

Investigation of Methylene Blue Decolorization Using Polyhydroxybutyrate Biopolymer and Bacteria Isolated from Textile Wastewater

Zahra Shahi¹, Mohammad Khajeh Mehrizi^{*1}, Maryam Sadat Mirbagheri Firoozabad²

1- Department of Textile Engineering, Yazd University, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran.

2- Department of Biology, Yazd University, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23-01-2026

Accepted: 05-04-2026

Available online: 06-04-2026

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI:10.30509/jcst.2026.167761.1281

Keywords:

Textile wastewater

Decolorization

Methylene blue

Bacteria

PHB biofilm

ABSTRACT

Contamination of textile wastewater with industrial dyes poses a serious environmental threat, and due to the high chemical stability of these dyes, developing efficient removal methods is essential. In this study, two novel bacterial strains (*Megaterium SH3 OR635822*, and *Bacillus cereus SH4 OR636055*) and a produced polyhydroxybutyrate (PHB) biofilm were evaluated as bioadsorbents for the removal of the cationic dye methylene blue. Results showed that strain SH4 exhibited the highest dye removal efficiency of 28.45 % under optimal conditions (dye concentration= 100 mg/L, contact time =72 h, pH =7), whereas the PHB biofilm reached 50.81 % under its optimal conditions (dye concentration =100 mg/L, contact time= 60 min, pH =10). Isotherm, kinetic, and thermodynamic analyses indicated that the pseudo-second-order kinetic model and Langmuir isotherm provided the best fit to the experimental data, and the adsorption process was spontaneous and endothermic. This innovative study highlights the high potential of novel bacterial strains and the produced PHB biofilm as efficient bioadsorbents for sustainable treatment of colored wastewater.

*Corresponding author: * mkhajeh@yazd.ac.ir





بررسی رنگبری متیلن بلو توسط بیوپلیمر پلی هیدروکسی بوتیرات و باکتری های جداسازی شده از پساب نساجی

زهرا شاهی^۱، محمد خواجه مهریزی^{۲*}، مریم السادات میرباقری فیروز آباد^۳

۱- دانشی آموخته دکترا، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

۳- استادیار، گروه زیست شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

چکیده

آلودگی پساب های نساجی با رنگزاهای صنعتی یکی از تهدیدهای جدی محیط زیست است و به دلیل مقاومت شیمیایی بالای این رنگزاهای، توسعه روش های کارآمد برای حذف آنها اهمیت بالایی دارد. در این پژوهش، دو گونه باکتری جدید (*Megaterium SH3 OR635822*، *Bacillus cereus SH4 OR636055*) و همچنین فیلم تولیدی پلی هیدروکسی بوتیرات (PHB) به عنوان جاذب های زیستی برای حذف رنگزای کاتیونی متیلن بلو مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که سویه SH4 در شرایط بهینه (غلظت رنگزا ۱۰۰ mg/l، مدت زمان تماس ۷۲ ساعت و $pH=7$) بیشترین بازده حذف رنگزا را به میزان ۴۵/۲۸ درصد نشان داد، در حالی که فیلم PHB در شرایط بهینه خود (غلظت رنگزا ۱۰۰ mg/l، مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه و $pH=10$) توانست ۸۱/۵۰ درصد از ماده رنگزا را حذف کند. تحلیل های ایزوترم، سینتیک و ترمودینامیک نشان دادند که مدل شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر بهترین تطابق را با داده های حاصل از فرایند رنگبری دارند و فرایند جذب به صورت خودبه خودی و گرماگیر انجام می شود. این مطالعه نوآورانه، پتانسیل بالای باکتری های جدید و فیلم تولیدی PHB به عنوان جاذب های زیستی کارآمد برای تصفیه پایدار پساب های رنگی را نشان می دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۱/۱۷

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2026.167761.1281

واژه های کلیدی:

پساب نساجی

رنگبری

متیلن بلو

باکتری

فیلم زیستی PHB



۱- مقدمه

آلودگی محیط‌زیست یک مشکل جهانی قابل توجه، به ویژه در کشورهای در حال توسعه است. مواد معدنی و فاضلاب‌های صنعتی عمدتاً دارای مواد آلی مانند رنگ‌ها، ترکیبات فنلی، ترکیبات آروماتیک و فلزات سنگین هستند (۱). صنعت نساجی یک نیروی اقتصادی بزرگ جهانی و عامل مهمی در آلودگی، به ویژه در کشورهایمانند چین و آفریقای جنوبی است (۲). بیش از ۱۰۰۰۰۰۰ رنگزا به صورت تجاری در دسترس است که تولید سالانه آنها بیش از ۷۰۰۰۰۰ تن است (۳). در طول رنگ‌رزی، برخی از رنگ‌ها به صورت تثبیت نشده روی پارچه باقی می‌مانند و شسته می‌شوند که منجر به آلودگی می‌شود، به حیات آبریان آسیب می‌رساند و خطرات سلامتی متعددی را برای انسان ایجاد می‌کند (۲). متیلن بلو به دلیل خواص سمی خود، یک خطر بالقوه برای سلامتی محسوب می‌شود. این سمیت یک نگرانی قابل توجه است، زیرا قرار گرفتن در معرض رنگزای متیلن بلو، متاسفانه می‌تواند خطر ابتلا به سرطان را افزایش دهد. علاوه بر این، این رنگزا همچنین می‌تواند طیف وسیعی از مشکلات پوستی ناخوشایند و بالقوه مضر را ایجاد می‌کند (۴). روش‌های گوناگونی برای حذف رنگ‌ها نظیر انعقاد الکتریکی، صافش، انعقاد، لخته‌سازی و اسمز معکوس به کار گرفته شده است. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و زیستی دسته‌بندی نمود. روش‌های زیستی مزایای بیشتری نسبت به روش‌های فیزیکی و شیمیایی دارند، زیرا لجن کمتری تولید می‌کنند. به معرف‌های شیمیایی کمتری نیاز دارند، ارزان‌تر و سازگار با محیط‌زیست هستند. همچنین از طریق متابولیسم میکروبی، محصولات جانبی غیرسمی تولید می‌کنند. فرایند حذف رنگزا توسط باکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها و سایر سیستم‌های زیستی عمدتاً از طریق دو سازوکار جذب و تخریب انجام می‌شود (۲). جذب، تجمع روی سطح است و می‌تواند فیزیکی یا شیمیایی باشد. برهم‌کنش در جذب فیزیکی از طریق نیروهای واندروالس، پیوند هیدروژنی یا برهم‌کنش‌های آب‌گریز است. در جذب شیمیایی، پیوند کووالانسی یا یونی بین سطح جاذب و ماده جذب‌شونده رخ می‌دهد (۵). سازوکار حذف متیلن بلو را می‌توان تا حد زیادی با برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک بین نواحی کاتیونی مولکول‌های متیلن بلو و گروه‌های عاملی با بار منفی گروه‌های کربوکسیل، فسفوریل و هیدروکسیل در دیواره سلولی باکتری توضیح داد. علاوه بر جذب رنگ‌ها توسط باکتری‌ها، سلول‌های باکتریایی می‌توانند متیلن بلو را از طریق واکنش‌های آنزیمی نیز تجزیه زیستی کنند (۶). تجزیه باکتری رنگ‌ها با آنزیم‌های درون سلولی و خارج سلولی سیستم آنزیمی اکسیدوردوناز مرتبط است. این شامل لاکاز، پراکسیداز منگنز، پراکسیداز لیگنین، ردونکاز NADH-DCIP و آزرودونکاز می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط وو^۱ و همکارانش انجام شد، آزمون کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی

