşiminin kontrolü, trombüs oluşumunun ve cihaz kaynaklı komplikasyonların azaltılması açısından önemlidir. Süperhidrofobik yüzeyler, düşük sıvı-katı temas alanı sayesinde kan bileşenlerinin yüzeye tutunmasını sınırlandırmaya yönelik bir yaklaşım olarak araştırılmaktadır [54].

Bununla birlikte, kardiyovasküler uygulamalar süperhidrofobik yüzeyler açısından özellikle zorlu çalışma koşulları oluşturmaktadır. Yüksek ve değişken akış hızları, kesme gerilmeleri, basınç değişimleri ve sürekli mekanik hareketler yüzeyin mikro/nano yapısının ve hapsolmuş hava tabakasının stabilitesini etkileyebilir. Bu nedenle laboratuvar koşullarında elde edilen yüksek temas açısının doğrudan gerçek vasküler ortam performansına karşılık geleceği varsayılmamalıdır. Kardiyovasküler cihazlarda yüzeyin hidrofobik karakteri kadar, kan akışı altındaki mekanik ve hidrodinamik davranışı da dikkate alınmalıdır [55].

3.1.4. Tıbbi Cihazlarda Biyolojik Kirlenmenin Kontrolü

Süperhidrofobik yüzeylerin implant ve tıbbi cihazlardaki bir diğer potansiyel kullanım alanı, genel olarak biyolojik kirlenmenin (biofouling) azaltılmasıdır. Proteinler, lipidler, hücreler ve mikroorganizmalar yüzeye birikerek cihazın fiziksel ve biyolojik performansını zaman içerisinde değiştirebilir. Bu durum özellikle sensörlerin algılama doğruluğu, kateterlerin yüzey özellikleri ve implantların biyolojik performansı açısından önem taşımaktadır [56].

Süperhidrofobik yüzeylerde sıvı-katı temasının azaltılması, biyolojik bileşenlerin yüzeye ulaşmasını ve yüzey üzerinde kalıcı olarak birikmesini sınırlandırabilir. Ancak biyolojik sıvıların yüzey üzerinde oluşturduğu protein ve hücre tabakası, zaman içerisinde süperhidrofobik davranışın azalmasına yol açabilir. Dolayısıyla süperhidrofobik yüzeylerin biyofouling direnci, başlangıçtaki temas açısı yerine biyolojik ortamda uzun süreli fonksiyonel stabilite açısından değerlendirilmelidir [57].

Bu nedenle gelecekte implant ve tıbbi cihaz yüzeylerinde yalnızca süperhidrofobiklik değil, birden fazla fonksiyonun aynı yüzeyde bir araya getirilmesi beklenmektedir. Süperhidrofobik özelliklerin

antibakteriyel, antifouling, antitrombojenik ve gerektiğinde doku-uyumlu özelliklerle bütünleştirilmesi, uygulamaya özgü çok işlevli yüzeylerin geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Böylece yüzey, tek bir biyolojik süreci kontrol eden pasif bir bariyer olmaktan çıkarak, cihazın kullanım amacına göre farklı biyolojik etkileşimleri aynı anda düzenleyebilen fonksiyonel bir arayüz haline gelebilir [57].

Sonuç olarak, implant ve tıbbi cihazlarda süperhidrofobik yüzeylerin temel potansiyeli, biyolojik ortam ile malzeme arasındaki etkileşimlerin fiziksel olarak sınırlandırılabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, her uygulamada hedeflenen biyolojik yanıt farklı olduğundan, süperhidrofobikliğin maksimum düzeye çıkarılması evrensel bir çözüm değildir. Özellikle doku bütünleşmesinin gerekli olduğu implantlarda hücre adezyonu ile bakteriyel adezyon arasında, kanla temas eden cihazlarda ise sıvı iticilik ile uzun dönem yüzey kararlılığı arasında uygun bir denge kurulmalıdır. Bu nedenle geleceğin implant ve tıbbi cihaz yüzeylerinin, uygulamaya özgü, çok işlevli, mekanik olarak dayanıklı ve biyolojik ortamda uzun süreli performansını koruyabilen yüzey platformları olarak tasarlanması gerekmektedir. Tablo 3.1’de farklı biyomedikal uygulamalara yönelik temel problem ve süperhidrofobikliğin potansiyeli açıklanmıştır.

Tablo 3.1. Farklı biyomedikal uygulamalara yönelik temel problem ve süperhidrofobikliğin potansiyeli

Uygulama	Temel problem	Süperhidrofobikliğin potansiyel rolü
Dental implant	Biyofilm/peri-implant enfeksiyonları	Bakteriyel adezyonu azaltma
Ortopedik implant	Enfeksiyon + osteointegrasyon dengesi	Bakteri tutunmasını azaltırken hücresel yanıtı kontrol etme
Kateter	Biofouling + enfeksiyon	Protein/bakteri tutunmasını sınırlandırma
Vasküler cihaz	Trombosit/koagülasyon	Kan-yüzey temasını azaltma
Kardiyovasküler cihaz	Trombüs + mekanik yük	Antifouling/antitrombojenik yüzey oluşturma

3.2. Biyosensörler ve Tanı Sistemleri

Biyosensörler ve biyomedikal tanı sistemleri, biyolojik bir analitin seçici olarak tanınmasını ve bu etkileşimin ölçülebilir bir sinyale dönüştürülmesini sağlayan sistemlerdir. Proteinler, nükleik asitler, antijenler, antikolar, enzimler, hücreler ve mikroorganizmalar gibi farklı biyolojik hedeflerin tespitinde kullanılan bu sistemlerde, sensör yüzeyinin fizikokimyasal özellikleri analiz performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Özellikle küçük hacimlerde çalışılan mikro ve nanosistemlerde yüzey-sıvı etkileşimlerinin kontrol edilmesi; analitin taşınması, yüzeyde birikmesi, hedef molekülün tanınması ve sinyal/gürültü oranının iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda süperhidrofobik yüzeyler, yalnızca biyolojik kirlenmeyi sınırlandıran yüzeyler olarak değil, aynı zamanda sıvıların ve biyolojik moleküllerin yüzey üzerindeki davranışını kontrol edebilen fonksiyonel platformlar olarak değerlendirilmektedir [58].

Biyosensörlerde yüzeyin en önemli gereksinimlerinden biri, hedef analitin sensörün aktif bölgesine etkili biçimde ulaştırılması ve hedef dışı biyolojik bileşenlerin sensör yüzeyine bağlanmasının mümkün olduğunca azaltılmasıdır. Özellikle kan, serum, tükürük veya diğer karmaşık biyolojik örneklerle çalışan sistemlerde çok sayıda protein ve biyomolekül sensör yüzeyine adsorbe olabilir. Bu durum, hedef analitin bağlanma bölgelerini maskeleyerek sensörün duyarlılığını azaltabilir ve arka plan sinyalini artırabilir. Dolayısıyla biyosensör yüzeylerinde antifouling davranış ile hedef molekülün seçici olarak yakalanması arasında uygun bir denge kurulması gerekmektedir [58].

Süperhidrofobik yüzeylerin bu bağlamdaki potansiyeli, düşük yüzey enerjisi ve azaltılmış gerçek sıvı-katı temas alanından kaynaklanmaktadır. Hiyerarşik mikro/nano yapıların oluşturduğu yüzey morfolojisi, biyolojik sıvıların yüzeye temasını sınırlandırarak proteinlerin ve diğer hedef dışı bileşenlerin yüzeyde birikmesini azaltabilir. Kararlı bir Cassie-Baxter ıslanma durumunda, yüzey yapıları arasında hapsolan hava sıvının katı yüzeye temasını sınırlar ve böylece biyolojik kirlenmeye

karşı fiziksel bir bariyer oluşturabilir. Bu özellik, özellikle sensörün uzun süreli veya tekrar eden ölçümlerde kullanılması durumunda önemli bir avantaj sağlayabilir [58].

Ancak biyosensörlerde süperhidrofobikliğin önemli bir sınırlaması bulunmaktadır. Sensörün hedef analiti tespit edebilmesi için analitin belirli bir bölgeye ulaşması ve burada tanıma elemanlarıyla etkileşmesi gerekmektedir. Çok yüksek ve homojen bir süperhidrofobiklik, biyolojik sıvının sensörün aktif bölgesiyle temasını aşırı derecede azaltarak hedef molekülün yakalanmasını da sınırlandırabilir. Bu nedenle biyosensör tasarımında amaç, yüzeyin tamamını biyolojik bileşenlere karşı itici hale getirmek yerine, istenmeyen moleküllerin adsorpsiyonunu azaltırken hedef analitin kontrollü biçimde sensör yüzeyine ulaşmasını sağlayan bir yüzey mimarisi oluşturmaktır [58].

Bu yaklaşım, süperhidrofobik ve hidrofilik bölgelerin aynı sensör üzerinde birlikte tasarlanmasıyla gerçekleştirilebilir. Hidrofilik bölgeler biyolojik sıvının belirli alanlarda tutulmasını ve hedef analitin sensörün aktif bölgesine yönlendirilmesini sağlarken, çevredeki süperhidrofobik bölgeler sıvının yayılmasını ve hedef dışı bileşenlerin sensör yüzeyine temasını sınırlandırabilir. Böylece sıvının hareketi ve biyolojik moleküllerin sensör üzerindeki dağılımı yüzey kimyası ve topografyası kullanılarak mekânsal olarak kontrol edilebilir. Bu tür heterojen ıslanabilirliğe sahip yüzeyler, biyosensörlerde seçicilik ve duyarlılığın geliştirilmesi açısından önemli bir tasarım yaklaşımıdır.

Süperhidrofobik yüzeylerin biyosensörlerdeki bir diğer potansiyel avantajı, küçük hacimli sıvıların belirli bölgelerde yoğunlaştırılabilmesidir. Mikro/nano yapıların uygun biçimde tasarlanmasıyla damlacıkların hareketi, birleşmesi, ayrılması veya belirli bir algılama bölgesine yönlendirilmesi kontrol edilebilir. Bu özellik, düşük konsantrasyonlarda bulunan analitlerin daha küçük örnek hacimleri kullanılarak algılanmasına katkıda bulunabilir. Özellikle taşınabilir ve düşük numune hacmi gerektiren tanı sistemlerinde yüzeyin sıvı yönetme kapasitesi, sensör performansının önemli bir bileşeni haline gelmektedir.

Biyosensör yüzeylerinde mikro/nano desenleme bu nedenle yalnızca yüzeyin ıslanabilirliğini değiştirmek için değil, biyolojik hedeflerin mekânsal olarak düzenlenmesi amacıyla da kullanılabilir. Sensörün aktif bölgeleri hidrofilik veya biyotanıma molekülleri ile fonksiyonlandırılmış alanlar olarak tasarlanırken, çevredeki bölgeler süperhidrofobik özellik gösterebilir. Böyle bir yüzey mimarisi, örnek içerisindeki hedef moleküllerin aktif bölgelere yönlendirilmesini ve hedef dışı bileşenlerin diğer alanlardan uzak tutulmasını sağlayabilir. Sonuç olarak yüzey, pasif bir taşıyıcı olmaktan çıkarak biyolojik analitin hareketini ve sensörle etkileşimini yönlendiren aktif bir mikroçevre haline gelebilir.

Süperhidrofobik yüzeylerin optik, elektrokimyasal, piezoelektrik veya diğer transdüksiyon mekanizmalarına dayalı biyosensörlerle bütünleştirilmesi de önemli bir araştırma alanıdır. Yüzeyin mikro/nano topografyası, sensörün aktif alanını ve biyolojik moleküllerin bu alanla etkileşim biçimini değiştirebilir. Özellikle nanoyapılı yüzeylerin yüksek özgül yüzey alanı, biyotanıma elemanlarının immobilizasyonu için geniş bir yüzey sağlayabilir. Bununla birlikte, yüksek yüzey alanı ile yüksek süperhidrofobiklik her zaman aynı biyolojik sonucu üretmeyebilir. Sensör tasarımında hedef molekülün yüzeye erişimi ve bağlanma kinetiği ile antifouling davranış arasında uygun bir denge kurulmalıdır [59,60].

Biyosensörlerde süperhidrofobik yüzeylerin kullanımını sınırlayan önemli faktörlerden biri de biyolojik ortamın yüzey özelliklerini zaman içerisinde değiştirmesidir. Serum veya kan gibi karmaşık örneklerde bulunan proteinler yüzeye adsorbe olarak başlangıçtaki ıslanabilirlik özelliklerini değiştirebilir. Buna ek olarak, mikro/nano yapıların biyolojik materyalle dolması veya yüzeyin mekanik olarak bozulması, Cassie–Baxter durumunun kararlılığını azaltabilir. Böyle bir değişim, sıvının sensör yüzeyine yayılmasını ve analitin taşınmasını etkileyerek ölçüm sonuçlarında sapmaya neden olabilir. Bu nedenle biyosensörlerde yüzeyin başlangıçtaki süperhidrofobikliği kadar, ölçüm koşulları altında uzun dönem yüzey kararlılığı da önem taşımaktadır [59,60].

Tanı sistemlerinde bir diğer önemli gereksinim, ölçümün tekrarlanabilirliğidir. Süperhidrofobik yüzeylerde damlacığın yüzey üzerinde hareketi, temas alanı ve kalma süresi; yüzey topografyasındaki küçük farklılıklardan bile etkilenebilir. Üretim sırasında mikro/nano yapıların boyutlarında veya yüzey kimyasında meydana gelen değişimler, farklı sensörler arasında performans farklılıklarına yol açabilir. Bu nedenle biyosensör uygulamalarında yüzey üretiminin yalnızca laboratuvar ölçeğinde başarılı olması yeterli değildir; üretim sürecinin tekrarlanabilirliği, yüzey özelliklerinin homojenliği ve ölçeklenebilirliği de değerlendirilmelidir [59,60].

Süperhidrofobik yüzeylerin tanı sistemlerindeki potansiyeli, özellikle **mikroakışkan ve lab-on-a-chip platformlarıyla** birleştirildiğinde daha da belirgin hale gelmektedir. Bu sistemlerde çok küçük miktarlardaki biyolojik örneklerin belirli kanallara veya algılama bölgelerine yönlendirilmesi gerekmektedir. Süperhidrofobik ve hidrofilik alanların birlikte tasarlanması, sıvının istenmeyen bölgelere yayılmasını önlerken hedeflenen bölgelere kontrollü olarak taşınmasına olanak sağlayabilir. Böylece numune tüketimi azaltılabilir, analiz süresi kısaltılabilir ve birden fazla analitin aynı platform üzerinde incelenmesine yönelik sistemler geliştirilebilir [59,60].

Bu yaklaşım, özellikle çoklu biyobelirteç tespiti açısından önemlidir. Aynı sensör platformunda farklı biyolojik hedeflere özgü algılama bölgelerinin oluşturulması durumunda, yüzeyin ıslanabilirlik desenleri farklı örnek bileşenlerinin ilgili bölgelere yönlendirilmesinde kullanılabilir. Böylece yüzey topografyası ve kimyası, yalnızca sensörün biyolojik tanıma özelliğini değil, aynı zamanda örneğin platform içerisindeki fiziksel dağılımını da kontrol eden bir tasarım parametresine dönüşmektedir [59,60].

Bununla birlikte, biyosensör uygulamalarında süperhidrofobikliğin avantajları ile hedef molekülün sensör yüzeyine ulaşma gereksinimi arasında dikkatli bir denge kurulmalıdır. Tamamen süperhidrofobik ve biyolojik olarak inert bir yüzey, biyolojik kirlenmeyi azaltabilir ancak hedef analitin sensör yüzeyine ulaşmasını da engelleyebilir. Buna karşılık kontrollü biçimde desenlenmiş veya fonksiyonlandırılmış heterojen yüzeyler, hedef moleküllerin belirli bölgelerde seçici olarak yakalanmasına olanak sağlayabilir. Bu nedenle geleceğin biyosensörlerinde yüzey tasarımının temel hedefi, maksimum süperhidrofobiklik elde etmek değil, biyolojik örneğin taşınması, hedef molekülün seçici tanınması ve hedef dışı etkileşimlerin sınırlandırılması arasında optimum dengeyi sağlayan yüzey mimarisinin geliştirilmesi olacaktır.

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeyler biyosensör ve tanı sistemlerinde üç temel işlev açısından önemli potansiyel taşımaktadır: **biyolojik kirlenmenin azaltılması, sıvı hareketinin kontrol edilmesi ve biyolojik analitlerin mekânsal olarak yönlendirilmesi.** Bu özelliklerin seçici biyotanıma elemanları, mikro/nano topografya ve farklı ıslanabilirlik bölgeleriyle birleştirilmesi, daha düşük numune hacmiyle çalışan, hızlı, hassas ve çoklu analiz yapabilen yeni nesil tanı platformlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, biyolojik ortamda yüzey stabilitesi, üretim tekrarlanabilirliği ve hedef analitin yüzeye erişimi gibi sorunların çözülmesi, süperhidrofobik biyosensörlerin laboratuvar araştırmalarından klinik uygulamalara aktarılmasından geçer.

3.3. Mikroakışkan ve Lab-on-a-Chip Sistemleri

Mikroakışkan sistemler, mikrolitre ile nanolitre ölçeğindeki sıvı hacimlerinin kontrollü biçimde taşınması, karıştırılması, ayrılması ve analiz edilmesine olanak sağlayan miniaturize platformlardır. Bu sistemlerin biyomedikal alandaki önemli uygulamaları arasında biyosensörler, hızlı tanı sistemleri, hücre analizleri, ilaç tarama platformları, moleküler tanı ve laboratuvar-on-a-chip (lab-on-a-chip) sistemleri yer almaktadır. Mikroölçekli sistemlerde sıvıların davranışı, makroskopik sistemlerden farklı olarak yüzey kuvvetlerinden ve ara yüzey olaylarından güçlü biçimde etkilenmektedir. Bu nedenle mikrokanal ve yüzeylerin ıslanabilirlik özelliklerinin kontrol edilmesi, mikroakışkan sistemlerin performansını belirleyen temel tasarım parametrelerinden biri haline gelmektedir.

Mikroakışkan sistemlerde kanal boyutlarının küçülmesiyle birlikte yüzey alanının hacme oranı artmakta ve sıvı-yüzey etkileşimleri baskın hale gelmektedir. Bu durum, sıvının kanal duvarlarıyla etkileşimi, kapiler kuvvetler, yüzey gerilimi, temas açısı ve viskozite gibi parametrelerin akış davranışını belirlemesine neden olmaktadır. Süperhidrofobik yüzeyler, yüksek temas açıları ve düşük sıvı-katı adezyonu sayesinde sıvıların yüzey üzerinde yayılmasını sınırlandırabilir ve damlacıkların daha düşük dirençle hareket etmesine olanak sağlayabilir. Bu özellik, özellikle mikroölçekli sıvıların kontrollü olarak taşınması ve farklı bölgeler arasında yönlendirilmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

3.3.1. Damlacık Hareketi ve Sıvı Taşınımının Kontrolü

Damlacıkların mikro/nano yapılandırılmış yüzeyler üzerindeki hareketi; yüzey gerilimi, temas açısı histerezisi, kapiler kuvvetler, yerçekimi ve dış kuvvetler arasındaki denge tarafından belirlenmektedir. Süperhidrofobik yüzeylerde düşük temas açısı histerezisi, damlacık ile yüzey arasındaki yapışma kuvvetini azaltarak damlacıkların küçük eğim açılarında dahi hareket edebilmesini sağlayabilir. Böylece sıvıların belirli bir yüzey üzerinde düşük enerji tüketimiyle taşınması mümkün hale gelebilir [61].

Bu özellik özellikle küçük miktarlardaki biyolojik örneklerin işlenmesinde önem taşımaktadır. Kan, serum, tükürük veya diğer biyolojik sıvılardan alınan mikrolitre veya daha küçük hacimlerdeki örneklerin belirli bir algılama bölgesine taşınması, klasik pompalama sistemlerine kıyasla daha karmaşık bir yüzey kontrolü gerektirebilir. Süperhidrofobik yüzeyler, sıvının istenmeyen bölgelere yayılmasını sınırlandırırken, uygun şekilde tasarlanmış hidrofilik veya daha düşük hidrofobikliğe sahip bölgeler damlacığın hedeflenen yöne hareket etmesini sağlayabilir [62].

Bu yaklaşımda yüzeyin tamamının süperhidrofobik olması yerine **hidrofilik ve süperhidrofobik bölgelerin mekânsal olarak desenlenmesi** önemli bir tasarım stratejisidir. Hidrofilik bölgeler sıvının tercihli olarak temas ettiği ve tutulduğu alanlar olarak işlev görürken, süperhidrofobik bölgeler sıvının yayılmasını ve istenmeyen temasları sınırlandırabilir. Böylece yüzey kimyası ve topografyası birlikte kullanılarak damlacıkların belirli güzergâhlar boyunca yönlendirilmesi mümkün olabilir.

3.3.2. Yüzey Desenleme ve Kontrollü Islanabilirlik

Mikroakışkan sistemlerde yüzey desenleme, sıvıların hareketinin pasif olarak kontrol edilmesine olanak sağlayan önemli bir yöntemdir. Farklı ıslanabilirlik özelliklerine sahip bölgelerin aynı yüzey üzerinde oluşturulmasıyla sıvının belirli alanlara yönelmesi, tutulması veya bu alanlardan uzaklaştırılması sağlanabilir. Bu yaklaşım, özellikle harici pompa veya valf gereksinimini azaltarak mikroakışkan sistemlerin daha basit, kompakt ve taşınabilir hale getirilmesine katkıda bulunabilir [63].

Süperhidrofobik bölgeler sıvının yayılmasını sınırlandırırken, hidrofilik bölgeler damlacığın tutulması için enerji açısından daha elverişli alanlar oluşturabilir. Bu iki farklı yüzey davranışının kontrollü biçimde birleştirilmesiyle sıvıların iki boyutlu yüzeyler üzerinde belirli yollar boyunca hareket ettirilmesi mümkün hale gelebilir. Yüzey desenlerinin geometrisi, genişliği ve birbirleriyle olan bağlantıları damlacıkların hareket yönünü ve kararlılığını belirleyen önemli parametrelerdir.

Bu yaklaşım, biyosensörlerde tanımlanmış algılama bölgelerinin oluşturulması açısından da önem taşımaktadır. Örneğin biyolojik örnek, süperhidrofobik bariyerlerle çevrelenmiş hidrofilik bir algılama bölgesine yönlendirilebilir. Böylece numunenin sensör yüzeyinde kontrolsüz biçimde yayılması önlenirken, hedef analitin aktif bölgeye taşınması sağlanabilir. Bu tür yüzey mimarileri, birden fazla algılama bölgesinin aynı platform üzerinde oluşturulmasına da olanak sağlayarak çoklu biyobelirteç analizlerinin gerçekleştirilmesini destekleyebilir.

3.3.3. Kapiler Etkiler ve Pasif Sıvı Yönetimi

Mikroakışkan sistemlerin en önemli avantajlarından biri, dış enerji gerektirmeden sıvıların taşınmasına olanak sağlayabilmesidir. Bu süreçte kapiler kuvvetler önemli bir rol oynamaktadır. Mikrokanal boyutlarının küçülmesiyle yüzey gerilimi ve kapiler kuvvetlerin etkisi artmakta ve sıvının kanal içerisinde hareketi yüzeyin ıslanabilirlik özelliklerine daha duyarlı hale gelmektedir [64].

Süperhidrofobik yüzeyler ile kapiler akış arasındaki ilişki ise yüzeyin homojen veya heterojen yapısına bağlı olarak değişmektedir. Tamamen süperhidrofobik bir yüzey, sıvının yayılmasını ve kapiler ilerlemesini sınırlandırabilirken, hidrofilik bölgelerin kontrollü biçimde oluşturulması sıvının belirli kanallara veya mikrozervuarlara yönlendirilmesini sağlayabilir. Bu nedenle mikroakışkan sistemlerde süperhidrofobiklik çoğu zaman tek başına değil, farklı ıslanabilirlik özelliklerine sahip yüzey bölgeleriyle birlikte değerlendirilmektedir [65].

Bu yaklaşım **pasif sıvı yönetimi** açısından özellikle değerlidir. Harici pompalar, mekanik valfler veya karmaşık kontrol sistemleri olmaksızın sıvının yüzey enerjisi ve kapiler kuvvetler kullanılarak belirli bölgelere taşınabilmesi, taşınabilir tanı cihazlarının tasarımını kolaylaştırabilir. Özellikle kaynakların sınırlı olduğu ortamlarda kullanılacak düşük maliyetli ve enerji gereksinimi düşük tanı sistemleri açısından bu özellik önemli bir avantaj sunmaktadır.

3.3.4. Dijital Mikroakışkanlar ve Damlacık Tabanlı Sistemler

Mikroakışkan teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, sıvıların sürekli akış halinde taşındığı klasik mikrokanal sistemlerine alternatif olarak dijital mikroakışkanlar geliştirilmiştir. Dijital mikroakışkan sistemlerde sıvılar sürekli bir kanal içerisinde hareket etmek yerine, bağımsız damlacıklar şeklinde manipüle edilebilmektedir. Damlacıkların hareket ettirilmesi, birleştirilmesi, bölünmesi ve belirli yüzey bölgelerinde tutulması; elektriksel, optik, termal, manyetik veya mekanik yöntemlerle kontrol edilebilmektedir [66].

Bu sistemlerde yüzey ıslanabilirliği damlacık hareketinin enerji gereksinimini ve kontrol edilebilirliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Süperhidrofobik veya düşük adezyonlu yüzeyler, damlacığın yüzey üzerinde hareket ederken maruz kaldığı direnç kuvvetlerini azaltabilir. Böylece damlacıkların daha düşük dış kuvvetlerle hareket ettirilmesi mümkün olabilir. Buna karşılık, damlacığın belirli bir bölgede tutulmasının gerekli olduğu durumlarda daha hidrofilik veya fonksiyonlandırılmış alanlar kullanılabilir. Bu nedenle dijital mikroakışkan sistemlerde yüzeyin kontrollü heterojen ıslanabilirliği, damlacıkların hem hareket ettirilmesi hem de belirli konumlarda sabitlenmesi açısından önemli bir tasarım parametresidir.

Damlacık tabanlı sistemler, biyolojik analizlerde örnek ve reaktiflerin çok küçük hacimlerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bir damlacık, tek bir mikroyerleşim gibi davranarak belirli bir biyokimyasal reaksiyonun gerçekleştirilmesi için kullanılabilir. Bu yaklaşım numune ve reaktif tüketimini azaltırken, çok sayıda bağımsız reaksiyonun aynı platform üzerinde paralel olarak yürütülmesine olanak sağlayabilir. Süperhidrofobik bariyerlerle birbirinden ayrılmış hidrofilik reaksiyon bölgeleri, damlacıkların belirli alanlarda tutulmasına ve çapraz kontaminasyonun sınırlandırılmasına katkıda bulunabilir.

3.3.5. Küçük Numune Hacimlerinin Yönetimi

Mikroakışkan ve lab-on-a-chip sistemlerin temel hedeflerinden biri, analiz için gerekli biyolojik örnek hacmini mümkün olduğunca azaltmaktır. Geleneksel laboratuvar analizlerinde mililitre ölçeğinde örnekler gerekebilirken, mikroakışkan platformlarda mikrolitre, nanolitre ve daha küçük hacimlerle çalışmak mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte, örnek hacminin küçülmesi sıvının yüzeyle etkileşimini daha belirgin hale getirmekte ve yüzey tasarımının analiz performansı üzerindeki etkisini artırmaktadır [58].

Süperhidrofobik yüzeyler bu bağlamda numunenin gereksiz alanlara yayılmasını sınırlandırarak küçük hacimli damlacıkların kontrollü biçimde yönetilmesine katkıda bulunabilir. Özellikle kan veya serum gibi değerli biyolojik örneklerde, numunenin yalnızca gerekli algılama bölgesine yönlendirilmesi numune kaybının azaltılması açısından önemlidir. Bunun yanı sıra, küçük hacimli damlacıkların daha yüksek yüzey/hacim oranına sahip olması, hedef analitin sensör yüzeyindeki biyotanıma elemanlarıyla karşılaşma olasılığını artıracak yüzey mimarilerinin geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

Ancak küçük hacimli sistemlerde bu avantajın elde edilebilmesi için yüzey özelliklerinin yüksek düzeyde tekrarlanabilir olması gerekir. Mikro/nano yüzey topografyasındaki küçük farklılıklar bile damlacığın temas alanını, hareket hızını ve nihai konumunu değiştirebilir. Bu nedenle mikroakışkan uygulamalarda süperhidrofobik yüzeylerin üretimindeki geometrik ve kimyasal homojenlik, klasik makro ölçekli uygulamalara kıyasla daha kritik hale gelmektedir.

3.3.6. Biyolojik Örneklerde Kontaminasyon ve Biofouling Kontrolü

Mikroakışkan sistemlerde çok küçük hacimlerde çalışılması, yüzeyde meydana gelen biyolojik kirlenmenin sistem performansı üzerindeki etkisini artırabilmektedir. Proteinler, hücreler ve mikroorganizmalar kanal duvarlarına veya algılama yüzeylerine adsorbe olduğunda sıvı akışını değiştirebilir, aktif algılama bölgelerini kapatabilir ve analiz doğruluğunu azaltabilir. Süperhidrofobik yüzeylerin düşük sıvı-katı temas alanı, bu tür biyolojik bileşenlerin yüzeye tutunmasını azaltmaya yönelik bir yaklaşım sağlayabilir [67]. Bununla birlikte, süperhidrofobik yüzeylerin uzun süreli biyolojik örneklerle temasında yüzeyin başlangıç özelliklerinin korunması önemlidir. Protein adsorpsiyonu ve yüzey kirlenmesi, mikro/nano yapılar arasındaki hava ceplerinin kararlılığını azaltarak yüzeyin ıslanabilirlik davranışını değiştirebilir. Bu nedenle mikroakışkan cihazlarda süperhidrofobiklik, antifouling özelliklerle birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle tekrar kullanılabilir sistemlerde yüzeyin temizlenebilirliği ve sterilizasyon sonrasında yüzey özelliklerinin korunması önemli tasarım kriterleridir.

3.3.7. Lab-on-a-Chip Sistemlerinde Entegrasyon

Süperhidrofobik yüzeylerin mikroakışkan sistemlere entegrasyonu, örnek hazırlama, sıvı taşınımı, reaksiyon, ayırma ve algılama gibi farklı işlemlerin tek bir platform üzerinde birleştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu yaklaşım, klasik laboratuvar işlemlerinin minyatürleştirilerek tek bir çip üzerinde gerçekleştirilmesini amaçlayan lab-on-a-chip teknolojisinin temel hedefleriyle uyumludur [68].

Bir lab-on-a-chip platformunda süperhidrofobik yüzeyler farklı işlevleri yerine getirebilir. Kanal dışına sıvı taşınmasını önleyen bariyerler oluşturabilir, damlacıkların belirli bölgelere yönlendirilmesini sağlayabilir, reaksiyon bölgelerini birbirinden ayırabilir ve biyolojik kirlenmeyi sınırlandırabilir. Hidrofilik ve süperhidrofobik bölgelerin kontrollü biçimde bir arada kullanılmasıyla örnek hazırlama ve analiz adımlarının aynı platform üzerinde otomatik veya yarı otomatik biçimde gerçekleştirilmesi mümkün olabilir.

Bu tür sistemlerde yüzey tasarımı, cihazın geometrisi ve akış dinamikleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Süperhidrofobik özelliklerin kanal içerisinde sıvı hareketini kolaylaştırması beklenirken, aşırı düşük adezyon bazı bölgelerde sıvının tutulmasını veya reaksiyon için gerekli temas süresinin sağlanmasını zorlaştırabilir. Dolayısıyla yüzeyin farklı bölgelerinde farklı ıslanabilirlik seviyelerinin kullanılması, lab-on-a-chip sistemlerinde işlevsel bir tasarım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeyler mikroakışkan ve lab-on-a-chip sistemlerinde *damlacık hareketinin kontrolü, sıvıların yönlendirilmesi, pasif kapiler akışın düzenlenmesi, küçük numune hacimlerinin yönetimi, biyolojik kirlenmenin azaltılması ve çoklu analizlerin gerçekleştirilmesi* açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte, süperhidrofobikliğin mikroakışkan sistemlerde başarılı biçimde kullanılabilmesi, yüzeyin yalnızca yüksek temas açısına sahip olmasına

değil, damlacık hareketi ve yüzey-sıvı etkileşimlerinin uygulamanın gereksinimlerine göre hassas biçimde kontrol edilmesine bağlıdır. Bu nedenle geleceğin mikroakışkan platformlarında ****süperhidrofobik, hidrofilik ve fonksiyonel bölgelerin hiyerarşik olarak bir arada tasarlandığı heterojen yüzey mimarilerinin**** daha fazla önem kazanması beklenmektedir. Böylece yüzey, yalnızca sıvının temas ettiği pasif bir ara yüz olmaktan çıkarak, biyolojik örneğin taşınmasını, işlenmesini ve analiz edilmesini yönlendiren aktif bir mikroakışkan bileşen haline gelebilecektir.

3.4. Doku Mühendisliği ve Rejeneratif Tıp

Doku mühendisliği ve rejeneratif tıp uygulamalarında temel amaç, hasarlanmış veya işlevini kaybetmiş dokuların yeniden oluşturulmasını destekleyen uygun biyolojik mikroçevrenin tasarlanmasıdır. Bu süreçte hücrelerin yüzeye tutunması, yayılması, çoğalması, farklılaşması ve hücreler arası etkileşimlerin düzenlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle doku mühendisliği açısından yüzey tasarımı, yalnızca malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmeye yönelik bir yaklaşım olmaktan çıkmış; hücrelerin davranışını yönlendirebilen aktif bir biyomühendislik stratejisine dönüşmüştür [69].

İlk bakışta süperhidrofobik yüzeylerin doku mühendisliği uygulamalarıyla çeliştiği düşünülebilir. Çünkü süperhidrofobik yüzeylerin düşük yüzey enerjisi ve düşük sıvı-katı temas alanı, protein ve hücre adezyonunu sınırlandırabilmektedir. Oysa doku oluşumunun gerçekleşebilmesi için hücrelerin biyomalzeme yüzeyine belirli ölçüde tutunması ve burada uygun biyolojik fonksiyonlarını sürdürebilmesi gerekir. Bu nedenle doku mühendisliğinde hedef, yüzeyin mümkün olan en yüksek hidrofobikliğe ulaştırılması değil, hücre-yüzey etkileşiminin kontrollü olarak düzenlenmesidir.

Bu yaklaşım, süperhidrofobik yüzeylerin doku mühendisliğinde doğrudan homojen bir yüzey olarak kullanılmasından ziyade, farklı ıslanabilirlik özelliklerine sahip bölgelerin birlikte tasarlanmasını gündeme getirmektedir. Süperhidrofobik, hidrofobik, hidrofilik veya biyofonksiyonel bölgelerin aynı yüzey üzerinde belirli geometrik düzen içerisinde oluşturulması, hücrelerin yüzey üzerindeki dağılımının mekânsal olarak kontrol edilmesine olanak sağlayabilir. Böylece yüzeyin bazı bölgelerinde hücre adezyonu sınırlandırılırken, hedeflenen bölgelerde hücrelerin tutunması ve yayılması desteklenebilir.

3.4.1. Kontrollü Hücre Adezyonu

Hücrelerin bir biyomalzeme yüzeyine tutunması, yüzeyin kimyasal bileşimi, yüzey enerjisi, topografyası, pürüzlülüğü ve adsorbe olan proteinlerin özellikleri tarafından belirlenmektedir. Hücreler çoğu durumda doğrudan malzeme yüzeyiyle değil, yüzey üzerinde adsorbe olmuş ekstrasellüler matriks proteinleri aracılığıyla etkileşime girmektedir. Bu nedenle yüzeyin ıslanabilirlik özelliklerinin değiştirilmesi, protein adsorpsiyonunu ve dolayısıyla hücrelerin yüzeyle etkileşim biçimini değiştirebilir [70].

Süperhidrofobik yüzeyler bu mekanizma üzerinden hücre adezyonunu sınırlandırabilir. Ancak bu özellik, doku mühendisliğinde yalnızca dezavantaj olarak değerlendirilmemelidir. Hücrelerin yüzeye rastgele ve kontrolsüz biçimde yayılmasının istenmediği durumlarda düşük hücre adezyonu avantaj sağlayabilir. Örneğin belirli hücre tiplerinin yalnızca tanımlanmış bölgelerde toplanmasının istendiği biyomühendislik uygulamalarında süperhidrofobik alanlar doğal bir hücre-repellent bariyer olarak kullanılabilir.

Bu nedenle doku mühendisliğinde önemli olan, yüzeyin tamamen hücre-adezif veya tamamen hücre-repellent olması değil, ****hücrelerin istenen konumlarda ve uygun yoğunlukta organize edilmesidir.**** Süperhidrofobik bölgeler hücrelerin bulunmasının istenmediği alanları tanımlarken, hidrofilik veya biyolojik olarak fonksiyonlandırılmış bölgeler hücrelerin tutunması ve gelişmesi için uygun mikroçevreler oluşturabilir.

3.4.2. Süperhidrofobik/Hidrofilik Yüzey Desenleme

Süperhidrofobik ve hidrofilik bölgelerin aynı yüzey üzerinde birlikte oluşturulması, hücre davranışının mekânsal olarak kontrol edilmesi açısından önemli bir stratejidir. Hidrofilik bölgeler hücrelerin tutunması için uygun yüzeyler oluştururken, çevredeki süperhidrofobik bölgeler hücrelerin bu alanlara yayılmasını sınırlandırabilir. Böylece hücrelerin belirli geometrik desenler içerisinde organize edilmesi mümkün hale gelebilir [71].

Bu yaklaşım özellikle hücrelerin kontrollü biçimde dizilmesinin veya belirli bir hücre yoğunluğunun oluşturulmasının önemli olduğu uygulamalarda kullanılabilir. Hücrelerin yüzey üzerinde rastgele dağılması yerine, mikrodesezli adezif bölgeler aracılığıyla belirli konumlarda tutulması; hücre-hücre etkileşimlerinin, hücre morfolojisinin ve hücresel sinyalleşmenin kontrol edilmesine katkı sağlayabilir. Böylece yüzey topografyası ve ıslanabilirlik, hücrelerin yalnızca yüzeye tutunmasını değil, hücrelerin birbirleriyle nasıl organize olacağına da etkileyen tasarım parametrelerine dönüşmektedir.

Bu tür desenleme stratejileri, özellikle hücre tabakalarının oluşturulması, doku benzeri mikroyapıların geliştirilmesi ve hücre-hücre etkileşimlerinin incelenmesi açısından önem taşımaktadır. Örneğin hücrelerin yalnızca hidrofilik adacıklara tutunabildiği ve süperhidrofobik bölgelerde yayılmasının sınırlandığı bir yüzey, kontrollü hücre yoğunluğuna sahip mikroçevrelerin oluşturulmasını sağlayabilir. Bu yaklaşım, doku mühendisliğinde kullanılan hücrelerin konumunun ve geometrisinin yüzey aracılığıyla yönlendirilmesine olanak verir.

3.4.3. Yüzey Islanabilirlik Gradyanları

Keskin hidrofilik/süperhidrofobik sınırların yanı sıra, yüzey ıslanabilirliğinin kademeli olarak değiştiği ıslanabilirlik gradyanları da hücresel davranışın kontrolünde kullanılabilecek yenilikçi bir yaklaşımdır. Böyle bir yüzeyde yüzey enerjisi veya temas açısı tek bir değerde sabit kalmak yerine belirli bir doğrultuda sürekli veya kademeli olarak değişmektedir. Bu durum, hücrelerin yüzey üzerindeki adezyon, yayılma ve göç davranışlarının mekânsal olarak farklılaşmasına olanak sağlayabilir [72].

Hücre göçü özellikle yara iyileşmesi, damar oluşumu ve doku rejenerasyonu gibi süreçlerde temel biyolojik mekanizmalardan biridir. Hücrelerin belirli bir yönde hareket etmesini sağlayabilecek yüzey gradyanları, doğal dokulardaki biyolojik sinyallerin mühendislik yoluyla taklit edilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle süperhidrofobik ve hidrofilik bölgeler arasındaki kontrollü geçişler, hücrelerin yüzey üzerindeki konumunu ve hareketini yönlendirebilen fizikokimyasal sinyaller olarak değerlendirilebilir.

Ancak hücre davranışının yalnızca temas açısıyla açıklanması mümkün değildir. Islanabilirlik gradyanı ile birlikte yüzey topografyası, kimyasal fonksiyonel gruplar, protein adsorpsiyonu ve mekanik özellikler de hücresel yanıtı etkileyebilir. Bu nedenle gelecekteki yüzey tasarımlarında tek bir parametrenin optimize edilmesi yerine, çok parametrelili yüzey gradyanlarının oluşturulması daha etkili bir yaklaşım olabilir.

3.4.4. Hücre-Rejeneratif Mikroçevrenin Tasarımı

Doku mühendisliğinde güncel yaklaşımlar, hücrelerin yalnızca uygun bir yüzeye tutunmasını değil, doğal dokuda bulunan mikroçevrenin mümkün olduğunca doğru biçimde taklit edilmesini hedeflemektedir. Doğal ekstrasellüler matriks; hücrelere biyokimyasal, fiziksel ve mekanik sinyaller sağlayarak hücre davranışını düzenlemektedir. Yapay biyomalzeme yüzeylerinde de benzer sinyallerin kontrollü biçimde oluşturulması, hücrelerin istenen yönde davranmasını sağlayabilir [1].

Süperhidrofobik yüzeyler bu bağlamda, biyolojik mikroçevrenin mekânsal olarak sınırlandırılması için kullanılabilecek fiziksel bölgeler oluşturabilir. Örneğin hücrelerin tutunmasının istendiği hidrofilik bölgeler, hücre adezyonunu destekleyen peptitler, proteinler veya diğer biyofonksiyonel moleküller ile modifiye edilebilir. Bu bölgeleri çevreleyen süperhidrofobik alanlar ise hücrelerin fonksiyonel

bölgelerin dışına yayılmasını sınırlandırabilir. Böylece biyolojik sinyallerin yalnızca belirli mikroalanlarda sunulduğu kontrollü bir yüzey mimarisi oluşturulabilir.

Bu yaklaşım, “biyolojik olarak aktif adacıklar” kavramının geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Hücrelerin tutunması, çoğalması veya farklılaşması için gerekli sinyallerin belirli bölgelerde yoğunlaştırılması; buna karşılık diğer alanların hücre-repellent özellik göstermesi, yapay bir biyolojik mikroçevrenin yüzey düzeyinde oluşturulmasını mümkün kılabilir. Böyle bir sistemde süperhidrofobik bölgeler pasif bir yüzey özelliğinden ziyade, biyolojik sinyallerin mekânsal sınırlarını belirleyen yapısal bileşenler olarak görev yapmaktadır.

3.4.5. Dokuya Özgü Yüzey Tasarımı

Farklı dokuların hücrel ve biyolojik gereksinimleri birbirinden önemli ölçüde farklıdır. Kemik dokusunda osteoblastların adezyonu ve mineralize doku oluşumu ön plana çıkarken, vasküler dokularda endotel hücrelerinin uygun şekilde organize olması ve trombojenik yanıtın sınırlandırılması önem taşımaktadır. Sinir dokusunda ise hücre göçünün ve uzantıların belirli yönlerde ilerlemesinin kontrol edilmesi gerekebilir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin doku mühendisliğindeki kullanımı, doğrudan malzemenin hidrofobiklik derecesine değil, hedef dokunun biyolojik gereksinimlerine göre belirlenmelidir [11]. Örneğin kemik doku mühendisliğinde hücrelerin implant yüzeyine tutunması ve osteojenik farklılaşmasının desteklenmesi gerekirken, implantın belirli bölgelerinde bakteriyel kolonizasyonun sınırlandırılması da istenebilir. Bu durumda süperhidrofobik ve hücre-adeziv bölgelerin birlikte tasarlanması, aynı yüzey üzerinde hem biyolojik bütünleşmenin hem de mikrobiyal kolonizasyon kontrolünün sağlanmasına katkıda bulunabilir.

Vasküler doku mühendisliğinde ise yüzey tasarımı daha karmaşık bir denge gerektirir. Endotel hücrelerinin yüzeye tutunması ve uygun bir hücrel tabaka oluşturması istenirken, trombositlerin ve diğer kan bileşenlerinin istenmeyen şekilde yüzeye tutunmasının sınırlandırılması gerekir. Bu nedenle aynı yüzey üzerinde hücre tipine özgü farklı biyolojik yanıtların oluşturulması, gelecekteki çok işlevli yüzey tasarımlarının önemli hedeflerinden biri olacaktır.

3.4.6. Süperhidrofobik Yüzeylerin 3B Doku Yapılarıyla Birleştirilmesi

Doku mühendisliğinde üç boyutlu yapıların kullanılması, hücrelerin yalnızca düz bir yüzeye değil, doğal dokuya daha yakın bir mimariye sahip bir mikroçevrede büyütülmesine olanak sağlamaktadır. İskeleler, hidrojel ve 3B biyobaskı ile üretilen yapılar bu yaklaşımın önemli örnekleridir. Süperhidrofobik yüzey özelliklerinin bu üç boyutlu yapılara aktarılması, hücrelerin ve biyolojik sıvıların iskele içerisinde belirli bölgelerde yönlendirilmesine yönelik yeni olanaklar sunabilir [73].

Özellikle 3B biyobaskı ile oluşturulan yapılarda farklı ıslanabilirlik özelliklerinin mekânsal olarak tanımlanması, hücrelerin belirli bölgelerde tutulmasına veya farklı hücre tiplerinin farklı mikroalanlara yönlendirilmesine yardımcı olabilir. Süperhidrofobik bölgeler hücrelerin yayılmasını sınırlandırırken, hidrofilik ve biyofonksiyonel bölgeler hücrelerin tutunması ve doku oluşumunu desteklemesi için tasarlanabilir. Böylece yüzey mühendisliği ile 3B yapısal tasarımın birleştirilmesi mümkün hale gelmektedir.

Bununla birlikte, üç boyutlu yapılarda süperhidrofobik davranışın korunması düz yüzeylere göre daha zordur. Karmaşık geometriler, gözenekli yapılar ve iç yüzeyler sıvıların ve hücrelerin davranışını değiştirebilir. Ayrıca sterilizasyon, hücre kültürü ortamı ve uzun süreli biyolojik maruziyet, yüzeyin başlangıçtaki mikro/nano yapısını ve ıslanabilirlik özelliklerini değiştirebilir. Bu nedenle 3B doku mühendisliği uygulamalarında süperhidrofobik yüzeylerin tasarımı, yalnızca temas açısının ölçülmesine değil, hücre kültürü ve biyolojik ortam içerisindeki fonksiyonel kararlılığın değerlendirilmesine dayanmalıdır.

3.4.7. Süperhidrofobiklikten Kontrollü Biyolojik Arayüzlere

Doku mühendisliği açısından süperhidrofobik yüzeylerin en önemli potansiyeli, hücreleri tamamen yüzeyden uzaklaştırmak değil, ****hücrelerin nerede ve nasıl etkileşeceğini kontrol etmektir****. Bu nedenle geleceğin yüzey tasarımlarında homojen süperhidrofobik kaplamaların yerini, farklı ıslanabilirlik ve biyofonksiyonel özelliklerin mekânsal olarak düzenlendiği heterojen yüzeylerin alması beklenebilir [71]. Bu yaklaşımda süperhidrofobik bölgeler hücre-repellent alanlar olarak görev yaparken, hidrofilik veya biyofonksiyonel bölgeler hücrelerin tutunması ve gelişmesi için aktif mikroçevreler oluşturabilir. Yüzey gradyanları ise bu iki davranış arasında kontrollü geçiş sağlayarak hücrelerin adezyon ve göç süreçlerinin daha hassas biçimde düzenlenmesine olanak verebilir. Böylece yüzey mühendisliği, yalnızca malzemenin su ile etkileşimini değiştiren bir teknoloji olmaktan çıkarak, hücresel mikroçevrenin mekânsal organizasyonunu sağlayan bir biyomühendislik platformuna dönüşebilir.

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeylerin doku mühendisliği ve rejeneratif tıptaki kullanımında temel hedef maksimum hidrofobiklik elde etmek olmamalıdır. Aksine, ****hücre adezyonu, hücre göçü, protein adsorpsiyonu, biyolojik sinyaller ve yüzey topografyasının birlikte kontrol edildiği uygulamaya özgü mikroçevrelerin oluşturulması**** daha rasyonel bir yaklaşım sunmaktadır. Süperhidrofobik/hidrofilik desenleme, ıslanabilirlik gradyanları ve biyofonksiyonel bölgelerin kombinasyonu sayesinde hücre davranışının mekânsal olarak yönlendirilmesi mümkün olabilir. Bu yaklaşım, gelecekte implant ve doku mühendisliği platformlarının yalnızca pasif taşıyıcı yapılar olmaktan çıkarak, hücrelerin davranışını aktif biçimde düzenleyen ****akıllı biyolojik arayüzlere**** dönüşmesine katkı sağlayacaktır.

3.5. Antibakteriyel ve Antibiyofilm Uygulamalar

Biyomedikal cihazların yüzeylerinde bakteriyel adezyon ve biyofilm oluşumu, implant ilişkili enfeksiyonların ve cihaz kaynaklı komplikasyonların önemli nedenleri arasında yer almaktadır. Bir biyomalzeme yüzeyine ulaşan bakteriler, yüzey özelliklerine ve çevresel koşullara bağlı olarak ilk tutunma aşamasından başlayarak kolonizasyon ve biyofilm oluşumuna ilerleyebilmektedir. Biyofilm içerisinde bulunan bakteriler, planktonik bakterilere kıyasla fiziksel ve kimyasal streslere daha dirençli hale gelebildiğinden, oluşmuş bir biyofilmin ortadan kaldırılması çoğu zaman başlangıçtaki bakteriyel adezyonun önlenmesinden daha zordur. Bu nedenle modern biyomalzeme yüzey tasarımında temel hedeflerden biri, bakterilerin yüzeye ilk temas ve tutunma aşamasını mümkün olduğunca erken aşamada sınırlandırmaktır [5].

