

گالاکتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات زیستی و کاربردها

علی امینی بیدختی^۱، منیرالسادات شاکری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری بیوتکنولوژی مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، گروه پژوهشی زیست فناوری مواد غذایی، مشهد، ایران

۲- استادیار موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، گروه پژوهشی زیست فناوری مواد غذایی، مشهد، ایران
m.shakeri@rifst.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۱۵، تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۱

صفحه ۵۳-۷۶

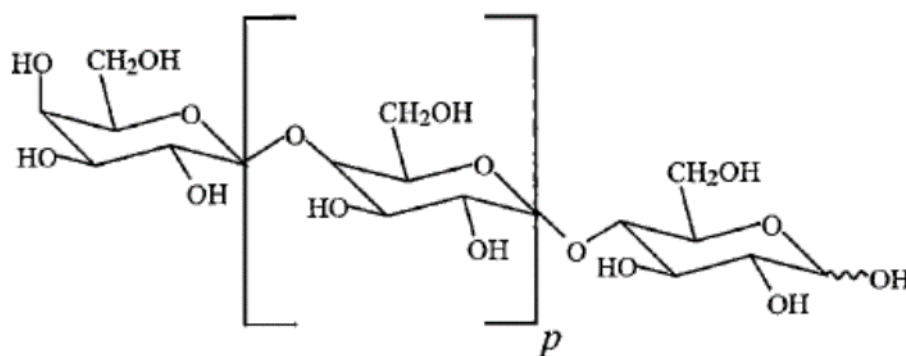
چکیده

گالاکتوالیگوساکاریدها ترکیبات غذایی بر پایه کربوهیدرات هستند که می‌توانند در فعالیت‌های فیزیولوژیکی مرتبط با سلامتی از جمله تولید اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه، انتقال انرژی در کولونوسیت‌ها و رشد و تمایز سلولی سلول‌های اپیتلیال روده موثر باشند. گالاکتوالیگوساکاریدها در حیوانات و انسان‌ها به عنوان ترکیبات پری بیوتیک شناسایی شده‌اند و با موفقیت در طیف گسترده‌ای از محصولات غذایی مانند محصولات نانوائی، شیرخشک نوزاد، فرآورده‌های لبنی و نوشیدنی‌ها استفاده شده‌اند. گالاکتوالیگوساکاریدها را می‌توان از دو منبع دانه سویا و لاکتوز حاصل از شیر گاو به صورت شیمیایی و یا آنزیمی سنتز و تولید کرد. انتخاب فناوری مناسب برای فرآیند هیدرولیز لاکتوز یا تولید گالاکتوالیگوساکاریدها به ماهیت سوبسترا و ویژگی‌های آنزیم بستگی دارد. تنظیمات راکتور عامل مهم دیگری است که می‌تواند بر بازده و ترکیب مخلوط‌های گالاکتوالیگوساکاریدی اثر داشته باشد. در این مقاله به طور خلاصه جنبه‌های مختلف مربوط به تولید گالاکتوالیگوساکاریدها از جمله انواع آنها و عملکرد ترکیبات فراسودمند آن، نقش آنها به عنوان پری بیوتیک و تولید صنعتی آن از طریق روش‌های میکروبی و همچنین راهکارهای بهبود فرآیند تولید بررسی می‌شوند. مشخصات فیزیکی، شیمیایی، اثرات فیزیولوژیکی و کاربردهای گالاکتوالیگوساکاریدها نیز به طور خلاصه بیان شده است. **واژه‌های کلیدی:** گالاکتوالیگوساکاریدها (GOS)، پری بیوتیک، سنتز آنزیمی، شیرخشک نوزادان.

مقدمه

گالاکتوالیگوساکاریدها (GOS)، الیگوساکاریدهای گالاکتوزیله شده ترانس و غیرقابل هضم هستند که از ۱ تا ۷ واحد گالاکتوز متصل به یک گلوکز یا گالاکتوز انتهایی از طریق پیوندهای گلیکوزیدی $\beta(1 \rightarrow 3)$ ، $\beta(1 \rightarrow 4)$ یا $\beta(1 \rightarrow 6)$ تشکیل شده اند (شکل ۱). اگرچه تری تا هگزاساکاریدها با ۲ تا ۵

واحد گالاکتوز (با درجه پلیمریزاسیون ۳ تا ۶) اجزای اصلی محصولات حاوی GOS هستند، دی ساکاریدهای متشکل از گالاکتوز و گلوکز (با درجه پلیمریزاسیون ۲) با پیوندهای بتا-گلیکوزیدی متفاوت از لاکتوز نیز به عنوان GOS تعریف می شوند زیرا دارای خصوصیات فیزیولوژیکی مشابه الیگوساکاریدهای بلند زنجیره هستند (۱).



شکل ۱- ساختار گالاکتوالیگوساکاریدها.

کروشه ها واحدهای تکرارشونده هستند، p برابر با صفر تا ۶ تولید گالاکتوالیگوساکاریدهای متشکل از ۱ تا ۷ واحد گالاکتوز متصل به گلوکز یا گالاکتوز انتهایی را از طریق پیوندهای گلیکوزیدی $\beta(1 \rightarrow 3)$ ، $\beta(1 \rightarrow 4)$ یا $\beta(1 \rightarrow 6)$ نشان می دهد (۱).

کولونوسیت ها و رشد و تمایز سلولی سلول های اپیتلیال روده داشته باشند. این ترکیبات همچنین متابولیسم لیپیدها و کربوهیدرات ها را افزایش داده و از عفونت جلوگیری می کنند. تعداد

گالاکتوالیگوساکاریدها ترکیبات غذایی بر پایه کربوهیدرات هستند که می توانند فعالیت های فیزیولوژیکی مرتبط با سلامتی از جمله تولید اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه (SCFA)، انتقال انرژی در

"ایمنی‌بخشی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

باکتری‌های بیماری‌زا را کاهش داده، عملکرد طبیعی روده را تسهیل می‌کنند و جذب برخی از مواد معدنی را تحریک کرده و میزان چربی خون را کاهش می‌دهند. گالاتوالیگوساکاریدها، همچنین به عنوان الیگوگالاتوزیل لاکتوز، الیگوگالاتوز، الیگولاتوز یا ترانس گالاتوالیگوساکاریدها شناخته می‌شوند و به دلیل ماهیت غیرقابل هضم خود، به گروه پری‌بیوتیک‌ها تعلق دارند. این ترکیبات به دلیل فواید سلامتی بخش شناخته شده، توجه زیادی را در زمینه غذاهای فراسودمند به خود معطوف کرده‌اند. در گذشته، به دلیل وجود شیرینی کم، حلاطیت در آب و قابلیت هضم پائین به عنوان یکی از ترکیبات غذایی از اهمیت کمی برخوردار بودند اما در حال حاضر، ادعا می‌شود که گالاتوالیگوساکاریدها متعلق به پری‌بیوتیک‌ها هستند و به صورت انتخابی رشد باکتری‌های مفید را در قسمت تحتانی روده انسان تحریک می‌کنند. علت توجه و علاقه به گالاتوالیگوساکاریدها به طور عمده به دلیل وجود الیگوساکاریدهای بر پایه گالاتوز

در شیر انسان و شباهت ساختاری بین GOS تجاری و الیگوساکارید شیر انسان (human milk oligosaccharide) است. شیر انسان حاوی حدود ۷ درصد لاکتوز و ۱ درصد HMO شامل لاکتوز متصل به فوکوز، N-استیل گلوکوزامین و اسید سیالیک است. الیگوساکاریدها بعد از لاکتوز و چربی سومین جزء مواد جامد شیر انسان را تشکیل می‌دهند. مقادیر زیادی از آنها در آغوز مشاهده می‌شود به طوری که این مواد تا ۲۴ درصد کل کربوهیدرات‌های آغوز را تشکیل می‌دهند. در اکثر مطالعات، الیگوساکاریدهای موجود در شیر انسان شامل تقریباً ۶۰ تا ۹۰ درصد GOS و ۱۰ تا ۴۰ درصد فروکتوالیگوساکاریدها (FOS) در چند ماه اول شیردهی گزارش شده است. این ترکیبات در درجه اول باعث رشد و پیشرفت فلور میکروبی و سیستم ایمنی نوزادان می‌شوند. نوزادان شیرخوار دارای تعداد بیفیدوباکترهای بالاتر، ترکیب فلور میکروبی ساده‌تر و حساسیت کمتر به بیماری‌های عفونی نسبت به نوزادان تغذیه‌شده با شیر خشک هستند. سطح

بالاتری از آمونیاک، آمین و فنل و سایر ترکیبات مضر نیز در نوزادان تغذیه شده با شیرخشک گزارش شده است. با این وجود، افزودن مقدار مناسب GOS، سطح آن را در نوزادان تغذیه شده با شیرخشک حفظ می کند (۲).