جرمی (GC-MS)، محصولات حاصل از تجزیه رنگزای متیلن بلو شامل فل‌ها و ترکیبات فنوتیازین با گروه‌های دی متیل آمینو را توسط گونه باسیلوس را شناسایی کرد (۷). اخیراً، پلیمرهای زیستی و مشتقات آنها به دلیل مساحت سطح بالا، پایداری فیزیکی - شیمیایی و حضور فراوان حفره‌های ریز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. گزارش‌های اخیر نشان می‌دهد که پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها، پلیمرهای تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌های مختلف (حدود ۳۰۰ سویه باکتری)، به دلیل خواص آب‌گریزی خود می‌توانند، به‌طور مؤثر رنگ‌ها را از پساب نساجی جذب کنند. در شرایطی که نیتروژن، فسفر و اکسیژن در غلظت‌های کم وجود دارند و کربن اضافی وجود دارد، برخی از میکروارگانیسم‌ها PHA تولید می‌کنند. آنها به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری و زیست‌سازگاری عالی خود، به‌عنوان مواد زیستی امیدوارکننده، مورد توجه صنعتی قابل توجهی قرار گرفته‌اند (۸-۱۱). در تحقیقی توسط چونوت^۲ و همکارانش (۲۰۲۱)، فیلم پلی‌هیدروکسی بوتیرات توسط روش ریخته‌گری حلال تهیه شد و برای رنگبری پساب رنگی نساجی تایلند مورد ارزیابی قرار گرفت. بیش‌ترین میزان حذف رنگزا با ۴۹/۷ درصد در زیر نور خورشید پس از ۲۱۰ دقیقه مشاهده شد. نتایج نشان داد که پس از تصفیه با فیلم حاصل‌شده عوامل پساب نساجی پس از ۱۳۵ دقیقه بیش از ۶۱ درصد کاهش یافت (۱۲). در تحقیقی توسط اعتضاد^۳ و همکارانش (۲۰۲۱)، از باکتری‌های جداسازی شده از خاک‌های آلوده به نفت برای رنگبری رنگزای مالاشیت‌گرین استفاده شد. شرایط بهینه برای رنگبری توسط این باکتری (۹۷ درصد) در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، غلظت ماده رنگزا ۲۰ mg/l، pH=۷ و مدت زمان ۲ ساعت تعیین شد. همچنین تجزیه زیستی رنگزا از مدل سینتیک مرتبه اول پیروی کرد (۱۳). در تحقیقی توسط درویشی و همکارانش (۲۰۱۹)، از نمونه پساب کارگاه‌های رنگ‌رزی باکتری‌های جدید جداسازی شدند. بیش‌ترین رنگزدایی توسط سویه کوکسی گرم مثبت O3 برای رنگزای روبین دیسپرس (۴۶/۸۰ درصد) و سویه Y4 برای متیل‌رد (۸۰ درصد) مشاهده شد. نتایج نشان داد که از جدایه‌های بومی تحت شرایط قابل اجرا می‌توان برای رنگزدایی زیستی از رنگزاهای صنعتی استفاده کرد (۱۴). در یک تحقیق توسط صابرطحان^۴ و همکارانش (۲۰۱۷)، با استفاده از یک محیط کشت حاوی ترکیب‌های رنگی پساب نساجی سه رنگزای دیسپرس، توانایی رشد و تجزیه رنگزا توسط سویه‌های جداسازی شده بررسی شد. باکتری‌های جداسازی‌شده از سه ویژگی قابلیت تجزیه رنگزا، رشد در دمای بالا و تحمل نمک برخوردارند. کنسرسیون سه سویه

2. Polyhydroxyalkanoate (PHAs)
3. Choonut
4. Polyhydroxybutyrate (PHB)
5. Etezzad
6. Malachite Green
7. Saber Tahan

1. Wu

پژوهش قبلی توسط باکتری‌ها سنتز شد (۱۶). برای تهیه فیلم PHB به روش ریخته‌گری با حلال، پلیمر در یک حلال مناسب حل و سپس تبخیر شد تا یک فیلم با کیفیت تشکیل شود. پودر PHB در کلروفورم و دی‌متیل فرماید با نسبت ۱:۵ حل شد تا محلول ۸ درصد وزنی در دمای ۵۵ °C به مدت ۴ ساعت آماده شود. محلول بر روی صفحه‌ای ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در آن (۶۰ °C) قرار داده شد تا کلروفورم تبخیر شود. پس از آن، فیلم با ضخامت $55 \pm 8 \mu m$ تشکیل شد. شرایط کشت و جداسازی اولیه سویه‌های باکتریایی مطابق با روش ارائه شده در مطالعه قبلی (۱۶) انجام شد و کلونی‌های حاصل به محیط نوترینت برات (NB) منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه قرار گرفتند تا رشد اولیه سویه‌ها حاصل گردد. ۰/۵ گرم پودر رنگزا در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد و سپس توسط اتوکلاو استریل گردید. به محلول رنگزا تعداد $10^{-8} \times 1/5$ باکتری در فاز لگاریتمی رشد اضافه شد و اثر رنگبری در شرایط مختلف بررسی شد. در مطالعه حاضر، تأثیر سه عامل عملیاتی، یعنی $pH = 3-10$ ، زمان تماس ۲۴-۷۲ ساعت و غلظت رنگ ۱۰-۲۰ mg/l برای رنگبری توسط باکتری‌ها بررسی شد. pH محیط با NaOH و HCl تنظیم شد. برای تعیین میزان رنگبری، فاز جامد (شامل باکتری) و فاز مایع نمونه‌های کشت، به‌وسیله گریزانه با دور ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، به مدت ۱۰ دقیقه جدا شدند. سپس میزان رنگبری محلول رویی در طول موج بیشینه مربوط به رنگزا (۶۶۴ nm) با روش طیف‌سنجی (UV-Vis) در مقایسه با شاهد (محیط بدون باکتری) اندازه‌گیری شد. برای بررسی تأثیر زمان، میزان رنگبری توسط فیلم، در زمان‌های ۱۰-۶۰ دقیقه، اندازه‌گیری و مورد آزمایش قرار گرفت. برای بررسی اثر غلظت، غلظت‌های ۲۰-۱۰۰ mg/l از رنگزای متیلن بلو مورد آزمایش قرار گرفت. به‌منظور کاهش خطای ناشی از اندازه‌گیری میزان رنگبری، هر آزمایش سه‌مرته تکرار شد و همچنین به‌منظور حذف خطای ناشی از تغییر تدریجی رنگ در اثر دما، محیط‌های شاهد به همراه نمونه‌ها گرم‌گذاری شدند. درصد رنگزدایی مطابق با رابطه ۱ محاسبه شد.

$$(1) \quad \text{جذب نهایی-جذب اولیه} / \text{جذب اولیه} * 100 = \text{رنگبری (\%)} \quad (1)$$

ایزوترم‌های جذب، خواص جذبی و داده‌های تعادلی هستند که به توصیف چگونگی واکنش آلاینده‌ها با مواد جاذب می‌پردازند و در بهینه‌سازی مصرف جاذب نقش اساسی دارند. تعادل جذبی وقتی رخ می‌دهد که مقدار رنگزای جذب‌شده روی سطح جاذب برابر با مقدار رنگزای واجذب شده باشد. مدل‌های ایزوترم زیادی برای تحلیل داده‌های تجربی و توصیف تعادل در جذب مانند لانگمویر، فرنلش، نرنست، تمکین، فرامکین و غیره وجود دارد. در این تحقیق مدل‌های

