اولین کنفرانس بین‌المللی
علمی پژوهشی
در علوم پایه، انسانی، تجربی، آموزش و پرورش،
تربیت بدنی، مدارس دولتی، فنی و حرفه‌ای،
کاردانش و غیرانتفاعی در عصر نوین- بوشهر

MDOI-01-2026.0175
MNR--1-52417D

نقش میکروبیوم روده در تنظیم سیستم ایمنی و سلامت انسان

علی مجدی، مرضیه دلیرکوهی و موسی مجدی

کارشناسی ارشد میکروبیولوژی

کارشناسی ارشد میکروبیولوژی

کارشناسی ارشد زیست گیاهی

چکیده

روده انسان یکی از پیچیده‌ترین محیط‌های زیستی بدن به شمار می‌رود که علاوه بر مشارکت در فرایند هضم و جذب مواد غذایی، نقش مهمی در حفظ تعادل سیستم ایمنی ایفا می‌کند. در این اندام، مجموعه گسترده‌ای از باکتری‌ها، ویروس‌ها، قارچ‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها حضور دارند که در مجموع میکروبیوم روده نامیده می‌شوند. این اجتماعات میکروبی از طریق ارتباط متقابل با سلول‌های اپیتلیال روده و اجزای مختلف سیستم ایمنی، در تنظیم پاسخ‌های دفاعی بدن مشارکت می‌کنند. ترکیب و تنوع میکروبیوم روده تحت تأثیر عواملی مانند تغذیه، سن، ژنتیک، سبک زندگی، مصرف داروها و شرایط محیطی قرار دارد. یکی از مهم‌ترین عملکردهای این مجموعه، کمک به شکل‌گیری و بلوغ سیستم ایمنی در دوران رشد و حفظ تعادل آن در طول زندگی است. برخی باکتری‌های روده با تولید متابولیت‌هایی مانند اسیدهای چرب زنجیره کوتاه، به تقویت سد مخاطی و تنظیم فعالیت سلول‌های ایمنی کمک می‌کنند. همچنین میکروبیوم در تمایز سلول‌های T تنظیمی، کنترل واکنش‌های التهابی و حفظ تحمل ایمنی نسبت به ترکیبات بی‌ضرر نقش دارد. برهم خوردن تعادل میان میکروارگانیسم‌های مفید و فرصت‌طلب که با عنوان دیس‌بیوز شناخته می‌شود، می‌تواند با افزایش نفوذپذیری سد روده و تغییر الگوی پاسخ‌های ایمنی همراه باشد. چنین تغییراتی در مطالعات مختلف با برخی بیماری‌های التهابی روده، اختلالات متابولیکی و بیماری‌های خودایمنی ارتباط داشته‌اند. از سوی دیگر، ارتباط دوطرفه میان روده و سایر اندام‌ها، به‌ویژه مغز، نشان‌دهنده گستردگی آثار میکروبیوم بر سلامت عمومی انسان است. شناخت این ارتباطات می‌تواند زمینه مناسبی برای توسعه راهکارهای پیشگیرانه و درمانی مبتنی بر اصلاح ترکیب میکروبی روده فراهم کند. پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش میکروبیوم روده در تنظیم عملکرد سیستم ایمنی و تبیین ارتباط آن با سلامت انسان، به مرور یافته‌های علمی موجود می‌پردازد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که حفظ تنوع و تعادل میکروبی روده یکی از عوامل مهم در عملکرد طبیعی دستگاه ایمنی و پایداری سلامت بدن محسوب می‌شود.

واژگان کلیدی :میکروبیوم روده، سیستم ایمنی، دیس‌بیوز، التهاب، سلامت انسان.



بیان مسئله

بدن انسان تنها از سلول‌ها و بافت‌های انسانی تشکیل نشده است، بلکه مجموعه گسترده‌ای از موجودات میکروسکوپی نیز در بخش‌های مختلف آن زندگی می‌کنند. بخش قابل‌توجهی از این میکروارگانیسم‌ها در دستگاه گوارش، به‌ویژه روده بزرگ، مستقر هستند و در ارتباط مداوم با سلول‌های بدن فعالیت می‌کنند. این موجودات شامل انواع باکتری‌ها، ویروس‌ها، قارچ‌ها و دیگر عوامل میکروبی هستند که هرکدام می‌توانند در شرایط مشخصی بر محیط زیستی روده اثر بگذارند(کوچی، ۱۴۰۳ ب) مجموعه ژن‌ها و فعالیت‌های زیستی این اجتماعات، میکروبیوم روده را شکل می‌دهد. اهمیت این مجموعه تنها به حضور آن در دستگاه گوارش محدود نیست؛ بلکه شواهد علمی نشان داده‌اند که میکروبیوم در بسیاری از فرایندهای حیاتی بدن، از جمله تنظیم متابولیسم، تولید برخی ترکیبات ضروری و کنترل فعالیت‌های ایمنی مشارکت دارد. به همین دلیل، در سال‌های اخیر نگاه پژوهشگران به روده از یک اندام صرفاً گوارشی به محیطی فعال در تنظیم سلامت عمومی تغییر کرده است. سیستم ایمنی برای محافظت از بدن در برابر عوامل بیماری‌زا طراحی شده است، اما عملکرد مطلوب آن تنها به قدرت دفاعی بالا وابسته نیست. این سیستم باید بتواند میان عوامل خطرناک و ترکیبات بی‌ضرر تمایز قائل شود و در برابر هرکدام واکنش متناسبی نشان دهد. واکنش بیش از اندازه به محرک‌های بی‌ضرر می‌تواند زمینه بروز حساسیت و التهاب غیرضروری را فراهم کند، در حالی که پاسخ ضعیف به عوامل بیماری‌زا احتمال ابتلا به عفونت را افزایش می‌دهد. بنابراین، حفظ تعادل میان تحریک و مهار پاسخ‌های ایمنی از اصول اساسی سلامت بدن محسوب می‌شود. میکروبیوم روده در این میان نقش مهمی دارد؛ زیرا از نخستین مراحل زندگی با سیستم ایمنی ارتباط برقرار می‌کند و در شکل‌گیری الگوی پاسخ‌دهی آن تأثیر می‌گذارد. این ارتباط در تمام طول زندگی ادامه دارد و می‌تواند تحت تأثیر تغییرات محیطی و رفتاری دستخوش تحول شود(صحت پور و همکاران، ۱۴۰۴).

