فرآوری پنیر، فلور میکروبی و مسیرهای بیوشیمیایی مولد ترکیبات فرار طعم زا در پنیر

محمد امین منصف اصفهانی[۱]

۱. دانشجوی دکتری صنایع غذایی گرایش زیست فناوری ، گروه علوم و صنایع غذایی واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مرجانه صداقتی[۲]

۲ . استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، واحد تهران شمال،دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

پنیر دارای تاریخچه‌ای طولانی است و این محصول لبنی تخمیر شده به‌طور طبیعی، طیف گسترده‌ای از طعم‌های منحصر به فرد را در بر دارد. میکروارگانیسم‌ها در انواع مختلف پنیر، جزء اساسی بوده و نقش‌های مهمی در تولید و رسیدن پنیر ایفا می‌کنند. با این حال، پنیرهای کشورهای مختلف همچنان به‌صورت دستی تهیه می‌شوند، فناوری‌های فرآوری متفاوتی دارند، فلور میکروبی پیچیده داشته و طعم پنیر به‌شدت متغیر است. بنابراین، مطالعه فناوری عمومی فرآوری، ارتباط بین فلور میکروبی و تشکیل طعم در پنیر، در شناسایی عوامل موثر در ایجاد آروما در پنیر موثر است. این مقاله پیشرفت‌های پژوهشی در زمینه فناوری عمومی فرآوری و نقاط کنترلی کلیدی در تولید پنیر طبیعی، مسیرهای بیوشیمیایی تولید ترکیبات طعم زا در پنیرها، تنوع و نقش مخمرها در پنیر را بررسی می‌کند. در این مقاله فناوری‌های مدرن شناسایی، تکامل ساختار میکروبی، تحول جمعیت میکروبی و ارتباط آن با طعم در پنیرهای کشورهای مختلف تحلیل شده است. این امر اهمیت یافتن ارتباط فلور میکروبی با مکانیسم های موثر در عطر و طعم را نشان می دهد.

واژگان کلیدی :پنیر، ترکیبات طعم، فرآوری، مخمر، مسیرهای بیوشیمیایی

مقدمه

پنیر یکی از محصولات لبنی تازه یا تخمیر شده سنتی با قدمتی طولانی است. تولید پنیر حدود ۸۰۰۰ سال پیش در کشورهای مختلف آسیای غربی آغاز شد(Sandine & Elliker, ۱۹۷۰)و به‌طور سنتی توسط مردم عشایری مغول، قزاق و سایر اقوام شمال غربی چین به نام "جوش‌های شیر" شناخته می‌شود (Zheng et al., ۲۰۲۱)پنیر از طریق انعقاد شیر، خامه یا دوغ کم‌چرب گاو، بز یا ترکیبی از این مواد تولید می‌شود و سپس آب‌پنیر از آن جدا می‌گردد. به‌طور کلی، در فرآیند تولید پنیر، مقدار مناسبی از استارتر باکتری‌های اسید لاکتیک (LAB) به همراه مایه پنیر به شیر اضافه می‌شود. تخمیر توسط این مواد باعث تغییر پروتئین‌های شیر (عمدتاً کازئین)، کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها می‌شود. در مرحله بعد، آب‌پنیر از محصول جدا شده و ماده باقی‌مانده برای مدت معینی رسیده می‌شود. در برخی انواع پنیر، ممکن است از باکتری‌های اسید لاکتیک استفاده نشود .محصولات لبنی تخمیر شده با ارزش تغذیه‌ای بالا به‌عنوان "مروارید تاج صنعت لبنیات" در نظر گرفته می‌شوند (Arruda et al., ۲۰۱۳). با بهبود کیفیت زندگی، نیازها و تقاضاهای غذایی مردم از نظر کمیت و کیفیت در حال تغییر است. علاوه بر این، محتوای لاکتوز در پنیر پایین است و به همین دلیل مصرف آن برای افرادی که عدم تحمل لاکتوز دارند، بسیار مناسب است (Monti et al., ۲۰۱۷) . در حال حاضر، نزدیک به ۱۳۰ کشور و منطقه انواع مختلف پنیر تولید می‌کنند و مجموع تولید جهانی پنیر حدود ۲,۰۰۰ × ۱۰^4 تن است. کشورهای اتحادیه اروپا، از جمله هلند و آلمان، بزرگترین صادرکنندگان پنیر در جهان هستند. از دیدگاه توسعه صنعت لبنی جهانی، پنیر یک محصول لبنی بسیار مهم محسوب می‌شود، اما هنوز در چین به‌عنوان یک صنعت مستقل توسعه نیافته است. در حال حاضر، تولید پنیر در کشورهای در حال توسعه همچنان در مراحل ابتدایی قرار دارد و بسیاری از مردم این کشورها با پنیر آشنا نیستند. همزمان، شرکت‌های فرآوری لبنیات با محدودیت‌های مالی و فناوری مواجه‌اند و تاکنون هیچ نوع پنیری به‌طور گسترده مورد پذیرش قرار نگرفته است. بنابراین، مطالعه پنیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Monti et al., ۲۰۱۷).

(Arruda et al., ۲۰۱۳)با توسعه صنعت لبنیات در کشورهای مختلف، رشد پرشتاب صنعت پنیر در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور جهانی، فرآیند تولید پنیر که بتواند در هر کشوری مورد استفاده قرار گیرد هنوز به‌عنوان یک فرآیند معتبر و استاندارد وجود ندارد. این امر به دلیل تفاوت‌های منطقه‌ای، روش‌های تولید و مواد اولیه موجود است. اولین روش تولید پنیر در جهان حمل شیر در معده حیوانات بود، که طی مهاجرت با نوسانات مداوم به پنیر تخمیر می‌شد. تولید پنیر در مناطق مختلف متفاوت است. برای مثال، در تولید پنیر چدار در جنوب‌غربی انگلستان، ماده اولیه استریل و خنک شده و سپس عامل تخمیر، کلرید کلسیم و مایه پنیر به آن اضافه می‌شود تا دلمه ایجاد شود (Lawrence et al., ۲۰۰٤). پس از ۳۰–۴۰ دقیقه، دلمه به قطعات ۵ میلی‌متری برش داده می‌شود، برای ۱۵ دقیقه به حال خود رها می‌شود و سپس برای ۵–۱۰ دقیقه دیگر هم زده می‌شود. دلمه بعداً برگردانده و انباشته شده، خرد و نمک‌زده می‌شود، سپس قالب‌گیری و پرس می‌شود. پنیر پرس‌شده پس از تعویض پارچه به اتاق تخمیر منتقل شده و منتظر تخمیر و رسیدن می شود (Banks et al., ۱۹۸۹).

در مقابل، شیر مورد استفاده برای تولید پنیر پارمسان در دو مرحله جداگانه جمع‌آوری می‌شود: شیر شب قبل و شیر تازه (جمع‌آوری شده صبح روز بعد) در یک تانکر مسی مخلوط می‌شوند. وقتی دما به ۵۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، پنیر با گاز پوشانده می‌شود و مراحل برش، قالب‌گیری، پرس و سپس خیساندن در آب‌نمک برای ۳ هفته انجام می‌گیرد (D'Incecco et al., ۲۰۲۰). حدود ۵ کیلوگرم آب در طول رسیدن تبخیر می‌شود. از سوی دیگر، پنیرهای نرم و نیمه‌سخت، مانند پنیر فتا، برای مدت کوتاهی در آب‌نمک خیسانده می‌شوند (Marino et al., ۲۰۱۷) در تولید پنیر قزاقی، فرآیند جمع‌آوری شیر مشابه پنیر پارمسان است، با این تفاوت که ممکن است ماست قدیمی به‌عنوان استارتر به کیسه چرمی بز اضافه شود یا نشود و سپس

به ماست تخمیر شود (Zheng et al., ۲۰۲۱). این ماست سپس با هم‌زدن جوشانده می‌شود تا آب آن تبخیر شود. دلمه باقی‌مانده در کیسه‌ای از جنس کرباس قرار گرفته و در فضای باز آویزان می‌شود تا رطوبت بیشتر از آن خارج شده و به پنیر تازه جامد تبدیل شود. این پنیر تازه به قطعات کوچک برش داده می‌شود یا به شکل پای در می‌آید و در نهایت به مدت ۳۰–۹۰ روز روی تخته‌ای از جنس بامبو برای رسیدن خودبه‌خود قرار می‌گیرد (Zheng, Liu, et al., ۲۰۱۸).

پذیرش پنیر توسط مصرف‌کننده نهایی به‌طور عمده به ویژگی‌های حسی خاصی مانند طعم و عطر آن بستگی دارد. ویژگی‌های منحصر به‌فرد و کیفیت خاص پنیر کاملاً به ترکیبات و مولکول‌های مختلفی که در آن وجود دارد وابسته است، از جمله اسیدهای چرب، آمین‌ها، کتون‌ها، اسیدهای آمینه آزاد، الکل‌ها، آلدئیدها، لاکتون‌ها و ترکیبات گوگردی (Califano & Bevilacqua, ۲۰۰۰) با این حال، حضور این مولکول‌ها با عواملی در فرآیند تولید پنیر مرتبط است که شامل شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های منطقه‌ای، موقعیت جغرافیایی، فناوری‌های مورد استفاده، میکروبیوتای مرتبط با پنیر و شرایط رسیدن آن می‌شود (Pino et al., ۲۰۱۸) چهار مسیر اصلی شامل گلیکولیز، استفاده از سیترات، پروتئولیز و لیپولیز در تشکیل طعم پنیر نقش دارند علاوه بر باکتری‌ها و کپک‌های موجود در پنیر، مطالعات نشان داده‌اند که *Geotrichum candidum* دارای ویژگی‌های بیانی مرتبط با متابولیسم کربوهیدرات، لیپید و اسید آمینه است، در حالی که *Debaromyces hansenii* در متابولیسم سایر اسیدهای آمینه دخالت دارد(Monnet et al., ۲۰۱٦). همچنین مخمرها اسیدهای آمینه را به کتو اسیدهای متناظر و NH^3 دآمین می‌کنند که باعث افزایش pH پنیر می‌شود (El Sheikha & Montet, ۲۰۱٤). تولید این ترکیبات طعمی به آنزیم‌های تخریب‌کننده شیر توسط هر سویه تخمیرکننده و مکمل مسیرهای متابولیکی میان سویه‌ها بستگی دارد. این ترکیبات طعمی می‌توانند کیفیت و تنوع طعم پنیر را افزایش دهند. از این رو، تنوع عملکردی که ارتباط نزدیکی با پیچیدگی میکروبیوتای پنیر دارد – در تنوع ترکیبات طعمی تولید شده در طی رسیدن بسیار مهم است (Irlinger & Mounier, ۲۰۰۹). پنیرهای سنتی تخمیر شده دارای جوامع میکروبی پیچیده، تخمیر چندسویه‌ای، مکانیسم‌های متابولیکی پیچیده و پروفایل‌های طعمی متفاوت هستند. بنابراین، میکروب‌ها نقش محوری در تشکیل طعم پنیر ایفا می‌کنند. این مقاله مروری تلاش دارد تا دیدگاه جامعی درباره دینامیک میکروبیوتای پنیر در فرآیندها و فناوری‌های مختلف تولید پنیر ارائه دهد و مسیرهای بیوشیمیایی اصلی تشکیل طعم پنیر را با تمرکز خاص بر نقش مخمرها بررسی کند. علاوه بر این، این مرور پیشرفت‌های مهمی را در درک اثرات تکنیک‌های مختلف تولید پنیر و تنوع میکروبی بر طعم و کیفیت پنیر ارائه می‌دهد.

فرآیند کلی تخمیر پنیر

ویژگی‌های انواع مختلف پنیر

بیش از ۲,۰۰۰ نوع پنیر مختلف در جهان وجود دارد که بیش از ۴۰۰ نوع از آن‌ها شهرت بیشتری دارند (Fox et al., ۱۹۹۳). بسته به محتوای رطوبت، روش‌های نگهداری و رسیدن پنیر می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد (جدول ۱). پنیرهای بسیار سخت مانند پارمسان و رومانو از دلمه‌های بسیار سخت تولید می‌شوند. این نوع پنیرها دارای رطوبت پایین هستند، از شیر کم‌چرب تولید می‌شوند و به آرامی (در طی ۱–۲ سال) تحت تأثیر باکتری‌ها رسیده می‌شوند. در مورد پنیرهای سخت مانند چدار و پنیر قزاقی، دلمه پیش از نمک‌زنی و پرس شدن اسیدی می‌شود و مدت رسیدن آن‌ها ۳–۱۲ ماه است. در حالی که برای پنیرهای نیمه‌سخت، این دوره ۲–۳ ماه می‌باشد. پنیرهای نیمه‌نرم، مانند پنیر لیمبرگر و پنیر آبی، با استفاده از باکتری‌ها (*Brevibacterium*) و/یا کپک‌ها (*Penicillium*) رسیده می‌شوند. در طول فرآیند رسیدن، کپک ممکن است عمدتاً بر سطح برخی پنیرها (مانند کاممبرت) رشد کند، اما در زیر سطح پنیرهایی مانند پنیر آبی گسترش یابد.

جدول ۱ | طبقه‌بندی و انواع اصلی پنیر

کشور مبدأ	طعم پنیر	نوع اصلی پنیر	میکروارگانیسم‌های بالغ	محتوای رطوبت% /	ساختار فرم
ایتالیا	طعم میوه‌ای و نمک	پارمزان، رومانو	باکتریایی	۳۵–۲۵	پنیر خیلی سفت
سوئیس	طعم میوه‌ای و طعم پایدار	امانوئل	باکتریایی: حفره اتمسفری		
بریتانیا	معطر، غنی و رایحه نرم	گروير	باکتریایی: بدون حفره		
بریتانیا	طعم گردو	چدار	باکتریایی: بدون حفره	۴۵–۳۵	پنیر سفت
هلند	طعم کاراملی و خامه‌ای	گودا، ادام	باکتریایی: حفره‌های کوچک هوا	۵۰–۴۵	پنیر نیمه‌سفت
آلمان	طعم تند	آجری	باکتریایی: بدون حفره		
فرانسه، دانمارک	رایحه قوی و طعم تند	روکفورت، آبی	کپکی	۵۵–۴۲	پنیر نیمه‌نرم
فرانسه	ملایم	کاممبرت	کپکی		
آمریکا	کمی ترش	کاتیج، خامه‌ای	بالغ نشده	۸۰–۵۵	پنیر نرم

ارزش‌های پررنگ نشان‌دهنده مقادیر سرستون و محتوای رطوبت هستند.

