فصلنامه (علمی)

زیست شناسی تکوینی

سال شانزدهم، شماره ۴، پاییز ۱۴۰۳ ص. ۳۶-۲۳

مقاله مروری

مروری بر فرآیندهای تولید چرم مبتنی بر میسلیوم قارچ‌ها

شهرزاد صادقی امجد[۱]، حورا دادگستر[۲]، محدثه لاری پور[۳*]

[۱] دانشجو دکتری گروه میکروبیولوژی، دانشکدهٔ علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

[۲] دانشجو دکتری گروه میکروبیولوژی، دانشکدهٔ علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

[۳*] دانشیار گروه میکروبیولوژی، دانشکدهٔ علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

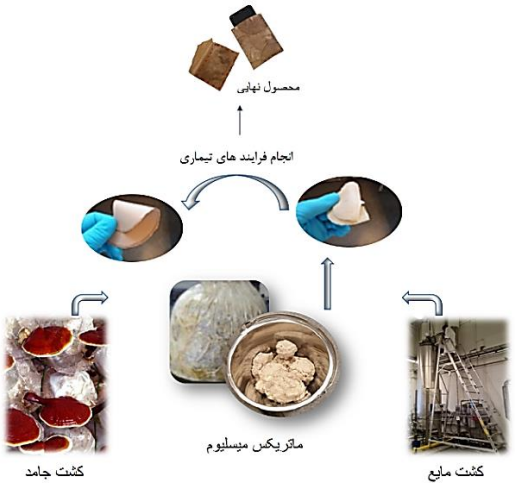
[*] (نویسنده مسئول مکاتبات): m.larypoor@iau-tnb.ac.ir

تاریخ دریافت: تیر ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

چکیده

با توسعه روزافزون جهانی علم بیوتکنولوژی و افزایش جمعیت، آدمی همواره به دنبال کاهش خسارات وارده به محیط زیست بواسطه حیات خویش بوده است، قارچ‌ها و گیاهان مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تولید و توسعه زیستی مواد پایدار هستند. تجدیدپذیر بودن، داشتن ایمنی بالا برای محیط‌زیست، ارزان بودن،زیست تخریب پذیر بودن و بومی بودن مواد زیستی، نقطه عطف مهمی در مهندسی زیستی مواد است، عملکرد اصلی قارچ‌ها در تولید آنزیم‌های مختلف و تاثیر آن بر روی انواع سوبسترا می‌باشد که می‌توانند این سوبسترا را به بسترهایی با استحکام و تحمل فشار بالا تبدیل کنند، گونه‌های مختلفی از قارچ‌های رشته‌ایی و کلاهدار براساس عملکرد ذکر شده در فرایند تولید چرم دخیل هستند. تولید انبوه آنها طی کشت (به سه روش جامد، مایع و غوطه‌ور)، جداسازی زیست‌توده حاصله طی فرایندهای خاص، خشک کردن، شکل‌دهی نهایی و جایگزینی ترکیب حاصله در صنعت چرم می‌تواند درکاهش بخش بزرگی از خسارات وارده به محیط‌زیست مثمرثمر باشد.

کلیدواژه‌ها: چرم، قارچ، چرم مبتنی بر میسلیوم، ماتریکس زیستی.



چکیده گرافیکی

مقدمه

باتوجه به سرعت رشد جمعیت، نیاز به پیشرفت تکنولوژی افزایش یافته است، در این راستا تولید و توسعه فرآیندهایی که کم‌ترین میزان خسارات را به محیط‌زیست وارد کنند و از اقتصاد دایره‌ای پیروی کنند مورد توجه قرار گرفته است. [۱, ۲] هدف اقتصاد دایره‌ای تولید کالاها و خدمات پایدار با الگوی مصرف صحیح منابع و به حداقل رساندن ضایعات است. [۱] رشد تساعدی جمعیت جهانی، افزایش تقاضای غذا و محصولات کشاورزی و به دنبال این‌ها ضایعات و محصولات جانبی کشاورزی را افزایش داده‌است. [۳] در اقتصاد دایره‌ای، روند بازیافت و استفاده از محصولات جانبی مورد توجه قرار می‌گیرد. [۷]

در نظر گرفتن اقتصاد دایره‌ای محققان را به جستجوی جایگزین‌های پایدار برای محصولات مبتنی بر منابع تجدیدناپذیر به منظور کاهش استرس‌های زیست‌محیطی، سوق داده‌است. [۱, ۴] استراتژی توسعه جایگزین‌های پایدار جهانی به سمت مواد مبتنی بر زیست هدف گذاری شده‌است. [۵-۷] در طراحی جایگزین‌های پایدار ویژگی‌هایی چون قابل بازیافت بودن، در دسترس بودن مواد اولیه، سازگاری با محیط‌زیست، مقرون‌به‌صرفه بودن مورد توجه قرار می‌گیرد. [۱, ۴]

قارچ‌ها و گیاهان مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تولید و توسعه مواد پایدار زیستی هستند و با دارا بودن دو ویژگی تجدیدپذیر بودن و ایمن بودن برای محیط‌زیست به نقطه عطفی در مهندسی زیستی مواد تبدیل شده‌اند. [۶, ۸, ۹] رشد قارچ‌ها به دنبال استفاده از ضایعات و محصولات جانبی کشاورزی به عنوان ماده اولیه و قابل بازیافت بودن، از نظر اقتصادی و علمی توجه‌ها را به خود جلب کرده‌است. [۳, ۵]

قارچ‌ها

قارچ‌ها یوکاریت‌هایی هتروتروف، شامل مخمرها، قارچ‌های کلاهدار و قارچ‌های رشته‌ایی هستند. [۱۰, ۱۱] قارچ‌ها از متابولیت‌های ثانویه با ارزش زیادی مانند پلی ساکاریدها، اسیدهای چرب، ترپنوئیدها و ترکیبات فنلی تشکیل شده‌اند. متابولیت‌های ثانویه قارچ فعالیت‌های بیولوژیکی مختلفی از جمله آنتی‌اکسیدانی، ضدویروسی، ضدالتهابی، ضدانعقادی، ضدکلسترول، ضدسرطانی، ضدمیکروبی و ... را نشان می‌دهند. [۴, ۱۲-۱۴] این ترکیبات مرتبط با قارچ‌ها، به عنوان عوامل درمانی ازجمله عوامل ضدپیری استفاده می‌شوند. [۴] قارچ‌ها حاوی آنزیم‌هایی نیز هستند که به طور گسترده در صنایع‌غذایی، سوخت‌های‌زیستی، شوینده‌ها و ترکیبات زیست فعال قارچی در دامپزشکی و پزشکی استفاده می‌شوند. [۱۳, ۱۴]

میسلیوم

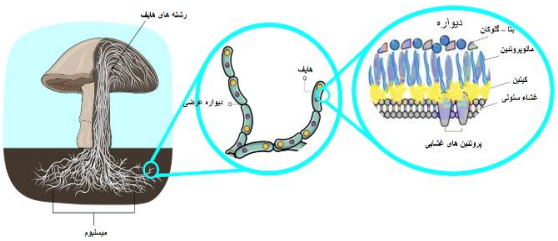
میسلیوم قسمت رویشی یک قارچ است که ماده‌ای سریع الرشد، ایمن و بی اثر به عنوان ماتریکس زیستی می‌باشد. [۱, ۱۵, ۱۶] میسلیوم شبکه متراکمی‌از رشته‌های نازک به نام هیف است که رشد می‌کند و به یک ماده جامد تبدیل می‌شود. کیتین قارچی، در دیواره‌های سلولی هیف‌ها موجود می‌باشد که در شکل ۱ آورده شده است. میسلیوم‌ها رشته‌های ریز سفید با ساختار سه بعدی، به زیرلایه‌های آلی حمله کرده و آنها را تجزیه می‌کنند، در طول رشد میسلیوم، سلولز، لیگنین یا همی‌سلولز و.... بعنوان سوبسترا می‌توانند توسط قارچ‌ها از طریق ترشح آنزیم‌های مختلفی مانند لاکتاز، لیگنین پراکسیداز و پراکسیداز منگنز تجزیه شوند. میسلیوم تقریباً در هرنوع ضایعات کشاورزی از جمله خاک‌اره و پوست پسته و ... قابل رشد است، مواد مشتق شده از آن پتانسیل تبدیل شدن به ماده انتخابی برای کاربردهای مختلف را دارند، زیرا آنها غیرسمی، قابل‌بازیافت و کم هزینه هستند. [۱, ۴, ۱۷]