یکی از ویژگی‌های مهم روده، قرار گرفتن در معرض حجم زیادی از مواد خارجی است. مواد غذایی، میکروارگانیسم‌های واردشده از محیط و ترکیبات حاصل از فعالیت‌های گوارشی به‌طور مداوم با سطح داخلی روده تماس دارند. در چنین شرایطی، بدن به سازوکاری نیاز دارد که ضمن فراهم کردن امکان جذب مواد مفید، مانع عبور عوامل بیماری‌زا و ترکیبات آسیب‌رسان شود. سد مخاطی روده، سلول‌های اپیتلیال و اتصالات میان‌سلولی در کنار اجزای ایمنی، این وظیفه را بر عهده دارند. میکروبیوم با تولید مواد متابولیکی و تعامل با سلول‌های پوششی می‌تواند به حفظ یکپارچگی این سد کمک کند. در صورت اختلال در این ارتباط، نفوذپذیری روده ممکن است افزایش یابد و تماس سیستم ایمنی با ترکیباتی که در حالت طبیعی نباید به‌راحتی وارد بافت شوند، بیشتر شود(مان و همکاران، ۲۰۲۴). یکی از مسائل اساسی در مطالعات مربوط به میکروبیوم، مفهوم تعادل میان جمعیت‌های میکروبی است. همه میکروارگانیسم‌های روده اثر یکسانی ندارند و برخی از آن‌ها در شرایط طبیعی به حفظ سلامت محیط روده کمک می‌کنند. در مقابل، گروهی از میکروب‌ها ممکن است در صورت افزایش بیش از اندازه جمعیت یا تضعیف دفاع میزبان، رفتار فرصت‌طلبانه پیدا کنند. هنگامی که ترکیب و عملکرد طبیعی این اجتماعات دچار تغییر نامطلوب شود، وضعیتی به نام دیس‌بیوز ایجاد می‌شود. این وضعیت ممکن است با کاهش تنوع میکروبی، افت جمعیت برخی باکتری‌های تولیدکننده متابولیت‌های مفید یا افزایش میکروارگانیسم‌های بالقوه بیماری‌زا همراه باشد. اهمیت دیس‌بیوز در آن است که می‌تواند ارتباط طبیعی میان میکروب‌ها، سد روده و سیستم ایمنی را مختل کند(کوچی، ۱۴۰۳ الف).

از دیگر موضوعات مهم در این زمینه، نقش فرآورده‌های حاصل از فعالیت باکتری‌های روده است. بسیاری از اثرات میکروبیوم نه از طریق حضور مستقیم باکتری‌ها، بلکه از راه ترکیباتی ایجاد می‌شود که در جریان متابولیسم تولید می‌کنند. اسیدهای چرب زنجیره کوتاه مانند استات، پروپیونات و بوتیرات از جمله مهم‌ترین این مواد هستند. این ترکیبات در نتیجه تخمیر کربوهیدرات‌های غیرقابل‌هضم و فیبرهای غذایی تولید می‌شوند و بر سلول‌های پوششی روده و برخی سلول‌های ایمنی اثر می‌گذارند. بوتیرات به‌عنوان یکی از منابع انرژی مهم سلول‌های کولون شناخته می‌شود و در حفظ سد مخاطی نقش دارد. همچنین این متابولیت‌ها می‌توانند در تنظیم بیان ژن‌ها و کنترل شدت واکنش‌های التهابی مشارکت داشته باشند. بنابراین، نوع فعالیت متابولیکی میکروبیوم به‌اندازه ترکیب جمعیتی آن اهمیت دارد. رابطه میکروبیوم و سیستم ایمنی به روده محدود نمی‌شود و می‌تواند در عملکرد سایر اندام‌ها نیز اثرگذار باشد. ارتباط میان روده و مغز که با عنوان محور روده ـ مغز شناخته می‌شود، نمونه‌ای از این تعاملات گسترده است. متابولیت‌های میکروبی، مسیرهای عصبی، هورمون‌ها و پیام‌رسان‌های ایمنی در انتقال اطلاعات میان این دو بخش مشارکت دارند. همچنین پژوهش‌ها به ارتباط احتمالی میکروبیوم با عملکرد کبد، تنظیم متابولیسم و پاسخ‌های التهابی عمومی بدن اشاره کرده‌اند(وانگ و همکاران، ۲۰۲۴). این یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییر در محیط میکروبی روده ممکن است پیامدهایی فراتر از دستگاه گوارش داشته باشد. با این حال، در بسیاری از این ارتباطات هنوز نمی‌توان نقش علت و معلولی قطعی برای میکروبیوم در نظر گرفت و انجام مطالعات مداخله‌ای و طولی ضروری است(رزمی، ۱۴۰۳).

بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر بررسی جایگاه میکروبیوم روده در تنظیم سیستم ایمنی و ارتباط آن با سلامت عمومی انسان است. در این مطالعه تلاش می‌شود نقش اجتماعات میکروبی در تکامل ایمنی، حفظ سد مخاطی، تولید متابولیت‌های تنظیم‌کننده التهاب و پیشگیری از اختلالات مرتبط با دیس‌بیوز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تأثیر عوامل تغذیه‌ای و محیطی بر ترکیب میکروبیوم و ظرفیت آن در حفظ تعادل ایمنی بررسی می‌شود. شناخت این سازوکارها می‌تواند به درک دقیق‌تر ارتباط میان سلامت روده و عملکرد عمومی بدن کمک کند و زمینه استفاده علمی از راهکارهای مبتنی بر اصلاح میکروبیوم را فراهم سازد.

روش پژوهش

مطالعه حاضر از نوع پژوهش‌های مروری بوده و با استفاده از روش کتابخانه‌ای و رویکرد توصیفی ـ تحلیلی انجام شده است. اطلاعات مورد نیاز از طریق بررسی مقاله‌های علمی پژوهشی و مروری، کتاب‌های تخصصی و منابع معتبر مرتبط با میکروبیوم روده، ایمنی‌شناسی و سلامت انسان گردآوری شده است. در انتخاب منابع، موضوعاتی نظیر ترکیب اجتماعات میکروبی روده، تعامل میکروارگانیسم‌ها با سلول‌های ایمنی، نقش متابولیت‌های میکروبی، ارتباط دیس‌بیوز با بیماری‌های التهابی و تأثیر عوامل تغذیه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. پس از گردآوری اطلاعات، مطالب بر اساس محورهای اصلی پژوهش طبقه‌بندی شده و یافته‌های مطالعات مختلف از نظر شباهت‌ها، تفاوت‌ها و نتایج گزارش‌شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرحله تحلیل، تلاش شده است ارتباط میان عملکرد میکروبیوم و سازوکارهای تنظیم سیستم ایمنی با در نظر گرفتن شواهد موجود تبیین شود. در نهایت، نتایج حاصل از مطالعات پیشین در قالب یک چارچوب علمی منسجم ارائه شده‌اند. این پژوهش شامل مداخله آزمایشگاهی یا بررسی بالینی مستقل نیست و یافته‌های آن بر پایه تحلیل منابع منتشرشده تنظیم شده است.