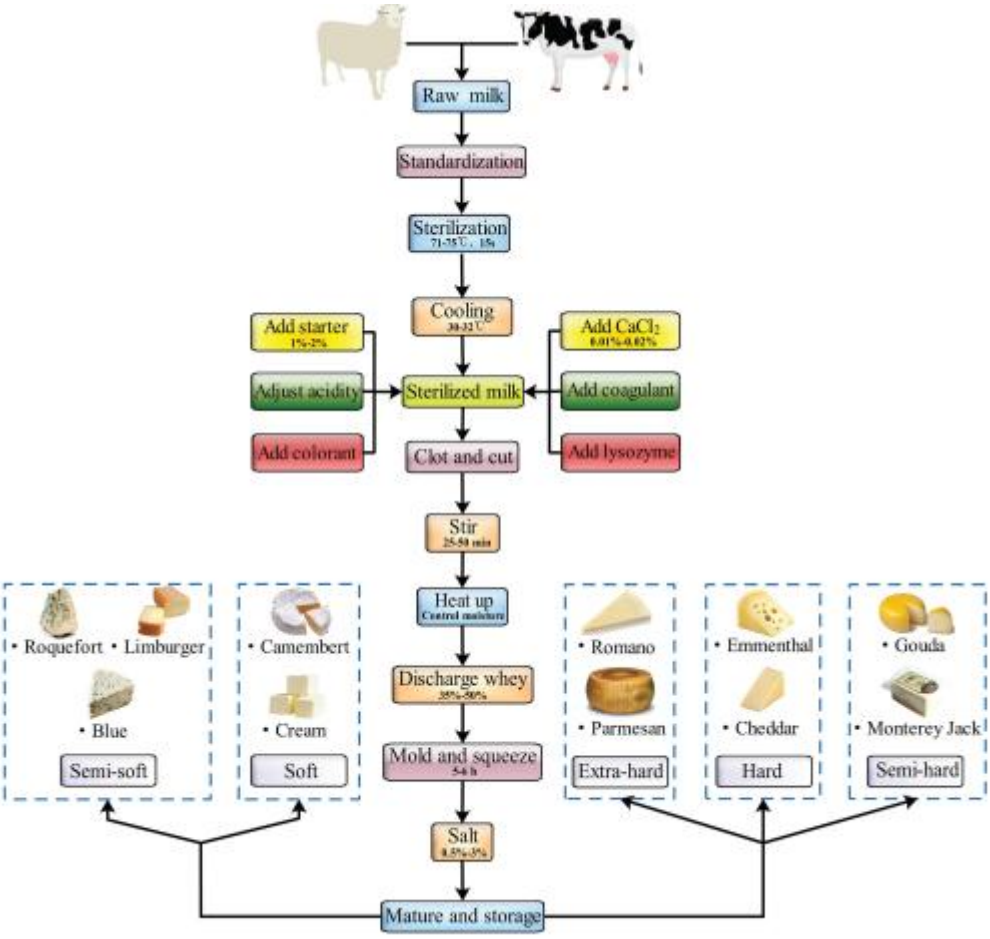
شیر با بار باکتریایی بالا ممکن است حاوی باکتری‌های لاکتوزتخمیرکننده باشد که می‌توانند بر فرآیند اسیدی شدن شیر در طی ساخت پنیر تأثیر بگذارند. عدم کنترل دقیق پنیرساز بر سرعت و میزان اسیدی شدن شیر می‌تواند یکی از عوامل مهم موفقیت در تولید پنیر را مختل کند. پاستوریزه‌کردن شیر بیشتر باکتری‌های تخمیرکننده لاکتوز را از بین می‌برد، که این امر کنترل دقیق‌تر بر فرآیند اسیدی‌سازی را امکان‌پذیر می‌کند و در نتیجه کیفیت پنیر را بهبود می‌بخشد. بنابراین، افزودن استارتر برای تخمیر صحیح ضروری است. برای برخی از انواع پنیرها، به‌ویژه چدار، پارمسان و گودای کهنه، معمولاً باکتری‌های کمکی (اغلب گونه‌های لاکتوباسیلوس) به شیر اضافه می‌شوند تا طعم‌های منحصر به‌فرد ایجاد کنند. این افزودنی‌ها ممکن است شامل گونه‌های باکتریایی باشند که باکتری‌های نامطلوب را در پنیر مهار کنند و همچنین ممکن است اثرات پروبیوتیکی داشته باشند. پنیرهای رسیده با کپک (مانند کاممبرت) و پنیرهای نرم رسیده سطحی (مانند لیمبرگر) به دلیل رطوبت بالای خود و از دست دادن اسیدیته در طول رسیدن، برای رشد عوامل بیماری‌زا محیط مساعدی فراهم می‌کنند. ویژگی‌هایی مانند یکنواختی، سختی و شکل پنیر به عوامل اساسی خاصی بستگی دارند که تضمین می‌کنند پنیر شرایط مطلوبی برای رسیدن داشته باشد و ویژگی‌های اساسی ایده‌آل خود را توسعه دهد. نرمی پنیر با محتوای آب بیشتر، چربی بالاتر و توانایی بیشتر در تجزیه پروتئین مرتبط است، در حالی که پنیرهای سخت دارای ساختاری محکم‌تر هستند. تنوع پنیرهایی که می‌توان تهیه کرد به ویژگی‌های شیر خام، روش آماده‌سازی لخته تازه و میکروارگانیسم‌های موجود در شیر یا لخته‌ها بستگی دارد. این عوامل به طور مستقیم با طعم و ویژگی‌های منحصر به فردی که در طول فرآیند تولید و رسیدن پنیر ایجاد می‌شوند، مرتبط هستند. نوع میکروب‌های دخیل در تولید یا رسیدن پنیر به میکروب‌های تلقیح شده، شرایط تولید پنیر و عوامل محیطی بستگی دارد.

فرآیندهای تخمیر پنیر

برای قرن‌ها، شیر مورد استفاده در تولید بسیاری از انواع پنیرها پیش از انعقاد به‌طور خاصی آماده‌سازی نمی‌شد. به‌ویژه در تولید پنیرهای سنتی و دست‌ساز، از شیر خام استفاده می‌شد (Kelly et al., ۲۰۰۸)پنیرها به‌طور سنتی با تبدیل شیر مایع به توده‌ای نیمه‌جامد با استفاده از عامل منعقدکننده مانند مایه پنیر، اسید، حرارت همراه با اسید، یا ترکیبی از این‌ها تولید می‌شوند.ویژگی‌های پنیر مانند رنگ، عطر، بافت، طعم و استحکام به عواملی مانند فناوری تولید، منبع شیر، محتوای رطوبت، مدت زمان کهنه‌شدن، و حضور کپک‌ها، مخمرها و باکتری‌های خاص بستگی دارد (Santiago-López et al., ۲۰۱۸) . هنگامی که شیر به پنیر تبدیل می‌شود، برخی از ترکیبات شیر حفظ شده و برخی دیگر به ترکیبات منحصربه‌فرد پنیر تبدیل می‌شوند. برای مثال، تخمیر میکروبی در فرآیند تبدیل شیر به پنیر، به‌طور مستقیم از طریق سنتز ویتامین B ترکیب پنیر را تنظیم می‌کند (Reif et al., ۱۹۷٦) و به‌طور غیرمستقیم با حل برخی مواد معدنی و لاکتات‌ها که در طول فرآیند انعقاد شیر از بین می‌روند، بر ترکیب پنیر تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، ترکیب پنیر بر اساس فرآیند تولید پنیر مورد استفاده تغییر می‌کند (Lucey & Fox, ۱۹۹۳).

پنیر معمولاً از شیر گاو تولید می‌شود، اما برخی از انواع پنیرها مانند روکفورت، فتا و مانچگو با استفاده از شیر گوسفند یا بز تولید می‌شوند (Branciari et al., ۲۰۰۰)به‌طور کلی، شیر خام باید بلافاصله پس از دوشیدن برای تولید پنیر استفاده شود. با این حال، تحویل به‌موقع شیر خام به کارخانه‌های پنیرسازی در مناطق دورافتاده ممکن است دشوار باشد. علاوه بر این، چنین کارخانه‌هایی ممکن است نیاز داشته باشند شیر جمع‌آوری‌شده را به مدت یک روز قبل از فرآوری ذخیره کنند. اگر دوره نگهداری بین ۲۴ تا ۷۲ ساعت باشد، تعداد باکتری‌ها می‌تواند به 10^6واحد تشکیل‌دهنده کلنی در هر میلی‌لیتر برسد. میزان چربی موجود در شیر خام بر اساس مقدار چربی مورد نیاز در پنیر تعیین می‌شود، که این مقدار به‌طور مستقیم با محتوای کازئین موجود در شیر کامل رابطه دارد.

برای استانداردسازی شیر و دستیابی به وزنی یکنواخت و کاهش انحرافات، می‌توان با اضافه‌کردن خامه، جداکردن بخشی از چربی و افزودن شیر بدون چربی یا مواد جامد غیرچربی حاصل از شیر، این فرآیند را انجام داد. برای حذف باکتری‌های مضر و بیماری‌زا، تضمین کیفیت یکنواخت و افزایش پایداری کیفیت پنیر، از شیر خام استریلیزه‌شده برای تولید اکثر انواع پنیر استفاده می‌شود. استریلیزاسیون در دمای ۶۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه یا در دمای ۷۱–۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ ثانیه انجام می‌شود. پیش از تولید پنیر، باکتری‌های آلاینده، عمدتاً گونه‌های لاکتوباسیلوس از محیط، ممکن است لاکتوز را تخمیر کنند. بنابراین، برای اطمینان از نرخ پایدار تولید اسید در طول تشکیل لخته و حفظ کیفیت و ثبات پنیر، لازم است که شیر از نظر سویه‌های میکروبی تولیدکننده اسید و ترکیبات طعم‌دهنده بررسی شود. علاوه بر استارترها، عوامل دیگری نیز می‌توانند بسته به نیاز نوع پنیر و شرایط تولید، به شیر اضافه شوند؛ برای مثال، کلرید کلسیم و رنگ‌دهنده‌ها ممکن است برای تولید لخته‌ای با سختی مناسب و رنگی یکنواخت اضافه شوند.لخته تنها زمانی برش داده می‌شود که به سختی مناسب رسیده باشد. برش لخته باعث تبدیل آن به قطعات کوچک‌تر می‌شود که سرعت خروج آب پنیر را افزایش می‌دهد. این برش همچنین سطح لخته را افزایش می‌دهد و امکان جمع‌شدن بیشتر از طریق آب‌زدایی را فراهم می‌کند. با افزایش سختی لخته، ظرفیت نگهداری آب آن کاهش می‌یابد. جمع‌شدن لخته و رسوب آب پنیر باعث می‌شود لخته آب بیشتری از دست بدهد و سخت‌تر شود.



شکل ۱ | فرآیند عمومی تولید پنیرهای طبیعی

به‌طور کلی، در فرآیند حذف آب پنیر، حجمی معادل ۳۵–۵۰ درصد از حجم اولیه شیر جدا می‌شود. هرچه دما در طول فرآیند تخلیه آب پنیر بالاتر باشد، میزان رطوبت لخته نیز بیشتر خواهد بود. این به این دلیل است که در دماهای بالا، ذرات لخته به سرعت تغییر شکل می‌دهند و منافذ موجود در ذرات پنیر سریع‌تر بسته می‌شوند و از خروج آب جلوگیری می‌کنند. اضافه‌کردن مقدار مناسب نمک در طول فرآیند تولید پنیر می‌تواند اسیدیته مناسب پنیر را تضمین کند، ویژگی‌های بافتی و طعم آن را بهبود بخشد، تعداد حفره‌های موجود در پنیر را کنترل کند، میزان رطوبت را تنظیم کند و از رشد میکروب‌های آلاینده جلوگیری کند (Upreti & Metzger, ۲۰۰۶). پنیرهای تازه مانند پنیر کاتیج و خامه‌ای نیاز به رسیدن ندارند، در حالی که پنیرهای سخت مانند چدار و سوئیسی باید دوره رسیدن را طی کنند. پنیرهای رسیده معمولاً با استفاده از لخته‌ای که با رنت تولید شده است تهیه می‌شوند. در طول دوره رسیدن، طعم‌های خاصی در لخته تازه از طریق فعالیت‌های پروبیوتیکی و آنزیمی ایجاد می‌شود که شدت آن به نوع پنیر بستگی دارد برای رسیدن پنیرهای سخت و بسیار سخت، مانند پارمزان و چدار، لخته در شرایطی نگهداری می‌شود که از رشد میکروارگانیسم‌های سطحی جلوگیری کند. به عنوان مثال، پنیر چدار در غارها رسیده می‌شود. برای رسیدن پنیرهای نرم و برخی نیمه‌نرم‌ها مانند لیندبرگر و بری، لخته‌ها در شرایطی نگهداری می‌شوند که رشد میکروارگانیسم‌های سطحی را تشویق کنند. به عنوان مثال، قارچ *Penicillium camemberti* در رسیدن پنیرهای

کاممبر و بری نقش دارد و باکتری *Brevibacterium linens* در رسیدن پنیرهای لکه‌دار بالغ مانند لیندبرگر مؤثر است (Łopusiewicz et al., ۲۰۲۰).

جالب است که پنیرهای آبی مانند استیلتون و روکفورت از دو روش مختلف رسیدگی استفاده می‌کنند. در مقابل، برخی از پنیرهای سنتی دست‌ساز، از جمله کازاک و پلیزنتیف، فرآیند تولید استاندارد خاصی ندارند و بسته به روش‌های سنتی که توسط تولیدکنندگان پنیر استفاده می‌شود، متفاوت هستند(Zheng et al., ۲۰۲۱) .

توسعه فناوری‌های فرآوری صنعتی و مزایای آن

پیشرفت فناوری‌های صنعتی در فرآوری پنیر عمدتاً تحت تأثیر عوامل اقتصادی، نیازهای مهندسی و تجهیزات، تقاضای مصرف‌کنندگان، و استانداردهای نظارتی قرار دارد. یکی از چالش‌های اصلی در تولید پنیر، دستیابی به کیفیت ثابت و بالا در کنار حجم تولید زیاد است(Panikuttira et al., ۲۰۱۸) . استفاده از فناوری‌های تحلیلی فرآیندی (PAT) برای نظارت و کنترل مداوم پارامترهای مؤثر در فرآیندهای لبنی می‌تواند به کاهش تولید محصولات با کیفیت پایین و افزایش بهره‌وری و سودآوری کمک کند(Munir et al., ۲۰۱۵) .از جمله روش‌های جایگزین برای کاهش بار باکتریایی می‌توان به استفاده از سانتریفیوژهای ویژه یا میکروفیلتراسیون اشاره کرد. همچنین، روش‌هایی مانند استفاده از پراکسید هیدروژن/کاتالاز و باکتوفوگیشن (سانتریفیوژ با سرعت بالا) برای حذف باکتری‌ها و هاگ‌های باکتریایی از شیر به کار می‌رود(Legg et al., ۲۰۱۷) .اخیراً تنظیم محتوای پروتئین شیر از طریق استفاده از فناوری اولترافیلتراسیون برای دستیابی به ترکیب نهایی مطلوب انجام شده است. از مزایای این روش می‌توان به ماده اولیه یکنواخت‌تر، استفاده سودآور از جریان لاکتوز و افزایش بازدهی مواد جامد شیر در مخزن پنیر اشاره کرد. انتخاب تجهیزات برای مرحله مخزن در فرآیند پنیرسازی به عوامل خارجی بسیاری بستگی دارد، از جمله نوع پنیر تولیدی، پردازش دلَمه در مراحل پایین دستی ، انعطاف‌پذیری، هزینه و بازدهی، تنها برای ذکر چندمورد نامبرد. در سال‌های اخیر، بیوتکنولوژی‌های جدید برای بهبود فرآیند رسیدن پنیر و ارتقاء طعم آن مورد بررسی قرار گرفته است. این فناوری‌ها شامل تلقیح کشت‌های اضافی و استفاده از آنزیم‌های خارجی، و تأثیر دما و فشار بالا بر کیفیت پنیر هستند (Khattab et al., ۲۰۱۹). تکنیک‌های نوین تشخیص سریع مانند طیف‌سنجی مادون قرمز(IR) ، بینی الکترونیکی و روش‌های نوری به عنوان جایگزینی برای روش‌های گران قیمت و نیازمند نیروی متخصص پیشنهاد شده‌اند. روش‌های اصلی غنی‌سازی پنیر شامل افزودن پروبیوتیک‌ها و پری‌بیوتیک‌ها، تقویت ویتامین‌ها و غنی‌سازی پروتئین شیر با سایر درشت‌مغذی‌ها است. توسعه فناوری‌های لبنی امکان استانداردسازی فناوری تولید صنعتی برخی از انواع پنیر را فراهم کرده است، در حالی که برخی دیگر همچنان با روش‌های سنتی و غیر استاندارد تهیه می‌شوند. به عنوان مثال، فناوری‌های اولترافیلتراسیون و تغلیظ برای تولید پنیر فتا مناسب‌تر هستند، اما پنیر قزاق با فرآیندهای دستی سنتی و غیر استاندارد تولید می‌شود. علاوه بر این، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی در نگهداری پنیر با فرصت‌ها و چالش‌هایی همراه است (Costa et al., ۲۰۱۸).

