نشریه علمی «علوم و فنون بسته‌بندی»
سال سیزدهم، شماره ۵۲، زمستان ۱۴۰۱؛ ص ۴۸-۴۱

علمی – ترویجی

ساخت و کاربرد سطوح فوق آب‌گریز در صنعت بسته‌بندی و زنجیره تأمین محصولات غذایی

مریم رواقی*

استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

(دریافت۱۴۰۱/۰۶/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴)

چکیده

سطوح فوق آب‌گریز دافع آب هستند و با کج کردن سطح قطره آب از روی آن می‌لغزد. محققان بسیاری در طی سالیان متمادی، به ساخت این سطوح و توسعه کاربرد آن‌ها در علوم مختلف پرداخته‌اند. مقاله مروری حاضر ضمن تمرکز بر پیشرفت‌های اخیر، به بررسی روش‌های ساخت و کاربردهای سطوح فوق آب‌گریز در صنعت بسته‌بندی و زنجیره تأمین پرداخته است. در این مقاله از طریق جستجو در پایگاه‌های Scopus، Springer، Science Direct، Pub Med، Sage journals و مجله علوم و فنون بسته‌بندی به بررسی اطلاعات منتشر شده طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۱ در این زمینه پرداخته شد. نتایج تحقیقات متعدد حاکی از کاربرد گسترده این فناوری در توسعه ساخت سطوح با اثرات ضد میکروبی، ضد چسبندگی، ضد خوردگی، ضد رسوب، ضد یخ‌زدگی و ضد مه، مقاومت به رطوبت و کاهش پدیده مهاجرت است که در زنجیره تأمین (از زمان تولید تا رسیدن به‌دست مصرف‌کننده نهایی) به‌خصوص صنعت بسته‌بندی، ساخت ظروف حمل و وسایل نقلیه اهمیت دارد. علی‌رغم تحقیقات صورت گرفته تا به امروز، مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است چرا که هزینه بالا، پایداری پایین و پیچیدگی زیاد از نقاط ضعف ساخت این سطوح است که کاربرد گسترده آن را در صنعت بسته‌بندی و زنجیره تأمین محدود می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: بسته‌بندی، پوشش، زاویه تماس، سطوح فوق آب‌گریز.

۱- مقدمه

افزایش جمعیت و تأمین نیازهای غذایی مردم از یک سو و هزینه بالای ضایعات از سوی دیگر باعث شده است تا محققان به بازنگری زنجیره تأمین بپردازند[۱]. زنجیره تأمین مواد غذایی شامل کلیه مراحل تولید، فراوری، توزیع، مصرف و دفع پسماند است. آنچه زنجیره تأمین ماده غذایی را از سایر محصولات متمایز می‌کند، تغییرات پیوسته کیفیت محصول تولیدی تا زمان رسیدن به‌دست مصرف‌کننده است. در چنین سیستمی ناکارآمدی‌های موجود بایستی شناسایی شوند و مشکلات آن‌ها با ارائه روش‌های بهینه حل شوند [۲].

بسته‌بندی مواد غذایی یکی از اجزاء مهم زنجیره تأمین است که نقشی اساسی در حفظ کیفیت و ایمنی حین نگهداری، حمل‌ونقل و فروش محصولات دارد. مواد بسته‌بندی با هدف حفاظت از غذا در برابر آسیب‌های مکانیکی، پیشگیری از وقوع واکنش‌های نامطلوب در اثر نور و گازها و جلوگیری از وقوع آلودگی میکروبی (فساد یا عوامل بیماری‌زا) طراحی می‌شوند. به‌دلیل تقاضای زیاد برای خرید مواد بسته‌بندی، این صنعت به یکی از بزرگ‌ترین و روبه‌رشدترین بخش‌های تجاری در جهان تبدیل شده است. علاوه بر این، هر روز تحولات و نوآوری‌های چشمگیری در این عرصه مانند تولید مواد و پوشش‌های جدید مشاهده می‌شود [۳]. در تولید مواد جدید بسته‌بندی بایستی ایمنی و غیرسمی بودن در کنار تجزیه‌پذیری، پایداری خصوصیات، قیمت و قابلیت تجاری‌سازی در نظر گرفته شود [۴].

آب‌گریزی یکی از ویژگی‌های سطحی مواد است که در آن مولکول‌ها از آب دوری می‌کنند. مواد آب‌گریز با داشتن ناهمواری‌های سطحی میکرومتری و نانومتری، اجازه پخش یا جذب شدن آب روی سطح را نمی‌دهند. در این شرایط، آب به‌صورت قطره از روی سطح سر می‌خورد. از میلیون‌ها سال قبل، سیستم‌های زنده به‌طور طبیعی از چنین قابلیت‌هایی بهره‌مند بوده‌اند. امروزه دانشمندان در تلاش‌اند تا با مطالعه سیستم‌های زنده و تقلید از آن‌ها برای توسعه فناوری‌های موجود استفاده کنند [۵].

