



A Review on the Development of Superhydrophobic Papers: Principles, Structures, and Their Role in Replacing Plastic Products

Moghadase Akbari*, Elyas Afra, Seyed Majid Zabihzadeh , Mohammadreza Dehghani Firouzabadi 

* Ph.D. in Pulp and Paper Industry, Gorgan and Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

(Received: 18/02/2025, Revised: 26/05/2025, Accepted: 18/06/2025, Published: 20/06/2025)

DOR: 20.1001.1.22286675.1404.16.61.6.0

ABSTRACT

Cellulose is one of the most abundant and cost-effective raw biomaterials in the world, playing a significant role in the development of sustainable materials. Its modifiability and diverse applications, particularly in producing multifunctional paper materials, have attracted considerable attention in line with plastic ban policies. However, the hydrophilic nature of cellulose significantly limits its applications and poses a significant challenge in developing sustainable alternatives to plastic. In this context, producing superhydrophobic paper, characterized by a contact angle above 150° and a sliding angle of less than 10°, has emerged as an innovative solution. Inspired by the lotus effect, these papers offer unique water resistance properties. Superhydrophobic papers have particularly extensive applications in the packaging industry, as they can protect products from moisture and liquids while remaining environmentally friendly. These characteristics make superhydrophobic papers an ideal choice for packaging food, pharmaceuticals, and moisture-sensitive products. Research on the design and fabrication of superhydrophobic cellulose-based surfaces has grown significantly in recent years. Therefore, this review article first discusses the concept of superhydrophobic surfaces and the lotus effect. It then elaborates on the scientific principles of surface wettability, the governing models of this phenomenon, and the factors influencing the formation of superhydrophobic surfaces based on cellulose materials. Finally, the diverse applications of superhydrophobic papers, including sustainable packaging and the development of environmentally friendly products, are analyzed and evaluated.

Keywords: Superhydrophobic Paper, Plastic Replacement Products, Packaging

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: akbari_moghadase@yahoo.com

مروری بر توسعه کاغذهای سوپر آب‌گریز: اصول، ساختار و نقش آن‌ها در جایگزینی محصولات پلاستیکی

مقدسه اکبری^{۱*}، الیاس افرا^۲، سید مجید ذبیح‌زاده^۳، محمد رضا دهقانی فیروزآبادی^۴

۱- دانش‌آموخته دکتری رشته صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و ساری، ایران، ۲-۴- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران، ۳- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1404.16.61.6.0

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

چکیده

سلولز، یکی از فراوان‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین ماده اولیه زیستی در جهان است که نقش مهمی در توسعه مواد پایدار ایفا می‌کند. قابلیت اصلاح‌پذیری و تنوع کاربردهای آن، به‌ویژه در تولید مواد کاغذی چندمنظوره، توجه گسترده‌ای را در راستای سیاست‌های "ممنوعیت پلاستیک" به خود جلب کرده است. با این حال، ماهیت آب‌دوست سلولز به طور قابل‌توجهی کاربردهای آن را محدود کرده و چالش بزرگی در توسعه جایگزین‌های پایدار پلاستیک ایجاد کرده است. در این زمینه، تولید کاغذ سوپر آب‌گریز که با زاویه تماس بالای ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه مشخص می‌شود، به عنوان راه‌حلی نوآورانه مطرح شده است. این کاغذها که از اثر لوتوس الهام گرفته‌اند، ویژگی‌های منحصر به فردی در برابر آب ارائه می‌دهند. کاغذهای سوپر آب‌گریز به‌ویژه در صنعت بسته‌بندی کاربردهای گسترده‌ای دارند، زیرا می‌توانند از محصولات در برابر رطوبت و مایعات محافظت کنند و در عین حال سازگار با محیط‌زیست باشند. این ویژگی‌ها، کاغذهای سوپر آب‌گریز را به گزینه‌ای ایده‌آل برای بسته‌بندی مواد غذایی، دارویی و محصولات حساس به رطوبت تبدیل کرده است. تحقیقات در زمینه طراحی و ساخت سطوح سوپر آب‌گریز مبتنی بر سلولز در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. بنابراین، این مقاله مروری، ابتدا مفهوم سطوح سوپر آب‌گریز و اثر لوتوس را بررسی می‌کند. سپس مبانی علمی ترشوندگی سطوح، مدل‌های حاکم بر این پدیده و عوامل مؤثر بر تشکیل سطوح سوپر آب‌گریز مبتنی بر مواد سلولزی تشریح می‌شود. در نهایت، کاربردهای متنوع کاغذهای سوپر آب‌گریز، از جمله در بسته‌بندی پایدار و توسعه محصولات دوست‌دار محیط‌زیست، تحلیل و ارزیابی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: کاغذ سوپر آب‌گریز، محصولات جایگزین پلاستیک، بسته‌بندی

۱- مقدمه

در میان مواد جایگزین، ماکرومولکول‌های طبیعی سلولز که فراوان‌ترین پلیمر زیستی تجدیدپذیر در زمین با ویژگی‌های زیست‌تخریب‌پذیری و قابلیت بازیافت هستند [۴]، به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال، در مقایسه با مواد پلاستیکی مختلف، مواد مبتنی بر کاغذ به دلیل وجود تعداد زیادی گروه هیدروکسیل روی سطح ماکرومولکول سلولز که به‌راحتی می‌تواند مولکول‌های آب را از محیط اطراف جذب کند، دارای ویژگی آب‌دوستی هستند. خاصیت مکانیکی مواد کاغذی به‌طور قابل‌توجهی به دلیل خیس شدن کاغذ توسط مولکول‌های آب در شرایط رطوبتی کاهش می‌یابد [۵].

طی قرن گذشته، صنعت پلاستیک با سرعت چشمگیری توسعه یافته است [۱]. معرفی پلیمرهای مصنوعی نظیر پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، و پلی‌وینیل کلراید تحولاتی اساسی در بسته‌بندی و مواد اولیه مورد استفاده در ذخیره‌سازی و تولید کیسه‌های خرید ایجاد کرده است [۲]. با این حال، بیشتر این پلیمرهای نفتی زیست‌تخریب‌پذیر و قابل‌بازیابی نیستند. این ویژگی‌ها چالش‌های جدی در مدیریت پسماند ایجاد کرده و نگرانی‌های زیست‌محیطی قابل‌توجهی را به همراه داشته‌اند [۳].