پیشرفت‌های تحقیقاتی در زمینه مکانیسم‌های متابولیکی مرتبط با طعم پنیر

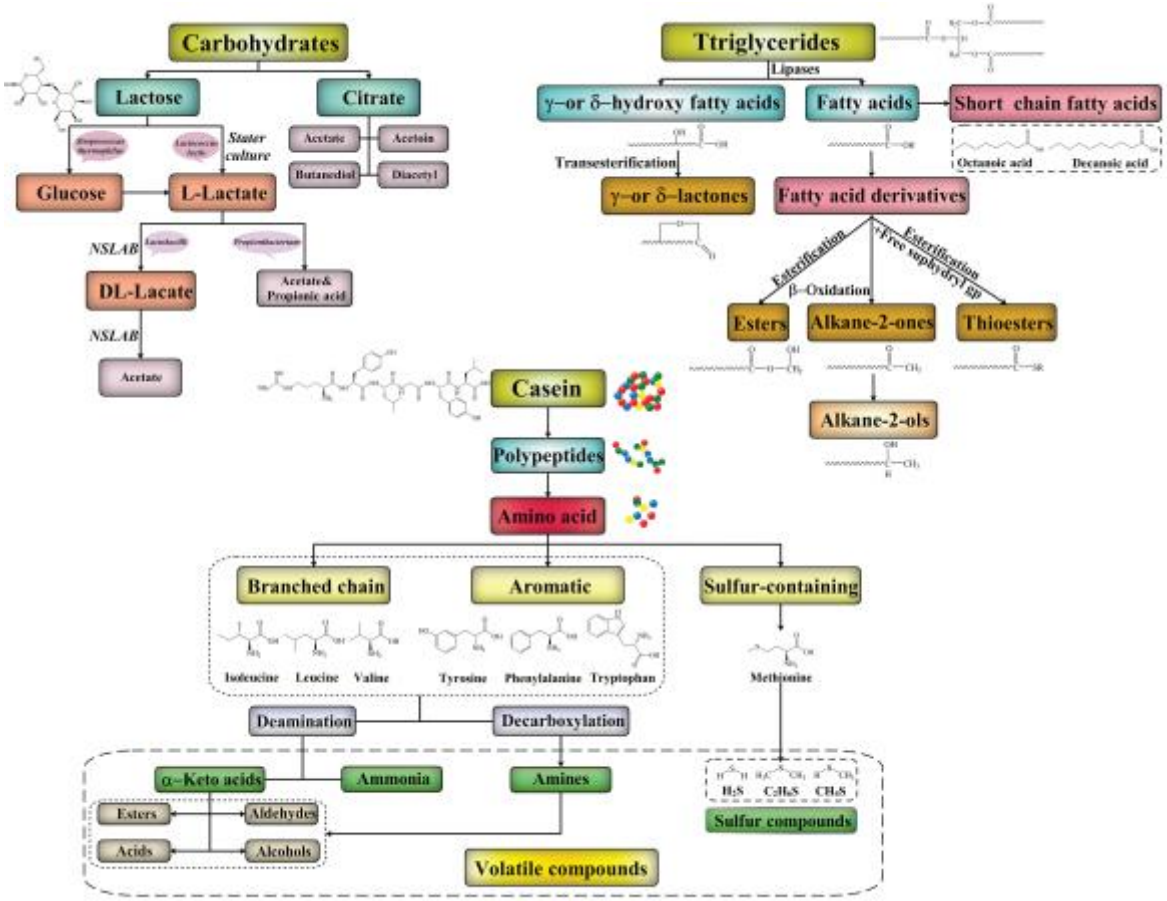
طعم پنیر: منشأ و تولید

طعم پنیر نتیجه دینامیک بیوشیمیایی در طول فرآیند تولید و رسیدن آن است(McSweeney & Sousa, ۲۰۰۰) . هر نوع پنیر ترکیب خاصی از مواد طعم‌دهنده دارد. تولید طعم پنیر عمدتاً شامل سه واکنش اصلی است: متابولیسم لاکتوز باقی‌مانده،

لاکتات، و سیترات؛ پروتئولیز؛ و لیپولیز (Marsili, ۱۹۸۵) .آنزیم‌های دخیل در تولید و رسیدن پنیر عمدتاً از شیر، استارتر کشت، مایه پنیر و میکروبیوتای ثانویه مشتق می‌شوند. تغییرات مختلف در لاکتوباسیل‌های غیر استارتر (NSLAB) و کشت‌های ثانویه یا مکمل نیز بسته به نوع پنیر و روش‌های فرآوری آن رخ می‌دهد. ترکیبات طعم‌دهنده مواد غذایی به دو دسته فرّار و غیر فرّار تقسیم می‌شوند. ترکیبات طعم‌دهنده فرّار شامل الکل‌ها، اسیدها، استرها، آلدهیدها و کتون‌ها هستند که همگی منبع عطر مواد غذایی محسوب می‌شوند. در حالی که مواد غیرفرار شامل اسیدهای آلی، آمینواسیدها، قندهای کاهنده، نوکلئوتیدها، پلی‌پپتیدها، و سایر مولکول‌های کوچک هستند که منبع اصلی طعم غذا محسوب می‌شوند (Delgado et al., ۲۰۱۰) .ترکیبات طعم‌دهنده پنیر شامل اسیدها، الکل‌ها، استرها، کتون‌ها و لاکتون‌ها هستند که کیفیت شیر خام و فرآیندهای تخمیر و/یا رسیدن تأثیر قابل توجهی بر آن‌ها دارند (Santiago-López et al., ۲۰۱۸). به‌ویژه، فرآیند رسیدن مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر طعم پنیر محسوب می‌شود. فرآیند رسیدن پنیر شامل واکنش‌های پیچیده بیوشیمیایی است که متابولیسم اولیه و ثانویه را شامل می‌شود. متابولیسم اولیه بر تشکیل طعم پایه تأثیر می‌گذارد و شامل سه تغییر اصلی است: تجزیه کربوهیدرات، هیدرولیز پروتئین، و تخریب چربی. متابولیسم ثانویه مسئول تشکیل طعم خاص هر نوع پنیر است این فرآیند عمدتاً شامل دکربوکسیلاسیون اسیدهای آمینه، ترانس‌آمیناسیون، دی‌آمیناسیون، دی‌سولفاسیون، بتا اکسیداسیون اسیدهای چرب و استریفیکاسیون است (Marilley & Casey, ۲۰۰٤). مخمرها می‌توانند به‌طور مؤثری بسیاری از متابولیت‌های ثانویه را که برای کیفیت پنیر حیاتی هستند تولید کنند. این ترکیبات شامل ترکیبات کربونیل، ترکیبات گوگردی، مشتقات اسیدهای چرب، ترکیبات فنلی و الکل‌های سنگین هستند که مستقیماً با عطر پنیر مرتبط می‌باشند(Dzialo et al., ۲۰۱۷) .

متابولیسم لاکتوز، لاکتات و سیترات

لاکتوز و سیترات اصلی‌ترین کربوهیدرات‌های موجود در تمامی انواع شیر پستانداران هستند. با این حال، میزان لاکتوز در شیر گونه‌های مختلف به‌طور قابل توجهی متفاوت است و در محدوده‌ای از ۰ تا ۱۰۰ گرم در لیتر قرار دارد(Lai et al., ۲۰۱٦) ؛ شکل ۲). محصولات اصلی متابولیسم لاکتوز شامل-L لاکتات، -DLلاکتات یا مخلوط راسمیک هستند که به طعم و ویژگی پنیر کمک می‌کنند. با این حال، برخی از باکتری‌ها از جمله گونه‌های *Leuconostoc* محصولات دیگری مانند اتانول نیز تولید می‌کنند (Vedamuthu, ۱۹۹٤). میکروبیوتای غیر استارتر در پنیرهای چدار، نوع هلندی، و پنیرهای مشابه، ال-لاکتات تولیدشده توسط استارتر *Lactococcus lactis* را به دی-ال لاکتات ایزومریزه می‌کند(McSweeney et al., ۲۰۱۷) . با این حال، غلظت بالای دی-ال لاکتات می‌تواند کیفیت حسی پنیر را تحت تأثیر قرار دهد. برخی از باکتری‌های استارتر (مانند *Streptococcus thermophilus*) که با میکروارگانیسم‌های مثبت گالاکتوز رشد می‌کنند، قادر به متابولیسم بخش گالاکتوز لاکتوز نیستند، که این امر منجر به تجمع گالاکتوز در لخته‌های پنیر می‌شود .پیرووات –که یک واسطه در متابولیسم لاکتوز است – پیش‌ساز تولید چندین ترکیب طعم‌دهنده زنجیره کوتاه از جمله استات، استوئین، دی‌استیل، اتانول، و استالدهید می‌باشد (Melchiorsen et al., ۲۰۰۲). در پنیر سوئیسی، لاکتات توسط گونه‌های *Propionibacterium* به پروپیونات‌ها، استات‌ها، دی‌اکسید کربن و آب متابولیزه می‌شود، که در این میان، دی‌اکسید کربن عامل ایجاد **"چشم‌ها "** یا حفره‌های مشخصه در این نوع پنیر است **استات** یک ترکیب طعم‌دهنده مهم در بسیاری از پنیرها است. علاوه بر متابولیسم از لاکتوز توسط باکتری‌های اسیدلاکتیک(LAB) ، استات می‌تواند از طریق متابولیسم لاکتات و سیترات نیز تشکیل شود (McSweeney & Sousa, ۲۰۰۰).



شکل ۲|مسیرهای بیوشیمیایی برای تولید ترکیبات طعم در پنیرها

در پنیرهای رسیده مانند کاممبرت **و** بری، لاکتات در لایه سطحی توسط کپک‌ها و مخمرهای موجود در سطح پنیر متابولیزه و به آب و اکسیژن تجزیه می‌شود، که این امر باعث افزایش pH در سطح پنیر می‌شود(Arruda et al., ۲۰۱۳) .این تغییرات مشابه با آنچه در پنیرهای هلندی و سوئیسی رخ می‌دهد است، اما در پنیر چدار مشاهده نمی‌شود. غلظت لاکتوز در پنیر می‌تواند به دلیل شستشو یا جایگزینی با آب پنیر کاهش یابد؛ در این شرایط، لاکتوز باقی‌مانده در لخته به‌سرعت متابولیزه شده و باعث افزایش مقدار pH می‌شود. به همین دلیل، پنیرهایی که لاکتوز باقی‌مانده کمی دارند، طعمی تازه و ملایم دارند؛ در حالی که پنیرهایی با لاکتوز باقی‌مانده بالا ممکن است طعمی قوی و تند داشته باشند که ناشی از مقدار کم pH است.در شیر، سیترات عمدتاً به صورت نمک‌های یونیزه با غلظتی حداکثر تا ۱.۸ گرم در لیتر وجود دارد، که بیشتر آن در طی فرآیند تولید پنیر همراه با آب پنیر از دست می‌رود. این امر به این دلیل است که تقریباً ٪۹۴ از سیترات در فاز محلول شیر قرار دارد (Dimos et al., ۱۹۹۶). سیترات توسط *S. thermophilus* یا لاکتوباسیل‌های ترموفیل متابولیزه نمی‌شود، اما توسط برخی از لاکتوباسیل‌های مزوفیل موجود در میکروبیوتای غیر استارتر (NSLAB) متابولیزه می‌شود.

تعدادی از ترکیبات طعمی مهم مانند استات، دی‌استیل، استوئین، بوتاندیول و دی‌اکسید کربن در صورتی که برخی از لاکتوباسیل‌های سیترات مثبت مانند *L. lactis* و *Leuconostoc* تقویت شوند، از سیترات تولید می‌شوند .دی‌استیل یک ترکیب آروماتیک مهم است که در برخی انواع پنیرها مانند پنیرهای نوع هلندی، کوارک و پنیر کاتیج به استوئین، ۲،۳-

بوتاندیول و ۲-بوتانون تبدیل می‌شود (Dimos et al., ۱۹۹٦) . متابولیسم سیترات به‌ویژه در پنیرهای نوع هلندی اهمیت دارد، زیرا CO_2 تولیدشده مسئول تشکیل حفره‌ها یا **"چشم‌ها "**در این نوع پنیرهاست . علاوه بر این، سیترات بستر اصلی برای استارترهای +Cit و میکروبیوتای غیر استارتر (NSLAB) است و سیترات باقی‌مانده که توسط NSLAB متابولیزه می‌شود، ممکن است باعث شل شدن بافت در برخی پنیرها مانند چدار شود (Speranza et al., ۲۰۱۷).

لیپولیز و متابولیسم اسیدهای چرب

لیپولیز تأثیر مهمی بر طعم و بافت پنیر دارد(Voigt et al., ۲۰۱۲) .لیپازهای موجود در پنیر از منابع مختلفی از جمله شیر، مایه پنیر، استارتر، استارترهای کمکی، باکتری‌های غیر استارتر و آنزیم‌های خارجی مشتق می‌شوند. از میان تمامی لیپازها، **لیپوپروتئین لیپاز** نقش مهمی در توسعه طعم در پنیرهای تولیدشده از شیر خام ایفا می‌کند، اما این آنزیم تأثیر اندکی بر طعم پنیرهایی دارد که از شیر پاستوریزه تولید شده‌اند . آنزیم‌های لیپولیتیک موجود در باکتری‌های اسیدلاکتیک (LAB) قادرند سوبسترا را هیدرولیز کرده و استرهای اسید چرب آزاد، تری‌آسیل‌گلیسرول‌ها، دی‌آسیل‌گلیسرول‌ها و مونوآسیل‌گلیسرول‌ها تولید کنند. آنزیم استراز LAB برای مونوآسیل‌گلیسرول‌های کمتر از $C_{۱۸}$ فعال است و حساسیت بیشتری به مونوآسیل‌گلیسرول‌های $C_۸$ دارد، اما بر دی‌آسیل‌گلیسرول‌های بالای $C_٦$ تأثیری ندارد (Holland et al., ۲۰۰۵). علاوه بر این، اسید اتیل‌بوتیریک از طریق انتقال گروه بوتیل از تری‌گلیسرول‌ها به اتانول توسط آنزیم ترانسفراز موجود در سلول‌های LAB تولید می‌شود توانایی باکتری‌های *Propionibacterium spp.* (PAB) در تجزیه چربی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر از باکتری‌های اسیدلاکتیک (LAB) است. در پنیر سوئیسی، PABنقش کلیدی در تبدیل لاکتات به استات، تولید طعم مشخص از طریق دی‌اکسید کربن و تشکیل اسیدهای آزاد ایفا می‌کند.(Schwenninger et al., ۲۰۱۱) ایجاد طعم‌های معمولی پنیر از طریق لیپولیز عمدتاً به فرایند زیر وابسته است: پیوندهای استری بین تری‌گلیسرول‌ها و اسیدهای چرب تحت تأثیر آنزیم لیپاز شکسته می‌شوند و مونوگلیسرول‌ها، دی‌گلیسرول‌ها و اسیدهای چرب آزاد تولید می‌شوند (Deeth & Touch, ۲۰۰۰)شکل ۲).