سطوح فوق آب‌گریز کاربردهای فراوانی دارند که بسیاری از ویژگی‌های آن‌ها در زنجیره تأمین نیز قابل‌استفاده است. کاربردهایی

* رایانامه نویسنده مسئول: ravaghi.maryam@gmail.com

مانند اثر ضد میکروبی، ضد چسبندگی، ضد خوردگی، ضد رسوب، ضد یخ‌زدگی و ضد مه، مقاومت به رطوبت و کاهش پدیده مهاجرت از مهم‌ترین آن‌ها است. در کنار تمام فواید موجود این سطوح باید مقرون‌به‌صرفه باشند و پایداری بالایی داشته باشند. برای دستیابی به این ویژگی‌ها و با توجه به اهمیت سلامت مصرف‌کننده، پوشش‌های مورداستفاده که در تماس با محصولات غذایی هستند بایستی ایمن باشند و باعث مخاطره نشوند. با توجه به اهمیت این سطوح در صنایع مختلف همچون بسته‌بندی و افزایش تحقیقات بین‌المللی در این زمینه، این مقاله به بررسی روش‌های ساخت این سطوح و کاربرد آن‌ها در صنعت بسته‌بندی و زنجیره تأمین پرداخته است.

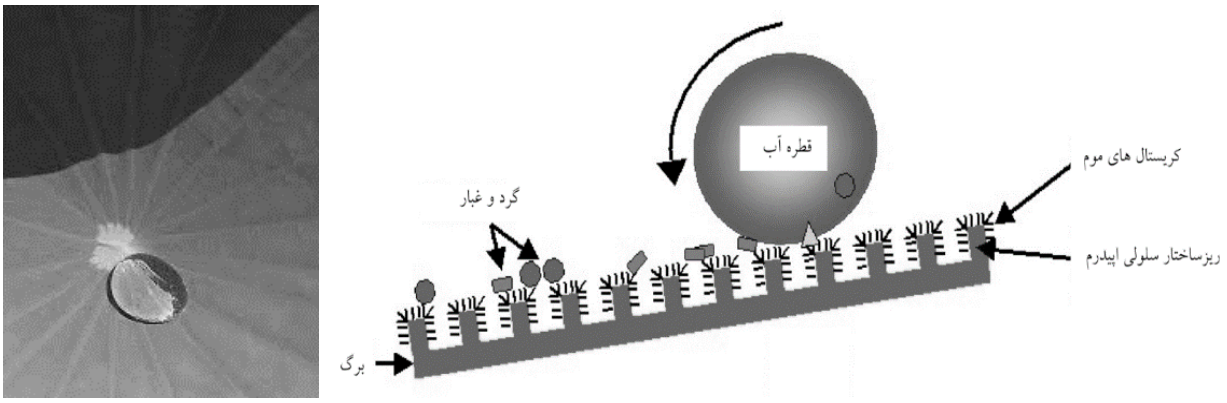
۲- روش تحقیق

در این مقاله سعی شد پس از بررسی پایگاه‌های اطلاعاتی داخلی و خارجی و تحقیقات اخیر مرتبط با مواد فوق آب‌گریز، به ارائه توضیحاتی ساده و کاربردی در مورد سازوکار و روش ساخت این سطوح پرداخته شود. در ادامه به ذکر خلاصه‌ای از پژوهش‌های قبلی در زمینه توسعه سطوح فوق آب‌گریز و با قابلیت‌های ویژه در زنجیره تأمین پرداخته شد و شکاف‌ها و معضلات موجود در تولید و کاربرد این سطوح مطرح گردید تا خواننده به جمع‌بندی کلی در رابطه با معایب و مزایای این سطوح برسد.

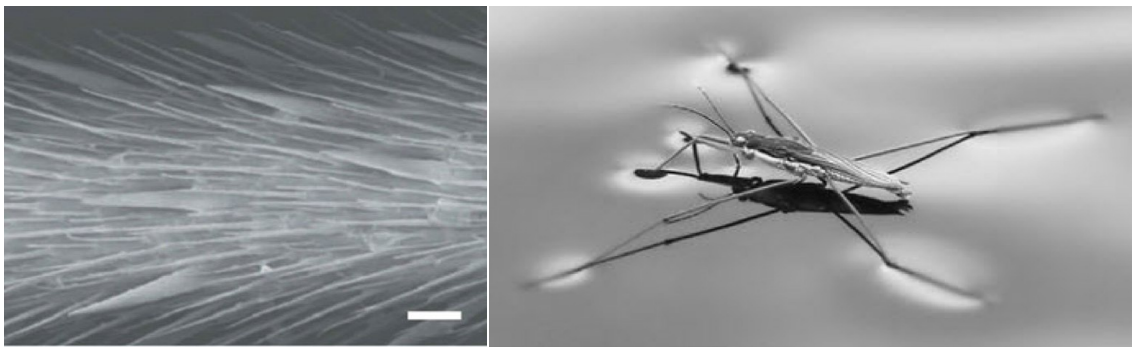
۳- سازوکارهای مواد فوق آب‌گریز

مواد هوشمندی چون سطوح فوق آب‌گریز با الهام از ساختارهای طبیعی از جمله برگ نیلوفر آبی، برگ برنج، پای حشرات، بال پروانه و حشرات آب‌پیما ساخته شده است [۵]. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، برگ نیلوفر آبی یک سطح خود تمیز شونده است که در آن قطرات شبنم روی سطح برگ می‌غلتند و غبار و آلودگی را حذف می‌کنند [۶].

ساختارهای مشابه نیلوفر آبی در برخی حشرات نیز دیده می‌شود. این حشرات ساختار میکرو - نانو روی تارهای ظریف پای خود دارند که می‌تواند هوا را به دام بیندازد و حشره روی آب بایستد. این ویژگی سطحی همراه با موم راز توانایی این حشرات برای مقاومت در برابر آب است (شکل ۲) [۷].



شکل (۱): غلتیدن قطره آب روی برگ نیلوفر آبی[۸].