مبانی نظری و یافته‌های پژوهش

۳-۱ .ساختار، ترکیب و ویژگی‌های زیستی میکروبیوم روده

میکروبیوم روده را می‌توان یک اجتماع زیستی پیچیده دانست که از هم‌زیستی تعداد زیادی میکروارگانیسم با بدن انسان شکل گرفته است. این مجموعه از نظر تعداد، نوع و عملکرد اعضای تشکیل‌دهنده، تنوع قابل‌توجهی دارد و بخش عمده فعالیت آن در روده بزرگ انجام می‌شود. باکتری‌ها شناخته‌شده‌ترین اعضای این اجتماع هستند، اما ویروس‌ها، قارچ‌ها و آرکی‌ها نیز در ساختار کلی آن حضور دارند. هر یک از این گروه‌ها ویژگی‌های متابولیکی خاصی دارند و در ارتباط با سایر میکروارگانیسم‌ها و سلول‌های میزبان فعالیت می‌کنند. نکته مهم آن است که عملکرد میکروبیوم را نمی‌توان صرفاً با شمارش گونه‌های موجود توضیح داد؛ زیرا نوع ارتباط میان میکروب‌ها و موادی که تولید می‌کنند نیز در تعیین آثار زیستی آن‌ها نقش اساسی دارد. در واقع، میکروبیوم روده یک سامانه پویا است که ترکیب آن در پاسخ به شرایط درونی و بیرونی بدن تغییر می‌کند.

در میان باکتری‌های روده، گروه‌هایی از شاخه‌های فیرمیکوت‌ها، باکتروئیدوتا، اکتینوباکتریوتا و پروتئوباکتریوتا اهمیت ویژه‌ای دارند. جنس‌هایی مانند Bifidobacterium، Lactobacillus، Faecalibacterium، Bacteroidesو Roseburiaاز جمله میکروارگانیسم‌هایی هستند که در مطالعات مربوط به سلامت روده مورد توجه قرار گرفته‌اند. البته نسبت و فراوانی این گروه‌ها در افراد مختلف یکسان نیست و نمی‌توان یک ترکیب ثابت را به‌عنوان الگوی مطلوب برای تمام انسان‌ها معرفی کرد. برخی از این باکتری‌ها در تجزیه فیبرهای غذایی و تولید اسیدهای چرب زنجیره کوتاه مشارکت دارند، در حالی که گروهی دیگر در پردازش اسیدهای صفراوی یا تبدیل ترکیبات غذایی نقش ایفا می‌کنند. اهمیت این تنوع در آن است که مجموعه فعالیت‌های میکروبی، ظرفیت متابولیکی گسترده‌ای برای میزبان فراهم می‌سازد(مان و همکاران، ۲۰۲۴).

محل استقرار میکروارگانیسم‌ها در دستگاه گوارش نیز از نظر عملکرد زیستی اهمیت دارد. شرایط معده، روده باریک و روده بزرگ از نظر میزان اسیدیته، سرعت عبور مواد غذایی، غلظت اکسیژن و دسترسی به مواد مغذی متفاوت است. به همین دلیل، هر بخش از دستگاه گوارش محیط مناسبی برای گروه مشخصی از میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند. روده بزرگ به دلیل سرعت کمتر عبور محتویات و وجود ترکیبات قابل‌تخمیر، محیط مناسبی برای فعالیت بسیاری از باکتری‌های بی‌هوازی محسوب می‌شود. در مقابل، در بخش‌های بالاتر دستگاه گوارش، شرایط محیطی متفاوتی وجود دارد و جمعیت میکروبی معمولاً الگوی دیگری دارد. این تفاوت مکانی نشان می‌دهد که بررسی میکروبیوم باید با توجه به محل نمونه‌برداری و ویژگی‌های محیطی هر بخش انجام شود. یکی از خصوصیات مهم میکروبیوم روده، توانایی آن در استفاده از ترکیباتی است که آنزیم‌های گوارشی انسان قادر به تجزیه کامل آن‌ها نیستند. فیبرهای غذایی و برخی کربوهیدرات‌های پیچیده از جمله این مواد هستند. باکتری‌های روده با استفاده از آنزیم‌های اختصاصی، این ترکیبات را تخمیر کرده و مواد متابولیکی متنوعی تولید می‌کنند. بخشی از این محصولات برای سلول‌های روده قابل استفاده هستند و بخشی دیگر از طریق گردش خون بر عملکرد اندام‌های دورتر اثر می‌گذارند. این فعالیت متابولیکی باعث می‌شود میکروبیوم در تکمیل ظرفیت تغذیه‌ای بدن نقش داشته باشد. علاوه بر

این، تخمیر ترکیبات غذایی می‌تواند بر اسیدیته محیط روده و شرایط رشد سایر میکروارگانیسم‌ها تأثیر بگذارد و از این طریق ساختار اجتماع میکروبی را تنظیم کند(کوچی، ۱۴۰۳ الف)

ترکیب میکروبیوم از دوران تولد به‌تدریج شکل می‌گیرد و در طول زندگی دستخوش تغییر می‌شود. نوع تغذیه در ماه‌های نخست زندگی، نحوه زایمان، مصرف شیر مادر، تماس با محیط و استفاده از داروها می‌توانند در این روند تأثیرگذار باشند. با افزایش سن و ورود مواد غذایی متنوع به رژیم غذایی، جمعیت میکروبی نیز تغییر می‌کند و به‌تدریج ساختار پیچیده‌تری به وجود می‌آورد. در دوران بزرگسالی، میکروبیوم معمولاً از پایداری نسبی برخوردار است، اما این پایداری مطلق نیست و ممکن است در اثر بیماری، تغییر رژیم غذایی یا مصرف دارو مختل شود. در سالمندی نیز تغییرات مرتبط با فیزیولوژی بدن، کاهش تنوع غذایی و مصرف داروهای متعدد می‌تواند بر ترکیب میکروبی اثر بگذارد. از این رو، سن یکی از متغیرهای مهم در بررسی ارتباط میکروبیوم و سلامت محسوب می‌شود. تنوع میکروبی از شاخص‌های مهم در توصیف وضعیت اکوسیستم روده است. منظور از تنوع تنها تعداد گونه‌های موجود نیست، بلکه میزان توزیع جمعیت میان گونه‌ها و نحوه تعامل آن‌ها را نیز در بر می‌گیرد. در بسیاری از مطالعات، کاهش تنوع میکروبی در کنار تغییرات عملکردی با برخی وضعیت‌های بیماری‌زا همراه بوده است. با این حال، تنوع بیشتر همیشه به معنای سلامت بهتر نیست؛ زیرا وجود برخی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا یا افزایش نامتعادل آن‌ها نیز می‌تواند تنوع ظاهری را تغییر دهد. بنابراین، ارزیابی وضعیت میکروبیوم باید بر اساس ترکیب، عملکرد و شرایط بالینی فرد صورت گیرد. توجه به این نکته از برداشت‌های ساده‌انگارانه درباره مفهوم باکتری‌های خوب و بد جلوگیری می‌کند(وانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