شیر انسان حاوی نسبت بالاتری از الیگوساکاریدهای خنثی (۱ درصد) در مقایسه با الیگوساکاریدهای اسیدی (۱/۰ درصد) است. بسیاری از مطالعات با استفاده از روش های کشت معمول و تکنیک های مولکولی برای شناسایی باکتری ها نشان داده اند که نوزادان تغذیه شده با شیر مادر دارای میکروبیوتای روده ای هستند که تحت سلطه بیفیدوباکترها قرار گرفته اند و با نوزادان تغذیه شده با شیر گاو تفاوت دارد. میکروبیوتا در نوزادان تغذیه شده با شیر گاو با تعداد کمی از بیفیدوباکترها و تعداد بیشتری از ارگانسم های خطرناک تر مانند کلستریديا و انتروکوک ها همراه است. تصور می شود که غلبه بیفیدوباکترها در نوزادان تغذیه شده با شیر مادر ناشی از توانایی آنها در استفاده از الیگوساکاریدها

در شیر مادر از جمله GOS است، که نوزادان نمی توانند در روده فوقانی هضم کنند. درحالی که تولید کامل کلیه ترکیبات شیر انسانی برای غنی سازی شیرخشک نوزاد دشوار خواهد بود، افزودن ترکیبات پری بیوتیک مانند GOS می تواند یک افزودنی مفید در شیرخشک نوزاد برای ایجاد برخی از ویژگی های فراسودمند مرتبط با شیر مادر، به ویژه اثرات بیفیدوژنی آن باشد (۳).

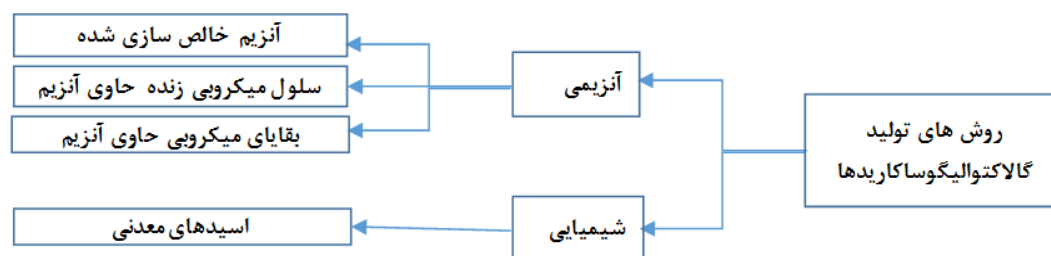
۱- روش های مختلف سنتز

گالاکتوالیگوساکاریدها

گالاکتوالیگوساکاریدها را می توان از دو منبع دانه سویا و لاکتوز حاصل از شیر گاو به صورت شیمیایی و یا آنزیمی سنتز و تولید کرد. حالت دوم شبیه به الیگوساکاریدهایی است که به طور طبیعی در شیر مادر وجود دارد و بنابراین استفاده اصلی آنها تاکنون در تولید شیرخشک نوزادان بوده است. با این حال، توانایی این الیگوساکاریدها در ایجاد اثر بیفیدوژنی باعث افزایش توجه به تولید و کاربرد آنها در فرآورده های مختلف غذایی و دارویی شده است (۴).

"امینی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

شکل ۲، روش‌های مختلف سنتز الیگوساکاریدها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- انواع روش‌های مورد استفاده در سنتز الیگوساکاریدها.

۱-۱ سنتز شیمیایی

گالاتوالیگوساکاریدها برای اولین بار به صورت شیمیایی از طریق جابجایی هسته‌ای و الکتروفیلی سنتز شدند. در واقع می‌توان با استفاده از اسیدهای معدنی (سنتز شیمیایی) الیگوساکاریدها را از مونوساکاریدها تولید کرد. این فرآیند، معروف به "ریورسیون (reversion)"، تولید الیگوساکاریدها را در حین هیدرولیز اسیدی لاکتوز نشان می‌دهد، که برای اولین بار در دهه ۵۰ مشاهده شد. شرایط مناسب برای تولید الیگوساکارید در حین هیدرولیز اسیدی لاکتوز و ساختارهای الیگوساکاریدی حاصل از آن به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. در نتیجه این فرآیند شیمیایی، مخلوط پیچیده‌ای از دی‌ساکاریدها و تری‌ساکاریدها با انواع

پیوندها با کنفورماسیون α - و β - آنومریک و قندهای انهدرو به وجود می‌آید. البته به دلیل عدم اختصاصی بودن محصول و شرایط شدید اعمال شده در حین هیدرولیز اسیدی لاکتوز، این فرآیند برای تولید GOS در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (۵).

۲-۱ سنتز آنزیمی

آنزیم‌های بتاگالاتوزییداز (β -gal; EC 3.2.1.23)، هیدرولیز و بتا ترانس گالاتوزیلاسیون بتا دی گالاتوپیرانوزیدها (مانند لاکتوز) را کاتالیز می‌کنند. این آنزیم‌ها در هنگام استفاده از لاکتوز به عنوان سوبسترا، GOS تولید می‌کنند. بتاگالاتوزییدازها تحت مکانیسم دو مرحله‌ای عمل می‌کنند. مرحله اول این مکانیسم شامل تشکیل یک

محصول حد واسط گالاکتوزیل-آنزیم با پیوند کوالانسی است. پس از آن، قطعه گالاکتوزیل متصل به نوکلئوفیل در محل فعال به یک گیرنده هسته‌ای منتقل می‌شود. آب و همچنین تمام انواع قند موجود در مخلوط واکنش می‌توانند به‌عنوان یک گیرنده گالاکتوزیل به کار گرفته شوند. از اینرو، مخلوط نهایی حاوی محصولات هیدرولیز لاکتوز، گلوکز و گالاکتوز، لاکتوز بدون برگشت و همچنین دی و تری الیگوساکاریدها است. آنزیم‌های کلیدی برای تولید GOS گالاکتوزیل ترانسفراز و گالاکتوزیداز هستند. گالاکتوزیل ترانسفراز یک آنزیم استرئو-انتخابی (stereo-selective) است که می‌تواند GOS را در مقادیر زیاد تولید کند (۵).

با این وجود، بیوکاتالیز GOS از طریق گالاکتوزیل ترانسفراز بسیار پرهزینه است، زیرا این واکنش به قندهای نوکلئوتیدی به‌عنوان یک اهداکننده نیاز دارد. تشکیل GOS با استفاده از گالاکتوزیدازها بسیار ارزان‌تر از گالاکتوزیل ترانسفرازها است. اما مقدار GOS تولیدی کمتر است.

همچنین این آنزیم نسبت به گالاکتوزیل ترانسفراز کمتر انتخابی است. منابع میکروبی بتاگالاکتوزیدازها برای تولید GOS شامل آنزیم‌های خام، آنزیم‌های خالص‌سازی‌شده، آنزیم‌های نوترکیب، آنزیم‌های تثبیت‌شده و یا بیوترانسفورماسیون سلول کامل، سلول‌های غیرزنده (تیمارشده با تولوئن) و سلول‌های تثبیت‌شده است. کل سلول هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که فرآیند جداسازی بتاگالاکتوزیداز غیراقتصادی است. البته استفاده از سلول کامل به دلیل کوفاکتورهای موجود در غشای سلولی و سلول بسیار ارزان‌تر است اما این موضوع برای سنتز GOS خیلی مهم نیست زیرا بتاگالاکتوزیداز از یون‌های فلزی به‌عنوان کوفاکتورها استفاده می‌کند (۶). در تولید آنزیمی GOS، برخی فرآورده‌های جانبی مانند گلوکز و گالاکتوز نیز ممکن است تولید شوند که اثرات پری‌بیوتیک ندارند و باعث کاهش بازدهی سنتز GOS می‌شوند. هنگام استفاده از سلول کامل، جدا از تداخل محصولات نهایی متابولیکی با تولید GOS

"امینی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

دما نیز عامل نامطلوب دیگری است. دما اغلب بازدهی سنتز GOS را افزایش می دهد اما برای سلول های غیرترموفیل، نامطلوب و حتی کشنده است. در برخی مطالعات از سلول های غیرزنده و در حالت کمون استفاده می شود. این نوع سلول ها معایب سلول های زنده را ندارند و بازده تولید GOS آنها بسیار بیشتر است. تولیدکنندگان صنعتی از سلول یا عصاره آنزیم استفاده می کنند. به عنوان مثال، سلول های در حال کمون *Clostridium laurentii* که در ژل های آلزینات کلسیم تثبیت شده اند، برای تولید GOS در مقیاس صنعتی استفاده می شوند. علاوه بر این، ترکیب آنزیم های میکروبی هم می تواند اتفاق بیفتد. در این صورت مدل سازی و کنترل فرآیند تخمیر دشوارتر می شود (۷).