به طور متداول، بهبود مقاومت به آب محصولات کاغذی در صنعت کاغذسازی از طریق فرایندهای آهاردهی سطحی و درونی به دست می‌آید. به‌عنوان مثال در فرایند آهاردهی درونی در شرایط

* رایانامه نویسنده مسئول: akbari_moghadase@yahoo.com

۳- تشکیل سطح سوپر آب‌گریز بر روی ماده زمینه سلولزی

سلولز یک هوموپلیمر خطی متشکل از واحدهای β -D-گلوکوپیرانوز است که با پیوندهای گلیکوزیدی (۴→۱) به یکدیگر متصل شده‌اند. این ماده به دلیل داشتن تعداد زیادی گروه‌های هیدروکسیل که به آسانی با مولکول‌های آب، پیوندهای هیدروژنی تشکیل می‌دهد، آب‌دوست است و قادر به جذب و نگهداری آب می‌باشد. این ویژگی سبب می‌شود که زاویه تماس آب بر روی فیلم‌های سلولزی صاف در محدوده ۱۷ درجه تا ۴۷ درجه، متغیر باشد [۲۳].

در دهه‌های اخیر، ایجاد سطح سوپر آب‌گریز بر روی ماده زمینه سلولزی مانند کاغذ، مقوا و پارچه‌های پنبه‌ای مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. این مواد چندمنظوره، بادوام و مقرون به صرفه هستند و از الیاف سلولزی زیست‌تخریب‌پذیر و تجدیدپذیر ساخته شده‌اند که قابلیت بازیافت دارند، انعطاف‌پذیر هستند و مقاومت مکانیکی خوبی دارند. ایجاد سطح سوپر آب‌گریز بر روی کاغذ و پنبه می‌تواند پتانسیل بهره‌برداری از این مواد را گسترش دهد و فرصت‌های جدیدی (به عنوان مثال، در زمینه‌های چاپ، ظروف نوشیدنی، برچسب‌های کاغذی خودتمیزشونده، دستگاه‌های میکروسایالی، جداسازی آب - نفت، کاغذ زیست فعال و...) را فراهم کند [۱۱].

۴- مبانی حاکم بر ترشوندگی سطح

آب، مایعی با کشش سطحی نسبتاً زیاد است و سطوح مختلف، بر اساس واکنش آن‌ها با قطرات آب، به دو دسته آب‌دوست یا آب‌گریز تقسیم می‌شوند. قطره آب، تمایل به پخش شدن بر روی سطوح با انرژی سطحی بالا دارد و بر سطوح با انرژی سطحی کم، حالت کروی به خود می‌گیرد [۱۱]. هنگامی که قطره مایع خالص غیرفرار بر روی سطح جامد تمیز، صاف و حل‌نشده قرار می‌گیرد، تعادل نیرو بین سطح جامد و مایع برقرار می‌شود. اگر نیروی چسبندگی بین مایع و جامد بیش‌تر از نیروی پیوستگی بین مولکول‌های مایع باشد، قطره‌ها خودبه‌خود بر روی سطح جامد گسترش می‌یابند که این موضوع به رفتار ترشوندگی معروف است. زمانی که تعادل بین نیروها ایجاد شود، زاویه تماس بین قطره‌های مایع و سطح جامد شکل می‌گیرد. میزان ترشوندگی (درجه ترشدن) بر اساس تعادل میان نیروهای چسبندگی و پیوستگی تعیین می‌شود [۲۴-۲۵].

۴-۱- زاویه تماس آب

زمانی که قطره مایع روی سطح جامد قرار می‌گیرد، عدم پخش آن، باعث ایجاد شکل ثابت و زاویه تماس می‌شود. زاویه تماس، قابلیت

قلیایی معمولاً مواد شیمیایی مانند آلکیل سوکسینیک‌انیدرید (ASA^1) و آلکیل کتن‌دایمر AKD^2 به سوسپانسیون الیاف اضافه می‌شود [۶-۷]. این تیمارها به طور قابل توجهی می‌تواند زاویه تماس آب کاغذ (< ۱۰۰) را افزایش دهد؛ اما منجر به تولید محصولات کاغذی ضد آب نخواهد شد. رویکرد دیگری که برای بهبود مقاومت به آب کاغذهای بسته‌بندی وجود دارد، لمینت آن‌ها با مواد ممانعتی مانند پلاستیک یا آلومینیوم است. جداسازی کاغذ از فیلم پلاستیکی یا فلزی، قابلیت بازیافت آن را دچار مشکل می‌کند [۸]؛ بنابراین، توسعه مواد کاغذی با خاصیت سوپر آب‌گریزی به عنوان جایگزین مناسب برای محصولات پلاستیکی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۹].

یک سطح سوپر آب‌گریز به صورت سطح با زاویه تماس آب (WCA^3) بزرگ‌تر از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش (SA^4) کم‌تر از ۱۰ درجه تعریف می‌شود [۱۰-۱۳]. به طور کلی، هم شیمی سطح (انرژی سطحی کم) و هم خصوصیات هندسی (ناهمواری سطح) بر خاصیت آب‌گریزی تأثیر می‌گذارند. اثر متقابل بین این دو ویژگی موضوع تحقیقات طی دهه‌های گذشته بوده است [۱۰]. محصولات کاغذی سوپر آب‌گریز، دارای کاربردهای بالقوه متعددی مانند ظروف نوشیدنی [۱۴]، برچسب‌های کاغذی خودتمیزشونده، کاغذ زیست فعال [۱۵]، جداسازی آب - نفت [۱۶] و دستگاه‌های میکروسایالی [۱۱] و... می‌باشد. در سال‌های اخیر، تحقیقات در زمینه مواد کاغذی با خاصیت سوپر آب‌گریز روبه‌افزایش بوده است. به همین منظور، در این مطالعه، ابتدا توضیح مختصری درباره سطح سوپر آب‌گریز و اثر لوتوس ارائه شده است.

۲- سطح سوپر آب‌گریز و اثر لوتوس

ایده اولیه در زمینه ایجاد سطوح آب‌گریز، از برگ‌های نیلوفر آبی الهام گرفته شده است [۱۷]. علاوه بر برگ‌های نیلوفر آبی [۱۸]، بسیاری از گیاهان و حیوانات مانند گلبرگ‌های گل رز [۱۹]، آب‌پیمایان^۵ [۲۰]، بال‌های پروانه و ... دارای ویژگی‌های آب‌گریزی، تمیزشوندگی و ضد رسوب هستند [۲۱]. این ویژگی‌ها به دلیل داشتن ساختارهای میکرو/نانو و انرژی سطحی پایین در این موجودات می‌باشد [۲۲].