در مجموع، میکروبیوم روده را باید یک سامانه زیستی متغیر و وابسته به شرایط میزبان دانست که در آن ترکیب جمعیت‌های میکروبی و فعالیت متابولیکی آن‌ها به‌صورت هم‌زمان اهمیت دارند. این اجتماع از طریق مشارکت در هضم مواد غذایی، تولید متابولیت‌ها، رقابت با عوامل بیماری‌زا و ارتباط با سلول‌های ایمنی، بخشی از عملکرد طبیعی بدن را بر عهده می‌گیرد. شناخت دقیق ساختار این مجموعه می‌تواند در تفسیر بهتر ارتباط میان میکروارگانیسم‌ها و سیستم ایمنی مؤثر باشد. همچنین بررسی تفاوت‌های فردی در میکروبیوم نشان می‌دهد که برای ارائه راهکارهای درمانی مبتنی بر میکروب‌ها، باید ویژگی‌های اختصاصی هر فرد مورد توجه قرار گیرد.

ارتباط میکروبیوم روده با تکامل و عملکرد سیستم ایمنی

ارتباط میان میکروبیوم روده و سیستم ایمنی از نخستین مراحل شکل‌گیری زندگی آغاز می‌شود. پس از تولد، بدن در معرض طیف گسترده‌ای از میکروارگانیسم‌های محیطی قرار می‌گیرد و روده به یکی از نخستین محل‌های برقراری تماس میان عوامل میکروبی و سلول‌های دفاعی تبدیل می‌شود. این تماس‌ها در شکل‌گیری پاسخ‌های ایمنی و آموزش سیستم دفاعی برای تشخیص عوامل خطرناک از محرک‌های بی‌ضرر اهمیت دارند. در دوران نوزادی، سیستم ایمنی هنوز در حال تکامل است و ارتباط با میکروبیوم می‌تواند بر بلوغ سلول‌های ایمنی و ایجاد تحمل نسبت به ترکیبات غیرمضر تأثیر بگذارد. بنابراین، میکروبیوم تنها مجموعه‌ای از موجودات ساکن روده نیست، بلکه در شکل‌گیری ویژگی‌های دفاعی بدن نیز مشارکت می‌کند. این ارتباط در مراحل بعدی زندگی ادامه پیدا می‌کند و در حفظ تعادل ایمنی نقش دارد. یکی از مهم‌ترین بخش‌های این

تعامل، سیستم ایمنی ذاتی است. این بخش از دفاع بدن شامل سلول‌هایی مانند ماکروفاژها، سلول‌های دندریتیک، نوتروفیل‌ها و سلول‌های کشنده طبیعی است که در شناسایی اولیه عوامل میکروبی نقش دارند. سلول‌های روده با استفاده از گیرنده‌های شناسایی الگو، ساختارهای مشخصی از میکروارگانیسم‌ها را تشخیص می‌دهند. گیرنده‌هایی مانندTLR ها وNOD ها از جمله مولکول‌هایی هستند که در این فرایند مشارکت دارند. پس از شناسایی محرک میکروبی، مسیرهای پیام‌رسانی داخل سلولی فعال می‌شوند و سلول‌ها می‌توانند مواد تنظیم‌کننده مانند سیتوکین‌ها را ترشح کنند. این واکنش‌ها در حالت طبیعی به حفظ تعادل محیط روده و مقابله با عوامل بیماری‌زا کمک می‌کنند. با این حال، تحریک بیش از اندازه این گیرنده‌ها ممکن است به ایجاد التهاب آسیب‌رسان منجر شود(صحت پور و همکاران، ۱۴۰۴).

میکروبیوم روده در تنظیم سیستم ایمنی اکتسابی نیز نقش قابل‌توجهی دارد. این بخش از سیستم دفاعی شامل لنفوسیت‌های Tو B است که در پاسخ‌های اختصاصی به عوامل خارجی فعالیت می‌کنند. برخی ترکیبات میکروبی می‌توانند بر نحوه تمایز سلول‌های T تأثیر بگذارند و مسیر پاسخ ایمنی را به سمت واکنش‌های التهابی یا تنظیمی هدایت کنند. سلول‌های T تنظیمی یا Treg از مهم‌ترین اجزای این فرایند هستند؛ زیرا با مهار واکنش‌های بیش از اندازه، از آسیب به بافت‌های بدن جلوگیری می‌کنند. در مقابل، سلول‌های Th17 در دفاع مخاطی، به‌ویژه در برابر برخی عوامل عفونی، اهمیت دارند. حفظ تعادل میان این دو گروه برای عملکرد مناسب ایمنی ضروری است. اختلال در این تعادل ممکن است در بروز بیماری‌های التهابی و خودایمنی نقش داشته باشد . سلول‌های دندریتیک از دیگر عناصر مهم در ارتباط میان میکروبیوم و ایمنی اکتسابی هستند. این سلول‌ها توانایی دریافت و پردازش ترکیبات آنتی‌ژنی را دارند و پس از آن اطلاعات لازم را به لنفوسیت‌های T منتقل می‌کنند. محیط روده به دلیل تماس دائمی با مواد غذایی و میکروارگانیسم‌ها به سازوکاری نیاز دارد که از فعال شدن بی‌دلیل واکنش‌های شدید ایمنی جلوگیری کند. سلول‌های دندریتیک با دریافت پیام‌هایی از محیط میکروبی می‌توانند در شرایط مناسب، پاسخ‌های تنظیمی را تقویت کنند. برخی متابولیت‌های باکتریایی نیز در تغییر عملکرد این سلول‌ها نقش دارند. به این ترتیب، میکروبیوم از طریق اثرگذاری بر سلول‌های ارائه‌کننده آنتی‌ژن می‌تواند نحوه فعال شدن پاسخ‌های اختصاصی سیستم ایمنی را تغییر دهد(بوتان و همکاران، ۲۰۲۴).

