اپی‌ژنتیک در صنایع غذایی: بررسی مفاهیم، کاربردها و آینده‌پژوهی

ماهان ریزه وندی [۱]، سیده یاسمن هاشمی [۲]، پریسا طهماسبی [۳]*

۱- دانشجوی کارشناسی،گروه زیست شناسی، دانشکده علوم پایه،دانشگاه ایلام،ایلام،ایران

پست الکترونیک نویسنده اول: mahanri13b@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی،گروه علوم ومهندسی صنایع غذایی، دانشکده پیرادامپزشکی،دانشگاه ایلام،ایلام،ایران

پست الکترونیک نویسنده دوم: yhashemi253@gmail.com

۳- استادیار گروه زیست شناسی، دانشکده علوم پایه،دانشگاه ایلام،ایلام،ایران

***پست الکترونیک نویسنده مسئول: P.tahmasbi@ilam.ac.ir**

چکیده

این مقاله مروری به بررسی اپی‌ژنتیک و نقش آن در صنعت غذایی می‌پردازد. در ابتدا، مفاهیم پایه‌ای شامل تفاوت با ژنتیک و مکانیسم‌های کلیدی نظیر متیلاسیون DNA و اصلاح هیستون‌ها مرور می‌شود. سپس، کاربردهای مهم فناوری‌های اپی‌ژنتیک در تضمین کیفیت مواد غذایی، توسعه محصولات غنی‌شده، اصلاح صفات کشاورزی و فرآوری و نگهداری محصولات بررسی می‌شود. فناوری‌های موجود در این حوزه، از جمله ویرایش هدفمند و تحلیل داده‌های اپی‌ژنتیکی، نقش اساسی دارند. همچنین، چالش‌های اخلاقی، ایمنی، و نیازهای تنظیم مقررات، موارد مهمی هستند که باید توجه ویژه شوند. در بخش آینده‌پژوهی، روندهای نوظهور، فرصت‌ها و تهدیدهای این فناوری در آینده صنعت غذایی تحلیل می‌شوند. در نهایت، ضرورت توسعه تحقیقات بیشتر و سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه برای بهره‌برداری مسئولانه از فناوری‌های اپی‌ژنتیک تأکید می‌شود. نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که بهره‌مندی منطقی و اخلاقی از این فناوری، می‌تواند در تحقق امنیت غذایی و پایداری زیست‌محیطی نقش مهمی ایفا کند.

کلمات کلیدی:

اپی ژنتیک،صنایع غذایی،مفاهیم

مقدمه

در دهه‌های اخیر،علم اپی‌ژنتیک به عنوان یکی از شاخه‌های نوظهور زیست‌فناوری مورد توجه قرار گرفته است. این علم با پژوهش در فرآیندهای تغییرپذیری بیولوژیکی بدون تغییر در توالیDNA ، به درک عمیق‌تری از نحوه تنظیم ژن‌ها و پاسخ‌های بیولوژیک می‌پردازد. کاربردهای گسترده اپی‌ژنتیک در حوزه‌های مختلف مانند پزشکی و زیست‌فناوری پایه، این روزها حوزه صنایع غذایی را نیز تحت تاثیر قرار داده است.

با توجه به نیاز روزافزون به تولید مواد غذایی سالم‌تر، مقاوم‌تر و استاندارد، تحقیقات در زمینه‌های اپی‌ژنتیک فرصت‌های جدیدی را برای بهبود کیفیت، ایمنی و پایداری محصولات غذایی فراهم می‌کند. این مقاله مروری بر مفاهیم پایه، نقش‌ها، کاربردها وچالش‌های پیش‌روی این فناوری در صنعت غذایی تمرکز خواهد داشت و افق‌های آینده‌پژوهی در این حوزه را بررسی می‌کند. (1)

مفاهیم پایه اپی‌ژنتیک

ژنتیک بر توالی و ساختار DNA تمرکز دارد، در حالی که اپی‌ژنتیک بر تنظیم فعالیت و بیان ژن‌ها متمرکز است و این دو حوزه مکمل هم هستند، اما تفاوت‌های بنیادی در اهداف و فرآیندهای مورد مطالعه دارند(2). .