اسیدهای چرب تأثیر مهمی بر طعم پنیر دارند. در طی فرآیند تخمیر و رسیدن پنیر، مجموعه‌ای از اسیدهای چرب با زنجیره‌های کربنی متوسط و کوتاه ($C > ٤$) پس از تجزیه چربی شیر تشکیل می‌شوند. این فرآیند منجر به ایجاد مواد طعم‌دهنده‌ی خاص در پنیر می‌شود که این مواد شاخص‌های مهمی برای تعیین میزان رسیدگی پنیر هستند. اکسیداسیون اسیدهای چرب، به‌ویژه اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه، می‌تواند منجر به تولید انواع آلدئیدهای غیراشباع با طعم‌های قوی شود. این فرآیند ممکن است بوی نامطبوعی مرتبط با ترشیدگی ایجاد کند که در پنیرهایی مانند گودا، چدار و سویسی پس از فساد مشاهده می‌شود(Forde & Fitzgerald, ۲۰۰۰) . با این حال، لیپولیز در اکثر پنیرها، از جمله پارمسان، امینتال، پنیرهای آبی و پنیرهای ایتالیایی اثر مثبتی دارد.اسیدهای چرب تولیدشده از طریق لیپولیز، به‌ویژه اسیدهای چرب آزاد مانند اسید استیک، اسید اکتانوئیک و اسید دکانوئیک، از جمله مواد طعم‌دهنده‌ی پنیر هستند. علاوه بر این، بافت منحصربه‌فرد و سختی پنیرها نتیجه‌ی تبخیر مداوم آب است. از میان اسیدهای چرب آزاد تولیدشده، اسید استیک طعمی تند به پنیر می‌بخشد، اما مقدار بیش‌ازحد آن می‌تواند بویی شبیه به سرکه ایجاد کند. طعم‌های تولیدشده توسط اسیدهای چرب بر اساس تفاوت در انواع و مقادیر این اسیدها در انواع مختلف پنیر متفاوت است(Mallatou et al., ۲۰۰۳) .

اسید بوتیریک یکی از ترکیبات طعم‌دهنده‌ی مهم در پنیرهایی مانند رومانو و پنیر کاتیج است، در حالی که طعم اصلی مشخصه‌ی پنیر سویسی ناشی از اسید پروپیونیک است که توسط باکتری‌های PAB تولید می‌شود .علاوه بر این، اسید هگزانوئیک مسئول ایجاد طعمی تند، عرق‌مانند و ترشیده است اسید اکتانوئیک طعمی شبیه به بز و مومی می‌دهد؛ و اسید دکانوئیک عطری شبیه به چربی و مرکبات ایجاد می‌کند (Gan et al., ۲۰۱٦) . اسیدهای چرب زنجیره کوتاه طعم‌های قوی و

مشخصی ایجاد می‌کنند که برخی از آنها پیش‌ساز مواد طعم‌دهنده بوده و به دیگر مواد معطر مانند لاکتون‌ها و الکل‌ها تبدیل می‌شوند لاکتون‌های اصلی در پنیر شامل-γ لاکتون و-δ لاکتون هستند که به ترتیب دارای حلقه‌های پنج‌وجهی و شش‌وجهی بوده و عطری شدید ایجاد می‌کنند. استرهای موجود در پنیر از طریق واکنش استری شدن بین اسیدهای چرب زنجیره کوتاه و اسیدهای چرب زنجیره متوسط تا بلند که از تجزیه چربی شیر تولید می‌شوند، و همچنین الکل‌های اولیه و ثانویه‌ای که از تخمیر لاکتوز یا متابولیسم اسیدهای آمینه در طی فرآیند تخمیر به دست می‌آیند، تولید می‌شوند (Fox et al., ۲۰۱۵). استرهای موجود در پنیر از طریق واکنش استری شدن بین اسیدهای چرب زنجیره کوتاه و اسیدهای چرب زنجیره متوسط تا بلند که در طی تجزیه چربی شیر تولید می‌شوند، تشکیل می‌گردند. علاوه بر این، الکل‌های اولیه و ثانویه از طریق تخمیر لاکتوز یا متابولیسم اسیدهای آمینه در طول فرآیند تخمیر تولید می‌شوند. ترکیبات استری در پنیر نقش مهمی در ایجاد رایحه‌های شیرین، میوه‌ای و گلی ایفا می‌کنند. با این حال، مقدار بیش‌ازحد استرهایی مانند اتیل بوتیرات و اتیل کاپروات می‌تواند منجر به ایجاد نقص طعمی با طعمی میوه‌ای بیش‌ازحد شود. علاوه بر این، تیواسترها (مانند-s متیل تیواستات، تیواتیل-۲-متیل پروپانوات، و-s متیل تیوبوتیرات) که از طریق واکنش اسیدهای چرب آزاد با گروه‌های سولفیدریل تولید می‌شوند، طعم‌هایی شبیه به سیر، گوگرد، یا تخم‌مرغ ایجاد می‌کنند(Iwasawa et al., ۲۰۱٤) . در نهایت، -βاکسیداسیون و دکربوکسیلاسیون متعاقب اسیدهای چرب آزاد در برخی پنیرها (مانند پنیر آبی) منجر به تشکیل متیل کتون‌ها یا آلکان-۲-ون‌ها، به‌ویژه هپتانون و نونانون می‌شود(McSweeney et al., ۲۰۰٤) .

پروتئولیز و متابولیسم اسیدهای آمینه

هیدرولیز پروتئین، به‌عنوان یک واکنش بیوشیمیایی اصلی، نقش حیاتی در ایجاد طعم پنیر دارد و تأثیر مهمی بر آزادسازی و مزه طعم پنیر در طی فرآیند رسیدن آن می‌گذارد (Gan et al., ۲۰۱٦)..پپتیدها و اسیدهای آمینه آزاد که از تجزیه پروتئین توسط پروتئاز در پنیر به دست می‌آیند، پیش‌ساز بسیاری از مواد طعم‌دهنده پنیر هستند. پروتئین‌های شیر عمدتاً شامل کازئین‌ها-α ، -βو-κ کازئین هستند که به دلیل تجزیه نشدن به‌طور قابل توجه، در آب‌پنیر از دست می‌روند. هیدرولیز کازئین مهم‌ترین مسیر بیوشیمیایی برای تشکیل طعم در پنیرهای سخت و نیمه‌سخت است. پروتئینازها و پپتیدازها تجزیه زنجیره‌های پلی‌پپتیدی را کاتالیز کرده و اسیدهای آمینه آزاد تولید می‌کنند که برخی از آنها به‌عنوان پیش‌ساز ترکیبات طعمی در طول تولید و رسیدن پنیر عمل می‌کنند (McSweeney, ۲۰۰٤). محتوای اسیدهای آمینه آزاد و متابولیسم در پنیر رسیده نقش‌های اساسی در توسعه طعم پنیر ایفا می‌کنند. تحت تأثیر آنزیم‌هایی مانند ترانس‌آمیناز، دی‌آمیناز، دکربوکسیلاز و سایر آنزیم‌ها، اسیدهای آمینه آزاد در پنیر به مجموعه‌ای از مواد طعم‌دهنده فرّار و غیر فرّار (مانند کتون‌ها، آلدهیدها، اسیدها و الکل‌ها) از طریق فرآیندهایی مانند دی‌آمیناسیون، آمیناسیون و دکربوکسیلاسیون تبدیل می‌شوند (Fox et al., ۱۹۹۸)شکل ۲.غلظت‌های متیونین، لوسین و گلوتامیک اسید معمولاً به‌عنوان شاخص‌های درجه هیدرولیز پروتئین در پنیر در نظر گرفته می‌شوند. حذف آنزیمی گروه آمینه از انتهای اسیدهای آمینه منجر به تشکیل مواد طعم‌دهنده و آروماتیک می‌شود، مانند ۳-متیل-بوتانول، متیونیلیل-پروپیل آلدهید، سولفیدها و استرهای آروماتیک که به ترتیب بوی مالت‌مانند، شبیه سیب‌زمینی پخته، تند و گل‌مانند ایجاد می‌کنند (Suzuki-Iwashima et al., ۲۰۲۰). غلظت اسیدهای آمینه، به‌ویژه گلوتامیک اسید و لیزین، در پنیر پارمزان به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از پنیر گودا، چدار یا امینتال است. باکتری‌های استارتر لاکتیک اسیدSLAB ، NSLBو سایر سویه‌های باکتریایی می‌توانند آنزیم‌های متابولیزکننده اسیدهای آمینه تولید کنند که به‌طور خاص بر روی اسیدهای آمینه با زنجیره شاخه‌ای، آروماتیک یا حاوی گوگرد عمل می‌کنند (Lagoda et al., ۲۰۲۳) .اسیدهای آمینه با زنجیره شاخه‌ای که پیش‌ساز ترکیبات آروماتیک مانند ایزوبوتیل استر، ۳-متیل‌بوتانال و ۲-متیل‌بوتانال هستند، در انواع مختلف پنیر یافت می‌شوند (Curioni & Bosset, ۲۰۰۲). علاوه بر این، ایزولوسین، لوسین و والین می‌توانند از طریق دکربوکسیلاسیون به ایزوبوتیل استر، ۲-متیل‌استالدئید و کتوایزوکاپروات تبدیل شوند که همگی دارای بوی نامطبوع قوی هستند (McSweeney, ۲۰۱۱) .کاتابولیسم اسیدهای آمینه آروماتیک با یک مرحله ترانس‌آمیناسیون آغاز می‌شود که در آن ایندول پیروات، فنیل

پیروات و-p هیدروکسی-فنیل پیروات به‌ترتیب از تریپتوفان، فنیل‌آلانین و تیروزین تولید می‌شوند. تبدیل تریپتوفان یا فنیل‌آلانین در بسیاری از پنیرهای سخت و نرم منجر به تشکیل بنزآلدهید می‌شود که با طعم بادام تلخ شناخته می‌شود. اسیدهای آمینه همچنین از طریق دی‌آمیناسیون و دکربوکسیلاسیون به ترکیباتی مانند اسیدهای-α کتو، آمونیاک و آمین‌ها تجزیه می‌شوند که به‌نوبه خود به ترکیباتی مانند الکل‌ها، استرها و اسیدها تبدیل می‌شوند. آمونیاک نیز یک ماده طعم‌دهنده مهم در بسیاری از پنیرها مانند کاممبرت و گرویر است (Engel et al., ۲۰۰۱) . در پنیر، متیونین به ترکیبات گوگردی فرّار مانند متان‌تیول (که طعمی ترش‌مانند دارد) و همچنین دی‌متیل سولفید و دی‌متیل تری‌سولفید (که طعمی شبیه به سیر دارند) تبدیل می‌شود؛ این ترکیبات نمایانگر مواد طعم‌دهنده پایه در بسیاری از انواع پنیر هستند (Smit et al., ۲۰۰۵). ترکیبات حاوی گوگرد (S-Compounds) از عوامل اصلی ایجاد آرومای خاص پنیر چدار هستند و همچنین به بوی شبیه سیر در یک پنیر کاممبرت کاملاً رسیده کمک می‌کنند (McSweeney & Sousa, ۲۰۰۰). علاوه بر تولید مواد طعم‌دهنده، پروتئولیز که با دکربوکسیلاسیون اکسیداتیو اسیدهای آمینه همراه است، ممکن است آمین‌های بیوژنیک با وزن مولکولی پایین (BA)تولید کند – مقادیر بیش از حد این آمین‌ها می‌تواند واکنش‌های فیزیولوژیکی نامطلوبی ایجاد کند (Spano et al., ۲۰۱۰). بنابراین، شناسایی آمین‌های بیوژنیک بخش ضروری از تحلیل ایمنی پنیر است.

پیشرفت در پژوهش‌های فناوری شناسایی طعم پنیر

پنیرهای مختلف دارای آرومای متنوع و ساختارهای پیچیده‌ای هستند که تحلیل آن‌ها عمدتاً بر پایه استخراج ترکیبات فرّار انجام می‌شود. در حال حاضر، روش‌های اصلی استخراج شامل تقطیر، استخراج با حلال، روش جذب فضای بالاسر (HS) و ریزاستخراج فاز جامد (SPME) هستند. تقطیر یک تکنیک استخراج نسبتاً ساده است، اما به زمان و نیروی کار زیادی نیاز دارد (Wang et al., ۲۰۰۸) . روش استخراج با حلال به مقدار نسبتاً زیادی حلال نیاز دارد. روش فضای فوقانی (HS) نسبتاً سریع و آسان است، اما غلظت مواد فرار موجود در فضای فوقانی ممکن است پایین باشد که می‌تواند نتایج را محدود کند. روش میکرو استخراج با فاز جامد (SPME) یک فناوری سریع و مؤثر برای غنی‌سازی ترکیبات طعمی نمونه است که نمونه‌برداری، جداسازی، غلظت و غنی‌سازی مؤثری از ترکیبات طعمی را نشان می‌دهد SPME .اغلب همراه با روش‌هایی مانند کروماتوگرافی گازی (GC) و طیف‌سنجی جرمی (MS) برای تشخیص ترکیبات فرار طعم در مواد غذایی استفاده می‌شود(Bertuzzi et al., ۲۰۱۸). کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) که نقش مهمی در تجزیه و تحلیل ترکیبات طعمی مواد غذایی ایفا می‌کند، به طور گسترده‌ای برای شناسایی نمونه‌های فرار و نیمه‌فرار مورد استفاده قرار گرفته است(El Sheikha & Hu, ۲۰۲۰). فناوری GC-MS در فرآیند کاربردی خود دارای مزایای خاصی است. در حال حاضر، ترکیب روش فضای فوقانی با میکرو استخراج فاز جامد (HS-SPME) و GC-MS برای تجزیه و تحلیل ترکیبات طعمی پنیر، شراب سفید، شراب برنج، چای پوئر و آبجو به کار گرفته شده است(Plutowska & Wardencki, ۲۰۰۷) . دلگادو از روش SPME-GC-MSبرای تحلیل ترکیبات فرار چهار مرحله مختلف از فرآیند رسیدن پنیر نرم شیر بز اسپانیایی استفاده کرد (Delgado et al., ۲۰۱۰). در مجموع، ۴۶ ترکیب فرار طعمی شناسایی شد که شامل ۱۳ اسید، ۹ استر، ۴ کتون، ۷ الکل، ۳ آلدهید، ۷ ترکیب آروماتیک و سایر ترکیبات بودند. (Frenzel et al., ۲۰۱۵). از GC-MS برای تعیین ترکیبات فرار پنیر گوسفندی رسیده ایتالیایی فیوره ساردو PDO استفاده کردند و ترکیبات اسید کربوکسیلیک (۶۸٪) را شناسایی کردند، در حالی که استرها (۱۴٪)، کتون‌ها (۹٪) و الکل‌ها (۸٪) به عنوان ترکیبات فرار اصلی شناخته شدند. (Ceruti et al., ۲۰۱۶). از GCبرای جداسازی ترکیبات فرار حاصل از فرآیند رسیدن پنیر رجیانیتو تحت ترکیب‌های مختلف دما-زمان استفاده کردند و ۴۱ ترکیب فرار از جمله اسیدها، کتون‌ها، آلدهیدها، استرها، الکل‌ها و هیدروکربن‌ها را جداسازی کردند.