لنفوسیت‌های B نیز در این ارتباط جایگاه مهمی دارند. این سلول‌ها با تولید آنتی‌بادی در شناسایی و خنثی‌سازی عوامل خارجی مشارکت می‌کنند. در محیط روده، یکی از مهم‌ترین انواع آنتی‌بادی، ایمونوگلوبولین A یا IgA است که در ترشحات مخاطی حضور دارد. این آنتی‌بادی می‌تواند به سطح میکروارگانیسم‌ها متصل شود و از تماس نامناسب آن‌ها با سلول‌های پوششی جلوگیری کند. در عین حال، IgAبه حفظ نوعی رابطه کنترل‌شده میان میزبان و میکروب‌های هم‌زیست کمک می‌کند. برخی باکتری‌های روده از طریق تحریک مسیرهای ایمنی مخاطی در تولید این آنتی‌بادی نقش دارند. بنابراین، ارتباط میکروبیوم با سلول‌های B تنها به دفاع در برابر عوامل بیماری‌زا محدود نیست، بلکه در مدیریت جمعیت میکروبی ساکن روده نیز اهمیت دارد)رزمی، ۱۴۰۳).

متابولیت‌های میکروبی و نقش آن‌ها در کنترل التهاب و حفظ سلامت بدن

بخش مهمی از تأثیرات میکروبیوم روده از طریق مواد حاصل از فعالیت متابولیکی باکتری‌ها اعمال می‌شود. این ترکیبات پس از تولید در محیط روده می‌توانند با سلول‌های پوششی، سلول‌های ایمنی و حتی اندام‌های خارج از دستگاه گوارش ارتباط برقرار کنند. در واقع، میکروارگانیسم‌ها با تبدیل مواد غذایی به مولکول‌های زیستی فعال، نوعی مسیر ارتباطی میان رژیم غذایی و سیستم ایمنی ایجاد می‌کنند. اهمیت این موضوع در آن است که بدن انسان به‌تنهایی قادر به تولید بسیاری از این ترکیبات از منابع غذایی نیست و برای بهره‌برداری از آن‌ها به فعالیت میکروبی وابستگی دارد. متابولیت‌های حاصل از تخمیر فیبر، ترکیبات مشتق‌شده از اسیدهای آمینه و فرآورده‌های تغییر اسیدهای صفراوی از جمله گروه‌های مهم در این زمینه هستند(کوچی، ۱۴۰۳ ب)

اسیدهای چرب زنجیره کوتاه از شناخته‌شده‌ترین فرآورده‌های متابولیکی میکروبیوم محسوب می‌شوند. این ترکیبات عمدتاً از تخمیر فیبرهای غذایی و کربوهیدرات‌های قابل‌تخمیر در روده بزرگ به وجود می‌آیند. استات، پروپیونات و بوتیرات سه نمونه مهم از این مواد هستند که هرکدام ویژگی‌های متابولیکی خاصی دارند. این اسیدها علاوه بر نقش تغذیه‌ای، به‌عنوان مولکول‌های پیام‌رسان نیز عمل می‌کنند و از طریق گیرنده‌های اختصاصی یا تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های داخل سلولی، رفتار سلول‌های بدن را تغییر می‌دهند. میزان تولید آن‌ها به نوع رژیم غذایی، ترکیب جمعیت میکروبی و شرایط محیط روده وابسته است. به همین دلیل، مصرف مواد غذایی حاوی فیبرهای متنوع می‌تواند از طریق تغییر فعالیت میکروبیوم، بر مقدار این متابولیت‌ها اثر بگذارد . بوتیرات از نظر سلامت مخاط روده اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا یکی از منابع اصلی انرژی برای سلول‌های پوششی روده بزرگ محسوب می‌شود. تأمین انرژی این سلول‌ها به حفظ ساختار طبیعی اپیتلیوم و عملکرد مناسب سد روده کمک می‌کند. علاوه بر این، بوتیرات می‌تواند از طریق مهار برخی آنزیم‌های هیستون داستیلاز، بر تنظیم بیان ژن‌ها اثر بگذارد. این فرایند در تمایز سلول‌های ایمنی و تقویت برخی پاسخ‌های ضدالتهابی اهمیت دارد. شواهد پژوهشی نشان داده‌اند که این ترکیب در شرایط مشخص می‌تواند به افزایش عملکرد سلول‌های T تنظیمی کمک کند و از تشدید واکنش‌های التهابی جلوگیری نماید. با این حال، اثر بوتیرات به غلظت، نوع سلول و شرایط بافتی وابسته است و نمی‌توان آن را در تمام وضعیت‌ها دارای عملکرد یکسان دانست(مان و همکاران، ۲۰۲۴).

پروپیونات و استات نیز در تنظیم فعالیت‌های ایمنی نقش دارند. این ترکیبات می‌توانند از طریق اتصال به گیرنده‌های جفت‌شونده با پروتئینG ، مسیرهای پیام‌رسانی داخل سلولی را فعال کنند. برخی از این مسیرها بر فعالیت سلول‌های ایمنی و نحوه ترشح سیتوکین‌ها تأثیر می‌گذارند. پروپیونات در بعضی شرایط با تقویت فعالیت سلول‌های تنظیمی، به کنترل التهاب کمک می‌کند. استات نیز علاوه بر نقش متابولیکی، در برخی فرایندهای مرتبط با تنظیم پاسخ ایمنی مشارکت دارد. تفاوت عملکرد این اسیدها نشان می‌دهد که اثرات میکروبیوم را نباید تنها بر اساس مجموع اسیدهای چرب زنجیره کوتاه بررسی کرد. نسبت میان این ترکیبات و نحوه استفاده سلول‌های میزبان از آن‌ها نیز اهمیت دارد. گروه دیگری از فرآورده‌های میکروبی، متابولیت‌های حاصل از تجزیه تریپتوفان هستند. تریپتوفان یک اسیدآمینه ضروری است که بخشی از آن توسط باکتری‌های روده به ترکیبات مختلف تبدیل می‌شود. برخی از این فرآورده‌ها قادرند گیرنده‌ای به نام AhR را فعال کنند که در تنظیم عملکرد سلول‌های ایمنی و حفظ سلامت مخاط روده نقش دارد. این مسیر می‌تواند بر فعالیت سلول‌های ایمنی ذاتی و اکتسابی، تولید برخی سیتوکین‌ها و حفظ تعادل التهابی اثر بگذارد. در صورتی که ترکیب میکروبیوم تغییر کند، الگوی تبدیل

