# Preparation of an Antimicrobial Green Tissue for the Conservation of Historical / Cultural Works

**Samera Salimpour Abkenar [1*], Reza Mohamad Ali Malek [2]**

1. Assistant Professor of Research Group of Traditional Arts, Research Institute of Cultural, Historical, and Tourism (RICHT), Tehran, Iran.

2. Associate professor of textile chemistry and fiber science, Amirkabir University of Technology.

## Abstract

Nowadays, preparing a natural, non-toxic, low-cost, and biodegradable substrate called "Green sheet" is one of the new approaches to Nano sciences and biotechnology. Green sheets have multiple functions in various industries such as food packaging, preparation of wound dressings, hospital clothes, drug delivery systems, perfumery, antiperspirant, antimicrobial, and insect repellent, and they have found a special position. One of their unique applications is the use of cultural heritage, such as conservation in the restoration of ancient works, and historical documents, packaging and transportation of historical objects, and making traditional dolls and embroidery. In this study, a natural sheet was prepared using unreelable cocoons through degumming, opening, and finishing processes in the presence of a natural crosslinking agent and the well-known pad-dry-cure method. Tea tree and oregano plant oils were applied to achieve an antimicrobial property. The antimicrobial activity was assessed against Staphylococcus aureus, Escherichia coli, and Candida albicans through qualitative and quantitative methods. The results showed that the silk sheet had good resistance against the mentioned microorganisms.

**Keywords:** Silk, Green tissue, antimicrobial property, Conservation knowledge, Nanotechnology and biotechnology.

**Knowledge of Conservation and Restoration**

Vol. 3(3) No.5
December 2020

https://kcr.richt.ir

Pages: 17 to 30

Corresponding Author

**Samera Salimpour Abkenar**

Assistant Professor of Research Group of Traditional Arts, Research Institute of Cultural, Historical, and Tourism (RICHT), Tehran, Iran.

Email
s.salimpour@richt.ir

Copyright © 2020,Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

# تهیه یک بستر سبز ضدمیکروبی برای حفاظت از آثار تاریخی– فرهنگی

**سامرا سلیم‌پور آبکنار[1]*، رضا محمدعلی مالک[2]**

۱. استادیار، گروه پژوهشی هنرهای سنّتی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

## چکیده

تهیه یک بستر طبیعی، غیرسمی، ارزان قیمت و زیست تخریب‌پذیر با نام بستر یا پوشش سبز (Green sheet) از رویکردهای نوین حوزه علوم نانو و فناوری زیستی است. امروزه بسترهای سبز با کاربردهای چندگانه در صنایع مختلفی نظیر بسته‌بندی مواد غذایی، تهیه پانسمان و زخم‌پوش، لباس‌های بیمارستانی، سیستم‌های دارورسانی، معطرسازی، ضدتعریق، ضدمیکروب، دافع حشرات و غیره از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. یکی از قابلیت‌های کاربردی این بسترها استفاده از آن‌ها در حوزه میراث فرهنگی همچون: حفاظت در مرمت آثار باستانی، حفاظت از اوراق تاریخی، بسته‌بندی و حمل‌ونقل اشیاء تاریخی و مکشوفه، ساخت عروسک‌ها، رودوزی‌های سنّتی و غیره است. بر این اساس، پژوهش پیش رو بر شیوه تهیه یک بستر طبیعی، ارزان قیمت و دوستدار محیط زیست با استفاده از پیله‌های ضایعاتی برای کاربرد در حوزه میراث فرهنگی- بالاخص حفاظت و مرمت- متمرکز شده است. در گام اول، بستر طبیعی مورد نظر با استفاده از پیله‌های ضایعاتی تحت فرآیندهای تکمیلی (صمغ‌زدایی، بازکردن و تکمیلی) تهیه شدند. سپس، نانوساختار طبیعی بتاسایکلودکسترین (β-CD) به روش ساده و متداول پد-پخت-خشک و به کمک اتصال‌دهنده طبیعی کربوکسیلیک اسید بر روی بستر مذکور اتصال یافت. برای ایجاد خاصیت ضدمیکروبی نیز از روغن‌های ضروری گیاهی (HEOs) مستخرج از گیاهانی با نام‌های درخت چای (TTO) و پونه کوهی (OP) استفاده شد. نهایتاً، فعالیت ضدمیکروبی این بستر در مقابل میکروارگانیسم‌های شناخته شده استافیلوکوکوس اورئوس (Staphylococcus aureus)، اشرشیا کلای (Escherichia coli) و کاندیدا آلبیکانس (Candida albicans) به روش‌های کیفی و کمی ارزیابی گردید. نتایج نشان می‌دهد که بستر سبز تهیه شده از مواد طبیعی، مقاومت بسیار خوبی در برابر رشد میکروارگانیسم‌های نامبرده شده دارد.

**واژگان کلیدی:** ابریشم، بستر سبز، خاصیت ضدمیکروبی، دانش حفاظت، نانو و فناوری زیستی.

فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال سوم، شماره ۳
شماره پیاپی ۵ ، پاییز ۱۳۹۹

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۱۷ تا ۳۰

نویسنده مسئول

**سامرا سلیم‌پور آبکنار**

استادیار، گروه پژوهشی هنرهای سنّتی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.

رایانامه

s.salimpour@richt.ir

مقاله منتخب سیزدهمین همایش دو سالانه حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی – فرهنگی و آرایه های معماری.

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

## مقدمه

یک بستر یا پوشش ضدمیکروبی[1] حاوی یک عامل ضدمیکروبی است که توانایی مهار رشد میکروارگانیسم‌ها[2] اعم از باکتری و قارچ را داراست. این بسترها به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف (نظیر بیمارستان‌ها، اقامتگاه‌ها، صنایع آرایشی- بهداشتی، دارویی، کشاورزی، غذایی، پوشاک، مبلمان و غیره) مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین و رایج‌ترین کاربرد این بسترها در حوزه بهداشت و درمان برای استریل کردن دستگاه‌های پزشکی، روکش‌های تخت و لباس‌های کادر درمان و بیماران در ارتباط با عفونت‌های مرتبط با محیط بیمارستانی است که سالیانه درصد بالایی از مرگ‌ومیر را به خود اختصاص می‌دهد. بااین‌حال، نیاز به استفاده از این پوشش‌ها در سایر زمینه‌های نامبرده شده تقاضا برای تولید روزافزون این محصول را فزونی بخشیده است. حفاظت از آثار تاریخی، یکی از حوزه‌های نیازمند به استفاده از بسترهای محافظ با خاصیت ضدمیکروبی است. ضرورت استفاده از یک بستر یا پوشش ضدمیکروبی برای حفظ اشیاء مکشوفه در مقابل عوامل مخرب خارجی (نظیر رطوبت، نور، قارچ و کپک)، بسته‌بندی مناسب برای یک حمل‌ونقل ایمن، قرار دادن تکه‌های مکشوفه یک منسوج بر روی بستری محافظ برای مطالعه و یا به نمایش در آوردن آن در موزه‌ها، حفاظت از اوراق تاریخی از جنس کاغذ و یا چرم‌های طبیعی که همواره در معرض خطر آسیب جدی در برابر عوامل محیطی هستند، از مهم‌ترین آن‌هاست. همچنین، استفاده از این پوشش‌ها در دوخت عروسک‌ها و رودوزی‌های سنّتی که اغلب با پوست بدن در تماس هستند، علاوه بر عدم انتقال بیماری‌های عفونی به افزایش طول عمر و ماندگاری آن‌ها نیز کمک می‌کند.