تا کنون بیش از ۶۰۰ ترکیب به عنوان اجزای فرار مواد غذایی شناسایی شده‌اند. تنها تعداد کمی از این ترکیبات تأثیر قابل توجهی بر پروفایل طعمی حسی غذای تحلیل‌شده دارند. فناوری GC-MS قادر است طیف گسترده‌ای از ترکیبات فرار را

تحلیل کند، اما نمی‌تواند مواد فعال طعمی را که بیشترین تأثیر را بر طعم غذا دارند، شناسایی کند. روش گاز کروماتوگرافی-اولفکتومتری (GC-O) مؤثرترین روش برای شناسایی و تشخیص اجزای رایحه است. روش‌های تحلیلی که می‌توانند با این فناوری به کار گرفته شوند شامل روش شدت-زمان، تحلیل Charm و تحلیل رقیق‌سازی استخراج رایحه هستند (Zhu et al., ۲۰۱۵).در روش شدت-زمان، رایحه‌های کلیدی موجود در مواد غذایی توسط یک ارزیاب حسی شناسایی می‌شوند تا طعم خاص ترکیبات فرار که قابل استشمام هستند را توصیف کند. سپس، این رایحه‌ها بر اساس شدت بو و میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر طعم رتبه‌بندی می‌شوند. تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های استخراج با حلال، SPMEو GC-O می‌تواند برای شناسایی ترکیبات اصلی رایحه در پنیرهای رسیده با دانه‌های آبی استفاده شود. ترکیبات شناسایی‌شده شامل متیل مرکاپتان، ۲(۳)-متیل‌بوتیریک اسید (بوی تند پنیر)، ۳-متیل‌تیوپروپانال، ۲,۳-بوتاندیون، دی‌متیل سولفید، بوتیریک اسید، ۱-اکتن-۳-ال، -٤-(Z)هپتنال، فنیل‌استالدئید، ۲-اتیل-۳,۵-دی‌متیل‌پیرازین و اسید استیک هستند(Majcher et al., ۲۰۱۷).

تنوع مخمر در پنیر و تأثیر آن بر طعم

تنوع ساختاری میکروبیوتای مخمر در پنیر

مواد غذایی تخمیری سنتی، از جمله نوشیدنی‌های الکلی چینی، پنیر، سرکه و نان، در محیط‌های باز با انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌ها غنی می‌شوند. در نتیجه، متابولیسم همکاری‌کننده بین میکروبیوتاهای مختلف، اساس فرآیند تخمیر در این مواد غذایی را تشکیل می‌دهد(Wolfe et al., ۲۰۱٤) . علاوه بر این، ساختار جامعه میکروبی و طعم این مواد غذایی ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند. به همین دلیل، جامعه میکروبی که در یک نوع پنیر زندگی می‌کند، از تنوع و سازگاری زیست‌محیطی بالایی برخوردار است. جوامع میکروبی در مواد غذایی تخمیری سنتی نقش مهمی در حفظ مواد غذایی و شکل‌گیری طعم ایفا می‌کنند(Wu et al., ۲۰۱۲) . متاژنومیکس با توان بالا می‌تواند تنوع و توالی جامعه میکروبی در سطح پنیر را آشکار کند – که یک اکوسیستم غذایی با میکروبیوتای نسبتاً ساده است. علاوه بر این، متاژنومیکس، ماکروترانسکریپتومیکس و پروتئومیکس می‌توانند با هم ترکیب شوند تا به طور قابل توجهی استخراج عملکردهای متابولیکی جوامع میکروبی در پنیرهای سنتی تخمیری را تسهیل کنند(Gkatzionis et al., ۲۰۱٤) . ترکیب روش‌های کشت‌پذیر خالص و غیرکشت‌پذیر (تکنیک‌های متاژنومیک) برای بررسی جوامع میکروبی به طور قابل توجهی درک ما از میکروبیوتای موجود در پنیرهای سنتی تخمیری را افزایش داده است(Aldrete-Tapia et al., ۲۰۱٤) . با این حال، تعداد کمی از مطالعات بر روی گونه‌های مخمر در پنیر متمرکز شده‌اند، حتی با وجود اینکه میکروبیوتای متنوع مخمر موجود در پنیر نقش‌های مهمی در کنترل کیفیت پنیر ایفا می‌کند.

اکوسیستم پنیر یک زیستگاه ویژه است که از همزیستی مخمرها، باکتری‌ها و قارچ‌های رشته‌ای پشتیبانی می‌کند. مخمرهای غالب اولیه مقاوم به اسید و نمک هستند؛ آن‌ها قادر به متابولیزه کردن لاکتات تولیدشده توسط باکتری‌های اسید لاکتیک (SLAB)بوده و از اسیدهای آمینه NH^3 تولید می‌کنند. منشأ مخمر در پنیر نه تنها از شیر، بلکه از محیط فرآوری و فرآیند ذخیره‌سازی در طول فرآیند تخمیر پنیر است(Dos Santos et al., ۲۰۱۷) . مخمرهایی که در محیط شیر خام و محصولات لبنی وجود دارند، به‌راحتی می‌توانند روی سطح پنیر تازه مستقر شده و همراه با سایر میکروارگانیسم‌ها یک بیوفیلم پیچیده تشکیل دهند(Fröhlich-Wyder et al., ۲۰۱۹) . این پدیده معمولاً در پنیرهای سنتی رسیده مشاهده می‌شود. گونه‌های متعددی از مخمر از سطح انواع مختلف پنیر جدا شده‌اند؛ با این حال، نقش آن‌ها در فرآیند رسیدن پنیر هنوز به‌خوبی درک نشده است. گونه‌های *Yarrowia lipolytica* ، *D. hansenii*، *Kluyveromyces lactis* و *Kluyveromyces marxianus* عمدتاً از سطح و بخش‌های داخلی پنیرهای سنتی فرانسوی جدا شده‌اند(Ceugniez et al., ۲۰۱۵) . حدود ۱۳۷ نوع پنیر از ۱۰ کشور جمع‌آوری شدند و ۲۴ باکتری و قارچ کشت‌پذیر از طریق توالی‌یابی متاژنومیک و جداسازی سویه‌ها شناسایی شدند که به‌طور گسترده روی سطح پنیر توزیع شده‌اند(Wolfe et al., ۲۰۱٤). کشت‌های تجاری مخمر، مانند *G.*

candidum، سال‌ها در تولید پنیر استفاده شده‌اند. استفاده از مخمر به‌عنوان کشت کمکی نیز در سال‌های اخیر محبوبیت یافته است. در پنیرهای Harzer و کوارک آلمانی، افزودن مخمرهای بسیار فعال *D. hansenii* و *Candida krusei* می‌تواند فرآیند رسیدگی را تسریع کند(Fröhlich-Wyder et al., ۲۰۱۹) . با این حال، بیشتر مخمرهایی که در داخل پنیر یافت می‌شوند به‌طور کامل بی‌هوازی هستند؛ از جمله این مخمرها *K. marxianus* است که لاکتوز باقی‌مانده را متابولیزه می‌کند. مطالعه‌ای روی تنوع قارچ‌های ۴۴ نوع پنیر نشان داد که *D. hansenii* فراوان‌ترین مخمر و *Pe. roqueforti* رایج‌ترین کپک بود (به‌ویژه در پنیرهای آبی)؛ علاوه بر این، بیشتر قارچ‌ها از محصولات لبنی جدا شده‌اند(Banjara et al., ۲۰۱۵) . با این حال، مسائل ایمنی بالقوه مرتبط با مصرف قارچ‌هایی مانند *Aspergillus flavus* نیز نیاز به توجه دارد. نوزده قارچ رشته‌ای و پنج سویه مخمر به‌عنوان بخشی از فرآیند تخمیر پنیرهای سنتی ترکی شناسایی شده‌اند؛ این موارد به‌ویژه شامل گونه‌های *Penicillium* و *D. hansenii* هستند(Budak et al., ۲۰۱۶) .

علاوه بر این، لاکتوباسیلوس، لاکتوکوکوس، انتروکوکوس و برخی مخمرها در پنیر PDO راگوزانو شناسایی شده‌اند؛ این میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در تشکیل طعم ایفا می‌کنند(Carpino et al., ۲۰۱۷) . از نظر قارچ‌ها، پنیر اسلواکی عمدتاً شامل *Hansenula debali*، *Y. lipolytica* و *G. candidum* است (Chebeňová-Turcovská et al., ۲۰۱۱), در حالی که پنیر لیواروت عمدتاً *Y. lipolytica* ، گونه‌های *Candida* ، *Candida intermedia* و *Geotrichum* را در بر می‌گیرد که از طریق هیبریداسیون فلورسانس درجا شناسایی شده‌اند؛(Mounier et al., ۲۰۰۹). *Pichia kudriavzevii* مخمر غالب در پنیر قزاقی است و پس از آن *K. marxianus* و *K. lactis* قرار دارند(Zheng, Li, et al., ۲۰۱۸) . طیف گسترده‌ای از مخمرها از پنیرهای کاممبر و بری جدا شده‌اند که در این میان *D. hansenii* و *Y. lipolytica* فراوان‌ترین گونه‌های جداشده هستند(Viljoen et al., ۲۰۰۳) . محصولات متابولیکی نهایی حاصل از تخمیر لاکتوز و گالاکتوز توسط مخمرهای جداشده از پنیر موزارلا ساخته‌شده از شیر بوفالو نشان‌دهنده تنوع زیادی است که به گونه‌های مختلف بستگی دارد (Suzzi et al., ۲۰۰۰). به‌طور کلی، *K. marxianus* و *K. lactis* به همراه گونه‌های بی‌شکل خود یعنی *D. hansenii* و *Saccharomyces cerevisiae*، رایج‌ترین مخمرها در پنیر هستند، اما نقش آن‌ها در فرآیند رسیدگی پنیر به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است.

تأثیر مخمرها بر کیفیت پنیر در طول فرآیند تخمیر

پنیرهای سنتی تخمیر شده دارای جوامع میکروبی پیچیده، هم‌تخمیر چندگونه‌ای، مکانیسم‌های متابولیکی پیچیده و طعم‌های متنوع هستند. طعم در پنیر عمدتاً از طریق تجزیه لاکتوز و کازئین و همچنین متابولیسم لیپید تولید می‌شود. در فرآیند رسیدگی پنیر، بیشتر مواد طعم‌دهنده از طریق هیدرولیز پروتئین و تبدیل اسیدهای آمینه به دست می‌آیند (Engels et al., ۱۹۹۷). علاوه بر این، تشکیل مواد طعم‌دهنده از متابولیسم میکروبیوتا و تبدیل مواد در طی فرآیند تخمیر جدایی‌ناپذیر است. مقدار مشخصی از باکتری‌های اسیدلاکتیک (LAB) معمولاً در شیر تازه و پنیر نارس وجود دارد و برخی از این باکتری‌ها دارای آنزیم‌های تبدیل‌کننده اسید آمینه با فعالیت بالاتری هستند؛ این ویژگی باعث افزایش تنوع و غنای طعم در پنیر می‌شود (Centeno et al., ۲۰۰۲). *Penicillium brevicompactum*، *Penicillium cavernicola* و *Penicillium olsonii* در پنیر دست‌ساز شیر بز فعالیت پروتئازی بیشتری دارند، در حالی که Mucor لیپاز بیشتری تولید می‌کند. علاوه بر این، *Y. lipolytica* بهترین فعالیت پروتئازی و لیپازی را نشان می‌دهد(Ozturkoglu-Budak et al., ۲۰۱۶) . علاوه بر باکتری‌های اسیدلاکتیک (LAB) و کپک‌ها، انواع مختلف مخمرها نیز در هیدرولیز پروتئین، تجزیه لیپید و لاکتوز، و جذب لاکتات و سیترات در طی فرآیند رسیدگی پنیر مشارکت دارند که همگی در تشکیل طعم پنیر نقش مهمی ایفا می‌کنند (Padilla et al., ۲۰۱۴). علاوه بر این، *Metschnikowia reukaufii*، *Y. lipolytica* و *Pi. kudriavzevii* بر آزادسازی پروتئازها تأثیر می‌گذارند که برای تشکیل اسیدهای آمینه آزاد از پروتئین‌ها بسیار حیاتی است(Akpınar et al., ۲۰۱۱).

پنیرهای سنتی تخمیر شده دارای یک میکروبیوتای هسته‌ای پایدار هستند؛ با این حال، گونه‌های مخمری موجود در این میکروبیوتا نیاز به تحلیل بیشتری بر اساس ژنوم متامورفیک و متابولومیک دارند. تأثیرات تعاملات میکروبی، محیط و فرآیندهای تولید بر جامعه میکروبی پنیر نشان داده است که میکروب‌های موجود در سطوح پنیر از قابلیت بازتولید بالایی برخوردارند و این امر پنیر را به یک مدل میکرواکوسیستم قابل مدیریت و ساخت تبدیل کرده است.

تمرکز تحقیقات مرتبط در حال انجام شامل موارد زیر است: (۱) روشی برای کنترل مؤثر مرحله رسیدگی پنیر به منظور اطمینان از طعم و کیفیت پنیر نهایی؛ (۲) شناسایی میکروبیوتای هسته‌ای، از جمله گونه‌های مختلف مخمر و تعاملات آنها در طول فرآیند تولید و رسیدگی پنیر؛ (۳) بررسی ارتباط بین تعاملات مذکور یا تغییرات پویا و تغییرات طعم در طول تولید و رسیدگی پنیر؛ و (۴) روشی برای تحلیل رابطه داخلی بین ویژگی‌های بوم‌شناختی و عملکردی جامعه میکروبی پنیر.