اپی‌ژنتیک شاخه‌ای از زیست‌فناوری است که به مطالعه تغییراتی در فعالیت و تنظیم ژن‌ها می‌پردازد، بدون اینکه توالی DNAتغییر کند. این تغییرات، ژن‌ها را فعال یا غیرفعال می‌کنند و نقش حیاتی در فرآیندهای زیستی، توسعه ارگانیزم‌ها، و پاسخ‌های محیطی دارند. (3)

مکانیسم‌های اصلی اپی‌ژنتیک شامل موارد زیر است.

- متیلاسیون DNA: این فرآیند در آن گروه‌های متیل ($-CH_3$) به نواحی خاصی ازDNA ، به‌ویژه در قسمت‌های پرایمر (مناطق پرکاربرد در تنظیم ژن) افزوده می‌شود. این کار معمولاً فعالیت ژن را کاهش می‌دهد و بدین ترتیب ژن را خاموش می‌کند یا سطح بیان آن را کنترل می‌نماید. متیلاسیون در تنظیم فتوسنتز، پاسخ‌های استرسی و توسعه سلول نقش دارد(4).

- اصلاح هیستون‌ها :هیستون‌ها پروتئین‌های هسته‌ای هستند که DNA بر آن‌ها پیچیده شده و ساختار کروماتین را شکل می‌دهند. تغییرات شیمیایی مانند فسفریلاسیون، متیلاسیون یا آزیله‌سازی روی هیستون‌ها، ساختار کروماتین را تغییر می‌دهد و در نتیجه، میزان دسترسی ژن‌ها برای ترجمه و بیان تنظیم می‌شود(5).

- RNAهای غیرکدکننده (مثل miRNA و siRNA): این نوعRNA ها که برخلافRNA های کدکننده پروتئین، خود محصولی تولید نمی‌کنند، در کنترل فرآیندهای سلولی و تنظیم فعالیت ژن‌ها نقش دارند. آن‌ها می‌توانند ترجمه پیام‌های ژنی خاص را مهار کرده یا بر پایداری mRNA تاثیر بگذارند(6).

این مکانیسم‌ها به طور مستقیم بر فرآیندهای زیستی، توسعه، و پاسخ به محیط تاثیر می‌گذارند، و مهم است بدانیم که این تغییرات، معمولاً قابل برگشت و پویا هستند. در نتیجه، اپی‌ژنتیک ابزاری قدرتمند برای تنظیم دقیق عملکرد ژن‌ها است که نقش مهمی در سلامت، بیماری‌ها و اصلاح مواد غذایی ایفا می‌کند.

کاربردهای اپی‌ژنتیک در صنایع غذایی

اپی‌ژنتیک به عنوان یک علم نوین، دارای امکانات و پتانسیل‌های متعددی در بهبود و توسعه صنایع غذایی است. استفاده از فناوری‌های اپی‌ژنتیک می‌تواند در بهبود کیفیت، ایمنی و پایداری محصولات غذایی نقش مهمی ایفا کند(7). برخی از مهم‌ترین کاربردهای این علم در صنعت غذا عبارتند از:

۱ .بهبود خواص ذاتی محصولات غذایی

با استفاده از روش‌های اپی‌ژنتیک، می‌توان ژن‌های مربوط به صفات مطلوب مانند طعم، رنگ، بافت و ارزش غذایی را فعال یا غیرفعال کرد. این فناوری امکان تولید محصولات غذایی با خواص بهتر، هضم آسان‌تر، مغذی‌تر و مقاوم‌تر در برابر شرایط محیطی را فراهم می‌آورد(8).

۲ .افزایش مقاومت گیاهان و حیوانات در مقابل بیماری‌ها و استرس‌ها

با اصلاح فعالیت ژن‌ها به روش‌های اپی‌ژنتیک، می‌توان مقاومت محصولات کشاورزی (مانند غلات، سبزیجات) و دام‌ها در مقابل عفونت‌ها، آفات، خشکسالی و دماهای شدید را افزایش داد. این کار به کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر کمک می‌کند و کشاورزی پایدار را ترویج می‌دهد(9).

۳ .توسعه مواد غذایی انحصاری و برندسازی

پتانسیل‌های فناوری اپی‌ژنتیک در ایجاد تنوع‌های جدید و خاص از محصولات غذایی، از قبیل رقم‌های جدید گیاهی با ویژگی‌های خاص، امکان گسترش بازارهای جدید و برندسازی مبتنی بر ویژگی‌های متمایز را فراهم می‌آورد(10).