۲- میکروارگانیسم های تولیدکننده آنزیم و مسیرهای بیوسنتز گالاتوالیگوساکاریدها

۲-۱ باکتری ها و قارچ ها

طبقه بندی گلیکوزید هیدرولازها (GHs) بر اساس شباهت در توالی اسیدهای آمینه

انجام شده است. در حال حاضر، این آنزیم ها ۱۱۵ خانواده را تشکیل می دهند. آنزیم های با فعالیت بتاگالاتوزیدازی (طبقه بندی شده به عنوان EC 3.2.1.23/108) در خانواده های GH1، GH2، GH35 و GH42 طبقه بندی می شوند. لاکتوز تنها سوبسترای طبیعی در بعضی از آنزیم های متعلق به GH1 و GH2 است، در حالی که خانواده های GH35 و GH42 شامل آنزیم هایی هستند که بر روی گلیکوزیدهای مختلف حاوی گالاتوز عمل می کنند (۸).

هیدرولازهای گلیکوزیدی با فعالیت بتاگالاتوزیدازی در انواع میکروارگانیسم ها از جمله جلبک ها، باکتری ها و یوکاریوت ها یافت می شوند. برخی از این آنزیم ها در ارگانیسم های میزبان بیان شده اند، و یا با ترکیبی از چندین تکنیک مرسوم، مانند تفکیک توسط نمک، تبادل یونی، فیلتراسیون ژلی، هیدروکسی آپاتیت و روش های کروماتوگرافی تخلیص شده اند. انواع هیدرولازهای گلیکوزیدی تجاری با فعالیت بتاگالاتوزیدازی به صورت تجاری

برای استفاده در فرآوری مواد غذایی در *Kluyveromyces lactis* پرکاربردترین دسترس هستند (۹). بعضی از این آنزیم‌ها در تولید صنعتی GOS نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آنزیم‌های اصلی صنعتی از گونه‌های *Aspergillus* و *Kluyveromyces* تهیه می‌شوند که احتمالاً GOS را نشان می‌دهند.

جدول ۱- باکتری‌های تولیدکننده بتاگالاکتوزیدازها، بازده و روش تولید GOS توسط آنها.

منابع	بازده (درصد)/ روش تولید	سویه باکتری
۱۰	۴۱ درصد/ بیان ژن مولد آنزیم در <i>شریشیا کلی</i>	<i>Lactobacillus sakei</i>
۱۱	۲۹/۷ درصد/ تولید GOS با کنترل مقدار آب در میسل‌های معکوس	<i>Escherichia coli</i>
۱۲	۳۸/۵ درصد/ افزودن Mg^{2+} به محل باندشدن آنزیم بتاگالاکتوزیداز	<i>Lactobacillus acidophilus</i>
۱۳	۴۱ درصد/ تولید آنزیم نو ترکیب با سیستم افزایش بیان ژن	<i>Lactobacillus plantarum</i>
۱۴	۳۱/۲ درصد/ مقایسه آنزیم در بسترهای آلزینات سدیم، کیتوزان و ژلاتین	<i>Bacillus stearothermophilus</i>
۱۵	۳۷ درصد/ تولید آنزیم نو ترکیب با استفاده از بیان ژن‌ها در <i>شریشیا کلی</i>	<i>Lactobacillus fermentum</i>
۱۶	۳۲/۵ درصد/ تولید در فرمانتور ۵ لتری	<i>Bifidobacterium longum</i> BCRC 15708
۱۷	۴۷/۶ درصد/ تولید در سیستم پیچ با آنزیم خالص شده	<i>Bifidobacterium infantis</i>
۱۸	۴۱/۳ درصد/ تولید با استفاده از سلول باکتری	<i>Lactobacillus bulgaricus</i>

جدول ۲- منابع قارچی بتاگالاکتوزیدازها، بازده و روش تولید GOS توسط آنها.

منابع	بازده (درصد)/ روش تولید	سویه قارچی
۱۹	۴۴ درصد/ خالص سازی آنزیم با کروماتوگرافی	<i>Cryptococcus laurentii</i>
۲۰	۴۰ درصد/ تولید با آنزیم خالص شده	<i>Bullera singularis</i>
۲۱	۳۷ درصد/ تولید توسط آنزیم نو ترکیب تثبیت شده در آلزینات	<i>Aspergillus candidus</i>
۲۲	۷۶ درصد/ تولید با استفاده از سلول مرده	<i>Kluyveromyces lactis</i>
۲۳	۴۱/۸ درصد/ تولید توسط عصاره سلولی	<i>Kluyveromyces marxianus</i>
۲۴	۳۴ درصد/ تثبیت بتاگالاکتوزیداز بر روی حامل نامحلول Eupergit C	<i>Talaromyces thermophilus</i>
۲۵	۲۷ درصد/ آنزیم تثبیت شده بر روی غشای کتانی در یک راکتور	<i>Aspergillus oryzae</i>
۲۶	۵۰ درصد/ تولید آنزیم نو ترکیب با استفاده از بیان ژن‌ها در <i>شریشیا کلی</i>	<i>Aspergillus nidulans</i>
۲۷	۵۴ درصد/ تولید توسط کشت میکروب در محیط حاوی آهن و روی	<i>Sterigmatomyces elviae</i>

"امینی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

بتاگالاتکتوزیدازهای حاصل از گونه‌های مختلف، دارای ویژگی‌های بسیار مختلف برای ایجاد پیوندهای گلیکوزیدی هستند و بنابراین مخلوط‌های مختلف GOS را تولید می‌کنند. به عنوان مثال، بتاگالاتکتوزیداز به دست آمده از *K. lactis*، بیشتر GOS با پیوندهای $\beta(1 \rightarrow 6)$ را تولید می‌کند، بتاگالاتکتوزیداز اسپرژیلوس اوریزه بیشتر GOS با پیوندهای $\beta(1 \rightarrow 3)$ و $\beta(1 \rightarrow 6)$ را تولید می‌کند، در *Bacillus circulans* بتاگالاتکتوزیداز غالباً GOS با پیوندهای $\beta(1 \rightarrow 4)$ را تشکیل می‌دهد (۲۲). آنزیم‌های تولیدشده از بیفیدوباکترها و لاکتوباسیل‌ها با توجه به ایمن بودن و بی خطر بودن آنها در مواد غذایی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. پیش‌بینی می‌شود GOS تولیدشده توسط این بتاگالاتکتوزیدازها انتخاب‌پذیری بهتری برای رشد و فعالیت متابولیکی این جنس از باکتری‌ها در روده داشته باشد و از اینرو منجر به بهبود اثرات پری‌بیوتیکی شوند (۲۸). این آنزیم‌ها با توجه به اختصاصی بودن سوبسترا و تنظیم بیان ژن

بسیار متفاوت هستند. بتاگالاتکتوزیداز حاصل از بیفیدوباکتریوم بیفیدوم اولویت مشخصی برای سنتز پیوند $\beta(1 \rightarrow 6)$ بیش از پیوندهای $\beta(1 \rightarrow 4)$ نشان می‌دهد. بتاگالاتکتوزیدازهای لاکتوباسیل‌ها در فرآورده‌های تجاری مانند فرآوری شیر یا تهیه پنیر بسیار اهمیت دارند. مطالعات اخیر در مورد بتاگالاتکتوزیدازها از *Lactobacillus reuteri* — *Lactobacillus bulgaricus*، به ویژه با توجه به خصوصیات آنزیمی و مولکولی آنها نشان می‌دهد که این آنزیم‌ها برای تولید GOS بسیار مناسب هستند (۱۲).