¹ Alkenyl Succinic Anhydride

² Alkyl Ketene Dimer

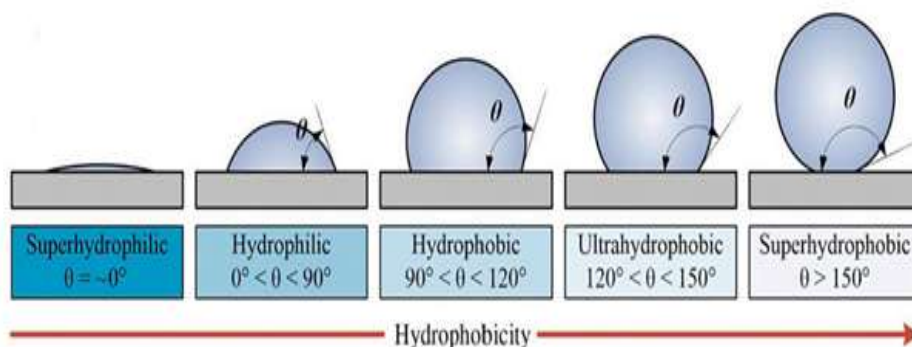
³ Water contact angle

⁴ Sliding angle

⁵ Water strider

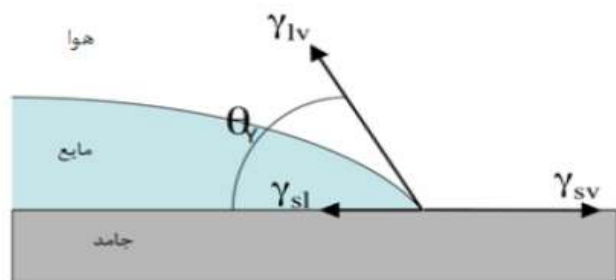
مختلف تقسیم می‌شود [۲۶]. رایج‌ترین حالت‌های ترشوندگی، حالت آب‌دوست ($0^\circ < \theta < 90^\circ$)، آب‌گریز ($90^\circ < \theta < 150^\circ$)، سوپر آب‌دوست و سوپر آب‌گریز، با زاویه تماس به ترتیب ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) و ($180^\circ > \theta > 150^\circ$) می‌باشد [۲۷]. حالت سوپر آب‌گریزی، حالتی است تقریباً بدون خیس شدن کامل ($WCA > 150^\circ$) قطره آب از سطح آن می‌لغزد [۱۱].

ترشدن سطح جامد به وسیله مایع را نشان می‌دهد. از لحاظ هندسی زاویه تماس به زاویه‌ای گفته می‌شود که به وسیله مایع، در مرز سه‌فاز مایع - جامد - گاز شکل می‌گیرد. هنگامی که مایع، آب باشد، زاویه تماس اندازه‌گیری شده، زاویه تماس آب می‌باشد [۱۱]. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، رفتار ترشوندگی سطح معمولاً با توجه به اندازه زاویه تماس آب به حالت‌های



شکل (۱): زاویه تماس قطرات مایع روی سطح بستر با خواص ترشوندگی مختلف [۱۱].

در این مدل، θ_Y زاویه تماس تعادلی مایع بر روی سطح جامد، و γ_{SV} ، γ_{SL} و γ_{LV} به ترتیب کشش سطحی بین جامد و بخار، جامد و مایع، مایع و بخار را نشان می‌دهند (شکل ۲). معادله یانگ ساده‌ترین رابطه برای توصیف تعادل نیروهای فعال یک قطره مایع پخش شده روی یک سطح می‌باشد و نخستین بار در سال ۱۸۰۵ به وسیله یانگ معرفی شده است [۱۱ و ۲۸]. در این مدل ترشوندگی به وسیله انرژی سطحی سطح جامد تعریف می‌شود.



شکل (۲): تماس یک قطره آب با سطح صاف و پارامترهای موجود در

معادله یانگ [۱۱]

معمولاً سطوحی که دارای کشش سطحی کمی هستند، مقدار اندکی گروه‌های قطبی در سطح دارند و یا هیچ گروه قطبی در سطح ندارند و معمولاً زاویه تماس بالاتری دارند. برای محاسبه زاویه تماس تعادلی سطوح ناهموار، نمی‌توان از معادله یانگ استفاده کرد. در این حالت کشش سطحی تنها عامل تأثیرگذار بر روی ترشوندگی سطح به وسیله قطره آب نیست، بلکه ناهمواری سطح نیز عاملی تأثیرگذار است. به

۴-۲- زاویه لغزش

برای اندازه‌گیری زاویه لغزش (سرخوردن) قطره روی یک سطح، ابتدا سطح آب‌گریز را در حالت افقی قرار می‌دهند. سپس قطره آب با اندازه مشخص را روی سطح قرار داده و تدریجاً به سطح شیب داده می‌شود تا قطره شروع به پایین آمدن روی سطح شیب دار کند. زاویه‌ای که در این حالت به دست می‌آید، زاویه لغزش قطره نامیده می‌شود. برای یک سطح سوپر آب‌گریز، این زاویه باید کم‌تر از ۱۰ درجه باشد [۱۱].

۵- مدل‌های ترشوندگی

در این بخش، مدل‌های نظری مختلف و اصول ترشوندگی سطوح و معادلات حاکم بر زاویه تماس مایع ارائه و بحث شده است. رفتار آب‌گریزی توسط سه مدل مختلف به شرح زیر تعریف شده است:

۵-۱- معادله یانگ (سطوح صاف)

ترشوندگی یک سطح ایده‌آل (به طور شیمیایی همگن و صاف) با شیمی سطح تعیین می‌شود و می‌تواند به وسیله معادله یانگ ارزیابی شود [۲۸].

معادله (۱)

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}$$

۶- عوامل موثر بر تشکیل سطح سوپر آب گریز

برای ایجاد خاصیت آب گریزی به دو مؤلفه ساختار سطحی با ناهمواری‌های در مقیاس میکرو و نانو (خصوصیات هندسی) و پوشش آن با یک ماده دارای انرژی سطحی کم (خصوصیات شیمیایی) نیاز است [۱۱].