نکته مهم در تهیه چنین بسترهایی آن است که بدون ایجاد عوارض جانبی و یا آلایندگی محیطی، زیست میکروارگانیسم‌ها را مختل کرده و از رشد آن‌ها جلوگیری کند. در سال‌های اخیر با تکیه بر انقلابی که فناوری نانو در حوزه‌های مختلف زندگی بشر به‌وجود آورده تولید چنین بسترهایی با پیشرفت‌های چشمگیری همراه بوده است. امروزه برای تهیه بستر یا پوشش ضدمیکروبی از موادی با ابعاد نانو استفاده می‌شود که دارای ویژگی‌های چندکاره[3] هستند؛ بدین مفهوم که هم‌زمان چند خاصیت مختلف در یک محصول را ایجاد می‌کنند. در این بین، بسترهای ضدمیکروبی که ویژگی‌های طبیعی، ارزان‌قیمت، غیرسمی، غیر التهابی، زیست تخریب‌پذیر با فرآیند تولید آسان داشته باشند، از استقبال گسترده‌تری برخوردارند. در هر حال، با وجود پژوهش‌های مختلفی که بر تهیه بسترهای ضدمیکروبی متمرکز شده‌اند، به اندک مواردی بر می‌خوریم که اهداف آن‌ها با رویکرد این پژوهش همسو باشند. به‌طورکلی، تحقیقات منتشر شده با موضوع ضدمیکروبی کردن به چند دسته مهم تقسیم می‌شوند.

- ا ستفاده از بیوپلیمرهای طبیعی همچون کیتوسان و آلجینات برای تهیه بستر ضدمیکروبی (Harugade et al., 2023).
- استفاده از نانو ذرات فلزی مانند: نقره، مس و دی اکسید تیتانیوم، اکسید روی و غیره (Bahandari et al., 2022).
- استفاده از ترکیبات نیتروژن‌دار نظیر: N- هالامین‌ها، کواترنری‌ها، دندریمرها و غیره (Gulati et al., 2022).
- استفاده از روش‌های مختلف همچون: پلاسما، سل‌ژل، پ ت UV و غیره (Naebe et al, 2022).

عموماً این پژوهش‌ها به معرفی مواد ضدمیکروبی و یا روش‌های کاربردی جدید برای افزایش کارآیی محصول با خاصیت ضدمیکروبی پرداخته‌اند و پارامترهایی نظیر: کم‌هزینه بودن، دوستدار محیطزیست و روش تهیه آسان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، هدف اصلی این پژوهش تهیه یک بستر (پوشش) ضدمیکروبی با ویژگی‌های طبیعی بودن، عدم سمیت، زیست تخریب‌پذیری و دوستدار محیطزیست است که با استفاده از یک روش ساده و کم‌هزینه تولید می‌شود.

## مبانی نظری

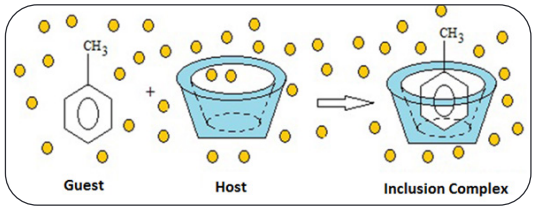
ابریشم[4] به دلیل جلای طبیعی، زیردست نرم، جذب رطوبت بالا، راحتی در پوشش و مشابهت با پوست بدن انسان یک لیف طبیعی ارزشمند محسوب

می‌شود. این لیف حیوانی گران‌قیمت از قدمتی ۵۰۰۰ ساله برخوردارست که توسط کرم ابریشم اهلی[۵] تولید می‌شود (Luo and Cao, 1997). ابریشم به فرم دو فیلامنت ممتد و مجزا از غده‌های ابریشم سازی که در دو سمت سر کرم ابریشم اهلی جای دارند، به فرم پیله ریسیده می‌شود. این دو فیلامنت[۶] پروتئینی که فیبروئین[۷] نام دارند، حدود ۶۷-۶۳ درصد وزنی ساختار ابریشم خام را تشکیل می‌دهند. فیبروئین‌ها هنگام خروج از دهان کرم ابریشم با بزاق دهانش که به صمغ ابریشم یا سریسین[۸] مشهورند، آغشته شده و به محض خروج در مجاورت هوا منجمد شده و دو فیلامنت مذکور به هم اتصال می‌یابند. سریسین که حدود ۲۵-۲۲ درصد لیف ابریشم خام را تشکیل می‌دهد، حاوی ترکیباتی نظیر: واکس[۹]، کربوهیدرات، رنگدانه‌ها و ترکیبات غیر آلی است (Kongkachui et al., 2002).

ابریشم به‌عنوان یک پلیمر زیستی طبیعی از قابلیت خوبی برای عامل‌دار شدن برخوردار است. خواص ساختاری، مکانیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و تطبیق‌پذیری خوب این لیف سبب شده که در سال‌های اخیر از این پلیمر طبیعی و پروتئینی در حوزه‌های زیست پزشکی و مهندسی بافت به‌وفور استفاده شود. برای تهیه منسوجی با خاصیت ضدمیکروبی معمولاً از پلیمرهای آلی مانند تریکلوسان[۱۰] و پلی‌فنول‌ها[۱۱]، غیرآلی فلزی (نظیر: نمک‌های کروم، نقره، روی، مس و یا دی اکسید تیتانیوم)، بیوپلیمرهای طبیعی کیتوسان[۱۲]، ترکیبات نیتروژن‌داری همچون دندریمرها[۱۳] و هایپربرنچدها[۱۴] در فرآیند اصلاح سطح استفاده می‌شود (Salimpour and Malek, 2024). با این وجود، چون این ترکیبات ممکن است اثرات سمی و مضر ولو به مقدار اندک داشته باشند، استفاده از ترکیبات طبیعی با خاصیت ضدمیکروبی در پژوهش‌های جدید رو به افزایش و ارزشمندتر است.

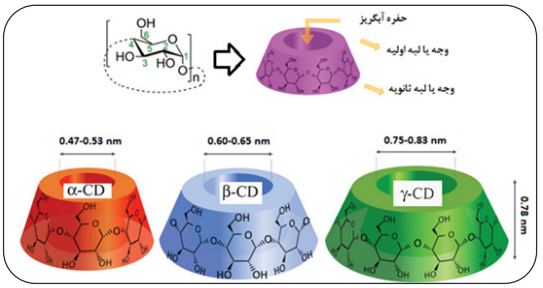
روغن‌های مستخرج از گیاهان دارویی با نام روغن‌های ضروری گیاهی[۱۵] یکی از این ترکیبات طبیعی هستند که عموماً در صنایع غذایی، آرایشی، بهداشتی و دارویی با نقش محافظت کننده، طعم‌دهنده و خوشبوکننده افزوده می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهند که این روغن‌ها دارای خواص متنوعی همچون: آنتی‌باکتریالی، آنتی‌اکسیدانی، ضد قارچ و ویروس، ضد حشره، ضد تومور و در برخی موارد مهارکننده سرطان هستند. مهم‌ترین و متداول‌ترین این روغن‌ها که تاکنون در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از: رزماری، دارچین، زردچوبه، اکالیپتوس، میخک، آویشن، زیره، نعنا، پونه و روغن درخت چای (Parham et al., 2020). طبیعت آب‌گریز، سرعت تبخیر بالا و رهایش کنترل نشده[۱۶] از مشکلات عمده استفاده از این روغن‌هاست. از این رو، یافتن راه‌هایی برای مقابله با این معایب به هنگام مصرف این روغن‌ها امری ضروری است. مطالعات نشان می‌دهند کپسوله کردن (Encapsulation) این روغن‌ها درون یک بستر حامل می‌تواند کارآیی آن‌ها را افزایش داده و از معایب‌شان به‌طور چشمگیری بکاهد (Sajed et al., 2013).