الیاف میسلیوم قارچ

میسلیوم قارچ، مواد بستر را در حین رشد به هم متصل کرده و امکان تولید ساختارهایی مانند ورقه‌ها، کامپوزیت‌ها و ماتریکس‌های چرم مانند را فرآهم می‌کند. استحکام کامپوزیت‌های مبتنی بر میسلیوم قارچ‌ها، به‌ویژه گونه‌های مختلف بازیدیومیست‌ها[1] مانند **ترامتس ورسیکالر**[2] و پلوروتوس استراتوس[3] ساخته می‌شوند بسیار بالا می‌باشد. گونه‌های گانودرما لوسیدوم[4] و گانودرما اوروجنز[5] و پلوروتوس استراتوس

[1] Basidiomycota
[2] *Trametes versicolor*
[3] *Pleurotus ostreatus*
[4] *Ganoderma lucidum*
[5] *Ganoderma oregonense*

توانایی تشکیل ساختارهایی شبیه لانه زنبور با انعطاف‌پذیری بالا دارند. ارگانیسم‌های سه جنس پلی پوروس[1]، فومز[2] و گانودرما نیز در تولید میسلیوم بسیارکاربردی هستند. [۲, ۴, ۶, ۱۱]



شکل ۱- ساختار میسلیوم و هیف در قارچ‌ها

کاربرد قارچ‌ها در بیوتکنولوژی

میکروارگانیسم‌ها را می‌توان به دو شکل در تولید مواد به کاربرد: با روش غیرمستقیم، که در این روش آنزیم‌ها و متابولیت های ثانویه استخراج شده از میکروارگانیسم‌ها اهمیت دارند [۱۰] و در روش مستقیم از خود میکروارگانیسم و اجزاء ساختاری آنها مانند استفاده از میسلیوم قارچ‌های کلاهدار و رشته‌ایی در تولید مواد زیستی، استفاده می‌شود. [۱, ۱۸]

مفهوم استفاده از میسلیوم قارچ‌های رشته‌ایی و کلاهدار به عنوان ماتریکس زیستی در سال ۲۰۰۷ توسط صاحبان شرکت Evocative Eben Bayer و Gavin McIntyre آغاز شد. [۱] میسلیوم قارچ‌ها با خاصیت اتصالی که دارد ترکیبات بستر را به یکدیگر متصل کرده و ساختاری منسجم را ایجاد می‌کنند. [۱, ۳] این ساختارهای منسجم با تفاوت‌های بالقوه در نوع قارچ، نوع بستر، نوع آنزیم‌های دخیل و شرایط محیطی دارای خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مختلفی هستند. [۵, ۱۶] مواد مشتق شده از میسلیوم دارای چندین مزیت کلیدی نسبت به مواد مصنوعی معمولی، از جمله چگالی کم، تنوع بالا، صرف انرژی کم، هزینه کم و سازگاری با محیط‌زیست هستند. [۲, ۴, ۱۵] بر همین اساس محصولات حاصل طیف گسترده‌ای از مواد را شامل می‌شوند و در صنایع مختلفی کاربرد دارند که در شکل ۲ به انواعی از آنها اشاره شده‌است. [۵, ۸]

صنعت ساخت‌وساز

کامپوزیت‌های ساخته شده بر اساس میسلیوم با خصوصیاتی مانند جذب حرارت و صوت می‌توانند جایگزین فوم‌ها، الوار و پلاستیک برای کاربردهایی مانند عایق، پوشش، کفپوش، کابینت و ... شوند. هزینه کم، سادگی ساخت و پایداری زیست محیطی این مواد نشانگر اهمیت آن‌ها در آینده ساخت‌وساز سبز خواهد بود. [۳]

صنعت خودروسازی

کامپوزیت‌های مشتق شده از میسلیوم‌های قارچی به‌عنوان

جایگزین‌هایی برای محصولات پتروشیمی‌در صنعت خودرو سازی توصیف شده‌است. [۴] از جمله آنها می‌توان به استفاده از مخلوط قارچ و مایع برای فرآیند قالب گیری تزریقی اشاره کرد که به کاهش استفاده از پلاستیک در وسایل نقلیه کمک می‌کند. همچنین در تزئینات داخل خودرو مانند روکش صندلی، آینه و... قابل استفاده خواهد بود. [۲]

صنعت الکترونیک

بردهای مدارالکتریکی مشتق شده از میسلیوم قارچ با تلقیح در بستر و محلولی حاوی نمک‌های فلزی تهیه می‌شود، نمک‌های فلزی می‌توانند میسلیوم‌های قارچ را تغییر دهند تا یک الگویسیم کشی برای مدارالکتریکی روی آن به وجود آید. [۲]

صنعت نساجی

مواد مختلف مشتق شده از قارچ‌ها برپایه میسلیوم و نوع بستر در صنعت نساجی دارای کاربردهای متنوعی چون تولید کاغذ، پوشش بسته‌بندی موادغذایی، پانسمان‌های ضدمیکروبی، چسب‌های پوششی، موادجاذب و همچنین تولید چرم جایگزین می‌باشد. [۲, ۶, ۱۵, ۱۹]

چرم جایگزین

تقاضا برای چرم پایدار به عنوان یک ماده لوکس، برای حل مشکلات محیط‌زیستی و اخلاقی صنعت چرم در حال افزایش است. [۶, ۷, ۹, ۱۹, ۲۰] صنعت جهانی چرم با نکات منفی

[1] *Polyporus*
[2] *fomes*

زیست‌محیطی و اخلاقی زیادی مواجه است، تولید چرم عمدتاً به پرورش حیوانات و پردازش پوست آنان متکی است، [۱۹, ۲۱] پردازش پوست حیوانات یا دباغی که امروزه با کروم و سایر مواد شیمیایی انجام می‌شود. به دلیل سرعت بالا و ارزان بودن مورد توجه است، اما پساب حاصل حاوی مواد سمی شیمیایی در غلظت‌های بالاتر از حدمجاز می‌باشد که خطرات زیست‌محیطی بسیاری را موجب می‌شود. [۱۹-۲۱]

چرم محصول جانبی صنعت گوشت است با توجه به شرایط پیش رو آب و هوایی، تمایل به رژیم‌های غذایی مبتنی بر گیاه و افزایش روز افزون حامیان حیوانات و محیط‌زیست، تحقیق و توسعه تولید جایگزین‌های پایدار چرم حائز اهمیت است. [۲۰] این نگرانی‌ها اکتشاف مواد جایگزین برای چرم‌های مبتنی بر حیوانات را به دنبال داشته که به انواعی از آن‌ها در جدول ۱ پرداخته شده است. [۱۹, ۲۱]

چرم قارچ یا چرم مبتنی بر میسلیوم به عنوان "موادسبز" با روش‌های زیست‌سازگار،بدون استفاده از مواد آلاینده شیمیایی و تنها از میسلیوم قارچی به همراه بسترهای مختلف از ضایعات و محصولات‌جانبی کشاورزی بعنوان جایگزینی برای چرم‌های حیوانی تولید می‌شوند. [۴, ۸, ۲۰, ۲۲] [۶و۴و۸]