۶-۱- انرژی سطحی

در اکثر مواد، مولکول‌ها توسط پیوندهای شیمیایی به هم متصل هستند. برای شکستن این پیوندها، مقدار خاصی از انرژی مورد نیاز است. مولکول‌هایی که در سطح ماده قرار دارند، پیوند تشکیل نمی‌دهند و در نتیجه انرژی بالقوه بیش‌تری نسبت به مولکول‌هایی که پیوند تشکیل داده‌اند، دارند. این انرژی اضافی که در سطح ماده وجود دارد، به عنوان انرژی سطح یا انرژی فصل مشترک شناخته می‌شود. این انرژی به صورت انرژی در واحد سطح اندازه‌گیری می‌شود و واحد آن در سیستم SI، ژول بر مترمربع (J/m^2) است [۳۲]. فرایند آب گریز کردن سطح به وسیله مواد با انرژی سطحی کم، بدین صورت می‌باشد که وقتی انرژی سطحی جامد به حدی کاهش یابد که از انرژی سطحی بحرانی آب کم‌تر شود، در این حالت آب تمایل جذب به سطح را از دست می‌دهد و بیش‌تر به صورت یک قطره خودش را روی سطح جمع می‌کند [۳۳]. در نتیجه با کاهش انرژی سطحی، آب گریزی افزایش می‌یابد [۳۴].

ترکیبات شیمیایی مختلف، مانند فلوروکربن‌ها، ترکیبات سیلانی مانند پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ($PDMS^1$) [۳۵-۳۶] و مواد آلی [۳۷] به منظور کاهش انرژی سطحی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. محققین متعددی، تهیه سطوح سوپر آب گریز از مواد آلی مانند پلی‌آمید [۳۸]، پلی‌کربنات [۳۷] و آلکیل‌کتندایمر [۳۹] را مورد بررسی قرار داده‌اند.

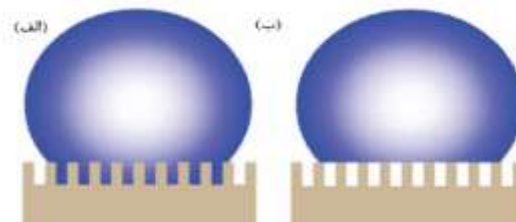
بسیاری از این ترکیبات گران هستند یا از پلیمرهای مصنوعی تهیه شده‌اند. همچنین اگر ترکیبات شیمیایی، حاوی فلئوئور (مانند پرفلوئورو اکتیل‌تری‌کلروسیلان، پرفلوئورو دکانوئیک‌اسید، دی‌کلروپرفلوئورو دسیل‌متیل‌سیلان و...) باشند، در طبیعت به سختی تجزیه می‌شوند و در موجودات زنده تجمع می‌یابند. این ترکیبات باعث آلودگی آب شده و می‌توانند منجر به سرطان و تضعیف سیستم ایمنی در انسان گردند. فرایند ساخت پوشش‌های حاوی این ترکیبات می‌تواند منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها شود؛ بنابراین، محققان در تلاش هستند تا با استفاده از مواد دوستدار

همین دلیل از نظریه‌های دیگری برای محاسبه زاویه تماس تعادلی استفاده می‌شود.

۵-۲- معادله ونزل - کسی و باکستر (سطح ناهموار)

سطوح واقعی، به ندرت کاملاً صاف هستند. حتی اگر یک سطح به صورت ماکروسکوپی صاف ظاهر شود، معمولاً ناهمواری‌هایی در مقیاس میکرو، نانو و مولکولی وجود دارد. محدودیتی که در رابطه با کاربرد مدل یانگ وجود دارد این است که فقط برای سطوحی معتبر است که از نظر اتمی صاف، از نظر شیمیایی همگن، و به وسیله برهم‌کنش‌های احتمالی با مایع تغییر نمی‌کنند. یافتن سطوح کاملاً صاف که در معادله یانگ فرض شده است، بسیار مشکل است؛ بنابراین در بیش‌تر موارد ناهمواری‌ها باید در نظر گرفته شود.

ترشوندگی سطوح ناهموار، توجه ونزل [۲۹] و کسی و باکستر [۳۰] را به خود جلب کرد و آن‌ها تئوری ترشوندگی را برای سطوح ناهموار معرفی کرده‌اند. ونزل و کسی - باکستر دو حالت ترشوندگی متضاد را توصیف کردند (شکل ۳)، یعنی حالتی که سطح کاملاً به وسیله یک مایع تر شده است (حالت ونزل) و حالتی که هوا در ناهمواری بستر به دام افتاده و فقط منطقه بالایی سطح تر شده است (حالت کسی - باکستر). تئوری‌های ترشوندگی ونزل و کسی - باکستر هنوز هم در مدل‌سازی و درک پدیده ترشوندگی بر روی سطح ناهموار مناسب است [۳۱].



شکل (۳): طرحی از رفتار قطره مایع با بستر جامد ناهموار (الف) مدل ونزل، (ب) مدل کیسی و باکستر [۱۱]

یک سطح سوپر آب گریز، باید دارای لایه یکنواختی از هوای محبوس باشد که زاویه تماس بسیار زیاد، زاویه لغزش بسیار کم (نزدیک به صفر)، را ایجاد نماید. باید توجه داشت که هوای محبوس شده در یک سطح سوپر آب گریز به عنوان یک مانع فیزیکی در برابر آب یا محلول‌های آبی عمل می‌نماید. بررسی سازوکار آب گریزی با تغییر ناهمواری سطح بسیار پیچیده است. در بیش‌تر سطوح سوپر آب گریز، شکل‌گیری سطح کامپوزیت جامد - هوا در زیر قطره آب، بسیار مهم است. سطح کامپوزیت باعث کاهش ناحیه تماس بین جامد - مایع و بنابراین کاهش چسبندگی قطره مایع به سطح جامد می‌شود [۱۱].

¹ Polydimethylsiloxane

این محصولات متمرکز شده است. کاغذ سوپر آب‌گریز به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند تمیز شوندگی [۴۳]، خاصیت ضد باکتری [۴۴]، ضد رسوب [۴۵] و ضد یخ/یخ‌زدگی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف دارد. این نوع کاغذ با دفع مایعات، باکتری‌ها و میکروارگانیسم‌ها، به عنوان یک ماده ضد آلودگی و ضد میکروب عمل می‌کند [۱۱]. کاغذ سوپر آب‌گریز مقاوم در برابر آتش و شعله [۴۶]، کاغذ سوپر آب‌گریز محافظ UV/الکترومغناطیس [۴۷] تهیه شده است. برخی از کاغذهای سوپر آب‌گریز دارای خاصیت فوتوکاتالیستی [۴۷] و خودترمیم‌شوندگی [۴۸] هستند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای این نوع کاغذها در کاربردهای مختلف مانند جداسازی نفت/آب، فیلتراسیون، پوشش‌های محافظ و سنسورها است.