سایکلودکسترین‌ها[۱۷] از ترکیبات طبیعی هستند که قادر به تشکیل کمپلکس، افزایش پایداری و حلالیت روغن‌های ضروری گیاهی‌اند. این ترکیبات می‌توانند به کمک حبس مولکولی روغن‌های گیاهی آب‌گریز در درون حفره‌های آب‌گریز خود، کمپلکس درهم جای[۱۸] تشکیل داده و پس از ذخیره‌سازی، آن‌ها را به آرامی و به شکل کنترل شده در محیط رها سازند (شکل ۱).




شکل ۱. کمپلکس درهم جای مابین حفره سایکلودکسترین و مولکول میهمان (Szejtli, 2004).

سایکلودکسترین‌ها در واقع الیگوساکاریدهای حلقوی[۱۹] دارای ۶، ۷ و یا ۸ حلقه گلوکوپیرانوزی[۲۰] هستند که به ترتیب با نام‌های β-، α-، و γ- سایکلودکسترین خوانده می‌شوند. در میان این ترکیبات غیرسمی و زیست تخریب‌پذیر، بتاسایکلودکسترین‌ها (β-CD) ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین ترکیبات با بالاترین خاصیت زیست




شکل ۲. ساختار سایکلودکسترین‌ها.
(Maesta Bezerra et al., 2020).

سازگاری هستند (شکل ۲). همچنین، این ترکیبات از کمترین میزان التهاب‌آوری یا آلرژی بر روی پوست بدن انسان برخوردارند (Martel et al., 2002)؛ بنابراین از آن‌ها می‌توان به‌عنوان حامل ترکیبات ضدمیکروبی گیاهی در بسترهای طبیعی همچون ابریشم استفاده کرد.

## مواد و روش‌ها

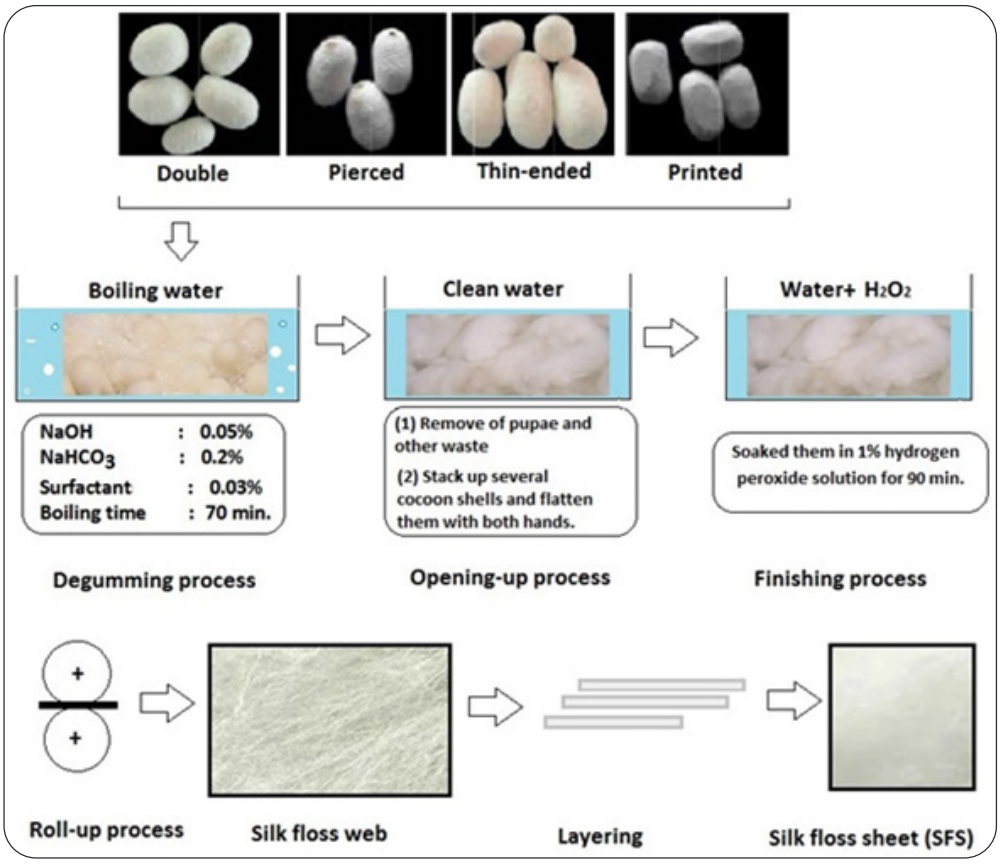
مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش، در جدول ۱ نشان داده شده است. پیله‌های ضایعاتی توسط کارخانه ابریشم گیلان اهدا شد. بتاسایکلودکسترین (β-CD) نیز از شرکت سیگما آلدریچ با کد محصول C4767 تهیه شد و در جای خشک و به دور از نور نگهداری گردید. همچنین، روغن‌های گیاهی از شرکت دینه دارو خریداری و بدون هیچگونه خالص‌سازی استفاده شدند. همچنین، آزمایشات ضدمیکروبی در آزمایشگاه میکروب‌شناسی دانشکده پزشکی دانشگاه شهید بهشتی انجام شد.

## تهیه بستر ابریشمی

برای تهیه بستر ابریشمی (SFS) از پیله‌های ضایعاتی (نظیر: دوتایی، رنگی، سوراخ شده و پوست نازک) استفاده شد. این بستر طی سه مرحلهٔ صمغ‌گیری[۲۱]، باز کردن[۲۲] و عملیات تکمیلی[۲۳] از پیله‌های مذکور تهیه گردید (شکل ۳). در مرحله صمغ‌گیری، پیله‌های ضایعاتی در آب حاوی مواد شیمیایی سود (۰/۰۵ درصد)، بی‌کربنات سدیم (۰/۲ درصد) و سورفکتانت (۰/۰۳ درصد) به مدت ۷۰ دقیقه جوشانده شدند. سپس، پیله‌ها با دست باز شده و شفیره‌ها و سایر ناخالصی‌ها خارج شدند. پس از آن، چندین پیله بر روی هم قرار داده شده و به کمک هر دو دست صاف شده تا شبیه به یک صفحه شوند. آنگاه، صفحات صاف شده درون آب حاوی پراکسید هیدروژن (۱ درصد) و به مدت ۹۰ دقیقه

جدول ۱. خصوصیات مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش.

| ماده اولیه | کد محصول | شرکت تولید کننده |
|---|---|---|
| پیله‌های ضایعاتی | – | کارخانه ابریشم گیلان |
| بتاسایکلودکسترین (BCD) | C4767 | Sigma Aldrich |
| سیتریک اسید (CA) | C0759 | Sigma Aldrich |
| سدیم هیپوفسفیت (SHP) | – | Sigma Aldrich |
| مواد مغذی مولر هینتون | – | Merck |
| بافر سالین فسفات (PBS) | – | Merck |
| (Brain heart infusion (BHI | – | Merck |
| اتانول خالص | – | Merck |
| باکتری‌ها و قارچ | – | آزمایشگاه میکروب شناسی دانشکده پزشکی دانشگاه شهید بهشتی |
| روغن درخت چای (TTO) | – | شرکت دینه دارو |
| روغن پونه کوهی (OP) | – | شرکت دینه دارو |
| سایر مواد شیمیایی | – | درجه آزمایشگاهی |




شکل ۳. فرآیند تهیه بستر ابریشمی از پیله‌های ضایعاتی.