امکان رنگبری تا ۹۰ درصد را فراهم کردند (۱۵). در تحقیقی توسط شاهی و همکارانش (۲۰۲۵)، یک سویه جدید جداسازی شده از پساب نساجی (*Bacillus cereus* SH2) بیشترین میزان حذف رنگزای آزویی (۹۸/۹۱ درصد) را در شرایط بهینه (غلظت رنگزا ۱۰۰ mg/l، ۲۵°C، ۷۲، ۷ pH) نشان داد (۱۶). همچنین در تحقیقی دیگر توسط شاهی و همکارانش (۲۰۲۶)، مقایسه میزان رنگبری رنگزای متیلن بلو توسط سه سیستم باکتریایی (SH2)، فیلم زیستی (PHB/MWCNT-COOH) و نانو الیاف PHB/PLA با باکتری تثبیت شده مورد بررسی قرار گرفت. سویه باکتری جدید، میزان ۶۹/۰۵ درصد حذف رنگزای متیلن بلو از خود نشان داد (غلظت رنگزا ۵۰ mg/l، ۷۲، ۷ pH). همچنین فیلم زیستی تهیه شده در حذف رنگزای متیلن بلو در شرایط بهینه (غلظت رنگزا ۱۰۰، ۶۰ min، ۱۰ pH)، مؤثر عمل کرد (۸۸/۵۸ درصد). از طرفی، نانو الیاف تهیه شده (با باکتری تثبیت شده)، در شرایط بهینه (غلظت رنگزا ۱۵۰ mg/l، ۹۰ min، ۷ pH)، بالاترین درصد رنگبری را نشان دادند (۹۳/۷۱ درصد). همچنین کاهش قابل توجه شدت قله‌های رنگزای متیلن بلو همراه با تغییرات جزئی در ناحیه UV نشان داد که علاوه بر جذب، بخشی از رنگ نیز توسط گونه باسیلوس تخریب شده است (۱۷). این مطالعه نشان داد که ترکیب استفاده از باکتری‌های بومی، و بیوپلیمرهای استخراجی روشی مؤثر و زیست‌سازگار برای حذف رنگزا از پساب‌های نساجی فراهم می‌کند (۱۷). در این پژوهش، برای نخستین بار دو سویه جدید باکتریایی به‌منظور بررسی توانایی آن‌ها در حذف رنگزای متیلن بلو مورد بررسی قرار گرفتند تا درک جامع‌تری از پتانسیل رنگبری زیستی گونه‌های مختلف باکتریایی حاصل شود. علاوه بر این، تأثیر فیلم زیستی تهیه شده (PHB) در حذف این رنگزا ارزیابی گردید. مقایسه عملکرد جاذب‌های مختلف، همراه با بررسی رفتار جذب در شرایط مختلف عملیاتی، از جنبه‌های نوآورانه این پژوهش محسوب می‌شود که می‌تواند به توسعه جاذب‌های زیستی کارآمد و سازگار با محیط‌زیست کمک نماید.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و روش‌ها

رنگزای متیلن بلو ($C_{16}H_{18}N_3SCl$) از شرکت الوان ثابت (ایران) (وزن ملکولی: ۳۱۹/۸۵ گرم بر مول، طول موج بیشینه: ۶۶۴ نانومتر) خریداری شد. سویه‌های باکتریایی مورد استفاده برای حذف رنگزا در این مطالعه، *Bacillus cereus* SH4، *megaterium* SH3 OR635822 و شناسایی OR636055 بود که در پژوهش‌های قبلی ما جداسازی و شناسایی شده بودند. پلیمر زیستی مورد استفاده از این تحقیق (PHB) در

1. Carboxylic multiwalled carbon nanotubes (MWCNT-COOH)
2. Polylactic acid (PLA)
3. Immobilized bacteria

4. Solvent Casting
5. Nutrient Broth

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

q_t مقدار رنگزا جذب شده (mg g^{-1}) در زمان t (min) است. k_1 و k_2 ثابت های سرعت ظاهری هستند.

با بررسی تغییرات میزان جذب بر حسب دما می‌توان در مورد ماهیت جذب گرماگیر یا گرمازا بودن واکنش اظهار نظر کرد و از روی بررسی تأثیرات دما، می‌توان دمای بهینه و لازم را برای رسیدن به حداکثر جذب و بازیابی به‌دست آورد، سپس ثابت‌های جذب و ثابت‌های تعادل را از روی شیب منحنی‌ها محاسبه کرد. به‌طور کلی، هر چه یک فرایند جذب در دمای کمتری اتفاق بیفتد از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر است. از روابط ۶ و ۷ برای محاسبه عوامل ترمودینامیکی مانند آنتالپی (ΔH)، انرژی آزاد گیبس (ΔG) و آنتروپی (ΔS) استفاده شده است.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (6)$$

$$\ln K_C = \frac{-\Delta G^0}{RT} = \frac{-\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (7)$$

که در آن R ثابت گاز ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)، T دمای مطلق (K) و K_C نشان دهنده ثابت تعادل است (۲۰-۱۸).

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تأثیر pH بر میزان رنگبری توسط باکتری‌ها

pH محلول، اثرات اساسی برای رشد بهینه باکتری در محیط‌های کشت در حذف رنگزا دارد. اثر pH محلول بر حذف رنگزا در شکل ۱ نشان داده شده است.

لانگمویر و فرندلیش استفاده شدند. در تئوری لانگمویر (رابطه ۲)، فرض اساسی این است که جذب در یک سری مکان‌های همگن خاصی در داخل جاذب اتفاق می‌افتد.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_b q_{\max} C_e} + \frac{1}{q_{\max}} \quad (2)$$

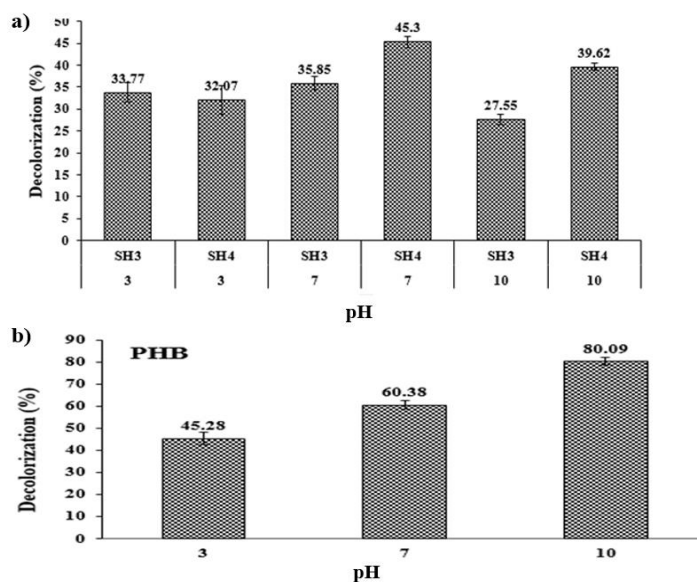
که در آن q_{\max} حداکثر ظرفیت جذب (mg g^{-1})، q_e ظرفیت جذب تعادلی (mg g^{-1})، C_e غلظت رنگزای محلول در حالت تعادل (mg l^{-1}) است. K_b و K_f به ترتیب ثابت لانگمویر و فرندلیش هستند و n عامل ناهمگنی است.

ایزوترم فرندلیش (رابطه ۳) با فرض یک سطح ناهمگن با توزیع نایکنواختی از گرمای جذب در روی سطح به دست می‌آید.

$$\text{Log} q_e = \text{Log} K_f + \frac{1}{n} \text{Log} C_e \quad (3)$$

مطالعات سینتیکی اطلاعات مورد نیاز را درباره‌ی سازوکار جذب فراهم می‌کنند. همچنین سرعت جذب حل شونده، توسط جاذب در سطح مشترک جامد-مایع به کمک این مطالعات توصیف می‌شود. سینتیک جذب شامل مدل‌های سینتیک مرتبه اول، دوم و مدل سینتیک نفوذ درون ذره‌ای می‌باشند. وقتی جذب سطحی توسط نفوذ از داخل یک لایه اتفاق می‌افتد، در اکثر مواقع سینتیک از مرتبه اول پیروی می‌نمایند. سینتیک مرتبه دوم نشان می‌دهد که جذب شیمیایی مرحله کندکننده سرعت است و فرایندهای جذب سطحی را کنترل می‌کند. مدل‌های سینتیک شبه مرتبه اول و دوم با رابطه‌های ۴ و ۵ بیان می‌شوند.

