

Korozyona Dirençli Amfifobik Yüzey Tasarımı: Silika-Perflorosilan Tabanlı Kaplamalar

Kübra Özkan Hüküm 

Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

Öne Çıkanlar

- Tek dağılımlı silika nanopartikülleri sentezi.
- Uygulaması kolay amfifobik (suyu ve yağı sevmeyen) kaplamaların eldesi.
- Korozyona dayanıklı endüstride çok kullanılan Al yüzeylerin geliştirilmesi.

Makale Bilgileri

Geliş: 16/04/2025

Kabul: 27/05/2025

Anahtar Kelimeler

Fonksiyonel yüzeyler,
Amfifobik kaplama,
Korozyon direnci

Öz

Fonksiyonel yüzey kaplamaları, özellikle metalik malzemelerin çevresel etkilerden korunması ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi açısından son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu çalışmada, alüminyum yüzeylere amfifobik özellik kazandırmak amacıyla, Stöber yöntemi ile sentezlenen silika nanopartiküller farklı konsantrasyonlarda yüzeye püskürtülmüş ve ardından 1H,1H,2H,2H-Perflorooktiltriethoxysilan (perflorosilan) bileşiği ile kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi kullanılarak yüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen nanopartiküllerin kimyasal yapısı ve boyutu, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Dinamik Işık Saçılımı (DLS) analizleri ile karakterize edilmiş; geliştirilen kaplamaların su, hekzadekan ve diiodometan test sıvıları ile yapılan temas açısı ölçümleri sonucunda hidroforobik ve oleofobik performans sergilediği belirlenmiştir. En yüksek silika konsantrasyonuna sahip (1 mg/mL) kaplamada temas açısı değerleri sırasıyla su için 116,7°, hekzadekan için 79,2° ve diiodometan için ise 100,1° olarak ölçülmüş; yüzey enerjisi 9,42 mJ/m² (su ve diiodometan temas açılarına göre) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, aşındırıcı pH koşulları altında gerçekleştirilen dayanıklılık testleri sonucunda kaplamaların kimyasal kararlılığını koruduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, uygulaması kolay ve uzun ömürlü bu amfifobik kaplama yönteminin, korozyona dayanıklı yüzey tasarımlarında geniş bir uygulama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Corrosion-Resistant Amphiphobic Surface Design: Silica-Perfluorosilane Based Coatings

Highlights

- Synthesis of silica nanoparticles with uniform (monodisperse) size distribution.
- Fabrication of easily applicable amphiphobic (water and oil-repellent) coatings.
- Development of corrosion-resistant aluminum surfaces widely used in industry.

Article Info

Received: 16/04/2025

Accepted: 27/05/2025

Keywords

Functional surfaces,
Amphiphobic coating,
Corrosion-resistant

Abstract

Functional surface coatings have emerged as a significant area of research in recent years, particularly for enhancing the surface properties of metallic materials and protecting them from environmental degradation. In this study, silica nanoparticles synthesized via the Stöber method were spray-coated onto the aluminum surfaces at different concentrations to impart amphiphobic characteristics. Subsequently, surface modification was carried out through the chemical vapor deposition (CVD) of 1H,1H,2H,2H-perfluorooctyltriethoxysilane (perfluorosilane) modifying agent. The chemical structure and particle size of the synthesized nanoparticles were characterized by using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and dynamic light scattering (DLS). Contact angle measurements performed with water, hexadecane, and diiodomethane confirmed the hydrophobic and oleophobic performance of the fabricated coatings. For the surfaces coated with the highest silica concentration (1 mg/mL), the water, hexadecane and diiodomethane contact angles were measured as 116.7°, 79.2° and 100.1°, respectively, whereas the surface energy was calculated as 9.42 mJ/m² (based on the contact angles of water and diiodomethane). In addition, durability tests conducted under corrosive pH conditions demonstrated that the coating retained its chemical stability. These results indicate that this facile and long-lasting amphiphobic coating method holds great potential for the design of corrosion-resistant surfaces in a wide range of industrial applications.

1. GİRİŞ

Metaller ve alaşımları, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi üstün özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, ev eşyaları ve inşaat sektörü gibi pek çok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Ancak metallerin yüksek yüzey enerjilerine sahip olmaları, nem, oksijen, asidik ya da bazik ortamlarda kolayca reaksiyona girmelerine neden olur. Bu durum, özellikle korozyon olmak üzere çeşitli kimyasal ve fiziksel bozulmalara yol açarak malzeme performansının ve kullanım ömrünün ciddi şekilde azalmasına neden olur [3].

Bu sınırların aşılabilmesi ve malzemelerin daha yüksek performansla kullanılabilmesi için günümüzde malzeme biliminde moleküler düzeyde mühendislik yaklaşımları giderek önem kazanmaktadır. Farklı bilimsel disiplinlerin katkısıyla geliştirilen nanomalzemeler, malzeme kompozisyonunun hassas bir şekilde kontrol edilmesini ve yüzey özelliklerinin istenilen fonksiyonları yerine getirecek biçimde modifiye edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu amaçla geliştirilen fonksiyonel kaplamalar sayesinde malzeme yüzeyleri su ve yağ iticilik (hidrofobisite ve oleofobisite), korozyon direnci ve kirlilik önleme gibi özellikler kazandırılmakta ve bu sayede geniş bir uygulama alanlarına hizmet edebilecek yeni malzeme sistemleri ortaya çıkmaktadır [4,5].

Bu fonksiyonel kaplamalar arasında, son yıllarda dikkat çeken uygulamalardan birisi amfifobik kaplamalardır. Amfifobisite, bir yüzeyin hem hidrofobik (su itici) hem de oleofobik (yağ itici) özellik göstermesidir [6]. Bu özellik, düşük yüzey enerjileri ile birlikte özel mikro/nano yapılar sayesinde elde edilmektedir. Amfifobik yüzeyler; kendini temizleme, parmak izi tutmama, kirlenme direncinin artırılması, korozyon ve buzlanmanın önlenmesi gibi avantajlar sunmaktadır [7-11]. Özellikle amfifobik kaplamalar, metal yüzeyleri hem su hem de yağ bazlı ortamlardan kaynaklanan korozyona karşı koruyarak, bu malzemelerin hem günlük yaşamda hem de endüstriyel uygulamalarda daha uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde kullanılmalarını sağlamaktadır [12]. Literatürde pek çok çalışma, amfifobik kaplamaların genellikle su-yağ ayırımı [13-15], buzlanmanın önlenmesi [16,17] ve kendini temizleme [18] gibi uygulamalarda çok fazla kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca amfifobik malzemelerin hazırlanmasında hâlâ karmaşık hazırlama işlemleri, kaplamanın kararlılığı ile ilgili sınırlamalar da bulunmaktadır [19].