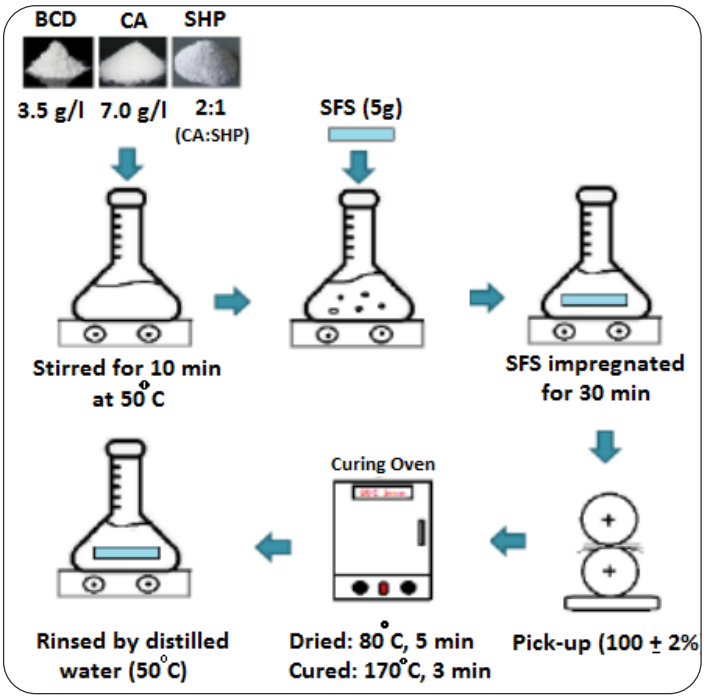
خیسانده می‌شوند. نهایتاً، صفحات مذکور را از میان غلتک آزمایشگاهی با برداشت (Pick-up) صد درصد عبور داده تا علاوه بر فشرده سازی، مایعات اضافی نیز خارج شوند. با قرار دادن چندین صفحه بر روی هم بستر ابریشمی با ضخامت دلخواه به دست می‌آید.

## اصلاح سطح بستر ابریشمی

مراحل اصلاح سطح بستر ابریشمی با نانوساختار بتاسایکلودکسترین ($C_{42}H_{70}O_{35}$) به‌صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. ابتدا، بستر ابریشمی (۵ گرمی) درون محلول حاوی بتاسایکلودکسترین (۳/۵ گرم بر لیتر)، اتصال دهنده سه عامله سیتریک اسید (۷/۰ گرم بر لیتر) و کاتالیزور سدیم هیپوفسفیت ($NaH_2PO_2$) با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد. سپس، نمونه خارج شده و به کمک غلتک آزمایشگاهی با برداشت ۱۰۰ درصد پد گردید تا مایعات اضافی خارج شوند. پس از آن، ابتدا نمونه در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۵ دقیقه درون آون آزمایشگاهی خشک شد و سپس، در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳ دقیقه تحت فرآیند پخت قرار گرفت. نهایتاً، نمونه با آب مقطر ۵۰ درجه سانتی‌گراد آبکشی شد تا مواد واکنش داده نشده از سطح آن خارج شوند.

## بارگذاری بستر ابریشمی با روغن‌های گیاهی

برای بارگذاری روغن‌های گیاهی درخت چای[۲۴] و پونه کوهی[۲۵] ابتدا نمونه‌های ابریشمی اصلاح شده با بتاسایکلودکسترین در حلال اتانول/آب با نسبت ۱۰/۹۰ غوطه‌ور شده و سپس روغن‌های گیاهی مذکور (غلظت ۳ درصد) به حمام‌ها اضافه شدند. نمونه‌های غوطه‌ور در محلول‌های فوق به مدت یک ساعت در دمای اتاق بر روی دستگاه لرزاننده قرار گرفتند.




شکل ۴. فرآیند اصلاح سطح بستر ابریشمی با نانوساختار بتاسایکلودکسترین.

سپس، نمونه‌ها از محلول‌ها خارج شده و توسط دستگاه غلتک آزمایشگاهی با برداشت ۲ ± ۱۰۰ درصد پد شدند. نهایتاً نمونه‌ها با آب مقطر آبکشی شده و در دمای اتاق خشک شدند (Scacchetti et al., 2017). لازم به توضیح است برای جلوگیری از تبخیر روغن‌های گیاهی، نمونه‌ها در کیف‌های پلاستیکی در بسته و به دور از نور نگهداری شدند.

## ارزیابی فعالیت ضدمیکروبی

برای اندازه‌گیری خاصیت ضدمیکروبی روغن‌های گیاهی از روش مینیمم غلظت بازدارندگی[۲۶] استفاده شد. فعالیت ضدمیکروبی روغن‌های نامبرده شده در مقابل باکتری‌های گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس[۲۷]، گرم منفی اشرشیا کلای[۲۸] و قارچ کاندیدا آلبیکانس[۲۹] توسط آزمون رقیق‌سازی ماده مغذی[۳۰] ارزیابی شد. در این آزمون، ابتدا رقّت‌های سریالی یک دوم (۲/۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر)، یک چهارم (۱/۲۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) و یک هشتم (۰/۶۲۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) از روغن‌ها در محیط ماده مغذی BHI ساخته و سپس با غلظت استانداردی از باکتری مورد آزمایش، مایه‌کوبی[۳۱] شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت از تکثیر باکتری مورد نظر، کمترین غلظت روغن گیاهی مورد استفاده که قادر به جلوگیری از رشد باکتری باشد، تحت عنوان مینیمم غلظت بازدارندگی (MIC) گزارش می‌شود (Murray et al., 2009).

برای ارزیابی خاصیت ضدمیکروبی بستر ابریشمی اصلاح و بارگذاری شده با روغن‌های گیاهی از روش کیفی و شناخته شده آزمون انتشار آگار[۳۲] مطابق استاندارد PN-EN ISO 20645: 2007 استفاده شد. در این آزمون، محیط آگار مولر هینتون[۳۳] موجود در هر پلیت با غلظت استانداردی از باکتری مورد آزمایش آغشته گردید. سپس، نمونه اصلاح شده (با قطر ۵ میلی‌متر) در هر پلیت بر روی سطح آگار قرار گرفت. آنگاه پلیت‌ها در دستگاه انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. پس از گذشت ۲۴ ساعت، میزان رشد باکتری‌ها در زیر و اطراف نمونه‌ها با نام ناحیه بازدارندگی[۳۴] ارزیابی شدند. ملاک ارزیابی برای رشد باکتری‌ها در جدول ۲ آمده است. عرض ناحیه

بازدارندگی (یا هاله عدم رشد) نیز مطابق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$W = (T-D) / 2 \qquad (1)$$

در رابطه فوق W، D و T به ترتیب عرض هاله عدم رشد، قطر نمونه و قطر هاله عدم رشد و نمونه است (Salimpour and Malek, 2012).