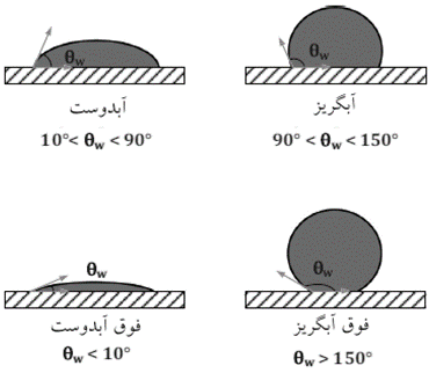
شکل (۲): ایستادن یک حشره آب‌پیما روی آب (راست)، ساختار میکروسکوپی پای حشره (چپ)[۷].

در اوایل دهه ۹۰ میلادی، بارتلات[1] قاشق عسلی را اختراع کرد که عسل بدون باقی‌ماندن از آن جدا می‌شد (شکل ۳). این اختراع گرچه به‌دلیل قیمت زیاد چندان مورد اقبال قرار نگرفت، اما پس از آن بسیاری از شرکت‌ها به اهمیت توسعه این فناوری در محصولات خود پی بردند و به‌تدریج کاربردهای تجاری متعددی ایجاد شد [۹].

شکل (۳): قاشق عسل فوق آب‌گریز بدون چسبیدن عسل [۹].

۴- زاویه تماس

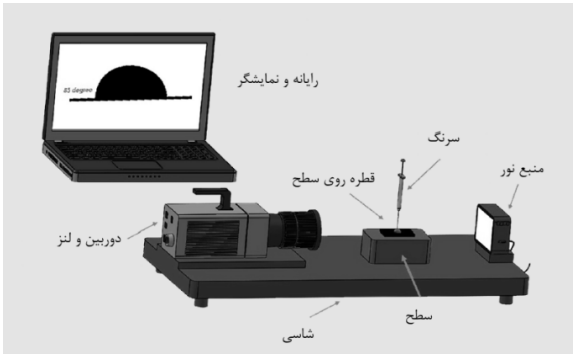
به زاویه‌ای گفته می‌شود که آخرین لبه یک مایع با سطح زیرین خود ایجاد می‌کند. هر چه این زاویه بزرگ‌تر باشد، نسبت آب‌گریزی بین دو ماده بیشتر است و احتمال خیس شدن سطح زیرین کم‌تر می‌شود. به‌طورکلی، یک سطح آب‌دوست زاویه تماسی کمتر از ۹۰ درجه دارد و چنانچه این زاویه کمتر از ۱۰ درجه باشد فوق آب‌دوست تلقی می‌گردد. سطوح با زاویه تماس بیش از ۹۰ درجه آب‌گریز هستند و اگر زاویه تماس بیش از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۵ درجه باشد به‌عنوان فوق آب‌گریز شناخته می‌شوند (شکل ۴). آب روی سطوح آب‌گریز زاویه تماس بسیار بزرگی به خود می‌گیرد و به شکل قطره‌های کروی درمی‌آید [۵].



شکل (۴). نمای ساده از زاویه تماس یک قطره آب با سطوح مختلف [۱۰] و [۱۱].

همان‌طور که در شکل (۵) می‌بینید دستگاهی که برای اندازه‌گیری زاویه تماس استفاده می‌شود شامل دو زیرمجموعه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است. بخش سخت‌افزاری برای ایجاد قطره و تصویربرداری استفاده می‌شود و بخش نرم‌افزاری به‌منظور آنالیز تصویر و اندازه‌گیری زاویه تماس کاربرد دارد [۱۲]. معمولاً ۲ یا ۵ میکرولیتر از قطره آب روی سطح موردنظر قرار داده می‌شود و زاویه تماس برای تعیین میزان جذب رطوبت و خیس شدن سطح تعیین می‌شود [۵].

در سال ۱۸۰۵، توماس یانگ[2] دانشمند بریتانیایی رابطه همبستگی بین زاویه تماس و کشش سطحی روی سطوح بسیار صاف و ایدئال را پیشنهاد داد. پس از آن مدل ونزل[3] و مدل کاسی - باکستر[4] برای بررسی ویژگی خیس شدن سطوح کمی زبر توسعه داده شد [۵].



[۵][۱۲].**شکل (۵):** شمای دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس

۵- روش ساخت

پدیده جذب رطوبت توسط مواد وابسته به ترکیب شیمیایی سطح و زبری ساختار در مقیاس میکروسکوپی همراه با سایر محرک‌های خارجی مانند نور، الکتریسیته، دما و ویژگی‌های محلول است. امروزه در تولید عینی و واقعی، استفاده از تغییر محرک‌های خارجی برای ایجاد سطوح دارای ویژگی فوق آب‌گریز موردتوجه قرار گرفته است. مبنای اصلی این روش بر این اساس است که ترکیب شیمیایی، ساختار سطحی و انرژی آزاد اجزا فعال سطح با تغییر محرک خارجی متقابلاً تغییر می‌یابند که باعث می‌شود جذب رطوبت سطح به‌طور برگشت‌پذیری تغییر کند. بااین‌حال این روش‌ها در عمل دچار نواقصی بوده است که به‌کارگیری آن‌ها را محدود کرده است [۱۳].