Süperhidrofobik yüzeyler bu açıdan, herhangi bir antimikrobiyal ajan salmadan bakteriyel kolonizasyonu azaltmayı amaçlayan pasif antibakteriyel yüzeyler arasında değerlendirilebilir. Bu yüzeylerin düşük yüzey enerjisi, yüksek su iticiliği ve mikro/nano ölçekli hiyerarşik topografyası, bakterilerin yüzeyle gerçek temas alanını azaltabilir. Özellikle yüzey yapıları arasında kararlı hava ceplerinin bulunması, bakterilerin doğrudan katı yüzeye ulaşmasını zorlaştırarak ilk adezyon olasılığını düşürebilir. Böylece antibakteriyel etkinlik, bakterileri doğrudan öldürmek yerine yüzeyde kalıcı olarak tutunmalarını ve çoğalmalarını sınırlandırma mekanizmasına dayanabilir.

3.5.1. Bakteriyel Adezyonun Pasif Olarak Sınırlandırılması

Süperhidrofobik yüzeylerde bakteriyel adezyonun azaltılması, esas olarak bakterinin yüzeyle temas ettiği gerçek alanın ve adezyon kuvvetlerinin değiştirilmesiyle ilişkilidir. Mikro/nano hiyerarşik yapıların oluşturduğu topografya, bakterinin yüzeye tamamen oturmasını engelleyebilir. Buna ek olarak düşük yüzey enerjisi, bakteriyel hücre zarfı ile yüzey arasındaki etkileşimleri değiştirebilir [32]. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin antibakteriyel performansı yalnızca temas açısının büyüklüğü ile değerlendirilmemelidir. Yüzey topografyasının geometrisi, pürüzlülük ölçeği, yüzey kimyası, temas açısı histerezisi ve Cassie–Baxter durumunun kararlılığı birlikte değerlendirilmelidir. Aynı temas açısına sahip iki yüzey, farklı mikro/nano topografya ve yüzey kimyası nedeniyle bakteriyel adezyon açısından tamamen farklı sonuçlar gösterebilir.

Bununla birlikte, bakteriyel hücrelerin boyutları ve morfolojileri de yüzey topografyasının etkinliğini belirleyen önemli parametrelerdir. Bakterinin yüzey yapısına göre boyutu ve şekli, hücrenin mikro/nano yapılar arasına yerleşme veya yüzeye temas etme olasılığını değiştirebilir. Bu nedenle ideal antibakteriyel yüzey topografyasının belirlenmesinde yalnızca yüzeyin geometrik özellikleri değil, hedef mikroorganizmanın morfolojik özellikleri de dikkate alınmalıdır.

3.5.2. Biyofilmin Oluşumunun Erken Aşamada Önlenmesi

Biyofilm oluşumu genellikle yüzeye ilk bakteriyel tutunmayı takip eden çok aşamalı bir süreçtir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin en önemli potansiyel avantajlarından biri, biyofilmin henüz oluşmaya başlamadığı erken aşamada bakteriyel kolonizasyonu sınırlandırabilmesidir. Yüzeydeki bakteriyel yoğunluğun azaltılması, sonraki hücreler arası etkileşimleri ve ekstrasellüler polimerik matriks oluşumunu da sınırlandırabilir [74].

Bu yaklaşım, özellikle yüzeyin bakteriler tarafından uzun süreli kolonizasyonunun ciddi klinik sonuçlara yol açabileceği implant ve tıbbi cihazlarda önem taşımaktadır. Kateterler, dental implantlar, ortopedik implantlar, vasküler cihazlar ve çeşitli cerrahi cihazlar, kullanım sırasında bakteriyel kontaminasyona maruz kalabilmektedir. Süperhidrofobik yüzeylerin pasif anti-adhezif davranışı, bu cihazların yüzeyinde bakterilerin kalıcı olarak kolonize olma olasılığını azaltmaya yönelik tamamlayıcı bir strateji sağlayabilir.

Ancak burada önemli bir ayrım yapılmalıdır. Bakteriyel adezyonun azaltılması bakterilerin öldürülmesi anlamına gelmez. Süperhidrofobik yüzey bakterinin yüzeye tutunmasını sınırlandırabilir; ancak yüzey üzerinde veya çevrede bulunan bakterilerin canlılığını doğrudan ortadan kaldırmayabilir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzeyler, bakterisidal bir yüzeyden ziyade öncelikle anti-adhezif veya antibiyofilm potansiyeli taşıyan yüzeyler olarak değerlendirilmelidir.

3.5.3. Süperhidrofobik–Antimikrobiyal Hibrit Yüzeyler

Süperhidrofobik yüzeylerin pasif anti-adhezif özellikleri, aktif antimikrobiyal mekanizmalarla birleştirildiğinde daha güçlü bir yüzey fonksiyonu elde edilebilir. Bu yaklaşımda yüzeyin bir bileşeni bakterilerin yüzeye tutunmasını azaltırken, diğer bileşen bakterilerin canlılığını sınırlandırmayı amaçlamaktadır. Böylece hem bakteriyel kolonizasyonun başlangıcı hem de yüzeye ulaşan bakterilerin çoğalması aynı yüzey üzerinde kontrol edilmeye çalışılabilir [38]. Bu tür hibrit yüzeylerde antimikrobiyal ajan olarak metalik veya metal oksit nanopartikülleri, fotokatalitik bileşenler, antimikrobiyal peptitler veya diğer biyolojik/kimyasal ajanlar kullanılabilir. Ancak aktif ajanların biyomedikal yüzeylere eklenmesi, sitotoksikite, kontrollü salım, çevre dokular üzerindeki etkiler ve uzun dönem stabilite gibi yeni sorunları beraberinde getirebilir. Bu nedenle aktif antimikrobiyal fonksiyonun süperhidrofobik yüzeye birleştirilmesi sırasında yalnızca antibakteriyel etkinlik değil, biyolojik güvenlik de dikkate alınmalıdır.

Özellikle implant yüzeylerinde güçlü bir antimikrobiyal etkinlik ile çevre dokuların sağlıklı hücresel yanıtı arasında uygun bir denge kurulmalıdır. Bakterileri etkili biçimde inhibe eden ancak osteoblast, fibroblast veya endotel hücreleri gibi hedef hücrelere zarar veren bir yüzey, klinik açıdan başarılı bir biyomalzeme olarak değerlendirilemez. Bu nedenle geleceğin antibakteriyel süperhidrofobik yüzeylerinde seçici biyolojik etki önemli bir tasarım hedefi olacaktır.

3.5.4. Kateter ve Tıbbi Cihazlarda Antibiyofilm Yüzeyler

Kateterler ve uzun süreli kullanılan tıbbi cihazlar, biyofilm oluşumu açısından özellikle yüksek risk taşıyan sistemlerdir. Cihaz yüzeyinde proteinlerin ve diğer biyolojik bileşenlerin birikmesi, bakterilerin yüzeye tutunmasını kolaylaştıran bir ara yüz oluşturabilir. Süperhidrofobik yüzeyler, biyolojik sıvının ve mikroorganizmaların yüzeye temasını sınırlandırarak bu ilk kolonizasyon aşamasının kontrolüne katkıda bulunabilir [75]. Kateter uygulamalarında yüzeyin mekanik esnekliği özellikle önemlidir.

Kateterin yerleştirilmesi, çıkarılması veya kullanım sırasında bükülmesi yüzey mikro/nano yapılarında deformasyona neden olabilir. Yüzey topografyasının bozulması, başlangıçta elde edilen süperhidrofobik davranışın azalmasına ve buna bağlı olarak antibiyofilm performansının zamanla düşmesine yol açabilir. Bu nedenle kateterlerde antibiyofilm yüzey tasarımı, yüksek temas açısının yanı sıra esneklik, aşınma direnci ve tekrarlanan deformasyonlar altında yüzey kararlılığı ile birlikte ele alınmalıdır [76].

3.5.5. Dental ve Ortopedik İmplantlarda Enfeksiyon Kontrolü

Dental ve ortopedik implantlarda bakteriyel kolonizasyonun sınırlandırılması, implantın uzun dönem başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Ancak bu uygulamalarda antibakteriyel yüzey tasarımı, yalnızca bakteriyel adezyonun azaltılması hedefiyle sınırlandırılmaz. İmplantın çevre dokuyla bütünleşmesi, hücre adezyonu ve doku rejenerasyonu da aynı anda dikkate alınmalıdır [77, 78].

Özellikle dental implantlarda bakteriyel biyofilm ile implant yüzeyi arasındaki etkileşimin azaltılması, peri-implant inflamasyonun önlenmesine katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, implant yüzeyinin tamamen hücre-repellent hale getirilmesi osteointegrasyon açısından olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle süperhidrofobik ve hidrofilik/biyofonksiyonel bölgelerin birlikte kullanıldığı desenli yüzeyler, bakterilerin tutunmasını sınırlandırırken osteojenik hücrelerin belirli bölgelerde adezyonunu desteklemek açısından daha rasyonel bir yaklaşım sunmaktadır.

Benzer şekilde ortopedik implantlarda enfeksiyon kontrolü ile kemik–implant bütünleşmesi arasında hassas bir denge bulunmaktadır. Süperhidrofobik yüzeyler bakteriyel kolonizasyonu azaltabilirken, hedef hücrelerin implant yüzeyine tutunmasını da sınırlandırabilir. Bu nedenle uygulamaya özgü yüzey tasarımında implantın farklı bölgelerinde farklı biyolojik fonksiyonların oluşturulması, gelecekte önemli bir yaklaşım olabilir.

3.5.6. Yara Örtüleri ve Biyomedikal Tekstiller

Yara yüzeyleri, bakteriyel kolonizasyon açısından yüksek risk taşıyan karmaşık biyolojik ortamlardır. Yara örtülerinde ideal yüzey; mikroorganizmaların kolonizasyonunu sınırlandırırken yara iyileşmesi için gerekli nem dengesini ve hücresel süreçleri olumsuz etkilememelidir. Süperhidrofobik yüzeylerin düşük sıvı adezyonu ve mikroorganizmaların yüzeye tutunmasını azaltma potansiyeli, bu sistemlerde antibiyofilm yaklaşım açısından değerlendirilebilir [79].

Ancak yara örtülerinde tamamen süperhidrofobik bir yüzey her zaman ideal değildir. Yara sıvısının belirli ölçüde emilmesi, kontrollü nem ortamının korunması ve hücrelerin iyileşme sürecine katılması gerekebilir. Bu nedenle süperhidrofobik ve hidrofilik bölgelerin birlikte tasarlanması, yaranın belirli bölgelerinde sıvı yönetiminin sağlanması ve bakteriyel kolonizasyonun sınırlandırılması açısından daha uygun olabilir.

Bu yaklaşım, özellikle çok işlevli yara örtülerinin geliştirilmesinde önem taşımaktadır. Süperhidrofobik bölgeler dış ortamdan kaynaklanan sıvı ve mikroorganizma geçişini sınırlandırırken, hidrofilik veya biyofonksiyonel bölgeler yara eksüdasının kontrollü yönetimini ve hücresel iyileşme süreçlerini destekleyebilir. Böylece yüzeyin farklı bölgeleri farklı biyolojik işlevler üstlenebilir.

3.5.7. Bakteri Türü ve Yüzey Tasarımı Arasındaki İlişki

Süperhidrofobik yüzeylerin antibakteriyel performansı tüm bakteriler için aynı olmayabilir. Bakterilerin hücre duvarı yapısı, yüzey yükü, hidrofobik karakteri, morfolojisi ve ekstrasellüler polimerik madde üretme kapasitesi yüzeyle etkileşimlerini değiştirebilir. Gram-negatif ve Gram-pozitif bakterilerin yüzey özelliklerindeki farklılıklar, aynı süperhidrofobik yüzeye karşı farklı adezyon davranışlarının ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle antibakteriyel süperhidrofobik yüzeylerin değerlendirilmesinde tek bir model bakteri üzerinden elde edilen sonuçların genelleştirilmesi dikkatle yapılmalıdır. Özellikle klinik uygulamalara yönelik yüzeylerde farklı bakteri türleri ve mümkün olduğunca gerçek biyolojik

ortamı temsil eden koşullar kullanılmalıdır. Ayrıca statik kültür ortamlarında elde edilen antibiyofilm sonuçlarının, gerçek kullanım koşullarındaki sıvı akışı ve mekanik etkiler altında aynı şekilde ortaya çıkacağı varsayılmamalıdır [5].

3.5.8. Uzun Dönem Antibiyofilm Performansı

Süperhidrofobik yüzeylerin antibiyofilm performansındaki en önemli sorunlardan biri, başlangıçta elde edilen yüzey özelliklerinin zaman içerisinde korunmasıdır. Proteinlerin yüzeye adsorpsiyonu, hücre kalıntılarının birikmesi, bakteriyel ekstrasellüler matriks oluşumu, mekanik aşınma ve sterilizasyon işlemleri yüzeyin mikro/nano topografyasını ve kimyasal yapısını değiştirebilir. Bunun sonucunda Cassie–Baxter durumunun kararlılığı azalabilir ve yüzey sıvılarla daha fazla temas etmeye başlayabilir [1]. Bu nedenle bir yüzeyin yalnızca üretim sonrasında yüksek temas açısı göstermesi, uzun dönem antibiyofilm performansının göstergesi olarak kabul edilmemelidir. Yüzeyin tekrarlanan sterilizasyon, mekanik sürtünme, biyolojik sıvılara maruz kalma ve uzun süreli kullanım sonrasında antibakteriyel davranışını koruyabilmesi gerekmektedir. Bu durum, süperhidrofobik yüzey tasarımı dayanıklılık ile biyolojik işlevselliğin birlikte optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır.

3.5.9. Geleceğe Yönelik Çok İşlevli Antibakteriyel Yüzeyler

Gelecekte antibakteriyel süperhidrofobik yüzeylerin yalnızca pasif su iticiliğe dayalı sistemlerden, birden fazla biyolojik fonksiyonu aynı anda yerine getirebilen akıllı yüzeylere dönüşmesi beklenmektedir. Bu yüzeylerde süperhidrofobiklik bakteriyel adezyonu sınırlandırırken, antimikrobiyal bileşenler yüzeye ulaşan bakterilerin canlılığını kontrol edebilir. Buna ek olarak antifouling ve doku-uyumlu fonksiyonların aynı yüzeyde birleştirilmesi, biyomedikal cihazların kullanım güvenliğini artırabilir [38, 80]. Özellikle çevresel koşullara yanıt verebilen uyaran-duyarlı yüzeyler, antibakteriyel yüzey mühendisliğinde yeni bir yaklaşım sunmaktadır. pH, sıcaklık, ışık veya diğer çevresel değişimlere yanıt olarak yüzey ıslanabilirliğinin veya antimikrobiyal aktivitesinin değiştirilebilmesi, yüzeyin yalnızca pasif bir bariyer olarak değil, biyolojik çevreyi algılayan ve buna uygun yanıt veren dinamik bir sistem olarak tasarlanmasına olanak sağlayabilir.

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeyler antibakteriyel ve antibiyofilm uygulamalarda bakteriyel adezyonun erken aşamada sınırlandırılması açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak süperhidrofobiklik tek başına bakterisidal bir mekanizma değildir ve yüzeyin biyolojik ortamda uzun süreli kararlılığı kritik bir sınırlamadır. Bu nedenle başarılı bir antibakteriyel biyomedikal yüzey; düşük bakteriyel adezyon, biyolojik güvenlik, mekanik dayanıklılık, uzun dönem stabilite ve hedef doku ile uyumluluk özelliklerini birlikte sağlamalıdır. Gelecekte süperhidrofobik yapıların antimikrobiyal, antifouling ve doku-uyumlu fonksiyonlarla bütünleştirildiği çok işlevli yüzeylerin, implant ve tıbbi cihaz kaynaklı enfeksiyonların kontrolünde daha önemli bir rol üstlenmesi beklenmektedir.

4. Gelecek Perspektifi

Süperhidrofobik yüzeylerin gelişimi, başlangıçta temel olarak sıvıların yüzeyden uzaklaştırılması ve yüzeyin ıslanabilirliğinin azaltılması üzerine kurulmuş olsa da, günümüzde bu yaklaşım giderek daha kapsamlı bir yüzey mühendisliği paradigmasına dönüşmektedir. Özellikle biyomedikal uygulamalarda bir yüzeyin yalnızca yüksek temas açısına sahip olması, klinik başarının sağlanması için yeterli değildir. Yüzeyin protein adsorpsiyonu, hücre adezyonu, bakteriyel kolonizasyon, biyofilm oluşumu, inflamatuvar yanıt, mekanik dayanım ve uzun süreli stabilite gibi çok sayıda biyolojik ve fiziksel parametre ile etkileşimi birlikte değerlendirilmelidir [1, 81].

Bu nedenle geleceğin süperhidrofobik yüzeylerinin, yalnızca “su itici yüzeyler” olarak değil, biyolojik çevre ile kontrollü etkileşim kurabilen **çok işlevli ve dinamik biyolojik arayüzler** olarak tasarlanması beklenmektedir. Bu dönüşümde ileri yüzey modifikasyon teknikleri, mikro/nano ölçekli topografik tasarım, 3B baskı, akıllı malzemeler, hesaplamalı modelleme ve yapay zekâ destekli tasarım yaklaşımları önemli rol oynayacaktır. Böylece yüzey tasarımı “en yüksek süperhidrofobiklik”

hedefinden, **belirli bir biyomedikal gereksinim için en uygun yüzey özelliklerinin birlikte optimize edilmesi** yaklaşımına geçilecektir [82].

4.1. Pasif Su İticilikten Dinamik Biyolojik Arayüzlere

Geleneksel süperhidrofobik yüzey tasarımında temel hedef, yüzey ile sıvı arasındaki temas alanını azaltmak ve yüksek temas açısı ile düşük kayma açısı elde ederek sıvıların yüzeyden kolayca uzaklaştırılmasını sağlamaktır. Bu yaklaşım, özellikle antibakteriyel ve biyofouling önleyici yüzeylerde önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte biyolojik sistemler statik değildir. Biyolojik sıvıların bileşimi, protein içeriği, pH, iyonik ortam, hücre yoğunluğu ve mekanik koşullar zaman içerisinde değişebilmektedir. Dolayısıyla biyomedikal yüzeylerin de çevresel koşullara karşı statik özelliklerini korumak yerine, bu değişimlere yanıt verebilecek şekilde tasarlanması giderek daha önemli hale gelmektedir [83]. Bu doğrultuda gelecekteki süperhidrofobik yüzeyler, **pasif su iticilikten dinamik biyolojik arayüzlere** doğru evrilebilir. pH, sıcaklık, iyonik güç, elektriksel uyarı, ışık veya mekanik stres gibi çevresel uyarılara yanıt verebilen akıllı yüzeylerin süperhidrofobik özelliklerle birleştirilmesi, yüzeyin biyolojik çevreyle etkileşiminin kontrollü olarak değiştirilmesine olanak sağlayabilir. Örneğin başlangıçta süperhidrofobik olan bir yüzey, belirli bir biyolojik koşul altında kontrollü olarak daha hidrofilik hale getirilebilir veya yüzeyin protein ve hücre etkileşimleri uygulamanın gereksinimine göre değiştirilebilir [84]. Bu yaklaşım özellikle implant yüzeyleri, biyosensörler, yara örtüleri ve mikroakışkan biyomedikal sistemler açısından önem taşımaktadır. Burada amaç yalnızca biyolojik materyalin yüzeye tutunmasını engellemek değil, **hangi biyolojik bileşenin, hangi zamanda ve hangi koşulda yüzeyle etkileşeceğini kontrol edebilmek**tedir. Dolayısıyla gelecekte süperhidrofobik yüzey kavramının “anti-ıslanma” fonksiyonundan “kontrollü biyolojik etkileşim” fonksiyonuna doğru genişlemesi beklenmektedir.

Bu perspektif, süperhidrofobikliğin tek başına bir yüzey performans göstergesi olarak değerlendirilmesinden ziyade, yüzey enerjisi, topografya, kimyasal fonksiyonellik ve biyolojik yanıtın birlikte ele alındığı **çok parametrelili arayüz mühendisliği** yaklaşımını gerekli kılmaktadır.

4.2. Yapay Zekâ ve Hesaplamalı Yüzey Tasarımı

Süperhidrofobik yüzeylerin performansı; yüzey kimyası, mikro/nano topografya, pürüzlülük, hiyerarşik yapı, yüzey enerjisi ve üretim koşulları arasındaki karmaşık etkileşimler tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle istenen yüzey özelliklerine yalnızca deneysel deneme-yanılma yoluyla ulaşılması zaman alıcı ve maliyetli olabilmektedir. Gelecekte bu sürecin **hesaplamalı modelleme, makine öğrenmesi ve yapay zekâ destekli optimizasyon** yöntemleriyle önemli ölçüde hızlandırılması mümkündür.

Özellikle farklı yüzey tasarım parametreleri ile temas açısı, kayma açısı, yüzey pürüzlülüğü, mekanik dayanım ve biyolojik yanıt arasındaki ilişkilerin büyük veri kümeleri üzerinden modellenmesi, yeni yüzeylerin tasarımında önemli bir avantaj sağlayabilir. Makine öğrenmesi modelleri, deneysel verilerden yararlanarak belirli bir temas açısına ulaşmak için gerekli topografik özellikleri tahmin edebilir veya farklı üretim parametrelerinin yüzey performansı üzerindeki etkisini önceden belirleyebilir.

Bu yaklaşım yalnızca temas açısının tahminiyle sınırlı değildir. Gelecekte **malzeme-yapı-özellik-biyolojik yanıt** ilişkilerinin aynı model içerisinde değerlendirilmesi mümkün olabilir. Örneğin belirli bir implant uygulaması için hedeflenen mekanik dayanım, antibakteriyel performans ve hücre uyumluluğu birlikte tanımlanarak, yapay zekâ algoritmaları bu gereksinimleri aynı anda karşılayabilecek yüzey mimarisini önerebilir.

Bu nedenle gelecekteki yüzey tasarım sürecinin;

Malzeme seçimi → yüzey topografyası → üretim parametreleri → yüzey özellikleri → biyolojik yanıt → optimizasyon

şeklindeki bütünleşik bir döngüye dönüşmesi beklenmektedir. Böyle bir yaklaşım, deneysel çalışmaların sayısını azaltırken tasarım alanının daha geniş biçimde taranmasına ve daha kısa sürede uygulamaya özgü yüzeylerin geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

Bununla birlikte yapay zekâ destekli tasarımın güvenilir biçimde kullanılabilmesi için yüksek kaliteli, standartlaştırılmış ve farklı biyolojik koşulları temsil eden deneysel veri setlerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle gelecekte yalnızca algoritmaların geliştirilmesi değil, **karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir yüzey performans verilerinin oluşturulması** da önemli bir araştırma alanı olacaktır.

4.3. Kişiselleştirilmiş Biyomedikal Yüzeyler

Biyomedikal uygulamaların geleceğinde önemli eğilimlerden biri de hastaya özgü gereksinimlerin doğrudan tasarım ve üretim sürecine aktarılmasıdır. Özellikle 3B baskı teknolojilerinin gelişmesi, karmaşık geometrilerin yanı sıra yüzey özelliklerinin de uygulamaya özgü olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum süperhidrofobik yüzeyler açısından önemli bir fırsat yaratmaktadır [85].

Geleneksel üretim yaklaşımlarında yüzey özellikleri çoğunlukla üretim sonrasında gerçekleştirilen kaplama veya yüzey modifikasyon işlemleriyle belirlenirken, 3B baskı ile **geometri, gözeneklilik, yüzey topografyası ve fonksiyonel özelliklerin aynı tasarım sürecinde ele alınması** mümkün hale gelebilir. Böylece hastanın anatomik özellikleri ve klinik gereksinimleri doğrultusunda kişiselleştirilmiş yüzey mimarileri geliştirilebilir.

Bu yaklaşım basit biçimde:

Hasta → gereksinim → yüzey tasarımı → kişiselleştirilmiş üretim → biyolojik değerlendirme

şeklinde ifade edilebilir.

Gelecekte bu sürecin yapay zekâ ve ileri görüntüleme teknolojileriyle birleştirilmesi, hastaya özgü yüzey tasarımını daha da ileri taşıyabilir. Örneğin hastanın anatomik verileri kullanılarak oluşturulan dijital model üzerinde, implantın yalnızca geometrisi değil, farklı bölgelerindeki yüzey özellikleri de ayrı ayrı tanımlanabilir. İmplantın bir bölgesinde bakteriyel kolonizasyonu azaltan süperhidrofobik bir yüzey tercih edilirken, hücre tutunmasının gerekli olduğu başka bir bölgede kontrollü hidrofilitiklik veya farklı bir yüzey topografyası oluşturulabilir.

Bu nedenle gelecekte “tek tip yüzey” yaklaşımının yerini, aynı biyomedikal cihaz üzerinde **mekânsal olarak değişken ve uygulamaya özgü yüzey özelliklerinin** bulunduğu fonksiyonel gradyan yüzeylerin alması mümkündür. Böyle bir yaklaşım, süperhidrofobikliğin biyomedikal uygulamalardaki kullanım alanını önemli ölçüde genişletebilir.

5. Sonuç

Süperhidrofobik yüzeyler, benzersiz ıslanma davranışları ve düşük sıvı tutma özellikleri sayesinde biyomedikal yüzey mühendisliğinde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Mikro/nano ölçekli hiyerarşik topografyanın yüzey kimyası ile birlikte tasarlanması; sıvıların, proteinlerin, bakterilerin ve diğer biyolojik bileşenlerin yüzeyle etkileşiminin kontrol edilmesine olanak sağlayabilmektedir. Bu özellikler, özellikle antibakteriyel ve antibiyofilm yüzeyler, biyofouling kontrolü, biyosensörler, implantlar ve yara örtüleri gibi farklı uygulama alanlarında önemli avantajlar ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte bu bölümde tartışıldığı üzere, **süperhidrofobiklik tek başına bir biyomedikal performans kriteri olarak değerlendirilmemelidir**. Çok yüksek bir temas açısının elde edilmesi, yüzeyin biyolojik olarak başarılı veya klinik olarak uygun olduğu anlamına gelmemektedir. Bir biyomedikal yüzeyin başarısı; ıslanabilirlik, yüzey topografyası, kimyasal yapı, mekanik dayanım,

biyoyumluluk, protein adsorpsiyonu, hücre davranışı, bakteriyel kolonizasyon ve uzun dönemli stabilite gibi birbirleriyle ilişkili çok sayıda parametrenin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Bu nedenle gelecekteki araştırmaların temel hedefi, **“en süperhidrofobik yüzeyi” geliştirmekten ziyade, belirli bir biyomedikal uygulamanın gerektirdiği özellikleri optimum biçimde bir araya getiren yüzeyleri tasarlamak** olmalıdır. Bu yaklaşım, süperhidrofobikliğin diğer yüzey fonksiyonlarıyla birlikte ele alındığı çok işlevli yüzeylerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Önümüzdeki dönemde akıllı ve uyarana yanıt veren malzemeler, 3B baskı, mikro/nano üretim teknikleri, hesaplamalı modelleme ve yapay zekâ destekli optimizasyonun birlikte kullanılmasıyla süperhidrofobik yüzeylerin daha kontrollü, öngörülebilir ve kişiselleştirilebilir hale gelmesi beklenmektedir. Özellikle yüzey özelliklerinin yalnızca üretim sonrasında ölçülmesi yerine, **tasarım aşamasında öngörülmesi ve biyolojik gereksinimlere göre optimize edilmesi**, yeni nesil biyomedikal yüzey mühendisliğinin temel yaklaşımlarından biri olacaktır.

Sonuç olarak süperhidrofobik yüzeylerin geleceği, yalnızca **suyu uzaklaştıran pasif yüzeylerden**, biyolojik çevreyi algılayabilen, değişen koşullara yanıt verebilen ve biyolojik etkileşimleri yönlendirebilen **dinamik, çok işlevli ve kişiselleştirilebilir biyolojik arayüzlere** doğru bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu dönüşüm gerçekleştiğinde süperhidrofobiklik, kendi başına nihai hedef olmaktan çıkarak; antibakteriyel, biyoyumlu, mekanik olarak dayanıklı, akıllı ve uzun ömürlü biyomedikal yüzeylerin tasarımında kullanılan güçlü bir **yüzey mühendisliği aracına** dönüşecektir.

Sonuç olarak, süperhidrofobiklik tek başına hedef değildir; asıl hedef, belirli bir biyomedikal uygulamanın gerektirdiği biyolojik, mekanik, kimyasal ve yüzeysel özellikleri aynı anda sağlayabilen, uzun ömürlü ve işlevsel biyolojik arayüzlerin geliştirilmesidir.

Kaynaklar

- Falde, E. J., Yohe, S. T., Colson, Y. L., & Grinstaff, M. W. (2016). Superhydrophobic materials for biomedical applications. *Biomaterials*, 104, 87-103.
- Luo, J., Yu, H., Lu, B., Wang, D., & Deng, X. (2022). Superhydrophobic Biological Fluid-Repellent Surfaces: Mechanisms and Applications. *Small Methods*, 6(12), 2201106.)
- Vilaseca, P., Dawson, K. A., & Franzese, G. (2012). Understanding surface-adsorption of proteins: the Vroman effect. *arXiv preprint arXiv:1202.3796*.)
- Oliveira, S. M., Alves, N. M., & Mano, J. F. (2014). Cell interactions with superhydrophilic and superhydrophobic surfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(8-9), 843-863.
- Ashok, D., Cheeseman, S., Wang, Y., Funnell, B., Leung, S. F., Tricoli, A., & Nisbet, D. (2023). Superhydrophobic surfaces to combat bacterial surface colonization. *Advanced Materials Interfaces*, 10(24), 2300324.;
- Gizer, G., Önal, U., Ram, M., & Şahiner, N. (2023). Biofouling and mitigation methods: A review. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(2).)
- Morán, G., & Méallet-Renault, R. (2017). Superhydrophobic surfaces toward prevention of biofilm-associated infections. In *Bacterial Pathogenesis and Antibacterial Control*. IntechOpen.
- Lourenço, B. N., Marchioli, G., Song, W., Reis, R. L., van Blitterswijk, C. A., Karperien, M., ... & Mano, J. F. (2012). Wettability influences cell behavior on superhydrophobic surfaces with different topographies. *Biointerphases*, 7(1), 46.
- Khanmohammadi Chenab, K., Sohrabi, B., & Rahmanzadeh, A. (2019). Superhydrophobicity: advanced biological and biomedical applications. *Biomaterials science*, 7(8), 3110-3137.
- Lima, A. C., & Mano, J. F. (2015). Micro-/nano-structured superhydrophobic surfaces in the biomedical field: part I: basic concepts and biomimetic approaches. *Nanomedicine*, 10(1), 103-119.;
- Lima, A. C., & Mano, J. F. (2015). Micro/nano-structured superhydrophobic surfaces in the biomedical field: part II: applications overview. *Nanomedicine*, 10(2), 271-297.)
- Mitra, S. P. (2020). Protein adsorption on biomaterial surfaces: subsequent conformational and biological consequences—a review. *J. Surf. Sci. Technol*, 36(1-2), 7-38.
- Assfalg, M. (2021). Protein adsorption and conformational changes. *Molecules*, 26(23), 7079.
- Awashra, M., & Jokinen, V. (2025). Superhydrophobic Cell-Repellent Microstructures: Plastron-Mediated Inhibition of A549 Epithelial Cell Adhesion. *Small*, 21(40), e06022.)
- Ratner, B. D., & Horbett, T. A. (2004). The role of adsorbed proteins in tissue response to biomaterials. *Biomaterial science—An introduction to materials in medicine*.
- Maskarinec, S. A., & Tirrell, D. A. (2005). Protein engineering approaches to biomaterials design. *Current opinion in biotechnology*, 16(4), 422-426.
- Sayin, E., Baran, E. T., & Hasirci, V. (2014). Protein-based materials in load-bearing tissue-engineering applications. *Regenerative Medicine*, 9(5), 687-701.
- Schmidt, D. R., Waldeck, H., & Kao, W. J. (2009). Protein adsorption to biomaterials. In *Biological interactions on materials surfaces: Understanding and controlling protein, cell, and tissue responses* (pp. 1-18). New York, NY: Springer US.

- Li, Y., Ji, R., Li, Y., Li, J., & Chen, H. (2024). Early-Stage Protein Adsorption Sequence on Blood-Contacting Surfaces: Answer to Vroman's Question. *Analytical Chemistry*, 96(25), 10434-10442.
- Yu, H., Wang, D., Yang, X., Jin, X., Cheng, S., Zhu, Y., ... & Deng, X. (2025). Tailoring Protein Adsorption at the Solid-Liquid Interface for Long-Term Superhemophobicity. *Advanced Materials*, 37(30), 2502388.
- Lourenço, B. N., Marchioli, G., Song, W., Reis, R. L., van Blitterswijk, C. A., Karperien, M., ... & Mano, J. F. (2012). Wettability influences cell behavior on superhydrophobic surfaces with different topographies. *Biointerphases*, 7(1), 46.)
- Llopis-Hernandez, V., Rico, P., Ballester-Beltran, J., Moratal, D., & Salmeron-Sanchez, M. (2011). Role of surface chemistry in protein remodeling at the cell-material interface. *PLoS One*, 6(5), e19610.
- SS, G., & Nayak, S. (2026). Protein adsorption at material interface: mechanistic design framework for engineering ceramic scaffolds for bone repair applications. *BioMedical Engineering OnLine*.
- Dede Eren, A., Lucassen, A. W., Tuvshindorj, U., Truckenmüller, R., Giselsbrecht, S., Eren, E. D., ... & de Boer, J. (2022). Cells dynamically adapt to surface geometry by remodeling their focal adhesions and actin cytoskeleton. *Frontiers in cell and developmental biology*, 10, 863721.)
- Erramilli, S., & Genzer, J. (2019). Influence of surface topography attributes on settlement and adhesion of natural and synthetic species. *Soft Matter*, 15(20), 4045-4067.).
- Hejazi, I., Seyfi, J., Hejazi, E., Sadeghi, G. M. M., Jafari, S. H., & Khonakdar, H. A. (2015). Investigating the role of surface micro/nano structure in cell adhesion behavior of superhydrophobic polypropylene/nanosilica surfaces. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 127, 233-240.
- Ferrari, M., Cirisano, F., & Morán, M. C. (2019). Mammalian cell behavior on hydrophobic substrates: influence of surface properties. *Colloids and Interfaces*, 3(2), 48.
- Kumashiro, Y., Yamato, M., & Okano, T. (2010). Cell attachment-detachment control on temperature-responsive thin surfaces for novel tissue engineering. *Annals of biomedical engineering*, 38(6), 1977-1988.)
- Li, S., Fan, Y., Liu, Y., Niu, S., Han, Z., & Ren, L. (2021). Smart bionic surfaces with switchable wettability and applications. *Journal of Bionic Engineering*, 18(3), 473-500.;
- Bai, X., Gou, X., Zhang, J., Liang, J., Yang, L., Wang, S., ... & Chen, F. (2023). A review of smart superwetting surfaces based on shape-memory micro/nanostructures. *Small*, 19(15), 2206463.)
- Abebe, G. M. (2026). Biofilm Formation on Indwelling Medical Devices: A Review of Health and Economic Implications. *International Journal of Microbiology*, 2026, 3474643.)
- Hwang, G. B., Page, K., Patir, A., Nair, S. P., Allan, E., & Parkin, I. P. (2018). The anti-biofouling properties of superhydrophobic surfaces are short-lived. *ACS nano*, 12(6), 6050-6058.
- Krasowska, A., & Sigler, K. (2014). How microorganisms use hydrophobicity and what does this mean for human needs?. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 4, 112.)
- Verran, J., Packer, A., Kelly, P., & Whitehead, K. A. (2010). The retention of bacteria on hygienic surfaces presenting scratches of microbial dimensions. *Letters in applied microbiology*, 50(3), 258-263.
- Wu, S., Zhang, B., Liu, Y., Suo, X., & Li, H. (2018). Influence of surface topography on bacterial adhesion: A review. *Biointerphases*, 13(6).)
- Graham, M. V., & Cady, N. C. (2014). Nano and microscale topographies for the prevention of bacterial surface fouling. *Coatings*, 4(1), 37-59.

- Asokan, S., Pandey, R. K., Jalil, M. A., Abd Alhussen, S. K., Yousif, S. I. A., Abbas, R. K., ... & Atiyah, M. M. (2026). Biofilm associated infections on medical devices: pathogenesis, diagnostic challenges, and control strategies. *The Microbe*, 100712.
- Guo, Q., Wang, Y., Wang, J., Wang, L., & Wang, L. Advanced Synergistic Antibacterial Interfaces Enabled by Micro/Nanostructure–Superhydrophobicity Coupling: Mechanisms and Applications. *Frontiers in Microbiology*, 17, 1928666.
- Vesterlund, S., Paltta, J., Karp, M., & Ouwehand, A. C. (2005). Measurement of bacterial adhesion—in vitro evaluation of different methods. *Journal of microbiological methods*, 60(2), 225-233.
- Priya, S., Malviya, R., Srivastava, S., Siang, T. C., & Aseeri, A. A. (2026). Bioinspired nanostructured surfaces for antimicrobial and antifouling applications. *Colloid and Interface Science Communications*, 70, 100863.;
- Luo, Q., Peng, J., Chen, X., Zhang, H., Deng, X., Jin, S., & Zhu, H. (2022). Recent advances in multifunctional mechanical–chemical superhydrophobic materials. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 947327.;
- Quan, Y. Y., Chen, Z., Lai, Y., Huang, Z. S., & Li, H. (2021). Recent advances in fabricating durable superhydrophobic surfaces: a review in the aspects of structures and materials. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(4), 1655-1682.)
- Kuchinka, J., Willems, C., Telyshev, D. V., & Groth, T. (2021). Control of blood coagulation by hemocompatible material surfaces—a review. *Bioengineering*, 8(12), 215.
- Wu, X. H., Liew, Y. K., Mai, C. W., & Then, Y. Y. (2021). Potential of superhydrophobic surface for blood-contacting medical devices. *International journal of molecular sciences*, 22(7), 3341.
- Manivasagam, V. K., & Popat, K. C. (2022). Improved hemocompatibility on superhemophobic micro–nano-structured titanium surfaces. *Bioengineering*, 10(1), 43.
- Lai, C. Q., Chia Wei Shen, J., Chua Wei Cheng, W., & Yap, C. H. (2016). A near-superhydrophobic surface reduces hemolysis of blood flow in tubes. *RSC Advances*, 6(67), 62451-62459.)
- Lee, S. H., Yoo, S., Kim, S. H., Kim, Y. M., Han, S. I., & Lee, H. (2025). Nature-inspired surface modification strategies for implantable devices. *Materials Today Bio*, 31, 101615.)
- Arciola, C. R., Campoccia, D., & Montanaro, L. (2018). Implant infections: adhesion, biofilm formation and immune evasion. *Nature reviews microbiology*, 16(7), 397-409.
- Souza, J. G. S., Nagay, B. E., Martins, R., Bertolini, M., Shibli, J. A., Aparicio, C., ... & Barão, V. A. (2025). Engineered surface strategies to manage dental implant-related infections. *Periodontology 2000*.
- Cruz, M. B., Silva, N., Marques, J. F., Mata, A., Silva, F. S., & Caramês, J. (2022). Biomimetic implant surfaces and their role in biological integration—a concise review. *Biomimetics*, 7(2), 74.
- Wang, Z., Paul, S., Stein, L. H., Salemi, A., & Mitra, S. (2022). Recent developments in blood-compatible superhydrophobic surfaces. *Polymers*, 14(6), 1075.)
- Zhang, S., Liang, X., Gadd, G. M., & Zhao, Q. (2020). Superhydrophobic coatings for urinary catheters to delay bacterial biofilm formation and catheter-associated urinary tract infection. *ACS Applied Bio Materials*, 3(1), 282-291. ;

- Gong, H., Zhang, G., Liu, J., Su, C., Ye, Y., Gan, Z., ... & Yu, Q. (2025). Super-hydrophilic/super-hydrophobic composite coating on peripherally inserted central venous catheters for enhanced antifouling, antithrombotic, and antibacterial performance. *Chemical Engineering Journal*, 169415.
- Zhang, J., Liu, X., & Zhou, L. (2025). Stable air plastron prolongs biofluid repellency of submerged superhydrophobic surfaces: The effects of surface texture and hysteresis. *Langmuir*, 41(3), 1807–1821.
- Jokinen, V., & Franssila, S. (2018). Superhydrophobic blood-repellent surfaces: Mechanisms of platelet antiadhesion. *Advanced Materials*, 30(23), 1705104.
- Wang, X., Dai, G., Gu, S., Qin, N., Liang, R., Wang, C., & Chen, Y. (2025). Fabrication of superhydrophobic coating on medical polycarbonate surface with anti-biofouling performance and biocompatibility. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 138621.)
- Ozkan, E., Mondal, A., Douglass, M., Hopkins, S. P., Garren, M., Devine, R., ... & Handa, H. (2022). Bioinspired ultra-low fouling coatings on medical devices to prevent device-associated infections and thrombosis. *Journal of colloid and interface science*, 608, 1015-1024.
- Yang, Y. J., & Gao, Z. F. (2022). Superwetable biosensor for disease biomarker detection. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 872984.
- Millner, P. A., Hays, H. C. W., Vakurov, A., Pchelintsev, N. A., Billah, M. M., & Rodgers, M. A. (2009, February). Nanostructured transducer surfaces for electrochemical biosensor construction—Interfacing the sensing component with the electrode. In *Seminars in cell & developmental biology* (Vol. 20, No. 1, pp. 34-40). Academic Press.;
- Campuzano, S., Pedrero, M., Yáñez-Sedeño, P., & Pingarrón, J. M. (2019). Antifouling (bio) materials for electrochemical (bio) sensing. *International journal of molecular sciences*, 20(2), 423.)
- McHale, G., Shirtcliffe, N. J., & Newton, M. I. (2004). Contact-angle hysteresis on super-hydrophobic surfaces. *Langmuir*, 20(23), 10146-10149.)
- Wang, J., Wu, Y., Cao, Y., Li, G., & Liao, Y. (2020). Influence of surface roughness on contact angle hysteresis and spreading work. *Colloid and Polymer Science*, 298(8), 1107-1112.
- Sinha Mahapatra, P., Ganguly, R., Ghosh, A., Chatterjee, S., Lowrey, S., Sommers, A. D., & Megaridis, C. M. (2022). Patterning wettability for open-surface fluidic manipulation: fundamentals and applications. *Chemical reviews*, 122(22), 16752-16801.
- Squires, T. M., & Quake, S. R. (2005). Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. *Reviews of modern physics*, 77(3), 977-1026.
- O’Loughlin, M., Priest, C., Popescu, M. N., & Ralston, J. (2013). Patterning of wettability for controlling capillary-driven flow in closed channels. *Journal of colloid and interface science*, 402, 259-266.
- Yang, C., Zeng, Q., Huang, J., & Guo, Z. (2022). Droplet manipulation on superhydrophobic surfaces based on external stimulation: A review. *Advances in Colloid and interface Science*, 306, 102724.
- Shirtcliffe, N. J., & Roach, P. (2012). Superhydrophobicity for antifouling microfluidic surfaces. In *Microfluidic Diagnostics: Methods and Protocols* (pp. 269-281). Totowa, NJ: Humana Press.)
- Filippidou, M. K., Kaprou, G., Loukas, C. M., Petrou, P., Tserepi, A., & Chatzandroulis, S. (2026). Fully Integrated Lab-on-a-Chip on Standard 4-layer Printed Circuit Board Incorporating DNA Amplification and Detection on Reduced Graphene Oxide Sensors. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 100828.
- Chang, H. I., & Wang, Y. (2011). Cell responses to surface and architecture of tissue engineering scaffolds. In *Regenerative medicine and tissue engineering-cells and biomaterials*. InTechOpen.)
- Llopis-Hernandez, V., Rico, P., Ballester-Beltran, J., Moratal, D., & Salmeron-Sanchez, M. (2011). Role of surface chemistry in protein remodeling at the cell-material interface. *PLoS One*, 6(5), e19610.

- Ueda, E., & Levkin, P. A. (2013). Emerging applications of superhydrophilic-superhydrophobic micropatterns. *Advanced Materials*, 25(9), 1234-1247.
- Kim, M. S., Khang, G., & Lee, H. B. (2008). Gradient polymer surfaces for biomedical applications. *Progress in polymer science*, 33(1), 138-164.
- Cheng, A., Schwartz, Z., Kahn, A., Li, X., Shao, Z., Sun, M., ... & Chen, H. (2019). Advances in porous scaffold design for bone and cartilage tissue engineering and regeneration. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 25(1), 14-29.
- Rao, Q., Weng, L., Zhang, J., Liu, D., Zhang, W., Chen, S., ... & Zheng, S. (2023). Research progress in superhydrophobic titanium-based implants for antibacterial applications. *Coatings*, 13(2), 419.
- Yahyaie, H., Makki, H., & Mohseni, M. (2019). Superhydrophobic coatings for medical applications. In *Superhydrophobic Polymer Coatings* (pp. 321-338). Elsevier.)
- Zhang, S., Deng, Z., Wang, Y., & Zhao, C. (2025). A Review of Anticoagulant Surface Modification Strategies for Blood-Contacting Materials: From Inertness to Bioinspired and Biointegration. *Coatings*, 15(12), 1486.
- Furukawa, W. F., Bryers, J. D., & Robbins, J. (2006). Biomaterial-centered infection: microbial adhesion. *Science*.)
- Arciola, C. R., Campoccia, D., & Montanaro, L. (2018). Implant infections: adhesion, biofilm formation and immune evasion. *Nature reviews microbiology*, 16(7), 397-409.
- Wang, B., Ding, X., Huang, R., Xu, Y., Zhu, G., & Liu, T. (2026). Asymmetrically Wetted Trilayer-Structured Wound Dressing with Unidirectional Moisture Transport and Hemostatic Function. *ACS Applied Bio Materials*, 9(5), 2535-2550.
- He, Z., Yang, X., Wang, N., Mu, L., Pan, J., Lan, X., ... & Deng, F. (2021). Anti-biofouling polymers with special surface wettability for biomedical applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 9, 807357.;
- Zhao, J., Lv, J., Otgonbayar, Z., Srikrajang, S., Zhou, C., Chen, Y., ... & Oh, W. C. (2025). Recent advance in superhydrophobic materials for biomedical applications: Comprehensive review. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 109, 107018.
- Karimdoost Yasuri, A. (2026). Review of surface engineering through wettability control: innovations, sustainability, and interdisciplinary impact. *Journal of Coatings Technology and Research*, 23(1), 255-272.
- Zhaxybayeva, A. G., Hashami, M., Nazhipkyzy, M., Aldiyarov, N. U., Kaliyeva, S. S., Kassenova, N. B., ... & Otenov, A. T. (2026). Smart Hydrophobic Surfaces: Nature-Inspired Designs for Sustainable Nanostructure Technologies. *Nanomaterials*, 16(13), 809.
- Shao, H., Yin, K., Xu, N., Zhang, Y., Shi, Z., Zhou, Y., ... & Deng, X. (2025). Adaptive surfaces with stimuli-responsive wettability: from tailoring to applications. *ACS nano*, 19(7), 6729-6747.
- Xu, J., Wang, Z., Wang, L., Liu, Y., Chen, X., Wang, X., & Dong, Z. (2025). Fabrication of Robust Superhydrophobic Surfaces on 3D-Printed Polymer Scaffolds via Confined Phase Separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(32), 46396-46408.)

BÖLÜM 2

MOLEKÜLER MARKÖRLERİN BİTKİLERDE GENETİK ÇEŞİTLİLİĞİN BELİRLENMESİNDE KULLANIMI

Begüm TERZİ AKSOY¹, Özlem ATEŞ SÖNMEZOĞLU²

¹ Begüm TERZİ AKSOY, Dr. Öğr. Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, <https://orcid.org/0000-0002-3264-2257>

² Prof. Dr. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, <https://orcid.org/0000-0002-3157-7895>

1. GİRİŞ

Bitkisel çeşitlilik değişen çevresel faktörler ve giderek artan nüfus artışına bağlı dolaylı etkenler nedeniyle genetik erozyona uğramakta ve bitkisel gen kaynakları yok olma tehlikesi ile karşı karşıya kalmaktadır. İnsan beslenmesinde kullanılan ve yetiştiriciliği yapılan türlere ait genetik çeşitliliğin korunması, bitkisel üretimin sürdürülebilirliğini sağlayacak etkenlerin başında gelmektedir. Bitkisel gen kaynaklarındaki genetik varyasyonun belirlenmesi, bitki genetik kaynaklarının korunması ve etkin bir şekilde kullanımı açısından oldukça önemlidir.

Genetik tanımlama ve karakterizasyon amacıyla kullanılan tekniklerin başında morfolojik, protein ve moleküler markörler gelmektedir. Moleküler markörler çevreden etkilenmeyişi, bitki gelişiminin her aşamasında kullanılabilmeleri ve polimorfizm oranlarının yüksek olması gibi avantajları nedeniyle diğer tekniklere oranla daha güvenilir olduklarından yaygın olarak tercih edilmektedir. Büyük ve kompleks genom yapısına sahip bitki türlerinde bile sağladıkları kolaylıklar nedeniyle kullanımı giderek artmaktadır. Moleküler tekniklerdeki ilerlemeler, farklı bitki genomlarında kullanılabilen ayırt edici ve tanımlayıcı moleküler markör çeşitliliğinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Moleküler DNA markörleri bitki biyoteknolojisi ve genetiği araştırmalarında genetik karakterizasyon, seleksiyon ve filogenetik analizler gibi alanlarda diğer markörlere kıyasla daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Moleküler markör tekniklerinin kullanımı bitkilerde genetik çeşitliliğin belirlenmesi, bu genetik çeşitliliğin içinden istenilen genlerin bulunması ve ticari çeşitlere başarılı bir şekilde aktarılması, genotipler arasındaki genetik varyasyonun tespit edilmesi ve bitkisel gen kaynaklarının korunmasına katkıda bulunmaktadır.