در روش کمی ارزیابی خاصیت ضدمیکروبی، مقاومت نمونه‌ها در برابر رشد میکروارگانیسم‌ها مطابق استاندارد AATCC 100-2004 مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های ابریشمی اصلاح شده (با قطر ۱/۰ ± ۱ سانتی‌متر) با حجمی معادل یک میلی‌لیتر از باکتری و قارچ مورد نظر، حاوی $5\times10^5$ کلونی (Cfu)[35] آغشته شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت، ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به لوله آزمایش حاوی نمونه اصلاح شده و باکتری اضافه شد و محلول به رقّت یک دهم غلظت قبلی رسید. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر از این محلول رقیق شده بر روی پلیت‌های حاوی ماده مغذی آگار ریخته شد و در انکوباتور (دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت) قرار گرفت. ارزیابی فعالیت ضدمیکروبی نمونه‌های ابریشمی اصلاح شده و شاهد بر اساس میزان کاهش تعداد کلونی باکتری‌ها[36] و مطابق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\text{درصد کاهش کلونی باکتری} = [N1-N2)/N1)]\times100 \qquad (2)$$

در رابطه فوق N1 و N2 به ترتیب تعداد کلونی‌های رشد یافته بر روی نمونه شاهد و اصلاح شده است.

لازم به ذکر است برای اطمینان از صحت نتایج، تمامی آزمایشات ضدمیکروبی سه مرتبه تکرار شده‌اند.

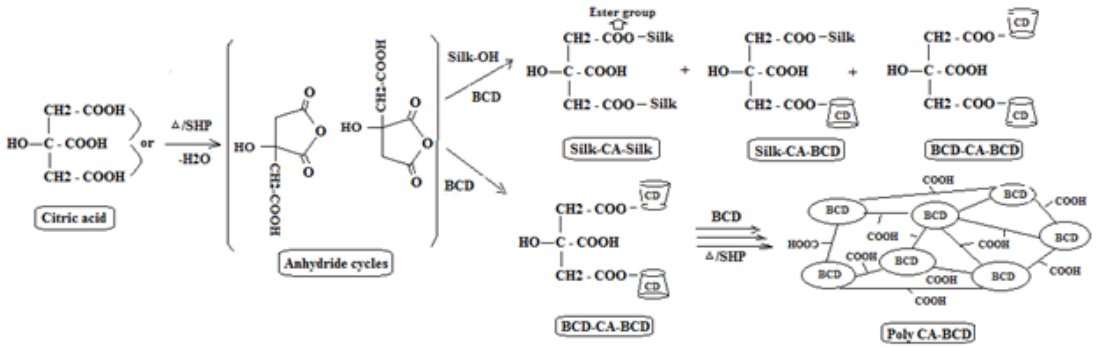
## نتایج و یافته‌ها

### سازوکار اتصال نانوساختار بتاسایکلودکسترین بر روی بستر ابریشمی

سازوکار اتصال مابین بستر ابریشمی و نانوساختار بتاسایکلودکسترین در شکل ۵ نشان داده شده است. در گام اول، سیتریک اسید (CA) به‌عنوان یک عامل اتصال‌دهنده اسیدی قادر است تحت یک واکنش تراکمی[37] به کمک گرما و کاتالیزور سدیم هیپوفسفیت (SHP) یک حلقه انیدریدی[38] تشکیل دهد. سپس با باز شدن این حلقه امکان واکنش استریفیکاسیون[39] با گروه‌های هیدروکسیل(-OH) ابریشم و یا گروه‌های هیدروکسیل بتاسایکلودکسترین فراهم خواهد شد. از آنجایی که تعداد گروه‌های هیدروکسیل بتاسایکلودکسترین در مقایسه با گروه‌های هیدروکسیل ابریشم بیشتر است، امکان شکل‌گیری یک شبکه پلیمری با نام سیتریک اسید- بتاسایکلودکسترین (Poly CA-BCD) نیز بسیار محتمل است، چیزی که پیش از این نیز تأیید شده است (Martel et al., 2001). شبکه پلیمری مذکور قادرست به فرم فیزیکی (و نه کووالانسی) بر روی بستر ابریشمی لنگر انداخته و نقش مؤثری بر جذب مولکول‌های میهمان ایفا نماید. لازم به ذکر است که این شبکه پلیمری در اثر شست‌وشوهای معمولی به راحتی از سطح نمونه خارج نمی‌شود.

جدول ۲. ملاک ارزیابی خاصیت ضدمیکروبی نمونه‌ها مطابق استاندارد PN-EN ISO 20645: 2007.

| هاله عدم رشد (میلی‌متر) | رشد زیر نمونه | توصیف | ارزیابی |
|---|---|---|---|
| ۱ < | خیر | قطر هاله عدم رشد بیش از ۱ میلی‌متر، عدم رشد زیر نمونه. | فعالیت خوب |
| ۱-۰ | خیر | قطر هاله عدم رشد حداکثر تا ۱ میلی‌متر، عدم رشد زیر نمونه. | |
| ۰ | خیر | قطر هاله رشد، عدم رشد زیر نمونه. | |
| ۰ | کمی | عدم هاله رشد، رشد زیر نمونه تشابه زیادی به حالت عدم رشد دارد. | فعالیت متوسط |
| ۰ | متوسط | عدم هاله رشد، رشد زیر نمونه تا نیمه مساحت نمونه. | فعالیت ضعیف |
| ۰ | زیاد | عدم هاله رشد، رشد زیر نمونه کاهش یافته یا فقط کمی کاهش یافته است. | |




شکل ۵. سازوکار اصلاح سطح بستر ابریشمی با بتاسایکلودکسترین.

از سویی دیگر، از نظر تئوری احتمال واکنش مابین گروه‌های کربوکسیل (-COOH) سیتریک اسید با گروه‌های هیدروکسیل (-OH) ابریشم به تنهایی و تشکیل Silk-CA-Silk وجود دارد؛ اما در عمل احتمال رخ دادن چنین سازوکاری بسیار ناچیز است، زیرا تعداد گروه‌های هیدروکسیل ابریشم در مقایسه با گروه‌های هیدروکسیل بتاسایکلودکسترین بسیار کمتر است و دسترسی به گروه‌های فراوان‌تر هیدروکسیل در ساختار بتاسایکلودکسترین منطقی‌تر و عملی‌تر به نظر می‌آید؛ بنابراین، احتمال تشکیل دو محصول Silk-CA-BCD و BCD-CA-BCD محتمل‌تر است. برای اطمینان از فرآیند اتصال، از آنالیزهای FTIR، XRD و UV-Visible استفاده شد که تحلیل این آنالیزها به‌طور کامل در مقاله‌ای که پیش از این به چاپ رسیده ارائه شده است (Salimpour & Malek, 2021)

## ارزیابی خاصیت ضدمیکروبی روغن‌های گیاهی درخت چای و پونه کوهی

خاصیت ضدمیکروبی روغن‌های ضروری گیاهی درخت چای و پونه کوهی مورد استفاده در این پژوهش بر مبنای رقّت‌های سریالی از روغن‌های گیاهی ارزیابی شد. نتایج مربوط به آزمون مینیمم غلظت بازدارندگی (MIC) در جدول ۳ نشان می‌دهد که غلظت‌های ساخته شده از روغن‌های گیاهی مقاومت خوبی در برابر رشد میکروارگانیسم‌ها دارند، به غیر از غلظت یک چهارم روغن پونه کوهی که مقدار رشد باکتری آن معادل $10^4$ cfu است (MIC= 1.25 mg/ml, X=$10^4$ cfu).