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4)$$



شکل ۱: اثر pH روی حذف رنگزای متیلن بلو، (a) باکتری (۷۲ h، ۵۰ mg/l) و (b) فیلم (۶۰ h، ۱۰۰ mg/l).

Figure 1: Effect of pH on MB removal, (a) bacteria (72 h, 50 mg/l), and (b) film (60 min, 100 mg/l).

استفاده، فرایند جذب ابتدا به سرعت اتفاق می‌افتد، سپس به تدریج به تعادل نزدیک می‌شود. این به دلیل وجود مکان‌های سطح آزاد متعددی است که به آسانی برای فرایند جذب در دسترس هستند. در نهایت با افزایش زمان، اشغال مکان‌های باقی‌مانده به دلیل فعل و انفعالات دافعه سخت‌تر می‌شود. در مراحل ابتدایی تماس، نرخ جذب به دلیل غلظت بالای رنگزا و وجود تعداد زیادی جایگاه آزاد جذب بالا است. افزایش زمان تماس باعث افزایش احتمال برخورد و برهم‌کنش میان جاذب و رنگزا می‌گردد که در نهایت منجر به افزایش میزان رنگبری می‌شود. پس از زمان مشخصی، تمام جایگاه‌های جذب در فیلم اشباع شده و ادامه زمان تماس تأثیری در افزایش جذب ندارد (۲۳، ۲۴).

۳-۳- تأثیر غلظت رنگزا بر میزان رنگبری توسط باکتری‌ها

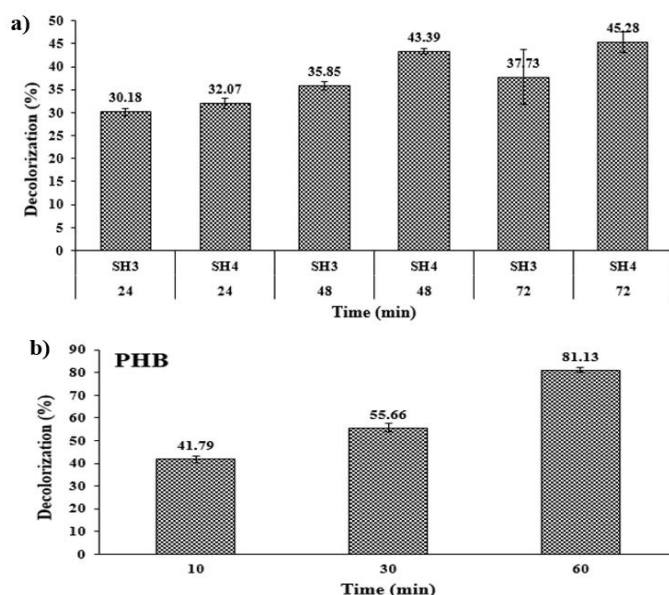
غلظت رنگزا نیز بر کارایی فرایند رنگزدایی تأثیر می‌گذارد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزایش غلظت اولیه رنگزا، موجب افزایش بازده رنگبری می‌شود. علت این امر را می‌توان در دسترسی بیشتر مولکول‌های رنگزا به سطح سلولی و آنزیم‌های ترشح‌شده از باکتری و در نتیجه افزایش نرخ برهم‌کنش و تجزیه دانست. اما غلظت‌های بالاتر منجر به کاهش کارایی رنگزدایی توسط باکتری‌ها می‌شود که دلیل آن سمی بودن رنگزاها است که فعالیت‌های متابولیکی را مهار می‌کند و همچنین اشباع آنزیم‌ها و محدود شدن ظرفیت جذب، بازده حذف را کاهش می‌دهد (شکل ۳a) (۲۱، ۱۳). همچنین شکل ۳b نشان می‌دهد که غلظت اولیه رنگزا بر حذف متیلن بلو با استفاده از فیلم تأثیر می‌گذارد.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار حذف رنگزا توسط باکتری در $pH=7$ بوده است. اگرچه در pH قلیایی، بار منفی سطح سلول باکتری افزایش می‌یابد و این می‌تواند جذب الکترواستاتیکی رنگزای متیلن‌بلو را تقویت کند، اما ممکن است که کاهش فعالیت آنزیمی، آسیب غشای باکتری و تغییرات ساختاری رنگزا موجب شوند که بازده رنگبری کاهش یابد (۲۱). از طرفی در رابطه با فیلم PHB بازده حذف رنگزا با افزایش pH از ۳ به ۱۰، افزایش یافت که احتمالاً به دلیل افزایش جذب رنگزای کاتیونی متیلن‌بلو از طریق تبادل یونی با گروه‌های آنیونی روی سطح فیلم است. pH بر رقابت بین یون‌های هیدروژن و کاتیون‌های رنگزا برای مکان‌های جذب تأثیر می‌گذارد و با سطوح pH بالاتر جذب رنگزاهای کاتیونی را بر روی لایه‌ها افزایش می‌دهد (۱۲).

۳-۲- تأثیر زمان بر میزان رنگبری توسط باکتری‌ها

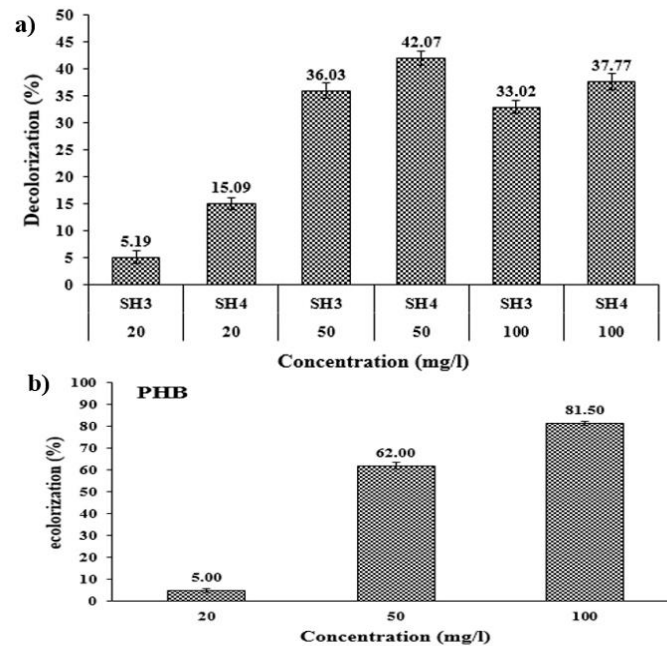
طول زمان تماس می‌تواند بر توانایی جذب زیستی تأثیر بگذارد و نقش مهمی در حذف رنگزا ایفا کند. اثر زمان محلول بر حذف رنگزا در شکل ۲ نشان داده شده است.

رنگبری توسط باکتری‌ها یک فرایند تدریجی و وابسته به رشد، تکثیر و ترشح آنزیم‌های تجزیه‌کننده است. از طرفی، زمان بیشتر باعث می‌شود برهم‌کنش بین سلول‌های باکتری و مولکول‌های رنگزا بهتر و بیشتر برقرار شود و فرایند جذب سطحی و تجزیه زیستی به‌طور مؤثرتری انجام شود (۲۲). رنگبری متیلن بلو توسط باکتری پس از ۴۸ ساعت تقریباً به حالت ثابت رسید. از طرفی در رابطه با فیلم مورد



شکل ۲: اثر زمان روی حذف رنگزای متیلن‌بلو، (a) باکتری ($pH=7$, ۵۰ mg/l) و (b) فیلم ($pH=10$, ۱۰۰ mg/l).