مخمرها نقش مهمی در تولید تقریباً تمام پنیرهای سنتی رسیده، به‌ویژه برخی از پنیرهای رسیده با شستشو مانند گرویر (Gruyère)، تیلزیت (Tilsit) و ربلوشون (Reblochon) ایفا می‌کنند(Rea et al., ۲۰۰۷) . برخی از مخمرهای تخمیرکننده می‌توانند در داخل پنیرهای دارای لخته اسیدی، مانند پنیر آلمانی هارزر(Harzer) ، رشد کنند و در مراحل اولیه تولید، اتانول و دی‌اکسید کربن تولید کنند(Fröhlich-Wyder et al., ۲۰۱۹) . با این حال، مخمرها ممکن است دلیل برخی از نقص‌های عمده در پنیر باشند، از جمله ایجاد بادکردگی زودهنگام، طعم نامطلوب، تغییر رنگ قهوه‌ای و سایر تغییرات قابل مشاهده(Jakobsen & Narvhus, ۱۹۹٦) مخمرها می‌توانند در سطح پنیر فرآیند کاهش اسیدیته را انجام دهند و باعث ایجاد یک گرادیان pH بین سطح و مرکز پنیر شوند که به دنبال آن انتشار لاکتات به بیرون رخ می‌دهد. زمانی که لاکتات کاهش می‌یابد، مخمرها اسیدهای آمینه را تجزیه می‌کنند تا آمونیاک (NH^3) تولید کنند که به داخل نفوذ کرده و باعث افزایش بیشتر مقدار pH می‌شود(Monnet et al., ۲۰۱۵). فرایند کاهش اسیدیته به شکل‌گیری جوامع باکتریایی مقاوم به نمک، گرم مثبت و کاتالاز مثبت با تحمل کمتر نسبت به اسید کمک می‌کند (Wolfe et al., ۲۰۱٤). رشد مخمر در پنیر به شرایط فیزیکوشیمیایی متعددی وابسته است، از جمله pH پایین، محتوای کپک، غلظت بالای نمک، رسیده شدن در یخچال و شرایط نگهداری(Viljoen et al., ۲۰۰۳) . مخمرهایی که روی سطح پنیر رشد می‌کنند، باید قادر به رشد در pH پایین، دمای پایین، فعالیت آبی کم و غلظت‌های بالای نمک باشند برای مثال، با استفاده از متاژنومیکس، (De Filippis et al., ۲۰۱٦) تغییراتی را در جوامع میکروبی و عملکردهای آن‌ها طی فرآیند رسیدگی پنیر ناشی از دما شناسایی کردند: افزایش پروتئولیز میکروبی، لیپولیز، بیان ژن‌های مرتبط با کاتابولیسم اسیدهای آمینه و لیپیدها، و سرعت رسیدگی پنیر. طعم‌های متمایز پنیر بر اساس تفاوت‌های موجود در شرایط تخمیر و کشت‌های آغازگر، که عمدتاً شامل کشت‌های آغازگر باکتریایی و مخمری هستند، تولید می‌شوند. آغازگرهای قارچی، مانند آن‌هایی که حاوی *Pe. albicans* و*Pe. roqueforti* هستند، می‌توانند فعالیت‌های پروتئولیتیک و لیپولیتیک داشته باشند(Nielsen et al., ۲۰۰۵).

علاوه بر این، *Pe. albicans* هیف‌های سفید تولید می‌کند، در حالی که *Pe. roqueforti* می‌تواند فرآیند رسیدگی پنیر را تسریع کند و طعمی تند و رنگ سبز تیره ایجاد کند. در سال‌های اخیر، از مخمرها نیز به‌عنوان سویه‌های کمکی در کشت‌های آغازگر برای تولید پنیر استفاده شده است؛ به‌عنوان مثال، *Candida lipidotica* برای تولید پنیر آبی به کار می‌رود(Roostita & Fleet, ۱۹۹٦). به‌عنوان کشت‌های کمکی، گونه‌های مخمر به توسعه طعم و بافت در طول تولید و رسیدگی انواع خاصی از پنیر کمک می‌کنند. این به دلیل فعالیت‌های لیپولیتیک و پروتئولیتیک آن‌ها است که می‌تواند زمان رسیدگی را کوتاه کرده و به تولید اقتصادی پنیر کمک کند(Roostita & Fleet, ۱۹۹٦) در بسیاری از موارد، رایج‌ترین مخمرها در پنیرهایی که بر روی سطح آن‌ها کپک یا باکتری رسیده شده است شامل *Kluyveromyces*، *Debaryomyces* و گونه‌های دیگر *Saccharomyces* هستند. مطالعات نشان داده‌اند که گونه‌های *Candida spp.*، *Candida zeylanoides* مخمرهای لبنی در پنیر فرانسوی Reblochon حضور دارند؛ مخمرهای *D. hansenii* و *K. marxianus* در پنیر *St.* Nectaire؛ و

Y. lipolytic، *K. marxianus* و *D. hansenii* در پنیر Tilsiter یافت می‌شوند(Corredor et al., ۲۰۰۰) بیشتر مخمرهایی که از سطح پنیرهای رسیده جداسازی می‌شوند، مقاوم به نمک هستند که از میان آن‌ها، *D. hansenii* می‌تواند مقادیر بالای کلرید سدیم را تحمل کرده و برای تکثیر خود از لاکتوز، اسید لاکتیک و اسید سیتریک استفاده کند (Gori et al., ۲۰۰۵). مخمرها از لاکتات باقی‌مانده برای کاهش اسیدیته سطح پنیر استفاده می‌کنند و ویتامین‌ها و مواد پیش‌ساز از جمله نیاسین، ریبوفلاوین و اسید پارا-آمینوبنزوییک تولید می‌کنند و به این ترتیب رشد *B. linens* را بر روی سطح پنیر ترویج می‌دهند(Seiler & Busse, ۱۹۹۰) . . *Debaryomyces hansenii* و *Y. lipolytica* برای تسریع فرآیند رسیدگی پنیر چدار و بهبود ویژگی‌های طعمی آن استفاده می‌شوند، در حالی که *Y. lipolytica* و *K. lactis* برای تسریع رسیدگی پنیر آبی به کار می‌روند(Ferreira & Viljoen, ۲۰۰۳). *Kluyveromyces lactis* و *K. marxianus* اجزای مهم میکروبیوتای پنیر هستند زیرا می‌توانند از لاکتوز باقی‌مانده از تخمیر در لخته استفاده کرده و دی‌اکسید کربن تولید کنند؛ این امر برای ایجاد ساختار باز در پنیرهایی مانند Roquefort مفید است(Dias et al., ۲۰۱٤) *Kluyveromyces marxianus* می‌تواند ترکیبات آروماتیک فرار را از طریق فعالیت پروتئولیتیک و لیپولیتیک در پنیرهای با پوسته آبی تولید کند و استرها (ترکیبات طعمی میوه‌ای) و استالدهید را از اتانول و اسیدهای کربوکسیلیک تولیدشده در طول تخمیر لاکتوز بسازد (Binetti et al., ۲۰۱۳).تحقیقات نشان داده‌اند که *Pi. kudriavzevii N-X* قوی‌ترین فعالیت پروتئولیتیک خارج سلولی را در آگار شیر بدون چربی دارد و طیفی از ترکیبات آروماتیک، از جمله اتانول، اتیل استات، ۳-متیل‌بوتانول و اسید استیک را در پنیر قزاقی تولید می‌کند(Zheng, Li, et al., ۲۰۱۸) . تحقیقات همچنین نشان داده‌اند که با افزودن مخمرهایی از جمله *K. marxianus* و *Pi. kudriavzevii*، بافت پنیر نسبتاً شکننده‌تر می‌شود(Xiao et al., ۲۰۲۰). *Kluyveromyces marxianus* به تشکیل اسیدهای آمینه آزاد و اسیدهای آلی، به‌ویژه گلوتامات و لاکتات، کمک می‌کند. علاوه بر این، *K. marxianus* عطرهایی مانند پیاز، روغنی و گلی به پنیر می‌بخشد. از سوی دیگر، *Pi. kudriavzevii* طعم‌های قوی شبیه به پیاز را تقویت می‌کند. همچنین، *K. lactis* و *Pichia fermentans* می‌توانند تخمیر کنند و میکروبیوتای مخمر معمول در پنیر فتا را تشکیل دهند(Rantsiou et al., ۲۰۰۸) . علاوه بر این، *Y. lipolytica* و *G. candidum* تأثیرات مهمی بر طعم پنیر در طول تولید و فرآیند رسیدگی آن دارند(Steensels & Verstrepen, ۲۰۱٤) . سویه‌های *Geotrichum candidum* در داخل و روی سطح پنیر یافت می‌شوند و در مراحل اولیه رسیدگی پنیر، به‌ویژه در پنیرهای Limburger، Tilsit و Romano، با سرعت رشد می‌کنند(Banjara et al., ۲۰۱۵) . با این حال، آنها قادر به متابولیسم گالاکتوز هستند اما لاکتوز را متابولیزه نمی‌کنند. در مقابل، *D. hansenii* به‌طور هم‌زمان لاکتوز و لاکتات را متابولیزه می‌کند که هر دو در مراحل اولیه رسیدن پنیر وجود دارند (Mansour et al., ۲۰۰۸)جالب است که *Y. lipolytica* کاملاً هوازی است و لاکتات را متابولیزه می‌کند *Geotrichum candidum*. فعال‌ترین گونه درگیر در تجزیه کازئین و چربی است که منجر به افزایش آزادسازی آمونیاک می‌شود(Dugat-Bony et al., ۲۰۱۵). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که *D. hansenii*، *G. candidum* و *Y. lipolytica* ممکن است ترکیبات فراری تولید کنند که به طعم پنیر کمک می‌کنند، مانند آلدهیدها و الکل‌های شاخه‌دار(Padilla et al., ۲۰۱٤) . به دلیل فعالیت‌های لیپولیتیک و پروتئولیتیک قوی خود، در مواد غذایی با محتوای بالای پروتئین یا چربی یافت می‌شود در طی فرآیند رسیدن پنیر، مقادیر زیادی از ترکیبات فرار، مانند اسیدهای آلی، سولفیدها، فوران‌ها و کتون‌های زنجیره کوتاه، توسط *Y. lipolytica* تولید می‌شود(Sørensen et al., ۲۰۱۱) همزیستی *Y. lipolytica* با *G. candidum* می‌تواند تأثیر منفی بر تشکیل هیف داشته باشد. علاوه بر این، *D. hansenii* و *Y. lipolytica* می‌توانند بر زیست‌بوم مخمرهای پنیرهای با پوسته شسته‌شده غالب شوند(Mounier et al., ۲۰۰۸). در حضور سایر مخمرها، مانند *Y. lipolytica* و *G. candidum*، جمعیت *D. hansenii* به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این حال، *D. hansenii* ممکن است رشد *K. lactis* و *G. candidum* را مهار کند(Lessard et al., ۲۰۱۲) .

در نهایت، مخمرها، باکتری‌ها و کپک‌های موجود در پنیر ممکن است اثر همزیستی داشته باشند که به توسعه طعم در پنیر کمک می‌کند، اما مکانیزم پیچیده زیربنایی آن نیاز به تحلیل بیشتری دارد. پنیرهای سنتی تخمیرشده عمدتاً به‌صورت طبیعی

و با استفاده از سویه‌های میکروبی متعدد تخمیر می‌شوند. مشکلات علمی، مانند مکانیزم نامشخص تشکیل مواد طعم‌دهنده و کیفیت طعم ناپایدار، به یک مانع جدی برای توسعه فرآیندهای استاندارد تولید پنیر تبدیل شده‌اند و انتقال تولید دستی به فرآوری صنعتی را به شدت محدود کرده‌اند. در سال‌های اخیر، مطالعاتی بر روی غربالگری سویه‌های میکروبی عملکردی که طعم پنیر را بهبود می‌بخشند، انجام شده است. یکی از مطالعات گزارش داده است که محتویات اتانول، استراز و گلیکول آسیل‌ترانسفراز از عوامل اصلی محدودکننده سنتز اتیل استات در کاممبرت فرانسوی هستند(Hong et al., ۲۰۱۸) . نتایج نشان داد که افزودن *L. lactis* CCFM ۱۲ با فعالیت بالای استراز و اتانول آسیل‌ترانسفراز، به‌طور قابل توجهی محتویات اتیل استات و عطر میوه‌ای را افزایش داد(Price et al., ۲۰۱٤)تأثیر افزودن مخمرهای عملکردی *Y. lipolytica* و *K. lactis* بر عطر پنیر آبی را بررسی کردند. این تأثیرات با استفاده از مدلی شامل *Y. lipolytica*، *K. lactis* و *Pe. roqueforti* مطالعه شد و نتایج نشان داد که تلقیح کم *K. lactis* با طعم پنیر، به‌ویژه تشکیل ترکیبات کتونی، ارتباط مثبت دارد. هنگامی که مقادیر کمی از *Y. lipolytica* و *K. lactis* استفاده شد، طعم پنیر آبی بهبود یافت(Sørensen et al., ۲۰۱۱) ترکیبی از *Y. lipolytica*، *S. cerevisiae* و *D. hansenii* را در فرآیند تخمیر پنیر تلقیح کردند تا کیفیت طعم پنیر را بهبود بخشند. در مقایسه با گروه کنترل، *Y. lipolytica* عمدتاً سولفیدها، فوران‌ها و کتون‌های زنجیره کوتاه تولید کرد، در حالی که *D. hansenii* به‌طور قابل توجهی محتویات آلدهیدها و الکل‌های شاخه‌دار را افزایش داد.

بنابراین، تقویت تشکیل طعم با تقویت این مخمرهای مفید در طی فرآیند رسیدن پنیر از اهمیت زیادی برخوردار است. در طی فرآیند رسیدن پنیر، توانایی پروتئولیز، لیپولیز و تجزیه لاکتوز مخمرها، همچنین جذب لاکتات و سیترات توسط آن‌ها نقش‌های مهمی ایفا می‌کنند – که همه این موارد به طور مستقیم با تشکیل طعم پنیر مرتبط هستند(Fox et al., ۱۹۹۸) از این رو، چگونگی حفظ پایداری طعم در پنیرهای سنتی دست‌ساز از طریق تقویت مخمرهای عملکردی، ایده‌هایی برای تحقیقات آینده ارائه خواهد داد.

نتیجه‌گیری

با پیشرفت علم و فناوری، استفاده از روش‌های سنتی ممکن است کاهش یابد. بنابراین، استفاده و حفاظت از منابع میکروبی مورد استفاده در غذاهای تخمیری سنتی، مانند پنیر، به‌طور فوری ضروری است. جمعیت میکروبی موجود در پنیر دارای سازگاری اکولوژیکی قوی است و همچنین تنوع ساختاری جامعه میکروبی و طعم‌های مختلف پنیرهای تولید شده در کشورهای گوناگون را تعیین می‌کند. تفاوت‌های منطقه‌ای و اقلیمی و تنوع فناوری‌های فرآوری منجر به تغییرات قابل‌توجهی در پنیرها در سراسر جهان شده‌اند، از جمله در عواملی مانند ظاهر و طعم. تأثیرات متابولیکی مخمرها بر فرآیند رسیدن و کیفیت پنیر مدت‌ها دست‌کم گرفته شده بود و مکانیسم‌های متابولیکی مخمرها تنها در سال‌های اخیر به تدریج روشن شده‌اند.

بنابراین، مطالعه رابطه ساختار جامعه مخمرها با تشکیل میکروبیوتای مخمری و مواد طعم‌دهنده در فرآیند تخمیر پنیر، کلید تولید پنیر با طعم مطلوب و کیفیت پایدار از طریق یک فرآیند استانداردسازی‌شده مخصوص پنیر است. به طور خلاصه، پنیر پتانسیل تبدیل شدن به محصولی لبنی با مصرف گسترده در آینده را دارد و از این رو، دارای چشم‌اندازهای بسیار گسترده‌ای در بازار است.بررسی حاضر یک پایه نظری برای توالی و انتخاب سویه‌های مخمری عملکردی و بهینه‌سازی فناوری‌های فرآوری پنیر به منظور بهبود طعم و کیفیت پنیر تخمیری ارائه کرد.