ایجاد ساختارهای زبر با ابعاد میکرو/نانو و استفاده از اجزاء آب‌گریز مخصوص باانرژی سطحی کم نیز امروزه در تحقیقات بسیاری بررسی شده است [۱۴] و [۱۵]. استفاده از فلوروآلکان‌ها در این زمینه کاربرد زیادی دارد، بااین‌وجود، مشکلات ناشی از ایمنی

[1] Barthlott

[2] Thomas Young
[3] Wenzel Model
[4] Cassie–Baxter Model
[5] Contact Angle Meter

برای سلامت انسان و اکوسیستم باعث شده است تا استفاده از چنین ترکیباتی در بسته‌بندی محصولات خصوصاً مواد غذایی و دارویی محدود شود [۱۶]. برای ساخت این مواد رعایت موارد ذیل الزامی است:

۱- حلال و واکنشگرهای مورداستفاده باید غیرسمی یا فرار باشند و هیچ باقیمانده‌ای از خود به‌جا نگذارند.

۲- روش ساخت سطح فوق آب‌گریز باید ساده، کم‌هزینه و سریع باشد تا قابلیت تجاری شدن داشته باشد. به‌علاوه، در سطوح با مواد مختلف و دارای شکل‌ها و ساختارهای متنوع کاربردی باشد.

گرچه استفاده از اسیدهای چرب (مانند سینامیک اسید و میریستیک اسید) و موم طبیعی (مانند موم زنبورعسل، موم کارنوبا، موم کاندلیلا و موم سبوس برنج) به‌عنوان جایگزین توانمند فلوروآلکان‌ها مطرح شده است، اثر این مواد خصوصاً طی درازمدت به‌خوبی فلوروآلکان‌ها نیست. برای مثال نیروی چسبندگی بین این مواد طبیعی و لایه بسیار ضعیف است و جزء آب‌گریز یا پوشش از لایه جدا می‌شود. به‌علاوه، روش‌های پوشش‌دهی سنتی تنها در صفحات مسطح کاربردی هستند و در شکل‌های غیر صاف مانند سطح داخلی لوله و کیسه که غیرمسطح کاربرد بسیار محدودی دارند [۴] و [۱۶].

روش‌های متعددی برای ساخت سطوح فوق آب‌گریز استفاده می‌شود که از جمله این روش‌ها می‌توان به غوطه‌وری در محلول، لیتوگرافی، رسوب قالب، حکاکی (لیزر، پلاسما، شیمیایی)، روش سل - ژل، رسوب الکتریکی، پوشش‌دهی پاششی و غیره اشاره کرد [۵] و [۱۷].

۶- کاربردها در صنعت بسته‌بندی و زنجیره تأمین

۶-۱- تولید سطوح خود تمیز شونده و با اثر ضد چسبندگی

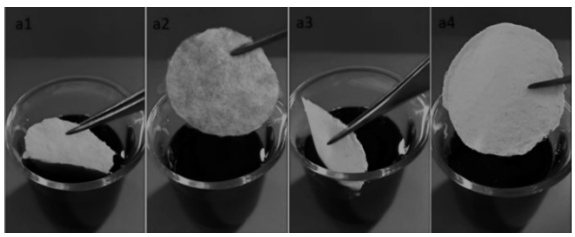
سطوح فوق آب‌گریز می‌توانند با دفع رطوبت و گردوغبار، سطح بسته‌بندی را تمیز نگه دارند و اثر خودتمیزشوندگی داشته باشند. این مسئله ضمن کاهش احتمال آلودگی بر جذابیت بصری و ظاهر مطلوب بسته‌بندی نیز تأثیر دارد[۱۸]. تحقیقات نشان داده است که ۱۵ درصد مواد غذایی مایع به‌دلیل چسبیدن به ظروف در بسته‌بندی باقی‌مانده و هدر می‌روند. این مسئله در محصولاتی مانند عسل، آبمیوه و داروهای مایع به‌دلیل قیمت بالاتر، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. علاوه بر این، مواد غذایی چسبیده باعث ایجاد خوردگی در بسته‌بندی و تولید مواد ناسالم و کاهش کیفیت غذا می‌شود [۱۹].

استفاده از مواد فوق آب‌گریز باعث کاهش چسبندگی باقیمانده غذا به سطح بسته‌بندی می‌شود. برای مثال همان‌طور که در شکل (۶) نیز نشان داده شده است محصول پس از برگرداندن ظرف، به جداره آن چسبیده است، درحالی‌که اگر بسته‌بندی با مواد فوق آب‌گریز پوشش داده شده باشد ظرف تمیز می‌ماند. هرچه ویسکوزیته دینامیک بیشتر باشد مقدار چسبیدن ماده غذایی به بسته‌بندی بیشتر است [۴]. اثر ضد چسبندگی سطوح فوق آب‌گریز باعث تأخیر در فساد ماده غذایی و انتشار میکروارگانیسم‌ها در بسته‌بندی می‌شود [۲۰].

شکل (۶): بسته‌بندی معمولی (سمت چپ)، بسته‌بندی با سطح فوق آب‌گریز (سمت راست) [۲۱].

۶-۲- ساخت مواد بسته‌بندی مقاوم به رطوبت

کاغذ و مقوا از جمله متداول‌ترین مواد بسته‌بندی هستند. این مواد از نظر قابلیت بازیافت، زیست‌تخریب‌پذیری و تجدیدپذیری بهتر از پلاستیک هستند. به‌دلیل وجود گروه‌های هیدروکسیل فراوان در ساختار فیبر کاغذ، این ماده خاصیت آب‌دوستی زیادی دارد[۱۳]. بدین ترتیب، کاغذ و مقوا مانع خوبی در برابر بخار آب، گاز و روغن نیست. اصلاح ویژگی‌های سطح باعث ایجاد مانع یا سدی در برابر آب می‌شود. امروزه با کاربرد سطوح فوق آب‌گریز این مسئله تا حدی زیادی مرتفع شده است [۱۰] و [۲۲]. استفاده از کاغذ زیست‌تخریب‌پذیر با پوشش فوق آب‌گریز جایگزین خوبی برای ظروف پلاستیکی یک‌بارمصرف مواد غذایی خواهد بود [۲۳].