Figure 2: Effect of time on MB removal, (a) bacteria ($pH 7$, 50 mg/l), and (b) film ($pH 10$, 100 mg/l).



شکل ۳: اثر غلظت رنگزا روی حذف رنگزای متیلن بلو، (a) باکتری (pH=۷، ۷۲ h) و (b) فیلم (pH=۷، ۶۰ min).
Figure 3: Effect of dye concentration on MB removal, (a) bacteria (pH 7, 72 h), and (b) film (pH 7, 60 min).

pH و دما بر رنگبری بررسی شد. بالاترین درصد رنگبری (۸۸ درصد) در غلظت ۴۰ ppm، دمای ۳۸°C، pH=۹ و پس از ۶ روز گرماگذاری به‌دست آمد (۲۷). در پژوهشی توسط سینگ و همکارانش (۲۰۲۴)، میزان رنگزدایی متیلن بلو توسط *Bacillus cereus* تا میزان ۹۴/۹۲ درصد در مدت ۵ روز و در شرایط pH خنثی و دمای ۳۰°C گزارش شده است (۲۸). در تحقیقی توسط فام و همکارانش (۲۰۲۲)، سویه‌ای از خاک جداسازی شد و در رنگبری متیلن بلو مورد استفاده قرار گرفت. بیشترین میزان رنگبری (۹۹/۵ درصد) توسط این سویه در غلظت رنگزای ۱۰۰۰ ppm، در مدت ۴۸ ساعت، در شرایط pH خنثی، دمای ۳۵°C و حالت استاتیک گزارش شده است (۲۹). تفاوت در درصد رنگبری و شرایط بهینه حذف رنگزا میان سویه‌های مختلف باکتریایی، ناشی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی، آنزیمی و ژنتیکی منحصر به فرد هر باکتری است که فعالیت و پایداری این آنزیم‌ها در شرایط محیطی متفاوت نظیر pH، دما و غلظت رنگزا تغییر می‌کند. بنابراین، بهینه‌سازی شرایط برای هر سویه خاص ضروری است تا عملکرد رنگبری به حداکثر برسد (۷). در تحقیق حاضر هم‌زمان با بررسی اثر هر یک از عوامل عملیاتی بر روی جاذب‌ها، یک نمونه شاهد از رنگزای متیلن‌بلو، بدون جاذب نیز نگهداری شد که هیچ کاهش قابل توجهی در طول زمان در غلظت رنگزا مشاهده نشد. به‌عبارت دیگر، متیلن‌بلو در حضور نور و در

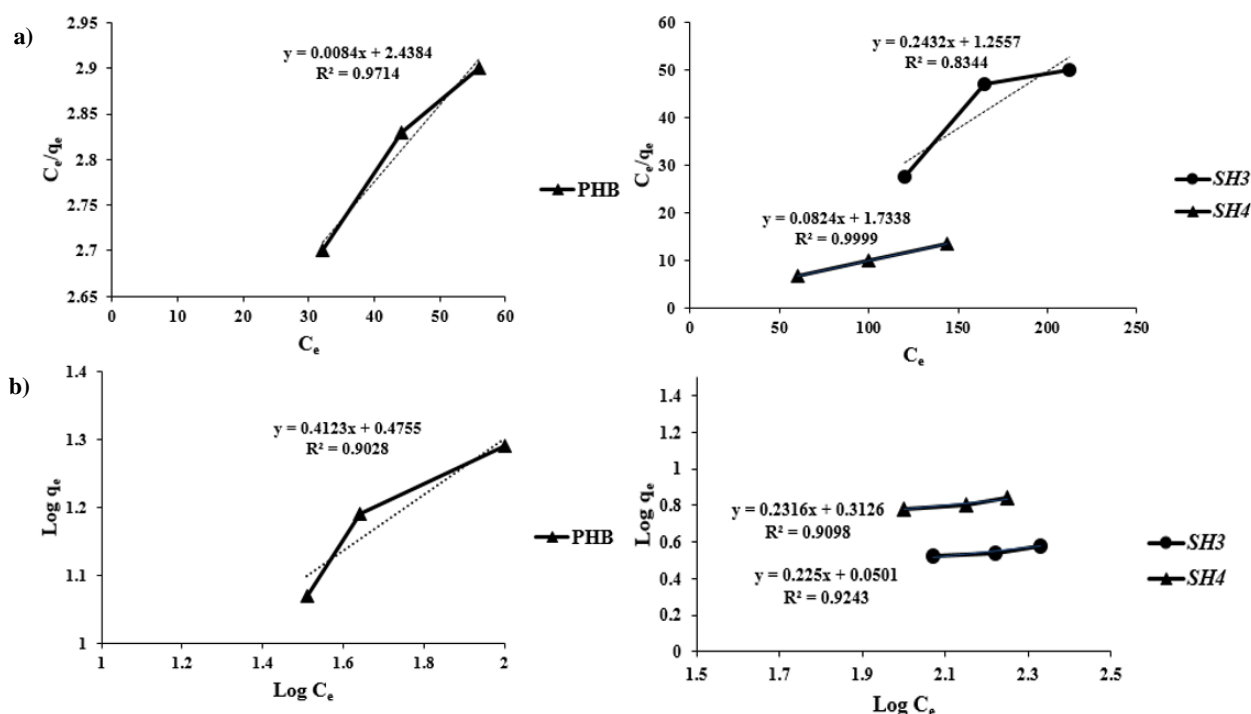
اثر غلظت اولیه رنگزا بر بازده حذف نشان داد که با افزایش غلظت متیلن بلو از ۲۰ به ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، درصد حذف افزایش یافت. در غلظت‌های پایین‌تر، تعداد مولکول‌های رنگزا در محلول محدود بوده و در نتیجه احتمال برخورد آن‌ها با مکان‌های فعال جذب کمتر است که منجر به بازده حذف پایین‌تر می‌شود. همچنین افزایش تعداد مولکول‌های رنگزا در غلظت‌های بالاتر موجب افزایش برهم‌کنش بین رنگزا و گروه‌های عاملی سطح فیلم شده و ظرفیت جذب به‌شکل مؤثرتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی به‌دلیل ساختار فشرده و سطح تماس محدود فیلم با محلول، مکان‌های فعال جذب در غلظت‌های خیلی بالاتر، به‌سرعت اشباع شده و امکان جذب مولکول‌های بیشتر فراهم نمی‌شود (۲۶، ۲۵). در تحقیقی توسط آنجل و همکارانش (۲۰۲۴)، از فیلم تهیه شده از استات سلولز/پلی‌هیدروکسی بوتیرات برای حذف رنگزای متیلن بلو استفاده شد. نتایج نشان داد بالاترین میزان رنگبری (۸۹ درصد) در غلظت ۴۰ ppm از رنگزا و ۱۰ mg از جاذب به‌دست آمد (ظرفیت جذب ۳۵/۹۸ mg/g). دستیابی به بازده بالا در غلظت پایین رنگزا می‌تواند ناشی از وجود گروه‌های قطبی بیشتر در ترکیب این دو پلیمر و تعامل بهتر سطحی با مولکول‌های رنگزا باشد (۲۴). در تحقیقی توسط انتظار و همکارانش (۲۰۱۵)، توانایی رنگبری رنگزای آزوی بتا نفتول نارنجی توسط باکتری *Halomonas Strain Gb* (جداسازی شده از کارخانه نساجی قم و کاشان) و اثر فاکتور غلظت،

