# میسلیوم؛ الیاف آینده؟

الیاف طبیعی همواره نقش مهمی در زندگی بشر داشته اند و از قدیم برای تولید لباس، کفش و سایر کالاها مورد استفاده قرار می گرفتند. این الیاف از گذشته به شیوه های مختلف و از منابع متنوعی که بیشتر گیاهی یا حیوانی بود، تهیه می شدند.

بعضی از مواد اولیه خام برای تولید الیاف را می توان از محیط های کشت باکتریایی نیز برداشت کرد برای مثال ابریشم عنکبوت. اخیرا چهارمین قلمرو از موجودات زنده(بر اساس طبقه بندی رابرت ویتاکر) نیز به این فهرست اضافه شده است.

دلیل ورود به حوزه های جدید و کشف نشده مواد اولیه ارگانیک را می توان فشاری دانست که روز به روز بیشتر به صنعت مد برای افزایش پایداری وارد می شود. اما چرا باید قارچ را در مقایسه با منابع متداول الیاف مانند پنبه یا ابریشم پایدارتر دانست؟ مهم ترین تفاوت، عملکرد بیولوژیکی قارچ در اکوسیستم جهانی است.

**قارچ ها؛ بازیافت کننده های عالی**

قارچ ها نقش مهمی را به عنوان تجزیه کننده در اکوسیستم های زمینی ایفا می کنند. در واقع آن ها بیشتر از هر ترکیب باکتریایی، مواد اولیه ارگانیک را تجزیه می کنند. قارچ‌ها برای آن که بتوان حداقل رد پا را بر سیاره زمین به جا گذاشت، بسیار موثر هستند: نخست این که قارچ ها مانند حیوانات برای حرکت یا تنظیم دمایی انرژی هدر نمی دهند.

دوم قارچ ها مانند گیاهان، زیست توده های ساختاری که قابل برداشت نباشند، ایجاد نمی کنند(برای مثال غوزه پنبه در مقابل ساقه و برگ پنبه).

سوم قارچ ها می توانند تقریبا بر روی هر زیرلایه ای رشد کنند که در فرایند بازیافت ارگانیک مفید است اما آیا الیاف قارچ که به آن میسلیوم گفته می شود واقعا پایدارتر از الیاف حیوانی یا گیاهی است؟

بیشتر زیست توده های موجود در جهان در طول فرایند فتوسنتز و تثبیت کربن توسط گیاهان به وجود می آیند.

قارچ ها برای بستن چرخه زندگی سلولز، همی سلولز، کیتین و لیگنین را به اجزای اولیه آن ها و در نهایت دی اکسید کربن، آب و محصولات جانبی تجزیه و در طول فرایند انرژی آزاد می کنند. از سوی دیگر باکتری ها به آسانی ملکول های در دسترس مانند کربوهیدارت ها، چربی ها و پروتئین ها را با محتوای انرژی نسبتا بالا تجزیه می کنند. موادی که تجزیه آن ها دشوارتر است مانند سلولز و لیگنین برای مصرف توسط ارگانیزم‌هایی با آنزیم های متنوع تر و موثرتر مانند قارچ ها باقی می مانند.

در این مقاله بیشتر تمرکز ما بر روی خانواده بازیدیومیست ها یا قارچ های چتری است. بازیدیومیست ها معمولا قسمت بیرون زده از زمین(قسمتی که معمولا آن را مصرف می کنیم) را تشکیل می دهند و دارای یک شبکه گسترده میسلیوم در زیر زمین هستند که وزن آن اغلب چندصد برابر قسمت بیرونی می باشد. این شبکه از ریشه های مجزا که هیفا نام دارد، باعث می شود نسبت سطح به حجم زیاد شود که برای ترشح سریع آنزیم ها و برداشت مواد مغذی ایده آل است.