محققان با استفاده از کاغذهای سوپر آب‌گریز، آشکارسازها و حسگرهایی طراحی کرده‌اند که آلاینده‌ها و مواد خطرناک را شناسایی می‌کنند. به عنوان مثال، دستگاه‌های مبتنی بر کاغذ سوپر آب‌گریز برای تشخیص آفت‌کش‌ها در محصولات کشاورزی [۱۱]، گازهای سمی در محیط [۴۹]، ملامین در شیر تقلبی و کاندیدا آلبیکنز در نمونه‌های بیولوژیکی [۴۵] مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، حسگرهای مبتنی بر کاغذ سوپر آب‌گریز قادر به آنالیز حرکات بدن انسان مانند حرکات انگشت، آرنج، مفاصل، گلو و نبض هستند [۱۱ و ۵۰].

۷-۱- محصولات کاغذی سوپر آب‌گریز جایگزین

پلاستیک

محصولات پلاستیکی به دلیل هزینه کم، وزن سبک، ضد آب بودن، ممانعت به گاز و پایداری عالی در محیط‌های مختلف (مانند محیط‌های آبی یا مایعات اسیدی/قلیایی ضعیف و حلال‌های آلی) به طور گسترده در صنعت بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده گسترده از پلاستیک‌های یک‌بار مصرف، به ویژه در بسته‌بندی غذا و دارو، باعث شده که آلودگی مربوط به مواد پلاستیکی به یک مشکل جهانی و جدی برای محیط‌زیست تبدیل شود [۵۱ و ۵۲]. در سال ۲۰۱۵، مصرف سالانه بسته‌های پلاستیکی یک‌بار مصرف بیش از ۴۰۷ میلیون تن بوده و سال‌ها، روند روبه‌افزایش را حفظ کرده است [۵۳]. بسته‌های پلاستیکی، به دلیل مقاوم بودن در برابر تجزیه زیستی، نه تنها باعث آلودگی خاک می‌شوند، بلکه به اقیانوس راه می‌یابند و میکروپلاستیک‌ها را تشکیل می‌دهند [۵۲ و ۵۴]. هر سال تخمین زده می‌شود که بیش از ۸ میلیون تن زباله پلاستیکی به اقیانوس‌ها ریخته می‌شود که منجر به تشکیل میکروپلاستیک‌های پایدار در اقیانوس‌ها می‌شود. این میکروپلاستیک‌ها باعث ایجاد

محیط‌زیست، پوشش‌هایی سوپر آب‌گریز، با خواص مشابه ترکیبات حاوی فلئوثر، اما بدون ضرر برای محیط‌زیست تهیه کنند [۱۱]. اخیراً، پلیمرهای زیستی به دلیل سازگاری با محیط‌زیست، زیست‌تخریب‌پذیری و قیمت مناسب، برای پوشش کاغذهای بسته‌بندی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد از منابع تجدیدپذیر مانند پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و لیپیدها ساخته می‌شوند و نسبت به پلیمرهای مصنوعی (پلی‌اتیلن، پلی‌وینیل الکل، لاتکس لاستیکی و فلوروکربن) مزایای زیست‌محیطی بیشتری دارند. پوشش‌های زیستی می‌توانند به عنوان مانع در برابر هوا، رطوبت، آب و روغن عمل کنند و به این ترتیب اگر برای بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرند، عمر مفید مواد غذایی را افزایش می‌دهند [۱۱].

از بین پلیمرهای زیستی، ترکیبات لیپیدی، مانند اسیدهای چرب با زنجیره بلند و موم‌ها (موم زنبور عسل، کارناوبا و کاندلیلا)، به دلیل ضد آب بودن می‌توانند برای پوشش مواد مختلف مورد استفاده قرار گیرند. موم‌ها مؤثرترین مواد برای کاهش نفوذپذیری رطوبت هستند. آب‌گریزی بالای آن‌ها نتیجه مقدار زیاد استرهای الکل‌های چرب با زنجیره بلند و اسیدها و همچنین آلکان‌های با زنجیره بلند است. به همین منظور، استفاده از لیپیدهای طبیعی (مانند موم زنبور عسل، موم کارناوبا و اسیدهای چرب با زنجیره بلند) برای کاهش انرژی سطحی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴۰].

۶-۲- ناهمواری سطح

برای تهیه یک سطح سوپر آب‌گریز، مورفولوژی سطح، نقش مهمی را در ترشوندگی ایفا می‌کند. زمانی که یک سطح دارای بافتی در مقیاس میکرو یا نانو باشد، هوا در بین آب و سطح، به دام می‌افتد، فصل مشترک بین هوا و آب در یک قطره که بر روی سطح قرار گرفته است افزایش می‌یابد، نیروی موئینگی بین قطره و سطح شدیداً کم می‌شود، زاویه بزرگ‌تری تشکیل می‌شود که میزان تماس سطح با آب را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، قطره آب شکل کروی به خود می‌گیرد و به راحتی جریان می‌یابد و قطرات بر روی سطح به آسانی می‌لغزند [۴۱]. در نتیجه تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی ناهموار، به منظور دستیابی به زاویه بالاتر ضروری می‌باشد [۴۲]. بر این اساس با استفاده از پرکننده‌ها و نانوذرات در ابعاد میکرو و نانو می‌توان ناهمواری‌های مورد نیاز برای ایجاد سطح سوپر آب‌گریز را ایجاد کرد.

۷-۲- کاربردهای کاغذهای سوپر آب‌گریز

باتوجه به عملکرد عالی کاغذ سوپر آب‌گریز و افزایش تقاضای روزافزون برای مواد تجدیدپذیر، مطالعات متعددی بر روی کاربردهای چندگانه

برابر آب سرد و گرم داشته است. خاصیت سوپرآب‌گریزی کاغذ پوشش‌دهی شده حتی در معرض محیط‌های اسیدی/قلیایی و دمای بالا نیز حفظ شده بود. همچنین این کاغذ قابلیت بازیافت، تجزیه-پذیری زیستی و سازگاری زیستی خوبی نشان داده است. بنابراین، این کاغذ سوپرآب‌گریز مبتنی بر سلولز می‌تواند گزینه مناسبی برای ساخت مواد بسته‌بندی یک‌بار مصرف سوپرآب‌گریز با کاربردهای متنوع باشد [۵۷].