MOLEKÜLER MARKÖRLER

Bitki biyoteknolojisi ve genetik mühendisliğindeki ilerlemeler ve gelişen uygulamalar, bu alanlarda kullanılan moleküler markör teknolojilerini oldukça önemli bir biyoteknolojik araç yapmıştır. Moleküler markörler bir gen bölgesi ya da gen bölgesi ile ilgili DNA parçasından geliştirilmektedir. Son yıllarda moleküler teknolojilerdeki gelişmeler, çok sayıda bitkide kullanılabilen farklı markör tekniklerinin geliştirilmesini sağlamıştır.

Genetik yapının ve kalıtsal özelliklerin detaylı olarak analiz edildiği genetik karakterizasyon tekniklerinin başında morfolojik, biyokimyasal ve moleküler markörler yer almaktadır. Morfolojik markörlerin kullanıldığı fenotipik karakterlerin çevre faktörlerinden etkilenmeleri ve sayılarının az oluşu, bu markör tipinin güvenilirliğini kısıtlamaktadır. Biyokimyasal

markörlerin ise sayılarının az olmasının yanı sıra bitkilerin belirli gelişme dönemlerinde özel dokularda analiz edilmeleri gerekliliği gibi dezavantajları vardır. Moleküler markörlerin kullanımı morfolojik ve biyokimyasal markörlerin kısıtlamaları ve dezavantajlarını ortadan kaldırmıştır (Ateş Sönmezoğlu ve Balkan, 2014; Yavuzaslanoglu vd., 2020).

Moleküler markörler çevreden etkilenmemeleri, tekrarlanabilir olmaları, genomda birden fazla bölgenin incelenmesine mümkün kılmaları, farklı ve çok çeşitli bitki dokularında tanımlanabilmeleri, güvenilir olmaları, ko-dominant yapıları, yüksek bilgi içeriği ve geniş varyasyon göstermeleri gibi üstün özellikleri nedenleriyle bitki biyoteknolojisi ve genetiği araştırmalarında moleküler karakterizasyon, genetik teşhis ve filogenetik analizler gibi alanlarda diğer markörlere kıyasla çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Ateş Sönmezoğlu ve 2022). Kompleks ve büyük genom yapısına sahip bitkilerde de oldukça bilgi verici olmaları sebebiyle DNA markörleri kullanılarak türlerin filogenetik olarak akrabalık dereceleri belirlenerek taksonomik tanımlamaları yapılabilmektedir (Ateş Sönmezoğlu ve Kütük, 2014). Moleküler markörler, bitki gelişiminin erken dönemlerinde bile çevre etkisinin altında kalmadan genotip tanımlama ve genetik karakterizasyon amacıyla kullanılmaktadır.

Moleküler markörler aracılığı ile DNA'daki farklılık ve benzerlikler tespit edilebilmektedir. Bu markörler morfolojik ve biyokimyasal markörlere kıyasla çok daha yüksek polimorfizm göstermektedir. DNA dizisinde ortalama olarak her 300 veya 500 nükleotidde bir bulunan varyasyonları gösteren polimorfizm, bir markörün farklı genotipleri ayırt edebilme özelliğidir. Spesifik özellikleri kodlayan diziler (ekzonlar) içerisinde oluşan varyasyonlar gözlenebilir fiziksel değişikliklere neden olmaktadır. Ancak varyasyonların çoğu herhangi bir özelliği kodlamayan diziler (intronlar) içerisinde gerçekleştiği için çoğunlukla fiziksel görünüş veya fonksiyon üzerinde etkisi olmaz. Bu varyasyonlar sadece DNA düzeyinde belirlenebilir ve moleküler markör olarak kullanılmaktadırlar. Markörlerin polimorfizm gösterme oranları bitki türüne göre farklı markör tiplerinde değişkenlik göstermektedir (Özcan vd., 2004).

Genomda yaygın olarak çok sayıda bulunmaları, lokusa özgü olmaları, ko-dominat yapıları, tekrarlanabilirlik ve güvenilirlik oranlarının yüksek olması, yüksek bilgi içeriği, yüksek polimorfizm oranı, analizlerinin kolay ve hızlı, düşük maliyetli ve tekrarlanabilir olması gibi avantajlar yönünden araştırmalara en uygun markör tipi seçeneğini sunabilmek için çok sayıda moleküler markör geliştirilmiştir. Geliştirilen ilk moleküler markör tekniği hibridizasyona dayalı olan RFLP (sınırlandırılmış parça uzunluğu polimorfizmi) bitkilerde fiziksel haritalama

çalışmalarında kullanılmış, ancak Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) teknolojisinin keşfiyle birlikte daha hızlı ve kolay analizler gerektiren RAPD, AFLP, SSR, ISSR, STS ve SNP gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Moleküler DNA markörleri temel olarak iki gruba ayrılmaktadır; i) hibridizasyona dayalı restriksiyon parça uzunluğu polimorfizmi (RFLP), ii) Polimeraz Zincir Reaksiyonuna (PCR) dayalı markörler. PCR esaslı moleküler markörler bitki ıslahı ve biyoteknolojisi araştırmalarında sağladıkları zaman, işgücü ve maliyet tasarrufu nedenleriyle büyük oranda tercih edilmektedir. Bununla birlikte yüksek polimorfizm oranı, ko-dominant olmaları, daha az miktarda DNA'ya ihtiyaç duyulması, otomasyona uygunluğu, daha bilgi verici ve güvenilir olmaları gibi öne çıkan avantajları ile günümüzde kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır.

PCR'ye dayalı moleküler DNA markörlerinden en önemlilerini; rastgele çoğaltılmış polimorfik DNA (RAPD), basit dizi tekrarları (mikrosatelitler veya SSR), dizisi etiketlenmiş alanlar (STS) ve çoğaltılmış parça uzunluğu polimorfizmi (AFLP) gibi belirleyiciler oluşturmaktadır. Moleküler markörler bitkilerde genetik materyallerin moleküler karakterizasyonu, DNA parmak izlerinin çıkarılması, çeşit tanımlaması ve filogenetik analizler başta olmak üzere çok farklı amaçlarla kullanılabilmektedir (Ateş Sönmezoğlu vd., 2022). Bu markörlerin kullanımı ile genetik varyasyon incelenerek türlerin taksonomik tanımlaması ve filogenetik akrabalıkları belirlenebilmektedir (Röder vd., 1995). Bununla birlikte bitkisel gen merkezi konumunda veya genetik çeşitliliği zengin olan ülkelerde yabani ve yerel gen kaynaklarının korunması bakımından da büyük önem taşımaktadır.

Moleküler markörler genotiplerin tanımlanması, genetik çeşitliliğin belirlenmesi, kantitatif karakter lokuslarının (QTL) tespiti ve haritalanması, markör destekli ıslah (MAS) ile gen aktarım çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Germplazm kaynaklarındaki genetik çeşitliliğin belirlenmesi, üstün ve elit genotiplerin tespiti ve korunması ile bitki ıslahının gelişiminde moleküler markörlerin katkısı oldukça önemlidir. Moleküler markörler çevre ve iklim değişikliklerinin bitkilerde meydana getirdiği etkilerin ve stres faktörlerine dayanıklı genotiplerin tespitinde de büyük öneme sahiptir (Jump ve Peñuelas, 2005). Moleküler markör tekniklerinin gelişimi bitki biyoteknolojisi, genetiği ve ıslahı çalışmalarına büyük katkılar sunmaktadır.

Markör destekli seleksiyon (MAS) ile çevre etkileri elimine edilmekte ve bitki gelişiminin herhangi bir evresinde seleksiyon yapılabilmektedir. Markör destekli seleksiyonda kullanılan

moleküler markörler arasında en çok tercih edileni DNA markörleridir (Güleç vd., 2010; Ateş Sönmezoğlu ve Keskin, 2015).

2. MOLEKÜLER MARKÖRLERİN BİTKİ GENETİK ÇEŞİTLİLİĞİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANIMI

Bitki genetik kaynaklarının sürdürülebilir biçimde korunması ve bitki ıslahı programlarında etkin olarak kullanılabilmesi için öncelikle bu gen kaynaklarında bulunan kalıtsal farklılıkların belirlenmesini gerekmektedir. Moleküler markör analizleri, genetik materyaller arasındaki benzerlik ve farklılıkların değerlendirilmesine, akrabalık ilişkilerinin belirlenmesine ve ıslah çalışmalarında yararlanılabilecek genetik varyasyonun tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Yerel ve yabani çeşitlerin moleküler yöntemlerle incelenmesi, bu çeşitlerin genetik yapılarının daha kapsamlı biçimde ortaya çıkarılmasının yanı sıra, hedeflenen özelliklerle ilişkili genetik belirleyicilerin ve allellerin saptanmasına da katkıda bulunmaktadır (Terzi ve Aksoy, 2026). Bu şekilde belirlenen yararlı genetik özelliklerin uygun ıslah hatlarına aktarılması, bitki genetik kaynaklarının değerlendirilmesini ve ıslah yöntemleri ile biyoteknolojik uygulamalarda kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Yerel ve yabani bitki genotiplerindeki genetik çeşitliliğinin belirlenmesi, bitkisel genetik kaynakların korunması ve ıslah programlarında etkin biçimde değerlendirilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bununla birlikte, çok sayıda bitki türüne ait yerel genotiplerin genetik özelliklerinin yeterince incelenmemiş olması, genetik gen kaynakları arasındaki özgün genetik özelliklerin ve farklılıkların tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Moleküler markörlerden yararlanılarak yapılan karakterizasyon çalışmaları, fenotipik değerlendirmeleri tamamlayarak genetik çeşitliliğin daha ayrıntılı ve güvenilir biçimde analiz edilmesine imkân tanımaktadır. Ülkemizin zengin bitkisel genetik kaynaklarının moleküler düzeyde yeterince tanımlanmamış olması, bu materyallerin korunması ve ıslah programlarına kazandırılmasını sınırlamaktadır. Bununla birlikte geleneksel ıslah yöntemleri ve biyoteknolojik araştırmalarda kullanım potansiyellerini de olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenlerle yerel ve yabani bitki çeşitlerinin DNA profillerinin oluşturulması, genetik yakınlık ve farklılıklarının belirlenmesi ve hedeflenen özelliklerle ilişkili genlerinin araştırılması, ıslah çalışmalarında daha etkin ve sürdürülebilir şekilde kullanılmalarını sağlayacaktır (Ateş Sönmezoğlu ve Terzi, 2018).

Bitkisel genetik kaynaklar günümüze kadar farklı amaçlarla değerlendirilse de materyallerin genetik özelliklerinin yeterince tanımlanmamış olması, ıslah programlarında doğrudan veya genitör olarak kullanım olanaklarını sınırlandırmaktadır. Genetik kaynakların moleküler markörler aracılığıyla incelenmesi genetik çeşitliliğin belirlenerek ıslah bakımından üstün özellikler taşıyan materyallerin seçiminde de avantajlar sağlayacaktır. Moleküler karakterizasyon sonucunda elde edilen veriler, genetik materyaller arasındaki farklılık ve benzerliklerin belirlenerek, ıslahta kullanılabilecek uygun genitörlerin seçilmesini kolaylaştırarak ıslah çalışmalarının daha etkin bir şekilde yürütülmesine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte aktarılan gen bölgelerinin DNA markörleri yardımı ile seleksiyonu bitki ıslahı için gerekli süre ve işgücünü önemli ölçüde azalmasına ve başarı oranının artmasına katkıda bulunmaktadır.

Türkiye'nin sahip olduğu bitkisel genetik kaynakların bir bölümünün yeterince tanımlanmamış ve tescil edilmemiş olması, bu materyallerin korunmasını ve genetik potansiyellerinden yararlanılmasını kısıtlamaktadır. Bu bağlamda moleküler markör analizleri; genetik materyallerin kimliklerinin belirlenmesi, çeşitler arasındaki farklılıkların ortaya çıkarılması ve özgün genotiplerin kayıt altına alınması bakımından da önemli bir araç niteliğindedir. Gen bankalarında koruma altına alınan yerel çeşitlerin moleküler düzeyde tanımlanması ve ıslah çalışmalarına kazandırılması oldukça önemlidir. Yerel bitki genotiplerinde moleküler markörlerle yürütülen analizler, çeşitler arasındaki genetik farklılıkların ve varyasyonun incelenmesini sağlamaktadır. Ancak özellikleri ayrıntılı olarak belirlenmemiş materyallerde değerli karakterlerin tanımlanması ve bu özelliklerden ıslah süreçlerinde yararlanılması daha güç olabilmektedir. Bu nedenle moleküler markörlerin genetik karakterizasyon çalışmalarında kullanılarak, yerel çeşitlerdeki genetik varyasyonun belirlenmesi ve ıslah programlarında değerlendirilmesi bakımından oldukça önemlidir (Dreisigacker vd., 2005).

Ancak birçok bitki türünde yerel ve yabani çeşitlerin genetik karakterizasyon çalışmalarının sınırlı kalması, bu materyaller arasındaki genetik farklılıkların ve önemli genetik özelliklerin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum özellikle gen kaynağı niteliği taşıyan yerel çeşitlerin korunmasını güçleştirebilmekte ve zaman içerisinde bu çeşitlerin kaybolma riskini artırmaktadır (Dreisigacker vd., 2005). Bunun yanı sıra, aynı genotipin farklı bölgelerde farklı adlarla yetiştirilmesi veya genetik açıdan farklı materyallerin aynı isimle anılması, çeşitlerin doğru biçimde tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Genetik özellikleri henüz

belirlenmemiş materyallerin bulunması ve aynı çeşit içerisindeki varyasyonun yeterince bilinmemesi de bu sorunları daha karmaşık hale getirmektedir.

Tarımsal üretimde yüksek verimli ve ticari çeşitlerin kullanımının yaygınlaşması, farklı ekolojik koşullara uzun yıllar boyunca uyum sağlamış yerel çeşitlerin üretim sistemlerinden uzaklaşmasına yol açabilmektedir. Bu süreç, bitkisel genetik çeşitliliğin azalması ve yerel genetik kaynakların kaybedilmesi açısından risk oluşturmaktadır. Dolayısıyla yerel çeşitlerin doğru ve güvenilir yöntemlerle tanımlanması; genetik kaynakların korunması, ıslah programlarında değerlendirilmesi, yetiştiricilik uygulamalarının geliştirilmesi ve tarıma dayalı sanayinin ihtiyaç duyduğu özelliklerin belirlenmesi bakımından oldukça önemlidir. Ayrıca, karakterizasyon çalışmalarından elde edilen verilerin uygun veri tabanlarına aktarılması ve uluslararası düzeyde paylaşılması, genetik kaynaklara ilişkin bilginin erişilebilirliğini ve bu kaynakların farklı araştırmalarda kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Bitkisel genetik kaynaklarda bulunan varyasyonun belirlenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve bu kaynakların sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesi için gerekli temel çalışmalardan biridir. Genetik farklılıkların ortaya çıkarılmasında uzun süre morfolojik ve fenotipik karakterlerden yararlanılmıştır. Ancak bu özelliklerin çevresel faktörlerden etkilenebilmesi ve bazı karakterlerin farklı koşullarda tutarlı biçimde gözlemlenememesi, yalnızca fenotipik verilere dayalı değerlendirmelerin kapsamını sınırlandırmıştır. DNA temelli analiz yöntemlerinin geliştirilmesiyle birlikte genetik çeşitliliğin belirlenmesinde moleküler markörlerden daha fazla yararlanılmaya başlanmıştır.

Moleküler markörler, doğrudan DNA düzeyindeki farklılıkları ortaya koymaları nedeniyle çevresel koşulların fenotipik özellikler üzerindeki etkilerinden büyük ölçüde bağımsız değerlendirme yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemlerin bitkinin gelişme döneminden bağımsız olarak uygulanabilmesi, genetik materyallerin farklı gelişim aşamalarında incelenmesini mümkün kılmaktadır. Geniş bir genetik varyasyonun belirlenmesinde sağladıkları olanaklar, moleküler markörleri bitkilerde genetik karakterizasyon ve genetik ilişkilerinin değerlendirilmesi açısından önemli araçlar haline getirmiştir (Özcan vd., 2004). PCR temelli moleküler markörler ekonomik olarak önemli bitkilerde genetik karakterizasyon ve moleküler bitki ıslahı araştırmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bitkisel gen kaynaklarında genetik çeşitliliğin saptanmasında ve genetik karakterizasyon çalışmalarında farklı moleküler markör tiplerinin kullanıldığı son yıllardaki bazı araştırmaların kısa bilgileri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Moleküler markörler ile bitkilerde genetik çeşitlilik ve karakterizasyon araştırmaları

Bitki adı	Numune kaynağı	Markör tipi	Popülasyon sayısı	Markör sayısı	Referans
Domates (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Güney İtalya kaynaklı yerel çeşitler	(GATA) ₄ minisatelit	64	1	Caramante vd., (2024)
Acı kabak (<i>Momordica charantia</i>)	Hindistan kaynaklı standart kültürler, yabancı türler, yerel çeşitler ve diğer germplazm örnekleri	InDel ve SSR	45	25 InDel 37 SSR	Meghashree vd., (2024)
Turpgiller (<i>Brassica</i> spp.)	Farklı tarımsal üniversiteler ve gen kaynakları bankalarından elde edilen örnekler	iPBS	33	10	Sameeullah vd., (2025)
Zerdaçal (<i>Curcuma longa</i>)	Hindistan kaynaklı çeşitli bölgelerden toplanan türler	iPBS	35	12	Gowda vd., (2025)
Pamuk (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Nazilli Pamuk Araştırma Enstitüsü ve GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü tarafından temin edilen genotipler	iPBS	179	7	Yeşil Bayrıl vd., (2024)
Beyaz kavak (<i>Populus tomentosa</i>)	Çin’in kuzeyindeki çeşitli bölgelerden temin edilen örnekler	SSR	623	13	Kong vd., (2024)
Yabani kivi meyvesi (<i>Actinidia eriantha</i>)	Çin’deki yabancı <i>A. eriantha</i> germplazm kaynakları	SSR	45	40	Liao vd. (2019)
Kore ginseng (<i>Panax ginseng</i>)	Japonya, Kore ve Çin’den grmplazm (ticari olarak temin edilen kökler)	SSR	91	8	Ito ve Ito, (2024)
Guava (<i>Psidium guajava</i>)	Hindistan, Yeni Delhi kaynaklı yerel, ticari ve yabancı çeşitler	SSR	36	24	Kherwar vd., (2018)
Ekmeklik buğday (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Türkiye’de yaygın olarak yetiştirilen çeşitler	SSR	10	15	Ateş Sönmezoğlu ve Terzi, (2018)
Sorgum (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	VNMKV, Parbhani kaynaklı yabancı ve mutant tipler	ISSR	20	9	Ansari vd., (2024)
Zeytin (<i>Olea europaea</i> L. subsp. oleaster)	Türkiye’nin Doğu Akdeniz bölgesinde bulunan Hassa ilçesindeki yabancı zeytin genotipleri	ISSR	20	7	Tunç vd., (2024)
Üzüm (<i>Vitis vinifera</i> L.)	Hırvatistan kaynaklı geleneksel kültür çeşitleri	SNP	149	516,101	Marinov vd., (2024)
Çavdar (<i>Secale cereale</i> L.)	Merkez ve Doğu Avrupa kaynaklı yabancı ve kültür örnekleri	SNP	603	55,744	Schreiber vd., (2019)
Fesleğen (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	Etiyopya’nın çeşitli bölgelerinden temin edilen örnekler	GBS-SNP	62	5,858	Gossa vd., (2024)

Pirinç (<i>Oryza sativa</i>)	Uluslararası Pirinç Araştırma Enstitüsü	KASP-SNP	3000	58	Sandhu vd., (2024)
Okra (<i>Hibiscus esculentus</i>)	Filistin'deki yerel okra çeşitleri	RAPD	7	15	Hamdan vd., (2024)
Serminat (<i>Lepidium sativum</i>)	İran kaynaklı farklı bölgelerden toplanan fenotipler	RAPD	17	7	Mortazavi vd., (2021)
Muz (<i>Musa sp.</i>)	Suudi Arabistan'daki Jazan Eyaletinin güneybatı bölgesinin üç bölgesi	Floresan etiketli AFLP	5	9	Safhi vd., (2023)
Mısır (<i>Zea mays</i> L.)	Batı Romanya kaynaklı yerel mısır çeşitleri	AFLP	60	8	Murariu vd., (2019)
Narenciye (<i>Citrus spp.</i>)	Farklı ülkelerden temin edilen narenciye çeşitleri ve ormandan toplanan yabani türler	AFLP	33	4	Al-Nadabi vd., (2018)
Aegilops türleri (<i>Aegilops spp.</i>)	İran kaynaklı örnekler	CBDP	77	15	Bokaei vd., (2024)
Mercimek (<i>Lens culinaris</i>)	İran kaynaklı yabani akraba ve yerel çeşitler	CBDP	90	10	Sarvmeili vd., (2020)
Kırmızı pancar (<i>Beta vulgaris</i> subsp.)	Hollanda, İç Moğolistan, Xinjiang, Heilongjiang ve Jilin kaynaklı pancar çeşitleri	CEAP	32	17	Wang vd., (2024)
Yer fıstığı (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	Bolivya kaynaklı orijinal bitki aynakları	CDDP	21	5	Klongová vd., (2023)
Kivi (<i>Actinidia spp.</i>)	Çin, Guizhou Eyaleti kaynaklı yabani türler	SRAP	110	13	Ma vd., (2024)
Yağ Palmiyesi (<i>Elaeis guineensis</i>)	Çin kaynaklı dört eyaletten toplanan örnekler	SRAP	223	33	Zhou vd., (2021)
Şeker pancarı (<i>Beta vulgaris</i> L.)	Türkiye tohum bankaları ve Amerikan gen bankası	SCoT	96	10	Yalinkiliç vd., (2024)
Sinemaki (<i>Senna alexandrina</i>)	Hindistan'ın güneyi kaynaklı senna aksesyonu	SCoT	25	35	Kumar vd., (2024)
Elma (<i>Malus</i> × <i>domestica</i> Borkh.)	Yerel elma çeşitleri	iPBS markers	16	13	Terzi Aksoy vd., 2026
Çayır otu çeşitleri	Farklı türlere ait çeşitli tahıl otu örnekleri (<i>Festuca pratensis</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Lolium multiflorum</i> , <i>Festuca rubra</i> , <i>Festulolium</i>)	SCoT	8	10	Mavlyutov vd., (2021)
Tacinga türleri (<i>Tacinga inamoena</i> , <i>Tacinga subcylindrica</i> , <i>Tacinga palmadora</i>)	Brezilya'nın yarı-kurak Caatinga biyocoğrafik bölgesinden toplanan örnekler	Plastit ve nükleer (PhyC)	222	3	Barrios-Leal vd., (2024)
Yaban mersini (<i>Vaccinium uliginosum</i>)	Çin'in Changbai ve Da Xing'an Dağları'ndan toplanan yabani bitki örnekleri	Kloroplast matK ve EST-SSRseq	378	660	Yang vd., (2024)

(GATA)₄ minisatelit DNA parmak izi (fingerprinting)

AFLP: Çoğaltılmış parça uzunluk polimorfizmi (Amplified Fragment Length Polymorphism)
CBDP: CAAT kutusundan türetilen polimorfizm (CAAT Box Derived Polymorphism)
CEAP: Cis element çoğaltılmış polimorfizm (Cis-element Amplified Polymorphism)
CDDP: Korunmuş DNA türevi polimorfizm (Conserved DNA-derived Polymorphism)
EST-SSR: İfade edilmiş dizi etiketleri SSR (Expressed Sequence Tags SSR)
GBS-derived SNP: Genotipleme tarafından dizileme (GBS)'den türetilmiş SNP (GBS-derived SNP)
InDel: Ekleme/silme markörleri (Insertion-Deletion Markers)
iPBS: Primer arası bağlanma yeri retrotranspozon markörleri
ISSR: Basit tekrarlı diziler arası polimorfizm (Inter Simple Sequence Repeat)
KASP: Rekabetçi alel spesifik PCR (Kompetitif Allele-Specific PCR)
matK: maturase K kloroplast gen markörü
RAPD: Rastgele çoğaltılmış Polimorfik DNA (Random amplification of polymorphic DNA)
SCoT: Başlangıç kodonu hedef polimorfizmi (Start Codon Targeted Polymorphism)
SNP: Tek nükleotid polimorfizmi (Single-Nucleotide Polymorphism)
SRAP: Diziyle ilişkili amplifikasyon polimorfizmi (Sequence-Related Amplified Polymorphism)
SSR: Basit dizi tekrarları (Simple Sequence Repeat)

3. SONUÇ

Moleküler markörler bitki genetiği ve ıslahı çalışmalarında genetik çeşitliliğin belirlenmesi, filogenetik ilişkilerin ortaya çıkarılması ve markör destekli seleksiyon uygulamalarının yürütülmesi açısından önemli araçlardır. Bu markörler, yerel ve yabani genotipler arasındaki genetik benzerlik ve farklılıkların belirlenmesine olanak sağlayarak bitkisel genetik kaynaklarının karakterizasyonuna katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, çeşit içi genetik varyasyonun temelindeki mekanizmaların açıklanması ve genetik açıdan birbirine yakın materyallerin güvenilir biçimde ayırt edilmesi için farklı moleküler markör sistemlerini kapsayan kapsamlı analizlere ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu doğrultuda, araştırmanın amacına ve incelenen bitki türünün özelliklerine uygun farklı markör sistemlerinin birlikte kullanılması, genetik çeşitliliğin daha ayrıntılı değerlendirilmesine ve bulguların güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlayabilir. Dolayısıyla moleküler markör temelli çalışmalar, bitkisel genetik kaynakların korunması, genetik ilişkilerin belirlenmesi ve değerli genetik materyallerin bitki ıslahı programlarında etkin biçimde değerlendirilmesi bakımından önemli bir yere sahiptir.

KAYNAKÇA

- Al-Nadabi, H., Khan, M., Al-Yahyai, R. A. & Al-Sadi, A. M. (2018). AFLP fingerprinting analysis of Citrus cultivars and wild accessions from Oman suggests the presence of six distinct cultivars. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 64(4), 173-182.
- Ansari, G. N., Jadhav, P. K., Wankhade, D. J., Deshmukh, A. S., Kalpande, H. V. & Chavhan, R. L. (2024). Genetic diversity analysis of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) mutant lines by using ISSR markers. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(10), 506-511.
- Ateş Sönmezoğlu, Ö. & Balkan, A.S. (2014). Molecular and biochemical analysis of durum wheat genotypes to examine carotenoid pigment content and lipoxygenase enzyme activity. *Cereal Research Communications*, 42(2), 218-228.
- Ateş Sönmezoğlu, Ö. & Kütük, A. (2014). Determination of Genetic Diversity among Karaman Apple Landraces. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 12(1), 52-54.
- Ateş Sönmezoğlu, Ö. & Keskin, H. (2015). Determination of genetically modified corn and soy in processed food products. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 3(03), 32-37.
- Ateş Sönmezoğlu, Ö. & Terzi, B. (2018). Characterization of some bread wheat genotypes using molecular markers for drought tolerance. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 24, 159-166.
- Ateş Sönmezoğlu, Ö., Çevik, E. & Terzi Aksoy, B. (2022). Assessment of some bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance using SSR and ISSR markers. *Biotech Studies*, 31(2), 45-52.
- Barrios-Leal, D. Y., Menezes, R. S., Zappi, D. & Manfrin, M. H. (2024). Unravelling the genetic diversity and population dynamics of three *Tacinga* species (Cactaceae: Opuntioideae) in the Caatinga. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 204(3), 256-266.
- Bokaei, A. S., Sofalian, O., Sorkhilalehloo, B., Asghari, A. & Pour-Aboghadareh, A. (2024). Investigation of genetic diversity and study of population structure in *Aegilops* species with U genome by CBDP markers. *Agricultural Biotechnology Journal*, 16(2), 69-90.
- Caramante, M., Rouphael, Y. & Corrado, G. (2024). Genetic diversity among and within tomato (*Solanum lycopersicum* L.) landraces grown in Southern Italy. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(1), 157-166.
- Dreisigacker, S., Zhang, P. & Warburton, M.L. (2005). Genetic diversity among and within CIMMYT wheat landrace accessions investigated with SSRs and implications for plant genetic resources management. *Crop Science*, 45, 65-661,
- Gossa, A. G., Tesfaye, B. & Degu, H. D. (2024). Genetic diversity and population structure of Ethiopian basil (*Ocimum basilicum* L.) accessions using DArTseq markers. *Ecological Genetics and Genomics*, 31, 100241.

- Gowda, M. R., Soundarya, D., Hiremath, C. & Shetty, N. P. (2025). Assessing genetic diversity of indigenous turmeric (*Curcuma longa* L.) through inter-simple sequence repeat (ISSR) markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72, 2413-2423.
- Güleç, T., Yıldırım, A. & Ateş Sönmezoğlu, Ö. (2010). Bitkilerde Markör Destekli Seleksiyon. *Turkish Journal of Scientific Reviews*, 3(1,) 67-79.
- Hamdan, Y. A., Hawamda, A. I., Basheer-Salimia, R. & Salman, M. (2024). Genetic diversity assessment of Palestinian okra landraces (*Abelmoschus esculentus* L.) through RAPD marker. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71, 3555-3562.
- Ito, H. & Ito, M. (2024). Genetic diversity of Panax ginseng cultivated in Japan and its relation with some plant characteristics. *Journal of Natural Medicines*, 78(1), 91-99.
- Jump, A.S. & Peñuelas, J. (2005). Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters*, 8, 1010-1020.
- Kherwar, D., Usha, K., Mithra, S. A. & Singh, B. (2018). Microsatellite (SSR) marker assisted assessment of population structure and genetic diversity for morpho-physiological traits in guava (*Psidium guajava* L.). *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 27, 284-292.
- Klongová, L., Kyseľ, M., Fialková, V., Fernández-Cusimamani, E., Kovacik, A. & Ziarovska, J. (2023). Utilization of CDDP markers in analysis of genetic variability of *Arachis hypogaea* L. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 13(1), e9884-e9884.
- Kong, B., Ma, L., Du, J. & Zhang, P. (2024). Genetic Diversity and Population Structural Analysis Reveal the Unique Genetic Composition of *Populus tomentosa* Elite Trees. *Forests*, 15(8), 1377.
- Kumar, A., Gupta, A. K., Siddiqui, S., Gupta, S., Lal, R. K., Srivastava, A. & Siddiqui, M. H. (2024). Estimation of genetic diversity utilizing gene-targeted SCoT markers and morpho-chemotypic analyses in *Senna alexandrina* Mill. (Senna). *Ecological Genetics and Genomics*, 31, 100252.
- Liao, G., Li, Z., Huang, C., Zhong, M., Tao, J., Qu, X. & Xu, X. (2019). Genetic diversity of inner quality and SSR association analysis of wild kiwifruit (*Actinidia eriantha*). *Scientia Horticulturae*, 248, 241-247.
- Ma, X., Han, Z., Li, T., Yang, Y., Su, W. & Li, W. (2024). Genetic diversity and population structure analysis of wild kiwifruit (*Actinidia* spp.) using SRAP markers. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 38(1), 2373845.
- Marinov, L., Magris, G., Di Gaspero, G., Morgante, M., Maletić, E., Bubola, M. & Zdunić, G. (2024). Single nucleotide polymorphism (SNP) analysis reveals ancestry and genetic diversity of cultivated and wild grapevines in Croatia. *BMC Plant Biology*, 24(1), 975.

- Mavlyutov, Y. M., Shamustakimova, A. O. & Klimenko, I. A. (2021). Application of SCoT markers for accessing of genetic diversity of gramineous forage grass species. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 901, p. 012038). IOP Publishing.
- Meghashree, J. R., Ganiger, V. M., Kumar, J. S. A., Bhuvaneshwari, G., Gopali, J. B., Evoor, S. & Lokeshkumar, B. M. (2024). Genetic diversity and population structure assessment of Indian bitter gourd accessions using nutritional content and molecular markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(4), 1557-1573.
- Mortazavi, F. A., Qaderi, A. & Sharifi-Sirchi, G. R. (2021). Evaluation of Genetic Diversity of 17 Populations (*Lepidium sativum* L.) Plant Collected from Different Regions of Iran by RAPD Marker. *ACS Agricultural Science & Technology*, 1(6), 684-690.
- Murariu, D., Plăcintă, D. D., & Simioniuc, V. (2019). Assessing genetic diversity in Romanian maize landraces, using molecular markers. *Romanian Agricultural Research*, 36.
- Özcan, S., Gürel, E. & Babaoğlu, M. (2004). Bitki Biyoteknolojisi: Genetik Mühendisliği ve Uygulamaları Kitabı. II. Baskı. Selçuk Üniversitesi Yayınları, ISBN: 975-6652-05-5.
- Röder, M.S., Plaschke, P. & König, S.U. (1995). Abundance, variability and chromosomal location of microsatellites in wheat. *Molecular and General Genetics*, 246, 327-333.
- Safhi, F. A., Alshamrani, S. M., Alshaya, D. S., Hussein, M. A. & Abd El-Moneim, D. (2023). Genetic diversity analysis of banana cultivars (*Musa* sp.) in Saudi Arabia based on AFLP marker. *Current Issues in Molecular Biology*, 45(3), 1810-1819.
- Sameeullah, M., Kayaçetin, F., Khavar, K. M., Perkasa, A. Y., Maesaroh, S., Waheed, M. T. & Çiftçi, V. (2025). Decoding genetic diversity and population structure of Brassica species by inter primer binding site (iPBS) retrotransposon markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72, 417-427.
- Sandhu, N., Singh, J., Ankush, A. P., Augustine, G., Raigar, O. P., Verma, V. K. & Kumar, A. (2024). Development of Novel KASP Markers for Improved Germination in Deep-Sown Direct Seeded Rice. *Rice*, 17(1), 33.
- Sarvmeili, J., Saidi, A., Farrokhi, N., Pouresmael, M. & Talebi, R. (2020). Genetic diversity and population structure analysis of landrace and wild relatives of lentil germplasm using CBDP marker. *Cytology and Genetics*, 54, 566-573.
- Schreiber, M., Himmelbach, A., Börner, A. & Mascher, M. (2019). Genetic diversity and relationship between domesticated rye and its wild relatives as revealed through genotyping-by-sequencing. *Evolutionary Applications*, 12(1), 66-77.
- Terzi Aksoy, B. Özarslan, F. & Ateş Sönmezoğlu, Ö. (2026). Molecular characterization of apple genotypes using iPBS markers: application in a limited geographical area. *Acta Physiologiae Plantarum*, 48(77), 1-9.

- Tunç, Y., Yaman, M. & Yilmaz, K. U. (2024). Elucidating the genetic diversity in wild olive (*Olea europaea* L. subsp. *oleaster*) genotypes from the Mesopotamia region with multivariate analyses. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71, 4843-4854.
- Yalinkiliç, N. A., Başbağ, S., Altaf, M. T., Ali, A., Nadeem, M. A. & Baloch, F. S. (2024). Applicability of SCoT markers in unraveling genetic variation and population structure among sugar beet (*Beta vulgaris* L.) germplasm. *Molecular Biology Reports*, 51(1), 584.
- Yang, H., Chen, J., Wang, Y., Tian, X., Zheng, Y., Jin, Z. & Zong, C. (2024). Determination of the genetic diversity and population structure of *Vaccinium uliginosum* in Northeast China based on the chloroplast mat K gene and EST-SSRseq molecular markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(3), 1035-1052.
- Yavuzaslanoglu, E., Karaca, M.S., Ateş Sönmezoğlu, Ö., Atilla, Ö., Elekcioglu, H. & Aydogdu, M. (2020). Occurrence and abundance of cereal nematodes in Konya and Karaman Provinces in Turkey. *Turkish Journal of Entomology*, 44(2), 223-236.
- Yeşil Bayrıl, B., Bakhsh, A., Nadeem, M. A. & Demirel, U. (2024). Elucidating the genetic diversity and population structure of international cotton germplasm using inter-primer binding site (iPBS) retrotransposon marker system. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(5), 1737-1748.
- Wang, Z., Wu, X., Pi, Z., Wu, Z. & Li, S. (2024). Genetic Diversity Analysis of Red Beet Germplasm Resources Using CEAP Molecular Markers. *Sugar Tech*, 26, 1477-1486.
- Zhou, L., Yarra, R., Cao, H. & Zhao, Z. (2021). Sequence-related amplified polymorphism (SRAP) markers based genetic diversity and population structure analysis of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Tropical Plant Biology*, 14, 63-71.

BÖLÜM 3

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SÜPERHİDROFOBİK YÜZEYLER I: TASARIM STRATEJİLERİ

Nurcan ÇALIŞ AÇIKBAŞ¹, Gökhan AÇIKBAŞ²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye; email: nurencalisacikbas@duzce.edu.tr

² Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye; email: gokhanacikbas@duzce.edu.tr

1. Giriş

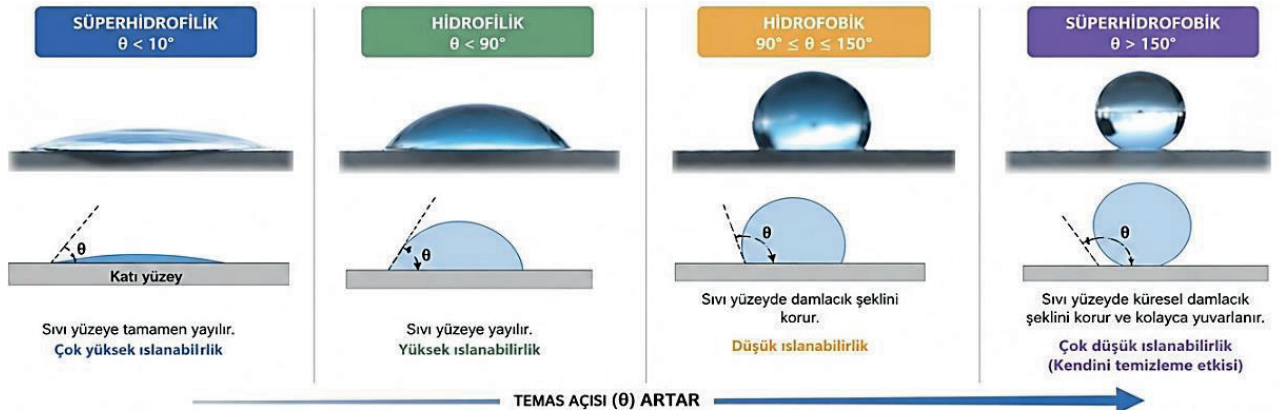
Süperhidrofobiklik kavramı, doğada bulunan olağanüstü su itici yüzeylerin incelenmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu alandaki ilk sistematik çalışmalar, **lotus yaprağının (Nelumbo nucifera)** kendi kendini temizleyebilme özelliğinin keşfedilmesiyle başlamıştır. Lotus yapraklarının yüzeyinde bulunan mikro ve nano ölçekli hiyerarşik yapılar ile düşük yüzey enerjisine sahip mumsu tabaka, su damlacıklarının yüzey üzerinde neredeyse küresel bir şekil almasını ve yüzeyden kolayca yuvarlanarak kir parçacıklarını uzaklaştırmasını sağlamaktadır. Bu olgu, literatürde "**Lotus Etkisi (Lotus Effect)**" olarak adlandırılmaktadır [1]. Süperhidrofobik yüzeylerin **teorik temelleri** ise yüzey ıslanabilirliğini açıklayan klasik modellerle oluşturulmuştur. **Young (1805)** ideal düz yüzeylerde temas açısını tanımlayan temel denklemi geliştirmiş, daha sonra **Wenzel (1936)** yüzey pürüzlülüğünün ıslanabilirlik üzerindeki etkisini açıklamış ve **Cassie ve Baxter (1944)** hava ceplerinin bulunduğu kompozit yüzeylerde görülen süperhidrofobik davranışı tanımlayan modeli ortaya koymuştur. Günümüzde süperhidrofobiklik, genellikle **150°'nin üzerinde statik su temas açısı** ve **10°'nin altında kayma açısı** ile karakterize edilmektedir [2-4].

1990'lı yılların sonlarından itibaren biyomimetik tasarım anlayışının gelişmesiyle birlikte lotus yaprağı, pirinç yaprağı, kelebek kanadı ve köpekbalığı derisi gibi doğal yüzeylerden ilham alınarak yapay süperhidrofobik yüzeyler geliştirilmeye başlanmıştır. Son yıllarda ise nanoteknoloji, lazer tekstürleme, plazma işlemleri, sol-jel yöntemleri ve katkılı üretim teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde süperhidrofobik yüzeyler; biyomedikal implantlar, antibakteriyel kaplamalar, mikroakışkan sistemler ve doku mühendisliği gibi birçok alanda önemli uygulama potansiyeli kazanmıştır [5,6].

2. Süperhidrofobik Yüzeylerin Temel Prensipleri

2.1. Islanabilirlik (Wettability) Kavramı

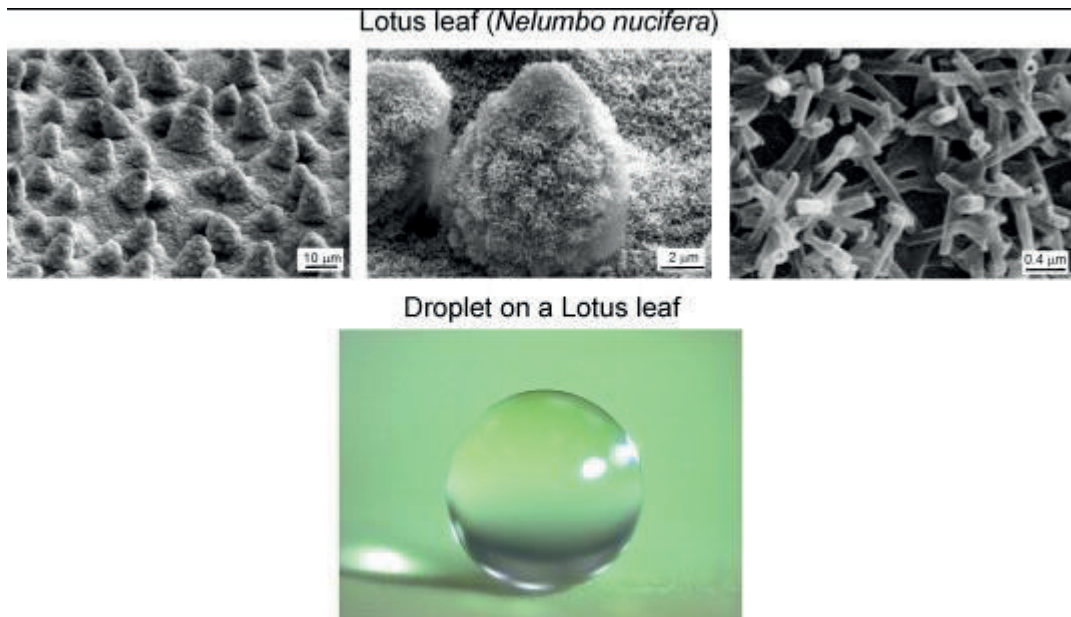
Islanabilirlik (wettability), bir sıvının katı bir yüzey ile temas ettiğinde yüzey üzerinde yayılma veya damlacık şeklinde kalma eğilimini ifade eden temel bir yüzey özelliğidir. Bu özellik, katı, sıvı ve gaz fazları arasındaki moleküller arası etkileşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmakta olup, yüzey kimyası ve yüzey topografisi tarafından belirlenmektedir [2,3]. Özellikle biyomedikal uygulamalarda implantların, biyosensörlerin, doku mühendisliği iskelelerinin ve tıbbi cihazların biyolojik performansı büyük ölçüde yüzeyin ıslanabilirlik özelliklerine bağlıdır. Hücre adezyonu, protein adsorpsiyonu, bakteri kolonizasyonu, kan uyumluluğu ve biyofilm oluşumu gibi birçok biyolojik olay doğrudan yüzeyin hidrofilik veya hidrofobik karakterinden etkilenmektedir [7-10]. Bir yüzeyin ıslanabilirliği, sıvının yüzey üzerinde oluşturduğu **statik temas açısı (contact angle, θ)** ile nicel olarak değerlendirilmektedir. Temas açısı, katı-sıvı ve sıvı-gaz ara yüzeylerinin kesiştiği noktada sıvı damlasına teğet çizilen doğru ile katı yüzey arasında oluşan açıdır. Düşük temas açısı, sıvının yüzey üzerinde kolayca yayıldığını ve yüzeyin hidrofilik karakter gösterdiğini ifade ederken, yüksek temas açısı yüzeyin hidrofobik özellik sergilediğini göstermektedir. Genel olarak temas açısının **90°'den küçük olması hidrofilik, 90°'den büyük olması hidrofobik, 150°'nin üzerinde olması ise süperhidrofobik** yüzey olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.1). Süperhidrofobik yüzeylerde yalnızca yüksek temas açısı yeterli olmayıp, aynı zamanda su damlacığının yüzeyden kolayca uzaklaşmasını sağlayan **10°'den küçük kayma (sliding) açısı** veya düşük temas açısı histerezi de önemli bir kriter olarak kabul edilmektedir [11-13].



Şekil 2.1. Islanabilirlik sınıflandırmasının şematik gösterimi. Süperhidrofilik ($\theta < 10^\circ$), hidrofilik ($\theta < 90^\circ$), hidrofobik ($\theta = 90-150^\circ$) ve süperhidrofobik ($\theta > 150^\circ$) yüzeylerde su damlacığının görünümü ve temas açılarının karşılaştırılması.

Islanabilirlik yalnızca yüzeyin kimyasal bileşimine bağlı değildir; aynı zamanda yüzeyin mikro ve nano ölçekli pürüzlülüğü de belirleyici bir rol oynamaktadır [4,14]. Kimyasal olarak düşük yüzey enerjisine sahip malzemeler hidrofobik davranış gösterme eğiliminde olsalar da, mikro/nano hiyerarşik yapıların oluşturulmasıyla bu özellik önemli ölçüde artırılabilir. Bu nedenle modern süperhidrofobik yüzey tasarımlarında, **düşük yüzey enerjili kimyasal modifikasyon ile çok ölçekli yüzey pürüzlülüğünün birlikte kullanılması temel tasarım stratejisini oluşturmaktadır [15].**

Doğada bulunan birçok canlı, üstün su itici özelliklerini bu iki temel mekanizmanın sinerjik etkisi sayesinde kazanmaktadır. En bilinen örnek olan **lotus yaprağı**, mikrometre boyutundaki papillalar üzerine yerleşmiş nanometre ölçekli mumsu kristaller sayesinde su damlacıklarının yüzey ile temas alanını minimuma indirerek "**Lotus Etkisi**" olarak bilinen kendini temizleme mekanizmasını gerçekleştirmektedir (Şekil 2.2). Benzer şekilde pirinç yaprakları, kelebek kanatları, su yürüyen böceklerin bacakları ve ağustos böceklerinin kanatları da yüksek su iticilik sağlayan biyoesinlenmiş (bioinspired) yüzey tasarımlarına ilham veren doğal örnekler arasında yer almaktadır [16,17].



Şekil 2.2. Yüzeyinde nanoyapıyı oluşturan üç boyutlu epikutiküler mum tübülleriyle kaplı papil benzeri epidermal hücrelerin meydana getirdiği bir mikro yapıdan oluşan Lotus (*Nelumbo nucifera*) yaprağı

yüzeyinin (üç farklı büyütme oranında gösterilen) SEM görüntüsü ve Lotus yaprağı üzerinde duran bir su damlasının görüntüsü [18].

Biyomedikal mühendisliği açısından değerlendirildiğinde, yüzey ıslanabilirliğinin optimize edilmesi implantların biyolojik yanıtını doğrudan etkileyebilmektedir. Örneğin hidrofilik yüzeyler osteoblast adezyonunu ve hücre proliferasyonunu destekleyerek kemik implantlarının osseointegrasyonunu artırırken, süperhidrofobik yüzeyler bakteri tutunmasını azaltarak enfeksiyon riskinin düşürülmesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, aşırı hidrofobik yüzeylerin bazı hücre tiplerinde hücre adezyonunu olumsuz etkileyebileceği de bildirilmektedir. Bu nedenle günümüzde araştırmalar, uygulamaya özgü olarak hidrofilik ve süperhidrofobik bölgeleri bir arada bulunduran veya çevresel uyaranlara yanıt verebilen akıllı (stimuli-responsive) yüzeylerin geliştirilmesine yönelmektedir [19-24].

Islanabilirliğin belirlenmesinde statik temas açısının yanı sıra ilerleyen (advancing) ve geri çekilen (receding) temas açıları, temas açısı histerezisi ve kayma açısı gibi dinamik parametreler de kullanılmaktadır. Özellikle biyomedikal uygulamalarda yalnızca statik temas açısının değerlendirilmesi yeterli olmayıp, yüzey üzerindeki sıvı hareketliliğinin ve damlacık davranışının incelenmesi gerçek çalışma koşullarının daha doğru şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle modern yüzey karakterizasyon çalışmalarında statik ve dinamik temas açısı ölçümlerinin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir [25-27].

Son yıllarda nanoteknoloji, lazer yüzey işleme, plazma modifikasyonu, elektroçirami ve eklemeli imalat teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde istenilen ıslanabilirlik özelliklerine sahip biyomalzeme yüzeylerinin kontrollü olarak üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Böylece yalnızca su itici özellik gösteren değil, aynı zamanda antibakteriyel, anti-biyofilm, antitrombotik ve kendini temizleyebilen çok fonksiyonlu süperhidrofobik yüzeylerin geliştirilmesi **biyomedikal yüzey mühendisliğinin en önemli araştırma alanlarından biri** haline gelmiştir [28-34].

2.2. Yüzey Serbest Enerjisi ve Temas Açısı

Yüzey serbest enerjisi (surface free energy, SFE), bir katı yüzeyin atom veya moleküllerinin çevreleriyle oluşturdukları dengesiz bağlanma durumundan kaynaklanan ve yüzeyin sıvılarla etkileşimini belirleyen temel termodinamik parametrelerden biridir. Bir malzemenin yüzeyinde bulunan atomlar, iç kısımdaki atomlara kıyasla daha az komşu atomla çevrilidir ve bu nedenle daha yüksek bir serbest enerjiye sahiptir. Bu enerji fazlalığı, yüzeyin çevresindeki sıvılar, gazlar veya biyolojik moleküllerle etkileşime girme eğilimini artırmaktadır. Sonuç olarak yüzey serbest enerjisi, bir yüzeyin ıslanabilirliği, adezyon davranışı, protein adsorpsiyonu, hücre tutunması ve biyolojik performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır [8].