۴ .کاهش فرآیندهای نگهداری و افزایش طول عمر محصولات

با کنترل فعالیت‌های ژنی مرتبط با فسادپذیری یا حساسیت به عوامل محیطی، می‌توان طول عمر و ماندگاری مواد غذایی را افزایش داد، بدون نیاز به مواد نگهدارنده شیمیایی مضّر(11).

۵ .بهبود فرآیندهای تولید و کاهش هدررفت

اپی‌ژنتیک می‌تواند در اصلاح ژن‌هایی که در فرآیندهایانبارداری، حمل‌ونقل و تولید نقش دارند، مورد استفاده قرار گیرد، تا کارایی و بهره‌وری در زنجیره تأمین مواد غذایی بهبود یافته و ضایعات کاهش یابد.

فناوری‌ها و ابزارهای موجود

در حوزه اپی‌ژنتیک، فناوری‌ها و ابزارهای متعددی توسعه یافته‌اند که امکان تحلیل، اندازه‌گیری و در بسیاری موارد، تغییر ساختارهای اپی‌ژنتیکی را فراهم می‌کنند. استفاده مؤثر از این فناوری‌ها نقش کلیدی در پیشبرد تحقیقات و کاربردهای صنعتی ایفا می‌کند(12). در این بخش، بر مهم‌ترین فناوری‌ها و ابزارهای رایج و نوظهور تمرکز می‌شود:

فناوری‌های تحلیل اپی‌ژنتیک

- **روش‌های بیوانفورماتیکی و فناوری‌های زیستی:**
  - **تشخیص متیلاسیون :DNA** روشی است که میزان و محل‌های متیلاسیون در DNA را مشخص می‌کند، شامل فناوری‌هایی مانند *Bisulfite Sequencing* که با استفاده از محلول بای‌سولفیت، گروه‌های متیل را شناسایی می‌کند و سپس با توالی‌یابیDNA ، محل‌های متیلاسیون مشخص می‌شود.

- **توالی‌یابی هیستون‌ها (ChIP-Seq):** این فناوری با استفاده از آنتی‌بادی‌های خاص، اصلاحات شیمیایی بر روی هیستون‌ها (مانند متیلاسیون، فسفریلاسیون) را تشخیص می‌دهد و با توالی‌یابی، محل دقیق این تغییرات را مشخص می‌کند.
- **RNA-Seq:** برای شناسایی و اندازه‌گیری سطح RNA های غیرکدکننده) مثل miRNA ، siRNA) و بررسی فعالیت‌های اپی‌ژنتیک مربوط به آن‌ها کاربرد دارد(13).

- **امبری (Nanopore sequencing):** فناوری نوینی است که علاوه بر توالی DNA ، قادر است تغییرات اپی‌ژنتیکی مانند متیلاسیون را همزمان تشخیص دهد، بدون نیاز به مراحل پردازش پیچیده، و در کمترین زمان ممکن(14).

فناوری‌های تغییر و مهندسی اپی‌ژنتیک

- **ابزارهای اصلاح‌کننده اپی‌ژنتیک (Epigenetic Editing tools):**
  - **پروتئین‌های CRISPR/dCas9:** نسخه غیرکامل و بدون قابلیت برش در سیستم CRISPR ، که می‌تواند با اتصال زنجیره‌های اصلاحی (مانند متیل‌ترانسفرازها یا دیمتیلازها) بر روی DNA ، به صورت هدفمند فعالیت‌های اپی‌ژنتیک را تغییر دهد. این روش امکان تنظیم دقیق فعالیت ژن‌ها را در سلول‌های زنده و در محیط‌های صنعتی فراهم می‌کند.
  - **نانوذرات (Nanoparticles):** برای انتقال مواد اصلاح‌کننده اپی‌ژنتیک به داخل سلول‌ها یا گیاهان، استفاده می‌شود و امکان تغییرات هدفمند و کنترل‌شده را میسر می‌کند(15).
- **روش‌های نوین در مهندسی اپی‌ژنتیک:**
  - **پلیمرازهای اصلاح‌شونده و نمونه‌های مصنوعی:** برای ساخت نمونه‌های اصلاح‌شده و مطالعه اثرات تغییرات اپی‌ژنتیک در محیط‌های آزمایشگاهی.
  - **سیستم‌های حمل و نقل هدفمند:** جهت انتقال عوامل اصلاح‌کننده به سمت گیاهان یا حیوانات، در راستای اصلاح صفات خاص(16).