Bu nedenle çalışmada, Al yüzeylere amfifobik özellik kazandırmak amacıyla, yüksek maliyetli ve karmaşık yüzey işleme teknikleri (örneğin plazma aşındırma [20], lazer desenleme [21]) yerine, düşük maliyetli ve uygulanması kolay bir strateji olarak partikül temelli yüzey modifikasyonu tercih edilmiştir. Bu amaçla, Stöber yöntemi ile monodispers yapıda sentezlenen silika nanopartiküller, farklı konsantrasyonlarda hazırlanarak yüzeylere spreyle yöntemiyle uygulanmıştır ve bu sayede kontrollü mikro/nano ölçekli pürüzlülük oluşturulmuştur. Spreyle yöntemi, hem işlem basitliği hem de homojen kaplama açısından avantaj sunmakta; yüzey morfolojisinin hassas biçimde kontrol edilmesine imkân tanımaktadır. Ardından söz konusu pürüzlü yüzeyler, düşük yüzey enerjili florlu fonksiyonel gruplar içeren perflorosilan bileşiği ile kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi aracılığıyla modifiye edilmiştir. CVD yöntemi ise, buhar fazındaki reaktiflerin yüzeyde kovalent bağlar oluşturmasını sağlayarak homojen, çok ince ve uzun ömürlü kaplamalar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen hibrit kaplama sistemi, yüzey topografisi ile kimyasal modifikasyonu birleştirilerek, hem su hem de yağ bazlı sıvılara karşı yüksek temas açısı değerleri göstermiştir. Ayrıca kaplamaların kimyasal stabilitesi, pH 1 ve 14 gibi aşındırıcı ortamlarda gerçekleştirilen dayanım testleri ile değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, yüzey pürüzlülüğü ile kimyasal dayanım arasında denge kurarak, geliştirilmiş amfifobik kaplamaların korozyona karşı etkin koruma sağlayabileceğini ortaya koymuş ve endüstriyel uygulamalara entegre edilebileceğini göstermektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler

Etanol (%99), NH₃ (%25, w/v), TEOS (%99) ve 1H,1H,2H,2H-Perflorooktiltrietoksilan (%98) Sigma firmasından temin edilmiştir.

2.2. Silika Partiküllerinin Sentezi

Bu deneysel çalışmada, silika partiküllerinin sentezi için Stöber yöntemi kullanıldı. Bu amaçla, 100 mL etanol ve 4 mL amonyak (NH_3 , %25, w/v) karışımına 2 mL tetraetil ortosilikat (TEOS) eklendi, ardından oda sıcaklığında 18 saat boyunca 600 rpm’de karıştırıldı. Nanopartiküller santrifüj edildi ve etanol:su (1:1, v:v) üç kez yıkandıktan sonra 40°C’da kurutuldu [22].

2.3. Amfifobik Kaplamaların Hazırlanması

Bu çalışmada, tüm planlanan yüzey işleme yöntemleri için bir alt tabaka malzemesi olarak yüksek ısı iletkenliğe sahip ve çeşitli sistemlerde örneğin, uçaklar, elektronik malzemeler vb. alanlarda çok fazla kullanılan alüminyum yüzeyler (3 x 1,5 cm) seçildi.

2.3.1. Silika dispersiyonu

Öncelikle, silika partikülleri etanol içerisinde 0,1 mg/mL; 0,5 mg/mL ve 1 mg/mL konsantrasyonlarında dispers edildi. Dispersiyonlar ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca homojen hâle getirildi.

2.3.2. Kaplama işlemi

Temizlenmiş ve kurutulmuş metal yüzeyler, hazırlanan dispersiyonlar ile püskürtme yöntemiyle (yüzeyden yaklaşık 10-15 cm uzaklıkta, yaklaşık 1-2 bar aralıktaki basınçla gerçekleştirildi) kaplandı. Her numune, oda sıcaklığında 10 dakika kurutuldu ve ardından 80°C’de 30 dakika boyunca fırınlanarak silika partiküllerin yüzeye tutunması sağlandı.

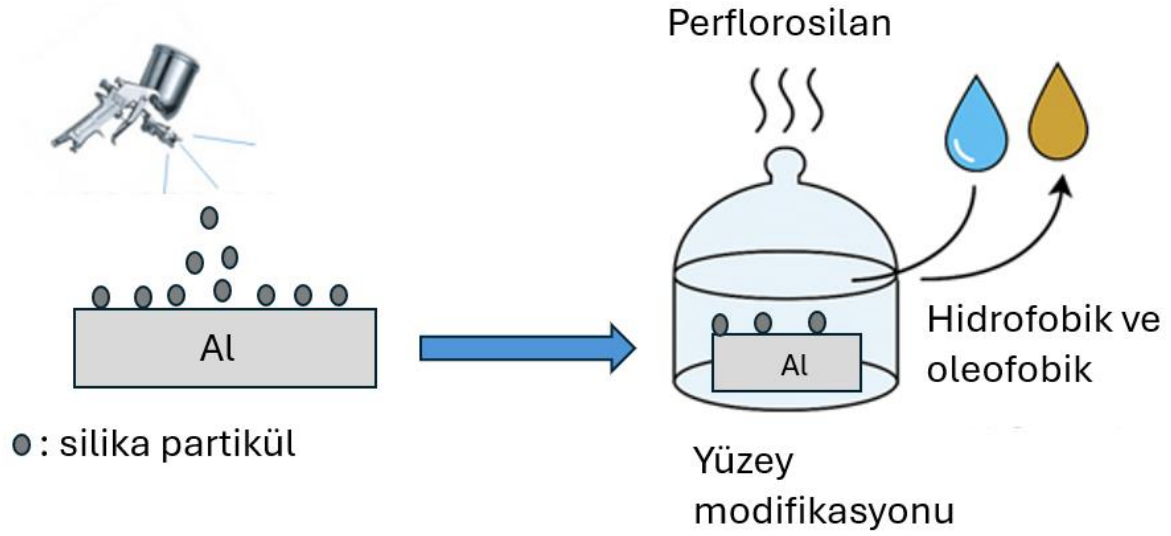
2.3.3. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile 1H,1H,2H,2H-Perflorooktiltrietoksilan (perflorosilan) modifikasyonu