شکل ۲ - انواع محصولات مبتنی بر میسلیوم قارچ ها

جدول ۱- بررسی انواع چرم از منابع مختلف

رفرنس	ماده‌اولیه	فرآیندتولید	معایب	مزایا	خصوصیات	انواع منشاء
[۱۹]	پوست گاوی، پوست گوسفندی، پوست شترمرغ و...	دباغی (کشتار،فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی)	منشاء جانوری آلودگی محیط‌زیست طی فرآیند تولید گران قیمت بودن	استحکام بالا، بو و رنگ طبیعی، دوام و پایداری بالا، تنوع بالا و زیست‌سازگار بودن	ضخیم، مقاومت کششی و سایشی بالا نرم، انعطاف‌پذیر، پایدار	جانوری
[۸, ۱۹, ۲۱, ۲۲]	سوخت فسیلی (پلاستیک، پلی‌اورتان، پلی‌وینیل‌کلرید و سیلیکون)	فرآیندهای پتروشیمی و پلاستیک‌سازی	منشاء سوختی و تجدیدناپذیر آلودگی محیط‌زیستی طی فرآیند تولید زیست‌تخریب پذیر نبودن	نسبتا ارزان بودن قیمت فرآیند تولید نسبتا آسان	مقاومت متوسط، انعطاف‌پذیر،نرم، پایداری کم	چرم‌های مصنوعی (پلاستیک)

رفرنس	ماده‌اولیه	فرآیندتولید	معایب	مزایا	خصوصیات	انواع منشاء
[۹,۱۹ ۲۱-۲۳]	برگ آناناس، فیبر تنه موز، برگ انگور، کاکتوس، الیاف انبه و...	فرآیندهای شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی	استحکام پایین، پایداری کم و عدم توسعه تولید	منشاء گیاهی و تجدیدپذیر سازگار با محیط‌زیست ارزان قیمت بودن	انعطاف‌پذیری نسبتا بالا استحکام و پایداری متوسط	گیاهی
[۱,۴,۶, ۱۸,۲۲ ۲۳]	قارچ‌های‌رشته‌ایی و کلاه دار	کشت، فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی	توسعه‌تولید کم	منشاء طبیعی تجدیدپذیر، ارزان بودن، بومی‌بودن، سازگار با محیط‌زیست	استحکام و تحمل بالا، نرم و انعطاف‌پذیر، پایدار	قارچی

جدول ۲- بررسی چرم مبتنی بر میسلیوم قارچ‌ها

رفرنس	پرکاربردترین جنس‌های‌قارچی	مزایا / معایب	خصوصیات چرم مبتنی بر میسلیوم	بستر	محیط و روش تهیه پیش کشت برای تلقیح	نوع و شرایط کشت	نوع قارچ
[۱,۴, ۶,۲۲- ۲۵]	*Ganoderma lucidum Agaricus.spp Fomes* و *Phellinus Pleutorus*	استحکام و تحمل بالا، نیاز به فرآیندهای شیمیایی محدود، ارزان بودن، بومی بودن کاربردی در تولید چرم	ماتریکس میسلیوم حصیری، با بوی مطبوع، نرم و انعطاف‌پذیر	الیاف لیگنوسلولوزی استریل	۱- محیط‌کشت هاگ‌ها بر روی بستر جامد لیگنوسلولوزی غنی یا محیط کشت جامد ۲- شستشو، جداسازی، آسیاب کردن و تهیه سوسپانسیون قارچی	کشت اغلب در بستر جامد و یا به روش غوطه‌ور	قارچ‌کلاهدار
	Aspergillus.spp Amylomyces rouxii	- نیاز به تیمارهای شیمیایی پس از خشک شدن ماتریکس جهت افزایش انعطاف پذیری و استحکام - بومی‌بودن وکاربردی بودن در تولید چرم	ماتریکس میسلیوم حاصل شکننده	الیاف لیگنوسلولزی گسسته و استریل	۱- محیط کشت مایع یا جامد مغذییرداشت ۲- فیلتراسیون و برداشت زیست‌توده شستشو و تهیه سوسپانسیون یا تهیه مستقیم سوسپانسیون قارچی	کشت اغلب در شرایط مایع بسته و نیمه پیوسته	قارچ‌های رشته‌ایی

تجارت چرم مبتنی بر میسلیوم

صنعت چرم و محصولات چرمی با تجارت سالانه بیش از ۸۰ میلیارد دلار در لیست پرمعامله‌ترین محصولات در سراسر جهان قرار دارند. ارزش بازار جهانی کالاهای چرمی ۳۹۴/۱۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۰ و نرخ رشد سالانه ۵/۹ درصد است. [۲۰] این آمارها اهمیت این صنعت را در اقتصادجهانی بیان می‌کنند، از این رو توسعه جایگزین‌های چرمی بر پایه موادزیستی مورد توجه قرارگرفته‌است.

درآینده نه چندان دور چرم‌قارچی یک رقیب سرسخت برای چرم حیوانی و مصنوعی خواهدبود. [۸] شرکت‌ها در حال کار برای تولید حجم‌های بالاتر از چرم قارچی با هزینه کم‌تر نسبت به سایر چرم‌های مصنوعی هستند. [۴] تولیدکنندگان پیشرو چرم قارچی شرکت‌هایی مانند: MycoWork، Bolt Threads، Desserto، Mycotech Lab و Mycel، این شرکت‌ها با شرکت‌هایی مانند هرمس و مرسدس بنز نیز همکاری می‌کنند. [۸]

مراحل تولید چرم از قارچ

بیشتر گونه‌های قارچ مورد استفاده از نوع قارچ‌های ساپروفیت، رشته‌ایی و کلاهدار هستند. تخمیر در بسترهای مختلف بر پایه

محصولات کشاورزی، تحت‌عنوان مواد لیگنوسلولزی(سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) و به روش‌های متفاوت انجام شده و میسلیوم‌های متراکم حاصل خواهندشد. [۸, ۲۶]

رشد میسلیوم از پیوند هیف‌ها به زیرلایه‌های آلی بستر تشکیل می‌شود، در طول کلونیزاسیون میسلیوم، ترکیب سوبسترا توسط قارچ‌ها از طریق ترشح آنزیم‌هایی مانند لاکتاز، لیگنین پراکسیداز و منگنز پراکسیداز تجزیه می‌شوند به تدریج ساختارهای قوی و سه‌بعدی را تشکیل می‌دهند. [۱, ۵]

پس از برداشت، میسلیوم، تحت یک سری عملیات فیزیکی و شیمیایی با هدف بهبود انعطاف و همچنین افزایش دوام و خواص جذب‌کنندگی قرار میگیرد که در زیبایی، شکل، بافت و بهبود شرایط مکانیکی برای کاربردهای مختلف مورد نیاز است. علاوه بر این، تکنیک‌هایی مانند استیل‌زدایی، اتصال عرضی کیتین، دناتوره‌سازی پروتئین و... در تراکم مواد و کنترل رطوبت دخیل می‌باشند. با این حال، فرآیندهای تیماری میسلیوم‌ها هنوز تحت تحقیقات بوده و در حال حاضر هیچ روش یک پارچه و استانداردی بعنوان مبنا اصلی مورد توافق قرارنگرفته‌است. همچنین باید در نظر داشت که روش‌های پردازش در شرکت‌ها راز تجاری آنها نیز می‌باشد. [۱۹] نوع گونه، نوع بستر و روش‌های ساخت و پردازش نقش زیادی در کیفیت مواد مبتنی بر میسلیوم دارند. با این حال، تأثیر گونه‌های قارچی بر خواص مواد نهایی غالب‌تر از اثر نوع بستر است. [۱, ۵]