Biyomedikal mühendisliğinde yüzey serbest enerjisi, implantların ve biyomalzemelerin çevre dokularla olan etkileşimini belirleyen en önemli yüzey karakteristiklerinden biridir. Yüksek yüzey serbest enerjisine sahip malzemeler genellikle hidrofilik özellik gösterirken, düşük yüzey serbest enerjisine sahip malzemeler hidrofobik davranış sergilemektedir. Özellikle florlu polimerler, silikon bazlı bileşikler ve uzun zincirli organik moleküller düşük yüzey enerjileri sayesinde süperhidrofobik kaplamaların hazırlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte son yıllarda çevresel ve toksikolojik kaygılar nedeniyle per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS) yerine çevre dostu alternatif düşük yüzey enerjili kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır [35,36].

Yüzey serbest enerjisinin sıvılarla etkileşimi en yaygın olarak **temas açısı (contact angle, θ)** ölçümleri ile değerlendirilmektedir. Temas açısı, sıvı damlasının katı yüzey üzerinde oluşturduğu geometrik şekli tanımlayan ve katı-sıvı-gaz fazlarının birleştiği noktada ölçülen açıdır. Bu açı, yüzeydeki adeziv kuvvetler (katı-sıvı etkileşimleri) ile kohezyon kuvvetleri (sıvı molekülleri arasındaki etkileşimler) arasındaki dengeyi yansıtmaktadır. Eğer adeziv kuvvetler baskın ise sıvı damlası yüzeye yayılmakta ve düşük temas

açısı oluşmaktadır. Buna karşılık kohezyon kuvvetlerinin baskın olduğu durumlarda sıvı küresel şeklini koruyarak yüksek temas açısı oluşturmaktadır [2,3].

Temas açısı ölçümleri, yüzeylerin ıslanabilirlik özelliklerinin sınıflandırılmasında temel kriter olarak kullanılmaktadır. Genel kabul gören sınıflandırmaya göre temas açısı **10°'den küçük olan yüzeyler süperhidrofilik, 10–90° arasında olan yüzeyler hidrofilik, 90–150° arasında olan yüzeyler hidrofobik ve 150°'nin üzerindeki yüzeyler ise süperhidrofobik** olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte yalnızca statik temas açısının yüksek olması süperhidrofobik davranışı açıklamak için yeterli değildir. Su damlacığının yüzey üzerinde kolayca hareket edebilmesini sağlayan düşük temas açısı histerezi ve **10°'den küçük kayma açısı (sliding angle)** da süperhidrofobik yüzeylerin karakterizasyonunda önemli parametreler arasında yer almaktadır.

Yüzey serbest enerjisi yalnızca suyun yüzey üzerindeki davranışını değil, aynı zamanda biyolojik moleküllerin adsorpsiyonunu da belirlemektedir. Bir implant vücut sıvılarıyla temas ettiğinde ilk birkaç saniye içerisinde albumin, fibrinojen, fibronektin ve immünoglobulinler gibi proteinler yüzeye adsorbe olmaktadır. Bu protein tabakası daha sonra hücre adezyonunu, inflamatuvar yanıtı ve doku iyileşmesini yönlendirmektedir. **Dolayısıyla yüzey serbest enerjisinin uygun şekilde kontrol edilmesi, biyomalzemelerin biyouyumluluğunu artırmak açısından kritik öneme sahiptir.** Örneğin orta düzeyde yüzey enerjisine sahip titanyum implant yüzeylerinin osteoblast adezyonunu desteklediği, buna karşın çok düşük yüzey enerjisine sahip süperhidrofobik yüzeylerin bakteri adezyonunu azaltarak enfeksiyon riskini düşürebildiği bildirilmektedir. Bu nedenle günümüzde birçok araştırma, hücreler için uygun biyolojik ortam oluştururken mikroorganizmaların yüzeye tutunmasını engelleyen seçici (selective) yüzeylerin geliştirilmesine odaklanmaktadır [37, 38].

Temas açısının belirlenmesinde yalnızca statik ölçümler değil, ilerleyen (**advancing**) ve geri çekilen (**receding**) temas açıları da kullanılmaktadır. Bu iki değer arasındaki fark **temas açısı histerezi (contact angle hysteresis)** olarak tanımlanmakta olup damlacığın yüzey üzerindeki hareket kabiliyetini göstermektedir. Düşük histerezi değerleri, damlacığın yüzeyden kolayca uzaklaşabildiğini ve yüzeyin kendi kendini temizleme özelliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Süperhidrofobik yüzeylerin tasarımında yüksek statik temas açısı kadar düşük histerezi ve düşük kayma açısı elde edilmesi de hedeflenmektedir [25, 27].

Son yıllarda lazer tekstürleme, plazma modifikasyonu, sol–gel kaplama, kimyasal aşındırma ve nanomalzeme tabanlı yüzey mühendisliği tekniklerinin gelişmesiyle yüzey serbest enerjisinin kontrollü olarak değiştirilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Böylece biyomalzemelerde hücre davranışı, protein adsorpsiyonu, antibakteriyel performans ve kan uyumluluğu gibi biyolojik özellikler, yüzey enerjisinin hassas şekilde ayarlanmasıyla optimize edilebilmektedir. Bu gelişmeler, süperhidrofobik yüzeylerin yalnızca su itici özellik gösteren pasif yapılar olmaktan çıkarak, biyolojik yanıtı yönlendirebilen fonksiyonel biyomalzemeler haline gelmesine önemli katkılar sağlamaktadır [39].

2.3. Islanma Teorileri ve Matematiksel Modeller

Katı bir yüzeyin sıvılar tarafından ıslanma davranışı, yüzeyin kimyasal bileşiminin yanı sıra mikro ve nano ölçekteki topografik özelliklerinden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Yüzey ile sıvı arasındaki etkileşimlerin doğru şekilde açıklanabilmesi amacıyla literatürde üç temel teorik model geliştirilmiştir: Young modeli, Wenzel modeli ve Cassie–Baxter modeli. Bu modeller, yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal heterojenliğin temas açısı üzerindeki etkilerini açıklayarak süperhidrofobik yüzeylerin tasarımında temel kuramsal altyapıyı oluşturmaktadır.

İdeal olarak düz ve homojen yüzeyler için geliştirilen Young modeli, gerçek mühendislik yüzeylerinde karşılaşılan pürüzlülüğü dikkate almamaktadır. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla Wenzel modeli geliştirilmiş, daha sonra ise sıvı damlası altında hapsolan hava tabakasını da dikkate alan Cassie–Baxter modeli önerilmiştir. Günümüzde biyomedikal uygulamalarda geliştirilen süperhidrofobik implant yüzeylerinin büyük çoğunluğu Cassie–Baxter rejiminde çalışacak şekilde tasarlanmaktadır.

2.3.1. Young Islanma Modeli (İdeal düz pürüzsüz yüzeyler)

Islanabilirlik teorisinin temelleri, 1805 yılında Thomas Young tarafından ortaya konmuştur. Young modeli, tamamen düz, kimyasal olarak homojen, rijit ve ideal yüzeylerde oluşan denge temas açısını tanımlamaktadır. Modelde sıvının yüzey üzerindeki davranışı yalnızca üç ara yüzey gerilimi arasındaki denge ile açıklanmaktadır [2].

Young denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\gamma^{SG} = \gamma^{SL} + \gamma^{LG} \cos\theta$$

Burada;

- γ^{SG} : Katı–gaz ara yüzey gerilimi
- γ^{SL} : Katı–sıvı ara yüzey gerilimi
- γ^{LG} : Sıvı–gaz yüzey gerilimi
- θ : Denge temas açısıdır.

Young modeline göre yüksek yüzey enerjisine sahip yüzeylerde sıvı damlası yayılma eğilimindedir ve temas açısı küçüktür. Buna karşılık düşük yüzey enerjili yüzeylerde damlacık küresel şeklini korur ve temas açısı büyür [2].

Young modeli, ideal yüzeyler için önemli bir teorik temel oluşturmaya rağmen gerçek biyomalzemelerin yüzeyleri belirli bir pürüzlülük ve kimyasal heterojenlik içerdiğinden, deneysel sonuçları tam olarak açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Özellikle lazer tekstürleme, kimyasal aşındırma veya nanopartikül kaplama gibi yöntemlerle üretilen biyomedikal yüzeylerde temas açısı yalnızca yüzey kimyasına değil, yüzey geometrisine de bağlı olarak değişmektedir.

2.3.2. Wenzel Islanma Modeli (Homojen ıslanma ve pürüzlülük etkisi)

Young modelinin gerçek yüzeyler için yetersiz kalması üzerine Wenzel (1936), yüzey pürüzlülüğünün etkisini dikkate alan yeni bir model geliştirmiştir. Wenzel modelinde sıvının yüzeydeki tüm mikro girinti ve çıkıntıları tamamen doldurduğu, yani sıvı ile katı yüzey arasında tam temas olduğu varsayılmaktadır. Bu durum homojen ıslanma (homogeneous wetting) olarak adlandırılmaktadır [3].

Wenzel modeli aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$\cos\theta_w = r \cos\theta_y$$

Burada;

- θ_w : Wenzel temas açısı
- θ_y : Young temas açısı

- r : Yüzey pürüzlülük faktörü (gerçek yüzey alanı/düz yüzey alanı)

Pürüzlülük faktörü (r) her zaman 1'den büyüktür. Denklem incelendiğinde yüzey pürüzlülüğünün mevcut ıslanabilirlik karakterini güçlendirdiği görülmektedir.

Buna göre;

- Eğer yüzey başlangıçta hidrofilik ise ($\theta_Y < 90^\circ$), pürüzlülüğün artması temas açısını daha da azaltır ve yüzey daha hidrofilik hale gelir.
- Eğer yüzey başlangıçta hidrofobik ise ($\theta_Y > 90^\circ$), pürüzlülük temas açısını artırarak yüzeyi daha hidrofobik hale getirir.

Wenzel modeli, özellikle kemik implantları gibi hücre adezyonunun istenildiği hidrofilik biyomalzemelerin davranışını açıklamada oldukça başarılıdır. Bununla birlikte süperhidrofobik yüzeylerde gözlenen çok düşük kayma açılarını ve damlacığın kolayca yuvarlanmasını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Çünkü model, damlacığın altında hava tabakası bulunmadığını varsaymaktadır.

2.3.3. Cassie–Baxter Islanma Modeli (Heterojen ıslanma ve hava boşluklarının rolü)

Cassie ve Baxter tarafından 1944 yılında geliştirilen model, günümüzde süperhidrofobik yüzeylerin açıklanmasında en yaygın kullanılan teoridir. Bu modelde sıvı damlası yüzey pürüzlerinin tamamını doldurmaz; mikro ve nano yapılar arasında hava cepleri (air pockets) veya plastron tabakası oluşur. Böylece sıvı damlası yalnızca katı yüzeyin belirli bir kısmıyla temas ederken geri kalan kısmı hava ile desteklenmektedir [4].

Cassie–Baxter denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\cos\theta_{CB} = f_s(\cos\theta_Y + 1) - 1$$

Burada;

- θ_{CB} : Cassie–Baxter temas açısı
- f_s : Sıvının temas ettiği katı yüzey alanının kesirsel oranı
- $(1-f_s)$: Hava ile temas eden alan oranıdır.

Katı ile temas eden alan oranı azaldıkça (f_s küçüldükçe) temas açısı büyümekte ve yüzey süperhidrofobik davranış göstermektedir.

Cassie–Baxter rejiminde damlacığın yüzey ile temas alanı son derece küçüktür. Bu nedenle adezyon kuvvetleri azalmakta, temas açısı histerezisi düşmekte ve damlacık yüzey üzerinde çok küçük eğimlerde bile kolaylıkla hareket edebilmektedir. Bu özellik "Lotus Etkisi" olarak bilinen kendini temizleme mekanizmasının temelini oluşturmaktadır.

Doğada lotus yaprağı, su örümceği, ağustos böceği kanadı ve bazı kelebek türleri Cassie–Baxter rejimine örnek gösterilmektedir. Bu biyolojik sistemlerde mikro ve nano ölçekteki hiyerarşik yapılar hava ceplerinin korunmasını sağlayarak yüksek temas açılarının oluşmasına katkıda bulunmaktadır.

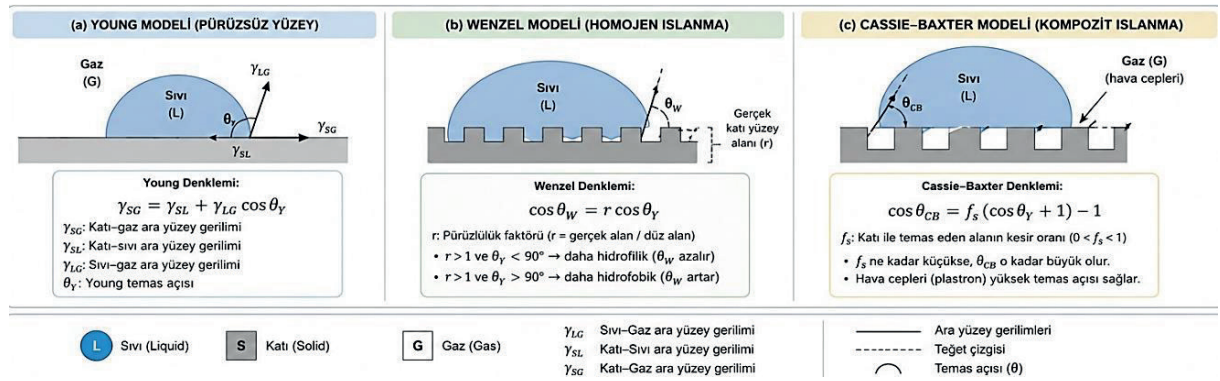
Biyomedikal uygulamalarda Cassie–Baxter modeli özellikle aşağıdaki amaçlarla tasarlanan yüzeylerde kullanılmaktadır:

- Antibakteriyel implant yüzeyleri
- Kan tutmayan biyomalzemeler
- Anti-biyofilm kaplamalar
- Kendini temizleyen cerrahi ekipmanlar
- Mikroakışkan sistemler
- Biyosensör yüzeyleri

Bu yüzeylerde bakterilerin ve proteinlerin gerçek temas alanı önemli ölçüde azaldığından biyolojik kirlenme (biofouling) engellenebilmekte ve implant enfeksiyonlarının azaltılması mümkün olabilmektedir.

2.3.4. Modellerin Karşılaştırılması ve Biyomedikal Önemi

Young, Wenzel ve Cassie–Baxter modelleri birbirini tamamlayan teorik yaklaşımlar olup farklı yüzey koşullarını açıklamaktadır. Young modeli ideal yüzeyler için temel bir referans oluştururken, Wenzel modeli pürüzlü yüzeylerde tam sıvı temasını, Cassie–Baxter modeli ise hava cepleri içeren kompozit temas durumunu açıklamaktadır. Şekil 2.3’de Young, Wenzel ve Cassie–Baxter ıslanma modellerinin şematik karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.3. Young, Wenzel ve Cassie–Baxter ıslanma modellerinin şematik karşılaştırılması.

Tablo 2.1’de Young, Wenzel ve Cassie–Baxter modellerinin karşılaştırılma tablosu verilmiştir. Biyomedikal uygulamalarda hangi modelin geçerli olduğu; yüzey topografisi, yüzey enerjisi, biyolojik sıvının özellikleri ve çalışma ortamına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin titanyum implantlarda kontrollü pürüzlendirme ile osteoblast adezyonunun artırılması hedeflendiğinde Wenzel rejimi avantaj sağlayabilir. Buna karşılık bakteri adezyonunun ve biyofilm oluşumunun azaltılması amaçlandığında Cassie–Baxter rejimini destekleyen hiyerarşik mikro/nano yapılar daha uygun olmaktadır.

Tablo 2. 1. Young, Wenzel ve Cassie–Baxter Modellerinin Karşılaştırılması

Özellik	Young	Wenzel	Cassie–Baxter
Yüzey tipi	Düz ve ideal	Pürüzlü	Mikro/nano pürüzlü
Sıvı–katı teması	Tam	Tam	Kısmi
Hava cepleri	Yok	Yok	Var
Temas açısı	Temel değer	Pürüzlülüğe bağlı artar/azalır	Çok yüksektir ($>150^\circ$)
Temas açısı histerezi	Düşük	Genellikle yüksek	Çok düşük
Su damlasının hareketi	Orta	Zor	Çok kolay
Kendini temizleme	Yok	Sınırlı	Çok yüksek
Biyomedikal uygulamalar	Referans model	Hücre adezyonunu artıran yüzeyler	Antibakteriyel ve antifouling yüzeyler

Son yıllarda geliştirilen birçok biyomalzemede, farklı bölgelerde farklı ıslanma davranışlarının oluşturulduğu **hibrit yüzeyler** üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu yüzeylerde belirli alanlar hidrofilik, belirli alanlar ise süperhidrofobik olacak şekilde tasarlanarak hem hücre proliferasyonu desteklenmekte hem de bakteri kolonizasyonu sınırlandırılmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle akıllı implant yüzeyleri ve doku mühendisliği uygulamalarında gelecek vaat eden stratejiler arasında yer almaktadır.

3. Süperhidrofobik Yüzeylerin Tasarım Stratejileri

Süperhidrofobik yüzeylerin geliştirilmesinde yüksek su iticiliğin elde edilmesi, yüzey kimyası ile mikro/nano ölçekteki topografik özelliklerin uyumlu biçimde tasarlanmasına bağlıdır. Bu doğrultuda, **yüzey morfolojisinin mikro ve nano ölçekte kontrol edilmesi, farklı boyutlardaki yapıların birlikte kullanılmasıyla hiyerarşik yüzey mimarisinin oluşturulması ve düşük yüzey enerjili kimyasal modifikasyonların uygulanması**, süperhidrofobik davranışın temelini oluşturan başlıca tasarım stratejileridir. Bununla birlikte, doğada bulunan lotus yaprağı, sucul bitki yaprakları ve bazı böceklerin yüzeylerinden esinlenen biyoesinlenmiş yaklaşımlar, yüksek temas açısı ve düşük temas açısı histerezisinin yanı sıra kendini temizleme, kirlenmeye direnç ve sıvı etkileşimlerinin kontrolü gibi işlevsel özelliklerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, süperhidrofobik yüzeylerin tasarım stratejileri; mikro ve nano ölçekli yüzey topografisinin tasarımı, hiyerarşik mikro/nano yapıların oluşturulması, düşük yüzey enerjili kimyasal modifikasyonlar ve biyoesinlenmiş tasarım yaklaşımları çerçevesinde ele alınarak, bu parametrelerin yüzeyin ıslanabilirliği ve biyomedikal performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

3.1. Mikro ve Nano Ölçekli Yüzey Topografisinin Tasarımı

Süperhidrofobik yüzeylerin geliştirilmesinde en kritik tasarım parametrelerinden biri, yüzey topografisinin mikro ve nano ölçekte kontrollü olarak düzenlenmesidir. Bir yüzeyin kimyasal bileşimi kadar fiziksel morfolojisi de sıvı damlacıklarının yüzey üzerindeki davranışını belirlemektedir. Özellikle mikro ve nano boyutlarda oluşturulan yüzey pürüzlülüğü, yüzey ile sıvı arasındaki gerçek temas alanını değiştirerek temas açısını, kayma açısını ve damlacık hareketliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle süperhidrofobik yüzey tasarımında **yüzey topografisi**, düşük yüzey enerjili kimyasal modifikasyon ile birlikte değerlendirilen temel mühendislik parametrelerinden biri olarak kabul edilmektedir. (Doğadaki lotus (*Nelumbo nucifera*) yaprağı, ağustos böceği (*Cicada spp.*) kanadı ve su yürüyen böcek (*Gerris remigis*) bacakları gibi biyolojik sistemlerde görülen olağanüstü su iticilik özelliklerinin temelinde mikro ve nano ölçekli hiyerarşik yapılar bulunmaktadır. Bu biyolojik yüzeyler, sıvı ile katı arasındaki temas

alanını minimize ederek Cassie–Baxter rejimini desteklemekte ve damlacık altında hava ceplerinin oluşmasını sağlamaktadır. Günümüzde geliştirilen biyomedikal süperhidrofobik yüzeylerin büyük bölümü de bu biyomimetik prensiplerden yararlanılarak tasarlanmaktadır [16, 40, 41].

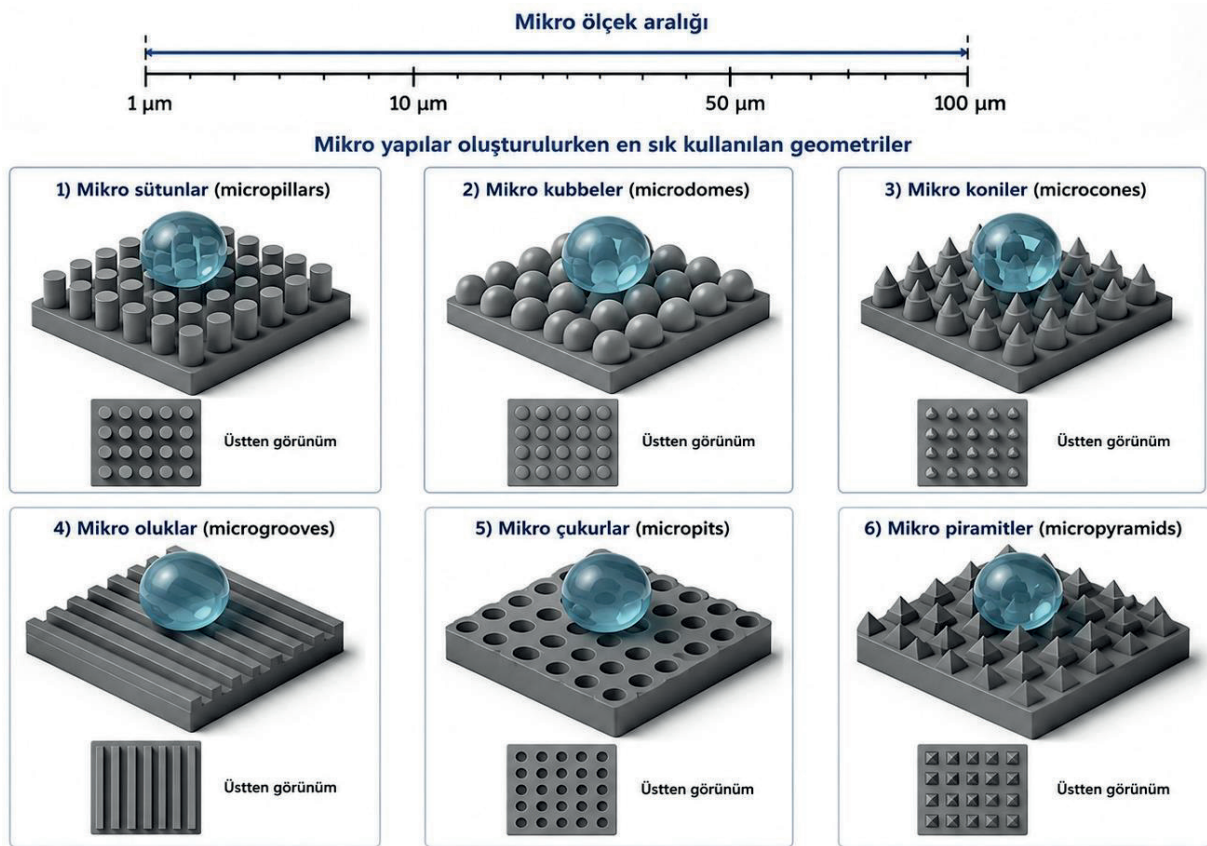
3.1.1. Mikro Ölçekli Yüzey Topografisi

Mikro ölçekli yüzey yapıları genellikle **1–100 μm** boyut aralığında yer alan çıkıntılar, oluklar, sütunlar, konik yapılar ve çukurlardan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Bu yapılar damlacığın makroskobik geometrisini belirleyerek sıvının yüzey üzerindeki yayılmasını kontrol etmektedir.

Mikro yapılar oluşturulurken en sık kullanılan geometriler;

- Mikro sütunlar (micropillars)
- Mikro kubbeler (microdomes)
- Mikro koniler (microcones)
- Mikro oluklar (microgrooves)
- Mikro çukurlar (micropits)
- Mikro piramitler (micropyramids)

şeklinde sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.1. Süperhidrofobik yüzeylerde kullanılan farklı mikro ölçekli yüzey geometrilerinin şematik gösterimi: mikro sütunlar, mikro kubbeler, mikro koniler, mikro oluklar, mikro çukurlar ve mikro piramitler.

Bu yapıların boyutu, yoğunluğu, yüksekliği ve birbirleri arasındaki mesafe damlacığın temas alanını doğrudan etkilemektedir. Örneğin mikro sütunların aralıklarının artması damla altında daha fazla hava tutulmasına olanak sağlarken, sütunların aşırı seyrek yerleştirilmesi damlacığın yapılar arasına çökmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla optimum geometri tasarımı süperhidrofobik performans açısından kritik öneme sahiptir [40].

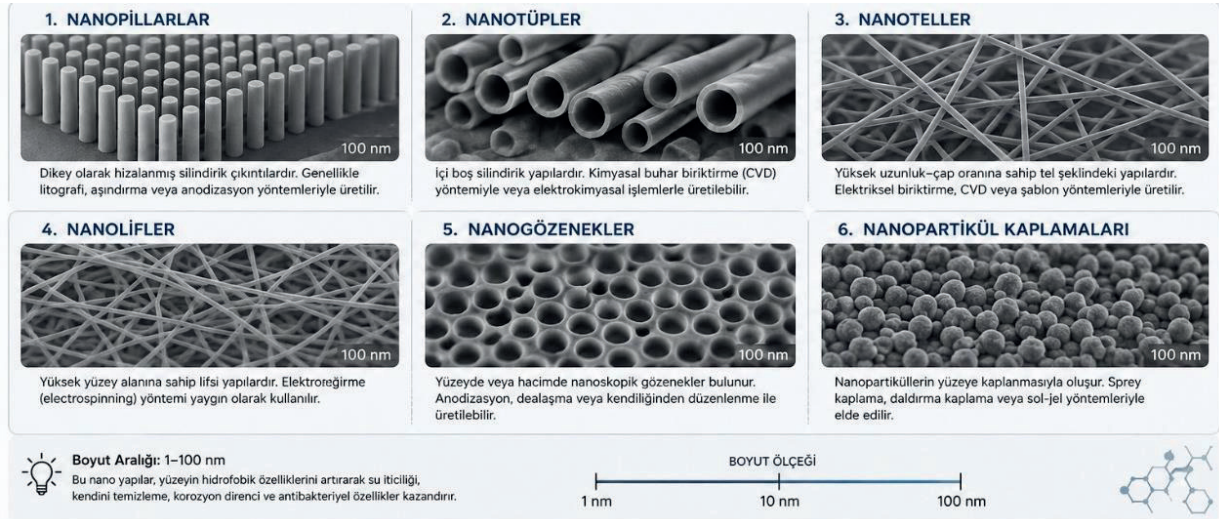
Biyomedikal uygulamalarda mikro topografiler yalnızca su iticiliği değil, aynı zamanda hücre davranışını da etkilemektedir. Osteoblastlar, fibroblastlar ve endotelial hücreler mikro oluklar boyunca hizalanma eğilimi gösterirken, makrofajların aktivasyonu yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle implant yüzeylerinde mikro yapılar yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda biyolojik fonksiyonların düzenlenmesinde de kullanılmaktadır [29].

3.1.2. Nano Ölçekli Yüzey Topografisi

Nano ölçekli yüzey yapıları genellikle **1–100 nm** boyut aralığında bulunan çıkıntılar, nanoteller, nanotüpler, nanopartiküller ve nanoliflerden oluşmaktadır (Şekil 3.2). Nano yapılar, yüzey ile sıvı arasındaki moleküler etkileşimleri düzenleyerek temas açısının artırılmasına katkıda bulunmaktadır [42].

Nano yapılar aşağıdaki şekillerde üretilmektedir:

- Nanopillerlar
- Nanotüpler
- Nanoteller
- Nanolifler
- Nanogözenekler
- Nanopartikül kaplamaları



Şekil 3.2. Nano ölçekli yüzey topografilerinin temsili görüntüleri

Nano topografinin en önemli avantajlarından biri, hava ceplerinin stabilitesini artırarak Cassie–Baxter rejiminin korunmasına katkıda bulunmasıdır. Özellikle implant yüzeylerinde nano yapılar yalnızca su itici özellik kazandırmakla kalmayıp, protein adsorpsiyonu ve hücre adezyonunu da düzenleyebilmektedir [43, 44]. Ancak, proteinlerin yüzey aktif madde (surfaktan) benzeri özellikleri nedeniyle zamanla bu koruyucu hava tabakasının yerini sıvıya bırakması ve sistemin Wenzel rejimine geçmesi, implantların uzun vadeli kararlılığı için aşılması gereken önemli bir mühendislik sorunudur [29].

Titanyum implantlarda oluşturulan TiO_2 nanotüp yapılarının osteoblast proliferasyonunu artırdığı, buna karşılık belirli nanopillar geometrilerinin bakterilerin hücre zarını mekanik olarak deforme ederek bakterisidal etki oluşturduğu bildirilmektedir. Bu nedenle nano topografi, biyomedikal yüzey mühendisliğinde fonksiyonel biyolojik yanıtların yönlendirilmesinde önemli bir araç haline gelmiştir [45, 46].

3.1.3. Mikro ve Nano Yapılar Arasındaki Sinerjik Etkileşim

Tek başına mikro veya nano ölçekli yapıların oluşturulması belirli düzeyde hidrofobiklik sağlayabilse de, gerçek süperhidrofobik davranış genellikle bu iki yapının birlikte kullanılmasıyla elde edilmektedir. Mikro yapılar damlacığın taşıyıcı iskeletini oluştururken, nano yapılar mikro yapılar üzerinde ikinci bir pürüzlülük oluşturarak hava ceplerinin korunmasını sağlamaktadır [47].

Bu çok ölçekli yapı sayesinde;

- gerçek temas alanı azalmakta,
- temas açısı artmakta,
- kayma açısı düşmekte,
- temas açısı histerezisi azalmakta,
- damlacık hareketliliği artmaktadır.

Sonuç olarak mikro ve nano topografilerin birlikte kullanılması, lotus yaprağında gözlenen süperhidrofobik davranışın yapay olarak taklit edilmesini mümkün kılmaktadır [48]

3.1.4. Topografik Parametrelerin Süperhidrofobik Davranışa Etkisi

Yüzey topografisinin başarısı yalnızca pürüzlülüğün varlığına değil, geometrik parametrelerin doğru seçilmesine de bağlıdır. Başlıca *tasarım parametreleri* şunlardır:

- Yapı yüksekliği
- Yapı çapı
- Yapılar arası mesafe (pitch)
- Yoğunluk
- En-boy oranı (aspect ratio)
- Yüzey pürüzlülüğü (R_a , R_q , R_z)
- Hiyerarşik yapı oranı

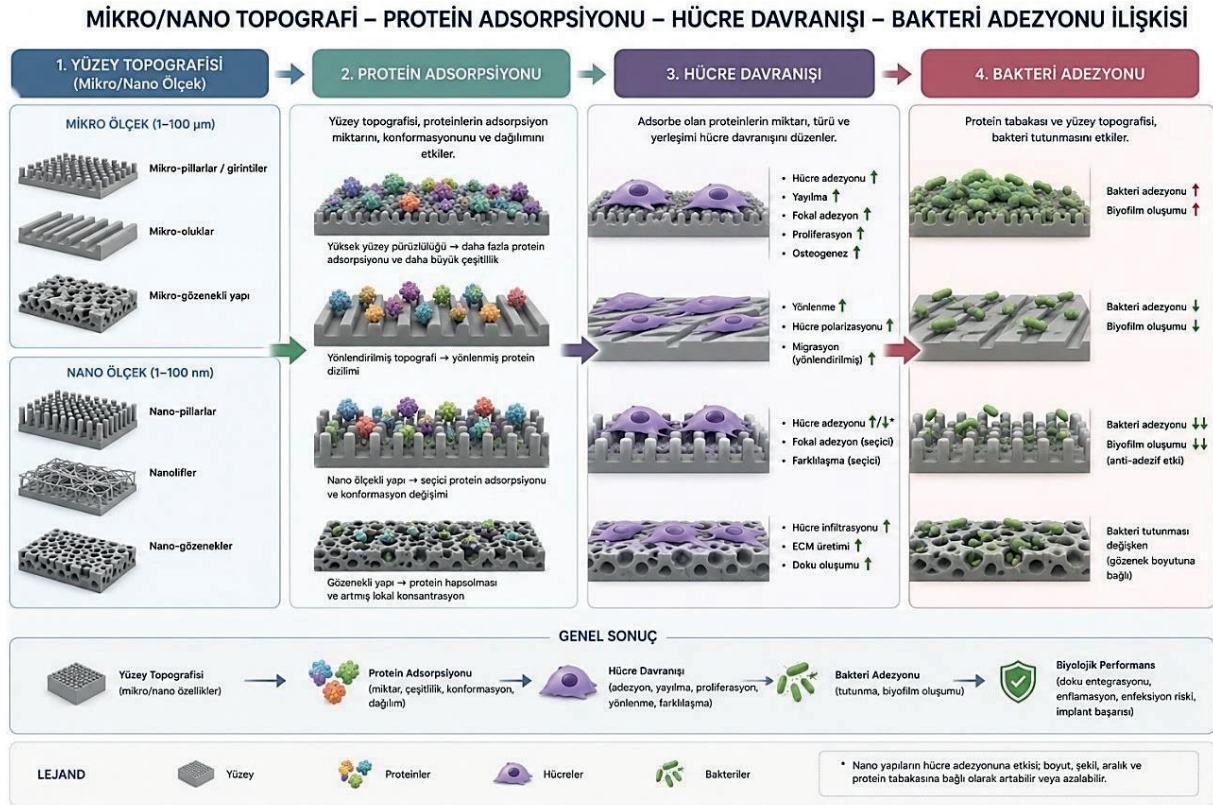
Özellikle yüksek en-boy oranına sahip mikro ve nano sütunlar daha yüksek temas açıları oluşturabilmektedir. Ancak aşırı ince yapıların mekanik dayanımı düşük olduğundan biyomedikal implantlarda optimum geometri seçimi büyük önem taşımaktadır [41].

Son yıllarda sonlu elemanlar analizi (FEA), hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve moleküler dinamik simülasyonları kullanılarak damlacık davranışı üretim öncesinde tahmin edilebilmekte ve yüzey geometrisi optimize edilebilmektedir [49, 50].

3.1.5. Biyolojik Yanıt Üzerindeki Etkileri

Mikro ve nano topografi yalnızca su iticilik sağlamamakta, aynı zamanda biyolojik sistemlerle olan etkileşimleri de belirlemektedir. Hücreler, mikro ve nano yapılardan oluşan topografik ipuçlarını (topographical cues) hücre zarlarındaki **integrin reseptörleri** aracılığıyla algılamakta; bu durum hücre içi

aktin liflerinin dizilimini (fokal adezyon) ve dolayısıyla hücrenin morfolojik davranışını şekillendirmektedir [51]. Mikro/nano ölçekli yüzey topografisinin protein adsorpsiyonu, hücre davranışı ve bakteri adezyonu üzerindeki etkisini gösteren şematik diyagram Şekil 3.3’de verilmiştir. Yüzeyin boyutu, şekli, aralığı ve gözenek yapısı; proteinlerin yüzeye adsorpsiyon miktarını, konformasyonunu ve dağılımını etkileyerek hücre adezyonu, yayılması, proliferasyonu ve farklılaşması gibi hücresel yanıtları düzenlemektedir. Aynı zamanda protein tabakası ve yüzey topografisinin birlikte oluşturduğu ara yüzey, bakterilerin yüzeye tutunmasını ve biyofilm oluşumunu etkileyerek implantın biyolojik performansını belirlemektedir.



Şekil 3.3. Mikro/nano ölçekli yüzey topografisinin protein adsorpsiyonu, hücre davranışı ve bakteri adezyonu üzerindeki etkisini gösteren şematik diyagram.

Protein Adsorpsiyonu: İmplant yüzeyleri vücut sıvıları ile temas ettikten sonraki ilk saniyelerde proteinlerle kaplanmaktadır. Mikro ve nano yapılar proteinlerin adsorpsiyon miktarını ve konformasyonunu değiştirerek sonraki hücresel olayları yönlendirebilmektedir [52, 53].

Hücre Adezyonu: Nano topografiler osteoblastların adezyonunu ve farklılaşmasını artırırken, bazı mikro geometriler fibroblast yönlendirilmesini kontrol edebilmektedir [54]. Biyomedikal implant tasarımlarında bu hücresel seçicilikten yararlanılarak; implantın **kemik içinde kalan kısımları** osteoblast adezyonunu tetiklemek adına nano-yapılarla optimize edilirken, **yumuşak doku ile temas eden boyun kısımları** ise fibroblastların yönlendirilmesini sağlayarak epitel göçünü ve dolayısıyla enfeksiyon sızıntısını engelleyecek mikro-oluklarla tasarlanmaktadır.

Bakteriyel Adezyon: Süperhidrofobik nano topografiler, bakteriyel kontaminasyonu önlemede çift etkili bir savunma mekanizması sergilemektedir. Doğadan ilham alan belirli nano sütun geometrileri, yüzeye tutunmaya çalışan bakterilerin hücre zarını mekanik olarak gerip elastik limiti aşmaya zorlayarak lizise (hücre ölümüne) neden olabilmektedir [55]. Ayrıca, yüzey üzerinde kararlı bir şekilde korunan Cassie–

Baxter rejimi sayesinde sıvı ve biyolojik akışkanlar pürüzlülüklerin tepesinde kalmakta; böylece bakterilerin katı yüzeyle olan gerçek temas alanı azalarak ilk reversibl tutunma basamağı kırılmakta ve biyofilm oluşumu önemli ölçüde geciktirilmektedir [56]. Nano sütunlar bakteri zarını mekanik olarak gererek hücre ölümüne neden olabilmektedir. Ayrıca Cassie–Baxter rejimi sayesinde bakterilerin gerçek temas alanı azaldığından biyofilm oluşumu da önemli ölçüde geciktirilmektedir [46, 56]. Bununla birlikte, nano sütunların sergilediği bu mekanik-bakterisidal performans, bakterilerin morfolojisine ve hücre duvarı kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir; peptidoglikan tabakası ince olan **Gram-negatif bakteriler** (örn. *Pseudomonas aeruginosa*, *E. coli*), kalın bir hücre duvarına sahip olan **Gram-pozitif bakterilere** (örn. *Staphylococcus aureus*) kıyasla bu mekanik gerilmeye karşı çok daha hassastır ve daha hızlı elimine edilmektedir [57].

Kan Uyumluluğu: Kan ile temas eden yüzeylerde, mikro ve nano topografiler tarafından korunan Cassie-Baxter hava katmanı sayesinde gerçek katı-sıvı temas alanı radikal bir şekilde azalmaktadır [29]. Bu morfolojik bariyer, plazma proteinlerinin yüzeye tutunmasını kısıtlayarak pıhtılaşma tetikleyicisi olan trombosit adezyonunu ve aktivasyonunu azaltabilmekte, sonuç olarak yapay yüzey kaynaklı trombüs oluşumunu ve emboli riskini önemli ölçüde sınırlandırabilmektedir [58, 59]. Bununla birlikte, kan ile temas eden süperhidrofobik yüzeylerin tasarımı yüksek kayma gerilmesi (high shear stress) altındaki dinamik akış koşullarında değerlendirilmelidir; çünkü hemodinamik kuvvetler hava ceplerinin kararlılığını bozarak sistemin pıhtılaşmayı tetikleyen Wenzel rejimine geçmesine yol açabilmektedir.

3.1.6. Güncel Tasarım Yaklaşımları

Son yıllarda mikro ve nano topografi tasarımında klasik düzenli geometrilerin yerini daha karmaşık biyomimetik yapılar almaya başlamıştır. Güncel çalışmalar özellikle şu alanlara odaklanmaktadır:

- Yapay zekâ destekli yüzey optimizasyonu,
- Fraktal yüzey tasarımları,
- Çok ölçekli hiyerarşik topografiler,
- Yönlendirilmiş (anizotropik) ıslanabilir yüzeyler,
- Uyarılara duyarlı (stimuli-responsive) dinamik yüzeyler,
- 4B yazdırılmış değişken topografiler.

Bu yeni nesil yaklaşımlar, yalnızca su iticiliği artırmayı değil; aynı zamanda hücre davranışını yönlendiren, antibakteriyel etki gösteren ve gerektiğinde yüzey özelliklerini çevresel koşullara göre değiştirebilen akıllı biyomalzemelerin geliştirilmesini hedeflemektedir [60-62].

Son yıllarda mikro ve nano topografi tasarımında klasik düzenli geometrilerin yerini daha karmaşık biyomimetik yapılar almaya başlamıştır. Güncel çalışmalar özellikle; yapay zekâ destekli yüzey optimizasyonu, fraktal yüzey tasarımları, çok ölçekli hiyerarşik topografiler, yönlendirilmiş (anizotropik) ıslanabilir yüzeyler, uyarılara duyarlı (stimuli-responsive) dinamik yüzeyler ve 4B yazdırılmış değişken topografiler üzerine odaklanmaktadır. Bu yeni nesil yaklaşımlar, yalnızca su iticiliği artırmayı değil; aynı zamanda hücresel mikroyapı etkileşimlerini aktif olarak yönlendiren, dinamik antibakteriyel etki gösteren ve gerektiğinde yüzey özelliklerini fizyolojik mikroçevre koşullara göre değiştirebilen akıllı biyomalzemelerin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Özellikle akıllı ilaç salınım sistemlerinde ve lab-on-a-chip (çip üstü laboratuvar) cihazlarında, dışarıdan bir manyetik alan veya pH değişimiyle topografisini (mikro sütunların açısını veya yüksekliğini) değiştirebilen bu akıllı yüzeyler, biyolojik sıvıların (kan, tükürük vb.) yapay bir pompa mekanizmasına ihtiyaç duyulmadan yönlendirilmesinde devrimsel bir potansiyele sahiptir."

Mikro ve nano ölçekli yüzey yapıları, yüzeyin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra protein adsorpsiyonu, hücre-yüzey etkileşimleri ve bakteri adezyonu gibi biyolojik süreçleri de önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Mikro ve nano topograflar; karakteristik boyutları, yüzey alanları, üretim yöntemleri ve biyolojik arayüzde oluşturdıkları etkiler bakımından birbirlerinden farklılık göstermektedir. Bu farklılıkların daha açık bir şekilde ortaya konulması amacıyla, mikro ve nano ölçekli yüzey yapılarının temel özellikleri ve biyomedikal uygulamalardaki etkileri **Tablo 3.1'de** karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.1. Mikro ve Nano Ölçekli Yüzey Yapılarının Karşılaştırılması

Özellik	Mikro Yapılar	Nano Yapılar
Boyut	1–100 μm	1–1000 nm
Temel görevi	Damlacık geometrisini belirleme	Moleküler etkileşimleri kontrol etme
Temas açısına etkisi	Orta–yüksek	Yüksek
Hava ceplerinin oluşumu	Kısmen	Destekleyici
Hücre davranışına etkisi	Hücre yönlenmesi	Hücre adezyonu ve farklılaşması
Bakteri adezyonuna etkisi	Azaltabilir	Mekanik bakterisidal etki gösterebilir
Kullanım alanı	Ortopedik implantlar, mikroakışkan sistemler	Dental implantlar, biyosensörler, antibakteriyel yüzeyler

3.2. Hiyerarşik Mikro/Nano Yapılar

Süperhidrofobik yüzeylerin tasarımında en başarılı yaklaşımlardan biri, mikro ve nano ölçekli yapıların aynı yüzey üzerinde kontrollü bir şekilde bir araya getirildiği **hiyerarşik (hierarchical) yüzey mimarilerinin** oluşturulmasıdır [18]. Hiyerarşik yüzeyler, farklı boyutlardaki topografik özelliklerin sinerjik etkisi sayesinde sıvı damlacıkları ile katı yüzey arasındaki gerçek temas alanını en aza indirerek yüksek temas açıları ve düşük kayma açıları elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, doğadaki biyolojik yüzeylerin morfolojik özelliklerinden esinlenen biyomimetik tasarım stratejilerinin temelini oluşturmaktadır [63].

Hiyerarşik yüzeylerde mikro yapılar, damlacığın makroskobik temas geometrisini belirleyen birincil yapılar olarak görev yaparken; nano yapılar mikro çıkıntılar üzerinde ikincil pürüzlülük oluşturarak hava ceplerinin (air pockets) kararlılığını artırmaktadır. Böylece sıvı damlası yüzey ile tam temas etmek yerine mikro çıkıntılar üzerinde dengede kalmakta ve damla altında hapsolan hava tabakası sayesinde **Cassie–Baxter ıslanma rejimi** oluşmaktadır. Bu mekanizma, süperhidrofobik yüzeylerin karakteristik özellikleri olan yüksek temas açısı ($>150^\circ$), düşük temas açısı histerezisi ve düşük kayma açısının ($<10^\circ$) temelini oluşturmaktadır [64–66].

3.2.1. Hiyerarşik Yapıların Temel Tasarım Prensipleri

Hiyerarşik mikro/nano yapılar, farklı uzunluk ölçeklerine sahip yüzey özelliklerinin belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Genel olarak bu yapılar üç temel bileşenden oluşmaktadır:

- **Birincil mikro yapılar:** Mikro sütunlar (micropillars), mikro koniler (microcones), mikro kubbeler (microdomes), oluklar ve çukurlar gibi mikrometre boyutundaki yapılardır.

- **İkincil nano yapılar:** Nanopillerler, nanotüpler, nanotel ağları, nanolifler veya nanopartikül kümeleri gibi nanometre boyutundaki yapılardır.
- **Düşük yüzey enerjili kimyasal modifikasyon:** Florlu veya flor içermeyen hidrofobik kaplamalar ile yüzey enerjisinin azaltılmasıdır.

Bu üç bileşenin birlikte optimize edilmesi, süperhidrofobik yüzeylerin yüksek performans göstermesi açısından kritik öneme sahiptir. Mikro yapılar damlacığın taşıyıcı iskeletini oluştururken, nano yapılar hava tabakasının sürekliliğini koruyarak sıvının yüzeye nüfuz etmesini engellemektedir.

Mikro ve nano yapılar arasındaki sinerjik etkileşim, yüzey ile su damlacığı arasındaki gerçek temas alanını önemli ölçüde azaltmaktadır. Temas alanındaki bu azalma, adezyon kuvvetlerinin düşmesine ve damlacığın yüzey üzerinde kolaylıkla hareket etmesine olanak tanımaktadır. Sonuç olarak damlacık, en küçük eğimlerde bile yüzeyden ayrılarak kir, toz ve mikroorganizmaları beraberinde uzaklaştırabilmektedir. Bu durum "Lotus Etkisi" olarak bilinen kendi kendini temizleme mekanizmasının temelini oluşturmaktadır.

Hiyerarşik yüzeyler ayrıca damlacık altında oluşan hava tabakasının sürekliliğini koruyarak yüksek temas açılarının uzun süre muhafaza edilmesini sağlamaktadır. Özellikle biyolojik sıvılarla temas eden yüzeylerde bu hava tabakası, proteinlerin ve bakterilerin yüzeye doğrudan temasını azaltarak biyolojik kirlenmeyi (biofouling) sınırlandırmaktadır.

4. Süperhidrofobik Yüzey Üretim Teknikleri

Süperhidrofobik yüzeylerin elde edilmesinde temel amaç, uygun mikro/nano ölçekli yüzey topografisini oluşturmak ve bu yapıyı düşük yüzey enerjili kimyasal modifikasyonlarla birleştirmektir. Günümüzde bu amaçla fiziksel, kimyasal ve hibrit üretim yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Kullanılacak yöntem; altlık malzemesinin türü, hedeflenen yüzey geometrisi, üretim maliyeti, mekanik dayanıklılık, ölçeklenebilirlik ve biyomedikal uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak seçilmektedir. Son yıllarda geliştirilen üretim teknikleri sayesinde yalnızca yüksek su iticiliğe sahip değil; aynı zamanda antibakteriyel, antitrombotik ve biyouyumlu çok fonksiyonlu süperhidrofobik yüzeylerin üretilmesi mümkün hâle gelmiştir [28, 67,68].

4.1. Lazer Yüzey İşleme

Lazer yüzey işleme, yüksek enerjili lazer ışınları kullanılarak malzeme yüzeyinde kontrollü mikro ve nano yapılar oluşturulmasına dayanan hassas bir üretim yöntemidir. Özellikle femtosaniye ve pikosaniye lazer sistemleri, altlık malzemeye minimum termal hasar vererek düzenli yüzey desenlerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Kimyasal reaktif gerektirmemesi, yüksek hassasiyet sağlaması ve karmaşık geometrilerin üretilmesi yöntemin önemli avantajlarıdır. Bununla birlikte yüksek ekipman maliyeti ve düşük üretim hızı, geniş ölçekli uygulamalardaki temel sınırlamalardır. Titanyum implantlar ve paslanmaz çelik biyomalzemeler üzerinde yaygın olarak uygulanmaktadır [69, 70].

4.2. Kimyasal Aşındırma

Kimyasal aşındırma yöntemi, asidik veya bazik çözeltiler kullanılarak yüzeyde mikro ve nano pürüzlülük oluşturulmasına dayanmaktadır. İşlem parametreleri uygun şekilde kontrol edildiğinde homojen yüzey morfolojileri elde edilebilmektedir. Düşük maliyetli olması, büyük yüzeylere uygulanabilmesi ve endüstriyel ölçeklenebilirliği yöntemin önemli avantajlarıdır. Ancak kullanılan kimyasalların çevresel etkileri ve yüzey geometrisinin hassas kontrolünün zor olması dikkat edilmesi gereken sınırlamalardır. Özellikle titanyum, magnezyum ve alüminyum esaslı biyomalzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [39, 71].