تریپتوفان نیز ممکن است دگرگون شود. بنابراین، ارتباط میان تغذیه، فعالیت میکروبی و مسیرهای پیام‌رسانی ایمنی از طریق این اسیدآمینه یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های جدید محسوب می‌شود(کوچی، ۱۴۰۳ الف)

اسیدهای صفراوی نیز از جمله موادی هستند که میکروبیوم در تغییر و تبدیل آن‌ها مشارکت می‌کند. این ترکیبات ابتدا در کبد ساخته می‌شوند و پس از ورود به روده در فرایند هضم چربی‌ها نقش دارند. برخی باکتری‌های روده می‌توانند ساختار اسیدهای صفراوی اولیه را تغییر دهند و انواع ثانویه آن‌ها را تولید کنند. این مواد علاوه بر نقش گوارشی، قادرند بر گیرنده‌های متابولیکی و ایمنی اثر بگذارند. از طریق این ارتباط، فعالیت میکروبیوم می‌تواند در تنظیم التهاب، متابولیسم و عملکرد برخی اندام‌ها مشارکت داشته باشد. تغییر در ترکیب اسیدهای صفراوی ممکن است با تغییرات جمعیت میکروبی همراه شود و بر وضعیت سلامت روده اثر بگذارد. به همین دلیل، بررسی متابولیسم اسیدهای صفراوی به یکی از محورهای مهم مطالعه ارتباط میان میکروبیوم و سلامت عمومی تبدیل شده است.

در مجموع، متابولیت‌های میکروبی را می‌توان واسطه‌های اصلی ارتباط میان فعالیت باکتری‌های روده و عملکرد سیستم ایمنی دانست. اسیدهای چرب زنجیره کوتاه، ترکیبات مشتق‌شده از تریپتوفان و اسیدهای صفراوی تغییریافته، هرکدام از مسیرهای متفاوتی بر سلول‌های بدن اثر می‌گذارند. این مواد در حفظ سد مخاطی، تنظیم فعالیت لنفوسیت‌ها، کنترل التهاب و برقراری تعادل متابولیکی مشارکت دارند. بنابراین، توجه به عملکرد متابولیکی میکروبیوم می‌تواند در مقایسه با بررسی صرف فراوانی گونه‌های باکتریایی، تصویر دقیق‌تری از نقش واقعی آن در سلامت انسان ارائه دهد. (کوچی، ۱۴۰۳ الف)

اختلال در تعادل میکروبی روده و ارتباط آن با بیماری‌های انسانی

دیس‌بیوز اصطلاحی است که برای توصیف تغییر نامطلوب در ترکیب یا عملکرد اجتماعات میکروبی به کار می‌رود. این وضعیت ممکن است با کاهش فراوانی برخی میکروارگانیسم‌های مفید، افزایش جمعیت گروه‌های فرصت‌طلب یا تغییر در ظرفیت متابولیکی اجتماع میکروبی همراه باشد. دیس‌بیوز الزاماً به معنای حذف کامل باکتری‌های سودمند نیست، بلکه گاهی تغییر در نسبت جمعیت‌ها و ارتباطات میان آن‌ها برای ایجاد اختلال کافی است. در چنین شرایطی، تولید برخی متابولیت‌های محافظتی کاهش پیدا می‌کند و احتمال افزایش فعالیت مسیرهای التهابی وجود دارد. همچنین رقابت طبیعی میان میکروارگانیسم‌ها ممکن است تضعیف شود و زمینه برای گسترش عوامل نامطلوب فراهم گردد. این تغییرات می‌توانند عملکرد طبیعی روده را تحت تأثیر قرار دهند و بر سلامت عمومی بدن اثر بگذارند(کوچی، ۱۴۰۳ ب)

یکی از پیامدهای احتمالی دیس‌بیوز، آسیب به یکپارچگی سد مخاطی روده است. سطح داخلی روده با لایه‌ای از مخاط پوشیده شده که از تماس مستقیم بسیاری از میکروارگانیسم‌ها با سلول‌های اپیتلیال جلوگیری می‌کند. در کنار این لایه، اتصالات محکم میان سلول‌های پوششی نیز عبور مواد از فضای بین‌سلولی را کنترل می‌کنند. برخی باکتری‌های مفید و متابولیت‌های آن‌ها در حفظ این ساختار نقش دارند. اگر جمعیت تولیدکننده ترکیبات محافظتی کاهش یابد، ممکن است عملکرد سد مخاطی تضعیف شود. در این حالت، عبور برخی اجزای میکروبی و ترکیبات تحریک‌کننده التهاب افزایش پیدا می‌کند و سلول‌های ایمنی بیشتر در معرض محرک‌های التهابی قرار می‌گیرند. البته میزان این تغییرات به نوع بیماری و شرایط فیزیولوژیکی فرد بستگی دارد. بیماری‌های التهابی روده از جمله اختلالاتی هستند که ارتباط نزدیکی با تغییرات میکروبیوم

دارند. بیماری کرون و کولیت اولسراتیو دو نمونه شناخته‌شده از این گروه محسوب می‌شوند. در این بیماری‌ها، التهاب مزمن در بخش‌هایی از دستگاه گوارش ایجاد می‌شود و می‌تواند با درد شکمی، اسهال، خون‌ریزی و اختلال در جذب مواد غذایی همراه باشد. مطالعات مختلف تغییر در فراوانی برخی گروه‌های میکروبی و کاهش تولید متابولیت‌های محافظتی را در بیماران مبتلا گزارش کرده‌اند. با این حال، هنوز مشخص نیست که این تغییرات در تمام موارد عامل آغازکننده بیماری هستند یا بخشی از پیامدهای التهاب و تغییر محیط روده به شمار می‌روند. احتمالاً ارتباطی دوطرفه میان التهاب و دیس‌بیوز وجود دارد؛ به این معنا که هرکدام می‌توانند شرایط را برای تشدید دیگری فراهم کنند(وانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