کاغذ به دلیل منابع فراوان، تجدیدپذیری، قابلیت بازیافت، تجزیه‌پذیری، انعطاف‌پذیری مکانیکی، چاپ‌پذیری و قیمت ارزان، به طور گسترده در صنعت بسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. با این حال، مواد بسته‌بندی کاغذی به دلیل ماهیت آب‌دوستی الیاف خود، در هنگام تماس با آب یا رطوبت در طی فرایند ذخیره-سازی و حمل‌ونقل، آسیب می‌بینند. در نتیجه، تولید بسته‌بندی‌های کاغذی سوپرآب‌گریز با قابلیت تجزیه زیستی و تجدیدپذیری از پلیمرهای زیستی بسیار مطلوب می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری

نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با منابع مبتنی بر نفت، جامعه علمی را به تمرکز بر مواد اولیه تجدیدپذیر سوق داده است. در مجموع، در این مقاله پیشرفت‌های اخیر در زمینه آماده‌سازی و کاربردهای چندمنظوره مواد مبتنی بر کاغذ سوپرآب‌گریز خلاصه شده است. بنابراین، نگرانی‌های فزاینده زیست‌محیطی ناشی از استفاده از منابع نفتی، توجه جامعه علمی را به سمت توسعه و استفاده از مواد اولیه تجدیدپذیر معطوف کرده است. این مقاله به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید و کاربردهای چندمنظوره کاغذهای سوپرآب‌گریز پرداخته است. کاغذهای سوپرآب‌گریز با دارا بودن مزایای منحصر به فردی همچون مقاومت عالی در برابر رطوبت، نفوذناپذیری در برابر مایعات، حفظ کیفیت محصولات در طولانی مدت و قابلیت بازیافت آسان، گزینه‌ای ایده‌آل برای صنعت بسته‌بندی محسوب می‌شوند. این مواد نه تنها می‌توانند جایگزین مناسبی برای بسته‌بندی‌های پلاستیکی باشند، بلکه با کاهش مصرف منابع فسیلی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، گام مهمی در جهت توسعه پایدار برمی‌دارند. ویژگی‌های ضدآب این کاغذها امکان بسته‌بندی ایمن محصولات حساس به رطوبت مانند مواد غذایی، دارویی و الکترونیکی را فراهم می‌آورد. باتوجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد کاغذهای سوپرآب‌گریز، این مواد در آینده نزدیک نقش مهمی در توسعه فناوری‌های پیشرفته چندمنظوره مانند دستگاه‌های میکروسیال، تشخیص پزشکی و مراقبت‌های بهداشتی، بسته‌بندی

بسیاری از بیماری‌های کشنده در انسان‌ها می‌شوند؛ بنابراین، یافتن جایگزین‌های زیست‌تخریب‌پذیر برای بسته‌بندی‌های پلاستیکی ضروری است [۵۲]. به همین منظور، در دهه‌های اخیر، توسعه بسته-بندی‌های سبز و زیست‌تخریب‌پذیر به‌عنوان جایگزین برای پلاستیک‌های یک‌بارمصرف، هم از نظر تحقیقات آزمایشگاهی و هم کاربردهای صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴۰ و ۵۲].

Huang و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از نانوذرات TiO_2 (با قطر ۱۰-۲۰ نانومتر) اصلاح شده با ۳-(تری‌متوکسی‌سیلیل) پروپیل متاکریلات (MPS) کاغذ سوپرآب‌گریز را تهیه کرده‌اند. در این روش، الیاف سلولزی با نانوذرات اصلاح‌شده، در خمیر مخلوط شد، و هیچ نوع تیمار دیگری بعد از تهیه کاغذ دست‌ساز به‌منظور دستیابی به سطح سوپرآب‌گریز انجام نشده است. این تحقیق ظاهراً اولین مطالعه‌ای بود که در آن اصلاح سطح سوپرآب‌گریز بر روی الیاف سلولزی قبل از فرآیند کاغذسازی، انجام شده است. نتایج نشان داد که زاویه تماس آب کاغذ تیمار شده در محدوده ۱۲۶/۵ تا ۱۵۴/۲ درجه و زاویه لغزش آن کم‌تر از ۳ درجه بوده است. اصلاح نانوذرات همچنین باعث بهبود ماتی کاغذ شد اما مقاومت به کشش آن کاهش یافته است [۵۶].

Jiang و همکاران (۲۰۲۲) کاغذ سلولزی سوپرآب‌گریز را از طریق پوشش‌دهی با مخلوط پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) با سینامالدهید (CIN^2) و همچنین نانوسیلیکا اصلاح شده با اسیداستئاریک (SA/SiO_2) به عنوان یک لایه تهیه کرده‌اند. ویژگی‌های عالی فیلم-سازی PLA باعث بهبود ۴۷/۹۴ درصدی مقاومت کششی کاغذهای تولید شده ($10.4/3 \text{ MPa}$) در مقایسه با کاغذهای سلولز اصلی (MPa) شده است. همچنین، با بهره‌گیری از نانوساختار ناهموار که توسط انرژی سطح پایین اسیداستئاریک، اصلاح شده بود، زاویه-تماس آب کاغذهای حاصل به ۱۵۶/۳ درجه رسید و دارای عملکرد سوپرآب‌گریزی برای مایعات مختلف بوده است. جذب آب کاغذ ۱۰۰ درصد کاهش یافته است و کارایی ضد باکتری آن‌ها حدود ۱۰۰ درصد بوده است [۵۲].

Kan و همکاران (۲۰۲۳) ابتدا، یک ماده آب‌گریز مبتنی بر سلولز را با واکنش دی‌الدهید سلولز با اکتادسیل‌امین سنتز کرده‌اند. سپس از نانوذرات سیلیکا برای افزایش زبری سطح پوشش استفاده کردند. کاغذ پوشش داده شده حاصل از این فرآیند، خاصیت سوپرآب‌گریزی با زاویه تماس آب 155 ± 0.6 درجه و زاویه لغزش 4 ± 0.1 درجه، را نشان داده است. همچنین، این کاغذ عملکرد دافع عالی در