انتخاب گونه

انتخاب گونه یکی از چالش برانگیزترین وظایف محققین مختلف در تولید موثر مواد زیستی است. [۱]

هنگامی‌که یک ماده‌ایی را به عنوان یک ماده مبتنی بر میسلیوم توصیف می‌کنیم، انتظار می‌رود که اکثر ترکیبات این ماده از زیست‌توده قارچی مشتق شده‌باشد. بنابراین، انتخاب گونه‌های قارچی می‌تواند به طور قابل توجهی بر فرآیند تولید و خواص مواد نهایی حاصله بواسطه ی ویژگی‌های بیولوژیکی آنها تأثیر بگذارد. [۲۲]

تراکم میسلیوم، سرعت رشد، هزینه محیط رشد (سوبسترا)، سطح مضر بودن یا نبودن، سهولت کشت و ساختار میسلیوم از جمله عوامل تاثیرگذار در انتخاب گونه قارچی تولیدکننده می‌باشد. [۱]

ارتقاء سطح تولید جایگزین چرم قارچی در فرآیند استفاده از سلول‌های زنده به عنوان کارخانه‌های میکروبی، بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی برای دستیابی به یک اقتصاد رقابتی در مقیاس مهم است. [۱۸,۱۹]

بعنوان مثال کشت تک گونه معمولاً گزینه ارجح است اما هیبریداسیون و جهش ممکن است استحکام، انعطاف‌پذیری و دوام محصول را بهبود بخشند. [۸]

از آنجاییکه تنوع فرآیندهای تخریب و تجزیه بستر در قارچ‌ها زیاد است، بسترهای لیگنوسلولوزی توسط تعداد زیادی از گونه‌ها مستعمره می‌شوند اما از این میان، شاخه بازیدیومیست‌ها به دلیل خاصیت چسبندگی طبیعی میسلیوم و توانایی آنها در تجزیه لیگنوسلولز برای تولید مواد زیستی و هم چنین به دلیل وجود دو ویژگی مهم سپتا[1] و آناستوموز[2] در هیف انتخاب شده‌است. سپتاها دیواره‌های سلولی عرضی قارچ‌ها هستند که دارای یک دریچه باز شونده می‌باشند که می‌توانند بسته شوند و بدین ترتیب به سلول کمک می‌کند تا آسیب وارد شده به کلنی در اثر پارگی را از داخل و خارج کاهش داده و استحکام میسلیوم را بسیار افزایش می‌دهند. در حالی که آناستوموز دارای ویژگی خاصی در ساختن دو هیف مختلف است که در هنگام برخورد با یکدیگر ترکیب می‌شوند ویک شبکه بزرگ امکان حمل و نقل بیشتر موادمغذی با بستر را فراهم میکند. در نتیجه، میسلیوم می‌تواند سریع، قوی و متراکم رشد کند. این دو ساختار هیف، بازیدیومیست‌ها را در تولید بیومواد منحصربه‌فرد می‌کنند. [۱, ۲] گانودرما و ترامتس رایج ترین جنس‌های ذکر شده در توضیحات ثبت اختراع هستند و به دنبال آنها فومز، فوزاریوم[3]، پلوروتوس و شیزوفیلوم[4]. به جز فوزاریوم که یک آسکومیست[5] است، همه گونه‌های ذکر شده در بالا از اعضای بازیدیومیست‌ها هستند. [۲, ۲۲]

گونه‌های قارچی متعلق به راسته آگاریکال‌ها (پلوروتوس استراتوس) منجر به تولید ماتریکس زیستی با مقاومت و

[1] Septa
[2] Anastomosis
[3] *Fusarium*
[4] *Schizophyllum*
[5] *Ascomycota*

استحکام بالاتر می‌شوند. این ویژگی به دلیل توانایی آن در استعمار و رشد سریع بر روی مواد آلی مختلف حاوی لیگنین، سلولز، و همی‌سلولز و دیواره‌های سلولی ضخیم آن‌ها می‌باشد. پلوروتوس استراتوس عضوی از قارچ صدفی است که گاهی اوقات به عنوان "صدف سفید" شناخته‌می‌شود، می‌توانند منطقه وسیعی لیگنوسلولزها مانند خاک‌اره یا کاه را مستعمره و تخریب کند. علاوه بر این، پوست خشن و ظاهری سفت آن باعث می‌شود، این گونه در تولید ماتریکس زیستی ارجحیت داشته‌باشد. [۱, ۵]

نوع بستر

عامل مهمی که در افزایش تولید و فرآوری میسلیوم برای اهداف تجاری باید در نظر گرفته‌شود، بسترتخمیر است که باید به عنوان یک منبع مقرون‌به‌صرفه انرژی و موادمغذی برای قارچ عمل کند. افزایش در حجم تولید، مستلزم بهره‌وری و صرفه‌جویی در مقیاس است، بنابراین، مقدار بیشتری از بسترها برای کارخانه ارتقا یافته مورد نیاز است. بسترها ممکن است بطورکامل تخریب شده و یا کامل تخریب نشوند. اصولاً بسترها از یک یا چند منبع کربوهیدرات و نیتروژن و فسفر محلول تشکیل شده‌اند. [۲, ۱۹, ۲۱]

عوامل مهم در انتخاب بستر مناسب: (۱) محتوای‌غذایی، (۲) در دسترس بودن و فراوانی، (۳) تجزیه‌پذیری، (۴) هزینه کم (۵) خواص‌بافتی و ساختاری مناسب و (۶) سازگاری .[۱] [۹] دارابودن موادمغذی مناسب بستر مانند گلوکز که منبع اصلی موادمغذی برای قارچ است. برای دریافت این ماده‌مغذی، برخی از قارچ‌ها سلولز را به گلوکز تجزیه می‌کنند لذا بسترهای با محتوای سلولز بالا به قارچ‌ها اجازه رشد سریع‌تر می‌دهند. [۱, ۵] از طرفی بستر باید مواد دیگری برای رشد میسلیوم مانند کربن، نیتروژن، مواد معدنی، ویتامین‌ها و آب را نیز فراهم کند. بسته به گونه، قارچ‌ها می‌توانند ترکیب سلولز، لیگنین یا همی‌سلولز را تجزیه کنند که هریک ویژگی خاصی به میسلیوم حاصله می‌بخشند. مثلا میسلیوم رشد شده روی سلولز سفت‌تر است، در حالی که افزودن دکستروز به بستر مبتنی بر سلولز، میسلیوم تولیدی را الاستیک‌تر می‌کند. [۱, ۵]

سرعت رشد میسلیوم در بستر کاه سریعتر از خاک اره است. به طور مشابه، رشد میسلیوم روی باگاس سرعت رشد سریع‌تری نسبت به خاک اره و مخلوط آن نشان می‌دهد. (سرعت رشد قارچ: خاک اره< کاه < باگاس) این امر به دلیل تنوع‌غذایی و پیچیدگی گلوکان موجود در خاک اره است. علاوه بر این، کاه و باگاس دارای خواص ذرات نرم تری نسبت به خاک اره هستند، بنابراین قارچ‌ها می‌توانند موادمغذی را به راحتی از بسترهای نرم نسبت به بستر سخت بدست آورند. برای افزایش محتوای غذایی، مکمل‌های مختلف مانند سبوس گندم و سبوس برنج و کاه‌های مختلف کشاورزی می‌توانند با ترکیب بستر رشد قارچ، مخلوط شوند. [۱, ۵]

مراحل فرآیند تولید چرم از قارچ

کشت سویه

به منظور تلقیح در بستر و بررسی سویه، پیش کشتی در محیط غنی و بر اساس نوع قارچ تهیه می‌شود. [۲۰, ۲۱]