CVD, silika gibi katı bir ürünü bir gaz fazı veya yüzey reaksiyonu yoluyla bir alt tabaka üzerine biriktirmek için kullanılan bir tekniktir. Öncelikle burada yüzeye biriktirilecek olan malzeme, termal ısıtma, basıncın azaltılması vb. gibi yöntemlerle hidroliz edilir ve ardından yüzeye kovalent bağ ile bağlanması için yüksek derecede ısıya maruz bırakılarak yüzeylerdeki -OH gruplarıyla kondenzasyon reaksiyon ile Si-O-Si bağları oluşturularak bağlanır [23-24]. Bu amaçla silika kaplanmış yüzeylere; perflorosilan bileşiğinin bağlanması için kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanıldı. Bu işlem için, yüzeyler ve küçük bir kaba konulan 2 mL perflorosilan bir vakum desikatörü içerisine yerleştirildi. Desikatör 120°C sıcaklığa sahip etüve konularak, 24 saat bekletildi. Ardından yüzeyler yıkandı ve kurutuldu (Şekil 1).

2.4. Karakterizasyon

Silika partikülün yapısal karakterizasyonu, bir FT-IR spektrometresi (Thermo Nicolet 6700, WI ABD) kullanılarak gerçekleştirildi. FT-IR spektrumu, 4 cm^{-1} çözünürlükte 4000-400 cm^{-1} tarama aralığında elde edildi. Partiküllerin hidrodinamik çapı suda, Dinamik Işık Saçılması (DLS, Malvern Zetasizer Nano ZS, UK) yöntemi ile belirlendi.

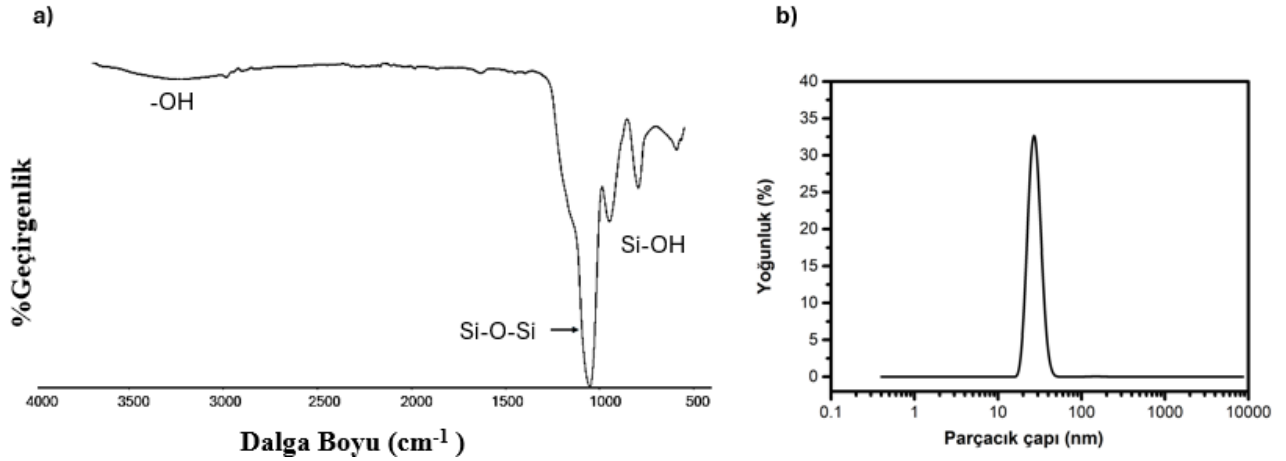
Kaplamaların morfolojisi Taramalı elektron mikroskopu (SEM, HITACHI SU1000, FlexSEM 1000II, 20kV), ıslanabilirliği, deiyonize suyun (2 μL), hekzadekan (2 μL) ve diiyodometan (2 μL) temas açısı ölçümleriyle bir damla şekil analiz yazılımı (DSA100, Krüss, Almanya) kullanılarak belirlendi. Hekzadekan temas açısı ölçümleri yüzeylerdeki florokarbon gruplarının varlığını doğrudan doğruladığından polar olmayan sıvı olarak kullanıldı.