**حقایقی در مورد قارچ ها**

بزرگ ترین موجود زنده کره زمین یک قارچ از خانواده آرمیلاریا به نام آرمیلاریا اوستویا است که بیش از ۲۳۸۵ هکتار از جنگل ملی مالهور واقع در ایالت اورگن را به خود اختصاص داده است.

فرشته ویرانگر(آمانیتا بیسپوریگرا)–گونه های همانند و نزدیک به هم از قارچ های سفید از نوع قارچ مرگبار–مهم ترین علت مسمومیت کشنده با قارچ در کشورهای توسعه یافته است. علت اصلی کشنده بودن این قارچ وجود آماتوکسین در آن است که بعد از مصرف مانع از پلیمریزاسیون RNA شده که در بیشتر مواقع پیامدهای مرگباری به همراه دارد. علایم مصرف این قارچ ممکن است پس از یک روز ظاهر شود، زمانی که آماتوکسین آسیبهای غیر قابل جبرانی به کبد و کلیه ها وارد کرده است.

بعضی از قارچ های چتری یا بازیدیومیست ها مانند قارچ اصلی پوسیدگی خشک با نام علمی سرپولا لاکریمنس می توانند حتی به چوب بسیار خشک(رطوبت ۱۵ تا ۱۹ درصد) نیز حمله کنند و ضمن تامین رطوبت و مواد مغذی مورد نیاز خود با سرعت بالایی(تا ۱۲ سانتی متر در هفته) ساختمان های چوبی را تخریب نمایند.

**الیاف سفید ظریف**

هیفا به ساختارهای لوله ای کوچکی گفته می شود که بیشترین وزن یک قارچ را تشکیل می دهند. اندازه این لوله های کوچک حدود ۳۰–۱۰ نانومتر بوده و درست مانند ریشه گیاهان در جهت محور طولی لوله رشد می کند. هیف ها مدام در حال جستجوی مواد مغذی و آب و ترشح آنزیم ها و متابولیت های ثانویه هستند. هیف ها با چشم غیرمسلح به صورت الیافی سفید و ظریف به نظر می رسند و به دلیل سایز میکروسکوپی که دارند، تعداد زیادی از هیف های به هم چسبیده را «شبکه میسلیوم» و یا همان «میسلیوم» می نامند.

مهم ترین پلیمر ساختاری میسلیوم درست مانند اسکلت خارجی حشرات، کیتین می باشد بر خلاف گیاهان که دیواره سلولی آن ها از سلولز، همی سلولز یا لیگنین تشکیل شده است. میسلیوم بر خلاف سلول های گیاهی که بر اساس عملکردشان تغییر می کنند، تنها در سه شکل اصلی وجود دارد: هیفای مولد(برای زایش دوباره)، هیفای اسکلتی(دیواره ضخیم برای تشکیل ساختار) و هیفای اتصال دهنده(برای چسبیدن به منابع غذایی که معمولا شاخه ای است مانند شاخ گوزن). ترکیبات شیمیایی تمامی آن ها بسیار مشابه است.

**رشد الیاف میسلیوم**

برای تولید مواد اولیه بر پایه میسلیوم مانند چرم، قارچ های چوبی نظیر قارچ های تاقچه ای به یک استاندارد صنعتی در این زمینه تبدیل شده اند. ظاهر سخت و چرم مانند آن ها به دلیل وجود مقادیر بالا از هیفای اسکلتی و هیفای اتصال دهنده است که بخش اعظم قسمت بیرونی قارچ که قابل رویت است را تشکیل می دهند.

برای تولید چرم از میسلیوم، قارچ گانودرما یک استاندارد صنعتی است که در چین با نام «لینگژی» و در ژاپن با نام «ریشی» شناخته می شود. این قارچ از خانواده قارچ های polyporus بوده که در اروپا، آمریکای شمالی و آسیا یافت می شود و معمولا بر روی درختان با چوب سخت در حال تخریب رشد می کند.