آماده سازی بستر

فرایند آماده‌سازی بستر به نوع قارچ مورد استفاده و نحوه کشت

بستگی دارد، فرآیند آماده سازی بسترهای لیگنوسلولزی، شامل تنظیم رطوبت بستر، انتقال به ظروف مورد نظر و استرلیزاسیون تحت شرایط استاندارد می‌باشد. [۲۰]

تلقیح در بستر و کشت

کشت قارچ‌ها به سه روش جامد، مایع وغوطه‌ور انجام می‌شوند. [۲۴, ۲۶-۲۸]

تخمیر در حالت جامد : در این نوع تخمیر، قارچ روی بستر جامد رشد می‌کند. تولید بالا، مصرف آب و انرژی کم، آلودگی کم و تولید فاضلاب کم، این روش را به یک روش ترجیهی برای تولید انبوه میسلیوم تبدیل کرده‌است. [۲۱, ۲۲, ۲۷, ۲۸]

تخمیر سطحی در حالت مایع: در این نوع تخمیر، در محیط مایع در شرایط استاتیک کشت داده‌می‌شود. از این حالت تخمیر برای تولید موادآلی، ترکیبات‌فرار و میسلیوم استفاده می‌شود. [۵, ۲۱, ۲۲, ۲۷, ۲۸]

تخمیر غوطه‌ور : در این نوع تخمیر، کشت قارچ‌ها در محیطی غنی از مواد غذایی انجام می‌شود. همچنین پارامترهای فرآیند در مقیاس بیوراکتور قابل کنترل هستند. میسلیوم‌های

حاصل از این روش، حالت اسفنجی و خواص لمسی متفاوتی دارند. [۵, ۲۱, ۲۲, ۲۷, ۲۸]

برداشت میسلیوم

برداشت میسلیوم با توجه به نوع تخمیر متفاوت است، در تخمیر مایع این مرحله شامل فیلتراسیون و شستشو می‌باشد، در صورتی که درتخمیر جامد میسلیوم‌ها با ساختار منسجمی را ایجاد کرده‌اند، برداشت میسلیوم همراه با بستر انجام می‌شود. [۲۰, ۲۶]

آماده سازی نمونه

آماده‌سازی نمونه بر اساس نوع قارچ و شرایط تخمیر شامل تیمارهای مختلف فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی می‌شود که می‌توان از آنها به پیش تیمار با تانن، گلیسرول و متصل کننده‌های‌زیستی، برای افزایش انعطاف‌پذیری و بدست آوردن خواص چرم مانند، اشاره کرد. [۲۰, ۲۶] سپس میسلیوم‌های تمیار شده تحت فرایندهای فیزیکی و مکانیکی قرار گرفته، پس از فشرده‌سازی و شکل‌گیری در دمای اتاق خشک می‌شوند. [۶, ۲۶]

روش‌های تحلیل نمونه

بررسی خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی چرم مبتنی بر میسلیوم تهیه شده با استفاده از آزمایشات مختلفی از جمله، تست کشش، تست تراکم، بررسی زاویه تماس آب، طیف سنجی مادون قرمز، میکروسکوپ الکترونی، میکروسکوپ نیروی اتمی، اسکن، بررسی اثرات دما و تولید منسوجات می‌توان اشاره‌کرد. [۱۸, ۲۶]

یک کیف پول کوچک دوخته شده می‌تواند کارایی محصول را برای منسوجات قارچی با خواص چرمی در مقیاس آزمایشگاهی نشان دهد.[۱۸, ۲۰] همچنین محصول نهایی قابلیت چاپ طرح های مختلف و رنگ آمیزی از جمله ا با استفاده از رنگدانه های طبیعی با منشاء قارچی را دارد. [۱۰]

بحث و نتیجه‌گیری

صنعت جهانی چرم همواره با مشکلات مختلف زیست‌محیطی و اخلاقی مواجه بوده چراکه عمدتاً به پرورش حیوانات متکی بوده است. که این امر منتج به جنگل‌زدایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و نگرانی‌هایی پیرامون حیات حیوانات می‌شود. علاوه بر این، دباغی پوست حیوانات، فرآیند تولید چرم طبیعی وهمچنین فرآیند تولید چرم مصنوعی (پلاستیکی)، مقدار زیادی مواد شیمیایی سمی‌تولید می‌کند که در نهایت در محیط منتشر می‌شود. بنابراین، نگرانی فزاینده پیرامون پایداری محیط‌زیست منجر به اکتشاف مواد جایگزین برای چرم‌های مبتنی بر حیوانات شده است. قارچ‌های رشته ای و کلاهدار بالاخص قارچ‌های رشته‌ای به‌عنوان گروه‌های بسیار غنی و متنوعی از گونه‌ها شناسایی شده‌اند که خود را به عنوان منابع زیستی امیدوارکننده با طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی تثبیت کرده اند. گونه‌های قارچی مختلف، از جمله گونه‌های آگاریکوس[1]، فومز، گانودرماو پلوروتوس، در حال حاضر بیشترین پتانسیل را در تولید چرم قارچی نشان داده‌اند. رابطه مورفولوژی قارچ و ژنتیک آن در ویژگی‌های میسلیوم تولیدی و مبدل شدن آن به ترکیبات با ساختارهای ویژه و استفاده در صنایع مختلف مانند نساجی، خودروسازی، الکترونیک و... بسیار حائز اهمیت است. محصولات مشتق شده از این گروه از ارگانیسم‌ها در حال حاضر راهی به سوی آینده ای پایدارتر برای زندگی برروی کره زمین در نظر گرفته می‌شوند، زیرا آنها دستیابی به محیطی عاری از آلودگی را تسهیل می‌کنند و در عین حال جایگزین‌های تجدیدپذیر را نیز برای منابع مبتنی برانرژی فسیلی فراهم می کنند. یکی از این راه حل های پایدار، تولید مواد جایگزین چرم از قارچ‌های رشته‌ای از طریق فرآیندهای بی‌خطر برای محیط‌زیست است. در این فرآیند، ضایعات کشاورزی به جایگزین‌های چرم‌مانند مقرون‌به‌صرفه، سازگار با محیط‌زیست و همه‌کاره تبدیل می‌شوند، بنابراین به طور قابل‌توجهی به اقتصاد زیستی دایره‌ای کمک می‌کنند که هدف آن افزایش کارایی استفاده از منابع و کاهش انباشت زباله به حداقل ممکن است. اگرچه ارزش پولی این اقتصاد دایره‌ای در حال حاضر قابل اندازه گیری نیست، مزایای زیست محیطی، از جمله انتشار کمتر و استفاده بهتر از زمین، غیرقابل انکار است. محدودیت‌های شناسایی شده در فناوری جایگزین چرم قارچی را