4.3. Sol–Gel Yöntemi

Sol–gel yöntemi, metal alkoksit veya inorganik öncül çözeltilerin hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları sonucu ince film kaplamalarının oluşturulmasına dayanmaktadır. Yöntem, düşük işlem sıcaklığı, homojen kaplama elde edebilme ve farklı fonksiyonel nanopartiküllerin sisteme kolayca entegre edilebilmesi nedeniyle biyomedikal uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle TiO_2 , SiO_2 ve ZnO esaslı kaplamalar, antibakteriyel ve biyouyumlu süperhidrofobik yüzeylerin geliştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır [72, 73].

4.4. Elektrokimyasal Anodizasyon

Elektrokimyasal anodizasyon, metal yüzeyinde kontrollü oksit tabakalarının oluşturulmasını sağlayan elektrokimyasal bir yöntemdir. Titanyum üzerinde oluşturulan düzenli TiO_2 nanotüp yapıları, hem süperhidrofobik özelliklerin geliştirilmesine hem de osteoblast proliferasyonu ve osseointegrasyonun artırılmasına katkı sağlamaktadır. Yöntem, yüksek tekrarlanabilirlik ve kontrollü nano yapı üretimi gibi avantajlara sahip olmakla birlikte yalnızca elektriksel olarak iletken malzemelere uygulanabilmektedir [74, 75].

4.5. Elektroeğirme (Electrospinning)

Elektroeğirme yöntemi, yüksek elektrik alanı altında polimer çözeltilerinden nanolif ağlarının üretilmesini sağlayan etkili bir tekniktir. Oluşturulan yüksek gözenekliliğe sahip nanolif yapıları, yüzey pürüzlülüğünü artırarak süperhidrofobik davranışı desteklemektedir. Ayrıca biyobozunur polimerlerin kullanılabilmesi, yöntemi yara örtüleri, doku mühendisliği iskeleleri ve ilaç salım sistemleri gibi biyomedikal uygulamalar için cazip hâle getirmektedir [76, 77].

4.6. Kimyasal ve Fiziksel Buhar Biriktirme (CVD/PVD)

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ve Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), ince film kaplamalarının kontrollü olarak yüzeye aktarılmasını sağlayan ileri üretim teknikleridir. Bu yöntemlerle yüksek saflıkta, homojen ve mekanik olarak dayanıklı kaplamalar elde edilebilmektedir. Özellikle TiN , DLC (Diamond-Like Carbon), SiO_2 ve florlu ince filmler biyomedikal implantlarda kullanılmaktadır. Ancak ekipman maliyetlerinin yüksek olması ve karmaşık proses gereksinimleri yöntemin en önemli dezavantajlarıdır [78, 79].

4.7. Litografi Tabanlı Yöntemler

Fotolitografi, nanoimprint litografi ve elektron demeti litografisi gibi teknikler, mikro ve nano desenlerin yüksek çözünürlükte oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle araştırma amaçlı çalışmalarda yüzey geometrisinin hassas şekilde kontrol edilmesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte yüksek maliyetleri ve düşük üretim hızları nedeniyle seri üretimden çok laboratuvar ölçekli uygulamalarda tercih edilmektedir [80-82].

4.8. Plazma Yüzey Modifikasyonu

Plazma işlemleri, yüzey kimyasını değiştirmeden veya ince fonksiyonel tabakalar oluşturarak yüzey özelliklerini geliştiren çevre dostu yöntemlerdir. Oksijen, argon veya florlu plazmalar kullanılarak yüzey enerjisi kontrol edilebilmekte ve hidrofobik fonksiyonel gruplar oluşturulabilmektedir. Plazma yöntemi, hızlı uygulanabilirliği, çözücü gerektirmemesi ve biyomedikal malzemelerde sterilizasyon ile yüzey modifikasyonunu aynı anda sağlayabilmesi nedeniyle dikkat çekmektedir [83, 84].

4.9. Eklemeli İmalat (3B Yazdırma)

Eklemeli imalat teknolojileri, karmaşık üç boyutlu geometrilere sahip biyomalzemelerin katmanlı üretimine olanak tanımaktadır. Son yıllarda mikro ve nano ölçekli yüzey desenlerinin doğrudan yazdırılabilmesi sayesinde süperhidrofobik implantlar ve kişiye özel biyomedikal cihazlar geliştirilmektedir. Üretim sonrasında lazer tekstürleme, plazma işlemi veya kimyasal modifikasyon gibi yöntemlerle yüzey özellikleri daha da iyileştirilebilmektedir. Tasarım özgürlüğü ve kişiselleştirilebilir üretim kapasitesi, eklemeli imalatı geleceğin en umut verici yüzey mühendisliği teknolojilerinden biri hâline getirmektedir [85, 86].

Süperhidrofobik yüzeylerin eldesinde kullanılan tüm bu fiziksel, kimyasal ve hibrit üretim yöntemleri; kendilerine özgü avantajları, sınırlamaları ve endüstriyel olgunluk seviyeleri bakımından farklılıklar göstermektedir. Bahsi geçen tekniklerin hedeflenen biyomedikal uygulamaya yönelik seçim kriterlerini kolaylaştırmak amacıyla hazırlanan genel karşılaştırma matrisi Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1. Süperhidrofobik Yüzey Üretim Tekniklerinin Genel Karşılaştırılması

Üretim yöntemi	Temel avantaj	Temel sınırlama	Biyomedikal uygulamalar
Lazer yüzey işleme	Yüksek hassasiyet, kimyasal gerektirmez	Yüksek maliyet	Ortopedik ve dental implantlar
Kimyasal aşındırma	Düşük maliyet, ölçeklenebilir	Kimyasal atık oluşumu	Metal implantlar
Sol-gel	Homojen kaplama, düşük sıcaklık	Kaplama çatlakları oluşabilir	Biyoseramik ve metal yüzeyler
Elektrokimyasal anodizasyon	Düzenli nano yapılar	İletken malzemelerle sınırlı	Titanyum implantlar
Elektroerozyon	Nanolif üretimi, yüksek gözeneklilik	Mekanik dayanım sınırlı olabilir	Doku mühendisliği, yara örtüleri
CVD/PVD	Dayanıklı ince filmler	Yüksek ekipman maliyeti	İnce film biyomalzemeler
Litografi	Çok yüksek çözünürlük	Düşük üretim hızı	Mikroakışkan sistemler, biyosensörler
Plazma modifikasyonu	Hızlı ve çevre dostu	Etkinlik zamanla azalabilir	Polimer ve metal biyomalzemeler
Eklemeli imalat	Karmaşık geometriler, kişiselleştirme	Ek yüzey işlemleri gerekebilir	Kişiye özel implantlar

5. Yapısal Zorluklar

Süperhidrofobik yüzeyler; düşük yüzey enerjisi, yüksek su iticiliği, sıvıların yüzey üzerinde kolayca uzaklaştırılması ve kontaminasyona karşı direnç gibi özellikleri sayesinde biyomedikal mühendisliğinde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, laboratuvar koşullarında elde edilen yüksek su temas açıları ve düşük kayma açıları, bu yüzeylerin gerçek biyomedikal ortamlarda güvenilir ve uzun süreli kullanımını garanti etmemektedir. Özellikle biyolojik sıvılar, mekanik yükler, tekrarlı temas, sterilizasyon işlemleri, kimyasal maruziyet ve uzun süreli sıvı altında kalma gibi koşullar, yüzeyin mikro/nanoyapısında ve kimyasal bileşiminde değişimlere neden olarak süperhidrofobik davranışın zamanla kaybolmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, biyomedikal uygulamalarda süperhidrofobik yüzey tasarımının yalnızca

başlangıçtaki ıslanabilirlik özelliklerine değil, aynı zamanda mekanik bütünlük, aşınma direnci, çevresel stabilite, biyouyumluluk ve üretilebilirlik gibi çoklu performans kriterlerine dayanması gerekmektedir [87, 88].

5.1. Mekanik Dayanıklılık ve Aşınma Direnci

Süperhidrofobik yüzeylerin en önemli yapısal sınırlamalarından biri, su itici davranışın büyük ölçüde yüzeyde oluşturulan mikro/nano ölçekli hiyerarşik yapıların korunmasına bağlı olmasıdır. Bu yapılar çoğu zaman yüksek yüzey alanına ve düşük mekanik stabiliteye sahip olduğundan, sürtünme, darbe, basınç veya tekrarlı temas sonucunda kolaylıkla deformasyona uğrayabilmektedir. Özellikle biyomedikal cihazlarda yüzeyler; implantasyon sırasında mekanik temas, kullanım sırasında tekrarlı yükleme ve çevresel etkiler nedeniyle aşınmaya maruz kalabilmektedir. Mikro/nanoyapıların kısmen dahi bozulması, yüzey pürüzlülüğünün ve hava hapsinin değişmesine, dolayısıyla Cassie–Baxter ıslanma durumunun bozulmasına neden olabilir. Sonuç olarak, başlangıçta 150°'nin üzerinde temas açısına sahip olan bir yüzey, kullanım sürecinde hidrofobikliğini önemli ölçüde kaybedebilir [89]. Bu nedenle gelecek nesil süperhidrofobik yüzeylerde mekanik dayanıklılık ile yüksek su iticiliği arasında bir denge kurulması temel tasarım gereksinimlerinden biridir. Yüzey mikro/nanoyapılarının doğrudan altlık üzerine büyütülmesi, yapısal olarak daha kararlı kaplama mimarilerinin geliştirilmesi, yüzey yapılarının daha dayanıklı polimerik veya seramik fazlarla desteklenmesi ve çok katmanlı/hiyerarşik kaplama tasarımları bu sorunun çözümünde kullanılabilecek yaklaşımlar arasındadır. Bunun yanında, mekanik hasar sonrasında yüzeyin başlangıçtaki özelliklerini yeniden kazanabilmesini sağlayan kendi kendini iyileştiren (self-healing) süperhidrofobik yüzeyler önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Kendini iyileştirme mekanizmasının polimer zincirlerinin yeniden düzenlenmesi, dinamik kovalent bağlar, supramoleküler etkileşimler veya yüzeyde bulunan hidrofobik bileşenlerin yeniden taşınması yoluyla gerçekleştirilmesi, yüzey ömrünün uzatılmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, biyomedikal uygulamalar açısından bu sistemlerin iyileşme mekanizmasının toksik olmayan bileşenlere dayanması ve sterilizasyon koşullarından sonra da işlevselliğini koruması gerekmektedir.

5.2. Uzun Dönem Stabilite

Süperhidrofobik yüzeylerin uzun dönem performansı, yalnızca yüzey kimyasının kararlılığına değil, aynı zamanda yüzey yapısında tutulan hava tabakasının sürekliliğine de bağlıdır. Cassie–Baxter modelinde sıvı ile yüzey arasındaki gerçek temas alanının azaltılmasını sağlayan hapsolmuş hava, yüksek su iticiliğin temel bileşenlerinden biridir. Ancak yüzey uzun süre sıvı altında kaldığında, basınç farklılıkları, sıvının mikro/nano yapılara nüfuz etmesi, gaz çözünmesi ve yüzey kusurları nedeniyle hapsolmuş hava zamanla kaybolabilmektedir. Bu durum, Cassie–Baxter durumundan Wenzel durumuna geçişi kolaylaştırarak temas açısının azalmasına ve sıvının yüzeye daha fazla nüfuz etmesine neden olabilir [90]. Bu problem özellikle kan, plazma, idrar, tükürük ve diğer biyolojik sıvılarla uzun süre temas eden biyomedikal cihazlar açısından kritik önem taşımaktadır. Biyolojik sıvıların saf sudan farklı olarak protein, lipid, hücresel bileşen ve çeşitli organik moleküller içermesi, yüzeyde adsorpsiyon ve biyolojik kirlenme (biofouling) riskini artırmaktadır. Yüzeye adsorbe olan biyomoleküller yalnızca yüzey enerjisini değiştirmekle kalmayıp mikro/nanoyapıların geometrisini de etkileyerek süperhidrofobik davranışın bozulmasına neden olabilir. Dolayısıyla, gelecekteki yüzey tasarımlarında yüksek başlangıç temas açısının yanı sıra *sıvı altında kalma süresi*, *basınç dayanımı*, *protein adsorpsiyonu* ve *biofouling direnci* gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir [58]. Bu bağlamda, plastronun daha uzun süre korunmasını sağlayacak hiyerarşik yüzey geometrileri, optimize edilmiş mikro/nanoyapı yoğunlukları ve gaz hapsini destekleyen yüzey mimarilerinin geliştirilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca, yüzeyin Cassie–Baxter durumunu hangi koşullarda kaybettiğinin belirlenmesi için statik temas açısı ölçümünün ötesine geçen dinamik ıslanabilirlik, basınç altında temas açısı, uzun süreli daldırma, tekrarlı sıvı temasları ve gerçek biyolojik ortam testleri standart değerlendirme protokollerine dâhil edilmelidir. Böylece laboratuvar ortamında ölçülen kısa süreli

süperhidrofobikliğin klinik kullanım koşullarındaki gerçek karşılığı daha doğru şekilde ortaya konulabilir [91].

5.3. Klinik Ölçeklenebilirlik

Süperhidrofobik yüzeylerin biyomedikal uygulamalara aktarılmasındaki bir diğer önemli engel, laboratuvar ölçeğinde geliştirilen yüzey üretim yöntemlerinin endüstriyel ve klinik ölçekte uygulanabilirliğidir. Litografi, lazer işleme, plazma işlemleri, elektrokimyasal yöntemler, sol-jel prosesleri ve çeşitli nanopartikül tabanlı kaplama teknikleri yüksek performanslı yüzeyler oluşturabilmesine rağmen; ekipman maliyeti, işlem süresi, enerji tüketimi, proses karmaşıklığı ve büyük veya karmaşık geometrilere sahip tıbbi cihazlara uygulanabilirlik açısından önemli sınırlamalar bulunmaktadır. Ayrıca, aynı mikro/nano yapının geniş yüzey alanları boyunca homojen şekilde oluşturulması ve üretim partileri arasında tekrarlanabilirliğin sağlanması endüstriyel üretim açısından kritik bir gerekliliktir [92].

Biyomedikal uygulamalarda ölçeklenebilirlik yalnızca üretim maliyeti ve yüzey alanının büyütülmesi anlamına gelmemektedir. Üretim sürecinin sterilizasyonla uyumluluğu, yüzey kaplamasının altlıkla adezyonu, kimyasal kararlılığı, biyoyumluluğu, bozunma ürünlerinin güvenliği ve uzun dönem performansının doğrulanabilirliği de dikkate alınmalıdır. Özellikle implant ve invaziv cihazlarda kullanılan kaplamaların üretim sonrasında sterilizasyon süreçlerinden geçmesi, yüzey kimyasını ve mikro/nanoyapıyı değiştirebileceğinden, üretim ve sterilizasyon süreçlerinin birlikte optimize edilmesi gerekmektedir.

Gelecekte klinik olarak uygulanabilir süperhidrofobik yüzeylerin geliştirilmesinde ****basit, düşük maliyetli, tekrarlanabilir ve ölçeklenebilir üretim tekniklerinin**** ön plana çıkması beklenmektedir. Sprey kaplama, daldırma kaplama, sol-jel, kendiliğinden organize olan sistemler ve geniş alanlı lazer/plazma işlemleri gibi yöntemlerin optimize edilmesi, laboratuvar ölçeğinden endüstriyel üretime geçişi kolaylaştırabilir. Bununla birlikte, üretim sürecinin yalnızca temas açısı gibi tek bir performans göstergesi üzerinden değil, yüzey morfolojisi, mekanik dayanıklılık, aşınma sonrası ıslanabilirlik, kimyasal stabilite, biyoyumluluk ve sterilizasyon sonrası performans gibi çoklu kriterler üzerinden standardize edilmesi gerekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, süperhidrofobik yüzeylerin biyomedikal mühendisliğinde yaygın ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi için temel hedef, yüksek temas açısına sahip bir yüzey üretmekten, gerçek kullanım koşullarında özelliklerini uzun süre koruyabilen fonksiyonel bir yüzey geliştirmeye doğru evrilmelidir. Gelecekteki tasarımlarda mekanik olarak dayanıklı mikro/nano hiyerarşik yapılar, kendini iyileştirme kapasitesi, kalıcı plastron stabilitesi, düşük biofouling eğilimi ve biyoyumlu kimya birlikte ele alınmalıdır. Bunun yanında, üretim yöntemlerinin maliyet, tekrarlanabilirlik ve ölçeklenebilirlik açısından optimize edilmesi, bu teknolojilerin laboratuvar araştırmalarından klinik uygulamalara taşınmasında belirleyici olacaktır. Bu nedenle, **yapısal tasarım–yüzey kimyası–mekanik dayanıklılık–biyolojik etkileşim–üretim teknolojisi arasındaki ilişkinin bütüncül biçimde ele alınması**, biyomedikal amaçlı süperhidrofobik yüzeylerin gelecekteki gelişimi için temel bir tasarım paradigması olarak değerlendirilebilir.

6. Gelecek Perspektifleri

Süperhidrofobik yüzeylerin gelecekteki gelişimi, yalnızca mevcut yüzey modifikasyon yöntemlerinin optimize edilmesine değil, aynı zamanda **yüzey geometrisinin, kimyasal bileşiminin ve fonksiyonel özelliklerinin kontrollü biçimde tasarlanabildiği yeni nesil üretim yaklaşımlarının geliştirilmesine** bağlıdır. Özellikle nanoteknolojideki ilerlemeler, mikro/nano ölçekte hiyerarşik yüzey yapıların hassas biçimde oluşturulmasını ve yüzey özelliklerinin uygulamaya özgü olarak programlanmasını mümkün hâle getirmektedir. Bu bağlamda üç boyutlu (3B) baskı, ileri mikro/nano üretim teknikleri ve akıllı/uyaranlara yanıt veren yüzey sistemleri, geleceğin süperhidrofobik yüzey tasarımlarında öne çıkan araştırma alanları arasında yer almaktadır [85, 93, 94].

Geleneksel süperhidrofobik yüzey üretim yöntemlerinde yüzey morfolojisinin ve kimyasal özelliklerin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesi çoğu zaman sınırlıdır. Oysa yeni nesil üretim yaklaşımları, yüzey topografyasının farklı uzunluk ölçeklerinde tasarlanmasına ve belirli bir uygulamanın gerektirdiği ıslanabilirlik, mekanik dayanıklılık ve sıvı taşınım özelliklerinin aynı anda optimize edilmesine olanak sağlayabilir. Özellikle biyomedikal mühendisliğinde karmaşık geometrilere sahip cihaz ve implantların yaygınlaşması, yalnızca düz yüzeylere uygulanabilen geleneksel kaplama teknikleri yerine, **geometriye özgü ve üç boyutlu yüzey mühendisliği yaklaşımlarını** gerekli kılmaktadır.

6.1. 3B Baskı ve Hiyerarşik Yüzey Mimarilerinin Tasarımı

3B baskı teknolojileri, süperhidrofobik yüzeylerin geleceğinde önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ekllemeli imalat yaklaşımı sayesinde yalnızca makro ölçekte cihaz geometrisinin değil, aynı zamanda yüzey topografyasının da kontrollü biçimde tasarlanması mümkün olabilir. Özellikle mikro/nano ölçekte hiyerarşik yapıların 3B baskı ile doğrudan veya dolaylı olarak oluşturulabilmesi, süperhidrofobik yüzeylerin üretiminde önemli bir tasarım özgürlüğü sağlayacaktır.

Gelecekte 3B baskının nanoteknolojik yüzey modifikasyonlarıyla birleştirilmesiyle, farklı ölçeklerde yapıların aynı yüzey üzerinde bütünleştirildiği **hiyerarşik mikro–nano mimariler** geliştirilebilir. Makrogeometrinin 3B baskı ile oluşturulmasının ardından yüzeyin nanoölçekli kaplama, lazer işlemi, nanopartikül biriktirme veya kendiliğinden organize olma yöntemleriyle fonksiyonlandırılması, hem geometrik hem de kimyasal olarak optimize edilmiş süperhidrofobik yüzeylerin elde edilmesini sağlayabilir.

Bu yaklaşım özellikle karmaşık geometrili biyomedikal cihazlarda önemlidir. İmplantların, mikroakışkan kanalların, sensörlerin ve diğer tıbbi cihazların yüzey özelliklerinin doğrudan tasarım aşamasında tanımlanabilmesi, süperhidrofobikliğin sonradan uygulanan bir kaplama özelliği olmaktan çıkarak **ürünün temel geometrik ve fonksiyonel tasarımının bir parçası hâline gelmesini** sağlayabilir.

6.2. Akıllı ve Uyarılara Yanıt Veren Yüzey Tasarımları

Geleceğin önemli araştırma alanlarından biri, çevresel koşullardaki değişimlere yanıt olarak yüzey özelliklerini kontrollü biçimde değiştirebilen **akıllı ve uyarılara yanıt veren (stimuli-responsive) süperhidrofobik yüzeylerdir**. Geleneksel süperhidrofobik yüzeyler genellikle sabit bir yüzey kimyası ve topografyaya sahipken, akıllı yüzeylerde ıslanabilirliğin dış uyarılara bağlı olarak değiştirilebilmesi hedeflenmektedir.

Sıcaklık, pH, ışık, elektrik alanı, manyetik alan veya kimyasal ortam gibi uyarıların kullanılmasıyla yüzeyin hidrofilik–hidrofobik veya süperhidrofilik–süperhidrofobik davranışı arasında kontrollü geçişler gerçekleştirilebilir. Böylece yüzey, yalnızca suyu uzaklaştıran pasif bir yapı olmaktan çıkarak, **sıvı hareketini, damla tutunmasını, damla taşınmasını veya yüzey–sıvı etkileşimini programlanabilir biçimde kontrol eden dinamik bir platforma** dönüşebilir.

Bu tür yüzeylerin geliştirilmesinde yüzey kimyası ile mikro/nano topografyanın birlikte tasarlanması kritik önem taşımaktadır. Gelecekte farklı uyarılara farklı yanıtlar verebilen çok durumlu yüzeylerin geliştirilmesiyle, aynı yüzeyin farklı çalışma koşullarında farklı ıslanabilirlik özellikleri göstermesi mümkün olabilir. Bu yaklaşım, özellikle mikroakışkan sistemler, biyosensörler, kontrollü sıvı yönetimi ve akıllı biyomedikal cihazlar açısından yeni tasarım olanakları sunmaktadır.

6.3. Nanoteknoloji Tabanlı Yeni Nesil Yüzey Mühendisliği

Nanoteknolojideki gelişmeler, süperhidrofobik yüzeylerin tasarımında **yüzey kimyası ile nanoölçekli topografyanın eş zamanlı kontrolünü** mümkün kılmaktadır. Nanopartiküller, nanoteller, nanotüpler, nanokompozitler ve kendiliğinden organize olan nanoyapılar kullanılarak yüzeyin etkin pürüzlülüğü, yüzey enerjisi ve sıvı ile etkileşimi kontrollü biçimde değiştirilebilir.

Gelecekte tek tip nanopartikül kullanımından ziyade, farklı boyut, şekil ve kimyasal özelliklere sahip nanoyapıların birlikte kullanıldığı **çok ölçekli ve hiyerarşik yüzey mimarilerinin** geliştirilmesi beklenmektedir. Bu tür tasarımlar, Cassie–Baxter durumunun daha kararlı hâle getirilmesine ve aynı zamanda mekanik dayanıklılığın artırılmasına katkı sağlayabilir. Bunun yanında, nanoölçekli yapıların biyouyumlu polimerler, seramikler veya hibrit malzemelerle bütünleştirilmesi, süperhidrofobik yüzeylerin farklı biyomedikal altlıklara uygulanabilirliğini genişletebilir.

Ancak nanoteknoloji tabanlı yüzeylerin gelecekteki başarısı yalnızca yüksek performans elde edilmesine değil, kullanılan nanomalzemelerin güvenliği ve yüzeyden ayrılma risklerinin kontrol edilmesine de bağlı olacaktır. Bu nedenle yeni nesil yüzey tasarımlarında **fonksiyonellik–mekanik kararlılık–biyogüvenlik** dengesinin birlikte ele alınması gerekmektedir.

6.4. Dijital Tasarım, Yapay Zekâ ve Kişiselleştirilmiş Yüzey Üretimi

Süperhidrofobik yüzeylerin geleceğinde yalnızca üretim teknolojilerinin değil, **hesaplamalı tasarım ve veri odaklı optimizasyon yöntemlerinin** de önemli rol oynaması beklenmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, mikro/nano yapı boyutları, yapı yoğunluğu, yüzey enerjisi ve sıvı ile etkileşim arasındaki ilişkinin modellenmesi, deneysel deneme-yanılma süreçlerinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Özellikle yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon yöntemleri kullanılarak belirli bir uygulama için optimum yüzey mimarisinin tahmin edilmesi mümkün hâle gelebilir. Böylece çok sayıda geometrik ve kimyasal parametrenin aynı anda değerlendirilmesi ve hedeflenen temas açısı, kayma açısı, mekanik dayanıklılık veya sıvı taşıma davranışına sahip yüzeylerin daha hızlı geliştirilmesi sağlanabilir. Bu yaklaşım, 3B baskı teknolojileriyle birleştirildiğinde **dijital olarak tasarlanan ve doğrudan üretilen kişiselleştirilmiş süperhidrofobik yüzeylerin** önünü açabilir. Böylece yüzey tasarımı, üretim ve performans değerlendirmesi birbirinden bağımsız aşamalar olmaktan çıkarak dijital bir tasarım–üretim döngüsü içerisinde bütünleştirilebilir.

Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeylerin geleceği; daha yüksek temas açlarına ulaşmaktan çok, **yüzey yapısının hassas biçimde tasarlanabildiği, fonksiyonların programlanabildiği ve üretimin dijital olarak kontrol edilebildiği yeni nesil yüzey mühendisliği yaklaşımlarına** doğru ilerlemektedir. 3B baskı, hiyerarşik mikro–nano yapıların tasarımı, akıllı ve uyaranlara yanıt veren yüzeyler, nanokompozit tabanlı yüzey mimarileri ve yapay zekâ destekli tasarım yöntemlerinin birlikte kullanılması, süperhidrofobik yüzeylerin yalnızca laboratuvar ölçeğinde geliştirilen pasif kaplamalar olmaktan çıkarak **uygulamaya özgü olarak tasarlanabilen, dinamik ve fonksiyonel yüzey platformlarına** dönüşmesini sağlayabilir. Biyomedikal mühendisliği açısından bu dönüşüm, yüzey özelliklerinin cihazın veya implantın tasarım aşamasından itibaren tanımlanmasına ve belirli klinik gereksinimlere göre özelleştirilmesine olanak sağlayarak, süperhidrofobik yüzey teknolojilerinin gelecekteki uygulama alanlarını önemli ölçüde genişletecektir [85, 95, 96, 97].

Kaynaklar

- Barthlott, W., & Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202, 1–8.
- Young, T. (1805). An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65–87.
- Wenzel, R. N. (1936). Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8), 988–994.
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of Porous Surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, 40, 546–551.
- Liu, K., & Jiang, L. (2011). Bio-inspired Design of Multiscale Structures for Function Integration. *Nano Today*, 6, 155–175.
- Nosonovsky, M., & Bhushan, B. (2009). Superhydrophobic Surfaces and Emerging Applications: Non-adhesion, Energy, Green Engineering. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 14, 270–280.
- Menzies, K. L., & Jones, L. (2010). The impact of contact angle on the biocompatibility of biomaterials. *Optometry and vision science*, 87(6), 387-399.
- Hamraoui, A. (2025). Cell adhesion and surface interactions: A comprehensive review of surface energy, wettability, and topography effects. *Aip Advances*, 15(9).
- Crago, M., Lee, A., Hoang, T. P., Talebian, S., & Naficy, S. (2024). Protein adsorption on blood-contacting surfaces: A thermodynamic perspective to guide the design of antithrombogenic polymer coatings. *Acta Biomaterialia*, 180, 46-60.
- Lima, A. C., & Mano, J. F. (2015). Micro/nano-structured superhydrophobic surfaces in the biomedical field: part II: applications overview. *Nanomedicine*, 10(2), 271-297.
- Wang, S., & Jiang, L. (2007). Definition of superhydrophobic states. *Advanced materials*, 19(21), 3423-3424.
- Law, K. Y. (2014). Definitions for hydrophilicity, hydrophobicity, and superhydrophobicity: getting the basics right. *The journal of physical chemistry letters*, 5(4), 686-688.
- Lafuma, A., & Quéré, D. (2003). Superhydrophobic states. *Nature materials*, 2(7), 457-460.) 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.
- Quéré, D. (2008). Wetting and roughness. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 38, 71-99.
- Parvate, S., Dixit, P., & Chattopadhyay, S. (2020). Superhydrophobic surfaces: insights from theory and experiment. *The Journal of Physical Chemistry B*, 124(8), 1323-1360.
- 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.
- Liu, K., Yao, X., & Jiang, L. (2010). Recent developments in bio-inspired special wettability. *Chemical Society Reviews*, 39, 3240–3255.

- Bhushan, B., Jung, Y. C., & Koch, K. (2009). Micro-, nano-and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1631-1672.
- Gittens, R. A., Scheideler, L., Rupp, F., Hyzy, S. L., Geis-Gerstorfer, J., Schwartz, Z., & Boyan, B. D. (2014). A review on the wettability of dental implant surfaces II: Biological and clinical aspects. *Acta biomaterialia*, 10(7), 2907-2918.
- Rupp, F., Gittens, R. A., Scheideler, L., Marmur, A., Boyan, B. D., Schwartz, Z., & Geis-Gerstorfer, J. (2014). A review on the wettability of dental implant surfaces I: Theoretical and experimental aspects. *Acta biomaterialia*, 10(7), 2894-2906.
- Zhang, Y., Fan, Z., Xing, Y., Jia, S., Mo, Z., & Gong, H. (2022). Effect of microtopography on osseointegration of implantable biomaterials and its modification strategies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 981062.
- Wang, H., Liu, J., Wang, C., Shen, S. G., Wang, X., & Lin, K. (2021). The synergistic effect of 3D-printed microscale roughness surface and nanoscale feature on enhancing osteogenic differentiation and rapid osseointegration. *Journal of Materials Science & Technology*, 63, 18-26.
- Shao, H., Ma, M., Wang, Q., Yan, T., Zhao, B., Guo, S., & Tong, S. (2022). Advances in the superhydrophilicity-modified titanium surfaces with antibacterial and pro-osteogenesis properties: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 1000401.
- Shin, S., Seo, J., Han, H., Kang, S., Kim, H., & Lee, T. (2016). Bio-inspired extreme wetting surfaces for biomedical applications. *Materials*, 9(2), 116.
- Erbil, H. Y. (2021). Dependency of contact angles on three-phase contact line: A review. *Colloids and Interfaces*, 5(1), 8.
- Eral, H. B., 't Mannetje, D. J. C. M., & Oh, J. M. (2013). Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications. *Colloid and polymer science*, 291(2), 247-260.
- Gao, L., & McCarthy, T. J. (2006). Contact angle hysteresis explained. *Langmuir*, 22(14), 6234-6237.
- Manoharan, K., & Bhattacharya, S. (2019). Superhydrophobic surfaces review: Functional application, fabrication techniques and limitations. *Journal of Micromanufacturing*, 2(1), 59-78.
- Falde, E. J., Yohe, S. T., Colson, Y. L., & Grinstaff, M. W. (2016). Superhydrophobic materials for biomedical applications. *Biomaterials*, 104, 87-103.
- Xue, C. H., Jia, S. T., Zhang, J., & Ma, J. Z. (2010). Large-area fabrication of superhydrophobic surfaces for practical applications: an overview. *Science and Technology of Advanced Materials*, 11(3), 033002.
- Jeevahan, J., Chandrasekaran, M., Britto Joseph, G., Durairaj, R. B., & Mageshwaran, G. J. J. O. C. T. (2018). Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges. *Journal of Coatings Technology and Research*, 15(2), 231-250.
- Kumar, A., & Nanda, D. (2019). Methods and fabrication techniques of superhydrophobic surfaces. In *Superhydrophobic polymer coatings* (pp. 43-75). Elsevier.
- Zheng, S. (2025). Superhydrophobic Antifouling and Antimicrobial Materials. *Antimicrobial Materials and Interfaces: Synthesis, Characterization, and Applications*, 1, 139-178.
- Wu, X. H., Liew, Y. K., Mai, C. W., & Then, Y. Y. (2021). Potential of superhydrophobic surface for blood-contacting medical devices. *International journal of molecular sciences*, 22(7), 3341.

- Acikbas, G., & Calis Acikbas, N. (2021). The effect of sintering regime on superhydrophobicity of silicon nitride modified ceramic surfaces. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 9(2), 734-744.
- Gentleman, M. M., & Gentleman, E. (2014). The role of surface free energy in osteoblast–biomaterial interactions. *International Materials Reviews*, 59(8), 417-429.
- Zhou, K., Chen, J., Wang, T., Su, Y., Qiao, L., & Yan, Y. (2020). Effect of surface energy on protein adsorption behaviours of treated CoCrMo alloy surfaces. *Applied Surface Science*, 520, 146354.
- Yan, Y., Yang, H., Su, Y., & Qiao, L. (2015). Albumin adsorption on CoCrMo alloy surfaces. *Scientific reports*, 5(1), 18403.
- Ge-Zhang, S., Yang, H., Ni, H., Mu, H., & Zhang, M. (2022). Biomimetic superhydrophobic metal/nonmetal surface manufactured by etching methods: A mini review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 958095.
- Zhao, W., Wang, Y., Han, M., Xu, J., & Tam, K. C. (2022). Surface modification, topographic design and applications of superhydrophobic systems. *Chemistry—A European Journal*, 28(68), e202202657.
- Haj Ibrahim, S., Wejrzanowski, T., Przybyszewski, B., Kozera, R., García-Casas, X., & Barranco, A. (2022). Role of surface topography in the superhydrophobic effect—Experimental and numerical studies. *Materials*, 15(9), 3112.
- Zhaxybayeva, A. G., Hashami, M., Nazhipkyzy, M., Aldiyarov, N. U., Kaliyeva, S. S., Kassenova, N. B., ... & Otenov, A. T. (2026). Smart Hydrophobic Surfaces: Nature-Inspired Designs for Sustainable Nanostructure Technologies. *Nanomaterials*, 16(13), 809.
- Stallard, C. P., McDonnell, K. A., Onayemi, O. D., O'gara, J. P., & Dowling, D. P. (2012). Evaluation of protein adsorption on atmospheric plasma deposited coatings exhibiting superhydrophilic to superhydrophobic properties. *Biointerphases*, 7(1), 31.
- Oliveira, S. M., Alves, N. M., & Mano, J. F. (2014). Cell interactions with superhydrophilic and superhydrophobic surfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(8-9), 843-863.
- Camargo, S. E. A., Xia, X., Fares, C., Ren, F., Hsu, S. M., Budei, D., ... & Esquivel-Upshaw, J. F. (2021). Nanostructured surfaces to promote osteoblast proliferation and minimize bacterial adhesion on titanium. *Materials*, 14(16), 4357.
- Ivanova, E. P., Linklater, D. P., Werner, M., Baulin, V. A., Xu, X., Vrancken, N., ... & Crawford, R. J. (2020). The multi-faceted mechano-bactericidal mechanism of nanostructured surfaces. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(23), 12598-12605.
- Su, Y., Ji, B., Zhang, K., Gao, H., Huang, Y., & Hwang, K. (2010). Nano to micro structural hierarchy is crucial for stable superhydrophobic and water-repellent surfaces. *Langmuir*, 26(7), 4984-4989.
- Wang, Y., Li, J., Song, H., Wang, F., Su, X., Zhang, D., & Xu, J. (2025). Biomimetic superhydrophobic surfaces: From nature to application. *Materials*, 18(12), 2772.
- Chen, Y., Guo, L., Sun, W., Cai, N., & Yan, Y. (2023). Molecular dynamics simulations of wetting behaviors of droplets on surfaces with different rough structures. *International Journal of Multiphase Flow*, 169, 104613.
- Zhang, X., Zhang, K., Xi, X., & Liu, J. (2026). A review of droplet dynamics on complex surfaces: mechanisms, regulation, and applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1-56.

- Luong-Van, E., Rodriguez, I., Low, H. Y., Elmouelhi, N., Lowenhaupt, B., Natarajan, S., ... & Cooper, K. (2013). Micro-and nanostructured surface engineering for biomedical applications. *Journal of Materials Research*, 28(2), 165-174.
- Barberi, J., & Spriano, S. (2021). Titanium and protein adsorption: an overview of mechanisms and effects of surface features. *Materials*, 14(7), 1590.
- Mitra, S. P. (2020). Protein adsorption on biomaterial surfaces: subsequent conformational and biological consequences—a review. *J. Surf. Sci. Technol*, 36(1-2), 7-38.
- Leclech, C., & Villard, C. (2020). Cellular and subcellular contact guidance on microfabricated substrates. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 551505.
- Jenkins, J., Mantell, J., Neal, C., Gholinia, A., Verkade, P., Nobbs, A.H., & Su, B. (2020). Antibacterial effects of nanopillar surfaces are mediated by cell impedance, penetration and induction of oxidative stress. *Nature Communications*, 11, 1626.
- Zhang, X., Wang, L., & Levänen, E. (2013). Superhydrophobic surfaces for the reduction of bacterial adhesion. *RSC Advances*, 3(30), 12003–12020.
- Hawi, S., Goel, S., Kumar, V., Pearce, O., Ayre, W. N., & Ivanova, E. P. (2022). Critical review of nanopillar-based mechanobactericidal systems. *ACS Applied Nano Materials*, 5(1), 1-17.
- Luo, J., Yu, H., Lu, B., Wang, D., & Deng, X. (2022). Superhydrophobic Biological Fluid-Repellent Surfaces: Mechanisms and Applications. *Small Methods*, 6(12), 2201106.
- Leslie, D. C., Waterhouse, A., Berthet, J. B., Valentin, T. M., Watters, A. L., Jain, A., ... & Ingber, D. E. (2014). A bioinspired omniphobic surface coating on medical devices prevents thrombosis and biofouling. *Nature biotechnology*, 32(11), 1134-1140.
- Sun, C., Gu, P., Wan, H., & Ren, M. (2025). AI-driven design of tunable wettability on composite surfaces. *Applied Surface Science*, 165325.
- Zhan, Y., Pang, Z., & Tan, G. (2025). Optically/thermally dual-responsive shape memory superhydrophobic surfaces with advanced multi-functionalities. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 192, 108812.
- Zhang, Y., Xue, Y., Li, M., & Zhang, Y. (2025). 3D Printing for Super-Wetting Surfaces. *Advanced Materials Technologies*, 10(24), e01049.
- Teisala, H., & Butt, H. J. (2019). Hierarchical structures for superhydrophobic and superoleophobic surfaces. *Langmuir*, 35(33), 10689-10703.
- Özcan, S., Açıkbaz, G., & Açıkbaz, N. Ç. (2018). Induced superhydrophobic and antimicrobial character of zinc metal modified ceramic wall tile surfaces. *Applied Surface Science*, 438, 136-146.
- Acikbas, G., Acikbas, N. C., Dizge, N., & Belibagli, P. (2024). Multi-functional ceramic glazes with nano ZnO/Cu–ZnO incorporation. *Ceramics International*, 50(21), 43800-43810.
- Acikbas, G., & Calis Acikbas, N. (2021). Nanoarchitectonics for polymer-ceramic hybrid coated ceramic tiles for antibacterial activity and wettability. *Applied Physics A*, 127(10), 794.
- Farzam, M., Beitollahpoor, M., Solomon, S. E., Ashbaugh, H. S., & Pesika, N. S. (2022). Advances in the fabrication and characterization of superhydrophobic surfaces inspired by the Lotus leaf. *Biomimetics*, 7(4), 196.

- Kim, S. H. (2008). Fabrication of superhydrophobic surfaces. *Journal of adhesion science and technology*, 22(3-4), 235-250.
- Shivakoti, I., Kibria, G., Cep, R., Pradhan, B. B., & Sharma, A. (2021). Laser surface texturing for biomedical applications: a review. *Coatings*, 11(2), 124.
- Cunha, A., Elie, A. M., Plawinski, L., Serro, A. P., Do Rego, A. M. B., Almeida, A., ... & Vilar, R. (2016). Femtosecond laser surface texturing of titanium as a method to reduce the adhesion of *Staphylococcus aureus* and biofilm formation. *Applied Surface Science*, 360, 485-493.
- Lijnev, A., Maté Sánchez de Val, J. E., Elango, J., Pérez-Albacete Martínez, C., Marín, J. M. G., Scarano, A., & Gehrke, S. A. (2025). Residual-Free Micro–Nano Titanium Surfaces via Titanium Blasting and Single Acid-Etching: A Cleaner Alternative. *Bioengineering*, 12(7), 735.
- Wang, Y., Ge-Zhang, S., Mu, P., Wang, X., Li, S., Qiao, L., & Mu, H. (2023). Advances in sol-gel-based superhydrophobic coatings for wood: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9675.
- Mustapha, N., & Hjiri, M. (2026). Advances in eco-efficient and accelerated sol–gel routes for hybrid nanostructures. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 117(2), 59.
- Alves-Rezende, M. C., Capalbo, L. C., De Oliveira Limírio, J. P., Capalbo, B. C., Limírio, P. H., & Rosa, J. L. (2020). The role of TiO₂ nanotube surface on osseointegration of titanium implants: Biomechanical and histological study in rats. *Microscopy Research and Technique*, 83(7), 817-823.
- Gao, L., Li, P., Farooq, O., Ma, F., Guo, W., & Zhou, T. (2026). Fabrication of TiO₂ Nanotubes Through Electrochemical Anodization and Secondary Oxidation. *Micromachines*, 17(9), 1016.
- Raman, A., Jayan, J. S., Deeraj, B. D. S., Saritha, A., & Joseph, K. (2021). Electrospun nanofibers as effective superhydrophobic surfaces: a brief review. *Surfaces and Interfaces*, 24, 101140.
- Villarreal-Gómez, L. J., Cornejo-Bravo, J. M., Vera-Graziano, R., & Grande, D. (2016). Electrospinning as a powerful technique for biomedical applications: a critically selected survey. *Journal of biomaterials science, polymer edition*, 27(2), 157-176.
- Saad, K. S. K., Saba, T., & Rashid, A. B. (2024). Application of PVD coatings in medical implantology for enhanced performance, biocompatibility, and quality of life. *Heliyon*, 10(16).
- Song, S. H., Min, B. K., Hong, M. H., & Kwon, T. Y. (2020). Application of a novel CVD TiN coating on a biomedical Co–Cr Alloy: An evaluation of coating layer and substrate characteristics. *Materials*, 13(5), 1145.
- Shigrekar, M., & Amdoskar, V. (2024). A review on recent progress and techniques used for fabricating superhydrophobic coatings derived from biobased materials. *RSC advances*, 14(44), 32668-32699.
- Shiu, J. Y., Kuo, C. W., Chen, P., & Mou, C. Y. (2004). Fabrication of tunable superhydrophobic surfaces by nanosphere lithography. *Chemistry of materials*, 16(4), 561-564.
- Pozzato, A., Dal Zilio, S., Fois, G., Vendramin, D., Mistura, G., Belotti, M., ... & Natali, M. (2006). Superhydrophobic surfaces fabricated by nanoimprint lithography. *Microelectronic Engineering*, 83(4-9), 884-888.
- Ryu, J., Kim, K., Park, J., Hwang, B. G., Ko, Y., Kim, H., ... & Lee, S. J. (2017). Nearly perfect durable superhydrophobic surfaces fabricated by a simple one-step plasma treatment. *Scientific reports*, 7(1), 1981.

- Kanbir, Ö., Soncu, S., & Çavdar, K. (2026). Recent advances in the field of surface modification using atmospheric pressure plasma: A review. *Next Materials*, 12, 102318.
- Amjad, M., Ngair, M., Ma, X., & Wen, D. (2025). Superhydrophobic 3D-printed microstructures: applications, challenges, and prospects. *Progress in Additive Manufacturing*, 10(10), 7337-7364.
- Liu, H., Zhang, Z., Wu, C., Su, K., & Kan, X. (2023). Biomimetic superhydrophobic materials through 3D printing: Progress and challenges. *Micromachines*, 14(6), 1216.
- (Mortazavi, V., & Khonsari, M. M. (2017). On the degradation of superhydrophobic surfaces: A review. *Wear*, 372, 145-157.
- Darband, G. B., Aliofkhazraei, M., Khorsand, S., Sokhanvar, S., & Kaboli, A. (2020). Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 1763-1802.
- Radwan, A. B., Ibrahim, M. A., Ismail, E. H., Zagho, M. M., El-Hout, S. I., Hassan, M. K., ... & Santo, L. (2025). Beyond wetting: unveiling the theoretical and practical power of superhydrophobic coatings in multifunctional applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(22), 10609-10640.
- Xue, Y., Lv, P., Lin, H., & Duan, H. (2016). Underwater superhydrophobicity: Stability, design and regulation, and applications. *Applied Mechanics Reviews*, 68(3), 030803.
- Sun, L., Guo, J., Chen, H., Zhang, D., Shang, L., Zhang, B., & Zhao, Y. (2021). Tailoring materials with specific wettability in biomedical engineering. *Advanced Science*, 8(19), 2100126.
- Li, L., Wei, J., Zhang, J., Li, B., Yang, Y., & Zhang, J. (2023). Challenges and strategies for commercialization and widespread practical applications of superhydrophobic surfaces. *Science Advances*, 9(42), eadj1554.
- Li, W., Zhan, Y., Amirfazli, A., Siddiqui, A. R., & Yu, S. (2022). Recent progress in stimulus-responsive superhydrophobic surfaces. *Progress in Organic Coatings*, 168, 106877.
- Sherin PA, T., Bandaru, S., Motapothula, M. R., Dalapati, G. K., Sangaraju, S., Krishnamurthy, S., ... & Ghosh, S. (2025). Facile fabrication of multifunctional superhydrophobic surfaces synthesized by the additive manufacturing technique modified with ZnO nanoparticles. *Langmuir*, 41(4), 2312-2322.
- Mohammadzadeh Sanandaji, M., Ebrahimzadeh, D., Haider, M. I., Banad, Y. M., Poleksic, A., & Ding, H. (2026). Machine learning model for predicting surface wettability in laser-textured metal alloys. *Journal of Laser Applications*, 38(3).
- Zhang, Z., Liu, Y., Chen, S., Liu, L., Liu, J., Hu, T., ... & Tan, X. (2026). Design of superhydrophobic anti-icing coatings guided by full-process machine learning. *Surface and Coatings Technology*, 133235.
- Chen, W., Huang, Z., Xiao, T., Jiang, L., Tan, X., & Lei, Y. (2025). Advancing superhydrophobic surfaces: From mechanism insights and design strategies to intelligent applications. *APL Materials*, 13(6).

BÖLÜM 4

BOR KARBÜR (B₄C) ÜRETİM SÜREÇLERİNDE TEKNOLOJİK TRENDLER VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Onur Yiğit ÖZGER¹, Edip AVŞAR²

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Merkez/Bilecik

<https://orcid.org/0000-0002-7577-1112>

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Merkez/Bilecik

<https://orcid.org/0000-0001-6249-4753>

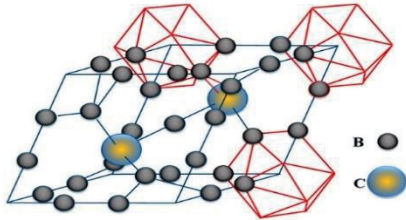
1. GİRİŞ

Bor karbür, stratejik öneme sahip bir seramik malzemedir. Nükleer endüstri, personel ve araç zırh sistemleri, roket yakıtı, aşındırıcı tozlar, seramik rulmanlar ve tel çekme kalıpları gibi çok çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır (Suri et al., 2010). Yoğunluğunun düşük, sertliğinin çok yüksek olması yanında, yüksek ergime noktası ve üstün kimyasal kararlılığı B_4C 'yi "teknik seramiklerin en hafifi ve en sert olanlarından biri" konumuna taşımaktadır (Ji et al., 2015, p. 15827). Endüstriyel ölçekte bor karbür, karbotermik indirgeme veya magnezyotermik indirgeme yöntemleriyle üretilmekte olup, yoğunlaştırma çoğunlukla sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme ile sağlanmaktadır (Suri et al., 2010). Bununla birlikte, polimer öncül yöntemi ve kimyasal buhar biriktirme gibi üretim teknikleri mevcuttur (Karaahmet, 2020, p. 434).

2. KRİSTAL YAPI VE ÖZELLİKLER

2.1. Kristalografik Yapı

Bor karbürün rombohedral yapısı, $B_{11}C$ ikozahedral kümeleri (12 atomlu) ve bunları bağlayan C–B–C zincirlerinden oluşur (Conde et al., 2000, p. 141). B_4C , geniş bir tek fazlı katı çözelti aralığı (yaklaşık atomik yüzde 9–20 karbon) sergiler (Conde et al., 2000, p. 141). Bu yapısal esneklik, bor atomu eksikliği gösteren bileşimlerden stokiyometrik değerin üzerindeki karbon oranlarına kadar geniş bir spektrumda kararlı kalabilmesine olanak tanır (Conde et al., 2000, p. 141).



Şekil 1. Bor karbürün rombohedral kristal kafes yapısı (Biçer et al, 2020,p 35).

2.2. Mekanik, Termal ve Nükleer Özellikler

Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert malzemelerden biri olarak kabul edilmekte olup, olağanüstü sertliği (yaklaşık 30 GPa), düşük yoğunluğu ($2,52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), yüksek ergime noktası, mükemmel kimyasal kararlılığı ve yüksek nötron soğurma tesir kesiti ile karakterize edilir (Zhao et al., 2022, p. 182). Genel olarak rapor edilen özellikler Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. Bor karbürün özellikleri

Özellik	Değer	Referans
Sertlik	HV $\approx$ 28–40 GPa	(Mestvirishvili et al., 2015, p. 1)
Young modülü	375–460 GPa	(Mestvirishvili et al., 2015, p. 1)
Eğilme dayanımı	280–550 MPa	(Mestvirishvili et al., 2015, p. 1)

Düşük difüzyon katsayıları ve güçlü kovalent bağ yapısı monolitik B₄C'nin sinterlenebilirliğini sınırladığından, yoğun malzeme üretimi Sıcak presleme (HP) ve sıcak izostatik presleme (HIP) gibi ileri basınç destekli tekniklere bağlıdır (Ji et al., 2015, p. 15827). Bor karbür, refrakter uygulamalarda yüksek ergime noktası ve termal kararlılığı; aşındırıcı uygulamalarda olağanüstü aşınma direnci; balistik uygulamalarda yüksek sertliği ve düşük yoğunluğu; nükleer uygulamalarda ise yüksek nötron absorpsiyon kapasitesi nedeniyle tercih edilmektedir (Domnich et al., 2011).