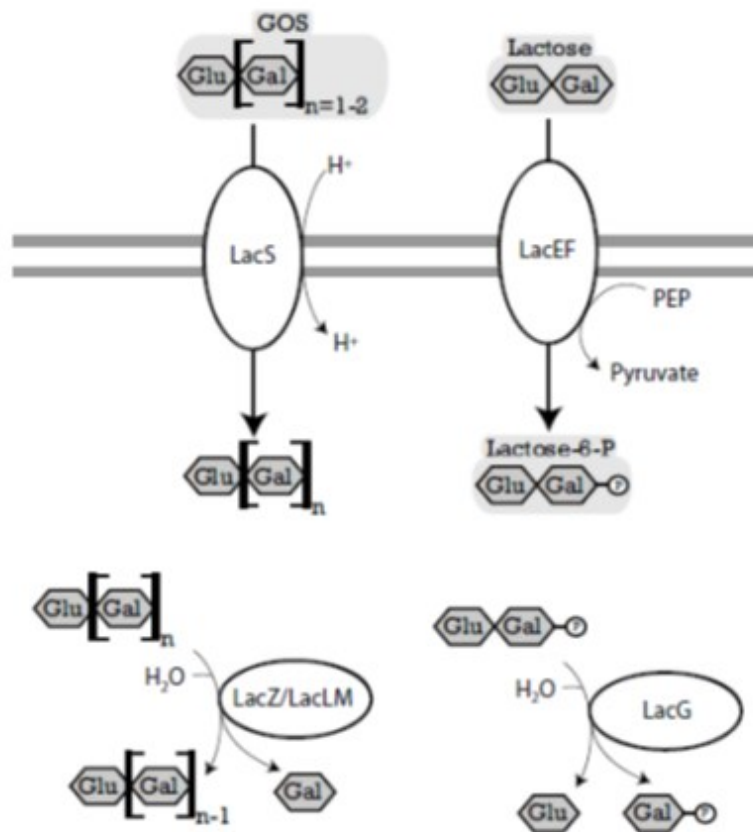
۲-۲ متابولیسم بتاگالاتکتوزیدازها و

بتاگالاتکتوالیگوساکاریدها

بتاگالاتکتوالیگوساکاریدها (β GOS) شامل واحدهای گالاتکتوز با اتصال $\beta(1 \rightarrow 2,3,4,6)$ با گالاتکتوز یا گلوکز ترمینال هستند. تنها بتاگالاتکتوالیگوساکاریدی که به طور گسترده در طبیعت وجود دارد لاکتوز است که در شیر پستانداران در غلظت‌های ۲ تا ۱۰ درصد وجود دارد (۲۹).

۱- انتقال و فسفوریلاسیون همزمان توسط سیستم فسفوترانسفراز LacEF و هیدرولیز توسط بتافسفوگالاکتوزیداز LacG یا ۲- انتقال توسط لاکتوز پرمه‌آز LacS و هیدرولیز توسط β گالاکتوزیداز (شکل ۳).

مطالعات اولیه در مورد متابولیسم β GOS توسط باکتری‌های اسید لاکتیک با هدف درک متابولیسم لاکتوز در کشت‌های استارتر لبنی انجام شده است. لاکتوباسیل‌ها، β GOS را توسط دو مسیر یا چرخه جایگزین متابولیزه می‌کنند:



شکل ۳- آنزیم‌های موثر در متابولیسم لاکتوز و بتاگالاکتوالیگوساکاریدها و موقعیت سلولی آنها در لاکتوباسیل‌ها.

LacS (در لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس)، دی و تری ساکاریدهای GOS را به داخل سیتوزول وارد می‌کند، LacZ (در لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس) و LacLM (در لاکتوباسیلوس پلانتراروم)، بتاگالاکتوزیدازهایی

"امینی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

هستند که بتادی گالاتوز انتهای را در بتادی گالاتوزیدها هیدرولیز می کنند، LacEF (در لاکتوباسیلوس کازئی)، یک سیستم لاکتوز فسفوترانسفراز است که لاکتوز را با انتقال یک فسفریل به بخش گالاتوز آن، به درون سیتوزول منتقل می کند، LacG (در لاکتوباسیلوس کازئی)، یک فسفوبتاگالاتوزیداز است که واحدهای انتهای را که به فسفوبتاگالاتوز متصل شده اند، هیدرولیز می کند (۳۰).

به طور معمول به صورت ساختاری در لاکتوباسیل ها بیان می شوند و اغلب در همان مکان های ژنتیکی که آنزیم های متابولیکی برای آلفاگالاتوزیدها وجود دارند، قرار می گیرند (۳۰).

۲-۳ عوامل مؤثر بر بازده تولید گالاتوالیگوساکاریدها

انتخاب فناوری مناسب برای فرآیند هیدرولیز لاکتوز یا تولید GOS به ماهیت سوبسترا و ویژگی های آنزیم بستگی دارد. مشخصه اصلی که انتخاب و کاربرد یک آنزیم مشخص را تعیین می کند، محدوده pH است. آنزیم های با pH بهینه اسیدی به طور عمده از قارچ ها تولید می شوند و برای فرآوری آب پنیر و پرمیت آب پنیر اسیدی مناسب هستند، در حالی که آنزیم های با pH خنثی از مخمرها و باکتری ها تولید می شوند و برای فرآوری شیر و آب پنیر شیرین مناسب هستند. بسته به منبع آنزیم، pH مخلوط واکنش در هنگام استفاده متفاوت است، به عنوان مثال

مسیر لاکتوز پرمه آز/ بتاگالاتوزیداز در لاکتوباسیل ها شایع تر است. ژن های متابولیکی β GOS اغلب روی پلاسמידها رمزگذاری می شوند. متابولیسم توسط مسیر LacEF/LacG چندین ویژگی متمایز از مسیر LacS/بتاگالاتوزیداز نشان می دهد: ۱- بتافسفوگالاتوزیداز LacG (طبقه بندی شده در خانواده GH1)، مخصوص لاکتوز است در حالی که در مسیر LacS/بتاگالاتوزیداز بتاگالاتوالیگوساکاریدهای بیشتری متابولیزه می شوند. ۲- ارگانیزم هایی که مسیر LacEF/LacG را بیان می کنند از گلوکز و گالاتوز به طور همزمان استفاده می کنند، در حالی که متابولیسم توسط مسیر LacS/LacLM یا LacZ منجر به متابولیسم ترجیحی گلوکز و دفع گالاتوز می شود. ۳- بیان LacEF/LacG توسط لاکتوز القا می شود و بیان ژن به صورت رونویسی با متابولیسم گالاتوز در ارتباط است. در مقابل، LacS و بتاگالاتوزیدازها

بتاگالاکتوزیداز/آسپرژیلوس/اوریزه در pH= ۵/۴ به بازده بهینه در تولید GOS می‌رسد. بیشترین بازده GOS به‌طور معمول هنگامی مشاهده می‌شود که واکنش ۴۵-۹۰ درصد تبدیل لاکتوز ادامه یابد (۲۹).

مطالعات مربوط به هیدرولازهای گلیکوزیدی مقاوم به حرارت نیز در جهت تولید GOS در دماهای بالا انجام شده است که می‌توان به بتاگلیکوزیدازهای حاصل از *L. bulgaricus* اشاره کرد. بتاگالاکتوزیدازهای فعال در سرما نیز توجه را به خود جلب کرده‌اند زیرا کاربرد آنها در فرآیندهای صنعتی هیدرولیز لاکتوز و سنتز الیگوساکاریدها می‌تواند خطر آلودگی به مزوفیل‌ها را کاهش دهد. بتاگالاکتوزیدازهای فعال در سرما از منابع مختلف مانند *Halorubrum lacusprofundi* جداسازی شده‌اند. اما تحقیقات نسبتاً کمی در مورد سنتز GOS در دماهای پایین توسط این آنزیم‌های سرمادوست انجام شده است (۳۰).

تنظیمات راکتور عامل مهم دیگری است که می‌تواند بر بازده و ترکیب مخلوط‌های

GOS اثر داشته باشد. در مقایسه با بتاگالاکتوزیدازهای محلول، بتاگالاکتوزیدازهای تثبیت شده ممکن است مزایایی از قبیل قابلیت تراکم سلولی بالاتر در بیوراکتورها، بهبود پایداری آنزیم، بازده بالا و جداسازی آسان‌تر محصولات را فراهم کنند. فعالیت بالاتر اما قابلیت تحمل حرارات پایین‌تر برای بتاگالاکتوزیداز تثبیت شده در نانوذرات کیتوزان نسبت به آنزیم باندشده به ماکروذرات نیز گزارش شده است (۳۱). از نظر پارامترهای فرآیندی، مقدار GOS تولیدشده توسط گالاکتوزیداز را می‌توان به روش‌های مختلف بهبود داد: (الف) افزایش غلظت واکنشگرها، (ب) کاهش فعالیت آبی واکنش، (ج) تغییر تعادل واکنش به سمت محصول نهایی با حذف محصول در محیط و (د) تغییر شرایط سنتز. داده‌های جمع‌آوری شده از تحقیقات نشان می‌دهد حداکثر بازده GOS تا حد زیادی تحت تأثیر غلظت اولیه لاکتوز است، تا زمانی که محدوده غلظت ۳۰ تا ۴۰ درصد (وزنی/حجمی) باشد. از آنجایی که حلالیت لاکتوز در دمای اتاق