## پارامتر نشان دهنده رشد میکروارگانیسم.

این نتیجه می‌تواند با خاصیت آبگریزی[۴۰] روغن‌های

جدول ۳. مینیمم غلظت بازدارندگی (MIC) روغن‌های ضروری گیاهی مورد استفاده در مقابل میکروارگانیسم‌ها.

| روغن‌های گیاهی | S. aureus | E. coli | C. albicans |
|---|---|---|---|
| درخت چای | MIC = 0.625 mg/ml<br>*X < $10^4$ cfu | MIC = 0.625 mg/ml<br>X < $10^3$ cfu | بدون رشد |
| پونه کوهی | بدون رشد | MIC = 0.625 mg/ml<br>X > $10^5$ cfu | MIC = 1.25 mg/ml<br>X= $10^4$ cfu |

ضروری در ارتباط باشد که با نفوذ به درون لیپید غشاء سلولی میکروارگانیسم‌ها مانع رشد سلولی و اختلال در فعالیت‌های حیاتی‌شان می‌شوند. علاوه بر این، نفوذ به غشاء سبب رهایش یون‌های مهم و نهایتاً مرگ باکتری می‌شود(Parham et al., 2020؛ Cowan, 1999). بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون MIC می‌توان اظهار داشت که روغن‌های درخت چای و پونه کوهی به دلیل مقاومت خوب در برابر رشد میکروارگانیسم‌ها گزینه مناسبی برای ایجاد خاصیت ضدمیکروبی در بستر ابریشمی اصلاح شده می‌باشند.

## آنالیز کیفی آزمون انتشار آگار

فعالیت ضدمیکروبی بسترهای ابریشمی اصلاح و بارگذاری شده با روغن‌های گیاهی از طریق اندازه‌گیری آزمون انتشار آگار ارزیابی شد. مطابق جدول استاندارد ۲ ناحیه بازدارندگی (یا هاله عدم رشد) با مقاومت نمونه در برابر رشد میکروارگانیسم‌ها در ارتباط است به نحوی‌که هر چقدر مقاومت بیشتر باشد، قطر هاله عدم رشد نیز بزرگ‌تر است. به بیانی ساده، زمانی که روغن‌ها از بسترهای ابریشمی اصلاح شده به داخل محیط رها می‌شوند، یک ناحیه عدم رشد یا ناحیه پاک شکل خواهد گرفت. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهند که نفوذ روغن‌های گیاهی از بستر ابریشمی اصلاح و بارگذاری شده به محیط حاوی میکروارگانیسم‌ها، مانع از رشد آن‌ها می‌شود و بدین‌ترتیب یک ناحیه عدم رشد (یا هاله پاک) به‌وجود می‌آید.

ارزیابی‌ها حاکی از آن است که نواحی بازدارندگی مربوط به بسترهای ابریشمی بارگذاری شده با روغن درخت چای، قطرهای عدم رشد بزرگ‌تری نسبت به بسترهای ابریشمی حاوی روغن پونه کوهی تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، قطر هاله عدم رشد بسترهای حاوی روغن درخت چای در برابر مخمر آلبیکانس نسبت به دو باکتری دیگر کوچک‌تر است. این نتیجه می‌تواند با ترکیبات شیمیایی موجود در روغن‌های گیاهی که طبیعت ضدباکتری و ضدقارچی دارند، در ارتباط باشد (Cowan, 1999)؛ بنابراین، برای رسیدن به نتایج قابل اطمینان‌تر استفاده از یک آنالیز کمی (یا آزمون شمارش کلونی) ضروری به نظر می‌رسد.

## آنالیز کمی آزمون شمارش کلونی

نتایج آزمون کمی شمارش کلونی ارائه‌شده در شکل ۶ بیانگر آن است که تعداد کلونی‌های میکروارگانیسم‌های استافیلوکوکوس اورئوس، اشرشیا کلای و کاندیدا آلبیکانس از $۱۰^۵ \times$ ۳/۶–۴/۵ به ۱۰× ۱/۵–۱/۰ (حدود ۹۹/۹ درصد) کاهش یافته‌اند. به عبارتی دیگر، رهایش روغن‌های ضروری گیاهی درخت چای و پونه کوهی از بسترهای ابریشمی اصلاح شده منجر به مرگ سلول‌ها به دلیل ترکیبات شیمیایی موجود در ساختارشان شده است. این ترکیبات

جدول ۴. متوسط هاله عدم رشد.

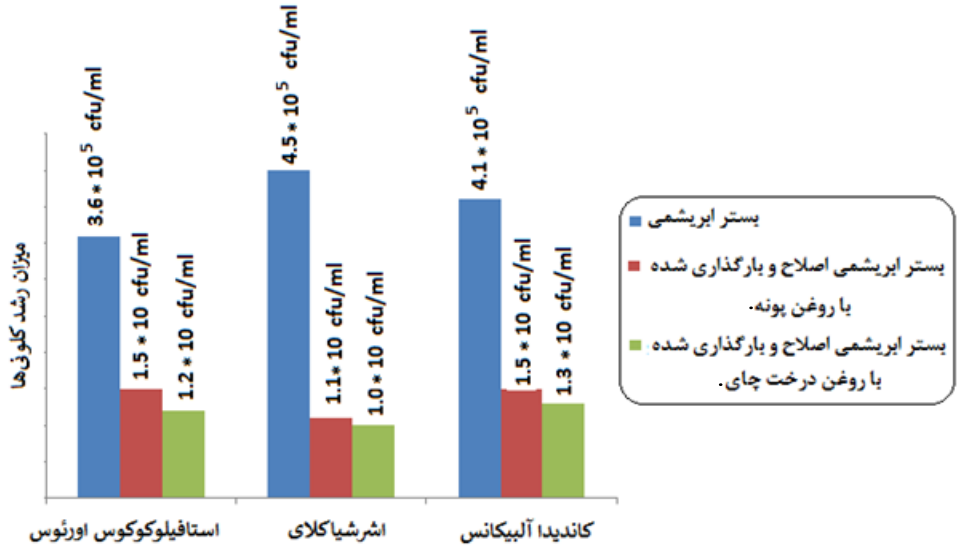
| نمونه* | S. aureus | | E. coli | | C. albicans | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | عرض هاله عدم رشد (mm) | میزان رشد زیر نمونه | عرض هاله عدم رشد (mm) | میزان رشد زیر نمونه | عرض هاله عدم رشد (mm) | میزان رشد زیر نمونه |
| BCD ابریشم اصلاح شده با | ۰ | زیاد | ۰ | زیاد | ۰ | زیاد |
| ابریشم اصلاح شده و بارگذاری شده باروغن درخت چای | ۱۱/۰ | زیاد | ۱۲/۵ | ۰ | ۳/۵ | ۰ |
| ابریشم اصلاح شده و بارگذاری شده باروغن پونه کوهی | ۴/۰ | ۰ | ۳/۰ | ۰ | ۴/۰ | ۰ |

* قطر نمونه ۵ میلی‌متر است.

تأثیرگذار شامل: تانن‌ها[41]، فنولیک‌ها[42]، ترپن‌ها[43] و غیره هستند که پیش از این اثرات ضدمیکروبی‌شان گزارش شده است (Dorman and Deans, 2000).