Şekil 1. Amfifobik yüzeylerin hazırlanması

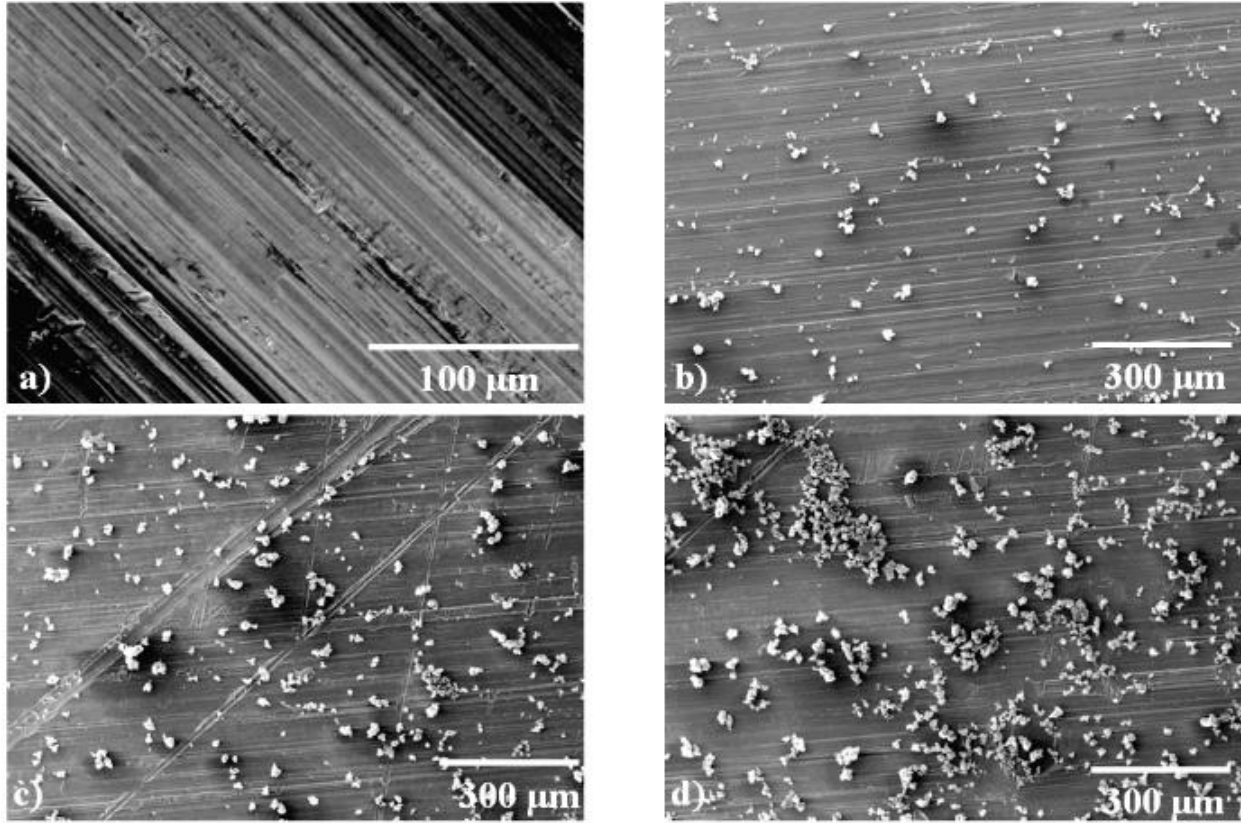
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Stöber yöntemi ile hazırlanan silika partikülleri FT-IR ve DLS kullanılarak boyut analizi ile karakterize edildi. Şekil 2-a’da gösterilen çıplak SiO₂ nanopartiküllerin FT-IR spektrumunda, Si-O-Si gerilme bandına ait 1051 cm⁻¹ pikin varlığı ve Si-OH asimetrik bükülme ve gerilme bandına ait 947 cm⁻¹ pikin varlığına atfedilir [25]. Buna karşılık Şekil 2-b’deki DLS ölçümlerine bakıldığında, SiO₂ partiküllerinin boyutu 27,6 ± 4 nm (PDI:0,53) ortalama hidrodinamik çapa sahip tek modlu bir dağılım sergilediği gözlemlendi.



Şekil 2. SiO₂ partikülün a) FT-IR spektrumu ve b) DLS boyut analizi

Farklı konsantrasyonlardaki silika süspansiyonlarıyla kaplanmış ve kaplanmamış Al yüzeylerin morfolojik yapısı SEM ile karakterize edildi (Şekil 3). Şekil 3-a, herhangi bir işlem uygulanmamış, silika partikülleri içermeyen boş Al yüzeyin morfolojisini temsil etmektedir. Bu yüzeyde silika partiküllerinin bulunmaması nedeniyle, belirgin bir yüzey pürüzlülüğü gözlemlenmedi. Buna karşılık, Şekil 3-b-c-d görüntülerinde, artan silika süspansiyonunun yüzey morfolojisi üzerindeki etkisi gözlemlendi. Düşük konsantrasyonda (Şekil 3-b) silika partikülleri yüzeyde seyrek ve dağınık hâlde bulunurken, konsantrasyonun artmasıyla birlikte (Şekil 3-c ve d) partikül yoğunluğu anlamlı şekilde arttı ve yüzeyin büyük bir bölümün nanopartiküllerle kaplandığı görüldü. Özellikle yüksek konsantrasyonda (Şekil 3-d), partiküllerin bir araya gelerek kümelenmeler oluşturduğu gözlemlendi.



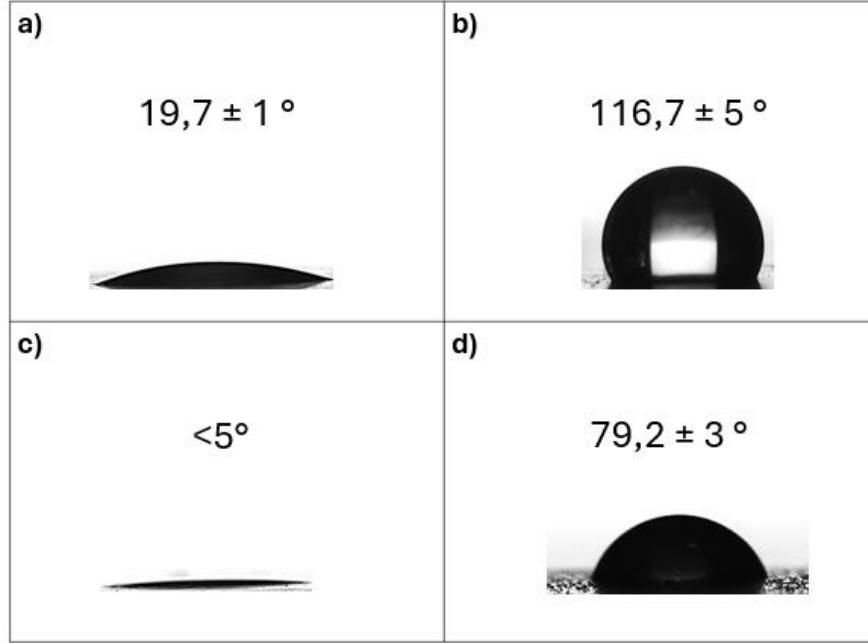
Şekil 3. a-Kaplamasız; b-c-d- 0,1; 0,5 ve 1 mg/mL silika nanopartikül süspansiyonları ile kaplanmış Al yüzeylerin SEM görüntüleri

Farklı konsantrasyonlara sahip (0,1 mg/mL; 0,5 mg/mL ve 1 mg/mL) silika partiküllerle ve perflorosilan ile modifiye edilmiş Alüminyum (Al) yüzeylerin su ve yağ iticiliği, su ve hekzadekan statik temas açısı ölçümleri yoluyla değerlendirildi. Bu amaçla kaplı yüzeylere 2,0 µL sıvı damlatıldı ve ardından temas açıları ölçüldü.