فناوری‌های حاکم بر داده‌های اپی‌ژنتیکی

- **بیوانفورماتیک و داده‌کاوی (Bioinformatics & Data Mining):**
  - نرم‌افزارهای تخصصی جهت تحلیل داده‌های توالی‌یابی اپی‌ژنتیک، شناسایی نقاط کلیدی، روندهای تغییرپذیری و ارتباط آن‌ها با صفات مشخص.

- مدل‌سازی و پیش‌بینی اثرات تغییرات اپی‌ژنتیک بر عملکرد محصولات، که در توسعه محصولات غذایی نوین نقش دارد.

- **پایگاه‌های داده و بانک‌های علمی:**

  - مجموعه‌های داده شامل نتایج آزمایش‌ها و مطالعات اپی‌ژنتیک در گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها، که امکان مقایسه، تحلیل و توسعه فناوری‌های جدید در صنعت غذایی را فراهم می‌سازد(17).

چالش‌ها و مسائل اخلاقی

استفاده از فناوری‌های اپی‌ژنتیک در صنایع غذایی، گرچه امکانات و فرصت‌های بسیاری را فراهم می‌کند، اما با مجموعه‌ای از چالش‌ها و مسائل اخلاقی نیز روبرو است که نیازمند بررسی جدی و نگرانی‌های منسجم است(18). این مسائل در سه حوزه اصلی قابل طبقه‌بندی هستند:

نگرانی‌های مربوط به ایمنی و سلامت مصرف‌کنندگان

- **عدم قطعیت در ارزیابی اثرات بلندمدت** :فناوری‌های اپی‌ژنتیک، علی‌رغم اینکه بسیاری از تغییرات بر روی فعالیت‌های ژن‌ها صورت می‌گیرد، ولی اثرات درازمدت آن‌ها بر سلامت انسان و محیط زیست هنوز به طور کامل شناخته نشده است. ممکن است تغییرات اپی‌ژنتیک، به طور ناخواسته، اثرات مضری بر بدن انسان داشته باشند یا منجر به بروز بیماری‌های جدید شوند.

- **پایداری و کنترل تغییرات** :مهندسی اپی‌ژنتیک ممکن است منجر به تغییراتی شود که کنترل آن‌ها سخت است و در صورت نادرستی، می‌تواند تاثیرات ناخواسته در زنجیره تأمین و سلامت مصرف‌کنندگان داشته باشد(19).

مسائل مربوط به تنظیم مقررات و کنترل صنعتی

- **عدم وجود استانداردهای جهانی مشخص** :فناوری‌های نوظهور و در حال توسعه در حوزه اپی‌ژنتیک، هنوز در بسیاری از کشورها تحت چارچوب‌های قانونی مشخص قرار نگرفته‌اند. نبود قوانین جامع و معتبر، خطر سوءاستفاده، تولید محصولات غیرمجاز یا بدون تایید، و انتقال فناوری‌های ناپایدار و ناسازگار را افزایش می‌دهد.

- **تفاوت‌های مقرراتی بین کشورها** :سطح پذیرش و کنترل فناوری‌ها، در کشورهای مختلف متفاوت است، که می‌تواند منجر به نابرابری و مشکلات تجاری و وارداتی شود(20).

ملاحظات اخلاقی و اجتماعی

- **مداخلات در ساختار طبیعی و بستر زندگی** :مهندسی اپی‌ژنتیک، با تغییر ساختارهای اپی‌ژنتیکی در موجودات، ممکن است مسئله‌ای اخلاقی در مورد تداخل در فرآیندهای طبیعی و مداخله در حیات بشر و طبیعت ایجاد کند.

- **پرسش‌های مربوط به مالکیت فکری و حقوقی** :فناوری‌های اپی‌ژنتیک اغلب تحت حقوق مالکیت فکری قرار دارند. سوالات مربوط به حق ثبت و مالکیت بر تغییرات اپی‌ژنتیکی، اثرات اجتماعی و اقتصادی، و نحوه بهره‌برداری عادلانه از فناوری‌ها، موضوعاتی حساس و چالش‌برانگیز هستند.