2.3. Lokal Amorfizasyon ve Kırılma Davranışı

B₄C, yüksek basınç altında "lokal amorfizasyon" olarak adlandırılan kendine özgü bir bozunma biçimi sergiler (Hwang et al., 2021, p. 2965). Elmas örs hücresi deneylerinde, yaklaşık 26 GPa'nın üzerindeki hidrostatik olmayan gerilmelerde yerel amorfizasyonun başladığı gösterilmiştir (Reddy et al., 2013, p. 2484). Nanoindentasyon, lazer şoku ve balistik çarpma altında nanoboyutlu amorf kayma bantları "en az direnç yolu" olarak çatlak çekirdeklenmesini hızlandırır ve kesme mukavemetinde ani kayıplara yol açar (Hwang et al., 2021, p. 2965). Bu amorfizasyonun B₁₁C ikozahedronlarının parçalanmasından kaynaklandığı Cs-düzeltilmeli STEM gözlemleriyle doğrulanmıştır (Reddy et al., 2013, p. 2484) ve amorfizasyon ile transgranüler kırılma, B₄C'nin yapısal uygulamalardaki başlıca iki başarısızlık modunu oluşturur (Hwang et al., 2021, p. 2965).

3. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Karbotermik İndirgeme

Endüstriyel üretimin ana omurgası olan karbotermik indirgeme, B₂O₃'ün kömür veya karbon siyahı ile yüksek sıcaklıkta indirgenmesi prensibine dayanır (Kakiage, 2018, p. 602). Genel reaksiyon;



şeklinde ifade edilmekte olup genellikle elektrik ark ocaklarında 2000–2500 °C civarındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir (Özkan et al., 2016, p. 6).

Reaksiyon kuvvetli biçimde endotermik olup endüstriyel uygulamalarda tipik olarak 2000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda direnç fırınlarında gerçekleştirilir (Göller et al., 1996).

Boussebha vd. (Boussebha et al., 2021), B_2O_3 ve karbon siyahı karışımından hazırlanan granüllerin atmosfer kontrollü döner fırın içerisinde $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve 1 saat süreyle işlenmesiyle, $10\text{ }\mu\text{m}$ ortalama tane boyutunda, eş eksenli ve homojen dağılımlı yüksek saflıkta B_4C tozlarının sentezlenebileceğini ortaya koymuşlardır. Feng vd. (Feng et al., 2022) ise "hızlı karbotermik indirgeme" yöntemiyle B_2O_3 oranı yüksek başlangıç karışımlarından ($B_2O_3/C = 4$) $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ortalama tane boyutu 300 nm olan ince B_4C tozları üretmişlerdir. Ortaya çıkan oluşumun ise yüksek B_2O_3 fazlasında sıvı–katı reaksiyonu yoluyla gerçekleştiğini ileri sürmüşlerdir. Karbotermik yöntemin avantajı düşük maliyetli hammaddelerin temin edilebilmesidir (Kakiage, 2018, p. 602); ancak çok yüksek sıcaklık gereksinimi, yüksek serbest karbon içeriği ve görece iri tane boyutu başlıca sınırlamalardır (Boussebha et al., 2021).

3.2. Magnezyotermik İndirgeme

Magnezyotermik indirgeme, B_2O_3 'ün magnezyum ve karbon varlığında indirgenmesiyle gerçekleştirilen bir sentez yöntemidir (Tan & García, 2019, p. 2290). Temel reaksiyon:



şeklinde ifade edilir. Bu yöntem, karbotermik yöntemle kıyasla çok daha düşük sıcaklıklarda reaksiyonun gerçekleşmesine olanak tanır. Bu ekzotermik süreç sayesinde reaksiyon sıcaklığı $1000\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığına kadar düşürülebilmekte olup, üretilen tozların son aşamada liç işlemi ile safsızlıklardan arındırılması gerekmektedir (Gökmeşe & Bostan, 2014).

Bu yöntemde, magnezyumun indirgeyici gücünden yararlanılarak karbotermik sürece göre daha düşük sıcaklıklarda yüksek verimli faz dönüşümleri elde edilebilmektedir (Babuz & Aksu, 2021, p. 682).

3.3. Kendiliğinden Yayılan Yüksek Sıcaklık Sentezi

Kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentezi (SHS), öncü toz karışımının bir noktadan tutuşturulmasıyla başlayan ve kendiliğinden yayılan ekzotermik bir reaksiyon dalgasıyla ilerleyen bir sentez yöntemidir (Su et al., 2014, p. 4909). Magnezyotermik ve alüminotermik sistemlerin her ikisi de SHS için uygundur: $B_2O_3\text{--}Mg\text{--}C$ ve $B_2O_3\text{--}Al\text{--}C$ sistemleri (Abdulkarimova et al., 2021) yüksek adyabatik sıcaklıkları ve hızlı reaksiyon süreleri sayesinde B_4C sentezi için tercih edilmektedir. Zakaryan ve ark. (Zakaryan et al., 2022), $B_2O_3\text{--}MgB_{12}\text{--}Mg\text{--}C$ sisteminde iki bor kaynağının birlikte kullanıldığı yeni bir yol sunmuşlar ve optimum karışımda adyabatik sıcaklığın $2100\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu kendiliğinden titreşimli yanma modu ve tabakalı makroyapı elde etmişlerdir. SHS yöntemi, kısa üretim süresi, düşük enerji tüketimi ve nispeten düşük maliyetli ekipman gereksinimi ile öne çıkmaktadır (İpekçi et al., 2016, p. 2040).

3.4. Polimer Öncül Yolu

Polimer öncül yöntemi, karboran veya dekarboran gibi bor açısından zengin monomerlerin polimerizasyonu ve ardından pirolizi yoluyla B₄C seramiği elde etmeyi amaçlar (Li et al., 2018). Li ve ark., 6-norbornenildekarboran ve dekarboranın halka açılma metatezi ve ardışık hidroborasyon yoluyla sentezledikleri poli(6-norbornenildekarboran-ko-dekarboran) [P] kopolimerinin argon altında 1400 °C'de 2 saat pirolizinden nano boyutlu rombohedral B₄C tozları elde etmişlerdir. TGA analizleri, polimerin %79'a varan seramik verimi sağladığını ve dönüşümün büyük oranda 350–470 °C aralığında gerçekleştiğini göstermiştir (Li et al., 2018). Kroke ve ark. (Kroke et al., 2001), B-trikloroborazenin bis(trimetilsilil)karbodiimid ile reaksiyonu sonucu oluşan kserojellerin 1200 °C'de amorf BC_xN_ySi_xH_x yapılarını, 2000 °C'de ise saf B₄C'yi oluşturduğunu göstermiştir. Yüksek seramik verimine sahip öncüllerin geliştirilmesi bu yöntemin temel zorluğudur (Li et al., 2018).

3.5. Mekanokimyasal Sentez

Mekanokimyasal sentez, katı hal reaksiyonlarının düşük sıcaklıklarda aktivasyonuna olanak tanıyan bir tekniktir (Baláz et al., 2013, p. 7600). Gökmeşe ve Bostan (Gökmeşe & Bostan, 2016), B₂O₃, magnezyum ve karbon karışımının yüksek enerjili öğütülmesiyle iki saatte MgO/B₄C kompozit tozlarının sentezlenebileceğini ve liç işlemini takiben elde edilen tek fazlı B₄C kristallerinin 10–200 nm boyut aralığında olduğunu HRTEM analizleri ile doğrulamışlardır. Tan ve García (Tan & García, 2019, p. 2290), B₂O₃'ün inert atmosferde Mg ve karbon varlığında öğütülmesi sırasında, ilk 60 saatte yalnızca boyut küçülmesi gözlenirken, 80. saatte ekzotermik bir kendiliğinden yayılan yanma reaksiyonunun tetiklendiğini ve B₄C'nin MgO yan ürünüyle oluştuğunu raporlamışlardır. Mekanokimyasal yaklaşımın temel avantajları, reaksiyonların düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi ve daha küçük tanecik boyutlarının elde edilebilmesidir (Baláz et al., 2013, p. 7600).

3.6. Kimyasal Buhar Biriktirme

Kimyasal buhar biriktirme (CVD), B₄C'nin ince film olarak üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Jansson, 1991). Jansson (Jansson, 1991), CVD reaktörü, reaksiyon gaz karışımı ve substrat malzemesi seçiminin faz bileşimi, morfoloji, mikroyapı ve biriktirme kinetiği üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Zeng ve ark. (Zeng et al., 2021, p. 537), CVD'de B/C oranını tahmin etmek için makine öğrenmesi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğini birleştiren melez bir yaklaşım önermiş; bu yöntemin, BCl₃'ün ve BHCl₂'nin ana bor kaynağı, C₂H₄ ve CH₄'ün ise ana karbon kaynağı olduğu süreçlerde tahmin hatasını %25'ten %7'ye düşürdüğünü göstermiştir.

3.7. Eriyik Tuz Sentezi

Eriyik tuz sentezi, karışım tuzlarının eriyik halde reaksiyon ortamı olarak kullanıldığı düşük sıcaklıklı bir yöntemdir (Liu et al., 2019). Liu ve ark. (Liu et al., 2019), Al, B₄C ve karbon siyahı hammaddelerini kullanarak NaCl bazlı bir eriyik tuz ortamında, 1250 °C sıcaklıkta saf fazda Al₈B₄C₇ alt mikron tozlarının sentezini gerçekleştirmişlerdir. Eriyik tuz, etkili bir sıvı reaksiyon ortamı oluşturarak reaksiyon sıcaklığını önemli ölçüde azaltmıştır (Liu et al., 2019).

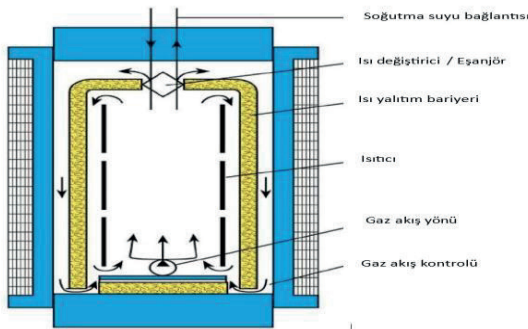
3.8. Nanoyapılı B₄C Sentezleri

Özgün morfolojiler için nanotel ve nanoçubuk üretimleri, önemli bir araştırma alt kategorisidir. Diboran ve metanın 650–750 °C'de, ~500 mTorr basınçta, katalizörsüz pirolizi ile metastabil, tek kristal ortorombik B₄C nanotellerinin elde edilebileceği gösterilmiştir (Velamakanni et al., 2009). Öte yandan, (Bao et al., 2008)'de iyileştirilmiş karbotermik yöntemle B₄C nanotelleri (5–10 µm uzunluk, 80–100 nm çap) sentezlenmiş ve yapılarının görünür bölgede 638 nm'de fotoluminesans verdiği raporlanmıştır. Ayrıca, B₄C malzemelerinin yüksek sıcaklık kararlılığı ve optoelektronik aygıtlarda kullanım potansiyeli nedeniyle önemli bir araştırma alanı olduğu belirtilmektedir (Domnich et al., 2011). Bununla birlikte, literatürde BCN gibi nanoyapılı malzemelerin sentezinde, CVD yönteminin yanı sıra azot içeren atmosferlerde gerçekleştirilen yüksek sıcaklık nitrürleme işlemleri ve polimerik öncüllerin buhar fazı pirolizi gibi farklı morfolojileri hedefleyen alternatif yaklaşımlar da yoğun ilgi görmektedir (Jalaly et al., 2017, p. 3453).

4. YOĞUNLAŞTIRMA VE SİNERLEME

4.1. Sıcak Presleme ve Sıcak İzostatik Presleme

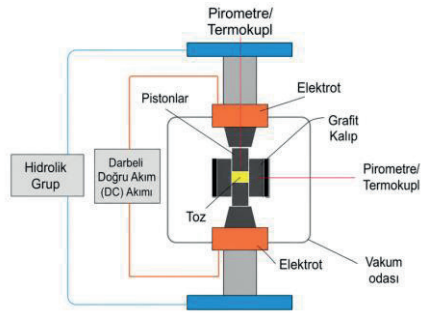
Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme, B₄C seramiklerinin yoğunlaştırılmasında kullanılan temel yöntemler olarak öne çıkmaktadır (Suri et al., 2010).



Şekil 2. Sıcak İzostatik Presleme (HIP) şematik görünümü (Zimmerman et al, 2008).

4.2. Kivılcım Plazma Sinterleme

SPS, darbeli DC akımı ve eşzamanlı tek eksenli basınç uygulayarak hızlı yoğunlaşma sağlayan bir tekniktir (Guillon et al., 2014). Liu ve ark. (Liu et al., 2021), katkısız B₄C tozlarından 1600–2050 °C aralığında SPS ile yoğun malzeme üretmiş ve teorik yoğunluğa yakın değerlerde sertlik ve kırılma tokluğunu sırasıyla $33,5 \pm 0,2$ GPa ve $3,21 \pm 0,13$ MPa·m^{1/2} olarak raporlamışlardır. Zhang ve ark. (Zhang et al., 2022), SPS sürecinin iki aşamalı olduğunu ortaya koymuş ve 1800–2000 °C'de yoğunlaşmanın, 2100–2200 °C'de ise tane büyümesinin gerçekleştiğini, yoğunlaşmanın tane sınırı kayması ve dislokasyon tırmanması ile kontrol edildiğini göstermiştir.

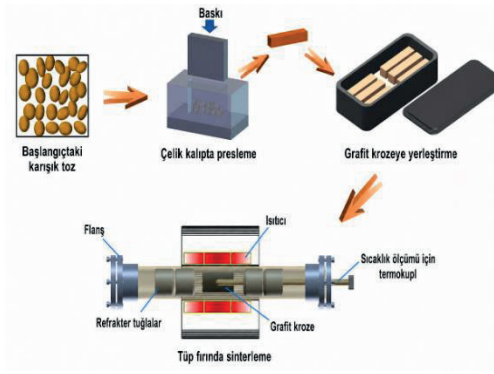


Şekil 3. Kivılcım Plazma Sinterleme şematik görünümü (Yushin et al, 2015).

4.3. Basıncsız Sinterleme

Basıncsız sinterleme, B₄C seramikleri için endüstriyel uygulama değerine sahip bir yöntemdir; ancak saf B₄C, katkısız basıncsız sinterleme ile yüksek yoğunluklara ulaşamaz (Zhang et al., 2019). Zhang ve ark. (Zhang et al., 2019), karbon, metalik, oksit ve nadir toprak oksit katkılarının B₄C yoğunlaşması üzerindeki etkilerini derlemiştir. Fernández-Ortiz ve ark., düşük sıcaklık sinterleme yaklaşımlarını sistematik olarak incelemiş, B₄C + hacimce %20 Si katkısıyla 1400 °C'de ve 75 MPa basınç altında hızlı basınç destekli sinterleme ile süper sert (~30 GPa), ince taneli B₄C–SiC iki fazlı kompozit üretilbileceğini göstermiştir (Fernández-Ortiz et al., 2025). Eriyik Si'nin hızla tüketilen kısa ömürlü bir geçiş fazı olduğu ve bu fazın gözenekli yapı içinde verimli bir şekilde yayılabilmesi için dış basıncın gerekli olduğu vurgulanmıştır (Fernández-Ortiz et al., 2025).

Mikro toz enjeksiyon kalıplama (µPIM), SiC, Al₂O₃ ve Y₂O₃ gibi katkılarla karmaşık şekilli B₄C bileşenlerinin üretimi için başarıyla kullanılmaktadır; bilyeli öğütme ile kafes bozulması ve boşluk oluşturularak yüzey enerjisi artırılmaktadır; katkılar ise sinterleme sıcaklığını azaltmaktadır (Wang et al., 2020).

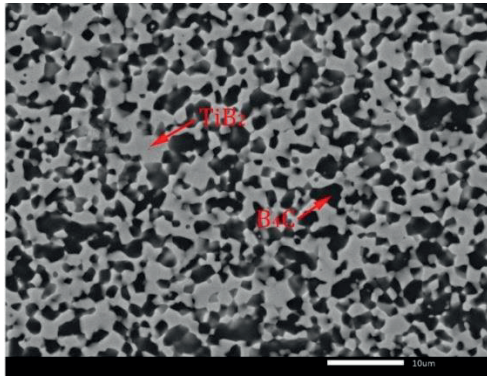


Şekil 4. Basıncsız Sinterleme şematik görünümü (Chunxi et al, 2021).

5. KOMPOZİT SİSTEMLER

5.1. B₄C–TiB₂ Kompozitler

B₄C–TiB₂ kompozitler, TiB₂ katkısı sayesinde yüksek elektriksel iletkenlik ve tokluk özelliklerine sahiptir (Zhao et al., 2022, p. 182). Zhao ve ark. (Zhao et al., 2022, p. 182), reaktif SPS ile hazırlanan B₄C–hacimce %15 TiB₂ kompozitinde, B₄C matrisi içinde üç boyutlu (3B) ara bağlantılı TiB₂ ağı oluşturmuş; $2,79 \times 10^4$ S/m elektriksel iletkenliği, 676 MPa eğilme dayanımı, 28,89 GPa Vickers sertliği ve $5,28 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ kırılma tokluğu elde etmiştir. Bu kompozitler, nötron soğurma peletleri olarak da saf B₄C peletlerinden daha iyi parçalanma direnci göstermektedir (Wang et al., 2020, p. 152278). Benzer şekilde, TiC ve B₄C tozlarının darbeli elektrik akımı ile sinterlenmesiyle üretilen B₄C–TiB₂ sistemleri, kullanılan tozların tane boyutunun optimize edilmesi sayesinde eğilme dayanımı, Vickers sertliği ve kırılma tokluğu açısından yüksek performans sergilemektedir (Zhao et al., 2024, p. 518). Bununla birlikte, *in situ* yöntemlerle üretilen TiB₂ fazının çatlak sapma ve köprüleme gibi mekanizmalarla B₄C matrisinin kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırdığı, özellikle TiO₂ katkılı sinterleme çalışmalarında deneysel olarak doğrulanmıştır (Başkut et al., 2025, p. 1184).

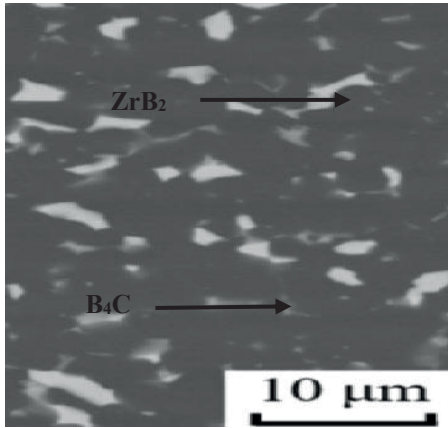


Şekil 5. B_4C - TiB_2 Kompozit malzemenin mikro yapısı (Švec 2025).

5.2. B_4C - ZrB_2 Kompozitler

ZrB_2 , B_4C matrisinde tane büyümesini engellemesi ve çatlak ucu gerilmesini sönmülmesi nedeniyle kritik bir ikincil fazdır (Yao et al., 2022). Yao ve ark. (Yao et al., 2022), SPS yöntemiyle ZrO_2 ve B_4C hammaddelerinden *in situ* olarak ZrB_2 sentezledikleri çalışmalarında, bu fazın B_4C seramiklerinin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini deneysel olarak kanıtlamışlardır.

Yao ve ark. (Yao et al., 2022), ZrB_2 parçacıklarının matris içerisinde homojen dağılımının tane sınırlarını sabitleyerek B_4C matrisindeki tane büyümesini etkin bir şekilde engellediğini, bu sayede daha rafine bir mikroyapısal morfoloji sağladığını göstermiştir. Benzer şekilde, SiC gibi diğer ikincil fazların eklenmesi de tanelerin homojenleşmesine katkıda bulunarak matrisin dayanımını ve tokluğunu geliştirmektedir (ka et al., 2024). Bu bağlamda, çok bileşenli karbürlerin borlanmasıyla B_4C tabanlı yüksek entropili borür kompozitlerinin sentezlenmesinin, ileri performanslı seramikler tasarlamak için potansiyel bir yaklaşım olduğu öne sürülmüştür (Qiu et al., 2025).



Şekil 6. B_4C - ZrB_2 Kompozit malzemenin mikroskobik görüntüsü (Yao et al., 2022).

6. UYGULAMA ALANLARI

6.1. Nükleer Endüstri

B_4C , yüksek ergime sıcaklığı, termal kararlılığı ve ^{10}B izotopunun yüksek nötron absorpsiyon tesir kesiti nedeniyle nükleer reaktörlerde (örneğin kaynar sulu, ağır su ve hızlı reaktörler) kontrol çubuğu ve nötron yutucu malzeme olarak kullanılmaktadır (Wang et al., 2020, p. 152278). ^{10}B izotopunun termal nötronlarla nükleer reaksiyonu $^{10}B + n \rightarrow ^7Li + ^4He$ biçimindedir; farklı reaktör tasarımlarında B_4C tozları paslanmaz çelik kılıflar içinde kontrol çubuğu bileşimi olarak tercih edilmektedir (Cheng et al., 2021, p. 3159).

Wang ve ark. (Wang et al., 2020, p. 152278), B_4C 'nin kontrol çubuğu performansının aşağıdaki üç kritik işlevi yerine getirmesine bağlı olduğunu belirtmiştir: normal işletme döngülerinde

reaktivite kompanzasyonu, yakıt ikmali veya bakım için sürecin başlatılması veya sonlandırılması, anormal koşullarda reaktörün hızla kapatılması. B_4C – TiB_2 kompozitlerinin bu işlevlerde saf B_4C 'ye kıyasla daha iyi davranış sergilediği, TiB_2 – B_4C arayüzlerinin helyum atomları için etkin tutma noktaları olması ve helyum kabarcıkları için tercihi çekirdeklenme bölgeleri oluşturmasıyla açıklanmıştır (Wang et al., 2020, p. 152278).

6.2. Balistik Koruma ve Zırh Sistemleri

Bor karbür (B_4C), düşük yoğunluğu ve yüksek özgül mukavemeti sayesinde hafif kişisel ve araç zırh sistemlerinde stratejik bir bileşen olarak tercih edilmekte olup, zırh çeliğine kıyasla aynı koruma seviyesi için çok daha düşük ağırlık sağlamaktadır (Yadav & Ravichandran, 2003, p. 557); Yadav ve Ravichandran'ın geliştirdiği B_4C /fiberglas (veya Kevlar) lamineli seramik kompozit zırh sistemi, küçük ateşli silahlara karşı benzer korumayı sağlayan metalik zırhtan önemli ölçüde daha hafiftir (Yadav & Ravichandran, 2003, p. 557). Balistik uygulamalarda B_4C 'nin performansını lokal amorfizasyon olgusu sınırlamaktadır (Hwang et al., 2021, p. 2966); Hwang ve ark. (Hwang et al., 2021, p. 2966), Si katkısı ve TiB_2 mikroparçacık takviyesinin amorfizasyon ve transgranüler kırılma sorunlarını eş zamanlı olarak hafiflettiğini ortaya koymuştur.

6.3. Aşındırıcılar, Kesici Takımlar ve Refrakter Uygulamalar

B_4C , yüksek sertliği ve üstün aşınma direnci nedeniyle kumlama nozulları, tel çekme kalıpları, parlatma ve taşlama tozları, kesici ve öğütücü diskler gibi aşındırıcı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Suri et al., 2010). Ayrıca, endüstriyel boyutta 1 μm ile 10 mm arasında değişen parçacık boyutlarına sahip B_4C tozları, çeşitli teknik seramiklerin ve sement karbürlerin hassas işlenmesinde anahtar aşındırıcı ortam olarak işlev görmektedir (Bakan & Kurt, 2020, p. 32). Bununla birlikte, bor karbürün düşük kırılma tokluğu ve işlenme güçlüğü gibi yapısal kısıtlamaları, elmas dışındaki en sert malzeme olma özelliğine rağmen endüstriyel kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir (Kayral, 2017, p. 142). Bu bağlamda, TiB_2 gibi ikincil fazların eklenmesiyle elde edilen hibrit kompozit yapılar, malzemenin bu karakteristik zayıflıklarını gidermeye yönelik kritik stratejiler sunmaktadır (Akgün, 2017, p. 2). Öte yandan, nanoyapılı bor karbür tozlarının yüzey modifikasyon teknikleriyle işlenmesi, matris-takviye ara yüzeyinde daha güçlü kimyasal bağların oluşumunu sağlayarak mekanik ömrü ve ısı kararlılığı artırmaktadır (ÜNAL & Akın, 2025). Ayrıca, bor karbürün bu üstün fizikokimyasal özellikleri, onu Black Hawk helikopterleri ve yüksek hızlı zırhlı kara araçları gibi ileri savunma teknolojilerinde vazgeçilmez bir malzeme haline getirmektedir (Koç, 2021, p. 993).

7. TEKNOLOJİK TRENDLER VE GELECEK PERSPEKTİFLER

7.1. Enerji Verimli ve Düşük Sıcaklık Sentez Yöntemleri

Geleneksel karbotermik yöntemde 1800°C'nin üzerindeki enerji yoğun prosesler yerini giderek artan biçimde düşük sıcaklık sentez stratejilerine bırakmaktadır (Boussebha et al., 2021). Boussebha ve ark. (Boussebha et al., 2021) tarafından geliştirilen dinamik/termokimyasal yöntem, 1800°C yerine 1500°C'de yüksek saflıkta B₄C tozları üretilmesine olanak tanımaktadır. Feng ve ark. (Feng et al., 2022)'nin hızlı karbotermik indirgemesi, 300 nm'lik ince tozları 1900°C'de üretebilmektedir. Mekanokimyasal sentez yöntemleri (Tan & García, 2019, p. 2290) gibi alternatif yaklaşımlar geliştirilmektedir. B₄C üretiminin ölçeklenebilir uygulaması için enerji tüketimini düşürmeye yönelik düşük karbonlu üretim teknikleri ve stratejileri araştırılmaktadır (Li, 2025).

7.2. Süper Sert ve Nanoyapılı B₄C

Nanoyapılı B₄C, önemli ölçüde artırılmış sertlik ve amorflaşmaya karşı dirençle süper sert bir malzeme sunmaktadır (Igoa et al., 2024). Velamakanni ve ark. (Velamakanni et al., 2009) B₄C nanotellerinin katalizörsüz sentezini ve karakterizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bao ve ark. (Bao et al., 2008) ise B₄C nanotellerinin sentezini ve fotoluminesans özelliklerini araştırmışlardır. Nanoboyutlu taneler ve yüksek tane sınırı yoğunluğu, nanoyapılı B₄C'nin sertliğini ve amorflaşmaya karşı direncini artırmaktadır (Igoa et al., 2024).

7.3. Akıllı Proses Modelleri ve Dijitalleşme

CVD gibi karmaşık süreçlerin modellenmesinde makine öğrenmesi ve CFD gibi dijital araçlar kullanılmaktadır (Zeng et al., 2021, p. 537). Zeng ve ark., CVD'de B/C oranını tahmin etmek için ML+CFD yaklaşımı önermiştir; bu yaklaşım, tahmin hatasını önemli ölçüde azaltmaktadır (Zeng et al., 2021, p. 537). SPS ile yoğun B₄C malzemeleri üretilmiştir; yoğunlaşma mekanizmaları ve tane büyüme kinetikleri açıklanmıştır (Zhang et al., 2022).

7.4. Türkiye'nin Bor Rezervleri ve Stratejik Konumu

ABD Jeolojik Araştırma Servisi'nin raporuna göre, bor karbür dünyada yalnızca beş ülkede üretilmektedir ve Türkiye, Eti Maden bünyesinde faaliyet gösteren Bandırma Bor Karbür Üretim Tesisindeki yıllık 1.000 tonluk kapasitesiyle bu ülkeler arasında yer almaktadır (Survey, 2024, p. 53). Türkiye, dünya bor rezervlerinin önemli bir bölümüne ev sahipliği yapmasıyla B₄C üretimi açısından stratejik bir konuma sahiptir (ÜNAL & Akın, 2025). Bu zengin hammadde varlığı, bor ürünlerinin katma değerli teknolojik uygulamalara dönüştürülmesini sağlayarak savunma ve havacılık gibi sektörlerde önemli bir rol oynamaktadır (ÜNAL & Akın, 2025). Yerli kaynakların katma değerli ileri teknoloji ürünlerine

dönüştürülmesi hedefiyle gerçekleştirilen çalışmalar, kompozit tozların endüstriyel üretim koşullarının iyileştirilmesine odaklanmaktadır.

7.5. Yeni Nesil Zırh Kompozitleri

Hwang ve arkadaşları, B₄C'nin karşılaştığı amorfizasyon ve transgranüler kırılma sorunlarını malzemenin zırh uygulamalarında kullanımını kısıtlayan ana faktörler olarak tanımlamışlardır (Hwang et al., 2021, p. 2965). Bu kısıtlamaları aşmak için geliştirilen metal matrisli veya nanoyapılı kompozit tasarımları özellikle 4. seviye balistik tehditlere karşı sağlanan koruma kapasitesini önemli ölçüde yükseltmektedir (ÜNAL & Akın, 2025). Ayrıca, bor karbürün elektriksel iletkenliğinin katkı maddeleriyle optimize edilmesi malzemenin işlenebilirliğini artırarak daha karmaşık geometrilere sahip balistik plakaların üretilmesine olanak tanımaktadır (Savacı & Turan, 2025). Özellikle grafen nanolevhalar, yüksek termal ve elektriksel iletkenlikleri gibi üstün özellikleri nedeniyle kompozit yapıların performansını artırmak amacıyla takviye elemanı olarak tercih edilmektedir (Şahingöz et al., 2024, p. 407). Buna ek olarak, bor karbür seramiklerinin üretimindeki sinterleme zorluklarını aşmak adına malzeme bilişimi yaklaşımları kullanılarak, proses parametreleri ile nihai mekanik özellikler arasındaki ilişkiler hassas bir şekilde nicelleştirilmektedir (Gökhan, 2025).

8. BOR KARBÜR ÜRETİMİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ VE ATIK YÖNETİMİ

Bor karbür üretiminde yaygın olarak kullanılan karbotermik indirgeme yöntemi, yüksek sıcaklık gerektiren ve enerji tüketimi bakımından yoğun bir üretim rotasıdır (Suri, Subramanian, Sonber, & Murthy, 2010; Li, 2025). Üretim sıcaklığının 1800 °C'nin üzerine çıkabilmesi, prosesin enerji tüketimini ve buna bağlı çevresel ayak izini artıran temel faktörlerden biridir (Boussebha, Bakan, & Kurt, 2021; Li, 2025). Bu nedenle daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilen dinamik/termokimyasal yöntemler, bor karbür üretiminde enerji verimliliğinin artırılması açısından önemli bir alternatif sunmaktadır (Boussebha et al., 2021). Benzer şekilde, mekanokimyasal sentezde geleneksel ve yüksek enerji gerektiren indirgeme reaksiyonları yerine mekanik öğütme destekli reaksiyonlardan yararlanılması, daha düşük enerji tüketimli üretim rotalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Tan & García, 2019, p. 2290). SPS gibi hızlı yoğunlaştırma teknikleri de işlem süresini kısaltarak geleneksel sıcak preslemeye kıyasla enerji tüketiminin ve tane büyümesinin azaltılmasına olanak tanıyabilmektedir (Chandran et al., 2025, p. 2; Matizamhuka, 2016, p. 1171).

Bor karbür üretiminin çevresel etkileri yalnızca enerji tüketimiyle sınırlı olmayıp, kullanılan hammaddelerin türü, proses atmosferi, yardımcı kimyasallar ve oluşan yan ürünlerle de ilişkilidir (Li, 2025). Özellikle mekanokimyasal sentez sırasında bor karbürün yanı sıra MgO gibi yan ürünlerin oluşması, ürünün saflaştırılması için yıkama ve asitle liç işlemlerini gerekli

kılabilmektedir (Tan & García, 2019, p. 2290). Bu işlemler sonucunda oluşan asidik çözeltiler ve bor içeren sıvı atıklar, arıtılmadan bertaraf edildiğinde su kaynakları üzerinde çevresel baskı oluşturabileceğinden kontrollü biçimde yönetilmelidir (Tan & García, 2019, p. 2290). Ayrıca üretim, öğütme ve sınıflandırma aşamalarında oluşabilecek ince bor karbür partiküllerinin çalışma ortamına yayılmasını önlemek için kapalı sistemler, uygun havalandırma ve toz toplama üniteleri kullanılmalıdır (Suri et al., 2010).

Atık bor karbürün yönetiminde öncelik, malzemenin doğrudan bertaraf edilmesi yerine yeniden kullanım ve geri kazanım seçeneklerinin değerlendirilmesine verilmelidir (Li, 2025). Kesme, taşlama, parlatma ve aşındırıcı işlemler sonucunda oluşan bor karbür tozları; tane boyutu, saflık, kimyasal bileşim ve yüzey kirliliği bakımından uygun olmaları hâlinde yeniden sınıflandırılarak aşındırıcı uygulamalarda veya kompozit üretiminde kullanılabilir (Bakan & Kurt, 2020, p. 32; Suri et al., 2010). Metal, bağlayıcı, yağ veya farklı seramik fazlarla kirlenmiş atıkların yeniden kullanımdan önce mekanik ayırma, yıkama, kurutma ve tane boyutuna göre sınıflandırma işlemlerinden geçirilmesi gerekebilir (Tan & García, 2019, p. 2290). Sinterlenmiş parçalar ve üretim artıkları ise kırma ve öğütme işlemleriyle ikincil hammaddeye dönüştürülebilir; ancak bu malzemelerin yeniden değerlendirilmesinde safsızlık düzeyi, tane boyutu dağılımı ve yeniden sinterlenebilirlik özellikleri dikkate alınmalıdır (Hartoko & Li, 2020; Suri et al., 2010).

Geri kazanımın teknik veya ekonomik açıdan uygun olmadığı atıklar için atığın kimyasal bileşimi ve olası kirleticileri belirlenerek mevzuata uygun kontrollü bertaraf yöntemi uygulanmalıdır (Li, 2025). MgO gibi yan ürünlerin uygun yıkama ve kimyasal ayırma işlemleriyle ana üründen uzaklaştırılabilmesi, bazı üretim rotalarında yan ürünlerin yönetimini kolaylaştırmaktadır (Tan & García, 2019, p. 2290). Bununla birlikte, kimyasal geri kazanım işlemleri ilave su, asit ve enerji tüketimine yol açabileceğinden, seçilecek yöntemin çevresel ve ekonomik uygunluğu yaşam döngüsü değerlendirmesiyle incelenmelidir (Tan & García, 2019; Li, 2025, p. 2290). Bu kapsamda, atıkların kaynağında ayrıştırılması, yeniden kullanılabilir bor karbür fraksiyonlarının belirlenmesi ve proses içinde kapalı devre geri besleme sistemlerinin kurulması sürdürülebilir üretim açısından etkili yaklaşımlar sunmaktadır (Li, 2025).

Sonuç olarak, bor karbür üretiminde çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması; enerji yoğun proseslerin düşük sıcaklık alternatifleriyle değiştirilmesine, yan ürün ve kimyasal atıkların kontrollü biçimde yönetilmesine ve atık bor karbürün mümkün olduğunca üretim döngüsüne geri kazandırılmasına bağlıdır (Boussebha, Bakan, & Kurt, 2021; Tan & García, 2019; Li, 2025). Gelecekteki çalışmaların düşük karbonlu sentez yöntemlerine, su ve kimyasal tüketimini azaltan saflaştırma süreçlerine ve farklı atık bor karbür türlerinin yeniden kullanım

performansını belirleyen yaşam döngüsü analizlerine odaklanması gerekmektedir (Chandran, et al., 2025; Li, 2025, p. 2).

9. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bor karbür; yüksek sertlik, düşük yoğunluk, yüksek ergime noktası, kimyasal kararlılık ve üstün nötron soğurma kapasitesi gibi özelliklerin eşsiz bileşimi sayesinde nükleer endüstriden balistik korumaya, aşındırıcılardan kesici takımlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde stratejik malzeme konumunu korumaktadır. Bu bölümde ele alınan sentez, yoğunlaştırma, kompozit tasarımı ve teknolojik trendler bağlamında ulaşılan bulgular aşağıda özetlenmekte ve tartışılmaktadır.

Üretim yöntemleri açısından, endüstriyel ölçekte hâlâ karbotermik ve magnezyotermik indirgeme yöntemleri hâkimdir; ancak bu yöntemlerin yüksek sıcaklık gereksinimi, enerji yoğunluğu ve iri tane boyutu gibi sınırlamaları, SHS, polimer öncül yolu, mekanokimyasal sentez, eriyik tuz sentezi ve CVD gibi alternatif yaklaşımları giderek daha cazip hale getirmektedir. Yalnızca 1500 °C'de çalışabilen dinamik/termokimyasal yöntem ile oda sıcaklığına yakın koşullarda nano taneli ürün veren mekanokimyasal sentez, enerji verimliliği açısından öne çıkan rotalardır. Bununla birlikte, her yöntemin ürün saflığı, tane boyutu ve ölçeklenebilirlik üzerinde farklı etkileri bulunduğu; dolayısıyla "tek bir ideal yöntemin" olmadığı ve seçimin hedef uygulamaya göre yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Yoğunlaştırma tarafında, B₄C'nin güçlü kovalent bağ yapısı nedeniyle basınç destekli teknikler zorunluluk olmaya devam etmektedir. SPS'nin kısa sürede yüksek yoğunluk sağlaması ve sürecin yoğunlaşma/tane büyümesi şeklinde iki aşamalı ilerlemesi, parametre optimizasyonu için önemli bir çerçeve sunmaktadır. Basınçsız sinterlemenin ise ancak katkı maddeleriyle anlamlı yoğunluklara ulaşabildiği görülmektedir. B₄C–TiB₂ ve B₄C–ZrB₂ kompozitleri, monolitik B₄C'nin düşük kırılma tokluğu ve amorfizasyona yatkınlık gibi yapısal zaafiyetlerini telafi etmekte; Si katkısıyla birleşen hibrit tasarımlar ise malzemenin iki temel başarısızlık modunu birlikte hafifletebilmektedir. Bu durum, kompozit yaklaşımlarının B₄C'nin yapısal uygulama alanını genişletmede belirleyici olacağına işaret etmektedir.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından; enerji yoğun proseslerin düşük sıcaklık alternatifleriyle ikame edilmesi, yan ürünlerin ve kimyasal atıkların kontrollü yönetimi ile atık bor karbürün üretim döngüsüne geri kazandırılması öne çıkan stratejilerdir. Türkiye'nin dünya bor rezervlerinin önemli bir bölümüne sahip olması ve mevcut bor karbür üretim kapasitesi, hammadde avantajının katma değerli ileri teknoloji ürünlerine dönüştürülmesi için güçlü bir zemin oluşturmaktadır. Gelecek araştırmaların; süper sert nanoyapılı malzemeler, çok işlevli

hibrit kompozitler, yapay zekâ destekli proses modellemesi ve düşük karbonlu üretim teknolojileri üzerinde yoğunlaşması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Akgün, S. (2017). TiB₂-B₄C KOMPOZİT TOZLARININ KARBÜR BORLAMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ. *DergiPark (Istanbul University)*.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsaeng/issue/30315/324096>
- Babuz, C., & Aksu, M. (2021). Magnezyotermik İndirgeme ile PrB₆ Sentezi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 679–688.
<https://doi.org/10.29130/dubited.813446>
- Bakan, S., & Kurt, A. O. (2020). *DİNAMİK / TERMOKİMYASAL YÖNTEMLE BOR KARBÜR (B₄C) SERAMİK TOZU ÜRETİMİ*.
- Baláž, P., Achimovičová, M., Baláž, M., Billik, P., Cherkezova-Zheleva, Z., Criado, J. M., Delogu, F., Dutková, E., Gaffet, É., Gotor, F. J., Kumar, R., Mitov, I., Rojac, T., Senna, M., Streletskii, A. N., & Wieczorek-Ciurowa, K. (2013). Hallmarks of mechanochemistry: from nanoparticles to technology. *Chemical Society Reviews*, 42(18), 7571. <https://doi.org/10.1039/c3cs35468g>
- Bao, L., Li, C., Yuan, T., Tian, J., Chao, H., Xing-Jun, W., Shen, C., & Gao, H. (2008). Synthesis and photoluminescence property of boron carbide nanowires. *Chinese Physics B*, 17(12), 4585–4591. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/17/12/042>
- Başkut, S., Yalama, N., & Turan, S. (2025). Effects of in-situ formed TiB₂ Phase on Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Boron Carbide. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, 13(3), 1184–1194.
<https://doi.org/10.29109/gujsc.1699270>
- Boussebha, H., Bakan, S., & Kurt, A. O. (2021). Dynamic / thermochemical method: A novel approach in the synthesis of B₄C powder. *Open Ceramics*, 6, 100133.
<https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100133>
- Chandran, N., Thakur, A., Nemani, S. K., Moharana, N., Scott, C. P. H., Kumar, K., Kumar, R., & Anasori, B. (2025). MXene-derived TiB₂ formation in B₄C at high temperatures. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(4). <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01387-x>
- Cheng, X., Liu, R., Liu, M., Shao, Y., & Liu, B. (2021). Applications of carbide ceramics in nuclear reactors. *Chinese Science Bulletin (Chinese Version)*, 66(24), 3154–3170.
<https://doi.org/10.1360/tb-2020-1316>
- Conde, O., Silvestre, A. J., & Oliveira, J. C. (2000). Influence of carbon content on the crystallographic structure of boron carbide films. *Surface and Coatings Technology*, 125, 141–146. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00594-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00594-0)

- Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., & Chhowalla, M. (2011). Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(11), 3605–3628. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x>
- Feng, B., Martin, H., & Michaelis, A. (2022). Synthesis of Boron Carbide Powder via Rapid Carbothermal Reduction Using Boric Acid and Carbonizing Binder. *Ceramics*, 5(4), 837–847. <https://doi.org/10.3390/ceramics5040061>
- Fernández-Ortiz, A., Zamora, V., Guiberteau, F., & Ortiz, Á. L. (2025). Low-temperature pressureless sintering B4C with Si aids: Is it feasible? *Ceramics International*, 51(13), 18203–18211. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.01.594>
- Gökhan, T., Ömer. (2025). Bor karbür seramiklerde proses-yapı-özellik ilişkilerini anlamak için malzeme enformatiği yaklaşımı [Middle East Technical University]. In *OpenMETU (Middle East Technical University)*. <https://hdl.handle.net/11511/114589>
- Gökmeşe, H., & Bostan, B. (2014). NANO PARÇACIK Al₂O₃/B₄C SERAMİK FAZININ MEKANOKİMYASAL YÖNTEMLE SENTEZLENMESİ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2). <https://doi.org/10.17341/gummfd.74781>
- Gökmeşe, H., & Bostan, B. (2016). Fabrication and characterization of nanoparticle MgO/B₄C composite by mechanochemical method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 684–694. <https://doi.org/10.1177/0954408916629106>
- Göller, G., Toy, Ç., Tekin, A., & Gupta, C. K. (1996). The Production of Boron Carbide by Carbothermic Reduction. *High Temperature Materials and Processes*, 15, 117–122. <https://doi.org/10.1515/htmp.1996.15.1-2.117>
- Guillon, O., González-Julián, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schierring, G., Räthel, J., & Herrmann, M. (2014). Field-Assisted Sintering Technology/Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, and Technology Developments. *Advanced Engineering Materials*, 16(7), 830–849. <https://doi.org/10.1002/adem.201300409>
- Hartoko, P., & Li, S. (2020). MECHANICAL PROPERTIES ENHANCEMENT OF BORON CARBIDE BASED ARMOUR MATERIALS. *Jurnal Pertahanan Media Informasi Tentang Kajian Dan Strategi Pertahanan Yang Mengedepankan Identity Nasionalism Dan Integrity*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.33172/jp.v6i1.810>
- Hwang, C., Du, J., Yang, Q., Çelik, A. M., Christian, K., An, Q., Schaefer, M., Xie, K. Y., LaSalvia, J. C., Hemker, K. J., Goddard, W. A., & Haber, R. A. (2021). Addressing amorphization and transgranular fracture of B₄C through Si doping and TiB₂

- microparticle reinforcing. *Journal of the American Ceramic Society*, 105(5), 2959–2977. <https://doi.org/10.1111/jace.18223>
- Igoa, F., Gaudisson, T., Floch, S. L., Baptiste, B., Delbes, L., Malarewicz, V., Beyssac, O., Béneut, K., Diogo, C. C., Gervais, C., Rousse, G., Rasim, K., Grin, Y., Maître, A., Godec, Y. L., & Portehault, D. (2024). Transforming Nanocrystals into Superhard Boron Carbide Nanostructures. *SPIRE - Sciences Po Institutional REpository*, 18(44), 30473–30483. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c08599>
- İpekçi, M., Acar, S., Elmadagli, M., Hennicke, J., Balcı, Ö., & Somer, M. (2016). Production of TiB₂ by SHS and HCl leaching at different temperatures: Characterization and investigation of sintering behavior by SPS. *Ceramics International*, 43(2), 2039–2045. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.174>
- Jalaly, M., Gotor, F. J., Semnan, M., & Sayagués, M. J. (2017). A novel, simple and rapid route to the synthesis of boron carbonitride nanosheets: combustive gaseous unfolding. *Scientific Reports*, 7(1), 3453. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03794-7>
- Jansson, U. (1991). CHEMICAL VAPOR DEPOSITION OF BORON CARBIDES. *Materials and Manufacturing Processes*, 6(3), 481–500. <https://doi.org/10.1080/10426919108934779>
- Ji, W., Rehman, S. S., Wang, W., Wang, H., Wang, Y., Zhang, J., Zhang, F., & Fu, Z. (2015). Sintering boron carbide ceramics without grain growth by plastic deformation as the dominant densification mechanism. *Scientific Reports*, 5(1), 15827. <https://doi.org/10.1038/srep15827>
- ka, J. K., Kim, K. H., Choi, W., Jung, S.-M., Lee, T., Kim, H., Lee, H., & Lee, J. H. (2024). Improving the Fracture Toughness of Boron Carbide via Minor Additions of SiC and TiB₂ Through Hot-Press Sintering. *Materials*, 17(24), 6233. <https://doi.org/10.3390/ma17246233>
- Kakiage, M. (2018). Low-temperature synthesis of boride powders by controlling microstructure in precursor using organic compounds. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 126(8), 602–608. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.18093>
- Karaahmet, O. (2020). USE OF PARTIALLY HYDROLYZED PVA FOR BORON CARBIDE SYNTHESIS FROM POLYMERIC PRECURSOR. *Ceramics - Silikat*, 434–446. <https://doi.org/10.13168/cs.2020.0031>
- Kayral, S. (2017). TiB₂-B₄C KOMPOZİT TOZLARININ KARBÜR BORLAMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ. *NWSA Academic Journals*, 12(3), 141–148. <https://doi.org/10.12739/nwsa.2017.12.3.1a0382>

- Koç, S. (2021). B4C ve Al2O3 Seramik Plakaların Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 25(3), 991–996. <https://doi.org/10.2339/politeknik.801714>
- Kroke, E., Völger, K. W., Klonczynski, A., & Riedel, R. (2001). A Sol-Gel Route to B4C. *Angewandte Chemie International Edition*, 40(9), 1698–1700. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010504\)40:9<1698::aid-anie16980>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010504)40:9<1698::aid-anie16980>3.0.co;2-z)
- Li, J., Cao, K., Li, J., Liu, M., Zhang, S., Yang, J., Zhang, Z., & Li, B. (2018). Synthesis and Ceramic Conversion of a New Organodecaborane Preceramic Polymer with High-Ceramic-Yield. *Molecules*, 23(10), 2461. <https://doi.org/10.3390/molecules23102461>
- Liu, C., Liu, X., Hou, Z., Jia, Q., Cheng, B., & Zhang, S. (2019). Low-Temperature Molten Salt Synthesis and the Characterisation of Submicron-Sized Al8B4C7 Powder. *Materials*, 13(1), 70. <https://doi.org/10.3390/ma13010070>
- Liu, Y., Ge, S., Huang, Y., Huang, Q., & Zhang, D. (2021). Influence of Sintering Process Conditions on Microstructural and Mechanical Properties of Boron Carbide Ceramics Synthesized by Spark Plasma Sintering. *Materials*, 14(5), 1100. <https://doi.org/10.3390/ma14051100>
- Matizamhuka, W. (2016). Spark plasma sintering (SPS) - an advanced sintering technique for structural nanocomposite materials. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(7), 1171–1180. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n12a12>
- Mestvirishvili, Z., Bairamashvili, I. A., Kvatchadze, V., & Rekhviashvili, N. (2015). Thermal and Mechanical Properties of B4C-ZrB2 Ceramic Composite. *Journal of Materials Science and Engineering B*, 5(10). <https://doi.org/10.17265/2161-6221/2015.9-10.007>
- Özkan, Ş. G., Tombal, T. D., Kurşun, İ., & Osmanlıoğlu, A. E. (2016). Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi / Properties, production, uses of boron compounds and their importance in nuclear reactor technology. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/boron/issue/24508/259751>
- Qiu, S., Zou, J., Liu, J., Wang, W., Xie, J., Ji, W., Wu, J., Zhou, Y., & Fu, Z. (2025). Achieving Superhardness and Enhanced Toughness in High-Entropy Boride-Based Composites by Tailoring Their Multi-Scale Microstructures. *Small*, 21(8). <https://doi.org/10.1002/sml.202404632>
- Reddy, K. M., Liu, P., Hirata, A., Fujita, T., & Chen, M. (2013). Atomic structure of amorphous shear bands in boron carbide. *Nature Communications*, 4(1), 2483. <https://doi.org/10.1038/ncomms3483>