پتانسیل ضدمیکروبی به توانایی شکل‌دهی کمپلکس با آمینواسیدهای نوکلئوفیلیک[44] در سلول‌های پروتئینی از طریق اتصالات هیدروژنی و کووالانسی باز می‌گردد. به همین دلیل، این کمپلکس‌ها می‌توانند باعث عدم فعالیت و یا اختلال عملکرد پروتئین‌ها در ساختار میکروارگانیسم‌ها شوند. گسست سلول‌های[45] میکروبی نیز در اثر حمله به دیوارهای سلولی پلی‌پپتیدها و غشاء آنزیمی حاصل می‌شود. علاوه بر این، برخی مطالعات (Abad, et al., 2012 ؛Parham et al., 2020). نیز خاصیت ضدمیکروبی روغن درخت چای و پونه کوهی را تأیید کرده‌اند. این مطالعات گزارش کردند که توانایی ضدمیکروبی این گیاهان به دلیل درصد بالای ترکیباتی نظیر: تیمول (Thymol)، کارواکرول[46]، لینالول[47]، سینئول[48]، تیوجن[49] و ترپن در ساختارشان رخ می‌دهد (Kazemi et al., 2011). نتایج آنالیز کروماتوگرافی گازی طیف‌سنجی جرمی[50] روغن‌های درخت چای و پونه کوهی مورد استفاده در این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیبات تیمول (۳۴/۱۵ درصد) و کارواکرول (۳۵/۲ درصد) در روغن ضروری درخت چای و همچنین سینئول (۴۸/۱ درصد) و تیوجن (۳۰/۱ درصد) در روغن ضروری پونه کوهی دارای بالاترین مقدار هستند (Salimpour Abkenar, 2024). بدین‌ترتیب، روغن‌های ضروری گیاهی درخت چای و پونه کوهی به ترتیب با بیشترین مقدار تیمول/کارواکرول و سینئول/تیوجن از بیشترین قدرت بازدارندگی میکروبی برخوردارند. یادآور می‌شود که نتایج حاصل از آزمون کمی شمارش کلونی در این مطالعه با پژوهش‌های پیشین همخوانی دارند (Lahkar et al., 2013؛Sajed et al., 2013).

همچنین، نتایج نشان می‌دهند که اثرات ضدمیکروبی روغن‌های ضروری گیاهی درخت چای و پونه کوهی علاوه بر وابستگی به درصدهای بالای ترکیبات شاخص موجود در آن‌ها به ترکیباتی با درصدهای کمتر نظیر: ترپینول[51]، ترپینن[52]، کمفور[53] و پینن[54] نیز وابسته‌اند. این ترکیباتِ با درصد کمتر، احتمالاً با شرکت در فرآیند بازدارندگی ضدمیکروبی به شکل‌گیری یک اثر هم‌افزایی[55] در کنار ترکیبات اصلی با درصد بالاتر کمک می‌کنند. اثر هم‌افزایی مذکور به افزایش توانایی ضدمیکروبی از طریق بی‌ثبات کردن غشای میکروبی کمک می‌کند. با این وجود، باید توجه داشت که شرایط کشت گیاهان دارویی (نظیر: اقلیم و نوع پرورش) و ژنتیک‌شان از پارامترهای بسیار




شکل ۶. میزان رشد کلونی‌های میکروارگانیسم‌ها.

تأثیرگـذار بـر عملکـرد فعالیـت ضدمیکـروبی روغن‌هـای ضـروری گیـاهی محسـوب می‌شـوند (Sajed et al., 2013).

## نتیجه‌گیری

نتایـج ایـن مطالعـه نشـان می‌دهـد کـه یـک بسـتر ابریشـمی طبیـعی، ارزان‌قیمـت و زیسـت‌تخریب‌پذیر را می‌تـوان از پیله‌هـای ضایعـاتی (نظیـر: دوتـایی، سـوراخ شـده، پوسـت نـازک و رنـگی) در طی مراحـل صمغ‌گیـری، بـاز کـردن و عملیـات تکمیـلی بـه شیـوه سـاده و شـناخته شـده پدخشـک‌پخت تهیـه کـرد. ایـن بسـتر طبیـعی در حوزه‌هـای مختلـف (نظیـر: بهداشـتی، پزشـکی، غـذا و دارو، بسـته بنـدی و غیـره) به‌ویـژه مـواردی کـه در آن زیست‌سـازگاری از اهمیـت بـالایی برخـوردار باشـد، قابـل اسـتفاده اسـت. در ایـن مطالعـه پیشـنهاد شـده کـه از بسـتر طبیـعی مذکـور بـرای حفاظـت از آثـار تاریـخی و فرهنـگی در برابـر عوامـل محیـطی (نظیـر: میکـروب، قارچ و کپـک) اسـتفاده شـود. بـرای نیـل بـه ایـن مقصـود، از نانوسـاختار طبیـعی، در دسـترس و دوسـتدار محیـط زیسـت بتاسایکلودکسـترین (β-CD) اسـتفاده شـده کـه قادر اسـت بـه کمـک یـک مـاده حـد واسـط طبیـعی بـا نـام سیتریک اسیـد (CA) بـر روی ایـن بسـتر اتصـال یابـد. از آن جـایی کـه نانوسـاختارهای سایکلودکسـترین دارای حفـره درونی بـا خاصیـت آب‌گریـزی هسـتند؛ چنانچـه از مـواد طبیـعی ضدمیکـروبی بـرای ورود و حبـس در ایـن حفره‌هـا اسـتفاده شـود، بـا رهایـش کنتـرل شـده این مـواد قـادر خواهنـد بود خاصیـت محافظـت ضـد میکـروبی خـوبی ایجـاد کننـد. بر ایـن اسـاس، در ایـن مطالعـه از روغن‌هـای طبیـعی درخـت چـای و پونـه کـوهی کـه در پژوهش‌هـای پیشیـن خاصیت ضـد میکروبی‌شـان بارهـا تأییـد شـده اسـت، اسـتفاده شـد. بـا حبـس مولکـولی روغن‌هـای مذکـور در حفره‌هـای نانوسـاختار بتاسایکلودکسـترین بستر ابریشـمی نامبرده شده فعالیت‌هـای ضدمیکـروبی و ضـد قـارچ بسیـار خـوبی از خـود نشـان داد. ایـن فعالیت‌هـا بـه کمـک آنالیزهـای کیـفی و کـمی مـورد ارزیـابی و مطالعـه قـرار گرفتنـد. بـرای دسـتیابی بـه کارآیی‌هـای بیشـتر، پیشـنهاد می‌شـود تحقیقـات بـر روی میکروارگانیسـم‌های شـناخته شـده دیگـر و همچنیـن، روغن‌هـای گیـاهی مشـابهی همچـون: نعنـاء فلفـلی، گل ختـمی، گل گاوزبـان و غیـره ادامـه یابـد.


## سپاسگزاری

ایـن مقالـه بـر اسـاس نتایـج حاصـل از دوره فرصـت مطالعـاتی جامعـه و صنعـت بـا عنـوان "مطالعـه خاصیـت ضدمیکـروبی بسـتر ابریشـم ضایعـاتی اصلاح شـده بـا بتاسایکلودکسـترین و بارگـذاری شـده بـا اسـانس‌های گیـاهی"، تحـت نظـارت و کارفرمـایی پژوهشـکده مهنـدسی مـواد و فرآیندهـای پیشـرفته دانشـگاه صنعـتی امیرکبیـر نگاشـته شـده اسـت. نگارنـده از تمـامی اسـاتید، همـکاران و دسـت‌اندرکارانی کـه در طـول ایـن پژوهـش بـا راهنمایی‌هـا و همکاری‌هـای خـود نقـش مؤثـری در پیشـبرد ایـن تحقیـق داشـتند، صمیمانـه قـدردانی می‌کنـد.