از این قارچ در طب سنتی چین برای تقویت سیستم ایمنی استفاده می شده است. گانودرما علاوه بر ارزش درمانی قادر به تولید ورقه های محکم و بادوام از میسلیوم نیز می باشد که از نظر استحکام، انعطاف پذیری و دوام مشابه پوست گاو است. این «ورقه‌های چرمی قارچی» را می توان از میسلیوم خالص و یا ترکیبات آن تهیه کرد اما این الیاف کوچک چطور به خوبی در کنار هم نگه داشته می شوند؟ پاسخ به طور خلاصه درگیری مکانیکی است اما در واقع به تعداد استارتاپ های فعال در زمینه میسلیوم پاسخ برای این پرسش وجود دارد. بیشترین پاسخی که به این سوال داده شده این است که هرکدام از الیاف میسلیوم درون دیگری رشد می کند و یک ساختار میکروسکوپی در هم تنیده را تشکیل می دهد که در آن هرکدام از الیاف تا زمانی که ورقه آماده برداشت نباشد، مدام در حال گسترش است. قارچ ها از قدیم بر روی محیط های جامد کشت می شدند(برای مثال تولید قارچ دکمه ای) اما اخیرا از سیستم های دیگری نظیر محیط کشت مایع و یا کشت در فشار اتمسفری پایین استفاده می شود که باعث افزایش بازدهی می گردد. با وجود این که تولید مواد بسته بندی از خاک اره، پوشال و یا سایر ضایعات ارگانیک به دست آمده از صنایع کشاورزی و چوب بری ساده است اما تولید ورقه های همگن با رنگ و ضخامت یکنواخت دشوار بوده و تنها چند شرکت محدود موفق به توسعه یک فرایند مقیاس پذیر برای تولید این ورقه ها شده اند.

مزایای استفاده از میسلیوم به عنوان ماده اولیه(برای مثال چرم) بسیار واضح است. نخست این که میسلیوم قابل رشد بر روی تقریبا هر نوع ماده اولیه ضایعاتی ارگانیک می باشد و دوم برای تولید آن در مقیاس صنعتی فناوری هایی را در دسترس داریم. معایب این فناوری اغلب به خوبی شناخته شده نیست که می تواند به دلیل پیچیدگی و تنوع فرایندهایی باشد که امروزه برای پرورش میسلیوم مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور درک و تجزیه و تحلیل فرایند تولید میسلیوم به دانش عمیق تری در زمینه قارچ شناسی، گردش کار استریل و طراحی فرایند تولید نیاز است.

**معایب مواد اولیه صنعتی بر پایه میسلیوم**

۱.نیاز به انرژی برای استریلیزاسیون: برای استریل کردن مواد اولیه خام پیش از آن که بتوان آن ها را برای کشت قارچ مورد استفاده قرار داد به انرژی نیاز است. فرایند استریلیزاسیون معمولا در یک اتوکلاو صنعتی انجام می شود که در آن مواد اولیه خام تا دمای حدود ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت چندین ساعت بسته به سایز بچ حرارت دهی می شوند. مصرف اتوکلاو مورد استفاده به طور میانگین حدود ۸۴ کیلووات ساعت برای ۵۰ کیلوگرم ماده اولیه استریل شده می باشد. در حال حاضر تولیدکنندگان در حال بهینه سازی این فرایند برای استفاده مجدد یا استریل کردن مجدد بخشی از ماده اولیه پیش از مصرف می باشند اما هنوز روش آماده و در دسترسی وجود ندارد.