در بیماری‌های خودایمنی نیز نقش احتمالی میکروبیوم مورد توجه قرار گرفته است. بیماری‌های خودایمنی زمانی ایجاد می‌شوند که سیستم ایمنی به اشتباه اجزای طبیعی بدن را به‌عنوان عامل بیگانه شناسایی کند و علیه آن‌ها واکنش نشان دهد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که تغییر در ترکیب میکروبی روده می‌تواند با تغییر تعادل میان سلول‌های T تنظیمی و سلول‌های التهابی همراه باشد. همچنین بعضی ترکیبات میکروبی ممکن است بر نحوه ارائه آنتی‌ژن و فعال شدن مسیرهای ایمنی تأثیر بگذارند. بیماری‌هایی مانند آرتریت روماتوئید و برخی اختلالات خودایمنی دیگر در مطالعات مرتبط با میکروبیوم بررسی شده‌اند. با وجود این، تفاوت‌های فردی و پیچیدگی عوامل ژنتیکی و محیطی باعث می‌شود که نتوان یک الگوی میکروبی مشخص را علت قطعی تمام این بیماری‌ها دانست(رزمی، ۱۴۰۳)

ارتباط میکروبیوم با بیماری‌های متابولیکی نیز از موضوعات مهم تحقیقات پزشکی است. چاقی و دیابت نوع دو از جمله بیماری‌هایی هستند که در برخی مطالعات با تغییر ترکیب و عملکرد میکروبیوم همراه بوده‌اند. باکتری‌های روده از طریق تغییر در استخراج انرژی از مواد غذایی، تولید متابولیت‌ها و اثرگذاری بر پیام‌رسانی هورمونی می‌توانند در تنظیم متابولیسم میزبان مشارکت داشته باشند. همچنین التهاب مزمن با شدت پایین که در برخی اختلالات متابولیکی مشاهده می‌شود، ممکن است با تغییرات سد روده و ورود ترکیبات التهابی به گردش خون ارتباط داشته باشد. با این حال، چاقی، رژیم غذایی، داروها و میزان فعالیت بدنی نیز خود بر میکروبیوم اثر می‌گذارند. بنابراین، رابطه میان میکروبیوم و اختلالات متابولیکی پیچیده است و نباید آن را به یک عامل منفرد تقلیل داد.

برخی پژوهش‌ها نیز ارتباط میان تغییرات میکروبیوم روده و اختلالات آلرژیک را بررسی کرده‌اند. در شرایط طبیعی، سیستم ایمنی باید بتواند نسبت به ترکیبات غذایی و مواد بی‌ضرر محیطی تحمل مناسبی ایجاد کند. اگر در مراحل اولیه رشد، ارتباط میان میکروبیوم و سیستم ایمنی به شکل مطلوب برقرار نشود، ممکن است تنظیم پاسخ‌های حساسیتی با اختلال مواجه شود. برخی متابولیت‌های باکتریایی در ایجاد تحمل ایمنی و تقویت سلول‌های T تنظیمی نقش دارند. تغییر در تولید این ترکیبات ممکن است با افزایش استعداد برخی افراد به بیماری‌های آلرژیک همراه باشد. آسم و حساسیت غذایی از جمله اختلالاتی هستند که در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. البته عوامل ژنتیکی، آلودگی هوا، نوع تغذیه و شرایط محیطی نیز در ایجاد این بیماری‌ها مؤثرند و نقش میکروبیوم باید در کنار سایر عوامل تفسیر شود. در نهایت، باید توجه داشت که مشاهده تفاوت در میکروبیوم افراد سالم و بیمار به‌تنهایی برای اثبات نقش علّی میکروارگانیسم‌ها کافی نیست. بیماری می‌تواند موجب تغییر رژیم غذایی، مصرف دارو، کاهش تحرک و تغییر محیط روده شود و در نتیجه ساختار میکروبی را دگرگون کند. از این رو، مطالعات

طولی، آزمایش‌های مداخله‌ای و بررسی متابولیت‌ها برای روشن شدن رابطه علت و معلولی اهمیت دارند. شناخت این محدودیت‌ها مانع از ارائه ادعاهای غیرعلمی درباره درمان بیماری‌ها از طریق تغییر ساده ترکیب باکتری‌های روده می‌شود .

راهکارهای حفظ تعادل میکروبیوم و کاربردهای درمانی آن در ارتقای سلامت انسان

تغذیه یکی از مؤثرترین عوامل قابل‌کنترل در شکل‌گیری و حفظ ترکیب میکروبیوم روده است. مواد غذایی مصرفی، علاوه بر تأمین انرژی و عناصر ضروری، منابع مورد استفاده میکروارگانیسم‌های ساکن روده را نیز فراهم می‌کنند. رژیم غذایی متنوع که شامل سبزیجات، میوه‌ها، حبوبات، غلات کامل و منابع مختلف فیبر باشد، می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای فعالیت گروه‌های متنوع باکتریایی ایجاد کند. فیبرهای غذایی در بخش‌های بالایی دستگاه گوارش به‌طور کامل هضم نمی‌شوند و در روده بزرگ توسط باکتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فرایند می‌تواند تولید اسیدهای چرب زنجیره کوتاه را افزایش دهد و بر سلامت مخاط روده اثر مثبت داشته باشد. در مقابل، رژیم غذایی محدود و کم‌فیبر ممکن است منابع تغذیه‌ای برخی از باکتری‌های مفید را کاهش دهد و ترکیب فعالیت متابولیکی میکروبیوم را تغییر دهد(کوچی، ۱۴۰۳ الف)