شکل (۷): کاغذ معمولی (سمت چپ) و کاغذ با پوشش فوق آب‌گریز (سمت راست) [۲۴].

همان‌طور که در شکل (۷) می‌بینید کاغذ با پوشش فوق آب‌گریز رطوبت را جذب نمی‌کند و رنگی نمی‌شود (شکل سمت راست)، درحالی‌که کاغذ معمولی توسط محلول کاملاً خیس و رنگی شده است (شکل سمت چپ).

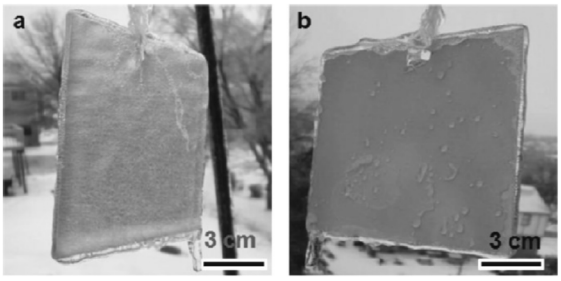
۶-۳- تولید پوشش برای کاهش پدیده مهاجرت

مهاجرت به معنی انتقال مواد اولیه از سطح مواد بسته‌بندی به غذا است. مهاجرت در اصل یک فرایند انتشار است که ممکن است به‌وسیله واکنش‌های درونی ترکیبات غذا با مواد بسته‌بندی تأثیر بپذیرد. شواهد نشان می‌دهد بسته‌بندی نامناسب می‌تواند از طریق مهاجرت ترکیبات از ماده بسته‌بندی به ماده غذایی، خود به‌عنوان منبع آلودگی به‌حساب آید. ازاین‌رو پدیده مهاجرت معمولاً به‌دلیل خطراتی که ممکن است برای سلامت مصرف‌کننده ایجاد کند در صنعت بسته‌بندی حائز اهمیت است. آنالیز ماده مهاجرت کننده در ماده غذایی به‌دلیل غلظت‌های پایین و پیچیدگی بافت ماده غذایی پرهزینه و زمان بر است؛ ازاین‌رو پیشگیری از ورود چنین ترکیباتی به غذا از بهترین راهکارهاست. پوشش‌دهی سطح با مواد فوق آب‌گریز از جمله روش‌های پیشنهادی بسیاری از محققان است. این روش باعث پر کردن منافذ و بهبود ویژگی‌های بسته‌بندی می‌شود. برای مثال کاغذ و مقوا معمولاً منافذی عریض و با اندازه‌های متنوع دارد که مهاجرت مواد به سهولت رخ می‌دهد. پوشش‌دهی با مواد فوق آب‌گریز ضمن کاهش مصرف جوهر چاپ باعث کاهش ریسک پدیده مهاجرت می‌شود [۲۵].

۶-۴- سطوح با اثر ضد یخ

زنجیره تأمین سرد که به آن زنجیره تأمین کنترل‌شده دمایی هم می‌گویند، مجموعه‌ای از فعالیت‌های شرکت‌های لجستیکی برای حفظ شرایط مناسب کالاها، به‌خصوص در یک محدوده دمایی مشخص است. مدیریت زنجیره سرد نقش مهمی در صنعت غذای جهانی دارد چرا که عمر نگهداری بسیاری از محصولات کوتاه است و بایستی تحت شرایط کنترل‌شده از زمان تولید تا لحظه تحویل به مصرف‌کننده قرار گیرند. در دمای پایین بخار آب چگالش یافته و تشکیل یخ می‌دهد. یخ زدن محصولات درون بسته، ایجاد یخ روی سطوح داخلی و خارجی ظروف مواد غذایی و وسایل حمل بار و یخ زدن کندانسور سردخانه می‌تواند بر یکنواختی شرایط و ایمنی محصولات اثرگذار باشد و همواره از معضلات زنجیره سرد است [۲۶].

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است ورق آلومینیومی معمولی در شرایط سرد و یخبندان به‌طور کامل یخ می‌زند درحالی‌که ورق آلومینیومی دارای پوشش فوق آب‌گریز دارای بخش یخزده محدودی است که عمدتاً در کناره‌ها که فاقد پوشش بوده، رخداده است [۲۷]. استفاده از چنین پوشش‌هایی مشکلات مرتبط با یخ زدن تجهیزات سرمایشی و وسایل حمل بار در زنجیره تأمین ماده غذایی را کاهش می‌دهد.

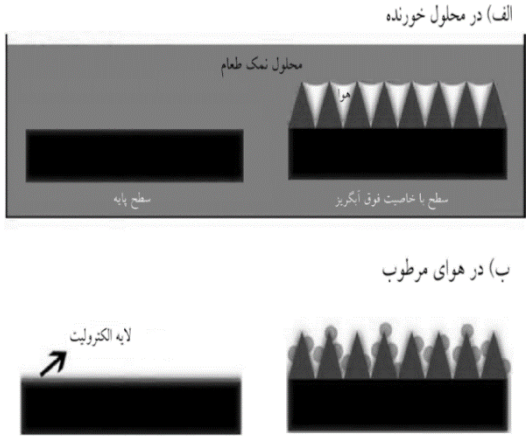


شکل (۸): ورق آلومینیومی معمولی در شرایط یخبندان (سمت چپ) و ورق دارای پوشش فوق آب‌گریز در همان شرایط (سمت راست) [۲۷].