نسبتاً کم است و با افزایش دما، افزایش می‌یابد، لذا به‌طور کلی درجه حرارت بالا مطلوب است. همچنین به نظر می‌رسد ترانس گالاتوزیلاسیون، در دمای بالا بهتر انجام می‌شود. افزایش دمای واکنش به‌طور قابل توجهی بازده تولید GOS را افزایش می‌دهد. با این حال، محققان دیگر بین درجه حرارت و بازده GOS در مورد برخی از میکروب‌ها، ارتباط کم یا ناچیزی را مشاهده کردند. بهینه‌سازی ساختار آنزیم نیز می‌تواند به افزایش حداکثری بازده تولید GOS از لاکتوز کمک کند. اصلاح آنزیم می‌تواند به‌صورت ژنتیکی یا شیمیایی باشد. تحقیقات نشان داده است فعالیت ترانس گالاتوزیلاسیونی بتاگالاتوزیداز حاصل از *B. Circulans* با اصلاح آنزیم با گلو تارآلدئید افزایش یافته است که احتمالاً به دلیل تغییرات ساختاری در نزدیکی محل فعال آنزیم است. جالب توجه است که گلو تارآلدئید به‌طور معمول به‌عنوان یک عامل اتصال‌دهنده متقاطع برای تثبیت آنزیمی کووالانسی نیز استفاده می‌شود. حذف محصول نهایی و یا بازدارنده‌ها از محیط واکنش یکی دیگر از

عوامل موثر بر بازده تولید است. راکتورهای مداوم مجهز به همزن به کمک فرآیندهای غشایی برای سنتز GOS استفاده شده‌اند. مزیت این فرآیند این است که محصول به‌طور مداوم (همراه با آب، مقداری سوبسترا و فرآورده‌های جانبی قندی ساده) از مخزن همزن‌دار با استفاده از اولترافیلتراسیون غشایی با جریان متقاطع خارج می‌شود، درحالی‌که آنزیم باقی می‌ماند. این ساختار همچنین امکان تغییر در زمان ماند را با هدف بهینه‌سازی بازده و ترکیب الیگوساکاریدها فراهم می‌کند (۳۲).

مخلوط‌های GOS تولیدشده توسط ترانس گالاتوزیلاسیون همیشه حاوی مقادیر قابل توجهی لاکتوز و مونوساکاریدهای بدون واکنش هستند. حذف کارآمد این ناخالصی‌های غیر GOS امکان تجاری‌سازی محصولات GOS با ارزش افزوده را فراهم می‌کند. جداسازی مونوساکاریدها در مقیاس وسیع به‌طور معمول توسط یک فرآیند کروماتوگرافی با رزین‌های تبادل یونی یا ذغال فعال انجام می‌شود با توجه به کروماتوگرافی

تبادل یونی، رزین‌های تبادل کاتیونی، بیشترین کاربرد را دارند زیرا بیشترین میل به مونوساکاریدها را نشان می‌دهند و بنابراین الیگوساکاریدها اولین ترکیباتی هستند که از ستون خارج می‌شوند. گزارش شده است که ذغال فعال میل ترکیبی بیشتری به الیگوساکاریدها نسبت به مونو و دی‌ساکاریدها دارد، به‌طوری‌که بازده تولید آنها را در سطح صنعتی اقتصادی‌تر می‌کند، زیرا احیاء مجدد می‌تواند بدون افت زیاد در سوبسترا انجام شود (۳۳).

۳- دستکاری‌های ژنتیکی برای افزایش تولید گالاکتوالیگوساکاریدها

مهندسی پروتئین یک روش قدرتمند برای بهبود بازده گالاکتوزیلاسیون است. همانطور که در بحث اصلاح آنزیم نیز بیان شد، جهش‌زایی نیز می‌تواند با تغییر در اسیدهای آمینه در جایگاه فعال آنزیم باعث افزایش عملکرد آن شود. همچنین پیشنهاد می‌شود به جای استفاده از آنزیم‌های آزاد یا تثبیت‌شده که محدودیت‌های خاص خود را دارند از بیان آنزیم روی سطح سلولی

میکروارگانیزم‌های مهندسی‌شده مانند *E. coli* و *Saccharomyces cerevisiae* استفاده شود (۳۴، ۱۴).

بتاگالاکتوزیدازهای نوترکیب دارای مزایای بیشتری نسبت به بتاگالاکتوزیدازهای بومی، از جمله بازده تولید بالا، خالص‌سازی آسان، پایداری و فعالیت بیشتر هستند. باکتری‌های *E. coli* و *S. cerevisiae* بیشتر برای تولید بتاگالاکتوزیدازهای نوترکیب استفاده می‌شوند. /شرشیا کلی دارای معایبی مانند تولید اندوتوکسین‌ها، مشکل در بیان پیوندهای دی‌سولفیدی و تشکیل استات است که دارای اثرات سمی است. در مقابل، باسیلوس سوبتیلیس مهندسی‌شده هیچگونه سموم آندو یا اگزو را تولید نمی‌کند. اما این باکتری معایبی از جمله تولید پروتئازها در مقادیر زیاد (که قادر به تخریب پروتئین‌ها هستند) و بی‌ثباتی پلاسמיד دارد. برخی مخمرها مانند *S. cerevisiae* و *Pichia pastoris* نیز برای تولید اشکال نوترکیب بتاگالاکتوزیداز استفاده شده‌اند. مخمر نسبت به باکتری‌ها دارای مزایایی از جمله

"ایمنی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

دامنه بهره‌وری بالاتر، تولید باندهای دی‌سولفیدی و تاخوردگی بهتر پروتئین است (۳۵).

۴- اثرات زیستی و سلامتی بخش گالاتوالیگوساکاریدها

به منظور استفاده ایمن از GOS در فرمول‌های شیرخشک نوزادان و غذاها، مطالعات بالینی بی‌شماری در نوزادان و بزرگسالان انجام شده است. نکته مهم این است که این مطالعات شامل نقاط پایانی بودند که اثرات GOS را بر فلور میکروبی مدفوع، فیزیولوژی دستگاه گوارش، سیستم ایمنی بدن و تحمل بدن ارزیابی می‌کردند. به طور کلی GOS غلظت اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه مدفوعی را در نوزادان و بزرگسالان افزایش داده، باعث بهبود قوام مدفوع در نوزادان، کاهش بروز درماتیت آتوپیک در نوزادان و کاهش علائم سندرم روده تحریک‌پذیر در بزرگسالان می‌شود (۳۶).

در ادامه به برخی از اثرات مهم زیستی (بیولوژیکی) گالاتوالیگوساکاریدها اشاره شده است.

۴-۱ تغییر فلور میکروبی روده

پری‌بیوتیک‌ها با فراهم کردن منابع انرژی برای میکروبیوتای روده‌ای، قادر به تنظیم ترکیب و عملکرد این میکروارگانیسم‌ها هستند. براساس آنالیز شیر انسان و غلظت بالای گالاتوز در آن، مخلوطی از ۱۰ درصد FOS با زنجیره بلند (اینولین) و ۹۰ درصد GOS مشابه شیر انسان برای استفاده در فرمول‌های شیرخشک نوزاد تهیه شده است. با تغذیه نوزادان نارس و زودرس با این مخلوط، افزایش در بیفیدوباکترها و لاکتوباسیل‌ها همراه با میکروبیوتای روده‌ای و ترکیبات مدفوع با شباهت بیشتر به نوزادان تغذیه‌شده با شیرمادر مشاهده می‌شود (۳۷).

پری‌بیوتیک‌ها همچنین قادر به تغییر محیط روده هستند. اسیدها اکثراً محصولات تخمیر پری‌بیوتیک‌ها هستند که باعث کاهش pH روده می‌شوند. نشان داده شده است که تغییر یک واحدی در pH روده از ۵/۶ به ۵/۵ می‌تواند به تغییر در ترکیب و جمعیت میکروبیوتای روده‌ای کمک کند. تغییر pH می‌تواند جمعیت گونه‌های حساس به اسید مانند

باکتریوئیدها را تغییر داده و تشکیل بوتیرات را توسط فیرمیکوت‌ها (firmicutes) تشدید کند که به عنوان سوخت سلول‌های اپیتلیال روده عمل می‌کنند. این فرآیند اثر بوتیروژنیک نامیده می‌شود. تخمیر GOS در روده بزرگ نیز پروپیونات تولید می‌کند، که در برابر سلول‌های سرطانی روده بزرگ خاصیت ضدالتهابی دارد (۳۸).