- Şahingöz, B., Karakoç, H., & Çıtak, R. (2024). Production of AA6061/TiB₂/B₄C/GNP hybrid surface composites processed by friction stir processing (FSP) and investigation of mechanical properties. *DergiPark (Istanbul University)*, 12(1), 405–426. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1435733>
- Savacı, U., & Turan, S. (2025). WC İLAVESİNİN VE SICAK PRESLEMENİN B₄C-TiB₂ KOMPOZİTLERİNİN YÖNE BAĞLI MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİLERİ. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi mühendislik ve mimarlık fakültesi dergisi :/Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi dergisi*, 33(2), 1854–1864. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1664220>
- Su, X., Fu, F., Yan, Y., Zheng, G., Liang, T., Zhang, Q., Cheng, X., Yang, D., Chi, H., Tang, X., Zhang, Q., & Uher, C. (2014). Self-propagating high-temperature synthesis for compound thermoelectrics and new criterion for combustion processing. *Nature Communications*, 5(1), 4908. <https://doi.org/10.1038/ncomms5908>
- Suri, A. K., Subramanian, C., Sonber, J. K., & Murthy, T. S. R. Ch. (2010). Synthesis and consolidation of boron carbide: a review. *International Materials Reviews*, 55(1), 4–40. <https://doi.org/10.1179/095066009x12506721665211>
- Survey, U. S. G. (2024). *Mineral commodity summaries 2024*. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>
- Tan, D., & García, F. (2019). Main group mechanochemistry: from curiosity to established protocols. *Chemical Society Reviews*, 48(8), 2274–2292. <https://doi.org/10.1039/c7cs00813a>
- ÜNAL, E., & Akın, H. K. (2025a). Bor ve Bileşiklerinin Yüksek Performanslı Kompozit Malzeme Uygulamaları. *İn Özgür Yayınları eBooks*. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1093.c4836>
- ÜNAL, E., & Akın, H. K. (2025b). Bor ve Bileşiklerinin Yüksek Performanslı Kompozit Malzeme Uygulamaları. *İn Özgür Yayınları eBooks*. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1141.c4705>
- Velamakanni, A., Ganesh, K. J., Zhu, Y., Ferreira, P. J., & Ruoff, R. S. (2009). Catalyst-Free Synthesis and Characterization of Metastable Boron Carbide Nanowires. *Advanced Functional Materials*, 19(24), 3926–3933. <https://doi.org/10.1002/adfm.200901146>
- Wang, C., Li, Z., Tian, W., Yu-xian, L., TANG, L., Pang, Q., & Chen, M. (2020). Micro powder injection molding of boron carbide components with SiC-Al₂O₃-Y₂O₃ sintering additives. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(5), 429–440. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.08.005>

- Wang, J., Ren, D., Chen, L., Man, G., Zhang, H., Zhang, H., Luo, L., Li, W., Pan, Y., Gao, P., Zhu, Y., & Wang, Z. (2020). Initial investigation of B₄C–TiB₂ composites as neutron absorption material for nuclear reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 539, 152275. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152275>
- Yadav, S. M., & Ravichandran, G. (2003). Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. *International Journal of Impact Engineering*, 28(5), 557–574. [https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(02\)00122-7](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(02)00122-7)
- Yao, W., Yan, J., Li, X., Chen, P., Zhu, Y., & Zhu, B. (2022). In Situ ZrB₂ Formation in B₄C Ceramics and Its Strengthening Mechanism on Mechanical Properties. *Materials*, 15(22), 7961. <https://doi.org/10.3390/ma15227961>
- Zakaryan, M. K., Zurnachyan, A. R., Amirkhanyan, N. H., Kirakosyan, H., Antonov, M., Rodríguez, M. Á., & Aydinyan, S. (2022). Novel Pathway for the Combustion Synthesis and Consolidation of Boron Carbide. *Materials*, 15(14), 5042. <https://doi.org/10.3390/ma15145042>
- Zeng, Q., Gao, Y., Guan, K., Liu, J., & Feng, Z. (2021). Machine learning and a computational fluid dynamic approach to estimate phase composition of chemical vapor deposition boron carbide. *Journal of Advanced Ceramics*, 10(3), 537–550. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0456-3>
- Zhang, M., Wang, W., Yuan, T., Xie, S., Li, R., Zhou, Z., & Xu, Y. (2022). Densification and grain growth kinetics of boron carbide powder during ultrahigh temperature spark plasma sintering. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(6), 1948–1960. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(22\)65921-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(22)65921-1)
- Zhang, W., Yamashita, S., & Kita, H. (2019). Progress in pressureless sintering of boron carbide ceramics – a review. *Advances in Applied Ceramics Structural Functional and Bioceramics*, 118(4), 222–239. <https://doi.org/10.1080/17436753.2019.1574285>
- Zhao, J., Wang, D., Jin, X., Ding, X., Zhu, J., & Ran, S. (2022). Highly electro-conductive B₄C–TiB₂ composites with three-dimensional interconnected intergranular TiB₂ network. *Journal of Advanced Ceramics*, 12(1), 182–195. <https://doi.org/10.26599/jac.2023.9220677>
- Zhao, J., Zhang, X., Ma, Z., Wang, D., Jin, X., & Ran, S. (2024). Tuning mechanical and electrical performances of B₄C–TiB₂ ceramics in a two-step spark plasma sintering process. *Journal of Advanced Ceramics*, 13(4), 518–528. <https://doi.org/10.26599/jac.2024.9220874>

- Abdulkarimova, R. G.; Seidualiyeva, A. J.; Batkal, Aysulu; Tolendiuli, S.; Fomenko, S. M. (2021). Boron Carbide Composites produced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis. *Revista Ingeniería UC*, 28(1), 111–120. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i1.5>
- Li, S., (2025). Recent Advances in Boron Carbide: Synthesis and Applications. *Advances in Material Chemistry*, 13(2), 186–195. <https://doi.org/10.12677/amc.2025.132021>
- Biçer H, Akdoğan EK, Şavklıyıldız İ, Haines C, Zhong Z, Tsakalakos T. Sabit DC elektrik alanı altında nano-bor karbürün termal genleşmesi: Bir senkrotron probu kullanılarak yerinde enerji dağılımlı X-ışını kırınımı çalışması. *Malzeme Araştırmaları Dergisi* . 2020;35(1):90-97. doi:10.1557/jmr.2019.382
- Zimmerman, Franz X., and Jerry Toops. "Hot isostatic pressing: today and tomorrow." *J. Mater. Sci. Technol* 1 (2008): 1-11.
- Yushin, Denis & Smirnov, Andrey & Solis Pinargote, Nestor & Peretyagin, Pavel & Torrecillas, Ramón. (2015). Modeling Process of Spark Plasma Sintering of Powder Materials by Finite Element Method. *Materials Science Forum*. 834. 41-50. 10.4028/www.scientific.net/MSF.834.41.
- Chunxi Luo, Yaxiang Zhang, Tengfei Deng, Pressureless sintering of high performance silicon nitride ceramics at 1620 °C, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 20, 2021, Pages 29371-29378,
- Švec, P. (2025). Wear Resistance of B₄C-TiB₂ Ceramic Composite. *Lubricants*, 13(1), 35. <https://doi.org/10.3390/lubricants13010035>
- Yao, W., Yan, J., Li, X., Chen, P., Zhu, Y., & Zhu, B. (2022). In Situ ZrB₂ Formation in B₄C Ceramics and Its Strengthening Mechanism on Mechanical Properties. *Materials*, 15(22), 7961. <https://doi.org/10.3390/ma15227961>

BÖLÜM 5

UZAKTAN ALGILAMA İLE SERA ALANLARININ TESPİTİ: İNDEKSLER, VERİ KAYNAKLARI VE ALGORİTMALAR ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Ramazan GÜNGÖR¹

¹ Öğr. Gör. Dr. , Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Demirci Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Manisa, Türkiye.
E-posta: ramazan.gungor@cbu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6338-8554

Giriş

Plastik veya cam örtülü seralar, bitkisel üretimi mevsim ve iklim kısıtlarından büyük ölçüde bağımsız kıldığı için sebze yetiştiriciliğinde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Üretim alanlarının hızla genişlemesi, bu alanların güvenilir ve güncel biçimde envanterlenmesini planlama ve izleme açısından önemli kılmaktadır. Çin'in Shouguang kentinde sera arazisinin 2000–2015 arasında yaklaşık %50,5 arttığı ve bu artışın %90'ından fazlasının 2010–2015 döneminde gerçekleştiği bildirilmiştir (Yu vd., 2017). Shandong Eyaleti ile Guanzhong Ovası'nda da uzun dönemli ve artan bir sera eğilimi saptanmıştır (Gao, Wu, Dyck, Lv, vd., 2022; Ou vd., 2020, 2021).

Saha ölçümlerine dayanan envanter çalışmaları zaman ve maliyet açısından sınırlı kaldığından uzaktan algılama, sera alanlarının haritalanmasında ve zamansal değişimin izlenmesinde temel yaklaşım hâline gelmiştir. Konuya ilişkin geniş kapsamlı bir derleme, orta ve yüksek mekânsal çözünürlüklü çok bantlı görüntülerin maliyet açısından uygun sonuçlar üretebildiğini vurgulamaktadır (Veetil vd., 2022). Bununla birlikte seraların spektral yanıtı; örtü malzemesinin rengine ve kimyasal yapısına, yüzeyin beyazlatılmış olup olmamasına, içerideki bitkinin gelişim evresine ve çevredeki yapı ile çıplak toprak yüzeylerine göre değişmekte, bu nedenle tek bir veri ve yöntem bileşimi her koşulda başarılı olmamaktadır (M. A. Aguilar vd., 2021; Veetil & Xuan, 2022).

Bu bölümde literatür dört ekseninde bir araya getirilmiştir: sera tespitinde başvuru spektral indeksler, kullanılan uydu verileri ile işleme platformları, sınıflandırma yöntem ve algoritmaları ve henüz çözülmemiş sınırlılıklar. İncelenen çalışmalarda bildirilen doğruluk değerleri farklı bölge, mevsim, örneklem ve değerlendirme koşullarında elde edildiğinden, bu değerler kesin bir üstünlük sıralaması olarak değil, genel eğilimleri göstermek amacıyla aktarılmıştır.

Sera Tespitinde Kullanılan İndeksler

Spektral indeksler, farklı bantlardaki yansıma değerlerinin oran veya fark işlemleriyle birleştirilmesiyle üretilen ve hedef yüzeyi arka plandan ayırmayı kolaylaştıran türev katmanlardır. Sera çalışmalarında başlangıçta bitki örtüsünü, suyu ve yapay yüzeyleri vurgulayan genel amaçlı indekslerden yararlanılmıştır. Vietnam'ın Dalat kenti çevresinde Sentinel-2 ve Landsat-8 görüntülerinden normalize edilmiş fark bitki indeksi (NDVI), normalize edilmiş fark yapı indeksi (NDBI) ve plastik sera indeksi (PSI) türetilmiş; indekslere dayalı haritalarda genel doğruluk (GD) Sentinel-2 için %90,8, Landsat-8 için %88,7 bulunurken, kontrolsüz K-Means sınıflandırmasıyla bu değerler sırasıyla %73,2 ve %71,7'de

kalmıştır (Veettil & Xuan, 2022). Meksika'da Sentinel-2 ile yürütülen bir çalışmada ise NDVI, normalize edilmiş fark su indeksi (NDWI), NDBI, PSI, plastik malçlı arazi örtüsü indeksi (PMAI) ve SWIR bantlarına dayalı normalize farklar birlikte değerlendirilmiş; ayrılabilirlik analiziyle yüksek ayrılabilirlik sağlayan beş bant seçilerek özellik uzayı sadeleştirilmiştir (Perilla & Mas, 2019).

Genel amaçlı indekslerin sera, yapı ve çıplak toprak arasındaki karışıklığı gidermede yetersiz kalması, plastiğe özgü indekslerin geliştirilmesine yol açmıştır. Yang vd. (2017), mavi, yeşil ve yakın kızılötesi bantları kullanan retrogresif plastik sera indeksini (RPGI) önermiş; atmosferik düzeltmesi yapılmış Landsat ETM+ görüntüsünde GD'yi %91,2, Kappa değerini 0,83 olarak bildirmiş ve sera kapsama oranının logaritmik bir regresyon modeliyle kestirilebildiğini göstermiştir. Dört çalışma bölgesinde 14 indeksin nesne tabanlı yaklaşımla karşılaştırıldığı çalışmada PSI tüm indekslerden daha başarılı bulunmuş, bu indeksin mevsimsel maksimum ve ortalama değerlerinin ayırt ediciliğinin yüksek olduğu belirlenmiştir; deniz plastiği için tasarlanan iki indeks ise sera tespitinde yetersiz kalmıştır (M. A. Aguilar vd., 2022). Xuzhou'da Landsat-8 ile geliştirilen eşik modelinde PSI, PMAI, renkli çelik bina indeksi ve parlaklık gibi spektral özellikler iki şekil ölçütüyle birleştirilmiş ve GD %98'in üzerine çıkmıştır (Ji vd., 2020).

Kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölge, plastik örtüleri ayırt etmede ayrı bir bilgi kaynağıdır. Alan spektrometresiyle yapılan ölçümlerde plastik örtülerin 1218, 1732 ve 2313 nm çevresinde belirgin soğurma özellikleri taşıdığı, 1732 nm'nin toprak, mineral ve bitkide benzer bir özellik göstermemesi nedeniyle haritalama için en elverişli dalga boyu olduğu ortaya konmuştur (Levin vd., 2007). Benzer bir sonuç WorldView-3 verilerinde de görülmüştür: yalnızca VNIR bantlarıyla GD %90,85 ve Kappa 0,812 iken SWIR bantları ile normalize fark plastik indeksi (NFPI) ve PMAI eklendiğinde GD'de %6,7, Kappa'da %14 oranında iyileşme sağlanmış, beyazlatılmış seralar için parlaklığı düzenlenen NFPI_B ile GD %98,08'e (Kappa 0,959) ulaşılmıştır (M. A. Aguilar vd., 2021). Sentinel-2'nin SWIR bantlarının görüntü füzyonuyla keskinleştirilmesi de DVM sınıflandırmasında ham görüntülere kıyasla daha doğru sonuçlar vermiştir (Lim & Park, 2020).

Daha özgün indeks önerileri de bulunmaktadır. Gaofen-2 görüntülerinde çift katsayılı bitki örtüsü eleme indeksi (DCVSI), yüksek yoğunluklu bitki örtüsü baskılama indeksi (HDVII) ve NDVI aşamalı olarak kullanılmış, GD %97,34'e ulaşmıştır (Shi vd., 2020). WorldView-2 ve Landsat-8 verileriyle çalışan bir karar ağacında moment mesafe indeksi (MDI) iki yılın her ikisinde de en önemli özellik olmuş, eşik değeri iki sensör için tutarlı çıkmış ve GD %93,0 ile %93,3 olarak hesaplanmıştır (M. A. Aguilar vd., 2016). Arşiv ortofotoların Landsat ile

kaynaştırıldığı çalışmada geliştirilen sera tespit indeksi (STI) haritalama aşamasında başarılı bulunmuştur (González-Yebra vd., 2018). Üzüm bağlarındaki plastik örtülerin belirlenmesinde yeşil NDVI, yeniden ölçeklendirilmiş parlaklık sıcaklığı, plastik yüzey ve kumlu yüzey indeksleri birleştirilmiş, yüksek çözünürlüklü yardımcı veri kullanılmadan %80'in üzerinde GD elde edilmiştir (Novelli & Tarantino, 2015). Kavun serası çalışmasında nesne özellikleri arasında NDVI ve normalize fark plastik sera örtüsü indeksine (NPSI) yer verilmiştir (Cui vd., 2022). Tablo 1, bu indekslerin dayandığı veriyi ve bildirilen başarıyı özetlemektedir.

Tablo 1. Sera Tespitinde Literatürde Öne Çıkan Spektral İndeksler ve Karakteristik Özellikleri

İndeks / özellik	Veri ve girdi	Elde Edilen GD (%)	Kaynak
RPGI	Mavi, yeşil, yakın kızılötesi bantlar; Landsat ETM+	GD %91,2; Kappa 0,83	Yang vd. (2017)
PSI	Sentinel-2 zaman serisi; nesne tabanlı	14 indeks arasında en başarılısı; GD yaklaşık %92–94	M. A. Aguilar vd. (2022)
NFPI, PMAI	WorldView-3 VNIR ve SWIR	NFPI_B ile GD %98,08; Kappa 0,959	M. A. Aguilar vd. (2021)
DCVSI, HDVII, NDVI	Gaofen-2	GD %97,34	Shi vd. (2020)
MDI	WorldView-2; Landsat-8 zaman serisi	GD %93,0 ve %93,3	M. A. Aguilar vd. (2016)
NDVI eşik gün sayısı	MODIS zaman serisi	GD > 0,84; Kappa 0,65	Lu vd. (2015)
PSI, PMAI, renkli çelik bina indeksi	Landsat-8 OLI; şekil ölçütleri	GD > %98	Ji vd. (2020)
Birleşik indeksler (yNDVI, parlaklık sıcaklığı vb.)	Landsat-8 OLI/TIRS	GD > %80	Novelli & Tarantino (2015)

İndekslerin başarısı mevsime ve örtü özelliklerine de bağlıdır. Plastik malçlı tarım arazilerinin haritalanmasında doku bilgisinin katkısı sınırlı kalmış, NDVI ve yeşillik indeksi özellikleri ile spektral bilgi daha belirleyici bulunmuş, en uygun dönem Nisan–Mayıs olarak saptanmıştır (Hasituya & Chen, 2017; Hasituya vd., 2016). Nesne tabanlı Sentinel-2

uygulanmasında NDVI, NDWI ve RPGI birlikte kullanıldığında üretici doğruluğu %82, GD %74 olurken spektral olarak benzer ayrıntılarda doğruluk %58–61'e gerilemiştir (Balcık Bektas vd., 2019). Retrogresif plastik sera indeksinden yararlanan bir Sentinel-2 yaklaşımı da boş tarım parsellerini ve plastik olmayan seraları %90'ın üzerinde doğrulukla ayırmış, ancak plastik seralarda kesinlik düşük kalmıştır (İbrahim & Gobin, 2021). Farklı renk ve kimyasal bileşime sahip örtülerin tamamı için geçerli bir indeksin bulunmaması ise hâlen temel eksiklik olarak görülmektedir (Veettil & Xuan, 2022).

Platform ve Veri Kıyaslaması

Orta ve düşük çözünürlüklü görüntüler

MODIS gibi kaba çözünürlüklü sensörler parsel ölçeğinde ayrıntı sunmasa da geniş alanlarda zamansal profile dayalı kural tabanlı modellere olanak tanımaktadır. Güney Xinjiang'da NDVI'nın belirli bir eşiği aştığı gün sayısına dayanan model, GD'yi 0,84'ün üzerine, Kappa değerini 0,65'e çıkarmıştır (Lu vd., 2015). Landsat serisi ise arşivinin uzunluğu sayesinde değişim analizlerinin omurgasını oluşturmuştur. Landsat-5 TM görüntülerine uygulanan karar ağacı 1998, 2007 ve 2011 için sırasıyla %95,00, %85,27 ve %97,82 GD üretmiş (Lu vd., 2014); Landsat-8 ile yapılan çalışmalarda hem nesne tabanlı (Ji vd., 2020; Wu vd., 2016) hem de çok zamanlı yaklaşımlarla (Hasituya & Chen, 2017) başarılı sonuçlar alınmıştır. Buna karşılık küçük parsellerin baskın olduğu bölgelerde Landsat'ın sınırları da gösterilmiştir: İsrail'de seraların çoğu 3200 m²'den küçük olduğu için uygun piksel boyutunun 8–16 m veya daha iyi olması gerektiği, Landsat 7 ETM görüntüsünde ise sera ile yerleşim alanlarının karışarak doğruluğun %35'in altına düştüğü bildirilmiştir (Levin vd., 2007).

Sentinel-2'nin 10 m çözünürlüğü bu boşluğu önemli ölçüde kapatmıştır. Anamur'da Sentinel-2 ile SPOT-7'nin nesne tabanlı olarak karşılaştırıldığı çalışmada Sentinel-2 için en yüksek GD %88,38 (Kappa 0,83), SPOT-7 için %91,43 (Kappa 0,88) bulunmuş; iki veri arasındaki sınırlı fark, orta çözünürlüklü görüntülerin Akdeniz seracılığı için kullanılabilir olduğunu göstermiştir (Bektas Balcık vd., 2020). Almería'da WorldView-2 destekli segmentasyonla Sentinel-2 ve Landsat-8 karşılaştırılmış, Sentinel-2 daha iyi performans göstermiş, dört rasgele orman (RO) şemasında GD %89,1 ile %93,4 arasında değişmiştir (Novelli vd., 2016). Eş zamanlı alınan görüntülerde yüzey yansıma değerleri çoğu bant ve NDVI için tutarlı çıkmış ($r^2 > 0,840$), ancak sera çatılarındaki güneş parıltısı ve yüksek aerosol bulunan alanlarda tutarsızlık artmıştır (M. A. Aguilar vd., 2020). Sera dışı genel arazi örtüsü sınıflamasında ise PlanetScope'un Sentinel-2 ve Landsat-8'den daha yüksek doğruluk (%97) verdiği ve çözünürlük arttıkça doğruluğun yükseldiği bildirilmiştir (Acharki, 2022).

Yüksek ve çok yüksek çözünürlüklü görüntüler

QuickBird, IKONOS, GeoEye-1, WorldView, SPOT ve Gaofen serisi gibi görüntüler seraların geometrik ayrıntısını yakalamada üstündür. Akdeniz kıyısında QuickBird verisiyle en yüksek olasılık (EYO) sınıflandırması yeşil–mavi–yakın kızılötesi bant kombinasyonunda %87,11 GD vermiştir (Agüera vd., 2006); QuickBird ve IKONOS'un karşılaştırıldığı çalışmada GD ve üretici doğruluğu QuickBird'de daha yüksek, kullanıcı doğruluğu ise iki sensörde benzer bulunmuştur (Agüera & Liu, 2009). Antalya'da WorldView-2 ile cam ve plastik seralar ayrı ayrı ele alınmış, destek vektör makinesi (DVM) %93,88 GD'ye ulaşmıştır (Koc-San, 2013); Anamur'da SPOT-5 verileri 2006–2014 arasındaki sera değişimini belirlemek için kullanılmıştır (Goksel vd., 2016). GeoEye-1'in dört bandı ile WorldView-2'nin dört veya sekiz bandı benzer doğruluk üretmiş, ortofotolardan türetilen yükseklik bilgisi ve normalize dijital yüzey modeli eklendiğinde doğruluk yaklaşık %90'a çıkmıştır (M. A. Aguilar vd., 2014). Renkli kızılötesi hava fotoğrafı ve dijital yüzey modeliyle DVM'de GD %94,80 elde edilmiştir (Celik & Koc-San, 2020).

Çözünürlüğün artmasının her zaman kazanç getirmediği de görülmüştür. Kavun serası çalışmasında Gaofen-2 görüntüsü yeniden örneklenerek farklı çözünürlükler üretilmiş; 2 m çözünürlükte GD %94,85 (Kappa 0,92) ile en yüksek değere ulaşılmış, bitkilerin erken gelişim evresindeki seralarda ise 1 m çözünürlük daha iyi sonuç vermiştir (Cui vd., 2022). Dolayısıyla uygun çözünürlük, parsel boyutu ve bitki gelişim evresiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Çok kaynaklı veriler ve radar

Tek sensörün sınırlarını aşmak için farklı veri türlerini birleştiren yaklaşımlar yaygınlaşmaktadır. Pirinç ve sera sınıflamasında Sentinel-1 radar ve Sentinel-2 optik verileri birleştirilmiş; GD yalnızca Sentinel-1 ile %79,98, yalnızca Sentinel-2 ile %91,18, ikisiyle %92,31 olmuş, çok kaynaklı verilere temel bileşen analizi eklenince %93,47'ye (Kappa 0,92) yükselmiştir (Zhang vd., 2022). Gaofen-2 ile Landsat-8 verilerinin kaynaştırılması (Wang & Lu, 2019), arşiv ortofotoların Landsat ile birleştirilmesi (González-Yebra vd., 2018) ve Sentinel-2, Landsat ile MODIS'in birlikte kullanılması (Xiong vd., 2019) bu eğilimin diğer örnekleridir.

Bulut tabanlı platformlar ve uzun dönemli izleme

Google Earth Engine (GEE), görüntü arşivine erişimi ve işlem gücünü tek ortamda sunarak geniş ölçekli, çok zamanlı sera haritalamasını mümkün kılmıştır. Shouguang'da 1990–2018 arasında Landsat ve RO ile üretilen haritalarda tüm dönemlerde GD %90'ın üzerinde

kalmış, en büyük genişleme 1995–2010 arasında görülmüştür (Ou vd., 2020). Shandong Eyaleti için 1989–2018 yıllık sera veri setinde örneklemin %63'ü eğitime ayrılmış, kalan %37'lik torba dışı (OOB) veri özellik önemini hesaplamada kullanılmış, olasılığa dayalı zamansal tutarlılık düzeltilmesi doğruluğu ortalama %5 artırmış; GD %96,56, üretici doğruluğu %86,64 ve F1 değeri 0,911 bulunmuştur (Ou vd., 2021). Guanzhong Ovası'nda yedi zaman dilimi için üretilen haritalar %90 ve üzeri doğruluk sağlamış, alanın %38,44'ünün sera için uygun olduğu hesaplanmıştır (Gao, Wu, Dyck, Lv, vd., 2022). Shouguang'da DVM ile üretilen 2000, 2010 ve 2015 haritalarında GD %96,60 ile %98,54 arasında kalmış, değişimin itici güçleri ikili lojistik regresyonla incelenmiştir (Yu vd., 2017). Meksika'da korunmuş tarım alanları (Perilla & Mas, 2019) ve Xinjiang'da plastik malçlı araziler (Xiong vd., 2019) de GEE ile haritalanmıştır. Tablo 2, platform ve veri kıyaslamasını özetlemektedir.

Tablo 2: Sera Tespitinde Kullanılan Uydu ve Hava Platformlarının Mekânsal, Spektral ve İşlevsel Kıyaslaması

Platform / Sensör	Mekânsal Çözünürlük	Spektral Kapsam	Temel Avantajları ve Kısıtları	Tipik Doğruluk Aralığı
Landsat-5/7/8 (OLI/TM)	30 m (15 m Pan)	VNIR, SWIR1, SWIR2, Thermal	Ücretsiz, 40+ yıllık tarihsel arşiv. Kısıt: Piksel karışımı, küçük seralarda yetersiz.	%85.0 - %98.2
Sentinel-2 (MSI)	10 m / 20 m	VNIR, Red Edge, SWIR1, SWIR2	Ücretsiz, yüksek zamansal çözünürlük (5 gün), SWIR ve Red Edge bantları üstün.	%88.7 - %94.1
WorldView-2 / WorldView-3	0.31 m - 1.84 m	VNIR + SWIR (8 VNIR + 8 SWIR)	Çok yüksek mekânsal çözünürlük, en yüksek sınıflandırma başarısı. Kısıt: Yüksek maliyet.	%90.8 - %98.1
GaoFen-2 / PlanetScope	1 m - 3 m	VNIR (RGB + NIR)	Bireysel sera sınırları ve detay çıkarımı için ideal. Kısıt: SWIR bant eksikliği.	%91.7 - %97.3
Sentinel-1 (SAR Radar)	10 m / 20 m	C-Band (VV, VH Polarizasyon)	Bulut ve hava koşullarından bağımsız. Optik veri ile birleştirildiğinde doğruluk artar.	%79.9 (Tek) / %93.5 (Optik ile)
RGB-NIR Ortofoto + DSM	< 0.5 m	VNIR + 3D Yükseklik (DSM/nDSM)	3D yükseklik ile zemin plastiği ve bina ayrımı mükemmel. Kısıt: Dar kapsama alanı.	%90.0 - %94.8

Yöntem ve Algoritma Kıyaslaması

Piksel tabanlı ve kural tabanlı yaklaşımlar

Piksel tabanlı yöntemler her pikseli yalnızca spektral değerine göre etiketler. Parametrik bir yaklaşım olan EYO bu grubun klasik temsilcisidir, ancak parametrik olmayan yöntemlerle karşılaştırıldığında genellikle geride kalmıştır. SPOT-5 görüntülerinde DVM %95'in üzerinde GD ve Kappa üretirken EYO %65'in üzerinde kalmıştır (Goksel vd., 2016). WorldView-2 ile Antalya'da DVM %93,88, RO %91,73 GD vermiş, her ikisi de EYO'dan daha başarılı olmuştur; fark özellikle cam seralarda belirginleşmiştir (Koc-San, 2013). Plastik malçlı arazilerde DVM, EYO ve en küçük uzaklık sınıflandırıcılarından üstün gelmiş, 90° yönlü gri seviye eş-oluşum matrisi dokusu spektral bilgiyle birleştirildiğinde GD %94,14, Kappa 0,92 olmuştur (Hasituya vd., 2016). Aynı konuda RO ile DVM kıyaslandığında RO'nun haritalama doğruluğu daha yüksek bulunmuştur (Hasituya & Chen, 2017).

Eşik ve karar ağacına dayanan kural tabanlı yöntemler eğitim verisi gereksinimini azaltabilmektedir. Landsat-5 TM için karar ağacı (Lu vd., 2014), MODIS için eşik modeli (Lu vd., 2015), nesne tabanlı Landsat-8 eşik modeli (Ji vd., 2020) ve iki sensörde aynı eşik değerlerini kullanan basit bir karar ağacı (M. A. Aguilar vd., 2016) bu gruba girer. Xinjiang'da CART ile kurulan plastik malç haritalama algoritması F1 değerini 0,914, GD'yi %92,2, üretici ve kullanıcı doğruluğunu sırasıyla %97,6 ve %86,7 bulmuştur (Xiong vd., 2019).

Nesne tabanlı görüntü analizi

Nesne tabanlı görüntü analizi (OBIA) görüntüyü önce homojen bölütlere ayırmakta, sınıflamayı bu bölütlerin spektral, doku ve şekil özellikleri üzerinden yürütmektedir; çalışmaların büyük bölümünde çok çözünürlüklü segmentasyon (MRS) tercih edilmiştir. Celik ve Koc-San (2020) ölçek parametresini ESP2 aracıyla otomatik belirlemiş; k-en yakın komşu (k-EYK), RO ve DVM'yi karşılaştırmış ve en yüksek GD'ye (%94,80) DVM ile ulaşmıştır. Orta çözünürlükte, Sentinel-2 ile en yakın komşu sınıflandırıcısı kullanıldığında GD %74'te kalmıştır (Balcik Bektas vd., 2019); Anamur'da ise k-EYK ve RO, SPOT-7 görüntüsünde Sentinel-2'ye göre biraz daha yüksek doğruluk üretmiştir (Bektas Balcik vd., 2020). Landsat-8 ile DVM tabanlı yaklaşımda doku ve komşuluk özelliklerinin RO ile seçilmesi GD ve kullanıcı doğruluğunu %85'in üzerine çıkarmış; seyrek bitki örtüsüne sahip alanlarda sınırlılık görülmüş, ayrıca radyal tabanlı çekirdek kullanılan yazılımda uygulanamamıştır (Wu vd., 2016). Nesne tabanlı RO modelinde 50 ağaç ve 5 özellik ile GD %91,7'ye ulaşılmıştır (Wang & Lu, 2019). OBIA'nın karar ağacıyla (M. A. Aguilar vd., 2021, 2022), aşağıdan yukarıya bölütleme ve RO

ile (Cui vd., 2022) ve arşiv ortofotolarda yarı otomatik biçimde (González-Yebra vd., 2018) uygulandığı çalışmalar da yöntemin esnekliğini göstermektedir.

Makine öğrenmesi ve topluluk yaklaşımları

GEE'de dört sınıflandırma yönteminin kıyaslandığı çalışmada en küçük uzaklık, üç çekirdekli DVM, CART ve RO karşılaştırılmış; tüm yöntemlerde GD %84'ün üzerinde kalmış, radyal tabanlı çekirdekli DVM %94 ile en iyisi olmuş, RO ve CART onu izlemiş, en küçük uzaklık en zayıf sonucu vermiştir (Gao, Wu, Dyck, Fang, vd., 2022). Jiangsu'da Landsat-8 ile CART, RO ve maksimum entropi yöntemlerinin üretici doğruluğu %80'i aşarken DVM ve Naive Bayes %60'ın altında kalmış; üç iyi sınıflandırıcıyı birleştiren topluluk yaklaşımı tekil yöntemlerden daha yüksek doğruluk üretmiş ve spektral özellikler en etkili girdi olmuştur (Lin vd., 2021). Meksika'da maksimum entropi yaklaşımı olasılığa dayalı eşik (0,8) ile spektral karışıklığı azaltmış, korunmuş ve korunmamış tarım alanlarında kullanıcı doğrulukları sırasıyla %70 ve %95 olmuştur (Perilla & Mas, 2019). Sınıf dengesizliği sorununu ele alan T. Feng vd. (2020), azınlık ve çoğunluk sınıflarından eşit sayıda örnek seçmiş, oylama entropisi ve genelleştirilmiş Öklid mesafesiyle eğitim setini otomatik zenginleştirmiş; GD, kullanıcı doğruluğu ve G-ortalaması %93'ün üzerinde, üretici doğruluğu %87 bulunmuştur. RO, çok zamanlı haritalamada da en yaygın tercih olmuştur (Acharki, 2022; Ou vd., 2020, 2021).

Derin öğrenme ve kontrolsüz yaklaşımlar

Derin öğrenme tabanlı PODD yöntemi, sera sayısını CBAM ve ASFF modülleriyle iyileştirilmiş YOLOX ile, sera alanını ResNet-101 omurgalı DeepLabv3+ ile belirlemektedir; iyileştirilmiş YOLOX'un mAP ve F1 değerleri %97,65 ve %97,50 olup özgün YOLOX'tan sırasıyla %1,50 ve %2,59 yüksek, DeepLabv3+'ın doğruluk ve mIoU değerleri ise (%99,2 ve %95,8) UNet'ten %0,5 ve %2,5 yüksek bulunmuştur (J. Feng vd., 2022). Etiketli veri gerektirmeyen yöntemlerden yaklaşık spektral kümeleme topluluğu WorldView-2 görüntülerinde hem plastik hem cam seraları diğer kontrolsüz yöntemlerden daha iyi çıkarmıştır (Pala vd., 2015); buna karşın indeks tabanlı haritalarla kıyaslandığında K-Means'in doğruluğu belirgin biçimde düşük kalmıştır (Veetil & Xuan, 2022). Tablo 3, öne çıkan yaklaşımları özetlemektedir.

Tablo 3. Sera Tespitinde Kullanılan Yöntem ve Algoritmaların Karşılaştırması

Yaklaşım	Algoritma ve veri	Bildirilen sonuç	Kaynak
Piksel tabanlı	EYO ve DVM; SPOT-5	DVM > %95; EYO > %65	Goksel vd. (2016)
Piksel tabanlı	EYO, RO, DVM; WorldView-2	DVM %93,88; RO %91,73	Koc-San (2013)
Karar ağacı	Landsat-5 TM	GD %85,27–97,82	Lu vd. (2014)
OBIA	k-EYK, RO, DVM; Sentinel-2 ve SPOT-7	%88,38 (Sentinel-2); %91,43 (SPOT-7)	Bektas Balcik vd. (2020)
OBIA	k-EYK, RO, DVM; renkli kızılötesi ortofoto ve dijital yüzey modeli	DVM %94,80	Celik & Koc-San (2020)
Makine öğrenmesi (GEE)	En küçük uzaklık, DVM, CART, RO; Landsat	Radyal DVM %94; en küçük uzaklık en düşük	Gao, Wu, Dyck, Fang, vd. (2022)
Topluluk	CART, RO, maksimum entropi; Landsat-8	Üretici doğruluğu 0,94	Lin vd. (2021)
Geliştirilmiş RO	Dengesiz örnek; yüksek çözünürlüklü görüntü	GD > %93; üretici doğruluğu %87	T. Feng vd. (2020)
Derin öğrenme	YOLOX ve DeepLabv3+ (PODD)	mAP %97,65; F1 %97,50	J. Feng vd. (2022)

Not. GD: genel doğruluk; EYO: en yüksek olasılık; DVM: destek vektör makinesi; RO: rasgele orman; OBIA: nesne tabanlı görüntü analizi; k-EYK: k-en yakın komşu.

Akdeniz Havzası ve Türkiye Örnekleri

Sera tespiti literatürü coğrafi olarak iki kümede toplanmaktadır. Akdeniz havzasında, özellikle İspanya'nın Almería bölgesinde, çalışmalar yüksek ve çok yüksek çözünürlüklü görüntülere, nesne tabanlı analize ve spektral indeks karşılaştırmalarına dayanmaktadır (Novelli vd., 2016; M. A. Aguilar vd., 2021). İspanya, Fas, İtalya ve Türkiye'deki sera alanlarında eş zamanlı Sentinel-2 ve Landsat-8 görüntülerinin tutarlılığı sınanmıştır (M. A. Aguilar vd., 2020). Almería, Agadir ve Antalya gibi sebze üretiminin yoğun olduğu alanlarda PSI en yüksek doğruluğu veren indeks olurken, en zayıf sonuçlar İtalya'nın Bari bölgesinde elde edilmiştir (M. A. Aguilar vd., 2022). Çin'de ise Shouguang, Shandong ve Guanzhong gibi geniş üretim bölgelerinde Landsat arşivi ile GEE kullanılarak onlarca yıllık haritalama dizilerinin üretilmesi öne çıkmaktadır (Gao, Wu, Dyck, Lv, vd., 2022; Ou vd., 2020, 2021).

Türkiye'de sera tespiti çalışmaları ağırlıklı olarak Antalya ve Mersin'in Anamur ilçesinde yürütülmüştür. Antalya'nın Muratpaşa ilçesinde WorldView-2 görüntüleriyle cam ve

plastik seraların ayrı ayrı sınıflandırılması (Koc-San, 2013), Anamur'da SPOT-5 ile DVM tabanlı değişim belirleme (Goksel vd., 2016) ve Sentinel-2 ile SPOT-7'nin nesne tabanlı karşılaştırılması (Bektas Balcik vd., 2020) başlıca örneklerdir. Bu çalışmalarda yüksek çözünürlüklü verilerin DVM, RO ve k-EYK ile birlikte kullanıldığı, Sentinel-2'nin ise sınırlı bir doğruluk kaybıyla uygulanabilir bir alternatif sunduğu görülmektedir. İncelenen çalışmalar arasında Türkiye'ye ait örneklerin uzun dönemli Landsat serileri ve bulut tabanlı işlemeyle birlikte ele alınması Çin örnekleri kadar yaygın değildir; bu durum, Akdeniz seracılığı için çok zamanlı ve ölçeklenebilir yaklaşımlara gereksinim olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca cam seraları da kapsayan çalışmalar sınırlıdır: Koc-San (2013) ile Pala vd. (2015) plastik ve cam seraları birlikte ele alırken, literatürdeki diğer çalışmaların çoğu plastik örtülü seralara odaklanmaktadır.

Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar

Literatür, yöntemin başarısını belirleyen birkaç ortak sorunu ortaya koymaktadır. Birincisi, renk, kimyasal bileşim ve yarı saydamlık farklılıkları nedeniyle her sera türüne uyan tek bir indeks geliştirilememiştir; yarı saydam seralarda yansıma bitki gelişimine bağlı olarak değişmektedir (Veetil & Xuan, 2022). İkincisi, görüntü tarihi önemlidir; plastik malçlı arazilerde Nisan–Mayıs ayları (Hasituya & Chen, 2017), MODIS tabanlı modelde yılın 90–125. günleri uygun bulunmuştur (Lu vd., 2015). Üçüncüsü, beyazlatma, aerosol ve güneş parıltısı gibi etkiler spektral tutarlılığı bozabilmektedir (M. A. Aguilar vd., 2020, 2021). Dördüncüsü, yöntemlerin başka iklim bölgelerine aktarılabilirliği sınanmalıdır; Xinjiang uygulaması yalnızca yarı kurak ve kurak alanlarda yürütülmüştür (Xiong vd., 2019). Küçük ölçekli çalışmalarda insansız hava araçları uygun bir seçenek olarak önerilirken, dağlık alanlar ve geniş ölçekler için uydu verileri kaçınılmaz görülmektedir (Veetil & Xuan, 2022).

Gelecek çalışmalar için öne çıkan öneriler; daha yüksek çözünürlüklü görüntüler ile OBIA ve makine öğrenmesinin birlikte kullanılması, ulusal, kıtasal ve küresel ölçekte sera haritalaması (Gao, Wu, Dyck, Lv, vd., 2022), doku özelliklerinin farklı çıkarım yöntemleriyle DVM'ye entegre edilmesi (Wu vd., 2016) ve çok zamanlı Landsat-8 görüntülerinin makine öğrenmesiyle sınanması (Hasituya vd., 2016) biçimindedir.

Sonuç

İncelenen çalışmalar, sera tespitinde başarının veri, indeks ve algoritma seçiminin birlikte ele alınmasına bağlı olduğunu göstermektedir. İndeks düzeyinde PSI, RPGI ve SWIR tabanlı NFPI gibi plastiğe özgü ölçütler genel amaçlı indekslere göre daha ayırt edici sonuçlar vermiş, ancak renk, bileşim ve mevsim kaynaklı değişkenlik nedeniyle evrensel bir indeks henüz oluşturulamamıştır. Veri düzeyinde Sentinel-2, 10 m çözünürlüğü ve açık erişimiyle yüksek çözünürlüklü ticari görüntülere makul bir alternatif sunmakta, Landsat ve GEE ise uzun dönemli değişim analizlerinin temelini oluşturmaktadır; en yüksek doğruluklar ise çoğunlukla çok kaynaklı veya SWIR ve yükseklik bilgisiyle zenginleştirilmiş girdilerle elde edilmiştir.

Algoritma düzeyinde parametrik yöntemlerin yerini DVM ve RO gibi parametrik olmayan sınıflandırıcılar almış; OBIA yüksek çözünürlüklü görüntülerde, RO ise bulut tabanlı çok zamanlı çalışmalarda baskın hâle gelmiştir. Topluluk yaklaşımları, sınıf dengesizliğine yönelik iyileştirmeler ve derin öğrenme tabanlı mimariler doğruluğu daha da yukarı taşımaktadır. Bununla birlikte raporlanan doğrulukların bölge, mevsim ve örneklem koşullarına duyarlı olması, farklı çalışmaların doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle Türkiye'deki Akdeniz seracılığı gibi yerel koşullarda, uygun indeks, çözünürlük ve algoritma bileşiminin ortak bir doğrulama çerçevesinde sınanması gerekmektedir.

Kaynakça

- Acharki, S. (2022). PlanetScope contributions compared to Sentinel-2, and Landsat-8 for LULC mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100774. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100774>
- Aguilar, M. A., Bianconi, F., Aguilar, F. J., & Fernández, I. (2014). Object-based greenhouse classification from GeoEye-1 and WorldView-2 stereo imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 3554–3582. <https://doi.org/10.3390/rs6053554>
- Aguilar, M. A., Jiménez-Lao, R., & Aguilar, F. J. (2021). Evaluation of object-based greenhouse mapping using WorldView-3 VNIR and SWIR data: A case study from Almería (Spain). *Remote Sensing*, 13(11), 2133. <https://doi.org/10.3390/rs13112133>
- Aguilar, M. A., Jiménez-Lao, R., Ladisa, C., Aguilar, F. J., & Tarantino, E. (2022). Comparison of spectral indices extracted from Sentinel-2 images to map plastic covered greenhouses through an object-based approach. *GIScience and Remote Sensing*, 59(1), 822–842. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2071057>
- Aguilar, M. A., Jiménez-Lao, R., Nemmaoui, A., Aguilar, F. J., Koc-San, D., Tarantino, E., & Chourak, M. (2020). Evaluation of the consistency of simultaneously acquired Sentinel-2 and Landsat 8 imagery on plastic covered greenhouses. *Remote Sensing*, 12(12), 2015. <https://doi.org/10.3390/rs12122015>
- Aguilar, M. A., Nemmaoui, A., Novelli, A., Aguilar, F. J., & Lorca, A. G. (2016). Object-based greenhouse mapping using very high resolution satellite data and Landsat 8 time series. *Remote Sensing*, 8(6), 513. <https://doi.org/10.3390/rs8060513>
- Agüera, F., Aguilar, M. A., & Aguilar, F. J. (2006). Detecting greenhouse changes from QuickBird imagery on the Mediterranean coast. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21), 4751–4767. <https://doi.org/10.1080/01431160600702681>
- Agüera, F., & Liu, J. G. (2009). Automatic greenhouse delineation from QuickBird and Ikonos satellite images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 66(2), 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.02.001>
- Balcik Bektas, F., Senel, G., & Goksel, C. (2019). Greenhouse mapping using object based classification and Sentinel-2 satellite imagery. In *2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820252>
- Bektas Balcik, F., Senel, G., & Goksel, C. (2020). Object-based classification of greenhouses using Sentinel-2 MSI and SPOT-7 images: A case study from Anamur (Mersin),

- Turkey. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 2769–2777. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2996315>
- Celik, S., & Koc-San, D. (2020). *Greenhouse detection from color infrared aerial image and digital surface model*. 29. <https://doi.org/10.3390/ecsa-6-06548>
- Cui, B., Huang, W. J., Ye, H. C., Chen, Q. X., Li, Z. C., & Jiang, H. Y. (2022). Optimal spatial resolution of remote-sensing imagery for monitoring cantaloupe greenhouses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1004(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1004/1/012020>
- Feng, J., Wang, D., Yang, F., Huang, J., Wang, M., Tao, M., & Chen, W. (2022). PODD: A dual-task detection for greenhouse extraction based on deep learning. *Remote Sensing*, 14(19), 5064. <https://doi.org/10.3390/rs14195064>
- Feng, T., Ma, H., & Cheng, X. (2020). Greenhouse extraction from high-resolution remote sensing imagery with improved random forest. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 553–556). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324147>
- Gao, C., Wu, Q., Dyck, M., Fang, L., & He, H. (2022). Greenhouses detection in Guanzhong Plain, Shaanxi, China: Evaluation of four classification methods in Google Earth Engine. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 48(6), 747–763. <https://doi.org/10.1080/07038992.2022.2117687>
- Gao, C., Wu, Q., Dyck, M., Lv, J., & He, H. (2022). Greenhouse area detection in Guanzhong Plain, Shaanxi, China: Spatio-temporal change and suitability classification. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 226–248. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.2023667>
- Goksel, C., Balcik Bektas, F., Keskin, M., & Celik, B. (2016). Evaluation of classification methods for detection of greenhouses from SPOT 5 satellite imagery. In *Proceedings of the 6th International Conference on Cartography and GIS, 13–17 June 2016* (pp. 712–717). https://www.researchgate.net/profile/Temenoujka-Bandrova/publication/309772611_6th_International_Conference_on_Cartography_and_GIS/links/5d13644a299bf1547c7f9906/6th-International-Conference-on-Cartography-and-GIS.pdf
- González-Yebra, Ó., Aguilar, M. A., Nemmaoui, A., & Aguilar, F. J. (2018). Methodological proposal to assess plastic greenhouses land cover change from the combination of archival aerial orthoimages and Landsat data. *Biosystems Engineering*, 175, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.08.009>

- Hasituya, & Chen, Z. (2017). Mapping plastic-mulched farmland with multi-temporal Landsat-8 data. *Remote Sensing*, 9(6), 557. <https://doi.org/10.3390/rs9060557>
- Hasituya, H., Chen, Z., Wang, L., Wu, W., Jiang, Z., & Li, H. (2016). Monitoring plastic-mulched farmland by Landsat-8 OLI imagery using spectral and textural features. *Remote Sensing*, 8(4), 353. <https://doi.org/10.3390/rs8040353>
- Ibrahim, E., & Gobin, A. (2021). Sentinel-2 recognition of uncovered and plastic covered agricultural soil. *Remote Sensing*, 13(21), 4195. <https://doi.org/10.3390/rs13214195>
- Ji, L., Zhang, L., Shen, Y., Li, X., Liu, W., Chai, Q., Zhang, R., & Chen, D. (2020). Object-based mapping of plastic greenhouses with scattered distribution in complex land cover using Landsat 8 OLI images: A case study in Xuzhou, China. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(2), 287–303. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01081-8>
- Koc-San, D. (2013). Evaluation of different classification techniques for the detection of glass and plastic greenhouses from WorldView-2 satellite imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 073553. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.7.073553>
- Levin, N., Lugassi, R., Ramon, U., Braun, O., & Ben-Dor, E. (2007). Remote sensing as a tool for monitoring plasticulture in agricultural landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, 28(1), 183–202. <https://doi.org/10.1080/01431160600658156>
- Lim, H., & Park, H. (2020). Supervised classification for greenhouse detection by using sharpened SWIR bands of Sentinel-2A satellite imagery. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38(5), 435–441. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.5.435>
- Lin, J., Jin, X., Ren, J., Liu, J., Liang, X., & Zhou, Y. (2021). Rapid mapping of large-scale greenhouse based on integrated learning algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(7), 1245. <https://doi.org/10.3390/rs13071245>
- Lu, L., Di, L., & Ye, Y. (2014). A decision-tree classifier for extracting transparent plastic-mulched landcover from Landsat-5 TM images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(11), 4548–4558. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2327226>
- Lu, L., Hang, D., & Di, L. (2015). Threshold model for detecting transparent plastic-mulched landcover using moderate-resolution imaging spectroradiometer time series data: A case study in southern Xinjiang, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 097094. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.9.097094>

- Novelli, A., Aguilar, M. A., Nemmaoui, A., Aguilar, F. J., & Tarantino, E. (2016). Performance evaluation of object based greenhouse detection from Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI data: A case study from Almería (Spain). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.011>
- Novelli, A., & Tarantino, E. (2015). Combining ad hoc spectral indices based on LANDSAT-8 OLI/TIRS sensor data for the detection of plastic cover vineyard. *Remote Sensing Letters*, 6(12), 933–941. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1093186>
- Ou, C., Yang, J., Du, Z., Liu, Y., Feng, Q., & Zhu, D. (2020). Long-term mapping of a greenhouse in a typical protected agricultural region using Landsat imagery and the Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(1), 55. <https://doi.org/10.3390/RS12010055>
- Ou, C., Yang, J., Du, Z., Zhang, T., Niu, B., Feng, Q., Liu, Y., & Zhu, D. (2021). Landsat-derived annual maps of agricultural greenhouse in Shandong Province, China from 1989 to 2018. *Remote Sensing*, 13(23), 4830. <https://doi.org/10.3390/rs13234830>
- Pala, E., Tasdemir, K., & Koc-San, D. (2015). Unsupervised extraction of greenhouses using approximate spectral clustering ensemble. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 4668–4671). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326870>
- Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2019). High-resolution mapping of protected agriculture in Mexico, through remote sensing data cloud geoprocessing. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 532–541. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1686430>
- Shi, L., Huang, X., Zhong, T., & Taubenbock, H. (2020). Mapping plastic greenhouses using spectral metrics derived from GaoFen-2 satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 49–59. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2950466>
- Veettil, B. K., Van, D. D., Quang, N. X., & Hoai, P. N. (2022). Remote sensing of plastic-covered greenhouses and plastic-mulched farmlands: Current trends and future perspectives. *Land Degradation and Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.4497>
- Veettil, B. K., & Xuan, Q. N. (2022). Correction to: Landsat-8 and Sentinel-2 data for mapping plastic-covered greenhouse farming areas: A study from Dalat City (Lam Dong Province), Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(49), 73934. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21677-x>
- Wang, C., & Lu, L. (2019). Object-based random forest classification for detecting plastic-mulched landcover from Gaofen-2 and Landsat-8 OLI fused data. In *2019 8th*

- International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820632>
- Wu, C. F., Deng, J. S., Wang, K., Ma, L. G., & Tahmassebi, A. R. S. (2016). Object-based classification approach for greenhouse mapping using Landsat-8 imagery. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(1), 79–88.
<https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160901.1414>
- Xiong, Y., Zhang, Q., Chen, X., Bao, A., Zhang, J., & Wang, Y. (2019). Large scale agricultural plastic mulch detecting and monitoring with multi-source remote sensing data: A case study in Xinjiang, China. *Remote Sensing*, 11(18), 2088.
<https://doi.org/10.3390/rs11182088>
- Yang, D., Chen, J., Zhou, Y., Chen, X., Chen, X., & Cao, X. (2017). Mapping plastic greenhouse with medium spatial resolution satellite data: Development of a new spectral index. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 47–60.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.002>
- Yu, B., Song, W., & Lang, Y. (2017). Spatial patterns and driving forces of greenhouse land change in Shouguang City, China. *Sustainability*, 9(3), 359.
<https://doi.org/10.3390/su9030359>
- Zhang, T., Tang, B. H., Huang, L., & Chen, G. (2022). Rice and greenhouse identification in plateau areas incorporating Sentinel-1/2 optical and radar remote sensing data from Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(22), 5727.
<https://doi.org/10.3390/rs14225727>

BÖLÜM 6

İŞ SÜREÇ YÖNETİMİ(BPM) İLE ARAÇ ÇEKİCİ YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Tahsin ÇETİNYOKUŞ¹, Okan TÜREYYEN²

¹ Prof. Dr. Gazi Üniversitesi Mühendislik Fak. Endüstri Müh. Böl. tahsinc@gazi.edu.tr

² Lisansüstü Öğrenci, Kurumu: Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı E-mail: okan.tureyyen@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ

Kentsel alanlarda çekicilerin etkin bir şekilde yönetilmesi, trafik akışının düzenli olması ve acil durumların zamanında müdahale edilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Çekiciler, trafik engellerini kaldırmak ve kanun uygulama faaliyetlerini desteklemek gibi önemli rol oynamaktadır. Ancak, çekici görevlendirmelerinin manuel olarak yönetilmesi çeşitli zorluklar doğurmaktadır; bu durum gecikmelere, etkinlik kayıplarına ve hatalara neden olmaktadır.