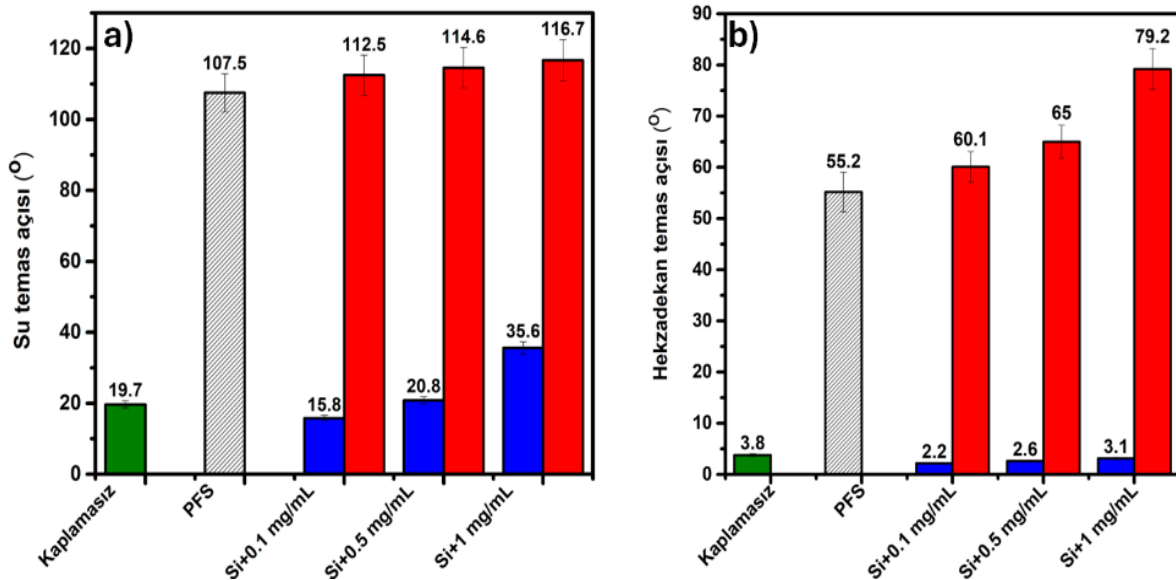
Kaplamasız Al yüzeylerin hem su (temas açısı: 19,7°) (Şekil 4-a) hem de hekzadekan (temas açısı: <5°) (Şekil 4-c) ile ıslatılabilirken; yalnızca silika partikülleri ile kaplanan yüzeylerde su temas açısı kaplama konsantrasyonuna bağlı olarak 15,8°'den 35,6°'ye yükseldiği, ancak hekzadekan temas açıları önemli bir değişim meydana gelmediği gözlemlenmedi (Şekil 5-a). Bu sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün su itici özellikler üzerinde belirleyici bir yol oynadığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Liang ve arkadaşları (2021) tarafından yaklaşık 30 nm boyutundaki silika nanopartiküllerle kaplanan yüzeylerde su ve hekzadekan temas açıları sırasıyla 28° ve <5° olduğu bildirilmiştir [26], bu da silika kaplamaların hidrofilik doğasına bağlı olarak yalnızca sınırlı düzeyde su iticilik sağladığını ve oleofobik özellik kazandırmada yetersiz kaldığını desteklemektedir.

Ardından üç farklı silika konsantrasyonu ile kaplanmış ve kaplamasız Al yüzeylere perflorosilan yapılarının dâhil edilmesiyle su ve hekzadekan temas açıları yeniden ölçüldü. Pürüzlü yüzeylere perflorosilan yapılarının dâhil edilmesiyle her iki sıvıya karşı da temas açıları belirgin artışlar elde edildi (Şekil 4-b-d). Özellikle yüzeyde biriken nano-silika partikül konsantrasyonu arttıkça ve dolayısıyla yüzeyde biriken perflorosilan miktarı arttıkça su temas açısı değerlerinin 112,5°'den 116,7°'ye hafif bir artış olduğu, benzer şekilde hekzadekan temas açısının 60,1°'den 79,2°'ye kadar ciddi bir artış olduğu görüldü (Şekil 5-a,b). Aynı zamanda kontrol amacıyla sadece perflorosilan (PFS) ile kaplanmış yüzeylerde de ölçümler gerçekleştirildi; su ve hekzadekan temas açıları sırasıyla 107,5° ve 55,2° olarak bulundu (Şekil 5-a,b). Keskin ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada da PFS kaplı yüzeylerde su temas açısı değerini 111° bulmuşlardır [27]. Bu sonuç PFS bazlı çalışma ile uyumludur. Tüm bu sonuçlar, yüzey morfolojisi ile kimyasal modifikasyonun, farklı sıvılarla etkileşimde farklı derecelerde etkili olduğunu göstermektedir.

Politetrafloroetilenin (PTFE), yaygın olarak bilinen adıyla Teflon, su ve yağ itici özellikleriyle tanınan düşük yüzey enerjili bir polimerdir. Literatürde, PTFE yüzeylerinde ölçülen statik temas açıları su ve hekzadekan için yaklaşık sırasıyla 118° ve 51° olduğu bilinmektedir [28]. Bu çalışmada geliştirilen perflorosilan ile kaplanmış pürüzlü yüzeylerde suya karşı temas açısı PTFE ile benzer seviyelerde gerçekleşmiş; hekzadekan ile temas açısı ise PTFE'ye kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, geliştirilen yüzeylerin yalnızca suya değil, aynı zamanda düşük yüzey gerilimli organik sıvılara karşı da daha üstün iticilik özelliği gösterdiğini söyleyebiliriz.



Şekil 4. Kaplamasız (boş Al yüzey), 1 mg/mL nano-silika süspansiyonu kaplı ve perflorosilan ile modifiye edilen Al yüzeylerin a ve b su; c ve d hekzadekan temas açısı görüntüleri



Şekil 5. Farklı yüzey modifikasyonlarının (silika partikül kaplama (mavi) ve perflorosilan (PFS) modifikasyonu (kırmızı)) Al yüzeyler üzerindeki (a) su ve (b) hekzadekan temas açısı ölçümleri

Hazırlanan perflorosilan kaplı pürüzlü yüzeylerin yüzey enerjisini değerlendirmek için, yüzeyler çeşitli çözücülerle ıslatıldı. Sıvılara ait serbest enerji bileşenleri (Çizelge 1) aşağıda verilen Owens-Wendt eşitliğinde (1) kullanılarak yüzey enerjisi hesaplandı. Silika süspansiyonunun konsantrasyonu arttıkça yüzey enerjisi sırasıyla 15,69; 13,60 ve 9,42 mJ/m² olarak bulundu. Yüzey enerjisinin azalması yüzeydeki pürüzlük artışıyla perflorosilan modifikasyonunun etkili şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

$$\gamma_S (1+\cos\theta) = 2 (\gamma_K^d \cdot \gamma_S^d)^{1/2} + 2 (\gamma_K^p \cdot \gamma_S^p)^{1/2} \quad (1)$$

Burada, γ_S gaz-sıvı arayüzünde serbest yüzey enerjisi; γ_K^d ve γ_S^d , katı-gaz ve sıvı-gaz arayüzündeki dispersif (dağılma) bileşeni; γ_K^p ve γ_S^p katı-gaz, sıvı-gaz arayüzündeki polar bileşenlerdir [29].