۶-۵- تولید پوشش‌های با اثر ضد خوردگی

واژه خوردگی معمولاً به تشکیل زنگ و یا اکسید شدن سطح فلز اطلاق می‌شود. خوردگی یکی از مشکلات مهم در قوطی‌های فلزی مورداستفاده در صنعت بسته‌بندی است. خوردگی در سطح خارجی قوطی‌های کنسرو به‌وسیله عوامل محیطی و در سطح داخلی به‌دلیل واکنش‌های شیمیایی بین ماده غذایی و قوطی فلزی ایجاد می‌شود. این واکنش در ابتدا منجر به آزاد شدن الکترون و سپس تولید هیدروژن می‌گردد. با ادامه واکنش شیمیایی، در سطح فلز حفره‌هایی ایجاد می‌شود و یون‌های فلزی از سطح قوطی به ماده غذایی آزاد می‌گردد. خوردگی در نهایت باعث تغییرات ارگانولیپتیکی، از بین رفتن خلأ، تورم هیدروژنی و یا سوراخ شدن قوطی می‌شود [۲۸].

استفاده از مواد فوق آب‌گریز باعث کاهش تماس رطوبت و یون‌های مخرب با سطح می‌شود. چنین سطحی با ایجاد یک‌لایه هوا مانند یک دی‌الکتریک عمل می‌کند و فرایند انتقال الکترونی را محدود می‌کند (شکل ۹) [۲۹].



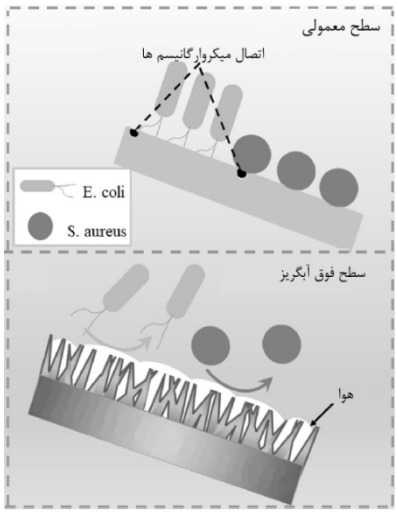
شکل (۹): افزایش مقاومت سطح نسبت به خوردگی با به‌کارگیری مواد فوق آب‌گریز[۲۹].

۶-۶- طراحی سطوح ضد رسوب

رسوب تجمع مواد ناخواسته (غیرآلی، آلی، مواد کلوئیدی و ارگانیسم‌های زنده) روی سطوح جامد است که با خوردگی ارتباط نزدیک دارد. رسوبات در خطوط لوله‌های فراوری و مخازن نگهداری مواد غذایی با گذشت زمان ضخامت و وسعت بیشتری را در برمی‌گیرند. این امر شرایط رشد و تکثیر انواع باکتری‌ها را در این فضا فراهم می‌کند و در نهایت منجر به بروز آلودگی در محصولات نهایی می‌شود. کاربرد مواد فوق آب‌گریز در طراحی سطوح به‌دلیل خاصیت خود تمیز شونده مانع از رسوب می‌شود [۲۹].

۶-۷- ساخت سطوح با اثر ضد میکروبی

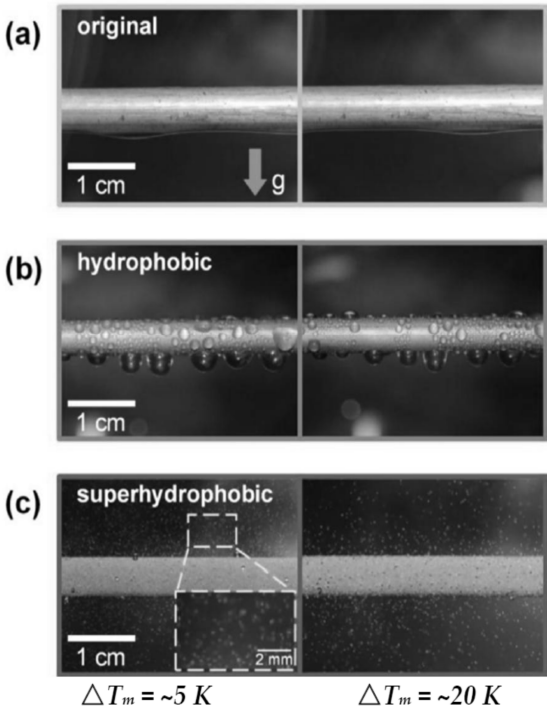
خیس شدن یکی از ویژگی‌های مهم سطوح جامد است که نقش کلیدی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مانند خوردگی و فعالیت باکتریایی دارد. مورفولوژی سطح بر خیس شدن آن تأثیرگذار است. در سطوح فوق آب‌گریز به‌دلیل وجود ناهمواری‌های سطحی، بالشتک‌های هوا ایجاد می‌شود که مانع از اتصال باکتری‌ها به سطح می‌شود (شکل ۱۰). کاربرد مواد فوق آب‌گریز به‌عنوان پوشش در بسته‌بندی باعث کاهش احتمال آلودگی‌های عامل عفونت و مسمومیت غذایی می‌شود. به‌علاوه، احتمال فساد و بروز ضایعات و تلفات را نیز به حداقل می‌رساند [۲۶].



شکل (۱۰): اثر ضد میکروبی سطوح فوق آب‌گریز [۲۶].