در میان سویه‌های باکتریایی مورد بررسی، سویه‌ای که بیشترین میزان حذف رنگ را نشان داد (SH4)، تطابق بالاتری با مدل ایزوترم لانگمویر داشت. این موضوع بیانگر آن است که جذب رنگزا توسط این باکتری با بیشترین میزان رنگبری، به صورت تک‌لایه‌ای و در سطوح یکنواخت انجام شده است و سازوکار جذب آن به احتمال زیاد از نوع شیمیایی می‌باشد (۲۲). انطباق داده‌ها با مدل لانگمویر نشان‌دهنده جذب یکنواخت و تک‌لایه‌ای روی سطح همگن باکتری است که حاکی از وجود نقاط جذب مشخص و محدود می‌باشد. این در حالی است که انطباق با مدل فرندلیچ بیانگر جذب چندلایه‌ای روی سطح ناهمگن است. تفاوت در رفتار جذب می‌تواند ناشی از

محیط قلیایی بدون ماده فعال پایدار باقی ماند و کاهش قابل توجه غلظت متیلن بلو در شرایط آزمایشی نیازمند حضور جاذب/کاتالیست فعال بوده و نمی‌توان آن را به نورکافت مستقیم یا pH قلیایی به‌تنهایی نسبت داد (۳۰، ۳۱).

۴-۳- بررسی ایزوترم، سینتیک و ترمودینامیک جذب در رنگبری توسط سویه‌های باکتریایی

نمودار خطی مدل‌های ایزوترم فرندلیچ و لانگمویر در شکل ۴ نشان داده شده است. ثوابت ایزوترم‌های جذب در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴: ایزوترم (a) لانگمویر و (b) فرندلیچ.

Figure 4: a) Langmuir, and b) Freundlich isotherms.

جدول ۱: ثوابت ایزوترم.

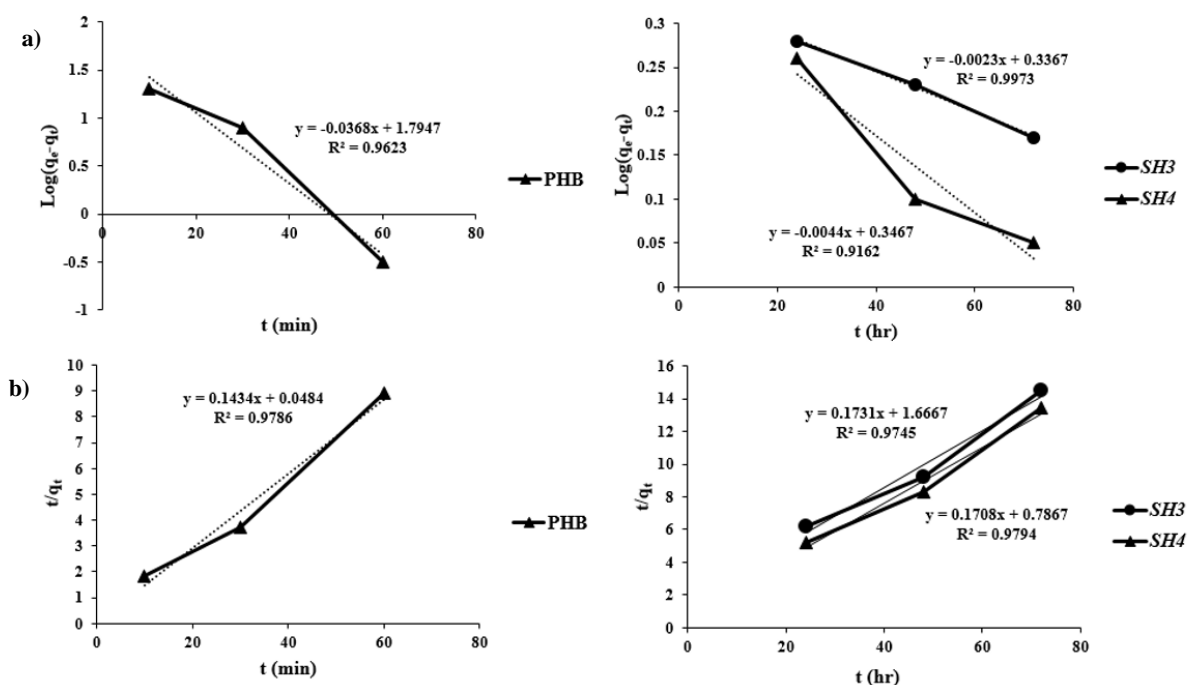
Table 1: Isotherm constants.

Adsorbents	Langmuir			Freundlich		
	R^2	q_{max}	K_L	R^2	n	K_F
SH3	0.83	4.11	0.19	0.93	4.44	1.12
SH4	0.99	12.13	0.047	0.91	4.32	2.05
PHB	0.97	119.05	0.0034	0.90	2.42	2.99

بالا نشان داده می‌شود، نشان داد که جذب رنگزای متیلن‌بلو روی فیلم، از یک سازوکار تک‌لایه پیروی می‌کند. این مدل فرض می‌کند که هر جایگاه تنها یک مولکول رنگزا را جذب می‌کند و پس از اشباع، امکان جذب بیشتر در آن نقطه وجود ندارد و فرایند جذب به‌صورت یکنواخت تا رسیدن به اشباع پیش می‌رود. شکل ۵ مدل‌های مرتبه اول و دوم و جدول ۲ نتایج متغیرهای سینتیکی را نشان می‌دهد.

1. Öztürk

تفاوت‌های ساختاری دیواره سلولی، نوع ترکیبات سطحی، تراکم گروه‌های عاملی، و نوع آنزیم‌های ترشح‌شده از سویه‌های باکتریایی باشد. در مطالعه‌ای توسط اوزتورک^۱ و همکارانش (۲۰۲۰) بر روی سویه *Rhodospseudomonas palustris* 51ATA و جذب رنگزای آزو مشخص شد که در دماهای ۳۵-۲۵ °C داده‌های جذب به‌خوبی با مدل ایزوترم لانگمویر منطبق است. ولی با تغییر شرایط محیطی، مدل فرندلیش نیز انطباق مناسبی نشان داد. این یافته دوگانه نشان می‌دهد توزیع محل‌های جذب روی سطح سلولی و ساختار فیزیکی - شیمیایی باکتری با تغییر شرایط مانند دما یا pH تغییر می‌کند (۲۵). همبستگی قوی بین داده‌های تجربی و مدل لانگمویر، که با مقدار R²



شکل ۵: سینتیکیه) مرتبه اول و (b) مرتبه دوم.

Figure 5: a) pseudo- first, and b) second-order model kinetics.

جدول ۲: مقادیر متغیرهای سینتیکی.

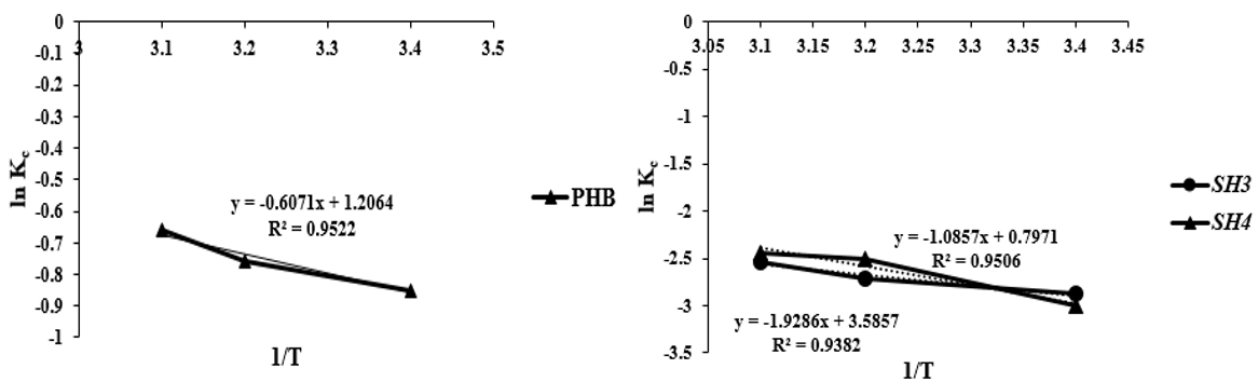
Table 2: Kinetics parameter values.