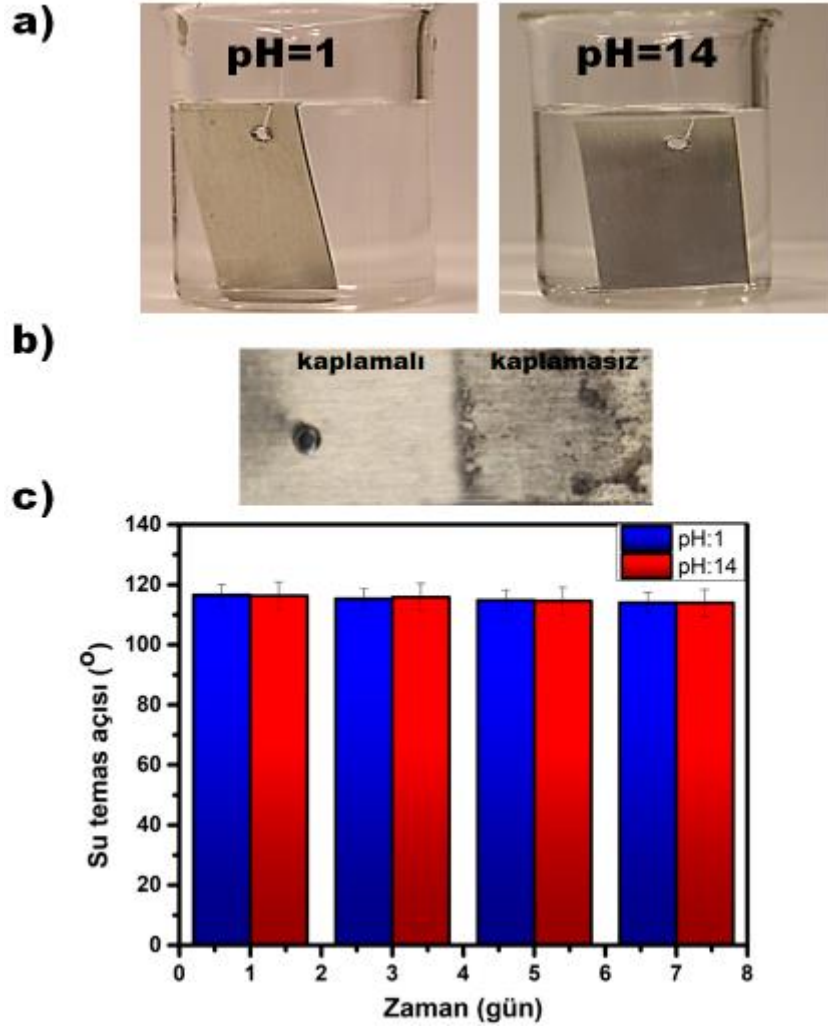
Çizelge 1. Su ve diiyodometan sıvılarının yüzey gerilimi (mN/m) ve bileşenleri [30]

Sıvı	Dispersif bileşen (γ^d)	Polar bileşen (γ^p)	Toplam değer (γ)
Su	21,8	51	72,8
Diiyodometan	50,8	0	50,8

Yüzeyin yarısı kaplamasız diğer yarısı ise 1 mg/mL konsantrasyonlu silika süspansiyonuna sahip perflorosilan ile modifiye edildikten sonra sırasıyla pH 1 ve 14'te aşındırıcı çözeltilere 1, 3, 5 ve 7 gün daldırıldıktan sonra yüzeylerin görüntüleri alındı (Şekil 6-a,b). Ardından kaplamalı olan yüzeyden su temas açıları ölçüldü. Su temas açıları için ortalama değerinin, sırasıyla 7 gün boyunca pH 1 ve pH 14'te aşındırıcı çözeltilere daldırıldıktan sonra sırasıyla 114° ve 113,9° kaldığı gözlemlendi (Şekil 6-c), bu da aşındırıcı çözeltinin pH'nın tasarlanmış kaplamanın temas açısı üzerinde çok az etkisi olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ise, düşük yüzey enerjili perflorlu malzeme ile modifiye edildikten sonra, üretilen kaplamanın kimyasal reaksiyonları engellemek için bir bariyer tabakası olarak hizmet edebilmesidir.

Literatürle karşılaştırıldığında, Ren ve arkadaşları (2023) SiO₂/alüminyum tripolifosfat ile modifiye edilmiş PTFE ile hazırlanan yüzeyleri pH 1 ve 14 çözeltilerde 96 saat (4 gün) süreyle test etmişler ve bu sürenin sonunda her iki ortamda da kaplamalarda gözle görülür hasarın oluşmadığı, ancak bazik ortamda ilerleyen süreçte deformasyon olduğunu bildirmişlerdir [31]. Benzer şekilde, Daneshnia ve arkadaşları (2023) elektrokaplama yöntemiyle bakır yüzeyler üzerine kobalt bazlı kaplamalar uygulamış ve farklı pH koşulları altında 16 gün boyunca stabilite testleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada pH 1 ortamında kaplamalar dayanıklılığını korurken, pH 14 ortamında ciddi yüzey bozulmaları olduğu rapor edilmiştir [32].

Literatürdeki bu çalışmalar incelendiğinde, ya kısa süreli dayanım sınırlarının aşılamadığı ya da daha uzun dayanım sağlanabilmesi için çok adımlı ve karmaşık üretim tekniklerinin kullanıldığı görülmektedir. Buna karşılık, bu çalışmada sunulan yöntem; kolay uygulanabilirliği, düşük maliyeti ve minimal proses gereksinimleri ile dikkat çekmektedir.