پری‌بیوتیک‌ها از جمله ترکیباتی هستند که با هدف تأثیرگذاری بر فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد معمولاً ترکیباتی هستند که به‌صورت انتخابی توسط گروهی از میکروب‌های میزبان استفاده می‌شوند و می‌توانند اثرات سودمندی بر سلامت داشته باشند. اینولین، فروکتوالیگوساکاریدها و گالاکتوالیگوساکاریدها از نمونه‌های شناخته‌شده این ترکیبات هستند. مصرف پری‌بیوتیک‌ها می‌تواند در شرایط مناسب به افزایش فعالیت برخی باکتری‌های تولیدکننده متابولیت‌های مفید کمک کند. با این حال، میزان پاسخ به این مواد در افراد مختلف یکسان نیست و نوع میکروبیوم اولیه، مقدار مصرف و وضعیت گوارشی فرد بر نتیجه اثر می‌گذارند. بنابراین، استفاده از این ترکیبات باید با توجه به شرایط فردی و تحمل گوارشی صورت گیرد. پروبیوتیک‌ها نیز از جمله روش‌های مورد استفاده برای تأثیرگذاری بر محیط میکروبی روده هستند. بر اساس تعریف علمی، پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که در صورت مصرف به مقدار کافی، می‌توانند برای میزبان فواید سلامت ایجاد کنند. برخی گونه‌های لاکتوباسیلوس و بیفیدوباکتریوم از جمله گروه‌های شناخته‌شده در فرآورده‌های پروبیوتیکی هستند. این میکروارگانیسم‌ها ممکن است از طریق رقابت با عوامل بیماری‌زا، تولید ترکیبات بازدارنده، تقویت سد مخاطی یا تأثیر بر فعالیت سلول‌های ایمنی عمل کنند. با این حال، اثرات پروبیوتیک‌ها وابسته به سویه است و نمی‌توان نتیجه یک مطالعه درباره یک سویه را به تمام اعضای یک جنس تعمیم داد. همچنین همه افراد به مصرف یک فرآورده پروبیوتیکی پاسخ مشابهی نمی‌دهند . پیوند میان پری‌بیوتیک‌ها و پروبیوتیک‌ها زمینه شکل‌گیری مفهوم سین‌بیوتیک را فراهم کرده است. سین‌بیوتیک به ترکیبی گفته می‌شود که در آن میکروارگانیسم زنده و بستر غذایی مورد استفاده آن به شکلی هماهنگ در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. هدف از این رویکرد، افزایش احتمال استقرار یا فعالیت میکروارگانیسم مورد نظر در محیط روده است. برای مثال، ترکیب برخی باکتری‌های مفید با فیبرهای قابل‌تخمیر می‌تواند در شرایط مشخص به افزایش تولید متابولیت‌های مفید کمک کند. با این حال، طراحی فرآورده‌های سین‌بیوتیک به بررسی دقیق سازگاری میان میکروارگانیسم و ماده غذایی نیاز دارد. اگر ترکیب انتخاب‌شده مناسب نباشد، ممکن است اثر مورد انتظار ایجاد نشود یا حتی تحمل گوارشی فرد کاهش پیدا کند. بنابراین، تعیین ترکیب مؤثر باید بر پایه شواهد آزمایشگاهی و بالینی انجام شود(بوتان و همکاران، ۲۰۲۴).

نتیجه‌گیری

بررسی نقش میکروبیوم روده در سلامت انسان نشان می‌دهد که ارتباط میان میکروارگانیسم‌های ساکن دستگاه گوارش و سیستم ایمنی، یکی از مهم‌ترین تعاملات زیستی بدن محسوب می‌شود. این اجتماع میکروبی با مشارکت در فرایندهای متابولیکی، حفظ یکپارچگی سد روده و تنظیم فعالیت سلول‌های دفاعی، به برقراری تعادل میان واکنش‌های التهابی و سازوکارهای مهارکننده کمک می‌کند. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های این ارتباط، توانایی باکتری‌های روده در تولید ترکیبات زیستی فعال است. اسیدهای چرب زنجیره کوتاه و سایر متابولیت‌های میکروبی می‌توانند در تنظیم فعالیت لنفوسیت‌ها، تقویت سلول‌های T تنظیمی و کنترل تولید پیام‌رسان‌های التهابی نقش داشته باشند. همچنین میکروبیوم از طریق تأثیر بر سد مخاطی، مانع از تماس نامناسب برخی عوامل خارجی با بافت‌های داخلی بدن می‌شود. از سوی دیگر، برهم خوردن تعادل میکروبیوم ممکن است زمینه‌ساز تغییرات نامطلوب در عملکرد سیستم ایمنی باشد. ارتباط این وضعیت با بیماری‌های التهابی روده، اختلالات متابولیکی، حساسیت‌ها و برخی بیماری‌های خودایمنی در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است. با این وجود، برای تعیین نقش مستقیم میکروبیوم در ایجاد این بیماری‌ها، بررسی‌های دقیق‌تر و مطالعات بالینی بیشتری مورد نیاز است.

در مجموع، می‌توان بیان کرد که میکروبیوم روده یکی از مؤلفه‌های مهم در حفظ سلامت عمومی انسان است و عملکرد مناسب آن به عوامل متعددی از جمله تغذیه، سبک زندگی و شرایط فیزیولوژیکی بدن وابستگی دارد. توجه به تنوع غذایی، دریافت فیبر کافی و استفاده اصولی از مداخلات میکروبی می‌تواند در حفظ تعادل این اجتماع زیستی مؤثر باشد. توسعه پژوهش‌های آینده در این زمینه نیز می‌تواند به شناسایی راهکارهای دقیق‌تر برای پیشگیری از بیماری‌ها و بهبود عملکرد سیستم ایمنی منجر شود.

منابع

- رزمی، علی،۱۴۰۳،نقش میکروبیوم روده در تنظیم سیستم ایمنی و بیماری های خودایمنی،چهارمین همایش بین المللی زیست شناسی و علوم آزمایشگاهی،همدان،https://civilica.com/doc/2201788
- کوچی، محدثه،۱۴۰۳،نقش میکروبیوم روده در سلامت انسان: از ایمنی و متابولیسم تا سلامت روان،چهارمین کنگره جهانی یافته های نوین در سلامت، علوم بهداشتی و علوم تربیتی،https://civilica.com/doc/2211471
- صحت پور، روژان و همتی تزنگی، فاطمه و زارع کوشک خلیلی، فاطمه و رحیمی فرودی، مریم و شایانفر، محمد امین و صحراگرد، ایلناز،۱۴۰۵،نقش میکروبیوتای روده در سیستم ایمنی،دومین کنفرانس ملی یافته های نوین در میکروبیولوژی و تولید فراورده های بیولوژیک،شیراز،https://civilica.com/doc/2697133
- کوچی، محدثه،۱۴۰۳،میکروبیوم روده و تاثیرات آن بر سلامت جسمی و ذهنی،یازدهمین کنفرانس بین المللی مطالعات میان رشته ای علوم بهداشتی، روانشناسی، مدیریت و علوم تربیتی،https://civilica.com/doc/2254104

- Mann, E. R., Lam, Y. K., & Uhlig, H. H. (2024). Short-chain fatty acids: Linking diet, the microbiome and immunity. Nature Reviews Immunology, 24, 577–595.
- Wang, J., He, M., Yang, M., & Ai, X. (2024). Gut microbiota as a key regulator of intestinal mucosal immunity. Life Sciences.
- Microbial Metabolites and Gut Immunology. (2024). Annual Review of Immunology, 42, 153–178
- Bhutta, N. K., et al. (2024). Gut microbiota mediated T cells regulation and autoimmune diseases. Frontiers in Microbiology, 15.
- Prasad, S., et al. (2024). Gut redox and microbiome: Charting the roadmap to T-cell regulation. Frontiers in Immunology, 15.
- Gut-Microbiota-Derived Metabolites Maintain Gut and Systemic Immune Homeostasis. (2023).