Adsorbents	First-order			Second-order		
	R ²	K ₁ (min ⁻¹)	q _{e1} (mg g ⁻¹)	R ²	K ₂ (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	q _{e2} (mg g ⁻¹)
SH3	0.99	0.0023	2.17	0.97	0.43	5.77
SH4	0.92	0.0044	2.22	0.98	0.21	5.85
PHB	0.96	0.0368	62.33	0.98	0.42	6.97

توسط روح^۴ و همکارانش (۲۰۲۳)، از پلی (۳-هیدروکسی بوتیرات-b- پلی متیل متاکریلات) دوپ شده با نانوذرات نقره (PHB- Ag NPs) به عنوان جاذب رنگزای متیلن بلو استفاده شد. بررسی ها نشان داد که جاذب حاصل دارای ظرفیت جذب تک لایه ۱۶۹/۳ mg/g برای متیلن بلو است. مطالعه سینتیکی نشان داد که واکنش از سینتیک شبه درجه دوم پیروی می کند و داده های ترمودینامیکی نشان دهنده ماهیت گرماگیر فرایند جذب است (۳۴).
در شکل ۶ رابطه بین ترمودینامیک جذب و دما نشان داده شده است. همچنین مقادیر متغیرهای ترمودینامیکی در جدول ۳ ارائه شده است.

1. Kenawy
2. Consortium
3. Azotobacter
4. Rooh

بررسی سینتیک جذب نشان داد که داده های حاصل از رنگبری توسط باکتری SH3 و SH4 به ترتیب با مدل سینتیکی شبه مرتبه اول و دوم تطابق بیشتری دارند. در تحقیقی توسط کناو^۱ و همکارانش (۲۰۲۱) میزان رنگبری رنگزای متیلن بلو توسط کنسرسیون^۲ یا ترکیبی از چند گونه باکتری (۷۶/۱ درصد) و همچنین از توپاکتر^۳ (۷۸/۷ درصد) بررسی شد و تحلیل سینتیکی نشان داد که فرایند از مدل سینتیک مرتبه اول تبعیت می کند (۳۲). مقدار R² بالاتر در سینتیک مرتبه دوم نشان داد که سازوکار جذب رنگزا روی سطح فیلم با این مدل همسو است و نشان دهنده غالب بودن فرایند جذب شیمیایی است. این موضوع بیانگر آن است که نرخ جذب به توان دوم غلظت جایگاه های فعال سطح جاذب وابسته است و فرایند به صورت تدریجی تر به تعادل می رسد. در مقایسه با مدل شبه مرتبه اول، که در آن جذب در زمان های اولیه سریع تر اتفاق می افتد، مدل شبه مرتبه دوم معمولاً با سرعت اولیه کمتر همراه است (۳۳). در تحقیقی



شکل ۶: منحنی K_c بر 1/T.
Figure 6: Plots of ln K_c versus 1/T.

جدول ۳: متغیرهای ترمودینامیکی.

Table 3: Thermodynamic parameters.

Adsorbents	R ²	ΔS (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)		
				323K	310K	293K
SH3	0.95	6.63	9.03	-2.13	-2.05	-1.93
SH4	0.94	29.81	16.03	-9.61	-9.22	-8.71
PHB	0.95	10.03	5.05	-3.2	-3.10	-2.93

مقادیر منفی ΔG^0 نشان می‌دهد که فرایند جذب خودبه‌خود بوده است. مقدار مثبت ΔS^0 نشان‌دهنده افزایش تصادفی یا بی‌نظمی در طول فرایند جذب است. ΔH^0 مثبت نشان می‌دهد که این فرایند گرماگیر است. به عبارتی، افزایش دما موجب افزایش ظرفیت جذب شده و فرایند به دریافت انرژی نیاز دارد. بنابراین، گرماگیر بودن جذب، نشان‌دهنده تأثیر مثبت دما بر عملکرد حذف رنگزا و احتمالاً افزایش تحرک مولکول‌های رنگزا و دسترسی بیشتر آن‌ها به محل‌های جذب است. از طرفی به علت ساختار پیچیده باکتری، فرایند انرژی‌بر است. دیواره سلولی باکتری شامل پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و غیره است که با افزایش دما ممکن است ساختارشان دچار تغییر شود و دسترسی بهتر و اتصال قوی‌تر رنگزا به مکان‌های باکتری را فراهم کند (۳۵). بررسی ترمودینامیکی رنگبری توسط فیلم نشان داد که فرایند جذب گرماگیر است که احتمالاً به دلیل نیاز به انرژی برای غلبه بر موانع نفوذ رنگزا به داخل ساختار پلیمری فیلم است. همچنین افزایش دما باعث انعطاف‌پذیری بیشتر بستر پلیمری و بهبود دسترسی به مکان‌های فعال می‌باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی اساتید و کارشناسان دانشکده مهندسی نساجی و گروه زیست‌شناسی دانشگاه یزد تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۴- نتیجه‌گیری

آلودگی ناشی از رنگزاهای نساجی به دلیل پایداری و سمی بودن رنگزاهای سنتزی، یکی از نگرانی‌های جدی زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، از دو سویه‌ی باکتریایی برای رنگبری زیستی رنگزای متیلن بلو از محلول آبی استفاده شد. تأثیر عوامل مختلف شامل دما، غلظت رنگزا، pH و زمان تماس بر بازده رنگبری مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین میزان حذف رنگزا (۴۵/۲۸ درصد) در شرایط بهینه

۵- مراجع

- Sarkheil H, Noormohammadi F, Rezaei AR, Borujeni MK. Dye pollution removal from mining and industrial wastewaters by using Chitson nanoparticles. *Int Conf Agric Environ Biol Sci*. 2014;4:1437-1442.
- Al-Tohamy R, Ali SS, Li F, Okasha KM, Mahmoud YA-G, Elsamahy T, et al. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2022; 231:113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>.
- McMullan G, Meehan C, Conneely A, Kirby N, Robinson T, Nigam P, et al. Microbial decolourisation and degradation of textile dyes. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2001;56:81-87. <https://doi.org/10.1007/s002530000587>.
- Alsukaibi AKD. Various approaches for the detoxification of toxic dyes in wastewater. *Processes*. 2022;10(10):1968. <https://doi.org/10.3390/pr10101968>
- Osorio-Aguilar DM, Saldarriaga-Noreña HA, Murillo-Tovar MA, Vergara-Sánchez J, Ramírez-Aparicio J, Magallón-Cacho L, et al. Adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue in carbon nanotubes: a review with bibliometric analysis. *Catal*. 2023;13:1480. <https://doi.org/10.3390/catal13121480>
- Pratama SA, Purnomo AS, Asranudin A. Methylene blue removal using alginate-PVA-Pseudomonas aeruginosa bio-composite: Kinetics and biodegradation studies. *Biotechnol Rep*. 2025;e00906. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2025.e00906>
- Wu K, Shi M, Pan X, Zhang J, Zhang X, Shen T, et al. Decolourization and biodegradation of methylene blue dye by a ligninolytic enzyme-producing *Bacillus thuringiensis*: Degradation products and pathway. *Enzyme Microb Technol*. 2022;156:109999. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2022.109999>.
- Heitmann AP, Rocha IC, de Souza PP, Oliveira LCA, de O. Patrício PS. Photoactivation of a biodegradable polymer (PHB): Generation of radicals for pollutants oxidation. *Catal Today*. 2020;344:xx. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.12.024>.
- Shahi Z, Khajeh Mehrizi M, Mirbagheri Firoozabad MS. *Biopolymers in the Textile Industry*. Springer; 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-0684-6>.
- Acharjee SA, Bharali P, Gogoi B, Sorhie V, Walling B, Alemtoshi. PHA-Based Bioplastic: a Potential Alternative to Address Microplastic Pollution. *Water Air Soil Pollut*.