منابع

Akpınar, O., Uçar, F., & Yalçın, H. T. (۲۰۱۱). Screening and regulation of alkaline extracellular protease and ribonuclease production of Yarrowia lipolytica strains isolated and identified from different cheeses in Turkey. *Annals of Microbiology*, *61*, ۹۰۷–۹۱۵.

Aldrete-Tapia, A., Escobar-Ramírez, M. C., Tamplin, M. L., & Hernández-Iturriaga, M. (٢٠١٤). High-throughput sequencing of microbial communities in Poro cheese, an artisanal Mexican cheese. *Food Microbiology*, *44*, ١٣٦–١٤١.

Arruda, A. G., Godden, S., Rapnicki, P., Gorden, P., Timms, L., Aly, S. S., Lehenbauer, T. W., & Champagne, J. (٢٠١٣). Randomized noninferiority clinical trial evaluating ٣ commercial dry cow mastitis preparations: I. Quarter-level outcomes. *Journal of Dairy Science*, *96*(٧), ٤٤١٩–٤٤٣٥.

Banjara, N., Suhr, M. J., & Hallen-Adams, H. E. (٢٠١٥). Diversity of yeast and mold species from a variety of cheese types. *Current Microbiology*, *70*, ٧٩٢–٨٠٠.

Banks, J. M., Brechany, E. Y., & Christie, W. W. (١٩٨٩). The production of low fat Cheddar-type cheese. *International Journal of Dairy Technology*, *42*(١), ٦–٩.

Bertuzzi, A. S., McSweeney, P. L. H., Rea, M. C., & Kilcawley, K. N. (٢٠١٨). Detection of volatile compounds of cheese and their contribution to the flavor profile of surface-ripened cheese. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *17*(٢), ٣٧١–٣٩٠.

Binetti, A., Carrasco, M., Reinheimer, J., & Suárez, V. (٢٠١٣). Yeasts from autochthonal cheese starters: technological and functional properties. *Journal of Applied Microbiology*, *115*(٢), ٤٣٤–٤٤٤.

Branciari, R., Nijman, I. J., Plas, M. E., Di Antonio, E., & Lenstra, J. A. (٢٠٠٠). Species origin of milk in Italian mozzarella and Greek feta cheese. *Journal of Food Protection*, *63*(٣), ٤٠٨–٤١١.

Budak, S. O., Figge, M. J., Houbraken, J., & de Vries, R. P. (٢٠١٦). The diversity and evolution of microbiota in traditional Turkish Divle Cave cheese during ripening. *International Dairy Journal*, *58*, ٥٠–٥٣.

Califano, A. N., & Bevilacqua, A. E. (٢٠٠٠). Multivariate analysis of the organic acids content of Gouda type cheese during ripening. *Journal of Food Composition and Analysis*, *13*(٦), ٩٤٩–٩٦٠.

Carpino, S., Randazzo, C. L., Pino, A., Russo, N., Rapisarda, T., Belvedere, G., & Caggia, C. (٢٠١٧). Influence of PDO Ragusano cheese biofilm microbiota on flavour compounds formation. *Food Microbiology*, *61*, ١٢٦–١٣٥.

Centeno, J. A., Tomillo, F. J., Fernández-García, E., Gaya, P., & Nuñez, M. (٢٠٠٢). Effect of wild strains of Lactococcus lactis on the volatile profile and the sensory characteristics of ewes' raw milk cheese. *Journal of Dairy Science*, *85*(١٢), ٣١٦٤–٣١٧٢.

Ceruti, R. J., Zorrilla, S. E., & Sihufe, G. A. (٢٠١٦). Volatile profile evolution of Reggianito cheese during ripening under different temperature–time combinations. *European Food Research and Technology*, *242*, ١٣٦٩–١٣٧٨.

Ceugniez, A., Drider, D., Jacques, P., & Coucheney, F. (٢٠١٥). Yeast diversity in a traditional French cheese "Tomme d'orchies" reveals infrequent and frequent species with associated benefits. *Food Microbiology*, *52*, ١٧٧–١٨٤.

Corredor, M., Davila, A.-M., Gaillardin, C., & Casaregola, S. (٢٠٠٠). DNA probes specific for the yeast species Debaryomyces hansenii: useful tools for rapid identification. *FEMS Microbiology Letters*, *193*(١), ١٧١–١٧٧.

Costa, M. J., Maciel, L. C., Teixeira, J. A., Vicente, A. A., & Cerqueira, M. A. (٢٠١٨). Use of edible films and coatings in cheese preservation: Opportunities and challenges. *Food Research International*, *107*, ٨٤–٩٢.

Curioni, P. M. G., & Bosset, J. O. (٢٠٠٢). Key odorants in various cheese types as determined by gas chromatography-olfactometry. *International Dairy Journal*, *12*(١٢), ٩٥٩–٩٨٤.

D'Incecco, P., Limbo, S., Hogenboom, J., Rosi, V., Gobbi, S., & Pellegrino, L. (٢٠٢٠). Impact of extending hard-cheese ripening: A multiparameter characterization of Parmigiano reggiano cheese ripened up to ٥٠ months. *Foods*, *9*(٣), ٢٦٨.

De Filippis, F., Genovese, A., Ferranti, P., Gilbert, J. A., & Ercolini, D. (٢٠١٦). Metatranscriptomics reveals temperature-driven functional changes in microbiome impacting cheese maturation rate. *Scientific Reports*, *6*(١), ٢١٨٧١.

Deeth, H. C., & Touch, V. (۲۰۰۰). Methods for detecting lipase activity in milk and milk products. *Methods*, *5*(۵), ۵۵۵.

Delgado, F. J., González-Crespo, J., Cava, R., García-Parra, J., & Ramírez, R. (۲۰۱۰). Characterisation by SPME–GC–MS of the volatile profile of a Spanish soft cheese PDO Torta del Casar during ripening. *Food Chemistry*, *118*(۱), ۱۸۲–۱۸۹.

Dias, O., Pereira, R., Gombert, A. K., Ferreira, E. C., & Rocha, I. (۲۰۱٤). iOD۹۰۷, the first genome-scale metabolic model for the milk yeast Kluyveromyces lactis. *Biotechnology Journal*, *9*(٦), ۷۷٦–۷۹۰.

Dimos, A., Urbacha, G. E., & Miller, A. J. (۱۹۹٦). Changes in flavour and volatiles of full-fat and reducedfat cheddar cheeses during maturation. *International Dairy Journal*, *6*(۱۰), ۹۸۱–۹۹۵.

Dos Santos, M. T. P. G., Benito, M. J., de Guía Córdoba, M., Alvarenga, N., & de Herrera, S. R.-M. S. (۲۰۱۷). Yeast community in traditional Portuguese Serpa cheese by culture-dependent and-independent DNA approaches. *International Journal of Food Microbiology*, *262*, ٦۳–۷۰.

Dugat-Bony, E., Straub, C., Teissandier, A., Onésime, D., Loux, V., Monnet, C., Irlinger, F., Landaud, S., Leclercq-Perlat, M.-N., & Bento, P. (۲۰۱۵). Overview of a surface-ripened cheese community functioning by meta-omics analyses. *PloS One*, *10*(٤), e۰۱۲٤۳٦۰.

Dzialo, M. C., Park, R., Steensels, J., Lievens, B., & Verstrepen, K. J. (۲۰۱۷). Physiology, ecology and industrial applications of aroma formation in yeast. *FEMS Microbiology Reviews*, *41*(Supp_۱), S۹۵–S۱۲۸.

El Sheikha, A. F., & Hu, D.-M. (۲۰۲۰). Molecular techniques reveal more secrets of fermented foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *60*(۱), ۱۱–۳۲.

El Sheikha, A. F., & Montet, D. (۲۰۱٤). African fermented foods: historical roots and real benefits. *Microorganisms and Fermentation of Traditional Foods. Boca Raton (FL): CRC Press, Taylor and Francis Group*, ۲٤۸–۲۸۲.

Engel, E., Septier, C., Leconte, N., Salles, C., & Le Quéré, J.-L. (۲۰۰۱). Determination of taste-active compounds of a bitter Camembert cheese by omission tests. *Journal of Dairy Research*, *68*(٤), ٦۷۵–٦۸۸.

Engels, W. J. M., Dekker, R., De Jong, C., Neeter, R., & Visser, S. (۱۹۹۷). A comparative study of volatile compounds in the water-soluble fraction of various types of ripened cheese. *International Dairy Journal*, *7*(٤), ۲۵۵–۲٦۳.

Ferreira, A. D., & Viljoen, B. C. (۲۰۰۳). Yeasts as adjunct starters in matured Cheddar cheese. *International Journal of Food Microbiology*, *86*(۱–۲), ۱۳۱–۱٤۰.

Forde, A., & Fitzgerald, G. F. (۲۰۰۰). Biotechnological approaches to the understanding and improvement of mature cheese flavour. *Current Opinion in Biotechnology*, *11*(۵), ٤۸٤–٤۸۹.

Fox, P. F., Law, J., McSweeney, P. L. H., & Wallace, J. (۱۹۹۳). Biochemistry of cheese ripening. *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology: Volume 1 General Aspects*, ۳۸۹–٤۳۸.

Fox, P. F., Mcsweeney, P. L. H., & Paul, L. H. (۱۹۹۸). *Dairy chemistry and biochemistry*.

Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., O'Mahony, J. A., Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (۲۰۱۵). Chemistry and biochemistry of cheese. *Dairy Chemistry and Biochemistry*, ٤۹۹–۵٤٦.

Frenzel, M., Zerge, K., Clawin-Rädecker, I., & Lorenzen, P. C. (۲۰۱۵). Comparison of the galacto-oligosaccharide forming activity of different β-galactosidases. *LWT-Food Science and Technology*, *60*(۲), ۱۰٦۸–۱۰۷۱.

Fröhlich-Wyder, M., Arias-Roth, E., & Jakob, E. (۲۰۱۹). Cheese yeasts. *Yeast*, *36*(۳), ۱۲۹–۱٤۱.

Gan, H. H., Yan, B., Linforth, R. S. T., & Fisk, I. D. (۲۰۱٦). Development and validation of an APCI-MS/GC–MS approach for the classification and prediction of Cheddar cheese maturity. *Food Chemistry*, *190*, ٤٤۲–٤٤۷.

Gkatzionis, K., Yunita, D., Linforth, R. S. T., Dickinson, M., & Dodd, C. E. R. (۲۰۱٤). Diversity and activities

of yeasts from different parts of a Stilton cheese. *International Journal of Food Microbiology*, *177*, ۱۰۹–۱۱۶.

Gori, K., Mortensen, H. D., Arneborg, N., & Jespersen, L. (۲۰۰۵). Expression of the GPD۱ and GPP۲ orthologues and glycerol retention during growth of Debaryomyces hansenii at high NaCl concentrations. *Yeast*, *22*(۱۵), ۱۲۱۳–۱۲۲۲.

Holland, R., Liu, S.-Q., Crow, V. L., Delabre, M.-L., Lubbers, M., Bennett, M., & Norris, G. (۲۰۰۵). Esterases of lactic acid bacteria and cheese flavour: Milk fat hydrolysis, alcoholysis and esterification. *International Dairy Journal*, *15*(۶–۹), ۷۱۱–۷۱۸.

Hong, Q., Liu, X. M., Hang, F., Zhao, J. X., Zhang, H., & Chen, W. (۲۰۱۸). Screening of adjunct cultures and their application in ester formation in Camembert-type cheese. *Food Microbiology*, *70*, ۳۳–۴۱.

Irlinger, F., & Mounier, J. (۲۰۰۹). Microbial interactions in cheese: implications for cheese quality and safety. *Current Opinion in Biotechnology*, *20*(۲), ۱۴۲–۱۴۸.

Iwasawa, A., Suzuki-Iwashima, A., Iida, F., & Shiota, M. (۲۰۱۴). Effects of flavor and texture on the desirability of Cheddar cheese during ripening. *Food Science and Technology Research*, *20*(۱), ۲۳–۲۹.

Jakobsen, M., & Narvhus, J. (۱۹۹۶). Yeasts and their possible beneficial and negative effects on the quality of dairy products. *International Dairy Journal*, *6*(۸–۹), ۷۵۵–۷۶۸.

Kelly, A. L., Huppertz, T., & Sheehan, J. J. (۲۰۰۸). Pre-treatment of cheese milk: principles and developments. *Dairy Science and Technology*, *88*(۴–۵), ۵۴۹–۵۷۲.

Khattab, A. R., Guirguis, H. A., Tawfik, S. M., & Farag, M. A. (۲۰۱۹). Cheese ripening: A review on modern technologies towards flavor enhancement, process acceleration and improved quality assessment. *Trends in Food Science & Technology*, *88*, ۳۴۳–۳۶۰.

Lagoda, M. E., O'Driscoll, K., Galli, M. C., Cerón, J. J., Ortín-Bustillo, A., Marchewka, J., & Boyle, L. A. (۲۰۲۳). Indicators of improved gestation housing of sows. Part II: Effects on physiological measures, reproductive performance and health of the offspring. *Animal Welfare*, *32*, e۵۲.

Lai, F.-N., Zhai, H.-L., Cheng, M., Ma, J.-Y., Cheng, S.-F., Ge, W., Zhang, G.-L., Wang, J.-J., Zhang, R.-Q., & Wang, X. (۲۰۱۶). Whole-genome scanning for the litter size trait associated genes and SNPs under selection in dairy goat (Capra hircus). *Scientific Reports*, *6*(۱), ۳۸۰۹۶.

Lawrence, R. C., Gilles, J., Creamer, L. K., Crow, V. L., Heap, H. A., Honoré, C. G., Johnston, K. A., & Samal, P. K. (۲۰۰۴). Cheddar cheese and related dry-salted cheese varieties. In *Cheese: chemistry, physics and microbiology* (Vol. ۲, pp. ۷۱–۱۰۲). Elsevier.

Legg, A. K., Carr, A. J., Bennett, R. J., & Johnston, K. A. (۲۰۱۷). General aspects of cheese technology. In *Cheese* (pp. ۶۴۳–۶۷۵). Elsevier.

Lessard, M.-H., Bélanger, G., St-Gelais, D., & Labrie, S. (۲۰۱۲). The composition of Camembert cheese-ripening cultures modulates both mycelial growth and appearance. *Applied and Environmental Microbiology*, *78*(۶), ۱۸۱۳–۱۸۱۹.

Łopusiewicz, Ł., Drozłowska, E., Tarnowiecka-Kuca, A., Bartkowiak, A., Mazurkiewicz-Zapałowicz, K., & Salachna, P. (۲۰۲۰). Biotransformation of flaxseed oil cake into bioactive camembert-analogue using lactic acid bacteria, Penicillium camemberti and Geotrichum candidum. *Microorganisms*, *8*(۹), ۱۲۶۶.

Lucey, J. A., & Fox, P. F. (۱۹۹۳). Importance of calcium and phosphate in cheese manufacture: A review. *Journal of Dairy Science*, *76*(۶), ۱۷۱۴–۱۷۲۴.

Majcher, M. A., Myszka, K., Gracka, A., Grygier, A., & Jeleń, H. H. (۲۰۱۷). Key odorants of lazur, a polish mold-ripened cheese. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*(۱۰), ۲۴۴۳–۲۴۴۸.

Mallatou, H., Pappa, E., & Massouras, T. (۲۰۰۳). Changes in free fatty acids during ripening of Teleme cheese made with ewes', goats', cows' or a mixture of ewes' and goats' milk. *International Dairy Journal*, *13*(۲–۳), ۲۱۱–۲۱۹.