۶-۸- سایر کاربردها

نیروی درگ یا پسار[1] عبارت است از نیروی مقاومت ناشی از حرکت بین سیال و جسم که بر خلاف جهت سرعت جریان عمل می‌کند. سطوح خطوط لوله کارخانه‌ها معمولاً زبر و آب‌دوست است. در این شرایط سیال درون لوله‌ها نیازمند صرف انرژی زیاد برای حرکت است. به‌کارگیری سطوح فوق آب‌گریز با ویژگی کاهش نیروی پسار باعث غلبه بر این مسئله می‌شود. انرژی سطح بسیار کم و تأثیر کشش سطحی که باعث کاهش تماس بین سیال و سطح دیواره لوله می‌شود دو عامل اصلی کاهش نیروی پسار است. علاوه بر خطوط لوله کارخانه‌ها مانند بخش پر کردن، این مسئله در مبدل‌های حرارتی و حتی سیکل تبرید نیز اهمیت دارد. از سطوح فوق آب‌گریز می‌توان برای انتقال حرارت به سیالات بسیار ویسکوز استفاده کرد. در این حالت مقاومت به جریان کاهش می‌یابد و کارایی انتقال حرارت بهبود می‌یابد. در بحث چگالش نیز سطح آب‌دوست باعث چگالش به‌صورت لایه یا فیلم و سطح آب‌گریز باعث چگالش قطره‌ای می‌شود (شکل ۱۱). آنچه مسلم است کارایی چگالش قطره‌ای بیشتر از لایه‌ای است. به‌علاوه، استفاده از سطح فوق آب‌گریز تشکیل یخ را به تعویق می‌اندازد و سیکل تبرید با کارایی بیشتری کار خواهد کرد [۲]. این امر در نگهداری بسته‌های غذایی و تکمیل زنجیره سرد محصولات حائز اهمیت است.



شکل (۱۱): چگالش روی سطح اصلی (بالا)، آب‌گریز (وسط)، فوق آب‌گریز (پایین) [۲].

۷- نتیجه‌گیری

سطوح فوق آب‌گریز در ابتدا با الهام از طبیعت و به‌دلیل قابلیت خودتمیزشوندگی موردتوجه قرار گرفتند. این سطوح به‌تدریج در

[1] Drag force

عرصه‌های مختلف وارد شدند و توجه محققان صنعت بسته‌بندی و زنجیره تأمین را جلب کردند. ویژگی‌هایی همچون اثر ضد میکروبی، ضد چسبندگی، ضد خوردگی، ضد رسوب، ضد یخ‌زدگی و ضد مه، مقاومت به رطوبت و کاهش پدیده مهاجرت باعث جذابیت تولید این سطوح در عرصه بسته‌بندی و زنجیره تأمین شد. علی‌رغم کاربردهای فراوان سطوح فوق آب‌گریز موانعی همچون قیمت بالا، ماندگاری پایین و پیچیدگی تکنیکی همچنان از معایب آن‌ها است. سطوح فوق آب‌گریز در تماس با محیط اسیدی و قلیایی، دمای بالا، سایش مکانیکی و تأثیر چرخه‌ای ویژگی فوق آب‌گریز خود را از دست می‌دهند؛ ازاین‌رو، در کنار توانایی سطوح بایستی پایداری آن‌ها نیز بررسی شود.

۸- مراجع

[1] M. Ravaghi, "Tracing of packages in supply chain based on IoT and blockchain technologies," J. Packag. Sci. Technol., vol. 12, no. 47, pp. 57–64, 2022 (In Persian).

[2] M. Haji, L. Kerbache, M. Muhammad, and T. Al-Ansari, "Roles of technology in improving perishable food supply chains," Logistics, vol. 4, no. 33, pp. 1–24, 2020.

[3] H. Cheng et al., "Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications," Food Chem., vol. 375, no. July 2021, p. 131738, 2022.

[4] J. Li et al., "All-natural superhydrophobic coating for packaging and blood-repelling materials," Chem. Eng. J., vol. 410, no. December 2020, p. 128347, 2021.

[5] Y. Zhang, Z. Zhang, J. Yang, Y. Yue, and H. Zhang, "A review of recent advances in superhydrophobic surfaces and their applications in drag reduction and heat transfer," Nanomaterials, vol. 12, no. 1, 2022.

[6] M. Liravi, H. Pakzad, A. Moosavi, and A. Nouri-Borujerdi, "A comprehensive review on recent advances in superhydrophobic surfaces and their applications for drag reduction," Prog. Org. Coatings, vol. 140, no. November 2019, p. 105537, 2020.

[7] X. Gao and L. Jiang, "Biophysics: water-repellent legs of water striders," Nature, vol. 432, p. 36, 2004.

[8] M. A. Samaha, H. V. Tafreshi, and M. Gad-el-Hak, "Superhydrophobic surfaces: From the lotus leaf to the submarine," Comptes Rendus - Mec., vol. 340, no. 1–2, pp. 18–34, 2012.

[9] J. J. Victor, "Biology inspired nano-materials: superhydrophobic surfaces by," University of Toronto, 2012.

[10] H. Zhang, Y. Cheng, and L. Zhang, "Superhydrophobic surfaces with dual-scale roughness and water vapor-barrier property for sustainable liquid packaging applications," Cellulose, 2022.

[11] A. Samanta, Q. Wang, S. K. Shaw, and H. Ding, "Roles of chemistry modification for laser textured metal alloys to achieve extreme surface wetting behaviors," Mater. Des., vol. 192, no. August 2021, p. 108744, 2020.