¹ (trimethoxysilyl) propyl methacrylate

² Cinnamaldehyde

- [7] R. Norouzi et al., "Comparison of some coating factors of paper and their effect on the properties and quality of packaging papers," J. Packag. Sci., vol. 6, no. 21, pp. 70–83, Jun. 2015. (In Persian)
- [8] Z. Li and M. Rabnawaz, "Fabrication of food-safe water-resistant paper coatings using a melamine primer and polysiloxane outer layer," ACS Omega, vol. 3, no. 9, pp. 11909–11916, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01423>
- [9] S. Ghimire et al., "Sampling and degradation of biodegradable plastic and paper mulches in field after tillage incorporation," Sci. Total Environ., vol. 703, Art. no. 135577, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135577>.
- [10] J. Yang et al., "Preparation, characterization, and properties of fluorine-free superhydrophobic paper based on layer-by layer assembly," Carbohydr. Polym., vol. 178, pp. 228–237, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.040>.
- [11] T. Yun et al., "Superhydrophobic modification of cellulosic paper-based materials: Fabrication, properties, and versatile applications," Carbohydr. Polym., vol. 305, p. 120570, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120570>.
- [12] S. Ning, G. Tian, and F. Yang, "Bionic silanized cellulose superhydrophobic paper for efficient oil-water separation," Sep. Purif. Technol., vol. 353, p. 128523, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128523>.
- [13] H. Chen et al., "Superhydrophobic surfaces for the sustainable maintenance of building materials and stone-built heritage: The challenges, opportunities and perspectives," Adv. Colloid Interface Sci., vol. 335, p. 103343, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103343>.
- [14] A. L. Mourad, H. L. G. da Silva, and J. C. B. Nogueira, "Carton for beverage—A decade of process efficiency improvements enhancing its environmental profile," Int. J. Life Cycle Assess., vol. 17, no. 2, pp. 176–183, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0347-x>.
- [15] L. C. Peng, Y. H. Meng, and H. Li, "Facile fabrication of superhydrophobic paper with improved physical strength by a novel layer-by-layer assembly of polyelectrolytes and lignosulfonates-amine," Cellulose, vol. 23, no. 3, pp. 2073–2085, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0910-5>.
- [16] B. Xiang et al., "Current research situation and future prospect of superwetting smart oil/water separation materials," J. Mater. Chem. A, vol. 10, no. 38, pp. 20190–20217, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2TA04469B>.
- [17] H. J. Lee and S. Michielsen, "Technical note-lotus effect: Superhydrophobicity," J. Text. Inst., vol. 97, no. 5, pp. 455–462, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1533/joti.2006.0271>.
- [18] C. Neinhuis and W. Barthlott, "Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces," Ann. Bot., vol. 79, no. 6, pp. 667–677, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0400>.
- [19] L. Feng et al., "Petal effect: A superhydrophobic state with high adhesive force," Langmuir, vol. 24, no. 8, pp. 4114–4119, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1021/la703821h>.
- [20] X. F. Gao and L. Jiang, "Water-repellent legs of water striders," Nature, vol. 432, no. 7013, p. 36, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1038/432036a>.
- [21] M. Ran, W. Zheng, and H. Wang, "Fabrication of superhydrophobic surfaces for corrosion protection: A review," Mater. Sci. Technol., vol. 35, no. 3, pp. 313–326, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1560985>.
- [22] T. Lv et al., "Superhydrophobic surface with shape memory micro/nanostructure and its application in rewritable chip for droplet storage," ACS Nano, vol. 10, no. 10, pp. 9379–9386, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b04257>.
- [23] E. Kontturi et al., "Amorphous characteristics of an ultrathin cellulose film," Biomacromolecules, vol. 12, no. 3, pp. 770–777, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm101382q>.
- [24] D. Bonn et al., "Wetting and spreading," Rev. Mod. Phys., vol. 81, no. 2, pp. 739–805, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.739>

هوشمند، حسگرهای فشار و مواد جایگزین پلاستیک صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود.

با این وجود، چالش‌هایی همچنان وجود دارند و در این راستا، چشم‌اندازهای زیر را پیشنهاد می‌کنیم:

۱. در فرایند تولید کاغذ سوپر آب‌گریز، باید استفاده از مواد شیمیایی سمی مانند فلوروکربن‌ها و یون‌های فلزی که ممکن است به محیط زیست یا سلامت انسان آسیب برسانند، کاهش یافته یا کاملاً اجتناب شود.

۲. توسعه پلیمرهای زیستی دوستدار محیط زیست، مانند موم طبیعی، اسیدهای چرب، پروتئین، سلولز و مشتقات آن‌ها، برای ساخت کاغذ سوپر آب‌گریز ضروری است.

۳. پایداری کاغذ سوپر آب‌گریز و ساده‌سازی فرایند آماده‌سازی همچنان از موضوعات مهم در پژوهش‌های جاری هستند.

۴. کاربرد مواد مبتنی بر کاغذ سوپر آب‌گریز باید بر روی مواد چندمنظوره با ارزش افزوده (مانند دستگاه‌های تحلیل و تشخیص و دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف‌پذیر) و همچنین محصولات کاغذی جایگزین پلاستیک با چشم‌انداز صنعتی مشخص (مانند نی کاغذی) تمرکز کند تا ارزش عملی کاغذ سوپر آب‌گریز به حداکثر برسد.

اگرچه تاکنون چندین ماده مبتنی بر کاغذ سوپر آب‌گریز مانند دستگاه‌های تحلیل و تشخیص، حسگرها، نی‌ها ساخته شده‌اند، اما همچنان تحقیقات بیشتری برای توسعه محصولات عملکردی، بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها و چرخه آماده‌سازی مورد نیاز است.

۹- مراجع

- [1] K. W. Singerman, M. G. Moore, J. T. P. Kortlever, and R. M. Gobble, "Industry payments to plastic surgeons, 2013 to 2018: Who's getting paid?" Plastic and Reconstructive Surgery, vol. 149, no. 1, pp. 264–274, 2022. DOI: 10.1097/PRS.0000000000008683.
- [2] Y. Zhong, P. Godwin, Y. Jin, and H. Xiao, "Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review," Adv. Ind. Eng. Polym. Res., vol. 3, no. 1, pp. 27–35, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>.
- [3] M. E. Pasaoglu and I. Koyuncu, "Substitution of petroleum-based polymeric materials used in the electrospinning process with nanocellulose: A review and future outlook," Chemosphere, vol. 269, Art. no. 128710, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128710>.
- [4] M. N. Khan et al., "Environmentally benign extraction of cellulose from dunchi fiber for nanocellulose fabrication," Int. J. Biol. Macromol., vol. 153, pp. 72–78, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.333>.
- [5] H. Li et al., "Fabrication of food-safe superhydrophobic cellulose paper with improved moisture and air barrier properties," Carbohydr. Polym., vol. 211, pp. 22–30, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.107>.
- [6] M. A. Hubbe, "Puzzling aspects of the hydrophobic sizing of paper and its inter-fiber bonding ability," BioResources, vol. 9, no. 4, pp. 5782–5783, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.9.4.5782-5783>.