- **تفاوت‌های فرهنگی و نگرانی‌های مذهبی** :در برخی فرهنگ‌ها و ادیان، هر گونه تغییر مصنوعی در ساختار زیستی، ممکن است منجر به نگرانی‌های دینی و فرهنگی شود و نیازمند رویکردهای حساس و احترام‌آمیز است(21).

ناپایداری و نگرانی‌های اقتصادی و اجتماعی

- **فشار بر کشاورزان و تولیدکنندگان کوچک‌مقیاس** :فناوری‌های پیشرفته ممکن است منجر به تمرکزکنندگی بازار و بروز نابرابری اقتصادی شود، به طوری که شرکت‌ها یا کشورهایی با فناوری پیشرفته، بر بازارهای جهانی سلطه پیدا کنند و کشاورزان کوچک یا کشورهای در حال توسعه را در معرض آسیب قرار دهند.

- **ترس از تغییرات در تنوع زیستی** :تغییرات اپی‌ژنتیک ممکن است به انقراض گونه‌های طبیعی یا کاهش تنوع زیستی منجر شود که این مسأله یکی از دغدغه‌های مهم در حفظ محیط زیست و پایداری اکوسیستم‌ها است(22).

در مجموع، گرچه فناوری‌های اپی‌ژنتیک می‌توانند انقلابی در صنعت غذایی ایجاد کنند و فرصت‌های بی‌نظیری برای بهبود سلامت و پایداری محصولات فراهم آورند، اما مسائل مربوط به ایمنی، تنظیم، اخلاق و عدالت اجتماعی باید با دقت و حساسیت مورد بررسی قرار گیرند. توسعه مقررات شفاف، نظارت مستمر، و مسائله‌مندی در طراحی فناوری‌ها، بخش حیاتی راهبردهای مسئولانه برای بهره‌برداری صحیح و اخلاقی از فناوری‌های اپی‌ژنتیک خواهد بود.

آینده‌پژوهی و افق‌های تحقیق

با پیشرفت سریع فناوری‌های اپی‌ژنتیک، افق‌های بسیار وسیعی برای کاربردهای آن در صنایع غذایی در حال شکل‌گیری است(23).

در این بخش، روندهای نو ظهور، فرصت‌ها، چالش‌ها و نیازهای تحقیقاتی آینده بررسی می‌شود:

روندهای نوظهور در اپی‌ژنتیک و صنعت غذایی

- **مهندسی هدفمند اپی‌ژنتیک بر اساس فناوری‌های پیشرفته** :توسعه روش‌های دقیق و کارآمد برای تغییرات اپی‌ژنتیکی در سطح سلولی و مولکولی، به‌منظور بهبود صفات خاص در گیاهان و حیوانات.
- **استفاده از فناوری‌های ویرایش اپی‌ژنتیک مانند CRISPR/dCas9**: امکان ایجاد تغییرات هدفمند در ساختارهای اپی‌ژنتیک بدون اثرات مضر یا تغییرات ژنتیکی دائمی، که به عنوان فناوری سبز و کم‌خطر در حال رشد است.
- **پیشرفت در تحلیل و تفسیر داده‌های اپی‌ژنتیکی** :استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای تحلیل حجم عظیم داده‌های اپی‌ژنتیکی و کشف روابط بین تغییرات اپی‌ژنتیک و صفات محصول(24).

فرصت‌ها و تهدیدهای آینده

- **پتانسیل تولید مواد غذایی مقاوم‌تر و مغذی‌تر** :توسعه گیاهان و حیوانات اصلاح‌شده با تغییرات اپی‌ژنتیکی برای مقابله موثرتر با خشکسالی، آفات، و بیماری‌ها؛ و ایجاد محصولات غنی‌شده برای رفع نیازهای تغذیه‌ای جمعیت در حال رشد.
- **پایداری محیط زیستی و کاهش مصرف سموم و مواد شیمیایی** :کاهش reliance بر سموم، آنتی‌بیوتیک‌ها و نگهدارنده‌های شیمیایی، که اثرات منفی زیست‌محیطی دارند.
- **خطرات و چالش‌ها** :همچنان نگرانی‌هایی در زمینه ایمنی، اثربخشی بلندمدت، و پذیرش عمومی وجود دارد که نیازمند خط‌مشی‌های هوشمند و همکاری‌های بین‌المللی است(25).