Mansour, S., Beckerich, J. M., & Bonnarme, P. (۲۰۰۸). Lactate and amino acid catabolism in the cheese-

ripening yeast Yarrowia lipolytica. *Applied and Environmental Microbiology*, *74*(٢١), ٦٥٠٥–٦٥١٢.

Marilley, L., & Casey, M. G. (٢٠٠٤). Flavours of cheese products: metabolic pathways, analytical tools and identification of producing strains. *International Journal of Food Microbiology*, *90*(٢), ١٣٩–١٥٩.

Marino, M., Innocente, N., Maifreni, M., Mounier, J., Cobo-Díaz, J. F., Coton, E., Carraro, L., & Cardazzo, B. (٢٠١٧). Diversity within Italian cheesemaking brine-associated bacterial communities evidenced by massive parallel ١٦S rRNA gene tag sequencing. *Frontiers in Microbiology*, *8*, ٢١١٩.

Marsili, R. (١٩٨٥). Monitoring chemical changes in Cheddar cheese during aging by high performance liquid chromatography and gas chromatography techniques. *Journal of Dairy Science*, *68*(١٢), ٣١٥٥–٣١٦١.

McSweeney, P. L. H. (٢٠٠٤). Biochemistry of cheese ripening. *International Journal of Dairy Technology*, *57*(٢-٣), ١٢٧–١٤٤.

McSweeney, P. L. H. (٢٠١١). *Biochemistry of cheese ripening. In "Encyclopedia of Dairy Sciences Second edition," ed. by JW Fuquay, PF Fox, and PLH McSweeney*. Elsevier Academic Press, London.

McSweeney, P. L. H., Fox, P. F., & Ciocia, F. (٢٠١٧). Metabolism of residual lactose and of lactate and citrate. In *Cheese* (pp. ٤١١–٤٢١). Elsevier.

McSweeney, P. L. H., Ottogalli, G., & Fox, P. F. (٢٠٠٤). Diversity of cheese varieties: An overview. *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*, *2*, ١–٢٣.

McSweeney, P. L. H., & Sousa, M. J. (٢٠٠٠). Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening: A review. *Le Lait*, *80*(٣), ٢٩٣–٣٢٤.

Melchiorsen, R. C., Jokumsen, V. K., Villadsen, J., Israelsen, H., & Arnau, J. (٢٠٠٢). The level of pyruvate-formate lyase controls the shift from homolactic to mixed-acid product formation in Lactococcus lactis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *58*, ٣٣٨–٣٤٤.

Monnet, C., Dugat-Bony, E., Swennen, D., Beckerich, J.-M., Irlinger, F., Fraud, S., & Bonnarme, P. (٢٠١٦). Investigation of the activity of the microorganisms in a reblochon-style cheese by metatranscriptomic analysis. *Frontiers in Microbiology*, *7*, ٥٣٦.

Monnet, C., Landaud-Liautaud, S., Bonnarme, P., & Swennen, D. (٢٠١٥). Growth and adaptation of microorganisms on the cheese surface. *FEMS Microbiology Letters*, *362*(١), ١–٩.

Monti, L., Negri, S., Meucci, A., Stroppa, A., Galli, A., & Contarini, G. (٢٠١٧). Lactose, galactose and glucose determination in naturally "lactose free" hard cheese: HPAEC-PAD method validation. *Food Chemistry*, *220*, ١٨–٢٤.

Mounier, J., Monnet, C., Jacques, N., Antoinette, A., & Irlinger, F. (٢٠٠٩). Assessment of the microbial diversity at the surface of Livarot cheese using culture-dependent and independent approaches. *International Journal of Food Microbiology*, *133*(١–٢), ٣١–٣٧.

Mounier, J., Monnet, C., Vallaeys, T., Arditi, R., Sarthou, A.-S., Hélias, A., & Irlinger, F. (٢٠٠٨). Microbial interactions within a cheese microbial community. *Applied and Environmental Microbiology*, *74*(١), ١٧٢–١٨١.

Munir, M. T., Yu, W., Young, B. R., Wilson, D. I., Information, I., & Centre, C. (٢٠١٥). The current status of process analytical technologies in the dairy industry. *Trends in Food Science & Technology*, *43*(٢), ٢٠٥–٢١٨.

Nielsen, K. F., Dalsgaard, P. W., Smedsgaard, J., & Larsen, T. O. (٢٠٠٥). Andrastins A− D, Penicillium roqueforti metabolites consistently produced in blue-mold-ripened cheese. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(٨), ٢٩٠٨–٢٩١٣.

Ozturkoglu-Budak, S., Wiebenga, A., Bron, P. A., & de Vries, R. P. (٢٠١٦). Protease and lipase activities of fungal and bacterial strains derived from an artisanal raw ewe's milk cheese. *International Journal of Food Microbiology*, *237*, ١٧–٢٧.

Padilla, B., Belloch, C., López-Díez, J. J., Flores, M., & Manzanares, P. (٢٠١٤). Potential impact of dairy yeasts on the typical flavour of traditional ewes' and goats' cheeses. *International Dairy Journal*, *35*(٢), ١٢٢–

۱۲۹.

Panikuttira, B., O'Shea, N., Tobin, J. T., Tiwari, B. K., & O'Donnell, C. P. (۲۰۱۸). Process analytical technology for cheese manufacture. *International Journal of Food Science & Technology*, *53*(۸), ۱۸۰۳–۱۸۱۵.

Pino, A., Liotta, L., Randazzo, C. L., Todaro, A., Mazzaglia, A., De Nardo, F., Chiofalo, V., & Caggia, C. (۲۰۱۸). Polyphasic approach to study physico-chemical, microbiological and sensorial characteristics of artisanal Nicastrese goat's cheese. *Food Microbiology*, *70*, ۱٤۳–۱٥٤.

Plutowska, B., & Wardencki, W. (۲۰۰۷). Aromagrams–Aromatic profiles in the appreciation of food quality. *Food Chemistry*, *101*(۲), ۸٤٥–۸۷۲.

Price, E. J., Linforth, R. S. T., Dodd, C. E. R., Phillips, C. A., Hewson, L., Hort, J., & Gkatzionis, K. (۲۰۱٤). Study of the influence of yeast inoculum concentration (Yarrowia lipolytica and Kluyveromyces lactis) on blue cheese aroma development using microbiological models. *Food Chemistry*, *145*, ٤٦٤–٤۷۲.

Rantsiou, K., Urso, R., Dolci, P., Comi, G., & Cocolin, L. (۲۰۰۸). Microflora of Feta cheese from four Greek manufacturers. *International Journal of Food Microbiology*, *126*(۱–۲), ۳٦–٤۲.

Rea, M. C., Görges, S., Gelsomino, R., Brennan, N. M., Mounier, J., Vancanneyt, M., Scherer, S., Swings, J., & Cogan, T. M. (۲۰۰۷). Stability of the biodiversity of the surface consortia of Gubbeen, a red-smear cheese. *Journal of Dairy Science*, *90*(٥), ۲۲۰۰–۲۲۱۰.

Reif, G. D., Shahani, K. M., Vakil, J. R., & Crowe, L. K. (۱۹۷٦). Factors affecting B-complex vitamin content of cottage cheese. *Journal of Dairy Science*, *59*(۳), ٤۱۰–٤۱٥.

Roostita, R., & Fleet, G. H. (۱۹۹٦). The occurrence and growth of yeasts in Camembert and blue-veined cheeses. *International Journal of Food Microbiology*, *28*(۳), ۳۹۳–٤۰٤.

Sandine, W. E., & Elliker, P. R. (۱۹۷۰). Microbially induced flavors and fermented foods. Flavor in fermented dairy products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *18*(٤), ٥٥۷–٥٦۲.

Santiago-López, L., Aguilar-Toalá, J. E., Hernández-Mendoza, A., Vallejo-Cordoba, B., Liceaga, A. M., & González-Córdova, A. F. (۲۰۱۸). Invited review: Bioactive compounds produced during cheese ripening and health effects associated with aged cheese consumption. *Journal of Dairy Science*, *101*(٥), ۳۷٤۲–۳۷٥۷.

Schwenninger, S. M., Meile, L., & Lacroix, C. (۲۰۱۱). Antifungal lactic acid bacteria and propionibacteria for food biopreservation. In *Protective cultures, antimicrobial metabolites and bacteriophages for food and beverage biopreservation* (pp. ۲۷–٦۲). Elsevier.

Seiler, H., & Busse, M. (۱۹۹۰). The yeasts of cheese brines. *International Journal of Food Microbiology*, *11*(۳–٤), ۲۸۹–۳۰۳.

Smit, G., Smit, B. A., & Engels, W. J. M. (۲۰۰٥). Flavour formation by lactic acid bacteria and biochemical flavour profiling of cheese products. *FEMS Microbiology Reviews*, *29*(۳), ٥۹۱–٦۱۰.

Sørensen, L. M., Gori, K., Petersen, M. A., Jespersen, L., & Arneborg, N. (۲۰۱۱). Flavour compound production by Yarrowia lipolytica, Saccharomyces cerevisiae and Debaryomyces hansenii in a cheese-surface model. *International Dairy Journal*, *21*(۱۲), ۹۷۰–۹۷۸.

Spano, G., Russo, P., Lonvaud-Funel, A., Lucas, P., Alexandre, H., Grandvalet, C., Coton, E., Coton, M., Barnavon, L., & Bach, B. (۲۰۱۰). Biogenic amines in fermented foods. *European Journal of Clinical Nutrition*, *64*(۳), S۹٥–S۱۰۰.

Speranza, B., Racioppo, A., Beneduce, L., Bevilacqua, A., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (۲۰۱۷). Autochthonous lactic acid bacteria with probiotic aptitudes as starter cultures for fish-based products. *Food Microbiology*, *65*, ۲٤٤–۲٥۳.

Steensels, J., & Verstrepen, K. J. (۲۰۱٤). Taming wild yeast: potential of conventional and nonconventional yeasts in industrial fermentations. *Annual Review of Microbiology*, *68*(۱), ٦۱–۸۰.

Suzuki-Iwashima, A., Matsuura, H., Iwasawa, A., & Shiota, M. (۲۰۲۰). Metabolomics analyses of the combined effects of lactic acid bacteria and Penicillium camemberti on the generation of volatile compounds in

model mold-surface-ripened cheeses. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *129*(۳), ۳۳۳–۳٤۷.

Suzzi, G., Lombardi, A., Lanorte, M. T., Caruso, M., Andrighetto, C., & Gardini, F. (۲۰۰۰). Phenotypic and genotypic diversity of yeasts isolated from water-buffalo Mozzarella cheese. *Journal of Applied Microbiology*, *88*(۱), ۱۱۷–۱۲۳.

Upreti, P., & Metzger, L. E. (۲۰۰٦). Influence of calcium and phosphorus, lactose, and salt-to-moisture ratio on Cheddar cheese quality: Manufacture and composition. *Journal of Dairy Science*, *89*(۲), ٤۲۰–٤۲۸.

Vedamuthu, E. R. (۱۹۹٤). The dairy Leuconostoc: use in dairy products. *Journal of Dairy Science*, *77*(۹), ۲۷۲٥–۲۷۳۷.

Viljoen, B. C., Khoury, A. R., & Hattingh, A. (۲۰۰۳). Seasonal diversity of yeasts associated with white-surface mould-ripened cheeses. *Food Research International*, *36*(۳), ۲۷٥–۲۸۳.

Voigt, D. D., Chevalier, F., Donaghy, J. A., Patterson, M. F., Qian, M. C., & Kelly, A. L. (۲۰۱۲). Effect of high-pressure treatment of milk for cheese manufacture on proteolysis, lipolysis, texture and functionality of Cheddar cheese during ripening. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *13*, ۲۳–۳۰.

Wang, C., Shi, D., & Gong, G. (۲۰۰۸). Microorganisms in Daqu: a starter culture of Chinese Maotai-flavor liquor. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *24*, ۲۱۸۳–۲۱۹۰.

Wolfe, B. E., Button, J. E., Santarelli, M., & Dutton, R. J. (۲۰۱٤). Cheese rind communities provide tractable systems for in situ and in vitro studies of microbial diversity. *Cell*, *158*(۲), ٤۲۲–٤۳۳.

Wu, Q., Xu, Y., & Chen, L. (۲۰۱۲). Diversity of yeast species during fermentative process contributing to Chinese Maotai-flavour liquor making. *Letters in Applied Microbiology*, *55*(٤), ۳۰۱–۳۰۷.

Xiao, J., Chen, Y., Li, J., Shi, X., Deng, L., & Wang, B. (۲۰۲۰). Evaluation of the effect of auxiliary starter yeasts with enzyme activities on Kazak cheese quality and flavor. *Frontiers in Microbiology*, *11*, ٦۱٤۲۰۸.

Zheng, X., Ge, Z., Lin, K., Zhang, D., Chen, Y., Xiao, J., Wang, B., & Shi, X. (۲۰۲۱). Dynamic changes in bacterial microbiota succession and flavour development during milk fermentation of Kazak artisanal cheese. *International Dairy Journal*, *113*, ۱۰٤۸۷۸.

Zheng, X., Li, K., Shi, X., Ni, Y., Li, B., & Zhuge, B. (۲۰۱۸). Potential characterization of yeasts isolated from Kazak artisanal cheese to produce flavoring compounds. *MicrobiologyOpen*, *7*(۱), e۰۰٥۳۳.

Zheng, X., Liu, F., Shi, X., Wang, B., Li, K., Li, B., & Zhuge, B. (۲۰۱۸). Dynamic correlations between microbiota succession and flavor development involved in the ripening of Kazak artisanal cheese. *Food Research International*, *105*, ۷۳۳–۷٤۲.

Zhu, J., Chen, F., Wang, L., Niu, Y., Yu, D., Shu, C., Chen, H., Wang, H., & Xiao, Z. (۲۰۱٥). Comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using GC–olfactometry, GC–FPD, and GC–MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *63*(۳٤), ۷٤۹۹–۷٥۱۰.

Cheese Processing, Microbial Flora, and Biochemical Pathways Generating Volatile Flavor Compounds in Cheese

Mohammad Amin Monsef Esfahani[1]

PhD Candidate in Food Science and Technology, specializing in Biotechnology, Department of Food Science and Technology, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Marjaneh Sedaghati

Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Biological Sciences, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Cheese has a long history as a naturally fermented dairy product, encompassing a wide range of unique flavors. Microorganisms are an essential component of different types of cheese, playing crucial roles in its production and maturation. However, cheeses from various countries are still predominantly handcrafted, with differing processing technologies, complex microbial flora, and highly variable flavor profiles. Thus, studying the general processing technologies and the relationship between microbial flora and flavor formation in cheese is vital for identifying factors influencing aroma development.

This article reviews recent research advancements in general cheese processing technology, key control points in natural cheese production, biochemical pathways involved in the formation of flavor compounds, and the diversity and role of yeasts in cheese. Modern identification technologies, the evolution of microbial structures, the transformation of microbial populations, and their correlation with flavor in cheeses from different countries are analyzed. These findings highlight the importance of understanding the relationship between microbial flora and the mechanisms influencing aroma and flavor in cheese.

Keywords: Cheese, Flavor Compounds, Processing, Yeasts, Biochemical Pathways

۱-Corresponding Author