- [43] J. Wei et al., "Facile, scalable spray-coating of stable emulsion for transparent self-cleaning surface of cellulose-based materials," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 6, no. 9, pp. 11335–11344, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00962>.
- [44] M. Raeisi et al., "Superhydrophobic cotton fabrics coated by chitosan and titanium dioxide nanoparticles with enhanced antibacterial and UV-protecting properties," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 171, pp. 158–165, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.220>.
- [45] A. Prabhu et al., "Inkjet printing of paraffin on paper allows low-cost point-of-care diagnostics for pathogenic fungi," *Cellulose*, vol. 27, no. 13, pp. 7691–7701, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03314-3>.
- [46] G. Wen and Z. Guo, "Nonflammable superhydrophobic paper with biomimetic layered structure exhibiting boiling-water resistance and repairable properties for emulsion separation," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 6, pp. 7042–7052, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8TA01920G>.
- [47] E. Pakdel et al., "Advances in photocatalytic self-cleaning, superhydrophobic and electromagnetic interference shielding textile treatments," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 277, Article 102116, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102116>.
- [48] Z.-G. Bai, Y.-Y. Bai, G.-P. Zhang, and S.-Q. Wang, "A hydrogen bond based self-healing superhydrophobic octadecyltriethoxysilane-lignocellulose/silica coating," *Progress in Organic Coatings*, vol. 151, Article 106104, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106104>.
- [49] Q. Huang et al., "A convenient approach to constructing superhydrophobic paper sensor for gas detection with high immunity to humidity," *Nano*, vol. 15, no. 7, Article 2050091, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793292020500915>.
- [50] Y. Bu et al., "Ultrasensitive strain sensor based on superhydrophobic microcracked conductive Ti3C2Tx MXene/paper for human-motion monitoring and E-skin," *Science Bulletin*, vol. 66, no. 18, pp. 1849–1857, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.04.041>.
- [51] Z. N. Diyana, R. Jumaidin, M. Z. Selamat, and M. S. M. Suan, "Thermoplastic starch/beeswax blend: Characterization on thermal mechanical and moisture absorption properties," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 190, pp. 224–232, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.201>.
- [52] X. Jiang et al., "Preparation and characterization of degradable cellulose-based paper with superhydrophobic, antibacterial, and barrier properties for food packaging," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 19, p. 11158, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms231911158>.
- [53] A. Diggle and T. R. Walker, "Implementation of harmonized Extended Producer Responsibility strategies to incentivize recovery of single-use plastic packaging waste in Canada," *Waste Management*, vol. 110, pp. 20–23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.013>.
- [54] R. Ding, L. Tong, and W. Zhang, "Microplastics in freshwater environments: sources, fates and toxicity," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 232, no. 4, pp. 1–19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05081-8>.
- [55] Y. He et al., "Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications," *Carbohydrate Polymers*, vol. 252, p. 117156, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117156>.
- [56] L. Huang et al., "Fabrication and characterization of superhydrophobic high opacity paper with titanium dioxide nanoparticles," *Journal of Materials Science*, vol. 46, pp. 2600–2605, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5112-1>.
- [57] L. Kan et al., "Fabrication of cellulose-based and fluorine/silane free superhydrophobic paper by a green and sustainable approach," *Industrial Crops and Products*, vol. 203, p. 117226, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117226>.
- [25] G. Kumar and K. N. Prabhu, "Review of non-reactive and reactive wetting of liquids on surfaces," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 133, no. 2, pp. 61–89, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.04.009>.
- [26] M. Ashraf et al., "Development of superhydrophilic and superhydrophobic polyester fabric by growing zinc oxide nanorods," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 394, pp. 545–553, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.05.013>.
- [27] S. G. Moghadam, H. Parsimehr, and A. Ehsani, "Multifunctional superhydrophobic surfaces," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 290, Art. no. 102397, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102397>.
- [28] T. Young, "III. An essay on the cohesion of fluids," *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 95, pp. 65–87, 1805. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>.
- [29] R. N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, no. 8, pp. 988–994, 1936. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>.
- [30] A. Cassie and S. Baxter, "Wettability of porous surfaces," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 40, pp. 546–551, 1944. DOI: <https://doi.org/10.1039/TF9444000546>.
- [31] K. Liu, X. Yao, and L. Jiang, "Recent developments in bio-inspired special wettability," *Chemical Society Reviews*, vol. 39, no. 8, pp. 3240–3255, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1039/B917112F>.
- [32] Y. Y. Yan, N. Gao, and W. Barthlott, "Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 169, no. 2, pp. 80–105, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.08.005>.
- [33] B. Bhushan, Y. C. Jung, and K. Koch, "Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 367, no. 1894, pp. 1631–1672, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0014>.
- [34] Q. Wang et al., "Facile approach to develop hierarchical roughness fiber@SiO2 blocks for superhydrophobic paper," *Materials*, vol. 12, no. 9, p. 1393, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091393>.
- [35] Q. Dou et al., "PDMS-Modified Polyurethane Films with Low Water Contact Angle Hysteresis," *Macromolecular Chemistry and Physics*, vol. 207, no. 23, pp. 2170–2179, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.200600375>.
- [36] G. R. Artus et al., "Silicone nanofilaments and their application as superhydrophobic coatings," *Advanced Materials*, vol. 18, no. 20, pp. 2758–2762, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200502030>.
- [37] N. Zhao et al., "Fabrication of biomimetic superhydrophobic coating with a micro-nano-binary structure," *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 26, no. 13, pp. 1075–1080, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.200500188>.
- [38] J. Zhang, X. Lu, W. Huang, and Y. Han, "Reversible superhydrophobicity to superhydrophilicity transition by extending and unloading an elastic polyamide film," *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 26, no. 6, pp. 477–480, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.200400512>.
- [39] R. Mohammadi, J. Wassink, and A. Amirfazli, "Effect of surfactants on wetting of super-hydrophobic surfaces," *Langmuir*, vol. 20, no. 22, pp. 9657–9662, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1021/la049268k>.
- [40] W. Zhang, P. Lu, L. Qian, and H. Xiao, "Fabrication of superhydrophobic paper surface via wax mixture coating," *Chemical Engineering Journal*, vol. 250, pp. 431–436, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.050>.
- [41] H. Ogihara, J. Xie, and T. Saji, "Factors determining wettability of superhydrophobic paper prepared by spraying nanoparticle suspensions," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 434, pp. 35–41, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.05.034>.
- [42] T. Onda, S. Shibuichi, N. Satoh, and K. Tsujii, "Super-water-repellent fractal surfaces," *Langmuir*, vol. 12, no. 9, pp. 2125–2127, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1021/la950418o>.