۲-۴ تعدیل و تنظیم سیستم ایمنی

فلور میکروبی روده در رشد و بلوغ سیستم ایمنی بدن بسیار اثرگذار است. رژیم غذایی یکی از مهمترین عواملی است که می‌تواند بر سیستم ایمنی دستگاه گوارش و همچنین ترکیب میکروبی روده و تشکیل محصولات متابولیک تأثیر بگذارد. بررسی تأثیر GOS بر ترکیبات میکروبی و عملکرد سیستم ایمنی (سلول‌های NK، فاگوسیتوز و سیتوکین‌ها) در افراد داوطلب سالم نشان می‌دهد مصرف GOS منجر به کاهش قابل توجهی در تعداد باکتری‌های بیماری‌زا (مانند باکتریوئیدها، *Clostridium perfringens*، گونه‌های دسولفوویبریو،

E. coli) و افزایش قابل توجهی در تعداد باکتری‌های مفید به خصوص بیفیدوباکترها می‌شود (۳۹).

۳-۴ کاهش آلرژی

در ۲ دهه گذشته در کشورهای توسعه یافته میزان شیوع بیماری‌های آلرژیک افزایش یافته است، و مطالعات نشان می‌دهد که امکان ارتباط بین فلور میکروبی روده و آلرژی وجود دارد. تعداد پایین سلول‌های بیفیدوباکتریایی با کاهش خاصیت چسبندگی در مدفوع نوزادان دارای آلرژی دیده شده است. این شیرخواران آلرژی غذایی به واسطه IgE دارنند. درماتیت آتوپیک (atopic dermatitis) یکی از علائم اولیه آلرژی در دوران نوزادی است و می‌تواند ۱۰ تا ۲۵ درصد کودکان در کشورهای غربی را تحت تأثیر قرار دهد. بر اساس مطالعات، GOS در ترکیب با مخلوطی از چهار باکتری پروبیوتیک (*L. rhamnosus* GG، *L. rhamnosus* BB99، *Bif. breve* LC705 و *Propionibacterium freudenreichii* ssp. *shermanii* JS به طور قابل توجهی

"ایمنی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

بیماری‌های مرتبط با IgE، آگزما و آگزمای
آتوپیک را کاهش می‌دهد (۴۰).

۴-۴ کاهش بیماری التهابی روده (IBD)

پاسخ‌های ایمنی نامناسب به فلور
میکروبی نرمال روده گاهی اوقات منجر
به شرایط التهابی مانند کولیت اولسراتیو
(ulcerative colitis) و بیماری کرون
(Crohn's disease) می‌شود. کاهش تعداد
بیفیدوباکترها و افزایش تعداد
ارگانیسم‌های دیگر مانند *E. coli* و
پیتواستریپتوکوکوسی‌ها در نمونه‌های مدفوع
و مخاط روده بزرگ در IBD مشاهده شده
است. به‌طور معمول، فلور نرمال میکروبی
روده با رهاسازی سیتوکین‌های تنظیم‌کننده
ایمنی IL-10 و TGF- β ارتباط دارد (۴۱).

۵-۴ فعالیت ضدبیماری‌زایی

مطالعات گوناگون نشان داده‌اند داشتن
پری‌بیوتیک در رژیم غذایی، با مهار اتصال
باکتری‌های بیماری‌زا یا سموم آنها به
اپیتلیوم روده، از روده در برابر عفونت و
التهاب محافظت می‌کند. پری‌بیوتیک
GOS حاوی ساختارهایی شبیه به غشای

میکروویلی است که با اتصال به
گیرنده‌های باکتریایی با آنها مقابله می‌کند
و از اینرو، از اتصال باکتری به اپیتلیوم
روده جلوگیری می‌کند. GOS موجود در
شیر انسان (با اتصالات آلفا)، دارای
ویژگی ضدچسبندگی بوده و قادر به
خنثی‌سازی سموم است. β GOS نیز می
تواند پیوند *E. coli* و *Salmonella*
enterica serovar Typhimurium را به
خط سلولی اپیتلیال HT-29 کاهش دهد
(۴۲).

۶-۴ کنترل انسداد انتروکولیت

آنتروکولیتیس نکروزه‌کننده (necrotizing
enterocolitis) یک شرایط نامناسب در
دستگاه گوارش است که در نوزادان نارس
دید می‌شود و در آن قسمت‌هایی از روده
تحت نکروز قرار می‌گیرند و می‌تواند به
عوارض بالا و مرگ و میر منجر شود. از
آنجایی که پری‌بیوتیک‌ها مانند FOS و
GOS می‌توانند رشد میکروبیوتای روده را
تحریک کنند (به‌عنوان مثال بیفیدوباکترها)
و باکتری‌های بیماری‌زا را در نوزادان
نارس کاهش دهند، احتمالا می‌توانند از
NEC جلوگیری کنند. علاوه‌براین

اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه می‌توانند با افزایش تخلیه معده و تحرک روده، تحمل تغذیه‌ای را بهبود بخشند (۴۳).

علاوه‌براین، GOS از تکثیر و رشد بیماری‌زها در طی این دوره آسیب‌پذیر محافظت می‌کند (۴۴).

۵- کاربردهای گالاکتوالیگوساکاریدها

۵-۱ شیرخشک نوزاد

GOS یک ماده ایده‌آل برای شیرخشک نوزاد است. GOS به‌طور طبیعی در شیر مادر وجود دارد و اثرات سلامتی بخش زیادی دارد. GOS در حال حاضر در بسیاری از فرمول‌های شیرخشک نوزادان زیر شش ماه و بالای ۶ ماه مورد استفاده قرار می‌گیرد و شربت GOS برای فرمول‌های شیرخشک نوزادان مناسب است. افزودن مقادیر پایین GOS (۰/۲۴ گرم در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر) به فرمول شیرخشک نوزادان می‌تواند باعث بهبود دفعات دفع، کاهش pH مدفوع و تحریک بیفیدوباکترها و لاکتوباسیل‌های روده‌ای همانند نوزادان تغذیه‌شده با شیر انسان شود. اثر بیفیدوژنیکی شناخته‌شده شیر انسان می‌تواند با استفاده از فقط GOS یا به همراه FOS، برای تقویت فرمول‌های شیرخشک بر پایه شیرگاو ایجاد شود.

۵-۲ شیرخشک مخصوص کودکان در

حال رشد

این شیرخشک برای کودکان یک ساله یا بالاتر مناسب است. ترکیب آن با شیر مادر یا فرمول نوزادان متفاوت است. کودکان در حال رشد باید تمام مواد مغذی را برای رشد و نمو خود از مواد غذایی به دست آورند. GOS غالباً در این نوع شیرخشک استفاده می‌شود. به‌دلیل پایه شیری GOS و استفاده از آن در فرمول نوزادان، منطقی‌ترین اقدام، افزودن آن به شیرخشک کودکان در حال رشد است (۴۵).

۵-۳ محصولات لبنی

GOS را می‌توان به راحتی به محصولات لبنی مانند ماست، دوغ و نوشیدنی‌های بر پایه لبنیات به‌دلیل حلالیت عالی آن اضافه کرد. GOS را می‌توان قبل یا بعد از تخمیر به ماست شیرین یا میوه‌ای اضافه کرد. به‌دلیل پایداری در شرایط اسیدی، GOS

"امینی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

می تواند از قبل با میوه مخلوط شود. پس از افزودن GOS، ساختار ماست کمی نرم تر و خامه ای تر به نظر می رسد. به علاوه، باکتری های ماست، GOS را نمی شکنند بنابراین تا زمان رسیدن به روده بزرگ به صورت غیرمتابولیزه باقی می ماند (۴۶).

۴-۵ نوشیدنی ها

به دلیل پایداری اسیدی و خاصیت تشکیل محلول های شفاف، GOS به راحتی به نوشیدنی هایی مانند آب میوه، نوشیدنی میوه ای، نوشیدنی های صبحانه و نوشابه ها افزوده می شود. GOS نسبت به حرارت و اسید پایدار است. کاهش میزان GOS تحت شرایط pH کم و دمای بالا مشاهده نشده است. از آنجایی که از نظر طعم بسیار خنثی است، هنگام افزودن GOS به نوشیدنی ها، طعم آنها تحت تأثیر قرار نمی گیرد (۴۵).

۵-۵ محصولات نانوائی

از GOS می توان در تولید نان و محصولات نانوائی که فیبر زیاد، قند کم و کالری کمی دارند، استفاده کرد. GOS

خصوصیات عملکردی مناسبی مانند کالری کم و ظرفیت نگهداری رطوبت بالا دارد که باعث می شود به عنوان یک جزء ایده آل برای محصولات نانوائی استفاده شود. علاوه بر این می تواند مزایای سلامتی بخش دیگری مانند رفع یبوست و بهبود جذب مواد معدنی را نیز به همراه داشته باشد (۴۵).

۶- خصوصیات فیزیکوشیمیایی و استاندارد

گالاتوالیگوساکاریدها

از آنجایی که GOS تجاری با درجه خوراکی به صورت مخلوط است، انتظار می رود خصوصیات فیزیکوشیمیایی و عملکردهای فیزیولوژیکی آن تا حدی به ترکیب مخلوط بستگی داشته باشد که به نوبه خود کاربرد مناسب آن را تعیین می کند. با افزایش اندازه مولکول، ویسکوزیته، شیرینی، حلالیت، اسمولاریته، توانایی تشکیل کریستال و واکنش پذیری (واکنش میلارد) آن کاهش پیدا می کند (۴۷). در جدول ۳ خلاصه ای از ویژگی های متداول GOS گزارش شده است.