نیازهای تحقیقاتی و توسعه‌ای

- **تعیین استانداردهای ایمنی و بررسی اثرات بلندمدت** :نیاز به انجام مطالعات بیشتر در زمینه ارزیابی ریسک‌های مرتبط با تغییرات اپی‌ژنتیکی در مواد غذایی، و تدوین دستورالعمل‌های جهانی و معتبر.
- **پژوهش در زمینه پایداری زیستی و تنوع ژنتیکی** :تضمین اینکه فناوری‌های اپی‌ژنتیک، در راستای حفظ تنوع زیستی و جلوگیری از اثرات منفی بر اکوسیستم‌ها استفاده شوند.
- **توسعه فناوری‌های انتقال هدفمند و موثر** :برای اصلاحات اپی‌ژنتیک در مقیاس صنعتی، به فناوری‌های مطمئن، ارزان و قابل کنترل نیاز است.
- **مطالعات اجتماعی و اخلاقی گسترده‌تر** :ارزیابی نگرانی‌ها و پذیرش اجتماعی در سطح جهانی، و تدوین سیاست‌ها و مقررات اخلاقی و قانونی مناسب(26).

در مجموع، آینده اپی‌ژنتیک در صنعت غذایی بسیار امیدوارکننده است، اما پویایی آن نیازمند پژوهش‌های مداوم، ارزیابی‌های علمی و سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه است. بهره‌برداری مسئولانه، منطبق بر اصول اخلاقی و علمی، کلید موفقیت در توسعه این فناوری برای بهبود سلامت، پایداری و امنیت غذایی جهان است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی جامع مفاهیم، فناوری‌ها و کاربردهای اپی‌ژنتیک در صنایع غذایی پرداختیم. مشخص شد که فناوری‌های اپی‌ژنتیک، به دلیل توانایی تغییر و تنظیم فعالیت‌های ژنی بدون تغییر در ساختار اولیهDNA ، ابزارهای قدرتمندی برای بهبود کیفیت، ایمنی و پایداری محصولات غذایی محسوب می‌شوند. با بهره‌گیری از روش‌های نوین تحلیل و ویرایش اپی‌ژنتیکی، می‌توان نیازهای روزافزون بشر در زمینه تغذیه سالم، مقاوم‌سازی محصولات در برابر آفات و شرایط محیطی سخت، و کاهش اثرات منفی بر محیط زیست را برآورده ساخت.

همان‌طور که در بخش آینده‌پژوهی مطرح شد، پتانسیل‌های فناوری‌های اپی‌ژنتیک در آینده بسیار گسترده است، اما نیازمند توسعه استانداردهای ایمنی، تنظیم مقررات مناسب، و کارشناسی‌های اخلاقی است. چالش‌های موجود، از جمله نگرانی‌های مربوط به ایمنی بلندمدت، مسائل اخلاقی، و نابرابری‌های اقتصادی، باید در سیاست‌گذاری‌ها و مطالعات پژوهشی مورد توجه قرار گیرند تا بتوان بهره‌برداری مسئولانه و مؤثر از این فناوری‌ها داشت.

در نهایت، توسعه کاربردهای اپی‌ژنتیک در صنایع غذایی، نه تنها می‌تواند به تحقق امنیت غذایی و سلامت جهانی کمک کند، بلکه باید با رعایت ملاحظات اخلاقی، زیست‌محیطی و اجتماعی صورت گیرد. همکاری‌های بین‌المللی و پژوهشی، توسعه فناوری‌های پایدار و آگاه‌سازی عمومی از عوامل کلیدی در موفقیت این مسیر هستند. اتخاذ رویکردی هوشمندانه و مسئولانه، می‌تواند آینده‌ای نویدبخش را برای صنعت غذایی و سلامت بشر رقم زند.