[1] *Agaricus*

می‌توان با شیوه های طراحی پایدار که به طور خاص برای مواد قارچی طراحی شده است کنار زد و این روش‌ها شامل بهینه سازی فرآیند، توسعه مواد کامپوزیتی با سایر مواد زیست تخریب‌پذیر، تهیه بستر رشد با کربن کم یا بدون کربن و همچنین انتخاب و بهبود سویه مناسب می‌باشد. در این حوزه مطالعاتی صورت گرفته است، به عنوان مثال در سال در سال ۲۰۲۱ بیست و یک سویه از قارچ های پوسیدگی چوب[1] بر اساس رنگ و قوام میسلیومی انتخاب شدند. در محیط مایع کشت شدند و بعداز بررسی‌های دقیق میکروسکوپی برروی ساختار، جنس و قوام و میسیلیوم حاصله، به این نتیجه دست یافتند که از میان سویه های مورد بررسی، سویه فومیتوپسیس ایبریکا[2] مناسب‌ترین سویه جهت توسعه مواد و الیاف چرم مانند است. [۲۹] در مطالعه‌ایی دیگر درسال ۲۰۲۴ از فیساروم پلی سفالوم[3] یا بلاب (نام یک گونه از رده کپک مخاطی پلاسمودیومی است که در مناطق سایه‌دار، مرطوب مانند برگ‌های پوسیده و کنده درختان زندگی می‌کند.) به منظور توسعه پارچه‌های سازگار با محیط‌زیست، تولید آسان و پایدار استفاده شده است. برای این منظور از آگار، ژلاتین و گلیسرول بعنوان بستر رشد پلاسمودیوم استفاده شده و پس از خشک شدن در هوا، ورقه‌های پارچه‌ای محکم و انعطاف‌پذیری به دست آمده است. در نهایت، ورقه‌های پارچه پلاسمودیوم قابل استفاده در تولید پوشاک و کفش مورد استفاده قرار خواهند گرفت. [۱۸] همچنین در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴ به منظور تقویت خواص چرم مانند تولیدات مبتنی بر میسلیوم قارچ‌های فومز فومنتاریوس[4]، پلوروتوس ارینجی[5]، ترامتس ورسیکالر[6] و فومیتوپسیس پینیکولا[7] با استفاده از رویکرد تکنیک کشش بیومیمتیک برای یافتن تقویت‌کننده‌های مناسب جهت افزایش استحکام کششی انجام شده است. [۶]

بر اساس مطالعات انجام شده بر خواص میسلیوم قارچ‌ها مشخص شده است که علاوه بر استفاده از قارچ به‌عنوان مواد خام برای جایگزین‌های چرم حیوانات وکاربرد در صنعت نساجی، در تولید الیاف کاربردی در مراقبت زخم، کامپوزیت به عنوان عایق و مواد بسته‌بندی و حتی تولید محصولات جایگزین گوشت کاربرد بالقوه‌ای دارند. با این حال، پتانسیل مواد جایگزین چرم قارچی در بازار مصرف هنوز کم ارزش است زیرا با چالش‌های بی‌شماری مواجه است که از کمبود دانش در زیست‌شناسی قارچی پایه تا چالش‌های صنعتی متغیر است. علاوه بر این، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های به‌کارگیری این فناوری، ناتوانی جایگزین‌های چرم مشتق‌شده از قارچ و سایر جایگزین‌های چرم در دستیابی به خواص مواد مشابه چرم حیوانات است. انتظار می‌رود که تلاش‌های تحقیق و توسعه بیشتر بر افزایش تطبیق پذیری و دوام این محصولات مشتق شده از قارچ متمرکز شود که در نتیجه معرفی مواد میسلیوم به طیف وسیع‌تری از مصرف کنندگان را تسهیل کند. به چند نمونه از مطالعات انجام شده در جدول ۳ اشاره شده‌است.

علی ایحال، مطالعات حاکی از آنند که باور به آینده‌ای متفاوت پیرامون محصولات مختلف زیستی برای داشتن زندگی پاک تر و سبز ترضروری است و همچنین این مهم راه گشایی برای رابطه همزیستی بین طبیعت و محصولات مصرفی خواهد بود.

[1] Wood decay fungi
[2] *Fomitopsis iberica*
[3] *Physarum polycephalum*
[4] *Fomes fomentarius*
[5] *Pleurotus eryngii*
[6] *Trametes versicolor*
[7] *Fomitopsis pinicola*

منابع

[1] Alemu D, Tafesse M, Mondal AK. Mycelium-based composite: The future sustainable biomaterial. International journal of biomaterials. 2022; 2022(1): 8401528.

[2] Cerimi K, Akkaya KC, Pohl C, Schmidt B, Neubauer P. Fungi as source for new bio-based materials :a patent review. Fungal biology and biotechnology. 2019; 10, 1-6.

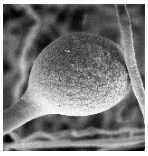
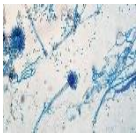
[3] .۳ Jones M, Mautner A, Luenco S, Bismarck A, John S. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. Materials & Design. 2020; 178: 108397.

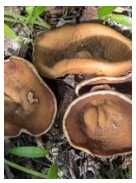
[4] Elkhateeb W, GM D. Muskin the amazing potential of mushroom in human life. Open Access Journal of Mycology & Mycological Sciences. 2022; 5(1): 1-5.

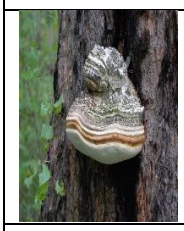
[5] Butu A, Rodino S, Miu B, Butu M. Mycelium-based materials for the ecodesign of bioeconomy. Dig J Nanomater Biostruct. 2020; 40, 15: 1129.

[6] Kniep J, Graupner N, Reimer JJ, Müssig J. Mycelium-based biomimetic composite structures as a sustainable leather alternative. Materials Today Communications. 20234; 39: 109100.

جدول ۳- گونه‌های کاربردی قارچ‌ها در تولید چرم و ساختارهای مبتنی بر میسلیوم

رفرنس	کاربرد	ماتریکس حاصل	سوبسترا	تخمیر	ساختار	جنس و گونه قارچ	تصویر
[۲۳, ۲۵, ۳۰, ۳۱]	مصنوعات چوبی	-	کیک پوسته‌جو و کلزا	تخمیر جامد	کلاهک سفید مایل به زرد لبه‌دار با سطحی صاف، سمی	*Agaricus arvensis*	
[۲۲]	تولید کاغذ، مصالح ساختمانی و عایق	ماتریکس میسلیومی فوم‌مانند	کیک پوسته‌جو و کلزا	تخمیر جامد	کلاهک محدب، سفید با سطحی صاف. ساقه دوکی شکل، سفید، قهوه ایی مایل به ارغوانی	*Agaricus bisporus*	
[۲۵, ۳۰, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار)	تخمیر مایع - نیمه پیوسته	کلاهک قهوه‌ایی مایل به خاکستری، سطح مخملی، مات و مواج ساقه استوانه‌ایی، باریک، سفید مایل به قهوه‌ایی سخت و شکننده	*Agrocybe brasiliensis*	
[۲۵, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل،ساکارز،آب وآگار)	مایع	دارای میسلیوم هوایی و بستری قارچ رشته‌ایی با کلنی‌های سفید مایل به خاکستری	*Amylomyces rouxii*	
[۲۵, ۳۰, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار)	تخمیر جامد	میسلیوم‌ها و ریزومورف‌ها هنگام رشد فعال درخشان هستند	*Armillaria mellea*	
[۳۱]	ورقه‌های ساختاری	میسلیوم سفت و محکم دارای الگوی انشعاب خاص در هیف	پوشش‌های گیاهی درحال پوسیدن مانند توده‌های کمپوست و برگ‌های مرده، غلات، آجیل، میوه‌های‌خشک و...	تخمیر مایع - بسته	هیف‌های داخل میسلیوم از نظر بیان ژن، رشد و ترشح بسیار ناهمگن هستند.	*Aspergillus nidulans*	
[۳۱]	ورقه‌های ساختاری	میسلیوم سفت و محکم دارای الگوی انشعاب خاص در هیف	پوشش‌های گیاهی در حال پوسیدن مانند توده‌های کمپوست و برگ‌های مرده،غلات، آجیل، میوه‌های خشک	تخمیر مایع - بسته	هیف‌های داخل میسلیوم از نظر بیان ژن، رشد و ترشح بسیار ناهمگن هستند.	*Aspergillus niger*	
[۳۱]	ورقه‌های ساختاری	میسلیوم سفت و محکم دارای الگوی انشعاب خاص در هیف	پوشش‌های گیاهی در حال پوسیدن مانند توده‌های کمپوست و برگ‌های مرده،غلات، آجیل،میوه‌های خشک	تخمیر مایع - بسته	هیف‌های داخل میسلیوم از نظر بیان ژن، رشد و ترشح بسیار ناهمگن هستند.	*Aspergillus oryzae*	