۲.تولید دی اکسید کربن در طول فرایند رشد: از نظر تنفسی قارچ ها شباهت بیشتری به حیوانات دارند تا گیاهان. گیاهان شش ملکول دی اکسید کربن+آب+نور را در کلروپلاست خود به یک ملکول گلوکز($C_6H_{12}O_6$) تبدیل می کنند و در نتیجه دی اکسید کربن محیط را تثبیت می نمایند. قارچ ها ذاتا ویرانگر هستند. آن ها در سوی دیگر این چرخه قرار دارند و با تجزیه پلیمرها انرژی ایجاد می کنند، درست مثل ما و در نتیجه باعث آزاد شدن دی اکسید کربن می شوند. از این فرایند حتی در بعضی از گلخانه های پرماکالچر نیز استفاده می شود تا با افزایش غلظت دی اکسید کربن در هوا شرایط رشد گیاه بهتر شود. هرچند که استفاده از این روش برای کشت گیاه عالی به نظر می رسد اما در مقیاس جهانی، تولید دی اکسید کربن و اثرات منفی آن بر تغییرات اقلیمی بر همه آشکار است. بنابراین تولید مواد اولیه بر پایه میسلیوم یک فرایند دی اکسید کربن خنثی نیست.

۳.نادانسته ها از ژنومیک: ممکن است که این عیب یک مشکل علمی به نظر برسد اما در انجام فرایندهای صنعتی در مقیاس بزرگ می تواند موانع زیادی ایجاد کند. دانش ما از ژنومیک قارچ ها هنوز بسیار ابتدایی است. ژنوم یک گیاه یا حیوان معمولا در طول عمر آن گیاه و حیوان نسبتا ثابت باقی می ماند و تنها در زمان تولید مثل ترکیب می شود ولی تغییرات ژنوم قارچ ها بسیار بیشتر است چون تولید مثل قارچ ها می تواند به صورت جنسی و غیرجنسی باشد. معمولا پیش از تولید مثل جنسی چندین چرخه تولید مثل غیرجنسی کامل می شود ولی در بعضی مواقع نیز ممکن است به صورت همزمان اتفاق بیفتد.

موضوعی که باعث پیچیدگی بیشتر برای متخصصان ژنتیک می شود این است که بسیاری از قارچ ها هموتالیک(هم ریسه) هستند برای مثال ارگان های جنسی تولید شده توسط یک ریسه خودبارور می باشند که باعث می شود دایما احتمال تولید مثل جنسی و غیرجنسی وجود داشته باشد. در نتیجه قارچی که شما امروز کار خود را با آن شروع کرده اید لزوما همان قارچی نیست که روز یا هفته بعد در کارخانه خود آن را پرورش می دهید.

۴.نگهداری از میسلیوم: از آن جایی که هر کدام از هیف ها دارای نسبت سطح به حجم بالایی می باشند، به سرعت خشک می شوند و در نتیجه نگهداری از آن ها دشوار است. اگر ماده اولیه بیش از حد خشک شود، انعطاف پذیری و دوام آن کاهش پیدا می کند. در حال حاضر بهترین راهکار صنعتی برای رفع این مشکل استفاده از مرطوب کننده ها(مشابه آن چه در صنایع غذایی استفاده می شود) است تا بتوان سطح رطوبت را به اندازه ای بالا نگه داشت که انعطاف پذیری ماده اولیه حفظ شود.

۵.استحکام میسلیوم: استحکام کششی کیتین در مقایسه با الیاف گیاهی(میوه، پوست درخت، برگ) که معمولا بر پایه ترکیبی از سلولز، همی سلولز و لیگنین می باشد، نسبتا پایین است(استحکام کششی سلولز GPa ۱۳۴ و استحکام کششی کیتین تنها GPa ۶۰ است). تلاش های زیادی صورت گرفته تا بتوان بدون استفاده از مواد شیمیایی مضر و از طریق ایجاد اتصالات عرضی یا دی استیله کردن الیاف کیتین مشکل استحکام در این الیاف را برطرف کرد. با ایجاد اتصالات عرضی میان هرکدام از هیف ها که تنها درگیری میان آن ها مکانیکی است، می توان استحکام مواد اولیه بر پایه میسلیوم را تا حد زیادی بهبود بخشید.

**مرجع:**

Martin Stubler, "Mycelium-Fibers of the future?" International Fiber Journal, August ۲۰۲۲

**تهیه و تنظیم: سیدضیا الدین امامی رئوف**