Şekil 6. 1 mg/mL silika süspansiyonuna sahip perflorosilan kaplamanın 7 gün boyunca, a) pH 1 ve b) 14'te aşındırıcı çözelti içerisindeki, b) asidik çözeltideki kaplamalı/kaplamasız yüzeylerin görselleri ve c) zamana karşı su temas açısı ölçümlerindeki değişimler

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Al yüzeylere uygulanan farklı konsantrasyonlardaki silika nanopartikülleri ile oluşturulan pürüzlü yapılar ve bu yüzeylere kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemiyle uygulanan perflorosilan modifikasyonunun su ve yağ iticilik üzerindeki etkisi kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yüzey pürüzlülüğünün temas açısı davranışlarında kritik rol oynadığını ortaya koymuştur.

Yalnızca silika partikülleri ile kaplanan yüzeylerde, artan konsantrasyona bağlı olarak yüzeyin daha pürüzlü hâle geldiği SEM analizleriyle doğrulanmış; bu artan pürüzlülük, su ile temas açısının 19,7°'den 35,6°'ye yükselmesine neden olmuştur. Ancak, silika yüzeylerin doğası gereği hidrofilik olması nedeniyle bu pürüzlülük, yağ gibi düşük yüzey gerilimli sıvılarda benzer bir iticilik oluşturmamıştır. Bu sonuç, pürüzlülüğün yağ itici özellik kazandırmak için tek başına yeterli olmadığını, yüzey enerjisinin düşürülmesinin de gerekli olduğunu göstermektedir.

Perflorosilan (PFS) ile kimyasal modifikasyonu yapıldığında, pürüzlü yüzeylerin hem suya hem de hekzadekana karşı temas açıları önemli ölçüde artmış; 1 mg/mL silika + PFS modifikasyonu uygulanan yüzeylerde bu değerler sırasıyla 116,7° (su) ve 79,2° (hekzadekan) olarak ölçülmüştür. Ayrıca, silika partikül konsantrasyonunun artması, yüzeyde daha fazla perflorosilan bağlanmasına olanak sağlayarak yüzey enerjisinin 9,42 mJ/m²'ye kadar düşmesine katkı sağlamıştır.

Ayrıca kaplamaların kimyasal dayanımı, pH 1 ve 14 gibi aşındırıcı ortamlarda test edilmiş ve elde edilen yüzeylerin temas açıları zamanla büyük oranda korunmuştur. Bu durum, perflorlanmış yüzeylerin kimyasal direnç açısından stabil olduğunu ve çevresel koşullara karşı koruyucu bir bariyer görevi gördüğünü göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile düşük yüzey enerjili, dayanıklı ve amfifobik karaktere sahip yüzeylerin basit, hızlı ve ekonomik bir yöntemle üretilebileceği ortaya konmuştur. Geliştirilen bu yöntem, korozyona karşı dayanıklı fonksiyonel kaplamaların üretiminde başta otomotiv, havacılık ve elektronik sektörleri olmak üzere birçok endüstriyel alanda geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, çalışmada yalnızca kimyasal dayanım değerlendirilmiş olup, kaplamaların farklı çevresel koşullardaki uzun vadeli performansları, yapışma dayanımı ve çevre dostu modifikasyon ajanlarıyla entegrasyonu gelecekteki araştırmalar için önemli potansiyel alanlar sunmaktadır. Bu doğrultuda, flor içermeyen ve çok işlevli kaplama (antibakteriyel, kendini temizleyen yüzeyler vb.) sistemleriyle yapılacak ileri çalışmalar, amfifobik yüzey teknolojilerinin sürdürülebilirliğini ve fonksiyonel çeşitliliğini artırabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI/ÇAKIŞMASI BİLDİRİMİ

Yazarlar arasında çıkar çatışması/çakışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI

Kübra Özkan Hüküm: Kavramlaştırma, Metodoloji, Yazılım, Deney sonuçlarının doğruluğunun kontrolü, İçerik analizi, Araştırma, Materyal temini, Yazımı-orijinal taslak, İnceleme-düzenleme.

KAYNAKLAR

- [1] Marati, M.S., Mozammel, M. (2020). Theoretical, fundamental and experimental study of Liquid-repellency and corrosion resistance of fabricated superamphiphobic surface on Al alloy 2024. *Chemical Engineering Journal*, 387, 124046.
- [2] Kesmez, O. (2020), Hydrophobic, organic-inorganic hybrid sol-gel coatings containing boehmite nanoparticles for metal corrosion protection. *Chemical Papers*, 74, 673-688.
- [3] Qi, Y., Wei, R., Zhang, Q., Fu, A., Lv, N., Yuan, J. (2024). Corrosion-resistant organic superamphiphobic coatings. *Coatings*, 14(6), 678.
- [4] Çakır, A.M., Yetim, T., Yetim, A.F., Celik A. (2024). Superamphiphobic TiO₂ film by sol-gel dip coating method on commercial pure titanium. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 1472-1484.
- [5] Liu, J., Fang, X., Zhu, C., Xing, X., Cui, G., Li, Z. (2020). Fabrication of superhydrophobic coatings for corrosion protection by electrodeposition: A comprehensive review. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 607, 125498.
- [6] Singh, V., Men, X., Tiwari, M.K. (2021). Transparent and robust amphiphobic surface exploiting nanohierarchical surface-grown metal-organic frameworks. *Nano Letters*, 21(8), 3480-3486.
- [7] Xia, Y., Gu, W., Shao, L., Jiao, X., Ji, Y., Deng, W., Yu, X., Zhang, Y., Zang, Y. (2023). Flexibility and abrasion tolerance of superamphiphobic coatings with rigid core-shell particles. *Chemical Engineering Journal*, 476, 146746.
- [8] Zhou, X., Liu, J., Liu, W., Steffen, W., Butt, H.J. (2022). Fabrication of stretchable superamphiphobic surfaces with deformation-induced rearrangeable structures. *Advanced Materials*, 34(10), 2107901.
- [9] Li, H., Jin, Q., Li, H., Tong, H., Wang, K., Chen, S., Ouyang, G., Wang, Z., Li, Y. (2023). Transparent superamphiphobic material formed by hierarchical nano re-entrant structure. *Advanced Functional Materials*, 34(3), 2309684.
- [10] Jia, X., Xu, Y., Gao, R. (2025). Preparation and anti-corrosion properties of superamphiphobic aluminum alloy surface by iron salt etching. *Materials Letters*, 387, 138257.