رفرنس	کاربرد	ماتریکس حاصل	سوبسترا	تخمیر	ساختار	جنس و گونه قارچ	تصویر
[۲۲]	مصنوعات چوبی	ماتریکس میسلیوم فشرده مستحکم و سخت	خاک غنی از سنگ آهک	تخمیر جامد	مستحکم، سفید مایل به کرم، فیبریل‌های کوچک، فشرده و سخت، قارچ سمی	*Calocybe gambosa*	
[۲۲, ۳۰]	چرم مبتنی بر قارچ	ماتریکس چرم مانند همانند پوسته رویی قارچ	برگ درختان	تخمیر جامد	غول پیکر با کلاهک کروی و نامتقارن سفیدمایل زرد و ساقه بسیارکوتاه	*Calvatia gigantea*	
[۳۲]	چرم مبتنی بر قارچ	ظاهر ماتریکس چرم مانند	لیگنوسلولوزی	تخمیر جامد	منفرد تا گروهی، مسطح و دایره‌ای، کرم تا زردکمرنگ، دارای منافذ	*Cerioporus squamosus*	
[۲۵, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار) آگار سیب زمینی	تخمیر مایع - بسته	ماکروقارچ مسطح فاقد ساقه کلنی‌سفید تا اخرایی	*Ceriporia lacerata*	
[۲۵, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار)	تخمیر مایع - بسته	کلاهک با فلس‌های قهوه‌ایی‌کمرنگ، ساقه سفید ضخیم و بلند.	*Coprinus comatus*	
[۲۲]	منسوجات چرمی بر پایه چرم	ماتریکس مطابق با چرم حیوانی	اتصال به اسکلت بیرونی بدن حشرات (کیتین)	تخمیر جامد	بدنه‌ای استوانه ایی، کرم مایل به نارنجی رنگ،هیف‌های بی‌رنگ و منفذدار	*Cordyceps militaris*	
[۲۲]	منسوجات مبتنی بر قارچ	ماتریکس میسلیومی با قابلیت پردازش جهت استفاده در کاربردهای متفاوت	خاکهای مناطق درختان سوزنی	تخمیر جامد	ظاهر فنجانی شکل، سطح داخلی فنجان قهوه‌ایی و سطح بیرونی سفید میباشد بسیار شکننده و دارای ساقه کوتاه	*Disciotis venosa*	
[۱۷, ۲۵, ۳۱]	در ساخت سازه‌های چوبی و ساختمانی	ماتریکس سخت و مستحکم	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار) سلولز و همی‌سلولز و چوب درختان مخروطی مانند کاج	تخمیر جامد	ظاهر کپک مانند	*Fibroporia vaillantii*	

رفرنس	کاربرد	ماتریکس حاصل	سوبسترا	تخمیر	ساختار	جنس و گونه قارچ	تصویر
[۲۵, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار)	تخمیر جامد	شبیه یک زبان بزرگ و بصورت صفحه ای است و سطح آن خشن با رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز است.(با افزایش سن قارچ رنگ آن قرمز تیره می‌شود)	*Fistulina hepatica*	
[۲۵, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار)	مایع – نیمه پیوسته	کلاهک کمی‌برآمده، صورتی مایل به قهوه‌ای سطحی صاف، دارای ساقه بلند و بصورت گروهی	*Flammulina velutipes*	
[۲۲, ۲۳, ۲۵]	ورقه‌های مبتنی بر میسلیوم قارچی	میسلیوم حصیری، قهوه ای، مخملی، ضخیم، بوی مطبوع و ساختار تشک مانند	لیگنین	تخمیر جامد	شبیه سم اسب، دارای برآمدگی‌های گسترده و متحدالمرکز باحاشیه ای صاف و گرد بدنه سفت و فیبری و به رنگ قهوه ای دارچینی است.سطح بالایی سخت و چوبی است.قسمت زیرین دارای منافذ به رنگ قهوه‌ای است.	*Fomes fomentarius*	
[۱۴, ۲۵, ۳۱]	چرم مبتنی بر میسلیوم	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل، ساکارز، آب وآگار).	تخمیر جامد	ظاهرمخروط‌های مشخص با بیش از ۵۰ سانتی متر.	*Fomitopsis officinalis*	
[۳۲]	منسوجات و ورقه‌های مبتنی بر میسلیوم قارچی	میسلیوم با رنگ طبیعی توام شده با سوبسترای بستر دارای تحمل دمایی بالا، بوی مطبوع و مستحکم	سلولز ساقه پنبه کاه شلتوک، پودر شلتوک ریز و گرد و غبار اره	تخمیر جامد	زرد مایل به سفید، فشرده و رشد سریع برچه پنبه ایی	*Ganoderma applanatum*	
[۱, ۸, ۱۱, ۲۲, ۳۲]	منسوجات و ورقه‌های مبتنی بر میسلیوم قارچی	میسلیوم حصیری تشک‌مانند با رنگ زرد مایل به نارنجی	سلولز ساقه پنبه	تخمیر جامد	سفیدترین قهوه ای، فشرده و بسیار متراکم با لکه‌های قهوه ای در وسط برچه پنبه ای	*Ganoderma lucidum*	
[۱, ۲۳, ۲۵, ۳۲]	چرم و ظروف بسته‌بندی مبتنی بر میسلیوم قارچی	میسلیوم با چگالی کم، استحکام کششی بالا	سلولز ساقه پنبه کاه شلتوک، پودر شلتوک ریز و گرد و غبار اره	تخمیر جامد	برچه پنبه ایی	*Ganoderma oregonese*	

تصویر	جنس و گونه قارچ	ساختار	تخمیر	سوبسترا	ماتریکس حاصل	کاربرد	رفرنس
	Ganoderma resinaceum	برچه پنبه ایی	تخمیر جامد	سلولز ساقه پنبه کاه شلتوک، پودر شلتوک ریز و گرد و غبار اره	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، چگالی کم، دوام بالا و سازگار	چرم و ظروف بسته‌بندی مبتنی بر میسلیوم قارچی	[۱، ۲۳، ۲۵، ۳۲]
	Ganoderma sessile	برچه پنبه ایی	تخمیر جامد	کاه شلتوک، پودر شلتوک ریز و گرد و غبار اره	میسلیوم حاصل نرم، استحکام بالا، چگالی کم، دوام بالا و سازگار	چرم و ظروف بسته‌بندی مبتنی بر میسلیوم قارچی	[۱، ۲۳، ۲۵، ۲۴، ۳۱]
	Ganoderma tsugae	برچه پنبه ایی	تخمیر جامد	سلولز ساقه پنبه کاه شلتوک، پودر شلتوک ریز و گرد و غبار اره	میسلیوم با چگالی کم، استحکام کششی بالا	چرم و ظروف بسته‌بندی مبتنی بر میسلیوم قارچی	[۱، ۲۳، ۲۵، ۳۱، ۳۲]
	Hericulum erinaceus	توبرکل‌های پیازی بزرگ و نامنظم با قطر ۵ تا ۴۰ سانتی متر، دارای خارهای شلوغ، آویزان و تولید کننده‌هاگ سیستم هیف مونومیت، آمیلوئید و متشکل از هیف‌های دیواره نازک تا ضخیم با حدود ۳-۱۵ میکرومتر (میکرون) عرض.	مایع - بسته	محیط‌کشت حداقل ووگل (نمک ووگل،ساکارز،آب وآگار) لیگنین(انگل درختی)	میسلیومی حاصل نرم، استحکام بالا، دوام بالا و سازگار	چرم مبتنی بر میسلیوم	[۲۲، ۲۵، ۳۱]
	Trametes versicolor	زرد مایل به سفید و متراکم	تخمیر جامد	گرد و غبار اره تراشه‌های چوب، هویج کنفی و الیاف، و حصیر کنفی.	میسلیوم با چگالی کم، استحکام کششی بالا	چرم و ظروف بسته‌بندی مبتنی بر میسلیوم قارچی	[۱، ۸، ۱۵، ۲۵]

[7] da Silva Junior CJG, de Amorim JDP, de Medeiros ADLM, de Holanda Cavalcanti AKL, do Nascimento HA, Henrique MA, et al. Design of a Naturally Dyed and Waterproof Biotechnological Leather from Reconstituted Cellulose. Journal of Functional Biomaterials. 2022; 13(2): 49.