منابع:

1. Lorenzo PM, et al. Epigenetic effects of healthy foods and lifestyle habits from the Southern European Atlantic diet pattern: a narrative review. Front Immunol. 2022.
2. Xue Y, et al. Epigenetics in the modern era of crop improvements. J (review). 2024.
3. Seem K, et al. Epigenome editing for targeted DNA (de)methylation — review of tools and perspectives. 2024.
4. Gong T, et al. Analysis and performance assessment of whole-genome bisulfite sequencing and related methylation methods. 2022
5. Dubois A, et al. Deciphering plant chromatin regulation via CRISPR-based approaches. 2021.
6. Li X, et al. Epigenetics in Precision Nutrition. 2022
7. Kakoulidou I, et al. Epigenetics for crop improvement in times of global change. 2021.
8. Xue Y, et al. Epigenetics in crop improvement review. 2024.
9. Kakoulidou I, et al. Epigenetics for Crop Improvement... 2021.
10. Gupta C, et al. Plant epibreeding review. 2022.
11. Wang, Z., et al. DNA Methylation Is Crucial for 1-Methylcyclopropene Delaying Postharvest Ripening and Senescence of Tomato Fruit. Postharvest Biology and Technology, 2024. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2024.11720368
12. Wang Y, et al. Nanopore sequencing technology, bioinformatics and applications. Nat Biotech. 2021.
13. Gong T, et al. Benchmarking bisulfite-based methods. 2022.
14. Ahsan MU, et al. DeepMod2 — methylation detection framework for Nanopore (2024). Nat Commun. 2024.
15. Fadul SM, et al. CRISPR-based epigenome editing: mechanisms & opportunities. 2023.
16. Seem K, et al. Epigenome editing for targeted DNA (de)methylation. 2024.
17. Omony J, et al. DNA methylation analysis tools (plant focus). 2020.
18. Rajanathadurai J, et al. Advances in targeting cancer epigenetics using CRISPR-based approaches — discusses safety/delivery/off-targets. 2024.
19. Abraham MJ, et al. Diet/exercise restore epigenetic states — 2023
20. Seem, S., Chakravarti, J., et al. (2021). Key considerations in safety, equity, and access to epigenetic editing. The CRISPR Journal. DOI: 10.1089/crispr.2021.0094

21. Alex, K., et al. (2023). Comparative ethical evaluation of epigenome editing and germline genome editing: Parental health, heredity, and autonomy concerns. Journal of Medical Ethics. DOI: 10.1136/jme-2022-108888

22. Varotto, S., Krugman, T., Aiese Cigliano, R., Kashkush, K., Kondić-Špika, A., Aravanopoulos, F. A., … & Miladinović, D. (2022). Exploitation of epigenetic variation of crop wild relatives for crop improvement and agrobiodiversity preservation. Theoretical and Applied Genetics. DOI: 10.1007/s00122-022-04122-y

23. Seem K, et al. Epigenome editing for targeted DNA (de)methylation. 2024

24. Fadul SM et al. CRISPR-based epigenome editing: mechanisms & opportunities. 2023.

25. Bearth, A., et al. (2024). Consumers' perceptions and acceptance of genome-edited foods: A comparative study. Journal of Cleaner Production. DOI:10.1016/j.jclepro.2024.232918

Epigenetics in the food industry: A review of concepts, applications, future research.

Mahan Rizevandi[1],Seyyedeh Yasaman Hashemi[2],Parisa Tahmasebi[3*]

1_B.Sc. student, Department of Biology, Faculty of Sciences, Ilam University, Ilam, Iran.
Corresponding Author: mahanri13b@gmail.com

2- B.Fi. student, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Veterinary Medicine, University of Ilam, Ilam, Iran.
Corresponding Author: yhashemi253@gmail.com

3-Assistant professor, Department of Biology, Faculty of Sciences, Ilam University, Ilam, Iran.
* Corresponding Author: P.tahmasbi@ilam.ac.ir

ABSTRACT

This review article explores epigenetics and its role in the food industry. It begins with an overview of fundamental concepts, including differences from genetics and key mechanisms such as DNA methylation and histone modification. The article then discusses major applications of epigenetic technologies in ensuring food quality and safety, developing enriched products, improving crop traits, and processing and preservation. Existing technologies, including targeted editing and epigenetic data analysis, play a crucial role. Ethical, safety, and regulatory challenges are also highlighted as critical considerations. Looking ahead, emerging trends, opportunities, and threats in the field are analyzed to understand future prospects for the food industry. The importance of further research and intelligent policymaking for responsible utilization of epigenetic innovations is emphasized. In conclusion, ethical and well-informed use of these technologies can significantly contribute to food security and environmental sustainability.

Key words:
Epigenetics,Food Industry,Concepts