- [11] Zhang, H., Yang, D., Chen, L., Zheng, Y., Zheng, H., Cui, Y., Wu, R. (2025). Fluorinated silicone-modified epoxy acrylate amphiphobic coatings Exhibiting highly efficient resistance to simulants of chemical warfare agents. *European Polymer Journal*, 228, 113793.
- [12] Tian, Z., Ma, R., Chen, Y., Li, S., Zhao, H., Zhang, Y., Li, Q., Zhang, X., An, B. (2025). A hierarchically amphiphobic structure enables coating an extraordinary anti-corrosion performance. *Progress in Organic Coatings*, 204, 109186.
- [13] Yong, J., Chen, F., Yang, Q., Huo, J., Hou, X. (2017). Superoleophobic surfaces. *Chemical Society Reviews*, 46, 4168-4217.
- [14] Li, F., Wang, S., Zhao, X., Shao, L., Pan, Y. (2022). Durable superoleophobic janus fabric with oil repellence and anisotropic water-transport integration toward energetic-efficient oil-water separation. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 32(14), 37170-37181.
- [15] Yang, Y., Guo, Z., Liu, W. (2022). Special superwetting materials from bioinspired to intelligent surface for on-demand oil/water separation: A comprehensive review. *Small*, 18(48), 2204624.
- [16] Wang, L., Tian, Z., Luo, X., Chen, C., Jiang, G., Hu, X., Peng, R., Zhang, H., Zhong, M. (2022). Superomniphobic surfaces for easy-removals of environmental-related liquids after icing and melting. *Nano Research*, 16, 3267-3277.
- [17] Liu, C., Liu, Q., Jin, R., Lin, Z., Qiu, H., Xu, Y. (2020). Mechanism analysis and durability evaluation of anti-icing property of superhydrophobic surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 119768.
- [18] Manouids, N.P., Zuburtikudis, I., Khalifeh, H.A., Karapanagiotis, I. (2024). Robust and transparent smooth amphiphobic coating with physical self-cleaning and photocatalytic activities. *Surfaces and Interfaces*, 52, 104928.
- [19] Shen, K.K., Jin, G.F., Lv, M.X., Huang, Y.Z., Jia, Y., Gao, M.N. (2024). Preparation of a stable super-amphiphobic coating via a simple sol-gel method. *Colloid Journal*, 86(5), 803-813.
- [20] Zhang, W., Li, S., Wei, D., Zheng, Z., Han, Z., Liu, Y. (2024). Fluorine-free, robust and self-healing superhydrophobic surfaces with anticorrosion and antibacterial performances. *Journal of Materials Science & Technology*, 186, 231-243.
- [21] Li, X., Su, H., Li, H., Tan, X., Lin, X., Wu, Y., Xiong, X., Li, Z., Jiang, L., Xiao, T., Chen, W., Tan, X. (2024). Photothermal superhydrophobic surface with good corrosion resistance, anti-/deicing property and mechanical robustness fabricated via multiple-pulse laser ablation. *Applied Surface Science*, 646, 158944.
- [22] Silva, A.S., Santoz, J.H.Z. (2024). Silica particle size and polydispersity control from fundamental practical aspects of the Stöber method. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 702 (2), 135190.
- [23] Rezaei, S., Manoucheri, I., Moradian, R., Pourabbas, B. (2014). One-step chemical vapor deposition and modification of silica nanoparticles at the lowest possible temperature and superhydrophobic surface fabrication. *Chemical Engineering Journal*, 252, 11-16.
- [24] Sarkari, N.M., Doğan, Ö., Bat, E., Mohseni, M., Ebrahimi, M. (2019). Assessing effects of (3-aminopropyl)trimethoxysilane self-assembled layers on surface characteristics of organosilane-grafted moisture-crosslinked polyethylene substrate: A comparative study between chemical vapor deposition and plasma-facilitated in situ grafting methods. *Applied Surface Science*, 497, 143751.
- [25] Feifel, S.C., Lisdat, F. (2011). Silica nanoparticles for the layer-by-layer assembly of fully electro-active cytochrome c multilayers. *Journal of Nanobiotechnology*, 9, 59.
- [26] Liang, L., Wang, Y., Liu, B., Gong, J., Shi, W., Liang, S. (2022). Fluoropolymer-coated SiO₂ nanoparticle-based nanofluids for oil recovery. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 637, 128242.
- [27] Keskin, E., Tarkuç, S., Yeşilçubuk, S.A., Kızılcan, N., Köken, N. (2025). Impact of fluoroalkoxysilane incorporation on the mechanical properties of sol-gel coatings on stainless steel and glass surfaces. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 114, 1062-1081.
- [28] Caliskan, T.D., Ozkan, K.H., Caykara, T., Luzinov, I. (2022). Toward the replacement of long-chain perfluoroalkyl compounds: Perfluoropolyether-based low surface energy grafted nanocoatings. *ACS Applied Polymer Materials*, 4, 2980-986.
- [29] Wang, C., An, D., Yang, T., Gu, L., Xie, M., Lin, X., Han, C., Song, Y., Deng, Q., Wen, F. (2024). Self-cleaning and amphiphobic properties of octadecyltrichlorosilane self-assembled modified polytetrafluoroethylene films. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 684, 133132.
- [30] Sivolapov, P., Myronyuk, O., Baklan, D., Berehovyj, T. (2021). Formation of effective concentration of film forming superhydrophobic coatings based on silicon dioxide. *Technology Audit and Production Reserves*, 3/3(59), 6-9.
- [31] Ren, G., Qiao, Z., Hui, Z., Tuo, Y., Zheng, W., Chen, X., Li, S. (2023). The waterborne superamphiphobic coatings with antifouling, high temperature resistance, and corrosion resistance. *ACS Omega*, 8, 1513578-13592.
- [32] Daneshnia, A., Raeissi, K., Salehikahrizangi, P. (2023). Corrosion protection of superhydrophobic/amphiphobic cobalt coating with anti-icing and self-cleaning properties fabricated by a one-step electrodeposition method. *Journal of Alloys and Compounds*, 948, 169767.