[12] H. Chen, J. L. Muros-Cobos, and A. Amirfazli, "Contact angle measurement with a smartphone," Rev. Sci. Instrum., vol. 89, no. 3, pp. 1–7, 2018.

[13] S. Jiang, S. Zhou, and B. Du, "A method for preparing superhydrophobic paper with high stability and ionic liquid-induced wettability transition," Materials, vol. 14, no. 16. 2021.

[14] S. Jiang, S. Zhou, B. Du, and R. Luo, "Preparation of superhydrophobic paper with double-size silica particles modified by amino and epoxy groups," AIP Advances, vol. 11, no. 2. 2021.

[15] M. Pardo-Figuerez, A. López-Córdoba, S. Torres-Giner, and J. M. Lagaron, "Superhydrophobic Bio-Coating made by co-continuous electrospinning and electrospraying polyethylene terephthalate films proposed as easy emptying transparent food packaging," Coatings, vol. 8, no. 10. 2018.

[16] S. Zhang et al., "Superhydrophobic and antioxidative film based on edible materials for food packaging," Langmuir, vol. 37, no. 16, pp. 5066–5072, 2021.

[17] A. Raman, J. S. Jayan, B. D. S. Deeraj, A. Saritha, and K. Joseph, "Electrospun nanofibers as effective superhydrophobic surfaces: a brief review," Surfaces and Interfaces, vol. 24, no. October 2020, p. 101140, 2021.

[18] M. Ghasemlou, P. H. Le, F. Daver, B. J. Murdoch, E. P. Ivanova, and B. Adhikari, "Robust and eco-friendly superhydrophobic starch nanohybrid materials with engineered lotus leaf mimetic multiscale hierarchical structures," ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 13, no. 30, p. 36558, 2021.

[19] C. Yang et al., "Preparation of edible superhydrophobic Fe foil with excellent stability and durability and its applications in food containers with little residue," New J. Chem., vol. 43, no. 7, pp. 2908–2919, 2019.

[20] L. Zhao, G. Duan, G. Zhang, H. Yang, S. Jiang, and S. He, "Electrospun functional materials toward food packaging applications: A review," Nanomaterials, vol. 10, no. 1, 2020.

[21] I. Fletcher, "Permanent Slippery Coatings For Food Packaging: What You Need To Know," https://www.foodonline.com, 2015.

[22] S. A. Ibrahim and M. Z. Sultan, "Superhydrophobic coating polymer/silica nanocomposites: enhancing water vapor barrier properties of packaging paper with ultra-thin PS/silica nanocomposite polymer coating," Egypt. J. Chem., vol. 62, no. 1, pp. 131–139, 2019.

[23] G. Mcguire, R. Woolley, and R. Llp, "Hydrophobic coatings and the drive to replace plastic packaging," IAM, no. July, 2019.

[24] Q. Wang et al., "Superhydrophobic paper fabricated via nanostructured titanium dioxide-functionalized wood cellulose fibers." J. Mater. Sci., vol. 55, pp. 7084–7094, 2020.

[25] Saber Ibrahim and H. Fahmy, "The effect ecofriendly

superhydrophobic nano composites coating and penetration of printing inks on paperboard packaging materials," Int. Des. J., vol. 11, no. 1, pp. 319–326, 2021.

[26] X. Lan, B. Zhang, J. Wang, X. Fan, and J. Zhang, "Hydrothermally structured superhydrophobic surface with superior anti-corrosion, anti-bacterial and anti-icing behaviors," Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp., vol. 624, no. April, pp. 1–11, 2021.

[27] L. Cao, A. K. Jones, V. K. Sikka, J. Wu, and D. Gao, "Anti-icing superhydrophobic coatings," Langmuir, vol. 25, no. 21, pp. 12444–12448, 2009.

[28] R. Sani, M. Mohammadi, and M. Zare, "Corrosion in metal cans," J. Packag. Sci. Technol., vol. 9, no. 36, pp. 60–69, 2018 (In Persian).

[29] V. S. Saji, "Wax-based artificial superhydrophobic surfaces and coatings," Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp., vol. 602, no. June, 2020.

Journal of Packaging Science and Technology

Vol. 13, No. 4, Winter, 2023

Fabrication and Application of Superhydrophobic Surfaces in the Packaging Industry and Food Supply Chain

Maryam Ravaghi*

* Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran

(Received: 24/08/2022; Accepted: 04/01/2023)

Abstract

Superhydrophobic surfaces have water repellent properties, and water droplets easily move down on such a tilted surface. Over the years, many researchers have been working on different fabrication methods and applications of these surfaces in diverse fields. The present review focuses mainly on the recent progress in different construction methods and applications of superhydrophobic surfaces in the packaging industry and food supply chain. Hence, this study investigates the essential extracted information from some articles published from 2004- 2021 by Scopus, Springer, Science Direct, Pub Med, Sage journals and the Journal of Packaging Science and Technology databases. Researchers have found various applications of this technology in the development of surfaces with antimicrobial, anti-sticking, anticorrosion, antifouling, anti-icing, antifogging, moisture resistant and migration phenomenon reduction properties, which play key roles along the supply chain (from the time they are manufactured until they reach the end user) especially in the packaging industry, fabricating containers and vehicles. Despite all the researches, more investigations are needed as this technology suffers from limitations such as high cost, poor durability and technical complexity

Keywords: Packaging, Coating, Contact Angle, Superhydrophobic Surfaces

*Corresponding Author E-mail: ravaghi.maryam@gmail.com