Çekici faaliyetleri yürütülen özel ya da tüzel kurumlar bünyesindeki çekicilerin etkin bir şekilde yönetilmesinde benzer zorluklarla karşı karşıyadır. Mevcut süreç büyük ölçüde manuel karar verme üzerine kurulmuştur. Bu da hizmet taleplerine tutarsız yanıt verilmesine ve gecikmelere neden olmaktadır. Etkin olmayan bu yapı trafik hizmetlerinin genel performansını etkilemenin yanı sıra kurumun itibarını da zedeleyip, kamu güvenliğini riske atmaktadır.

Bu zorlukları ele almak için, çekici görevlendirmesi süreçlerinin optimize edilmesi ve operasyonel verimliliğinin artırılması için kapsamlı bir yaklaşım gereklidir. Bu araştırma kapsamında, çekici görevlendirmesini optimize etmek ve karar verme sürecini iyileştirmek için GPS teknolojisi ve Karar Destek Sisteminin(KDS) entegrasyonu önerilmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde araç takibi üzerine birçok çalışma mevcuttur. Ghaffari ve diğerleri(2014) çalışmalarında farklı iletişim teknolojilerini kullanarak sahip olunan araçların takibini sağlayan bir filo takip sistemi geliştirilmiştir. Sistem 4 ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar; Web sunucusu, iletişim sunucusu, veri tabanı sunucusu ve harita sunucusudur. Çalışma sistemi ilk olarak GPS ve GPRS(Genel Paket Radyo Servisi) aracın konumunu belirlemek adına GPS takibini sağlamak için modüle sim takılarak aracın hareketliliği kontrol edilmektedir. İletişim sunucusu elde edilen bilgileri veri tabanı sunucusuna iletir. Veri tabanı sunucusunda ki bilgiler bir web sunucusuna gönderilir ve bir personel ve idari yönetim bir web tarayıcısı yardımıyla bütün bilgilere, araçların hangi konumda olduklarına başarılı bir şekilde erişir.

Can(2010) çalışmasında BPM(İş Yönetim Süreci)'nin tarihsel gelişimini aktarırken en önemli husus olan kurum için iyi bir BPM süreci oluşturulduğu takdirde kurumun birçok avantaj sağlayacağı belirtilmektedir.

Küçüksille ve Kuşcu(2010) ise çalışmalarında piyasada kullanılan Araç Takip Sistemlerinin çoğunda mikro denetleyici kitler kullanıldığı bunun ise son kullanıcı için arıza ve sistemde değişiklikler yapılmak istendiğinde bir sorun oluşturduğuna değinmişlerdir. Bu sorunun çözümünün ise PDA (Personel Digital Assistant: Kişisel Cep Bilgisayarları) yazılım yardımıyla GPS verilerinin alınıp merkezi sisteme iletilmesinin mümkün olduğu vurgulanmaktadır. Sistem 3 aşamadan oluşur bunlar araç içinde ki PDA'lar aracılığıyla GSM hattına buradan ise bir merkezi sisteme iletimi şeklinde çevrim içi olarak web tarayıcısı üzerinden çalışmaktadır. Bu şekilde bir PDA'nın çıkarılıp yeni bir PDA'nın sadece yazılımı yüklenerek sisteme dahil edilmesi sağlanmıştır. Bu şekilde Araç Takip Sistemi hantallıktan kurtulan, maliyeti düşüren ve verimliliği artan bir hal kazanmıştır.

Dirik(2002) Araç Takip Sistemi çevrim içi ve düşük maliyetli olarak geliştirilmiştir. Sistem 3 aşamalı olarak tasarlanmıştır ilk olarak konumun tespiti ikinci olarak kablosuz haberleşme ve son olarak araçların konumunun sayısal olarak haritada görüntülenmesi şeklindedir. Bu çalışmanın diğer çalışmadan farkı haberleşmek için GSM şebekelerine veya uyduya ihtiyaç duymamasıdır. Haberleşmek için analog araç telsizleri kullanarak maliyeti düşük çevrim içi bir Araç Takip Sistemi oluşturulmuştur.

Ecemiş ve Yaykaşlı(2018) çalışmada tüketicilerin otel bulmasında birçok kriterin olduğu analizi yapılmıştır. Bu hususta TOPSIS yöntemiyle tüketicilerin kriterleri ağırlıklandırılarak tüketiciye WEB tabanlı çok kriterli bir Karar Destek Sistemi sunulmuştur.

3. UYGULAMA BİLEŞENLERİ

3.1 İş Süreçleri Yönetimi(BPM)

İş Süreç Yönetimi(BPM), günümüz işletmelerinin karmaşıklığı ve rekabetçi doğası göz önüne alındığında hayati öneme sahip bir konsepttir. BPM, işletmelerin iş süreçlerini analiz etmek, tasarlamak, uygulamak, izlemek ve sürekli olarak iyileştirmek için kullanılan kapsamlı bir yönetim yaklaşımıdır.

İş Süreç Yönetimi(BPM), bir organizasyonun içinde bulunduğu iş süreçlerini stratejik bir şekilde ele alarak, bu süreçlerin verimliliğini, etkinliğini ve esnekliğini artırmayı amaçlayan bir yönetim sistemidir. BPM, işletmelerin süreçlerini daha iyi anlamalarını, sürekli olarak iyileştirmelerini ve rekabet avantajı elde etmelerini sağlar.

BPM'nin temel bileşenleri süreç tanımlama, iyileştirme, tasarım, otomasyon ve teknoloji kullanımı, izleme ve ölçümleme, iyileştirme gibi hususlar mevcuttur.

Süreci tanımlama ve modelleme ilk adım ve en önemli adımlardan biridir. İşletmenin iş süreçlerini detaylı bir şekilde tanımlama ve belgeleme sürecidir. Bu aşamada, işletmenin mevcut süreçleri haritalanır, farklı faaliyetler ve paydaşlar arasındaki ilişkiler analiz edilir ve iş süreçleri modellenir. Süreç tanımlanıp modellendikten sonra tasarım ve iyileştirme adımıyla devam edilir. Mevcut iş süreçlerinin anali edilmesini ve iyileştirilmesini içerir. Bu aşamada, süreçlerin verimliliğini arttırmak için fırsatlar belirlenir, gereksiz adımların ortadan kaldırılması veya süreçteki sorunların giderilmesi gibi değişiklikler yapılır.

Sürecin bu kısmında teknoloji ve otomasyon kullanarak insani hataların azaltılması, sistemin otomatikleştirilmesi için özel BPM yazılımları kullanılır.

BPM, işletmelerin süreç performansını izleme ve ölçme sürecidir. .Bu aşamada, belirlenen performans ölçütleri kullanılarak süreçlerin etkinliği değerlendirilir ve iyileştirme fırsatları belirlenir.

3.2 Küresel Konumlandırma Sistemi(GPS)

GPS, dünya genelinde kullanıcılara kesintisiz konum bilgisi sağlamayı amaçlayan radyo navigasyon sistemidir. Sistem uzay, kontrol ve kullanıcı olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Başlangıçta 1970'lerde tanımlanan prensiplere dayanan ancak zamanla geliştirilen GPS uydulardan aldığı bilgilerle konum belirleme işlemini gerçekleştirir.

“GPS tarafından kullanılan konum bulma yöntemi, konumlarını yayınlayan GPS uyduları ile kullanıcı arasındaki uzaklığın ölçülmesine dayanır. GPS uydularından yayınlanan GPS sinyali L1 (1575.42MHz) ve L2 (1227.6 MHz) frekanslarında bulunan iki bileşenden oluşur. Bütün uydular L1 ve L2 frekanslarında yayın yaparlar.

GPS uydularından yayınlanan sinyallerin karışmaması için çoklu erişim yöntemi olarak Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access -CDMA) kullanılır. GPS uydularında kullanılan kodlar çapraz ilinti değerleri düşük olacak şekilde seçilmiştir. GPS uydularından gönderilen yön güdüm ve zaman bilgisi kullanılarak gönderme anında GPS

uydusunun konumu bulunabilir. Aynı zamanda CDMA için kullanılan kodlardan yararlanılarak sinyalin GPS uydusundan alıcıya gelinceye kadar ortamda geçirdiği süre de çok hassas olarak bulunabilir.

Bu işlem için GPS alıcısında saat bulunması gereklidir. Eğer GPS alıcısındaki saatin GPS uyduları ile eşzamanlı olduğu düşünülürse konum bulmak için 3 uydudan gelen sinyallerin işlenmesi yeterli olacaktır. Ancak GPS alıcılarında maliyeti ve karmaşıklığı azaltmak için, hassas saatler kullanılmamaktadır. Bu nedenle konum bilgisi elde edebilmek için en az 4 uydudan gelen sinyallerin işlenmesi gereklidir. Kullanıcıda bulunan GPS alıcıları pasif elemanlar olduklarından GPS aynı anda sınırsız sayıda kullanıcıya hizmet verebilir ve özel bir izne gerek olmadan GPS hizmetinden yararlanılabilir".(Çınar,2005)

3.3 Karar Destek Sistemleri-KDS(DSS)

Karar Destek Sistemleri(KDS), bir organizasyon veya karar verenin, karar alma sürecini desteklemek için tasarlanmış bilgisayar tabanlı bir sistemdir. Bu sistemler, karmaşık veri analizlerini gerçekleştirmek, alternatif senaryoları değerlendirmek ve karar verme sürecini iyileştirmek için kullanılır.

KDS'nin temel amacı, karar vericilere doğru, zamanında ve işlevsel bilgiler sağlamaktır. Bu bağlamda, KDS, genellikle büyük veri serilerini işleyebilme, veri analitiği tekniklerini kullanabilme ve kullanıcıların farklı karar senaryolarını simüle edebilme yeteneklerine sahiptir.

KDS'nin bileşenleri arasında veri depolama ve yönetim sistemleri, veri analizi araçları, modelleme ve simülasyon yazılımları ve kullanıcı ara yüzleri bulunabilir. Bu bileşenler, karar vericilere bilgi sunma, veriye erişim sağlama, analiz yapma ve kararlarını destekleme konusunda yardımcı olur.

"Bazı durumlarda karar verici, kaliteli bir karar vermek için kendi deneyimine güvenebilir ya da Yönetim Bilgi Sisteminden (YBS) elde edilen mevcut bilgiden başka ilave bilgiye bakmaya gerek duymaz. Özellikle taktik ve stratejik seviyelerdeki karar vericiler, sık sık karmaşık faktörlerin tam olarak sentez edilmesi insanyeteneginin ötesinde olan zor durumlarla karşılaşılır.

Bu durumlar KDS'lerin uygulanması için uygundur. KDS'ler, YBS'lerden daha esnektir ve farklı durumlar için karar vericiye yardım desteği sunabilir; tüm karar aşamaları, karar tipleri ve farklı yapıdaki problemlerle ilgilenebilir" (Çetinyokuş ve Gökçen 2002)(Gökçen,2007)

Yönetim Bilişim Sistemleri(YBS),çok kriterli karar verme süreçlerinde önemli bir rol oynar. Çok kriterli karar verme, bir organizasyonun veya bireyin birden fazla kriter hedefi göz önünde bulundurarak en uygun kararı alma sürecidir. YBS, veri toplama, analiz, karar destek sistemleri, optimizasyon ve modelleme araçları gibi özelliklerle karar vericilere yardımcı olur. Bu sistemler, karar vericilerin daha hızlı, etkili ve bilgiye dayalı kararlar almasını sağlar.

Yönetim Bilişim Sistemleri (YBS) ve Karar Destek Sistemleri (KDS) genellikle birbirlerine yakın kavramlar gibi görünse de, aralarında belirli farklar bulunmaktadır.

Yönetim Bilişim Sistemleri genel iş süreçlerini desteklemek için kullanılırken, Karar Destek Sistemleri ise özellikle karar verme süreçlerini desteklemek için tasarlanmıştır ve daha gelişmiş analitik yeteneklere sahiptir.

"Karar verme, alternatifler arasından bütün koşulları sağlayan en uygunu belirleme sürecidir. Birçok karar verme problemi doğası gereği farklı ve birbiri ile çoğu zaman çelişen kriterlerin beraberce değerlendirilmesini gerektirir. Bu tip birden fazla alternatif arasında seçim yapılırken farklı kriterlerin hesaba katıldığı problemler, literatürde çok kriterli karar verme problemleri olarak adlandırılırlar. Çok kriterli karar verme problemleri birden fazla çelişen amacın birlikte değerlendirildiği, çoğu zaman matematiksel modelleme altyapısı ile çözümlendiği durumlarda, çok amaçlı(kriterli) karar verme (ÇAKV-ÇKKV) olarak da adlandırılırlar."(Cebeci,2021)

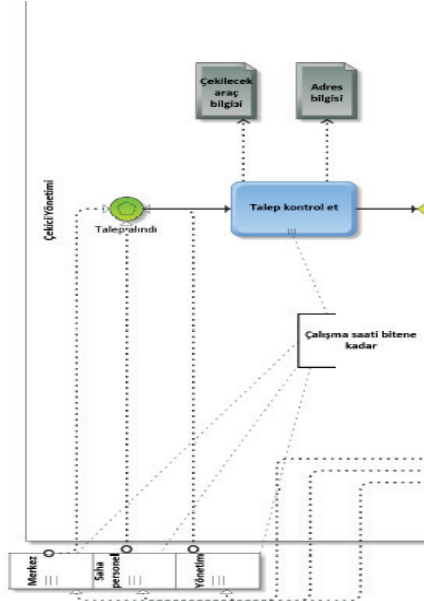
3.3.1 Çok Kriterli Karar Verme – TOPSIS Yöntemi

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri arasında yaygın olarak başvurulanan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), karar vericilere alternatifleri önceliklendirme ve en uygun seçeneği belirleme imkânı tanıyan mesafe tabanlı bir sıralama yöntemidir. Yöntemin temel felsefesi; seçilecek en iyi alternatifin pozitif ideal çözüme geometrik olarak en yakın, negatif ideal çözüme ise en uzak olması ilkesine dayanır. Uygulama süreci, karar problemi kapsamındaki kriterlerin ve bu kriterlerin önem derecelerini yansıtan ağırlıkların tanımlanmasıyla başlar. Kriterlerin fayda (maksimizasyon) veya maliyet (minimizasyon) yönlü olduğu belirlendikten sonra başlangıç karar matrisi kurulur. Farklı ölçü birimlerine sahip kriter değerleri vektör normalizasyonu ile birimsizleştirilerek normalize karar matrisi elde edilir. Bu matrisin ilgili kriter ağırlıkları ile çarpılması sonucunda ağırlıklandırılmış normalize karar matrisine ulaşılır. Elde edilen ağırlıklı performans değerleri üzerinden, her bir kriter için hedeflenen en iyi değerleri barındıran pozitif ideal çözüm ile en istenmeyen değerleri temsil eden negatif ideal çözüm noktaları tespit edilir. Her bir alternatifin bu iki referans noktasına olan Öklid mesafeleri hesaplanır. Son aşamada ise alternatiflerin negatif ideal çözüme olan mesafesinin, iki ideale olan toplam mesafeye oranlanmasıyla göreceli yakınlık katsayıları (C_i) (Bazı kaynaklarda da kullanıldığı gibi uygulamadan gelen şekillerde G_i olarak gösterilmiştir) hesaplanmıştır. Değeri 1'e en yakın olan alternatiften başlanarak nihai sıralama oluşturulur ve karar alma süreci nesnel bir zemine oturtulur.

4. UYGULAMA

4.1 Mevcut Çekici Yönlendirme Sistemi Modeli

Şekil 4.1.1. Talep alma süreci



Talebin alınması: Mevcut işleyen sistemde çekici yönlendirme işi için görevlendirilen memura çekici talepleri 3 farklı kaynaktan gelmektedir. Bunlar Zabıta Dairesi Başkanlığında bulunan vatandaşların veya kurum içindeki personellerin taleplerini alan “Haber merkezi” olarak adlandırılan yerdir. İkinci olarak sahada çalışan personeller telsiz vasıtasıyla çekicileri yönlendiren memura ulaşarak çekici talep etmektedirler. Son olarak ise üst yönetimin yani komiserler, amirler ve müdürler görevli memurdan çekici talep etmektedirler.

Yönlendirici personele gelen taleplerde çekicinin istendiği yerin adresi ve çekilecek aracın durumu belirtilmektedir. Şekil 4.1.1. 'deki modelde talep alma süreci gösterilmiştir.

Talebin Kontrol Edilmesi: Bu aşamada yönlendirici memur, merkeze ulaşan operasyonel talepleri belirlenen kriterler doğrultusunda analiz eder. Değerlendirme

sürecinin ilk adımı, talebin aciliyet derecesinin saptanmasıdır. Bildirimin acil bir durum içermesi durumunda hızlı bir karar mekanizması işletilirken; acil olmayan durumlarda daha kapsamlı ve kısıtlayıcı bir inceleme prosedürü yürütülür.

1. Acil Olmayan Taleplerin Değerlendirilmesi: Talebin acil nitelik taşımadığı senaryolarda süreç şu basamaklarla ilerler:

- **Personel Uygunluğu:** Çekici operatörlerinin çalışma saatleri, vardiya düzeni ve yasal mola süreleri kontrol edilir.
- **Araç Uyumluluğu:** Çekilecek aracın sınıfı, boyutları ve lastik taban genişliği gibi teknik özellikleri değerlendirilerek ekipman uygunluğu incelenir.

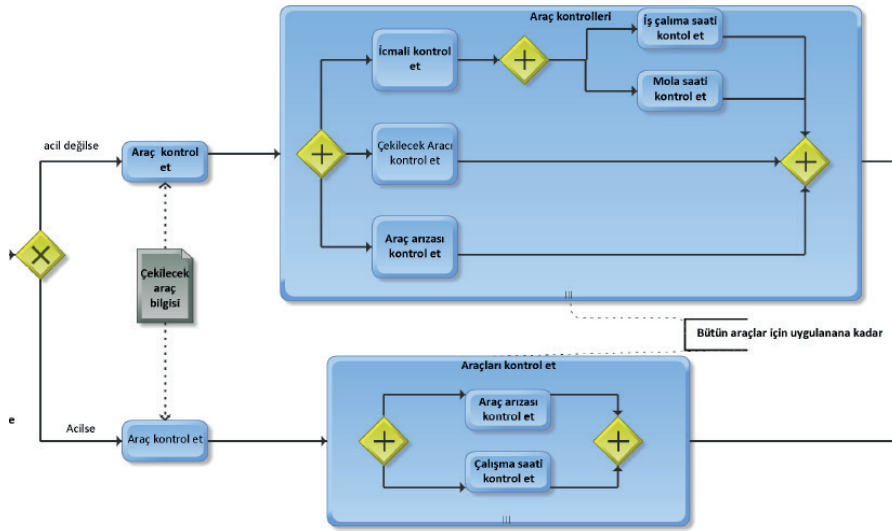
- Ekipman Durumu: Hizmet verecek çekicilerin mekanik ve operasyonel durumu denetlenir; araçlarda herhangi bir arıza bulunması halinde süreç olumsuz sonuçlandırılır.
- Onay Prosedürü: Sayılan tüm operasyonel kriterlerin eksiksiz karşılanması durumunda talep onay sürecine aktarılır.

2. Acil Taleplerin Değerlendirilmesi: Zaman hassasiyetinin yüksek olduğu acil durumlarda; personelin mola süreleri veya çekilecek aracın teknik uygunluğu gibi ayrıntılar göz ardı edilir. Bu aşamada yalnızca iki temel husus doğrulanır:

- Görevlendirilecek çekicilerin faal ve arızasız olması,
- Personelin fiilen mesaide bulunması.

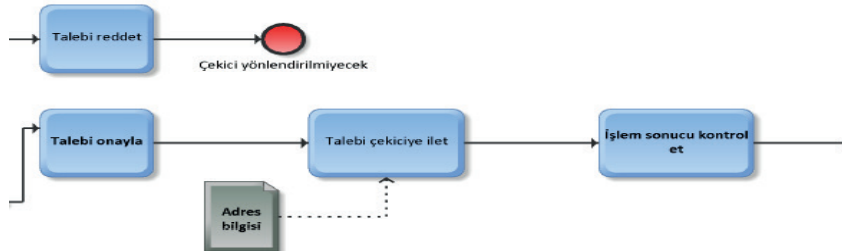
Kurum içi çekici filosu operasyonu karşılamada yetersiz kaldığında özel sektör kuruluşlarından destek talep edilir. Ancak temel gereksinimlerin hiçbir şekilde karşılanamaması halinde talep doğrudan reddedilir. Gerekli asgari koşullar sağlandığında ise talep ivedilikle onaylanır. Sürecin mantıksal karar adımları Şekil 4.1.2 'de modellenerek gösterilmiştir.

Şekil 4.1.2. Talebin analiz süreci



Talebin Onaylanması veya Reddedilmesi: Yönlendirici memur, önceki aşamada gerekli şartların sağlanmadığı durumlarda şartlar doğrudan reddeder. Ancak, istenilen şartlar karşılanıyorsa talebi onaylar ve uygun gördüğü çekiciye çekilmesi istenen aracın adres bilgisini ileterek çekicinin mevcut konuma gitmesini sağlar. Çekici, işlemi gerçekleştirdikten sonra (aracı çektiyse veya çekilmediyse), bu durumu yönlendirici memura ileterek bilgilendirir. Şekil 4.1.3. 'de talebin onaylanma veya reddedilme modeli gösterilmiştir.

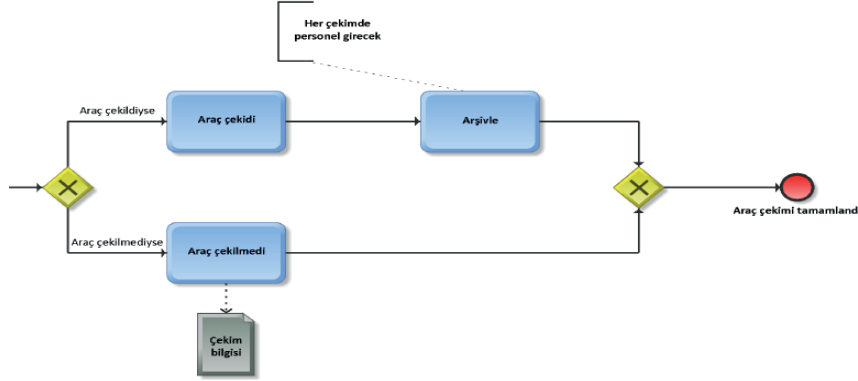
Şekil 4.1.3. Talebin onaylanma veya reddedilme süreci



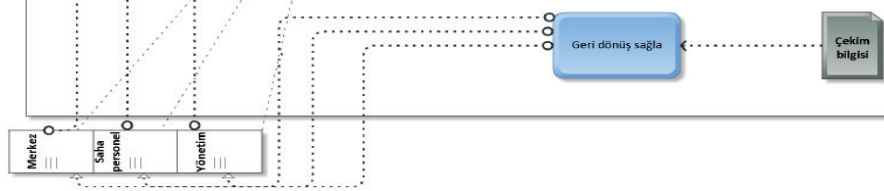
Araç Çekimi Süreci Tamamlanması: Araç çekim işlemi gerçekleştiyse yönlendirici memur bu çekim işlemini arşivler ve çekim sürecini tamamlar.

Araç çekim işlemi gerçekleşmediyse yönlendirici memur arşivleme işlemi gerçekleştirmez ve süreci tamamlar. İki hususta da yönlendirici memur geri dönüş sağlaya bilmek için çekim bilgisi olarak bu hususları not eder. Şekil 4.1.4. 'de çekim işlemi tamamlama ve Şekil 4.1.5. 'de geri dönüş süreci gösterilmiştir.

Şekil 4.1.4 Çekim işlemi tamamlama süreci

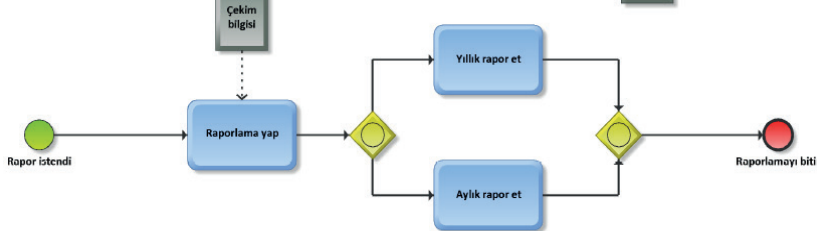


Şekil 4.1.5 Geri bildirim süreci



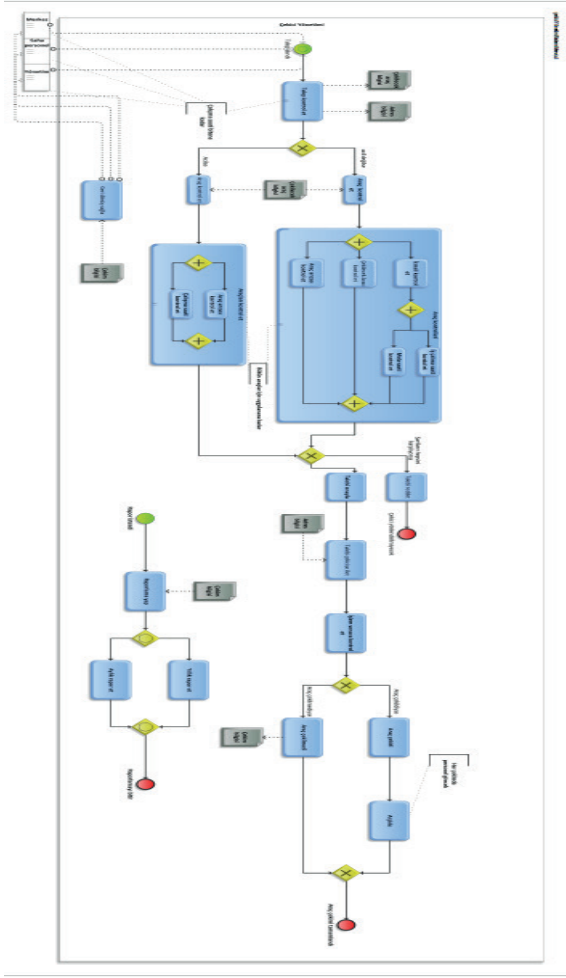
Raporlama Süreci: Yönetim, aylık veya yıllık periyotlarla çekim işlemlerinin raporunu talep etmektedir. Bu raporu hazırlamak için yönlendirici memur, önceden gerçekleştirilen her çekim işleminin detayını manuel olarak tutar. Talep edildiğinde, yönlendirici memur bu verileri kullanarak hesaplama işlemleri yapar ve yönetim tarafından istenen raporları sunar. Şekil 4.1.6.' de raporlama süreci gösterilmiştir.

Şekil 4.1.6. Raporlama süreci



Mevcut durumun genel görünümü ise Şekil 4.1.7' de verilmiştir.

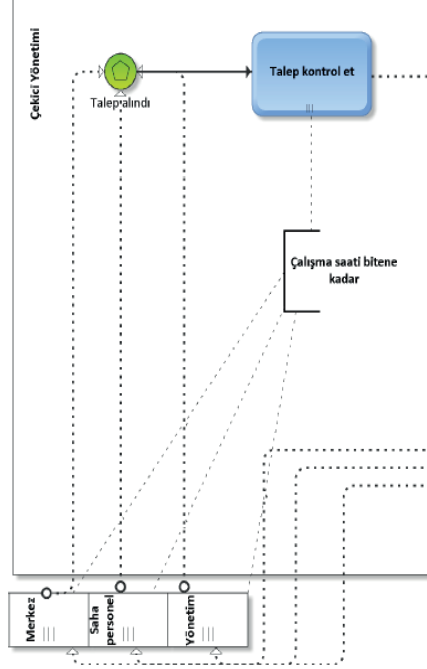
Şekil 4.1.7. Mevcut sistemin genel görünümü



4.2. İyileştirilmiş Çekici Yönlendirme Sistemi Modeli

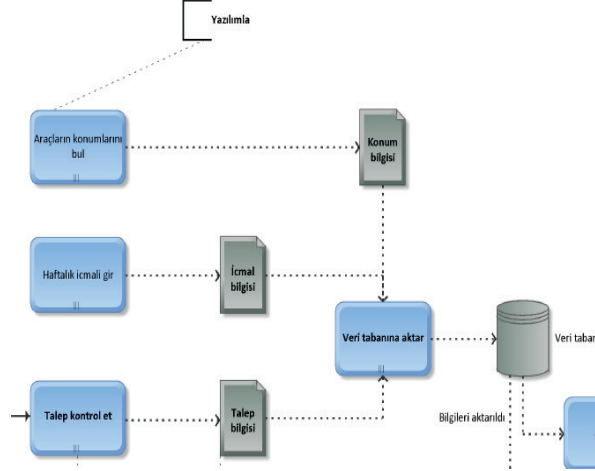
Talep alımı: Bir önceki model gibi burada da talep haber merkezi, saha personeli ve yönetim tarafından iletilmektedir. Şekil 4.2.1' de talep alım sistemi gösterilmiştir.

Şekil 4.2.1. Talep alım sistemi

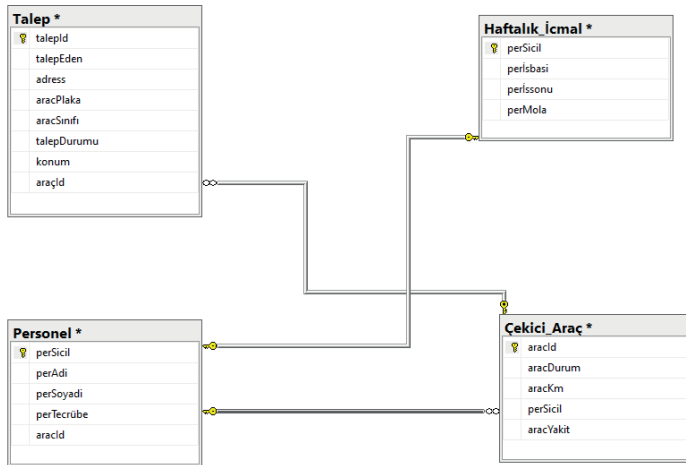


Veri tabanına aktarım işlemleri: Bu aşamada gelen taleplerin bilgisi (Araç bilgisi, talebin aciliyet durumu, araç arıza bilgisi vb.), oluşturulan veri tabanına aktarılmaktadır. Sonra ki aşamada ise personel tarafından haftalık veri tabanına icmal bilgisi girilmekte ve en önemli hususlardan olan bir yazılım desteğiyle araçların anlık konum bilgileri GPS yardımıyla tespit edilerek veri tabanına aktarılmaktadır. Şekil 4.2.2. ve Şekil 4.2.3.' de Veri tabanına aktarım süreci gösterilmiştir.

Şekil 4.2.2. Bilgi sistemi veri akış diyagramı



Şekil 4.2.3. Veri Modeli



Verilerin veri tabanı ortamına aktarılması, hem verilerin daha güvenli bir şekilde saklanması sağlar hem de kullanılabilirliklerini artırır. Yukarıda tablolardan da görüldüğü üzere, farklı kaynaklardan elde edilen veriler daha anlaşılabilir hale getirilmiştir.

Verilerin aktarılmasının ardından, veri tabanında oluşturulan tablolar arasında ilişkiler belirlenir. Bu sayede, tablolar arasında veri akışı sağlanır ve verilerin tutarlılığı ve

bütünlüğü korunmuş olur.

Bu süreç, bilgi yönetimi ve veri güvenliği açısından önemlidir. Veri tabanı çözümleri, verilerin etkin bir şekilde yönetilmesini ve gereksinimlere uygun olarak erişilmesini sağlar. Ayrıca, verilerin ilişkilendirilmesi ve yapılandırılması, bilgiye dayalı karar alma süreçlerini destekler ve kurumların stratejik hedeflerine katkı sağlar.

TOPSIS Destekli Çekici Araç Seçim Modeli: Çalışmanın bu aşamasında yönlendirici memurun en uygun çekici aracı seçebilmesi amacıyla Excel üzerinde TOPSİOS tabanlı bir karar destek sistemi kurulmuştur. Modelin adımları şu şekildedir:

- Ölçütler: Yakıt (Maksimum), Konum (Minimum/Metre), Personel Sayısı (Maksimum), Tecrübe (Maksimum) ve Mola Durumu (Maksimum).
- Ağırlıklar: Konum %35, Yakıt %20, Personel Sayısı %15, Tecrübe %15 ve Mola %15 olarak belirlenmiştir.
- Değer Girişi ve Kodlama:
 - Yakıt: 1 (Az), 2 (Tam)
 - Konum: Olay yerine olan mesafe (metre)
 - Personel: 0 (Tek kişi), 1 (Çift kişi)
 - Tecrübe: 1 (Az), 2 (Orta), 3 (Çok)
 - Mola: 0 (Molada), 1 (Molada değil / Göreve hazır)
- Alternatifler: Değerlendirmeye alınan çekiciler 191, 192, 193, 194 ve 195 telsiz kodlu 5 araçtır.

Yukarıda özetlenen parametreler ve karar matrisi yapısı Şekil 4.2.4'te, standart karar matrisi Şekil 4.2.5. 'de ve ağırlıklandırılmış standart karar matrisi Şekil 4.2.6. 'da gösterilmiştir.

Şekil 4.2.4. Karar matrisin oluşturulması

		Max	Min	Max	Max	Min	
	Ağırlık	0,20	0,35	0,15	0,15	0,15	1,0
	Ölçüt	Yakıt	Konum Bilgisi	P.Tek/Çift	P.Tecrübe	Persolen Mola	
seçenekler	Çekici 191	1	100	0	1	0	
	Çekici 192	1	500	0	1	0	
	Çekici 193	2	800	1	2	0	
	Çekici 194	2	300	1	1	1	
	Çekici 195	1	250	1	3	1	

Şekil 4.2.5. Standart karar matrisi

	Standart Karar Matrisi				
	Max	Min	Max	Max	Min
	Yakıt	Konum Bilgisi	P.Tek/Çift	P.Tecrübe	Persolen Mola
Çekici 191	0,3015	0,0975	0,0000	0,2500	0,0000
Çekici 192	0,3015	0,4874	0,0000	0,2500	0,0000
Çekici 193	0,6030	0,7798	0,5774	0,5000	0,0000
Çekici 194	0,6030	0,2924	0,5774	0,2500	0,7071
Çekici 195	0,3015	0,2437	0,5774	0,7500	0,7071

Şekil 4.2.6. Ağırlıklandırılmış standart karar matrisi

	Ağırlıklandırılmış Standart Karar Matrisi				
	Max	Min	Max	Max	Min
	Yakıt	Konum Bilgisi	P.Tek/Çift	P.Tecrübe	Persolen Mola
Çekici 191	0,0603	0,0341	0,0000	0,0375	0,0000
Çekici 192	0,0603	0,1706	0,0000	0,0375	0,0000
Çekici 193	0,1206	0,2729	0,0866	0,0750	0,0000
Çekici 194	0,1206	0,1023	0,0866	0,0375	0,1061
Çekici 195	0,0603	0,0853	0,0866	0,1125	0,1061
Pozitif İdeal	0,1206	0,0341	0,0866	0,1125	0,0000
Negatif İdeal	0,0603	0,2729	0,0000	0,0375	0,1061

Sıraların belirlenmesi: Son olarak pozitif ideal ve negatif ideallerin belirlenmesinden sonra C_i nin tespiti sağlanmıştır. Bu husustan sonra 5 çekicinin sıralaması bulunarak yönlendirici

memurun çıkan sonuç neticesinde doğru karar almasına yardımcı olunmuştur. Şekil 4.4.7 sıralama gösterilmiştir.

Şekil 4.4.7. Sıralama işleminin belirlenmesi

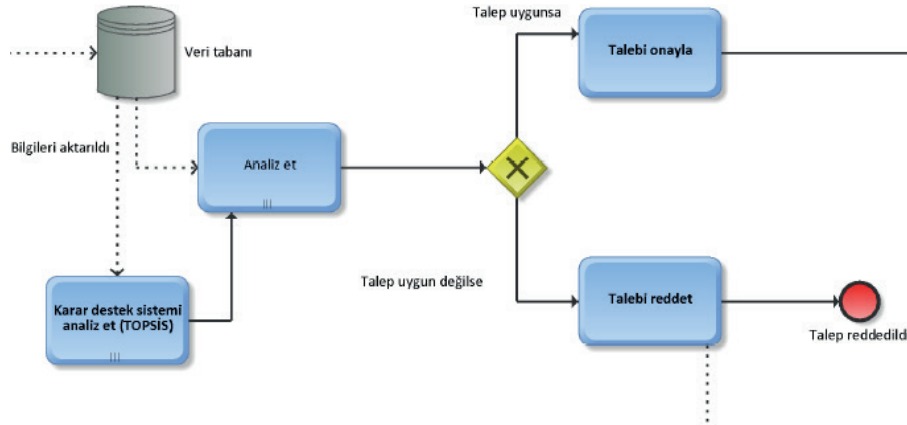
	S_i^+	S_i^-	G_i	Rank
Çekici 191	0,12947	0,261306102	1,1294657	1
Çekici 192	0,18811	0,147394231	1,1881055	4
Çekici 193	0,24174	0,154248545	1,2417377	5
Çekici 194	0,14673	0,200583526	1,146733	3
Çekici 195	0,13231	0,219847307	1,1323069	2

Talebin Analiz Edilmesi: Yönlendirici memur, TOPSİS karar destek sistemi ve veri tabanından gelen analitik verileri mesleki tecrübesiyle birlikte değerlendirir. Önerilen çekici aracı ve görev şartlarını inceleyen memur, uygunluk durumunda talebi onaylar; yetersizlik veya eksiklik tespit ederse talebi reddeder ya da alternatifleri değerlendirir.

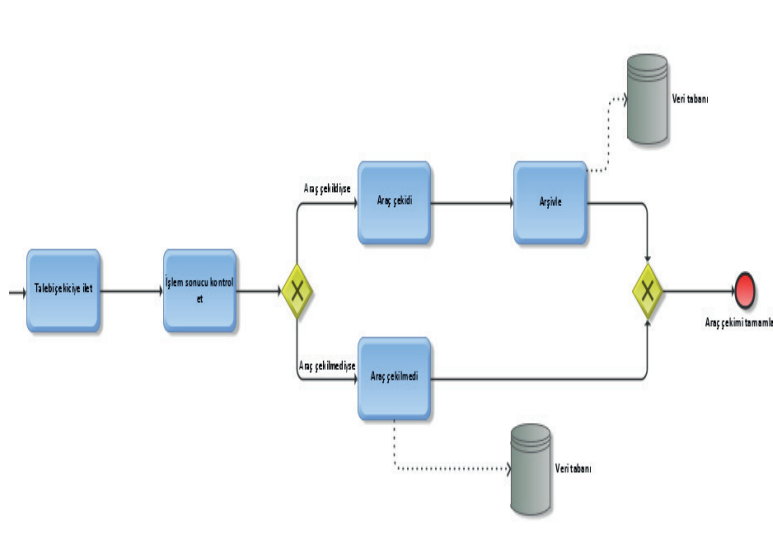
Objektif veriler ile uzman personel görüşünü harmanlayan bu mekanizma, çekici sevk sürecinin hızlı ve verimli yürütülmesini sağlar (Şekil 4.4.8).

Onaylanmış Talebin Sonuçlandırılması ve Arşivleme: Yönlendirici memur, onaylanan talebe ait adres, araç ve durum bilgilerini seçilen çekiciye iletir. Olay yerine ulaşan çekicinin aracı çekmesi durumunda veriler veri tabanına kaydedilerek arşivleme tamamlanır; çekme işlemi gerçekleştirilemezse kayıt altına alınarak süreç sonlandırılır (Şekil 4.4.9).

Şekil 4.4.8. Analiz süreci

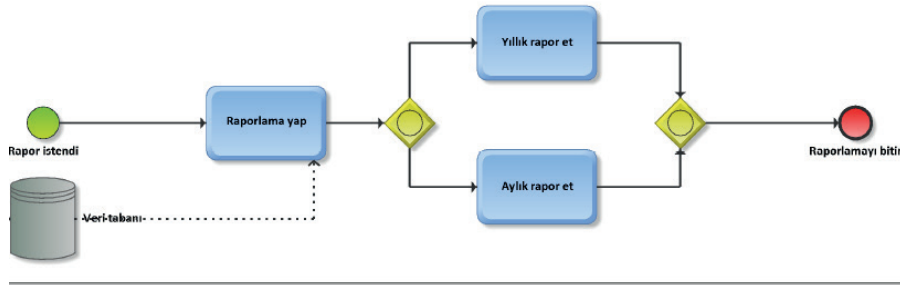


Şekil 4.4.19. Talep sonuçlandırılması ve arşivleme



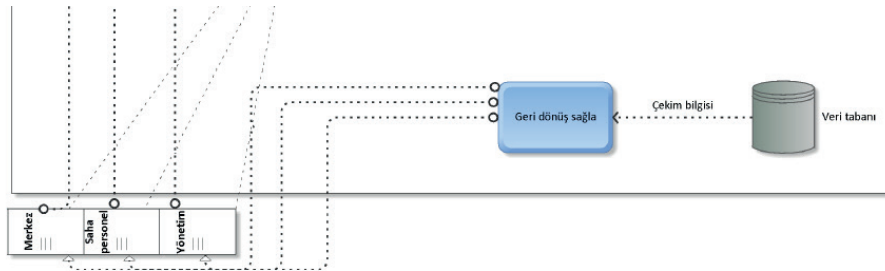
Raporlama işlemleri: Yöneticiler tarafından yıllık ve aylık olmak üzere belirli aralıklarla yönlendirici memurdan yapılan çekim işlemleri ile ilgili rapor istenmesi durumu olduğunda işleyen bu mevcut sistemde yapılan işlemler bir veri tabanından toplandığından VTYS(Veri Tabanı Yönetim Sistemi)kullanılarak istenilen raporlara ulaşılmaktadır. Şekil 4.4.10.' da raporlama işlemi gösterilmiştir.

Şekil 4.4.10. Raporlama süreci



Geribildirim sağlanması: Talep eden kaynaklara talebin durumu ile ilgili geri bildirim sağlanması gerektiğinde yönlendirici memur veri tabanında bilgilere ulaşarak işlemin sonucu olumlu veya olumsuz olarak taraflara(Haber merkezi, saha personeli, yönetim)bildirmektedir. Şekil 4.4.11 de geribildirim süreci gösterilmiştir.

Şekil 4.4.11. Geribildirim süreci



İyileştirilmiş sistemin genel görünümü Şekil 4.4.12. de verilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, bir Büyükşehir Belediyesi Trafik Zabıta Dairesi Başkanlığı çekici yönlendirme sistemine yönelik iyileştirilmiş bir sistem modeli oluşturulmuştur.

Mevcut sistemin temelinde personel analiz yeteneği, iş takibi ve deneyimine dayalı kararlar alınmaktadır. Ancak, bu yaklaşım tamamen insan odaklı olması, hataları ve yanlış kararlara yol açma potansiyelini beraberinde getirmektedir.

İyileştirilmiş sistem modeli içerisinde, çeşitli unsurların yenilenmesiyle personelin karar alma sürecine destek sağlanmıştır. Veri tabanı sistemi kullanarak bilgilerin toplanması, güvenli bir ortamda saklanması ve tek bir yerde tutulması; GPS sistemi kullanarak araçların anlık konum bilgisine erişilmesi ve TOPSIS Karar Destek Sistemi'nin veri tabanındaki bilgileri kullanarak yönlendirici memura karar alma sürecinde yardımcı olması bulunmaktadır. Bu iyileştirmelerin ardından, kurumun yakıt, evrak ve araç yıpranması gibi maliyetlerde azalma öngörülmektedir. Ayrıca, sistem hızının artması ve trafik hizmetlerinin aksamaması için daha doğru kararların alınması beklenmektedir.

Çalışmanın sonucunda ortaya konan iyileştirilmiş sistem modeli, bir Büyükşehir Belediyesi Trafik Zabıta Daire Başkanlığı'nın çekici yönlendirme sürecinde daha etkin ve verimli bir şekilde faaliyet göstermesini sağlayacaktır. Bu da hem kurumun iç işleyişini iyileştirecek hem de vatandaşlara sunulan trafik hizmetlerinin kalitesini arttıracaktır.

Bu iyileştirmeler BPM sistemi kullanarak modellenmiş ve uygulanarak, süreçlerin daha sistemli bir şekilde yönetilmesi sağlanmıştır. Buda kurumsal verimliliği arttırmaya yönelik önemli bir adımdır.

KAYNAKLAR

- Can, F. (2010). İş süreçleri yönetim sistemleri güncel durumu ve kuruluşu [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Cebeci, H. İ. (2021). Yönetim bilişim sistemleri literatüründe çok kriterli karar verme teknikleri: Sistematik bir inceleme. İşletme Bilimi Dergisi, 9(1), 111–146.
- Çetinyokuş, T. ve Gökçen, H. (2002). Borsada teknik göstergelerle analiz için bir karar destek sistemi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(1), 43–58.
- Davenport, T. H. ve Harmon, P. (2007). Business process change: A guide for business managers and BPM and Six Sigma professionals. Morgan Kaufmann Publishers.
- Dirik, A. E. (2002). GPS ile sistem içi araç takip sistemi [Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Ecemiş, O. ve Yaykaşlı, M. (2018). TOPSIS yöntemiyle otel seçimine yönelik bir karar destek sistemi. Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi, 6(74), 326–337.
- Garimella, K., Lees, M. ve Williams, B. (2008). BPM basics for dummies. Wiley Publishing.
- Ghaffari, S., Miman, M., & Küçük, L. (2014). Nakliyat araçları için bir araç takip sistemi. III. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi, 15-17.
- Gökçen, H. (2007). Yönetim bilgi sistemleri. Palme Yayıncılık
- Hantekin, E., Akyüz, Y. ve Bozdoğan, T. (2011). TOPSIS yöntemiyle finansal performans değerlendirmesi ve uygulama. Afyon Kocatepe Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi, 13(1), [73-92].
- Kaplan, E. D. (Ed.). (1996). Understanding GPS: Principles and applications. Artech House.
- Küçüksille, E. U. ve Kuşcu, Ö. (2010). Mobil cihazlar ile çevrimiçi araç takip sistemleri [Yayınlanmamış bildiri/rapor]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Parkinson, B. W. ve Spilker, J. J. (Ed.). (1996). Global positioning system: Theory and applications (Cilt 1). American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Soner, Ç. (2005). Vehicle tracking and guidance system using GPS [Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.