جدول ۳- خصوصیات فیزیکوشیمیایی گالاکتوالیگوساکاریدها (۳۹).

حلالیت	ظاهر	ویسکوزیته	پایداری حرارتی	نقطه انجماد	خواص	شیرینی
محلول در آب، حدود ۸۰٪ (وزنی/وزنی)	شفاف/ بی‌رنگ	شبه به شربت ذرت با فروکتوز بالا	پایدار در $pH=7$ و دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه، در $pH=2$ دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه؛ در $pH=2$ و دمای ۳۷ درجه سانتیگراد به مدت چند ماه	نقطه انجماد مواد غذایی را کاهش می‌دهد	دارای ظرفیت نگهداری رطوبت بالا و جلوگیری از خشک شدن بیش از حد	به طور معمول ۰/۳ تا ۰/۶ برابر ساکارز

GOS در ایالات متحده به‌طور کلی به‌عنوان یک ماده ایمن (GRAS)، در اتحادیه اروپا یک ماده غذایی غیرنوین (non-novel) و در ژاپن به‌عنوان ماده غذایی سلامتی بخش (FOSHU) پذیرفته شده است زیرا از ترکیبات شیر انسان و ماست سنتی هستند و می‌توانند از لاکتوز توسط باکتری‌های موجود در روده تولید شوند (۳۹). تنها اثر نامطلوب GOS که تاکنون شناخته شده است، اسهال اسمزی زودگذر است که هنگام مصرف بیش از حد GOS مشابه لاکتوز یا الکل‌های قندی غیرجذب‌شده (در افراد غیرتحمل‌کننده لاکتوز) اتفاق می‌افتد. تخمین زده می‌شود مقداری از GOS که اسهال اسمزی را

تحریک نمی‌کند تقریباً ۳/۰ تا ۴/۰ گرم در کیلوگرم وزن بدن یا حدود ۲۰ گرم برای هر فرد باشد (۴۸). با وجود اینکه برخی از ادعاهای مربوط به تغذیه و سلامتی در مورد GOS توسط مؤسسه ایمنی مواد غذایی اروپا تایید شده است با این حال، ادعاهایی مانند تقویت سیستم ایمنی سالم در افراد سالمند، کمک به مدیریت علائم مرتبط با سندرم روده تحریک‌پذیر و تقویت ایمنی بدن یا تقویت سیستم دفاع از بدن هنوز بررسی نشده‌اند. مطالعات متابولیکی (در شرایط آزمایشگاهی و موجودات زنده) در مورد سمیت کوتاه‌مدت، سمیت طولانی‌مدت و مطالعات بالینی نوزادان و بزرگسالان انجام

"امینی بیدختی و شاکری، گالاتوالیگوساکاریدهای میکروبی: تولید، اثرات بیولوژیکی و کاربردها"

شده است و از مصرف بی خطر GOS در فرمول‌های نوزادان و غذاهای مشخص شده پشتیبانی می‌کند. علاوه بر این، استفاده از GOS در فرمول‌های شیرخشک نوزادان و غذاهای مشخص شده در ایالات متحده، اتحادیه اروپا، استرالیا و نیوزلند بی خطر تعیین شده است (۸).

References

فهرست منابع

1. FDA. (2016). Generally recognized as safe determination for the use of VITAGOS in infant formula and selected conventional foods. Center for food safety and applied nutrition. Available at: <https://www.fda.gov/media/100812/download>.
2. Zeuner B., Teze D., Muschiol J. and Meyer A.S. (2019). Synthesis of human milk oligosaccharides: protein engineering strategies for improved enzymatic transglycosylation. *Molecules*. 24, 2033: 1-22.
3. Macfarlane G.T.S., Furrie E. and Cummings, J.H. (2004). Chemotaxonomic analysis of bacterial populations colonizing the rectal mucosa in patients with ulcerative colitis. *Journal of Animal Sciences*. 81, 2535-2545.
4. Knol J., Scholens P., Kafka C., Steenbakkers J., Gro S., Helm K., Klarczy, M., Schoofer H., Böckler H.M. and Wells J. (2005). Colon microflora in infants fed formula with galacto- and fructo-oligosaccharide: more like breast-fed infants. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 40, 36-42.
5. Martins G.N., Ureta M.M., Tymczyszyn E.E., Castilho P.C. and Gomez-Zavaglia A. (2019). Technological aspects of the production of fructo and galacto-oligosaccharides: enzymatic synthesis and hydrolysis. *Frontiers in Nutrition*. 6:78.
6. Fukuda H., Hama S., Tamalampudi S. and Noda H. (2008). Whole-cell biocatalysts for biodiesel fuel production. *Trends in Biotechnology*. 26(12): 668-673.
7. Osman A. Tzortzis G. Rastall R.A. and Charalampopoulos D. (2012). BbgIV is an important bifidobacterium galactosidase for the synthesis of prebiotic galactooligosaccharides at high temperatures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60, 740-748.
8. Torres.D.P.M, Gonc M.P.F., alves, Teixeira J.A. and Rodrigues L.R. (2010). Galacto-oligosaccharides: production, properties, applications, and significance as prebiotics. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 9: 438-454.
9. Panesar P.S., Panesar R., Singh R.S., Kennedy J.F. and Kumar H. (2006). Microbial production, immobilization and applications of β -D-galactosidase. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 81, 530-43.
10. Iqbal S., Nguyen T., Nguyen H.A., Nguyen T.T., Maischberger T., Kittl R. and Haltrich D. (2011). Characterization of a heterodimeric GH2 β -galactosidase from *Lactobacillus sakei* Lb790 and formation of prebiotic galacto-oligosaccharides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 59, 3803-3811.
11. Chen C.W., Ou-Yang C. and Yeh C.W. (2003). Synthesis of galactooligosaccharides and transgalactosylation modelling in reverse micelles. *Enzyme and Microbial Technology*. 33, 497-507.
12. Nguyen T., Splechna B., Krasteva S., Kneifel W., Kulbe K.D., Divne C. and Haltrich D. (2007). Characterization and molecular cloning of a heterodimeric β -galactosidase from the probiotic strain *Lactobacillus acidophilus* R22. *FEMS Microbiology letters*. 269, 136-144.

13. Iqbal S., Nguyen T., Nguyen T.T., Maischberger T. and Haltrich D. (2010). β -galactosidase from *Lactobacillus plantarum* WCFS1: biochemical characterization and formation of prebiotic galacto-oligosaccharides. Carbohydrate Research. 345, 1408-1416.
14. Chen S., Wei D. and Hu Z. (2001). Synthesis of galacto-oligosaccharides by immobilized *Bacillus stearothermophilus*. Wei Sheng Wu Xue Bao. 41, 357-362.
15. Liu G.X., Kong J., Lu W.W., Kong W.T., Tian H., Tian X.Y. and Huo G.C. (2011). β -galactosidase with transglycosylation activity from *Lactobacillus fermentum* K4. Journal of Dairy Science. 94, 5811-5820.
16. Hsu C.A., Lee S.L. and Chou C.C. (2007). Enzymatic production of galactooligosaccharides by β -galactosidase from *Bifidobacterium longum* BCRC 15708. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 55, 2225-2230.
17. Rabiou B.A., Jay A.J., Gibson G.R. and Rastall R.A. (2001). Synthesis and fermentation properties of novel galacto-oligosaccharides by β -galactosidases from *Bifidobacterium* species. Journal of Applied and Environmental Microbiology. 67, 2526-2530.
18. Fara A., Sabater C., Palacios J., Requena T., Montilla A. and Zarate G. (2020). Prebiotic galactooligosaccharides production from lactose and lactulose by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* CRL450. Food and Function. 11, 5875-5886.
19. Ohtsuka K., Tanoh A., Ozawa O., Kanematsu T., Uchida T. and Shinke R. (1990). Purification and properties of a β -galactosidase with high galactosyl transfer activity from *Cryptococcus laurentii* OKN-4. Journal of Fermentation and Bioengineering. 70, 301-307.
20. Shin H., Park J. and Yang J. (1998). Continuous production of galacto-oligosaccharides from lactose by *Bullera singularis* β -galactosidase immobilized in chitosan beads. Korean Journal of Applied Microbiology and Biotechnology. 33, 787-792.
21. Zheng P., Yu H., Sun Z., Zhang W., Fan Y. and Xu Y. (2006). Production of galacto-oligosaccharides by immobilized beta-galactosidase from *Aspergillus candidus*. Biotechnology Journal. 1, 1464-1470.
22. Rodriguez-Colinas B., de Abreu M.A., Fernandez-Arrojo L., de Beer R., Poveda A., Jimenez-Barbero J., Haltrich D., Ballesteros Olmo A.O., Fernandez-Lobato M. and Plou F.J. (2011). Production of galacto-oligosaccharides by the β -galactosidase from *Kluyveromyces lactis*: Comparative analysis of permeabilized cells versus soluble enzyme. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 59, 10477-10484.
23. Padilla B., Ruiz-Matute A. I., Belloch C., Cardelle-Cobas A., Corzo N. and Manzanares P. (2012). Evaluation of oligosaccharide synthesis from lactose and lactulose using β -galactosidases from *Kluyveromyces* isolated from artisanal cheeses. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 60, 5134-5141.
24. Nakkharat P. and Haltrich D. (2007). Beta-galactosidase from *Talaromyces thermophilus* immobilized on to Eupergit C for production of galacto-oligosaccharides during lactose hydrolysis in batch and packed-bed reactor. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 23, 759-764.
25. Albayrak N. and Yang S.T. (2002). Production of galacto-oligosaccharides from lactose by *Aspergillus oryzae* beta-galactosidase immobilized on cotton cloth. Journal of Applied Biotechnology and Bioengineering. 77, 8-19.
26. Nakai H., Baumann M.J., Petersen B.O., Westphal Y., Hachem M.A., Dilokpimol A., Duss J., Schols H.A. and Svensson B. (2010). *Aspergillus nidulans* β -galactosidase of glycoside hydrolase family 36 catalyses the formation of β -galacto-oligosaccharides by transglycosylation. FEBS Journal. 277, 3538-3551.
27. Onishi N. and Tanaka T. (1998). Galacto-oligosaccharide production using a recycling cell culture of *Sterigmatomyces elviae* CBS8119. Journal of Applied Microbiology. 26, 136-139.
28. Kittibunchakul S., van Leeuwen S.S., Dijkhuizen L., Haltrich D. and Nguyen T. (2020). Structural comparison of different galacto-oligosaccharide mixtures formed by β -galactosidases from lactic acid bacteria and bifidobacteria. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 68, 4437-4446.