- 2023;234:xx. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-06029-2>.
11. Montanheiro TLA, Cristóvan FH, Machado JPB, Tada DB, Durán N, Lemes AP. Effect of MWCNT functionalization on thermal and electrical properties of PHBV/MWCNT nanocomposites. *J Mater Res*. 2015;30:xx. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.303>.
 12. Choont A, Prasertsan P, Klomklao S, Sangkharak K. An environmentally friendly process for textile wastewater treatment with a medium-chain-length polyhydroxyalkanoate film. *J Polym Environ*. 2021;29:3335-3346. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02121-6>.
 13. Etezzad SM, Sadeghi-Kiakhani M. Decolorization of malachite green dye solution by bacterial biodegradation. *Prog Color Colorants Coat*. 2021;14:79-87. <https://doi.org/10.30509/PCCC.2021.81670>.
 14. Darvishi L, Ebrahimi A, Mahzounieh MR. Isolation and investigation of the effect of soil and textile wastewater bacteria on decolorization of industrial dyes. *J Ilam Univ Med Sci*. 2019;27(1):32-43. (In Persian).
 15. Saber Tahan M, Farazmand A, Pourbabaee A. The removal of dye colours from textile wastewater factories using mixed thermophilic bacterial consortium. *NCMBJ*. 2017;7(28):25-32. (In Persian).
 16. Shahi Z, Khajeh Mehrizi M, Mirbagheri Firoozabad MS. Decolorization of textile dye by isolated bacterial strains from textile waste and their ability to produce polyhydroxyalkanoate. *Prog Color Colorants Coat*. 2024; 18 (1):99-111. <https://doi.org/10.30509/PCCC.2024.167299>. 1292.
 17. Shahi Z, Khajeh Mehrizi M, Mirbagheri Firoozabad MS, Adeel Sh. Biodecolorization of textile dye using novel bacterial, film-based, and immobilized nanofiber systems for environmental wastewater treatment: a comparative study. *J Environ Chem Eng*. 2026; 14(1):121119. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121119>.
 18. Siti Zuraida M, Nurhaslina CR, Hamid KHK. Removal of Synthetic Dyes from Wastewater by Using Bacteria, *Lactobacillus delbrueckii*. *Int Refereed J Eng Sci*. 2013;2(5):1-7.
 19. Gouamid M, Ouahrani MR, Bensaci MB. Adsorption Equilibrium, kinetics and thermodynamics of methylene blue from aqueous solutions using Date Palm Leaves. *Energy Procedia*. 2013;36:898-907. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.103>.
 20. Eti IA, Khatun M, Khatun MA, Rahman MO, Anis-Ul-Haque KM, Alam MJ. Removal of Dye from Wastewater Using a Novel Composite Film Incorporating Nano-cellulose. *Adv Polym Technol*. 2023;1-9. <https://doi.org/10.1155/2023/4431941>.
 21. Moyo S, Makhanya BP, Zwane PE. Use of bacterial isolates in the treatment of textile dye wastewater: A review. *Heliyon*. 2022;8(6):e09632. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09632>.
 22. Sajed TS, Haji A, Khajeh Mehrizi M, Nasiri Boroumand M. Modification of wool protein fiber with plasma and dendrimer: Effects on dyeing with cochineal. *Int J Biol Macromol*. 2017;107:642-653. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.038>.
 23. Aia L, Zhang Ch, Liao F, Wanga Y, Li M, Meng L, et al. Removal of methylene blue from aqueous solution with magnetite loaded multi-wall carbon nanotube: Kinetic, isotherm and mechanism analysis. *J Hazard Mater*. 2011; 198:282-290. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.041>.
 24. Raj DVK, Renuka Devi M, Venkatesh B, Kubera Sampath Kumar S, Prakash C. Sustainable removal of methylene blue dye from textile effluent by using cellulose nanocrystals extracted from sugarcane bagasse. *Biomass Convers Biorefin*. 2022;14(10):1-9. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03284-5>.
 25. Öztürk A, Bayol E, Abdullah MI. Characterization of the biosorption of fast black azo dye K salt by the bacterium *Rhodospseudomonas palustris* 51ATA strain. *Electron J Biotechnol*. 2020;46:22-29. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2020.05.002>.
 26. Schwendler LA, Lansarin MA. Polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate/titanium dioxide composite films: Green synthesis, characterization, and photocatalytic assessment. *J Polym Res*. 2023;30(5):169. <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03556-2>.
 27. Entezari Gh, Otadi M, Amiri R. Study of decolorization ability of orange azo β -NapHtol by *Halomonas* Strain Gb bacteria and optimization of the effects of concentration, pH and temperature. *Petrol Res*. 2015;25:76-87. (In Persian).
 28. Singh S, Chaudhary P, Sharma A. Efficient decolourization of toluidine blue and methylene blue using *Bacillus cereus*. *Vegetos*. 2024;37(6):2439-2447. <https://doi.org/10.1007/s42535-023-00747-6>.
 29. Pham VHT, Kim J, Chang S, Chung W. Biodegradation of methylene blue using a novel lignin peroxidase enzyme producing bacteria, named *Bacillus* sp. React3, as a promising candidate for dye-contaminated wastewater treatment. *Fermentation*. 2022;8(5):190. <https://doi.org/10.3390/fermentation8050190>.
 30. Khan I, Saeed K, Zekker I, Zhang B, Hendi AH, Ahmad A, Ahmad S, Zada N, Ahmad H, Shah LA, Shah T, Khan I. Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*. 2022;14(2):242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>.
 31. Moosavi S, Li RYM, Lai CW, Yusof Y, Gan S, Akbarzadeh O, Chowhury ZZ, Yue XG, Johan MR. Methylene blue dye photocatalytic degradation over synthesised $Fe_3O_4/AC/TiO_2$ nanocatalyst: Degradation and reusability studies. *Nanomater*. 2020;10(12):2360. <https://doi.org/10.3390/nano10122360>.
 32. Kenawy ER, Shabaka AA, Abou-Zeid AM, Hassouna MS, Elhiti MA. Silica-based nano-adsorbent for enhancement of bacterial biodegradation of methylene blue dye. *Desal Water Treat*. 2021;241:183-191. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27829>.
 33. Simonin JP. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chem Eng J*. 2016;300:254-263. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.079>.
 34. Ullah R, Tuzen M, Hazer B. Synthesized of poly(3-hydroxy butyrate)-b-poly(methyl methacrylate) with Ag nano-particles for removal of methylene blue by multivariate optimization approach. *Research Square (Preprint)* (2023), <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2450619/v1>.
 35. Foo KY, Hameed BH. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chem Eng J*. 2010;156:2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.

How to cite this article:

Shahi Z, Khajeh Mehrizi M, Mirbagheri Firoozabad MS. Investigation of Methylene Blue Decolorization Using Polyhydroxybutyrate Biopolymer and Bacteria Isolated from Textile Wastewater. *J Color Sci Tech*. 2026;19(4):377-388. <https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167761.1281> [In Persian]