[8] Raman J, Kim D-S, Kim H-S, Oh D-S, Shin H-J. Mycofabrication of mycelium-based leather from brown-rot fungi. Journal of Fungi. 2011; 8(3): 317.

[9] Akhter S, Jahan MS, Rahman ML, Ruhane TA, Ahmed M, Khan MA. Revolutionizing Sustainable Fashion: Jute–Mycelium Vegan Leather Reinforced with Polyhydroxyalkanoate Biopolymer Crosslinking from Novel Bacteria. Advances in Polymer Technology. 2024; 2024(1): 1304800.

[۱۰] بیرانوند، شیدا، پور ل، نوروزی. بهینه سازی تولید بتاکاروتن رودوتورلا موسیلوژینوسا جدا شده از پساب کارخانه چرم.

فصلنامه علمی پژوهشی دنیای میکروب‌ها. ۲۰۱۹; ۱۲ (شماره ۱ (پیاپی ۳۸)):۳۹-۵۲.

[11] Larypoor M. Investigation of HER-3 gene expression under the influence of carbohydrate biopolymers extract of shiitake and reishi in MCF- ۷cell line. Molecular biology reports. 2022; 49(7): 72-6563.

[12]

[13] Elkhateeb W, Daba G. Marine endophytes a natural novel source for a treasure of bioactive compounds. J Adv Microbiol Res. 2022; 5(018): 2.

[14] Larypoor M, Gharakhani F. A review of the antimicrobial effects of metabolites extracted from cap fungi.2022.

[15] Elkhateeb WA, Daba GM, Elnahas MO, Thomas PW. Fomitopsis officinalis mushroom: ancient gold mine of functional components and biological activities for modern medicine. Egyptian Pharmaceutical Journal. 2019; 18(4): 9-285.

[16] Yasrebi N, Zarmi AH, Larypoor M, Zeynali M, Ebrahimi-Hosseinzadeh B, Mokhtari-Hosseini ZB, et al. In vivo and in vitro evaluation of the wound healing properties of chitosan extracted from Trametes versicolor. Journal of Polymer Research. 2021; 11, 1-28.

[17] Madusanka C, Udayanga D ,Nilmini R, Rajapaksha S, Hewawasam C, Manamgoda D, et al. A review of recent advances in fungal mycelium based composites. Discover Materials. 2024; 4(1): 13.

[18] Isola D, Lee H-J, Chung Y-J, Zucconi L, Pelosi C. Once upon a Time, There Was a Piece of Wood: Present Knowledge and Future Perspectives in Fungal Deterioration of Wooden Cultural Heritage in Terrestrial Ecosystems and Diagnostic Tools. Journal of Fungi. 2024; 10(5): 366.

[19] Bi Z, Crnković T. Bio-leather: Sustainable clothing fabrics made from simple media ingredients and slime mold Physarum polycephalum. Journal of Industrial Textiles. 2024; 54: 15280837241254210.

[20] Elkhateeb WA, Galappaththi M, Wariss H, Haesendonck K, Daba GM. Fungi-derived leather (mushroom leather). MycoKing. 2022; 5, 1.

[21] Wijayarathna EKB, Mohammadkhani G, Soufiani AM, Adolfsson KH, Ferreira JA, Hakkarainen M, et al. Fungal textile alternatives from bread waste with leather-like properties. Resources, Conservation and Recycling. 2022; 179: 106041.

[22] Amobonye A, Lalung J, Awasthi MK, Pillai S. Fungal mycelium as leather alternative: A sustainable biogenic material for the fashion industry. Sustainable Materials and Technologies. 2023: e00754.

[23] Elsacker E, Vandelook S, Peeters E. Recent technological innovations in mycelium materials as leather substitutes: a patent review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2023; 11.

[24] Jones M, Gandia A, John S, Bismarck A. Leather-like material biofabrication using fungi. Nature Sustainability. 2021; 4(1): 9-16.

[25] Conceição AA, Mendes TD, Mendonça S, Quirino BF, Almeida EGd, Siqueira FGd. Nutraceutical enrichment of animal feed by filamentous fungi fermentation. Fermentation. 2022; 8(8): 402.

[26] Smith MJ, Kittleson JT, Eng DJ, Boulet-Audet M. Mycelium materials, and methods for production thereof. Google Patents; 2023.

[27] Razzaq MA, Lyzu C, Parveen S, Uddin MT, Shaikh MAA, Chowdhury MJ, et al. Fatliquor for fungus resistant leather-a sustainable ecofriendly approach. Heliyon. 2024.

[28] Pechini MP. Washington, DC: US patent and trademark office. US patent. 1967; 3: 697.

[29] Greetham L, McIntyre GR, Bayer E, Winiski J, Araldi S. Mycological biopolymers grown in void space tooling. Google Patents; 2022.

[30] Cartabia M, Girometta CE, Milanese C, Baiguera RM, Buratti S, Branciforti DS, et al. Collection and characterization of wood decay fungal strains for developing pure mycelium mats. Journal of Fungi. 2021; 7(12): 1008.

[31] Polemis E, Zervakis G, Gargano M, Denchev C, Denchev T, Venturella G. Selected Choice Wild Edible Mushrooms.

[32] Case DA, Aktulga HM, Belfon K, Ben-Shalom I, Brozell SR, Cerutti DS, et al. Amber 2021: University of California, San Francisco; 2021.

[33] Ross P, Wenner N, Moorleghen C. Method of producing fungal materials and objects made therefrom. Google Patents; 2020.

Review of leather production processes based on mycelium of fungus

Sadeghi Amjad Sh.[1], Dadgostar H.[2], Laripour M.[3*]

[1] PhD student, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] PhD student, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, North Tehran Branch,Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3*] Associate Professor, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

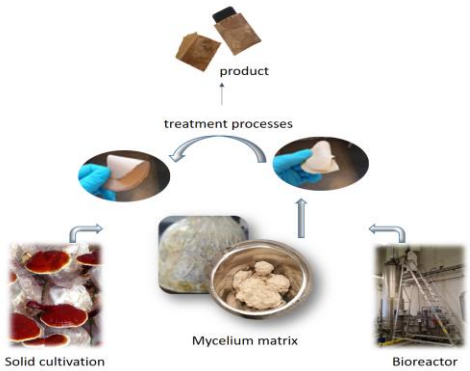
* (Corresponding author): m.larypoor@iau-tnb.ac.ir

Received: July 2024 Accepted: September 2024

Abstract

With the increasing global development of biotechnology and the increase in population, humans have always sought to reduce the damage caused to the environment by their lives, fungi and plants are the most suitable options for the production and biological development of sustainable materials. Being renewable, having high safety for the environment, being cheap, being biodegradable and being native biological materials is an important milestone in the bioengineering of materials. transform them into substrates with high strength and high pressure tolerance, different species of filamentous fungi and mushroom are involved in the leather production process based on the mentioned function. Their mass production during cultivation (in three methods, solid cultivation, liquid and submerged fermentation), separation of the resulting biomass during special processes, drying, final shaping and replacement of the resulting composition in the leather industry can be effective in reducing a large part of the damage caused to the environment.

Keywords: leather, fungi, Mycelium-based leather, biological matrix.



Graphical abstract