29. Cardelle-Cobas A., Martinez-Villaluenga C., Villamiel M., Olano A. and Corzo N. (2008). Synthesis of oligosaccharides derived from lactulose and pectinex ultra SP-L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56, 3328-3333.
30. Ganzle C. and Schwab C. (2012). Lactic acid bacteria fermentation of human milk oligosaccharide components, human milk oligosaccharides and galacto oligosaccharides. *FEMS Microbiology letters*. 315, 141-148.
31. Karan R., Capes M.D., DasSarma P. and DasSarma S. (2013). Cloning, overexpression, purification and characterization of a polyextremophilic β -galactosidase from the Antarctic haloarchaeon *Halorubrum lacusprofundi*. *BMC Biotechnology*. 13, 3.
32. Klein M.P., Nunes M.R., Rodrigues R.C., Benvenuti E.V., Costa T.M.H., Hertz P.F. and Ninow J.L. (2012). Effect of the support size on the properties of β -galactosidase immobilized on chitosan: advantages and disadvantages of macro and nanoparticles. *Journal of Biomacromolecules*. 13, 2456-2464.
33. Czermak P., Ebrahimi M., Grau K., Netz S., Sawatzki G. and Pfromm P.H. (2004). Membrane-assisted enzymatic production of galactosyl-oligosaccharides from lactose in a continuous process. *Journal of Membrane Science*. 232(1-2):85-91.
34. Benkoulouche M., Faure R., Remaud-Simeon M., Moulis C. and Andre I. (2019). Harnessing glycoenzyme engineering for synthesis of bioactive oligosaccharides. *Interface Focus*. 9: 20180069.
35. Hernandez O., Ruiz-Matute A.I., Olano A., Moreno F.J. and Sanz M.L. (2009). Comparison of fractionation techniques to obtain prebiotic galactooligosaccharides. *International Dairy Journal*. 19, 531-536.
36. Davani-Davari D., Negahdaripour M., Karimzadeh I., Seifan M., Mohkam M., Masoumi S.J., Berenjian A. and Ghasemi Y. (2019). Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods*. 8, 92: 1-27.
37. Walton G.E., van den Heuvel E.G., Kusters M.H., Rastall R.A., Tuohy K.M. and Gibson G.R. (2012). A randomised crossover study investigating the effects of galacto oligosaccharides on the fecal microbiota in men and women over 50 years of age. *British Journal of Nutrition*. 107, 1466-1475.
38. Moro G., Arslanoglu S., Stahl B., Jelinek J., Wahn U. and Boehm G. (2006). A mixture of prebiotic oligosaccharides reduces the incidence of atopic dermatitis during the first six months of age. *Archives of Disease in Childhood*. 91, 814-819.
39. Nurmi J., Puolakkainen P. and Rautonen N. (2005). *Bifidobacterium lactis* spp. 420 up-regulates cyclooxygenase (Cox) 1 and down-regulates COX-2 gene expression in a Caco-2 cell culture model. *Nutrition Journal*. 51, 83-92.
40. Triantis V., Bode L. and van Neerven R.J.J. (2018). Immunological effects of human milk oligosaccharides. *Frontiers in Pediatrics*. 6, 190.
41. Kukkonen K., Savilahti E., Haahtela T., Juntunen-Backman K., Korpela R., Poussa T., Turre T. and Kuitunen M. (2007). Probiotics and prebiotic galactooligosaccharides in the prevention of allergic disease: a randomised, double blind, placebo-controlled trial. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 119, 192-8.
42. Kelly D., Conway S. and Aminov R. (2005). Commensal gut bacteria: mechanisms of immune modulation. *Journal of Trends in Immunology*. 26, 326-33.
43. Tzortzis G., Goulas A.K. and Gibson G.R. (2005). Synthesis of prebiotic galactooligosaccharides using whole cells of a novel strain, *Bifidobacterium bifidum* NCIMB 41171. *Applied Microbiology Biotechnology*. 68, 412-6.
44. Patel R.M. and Denning P.W. (2013). Therapeutic use of prebiotics, probiotics, and postbiotics to prevent necrotizing enterocolitis: What is the current evidence?. *Journal of Clinics in Perinatology*. 40, 11-25.
45. Boehm G. and Moro G. (2008). Structural and functional aspects of prebiotics used in infant nutrition. *Journal of Nutrition*. 138, 1818-28.

46. Sangwan V., Tomar S.K., Singh R.R.B., Singh A.K. and Ali B. (2011). Galactooligosaccharides: novel components of designer foods. *Journal of Food Science*. 76, R103- R111.
47. Curda L., Rudolfova J., Stetina J. and Dryak B. (2006). Dried buttermilk containing galactooligosaccharides: process layout and its verification. *Journal of Food Engineering*. 77, 468-471.
48. Crittenden R.G. and Playne M.J. (2002). Purification of food-grade oligosaccharides using immobilised cells of *Zymomonas mobilis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 58(3): 297-302.

Microbial Galacto-oligosaccharides: Production, Biological Effects and Applications

Ali Amini Beidokhti¹, Monir-sadat Shakeri^{2*}

1- Ph.D. student of Food Biotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Department of Food Biotechnology, Mashhad, Iran.

2- Research Institute of Food Science and Technology, Department of Food Biotechnology, Mashhad, Iran.
m.shakeri@rifst.ac.ir

Abstract

Galacto-oligosaccharides (GOS) are carbohydrate-based nutrients that can have health-related physiological activities, including production of short-chain fatty acids (SCFAs), energy transfer in colonocytes, and cell growth and differentiation of intestinal epithelial cells. GOSs have been identified as prebiotic compounds in animals and humans and have been used successfully in a wide range of food products such as bakery products, infant formula, dairy products and beverages. GOSs can be synthesized and produced enzymatically from soybean seed and lactose from cow's milk. The choice of the appropriate technology for the process of lactose hydrolysis or GOS production depends on the nature of the substrate and the properties of the enzyme. Reactor settings are another important factor that can affect the efficiency and composition of GOS mixtures. In terms of process parameters, the amount of GOS produced by galactosidase can be improved in different ways: (a) increasing the concentration of reactants, (b) reducing the water activity of the reaction, (c) changing the reaction equilibrium towards the final product by removing product in the environment and (d) change the synthesis conditions. In this paper, various aspects related to the production of GOS, including their types and the function of its beneficial compounds, their role as prebiotics and its industrial production through microbial methods, as well as strategies to improve the production process is discussed. The physical, chemical, physiological effects and applications of GOS are also summarized.

Keywords: Galacto-Oligosaccharides (GOS), Prebiotics, Enzymatic Synthesis, Infant Formula.