## حامیان مالی و معنوی

ایـن پژوهـش بـا حمایت‌هـای مـادی و معنـوی دانشـکده مهنـدسی مـواد و فرآیندهـای پیشـرفته دانشـگاه صنعـتی امیرکبیـر و همـکاری پژوهشـگاه میـراث فرهنـگی و گردشـگری انجـام شـده اسـت.


## پی‌نوشت‌ها

1. Antimicrobial Sheet.
2. Microorganisms.
3. Multifunctional.
4. Silk.
5. Bombyx Mori.
6. Filament.
7. Fibroin.
8. Sericin.
9. Wax.
10. Triclosan.
11. Polyphenols.
12. Chitosan.
13. Dendrimers.
14. Hyper Branches.
15. Heos: Herbal Essential Oils.
16. Uncontrolled Release.
17. Cds: Cyclodextrins.
18. Inclusion Complex.
19. Cyclic Oligosaccharides.

20. Glucopyranose.
21. Degumming.
22. Opening.
23. Finishing.
24. TTO: Tea Tree Oi.
25. OP: Oregano Plant.
26. MIC: Minimum Inhibition Concentration .
27. Staphylococcus Aureus.
28. Escherichia Coli.
29. Candida Albicans.
30. Broth Dilution Test.
31. Inoculation.
32. Agar Diffusion Test .
33. Agar Muller Hinton.
34. Inhibition Zone.
35. Cfu: Colony Forming Units.
36. Bacteria Reduction.
37. Condensation Reaction .
38. Anhydride Cycle.
39. Esterification Reaction.
40. Hydrophobic.
41. Tannin.
42. Phenolic.
43. Terpene.
44. Nucleophilic Amino Acid.
45. Cell Disruption.
46. Carvacrol.
47. Linalool.
48. Cineole.
49. Thujone.
50. GC-MS Analysis.
51. Terpinol.
52. Terpinene.
53. Camphore.
54. Pinene.
55. Synergic Effect.

## منابع


Abad, M. J., Bedoya, L. M., Apaza, L., & Bermejo, P. (2012). The Artemisia L. genus: A review of bioactive essential oils. Molecules, 17 (3), 2542–2566. https://doi.org/10.3390/molecules17032542.

Bahandari, V., Jose, S., Badanayak, P., Sankaran, A., & Anandan, V. (2022). Antimicrobial finishing of metals, metal oxides, and metal composites on textiles: A systematic review. Industrial and Engineering Chemistry Research, 61 (1), 86–101. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c03345.

Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. Clinical Microbiology Reviews, 12 (4), 564–582. https://doi.org/10.1128/CMR.12.4.564.

Dorman, H. J. D., & Deans, S. G. (2000). Antimicrobial agents from plants: Antibacterial activity of plant volatile oils. Journal of Applied Microbiology, 88 (2), 308–316. https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.00969.x.

Gulati, R., Sharma, S., & Sharma, R. K. (2022). Antimicrobial textile: Recent developments and functional perspective. Polymer Bulletin, 79 (8), 5747–5771. https://doi.org/10.1007/s00289-021-03808-5.

Harugade, A., Sharje, A. P., & Pethe, A. (2023). Chitosan: A review on properties, biological activities and recent progress in biomedical applications. Reactive and Functional Polymers, 191, 105634. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105634.

Kazemi, M., Shafizade, S., & Larijani, K. (2011). Comparison of essential oils composition of stem, leaf and flower from Artemisia deserti Krasch. Applied Chemical Research, 18, 29–34.

Kongkachuichay, P., Shitangkoon, A., & Chinwongamorn, N. (2002). Thermodynamics of adsorption of laccaic acid on silk. Dyes and Pigments, 53 (2), 179–185. https://doi.org/10.1016/S0143-7208(02)00008-5.

Lahkar, S., Das, M. K., & Bora, S. (2013). An overview on tea tree (Melaleuca alternifolia) oil. Pharmaceutical and Pharmacological Research, 3 (2), 250–253.

Luo, J., & Cao, J. (1997). Low-temperature dyeing of real silk fabrics with liquid sulphur dyes. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 113 (3), 67–69. https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1997.tb01870.x.

Maesta Bezerra, F., Lis Arias, M. J., Beraldo Firmino, H., Dias da Silva, J. G., Sisquiera Curto Valle, R. D. C., Borges Valle, J. A., & Tessaro, A. L. (2020). The role of β-cyclodextrin in the textile industry—A review. Molecules, 25 (17), 1–28. https://doi.org/10.3390/molecules25173824.

Martel, B., Morcellet, M., Ruffin, D., Ducoroy, L., & Weltrowski, M. (2002). Finishing of polyester fabrics with cyclodextrins and polycarboxylic acids as crosslinking agents. Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry, 44 (1–4), 443–446. https://doi.org/10.1023/A:1023065823356.

Martel, B., Weltrowski, M., Ruffin, D., & Morcellet, M. (2001). Polycarboxylic acids as crosslinking agents for grafting cyclodextrins onto cotton and wool fabrics: Study of the process parameters. Journal of Applied Polymer Science, 83 (7), 1449–1456. https://doi.org/10.1002/app.2304.

Murray, P. R., Rosenthal, K. S., & Pfaller, M. A. (2009). Medical microbiology (6th ed). Mosby Elsevier.

Naebe, M., Haque, A. N. A., & Haji, A. (2022). Plasma-assisted antimicrobial finishing of textiles: A review. Research Journal of Textile and Apparel, 26 (2), 145–163. https://doi.org/10.1108/RJTA-06-2021-0071.

Parham, S., Kharazi, A. Z., Bakhsheshi-Rad, H. R., Nur, H., Ismail, A. F., Sharifi, S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2020). Antioxidant, antimicrobial, and antiviral properties of herbal materials. Antioxidants, 9 (12), 1309. https://doi.org/10.3390/antiox9121309.

Sajed, H., Sahebkar, A. H., & Iranshahi, M. (2013). Zataria multiflora Boiss. (Shirazi thyme)—An ancient condiment with modern pharmaceutical uses. Journal of Ethnopharmacology, 145 (3), 686–698. https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.12.018.

Salimpour Abkenar, S. (2024). A study on the antibacterial properties of silk floss sheet (SFS) modified with β-cyclodextrin and loaded with herbal essential oils. Sabbatical Project. Research Institute of Cultural Heritage and Tourism (RICHT).

Salimpour Abkenar, S., & Malek, R. M. A. (2024). Inclusion complex, antioxidant, and antimicrobial properties of silk floss sheet modified with β-cyclodextrin and loaded with herbal essential oils as a green tissue. Fibers and Polymers, 25 (1), 83–97. https://doi.org/10.1007/s12221-023-00408-0.

Salimpour Abkenar, S., & Malek, R. M. A. (2012). Preparation, characterization, and antimicrobial property of cotton cellulose fabric grafted with poly(propylene imine) dendrimer. Cellulose, 19 (5), 1701–1714. https://doi.org/10.1007/s10570-012-9746-9.

Salimpour Abkenar, S., & Malek, R. M. A. (2021). Modification of silk yarn with β-cyclodextrin nanoparticles: Preparation, characterization, and natural dyeing properties. Starch, 73 (9–10), 2000209. https://doi.org/10.1002/star.202000209.

Scacchetti, F. A. P., Pinto, E., & Soares, G. M. B. (2017). Functionalization and characterization of cotton with phase change materials and thyme oil encapsulated in β-cyclodextrins. Progress in Organic Coatings, 107, 64–74. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.03.013.

Szejtli, J. (2004). Past, present, and future of cyclodextrin research. Pure and Applied Chemistry, 76 (10), 1825–1845. https://doi.org/10.1351/pac200476101825.