اُمیکس‌ها در علوم کشاورزی

تدوین و گردآوری:

دکتر نسرین مشتاقی

عضو هیأت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر آزاده خادم

عضو هیأت علمی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

۱۴۰۳

سرشناسه:	مشتاقی، نسرین، ۱۳۵۸- ، گردآورنده
عنوان و نام پدیدآور:	امیکس‌ها در علوم کشاورزی/ تدوین و گردآوری: نسرین مشتاقی، آزاده خادم.
مشخصات نشر :	مشهدجهاد دانشگاهی، واحد مشهد، انتشارات، ۱۴۰۳.
مشخصات ظاهری:	۱۹۲ص.:مصور(رنگی)، نمودار.
شابک:	۹۷۸-964-324-541-2
وضعیت فهرست نویسی:	فیپا
یادداشت:	کتابنامه.
موضوع:	گیاهان زراعی -- اصلاح نژاد Field crops -- Breeding ژنتیک گیاهی Plant genetics گیاهان -- فیزیولوژی Plant physiology زیست‌شناسی تکوینی Developmental biology
شناسه افزوده:	خادم، آزاده، ۱۳۶۹-، گردآورنده
شناسه افزوده:	جهاد دانشگاهی. واحد مشهد. انتشارات
رده بندی کنگره:	SB ۱۸۵/۷
رده بندی دیویی:	۶۳۱/۵۲
شماره کتابشناسی ملی:	۹۷۳۰۰۵۹
اطلاعات رکورد کتابشناسی:	فیپا

انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد

مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه، سازمان مرکزی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

ص.پ. ۱۳۷۶-۹۱۷۷۵ تلفن: ۳۱۹۹۷۳۲۱ دفتر پخش: ۳۱۹۹۷۳۲۶

فروشگاه یک: ۳۸۴۱۸۰۷۰ فروشگاه دو: ۳۱۹۹۷۳۲۷ فروشگاه سه: ۳۱۹۹۷۲۲۰

info@jdmpress.com www.jdmpress.com

اُمیکس‌ها در علوم کشاورزی

تدوین و گردآوری: دکتر نسرین مشتاقی و دکتر آزاده خادم

آماده‌سازی، و امور فنی نشر: رضا نیک‌ذات / چاپ و صحافی: من‌چاپ

چاپ اول / ۱۴۰۳ / ۱۰۰ نسخه / شماره نشر ۶۱۱

شابک ۲-۵۴۱-۳۲۴-۹۶۴-۹۷۸ ISBN: 978-964-324-541-2

تمامی حقوق نشر برای ناشر محفوظ است.

قیمت: ۱/۶۰۰/۰۰۰ ریال

به نام خداوند جان و خرد

انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد بر این باور است که نخستین گام در راه بهبود ساختارهای اقتصادی-اجتماعی و توسعهٔ کشور، دستیابی به تازه‌های دانش و نشر یافته‌های پژوهشگران است.

کتاب حاضر ششصدویازدهمین اثری است که با همین رویکرد منتشر می‌شود. رهنمودهای خوانندگان فرهیخته می‌تواند ما را در ارتقاء سطح کیفی و کمّی این آثار یاری نماید.

انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد

خواننده گرامی:
به‌منظور استفاده بهینه از محتوا، تصاویر رنگی کتاب به همراه فهرست و پیشگفتار، در سایت ناشر به نشانی www.jdmpress.com دردسترس است.

فهرست

پیشگفتار ۱۰
۱. اهمیت فناوری اُمیکس ۱۲
۱-۱ کشاورزی پایدار در سایه اُمیکس‌ها ۱۳
۱-۲ اُمیکس‌ها و امکان به‌نژادی دقیق ۱۵
۱-۳ اهلی‌سازی مجدد و ارائه الگویی برای محصولات جدید ۱۸
۱-۴ چشم‌انداز فناوری‌های اُمیکس ۱۹
منابع ۲۰
۲. اجزای فناوری اُمیکس ۲۱
منابع ۲۶
۳. ژنومیکس ۲۷
۳-۱ ژنتیک در مقابل ژنومیکس ۲۷
۳-۲ تاریخچه ژنومیکس ۲۸
۳-۳ انواع ژن‌ها ۳۰
۳-۴ ژنوم ۳۱
۳-۵ تخمین ژنوم ۳۱
۳-۶ کارکرد علم ژنومیکس در زیست‌شناسی ۳۱
۳-۷ ارگانیسم‌های مدل برای مطالعات ژنومیکس ۳۳
۳-۸ شاخه‌های اصلی ژنومیکس ۳۶

۳-۸-۱ ژنومیکس ساختاری ۳۶
۳-۸-۲ ژنومیکس کارکردی ۴۲
۳-۹ کاربرد ژنومیکس در کشاورزی ۴۴
۳-۹-۱ ژنوتایپینگ با هدف تعیین نشانگرهای مولکولی ۴۵
۳-۹-۲ ژنومیکس مقایسه‌ای با هدف اصلاح گیاهان ۴۷
۳-۱۰ چالش‌های فناوری ژنومیکس ۴۸
۳-۱۱ چشم‌انداز فناوری ژنومیکس ۴۸
منابع ۴۸
۴. اپی‌ژنومیکس ۵۳
۴-۱ تنظیم اپی‌ژنتیکی ۵۴
۴-۲ توارث تغییرات اپی‌ژنتیکی ۵۷
۴-۳ تعیین تغییرات اپی‌ژنتیک در گیاهان ۵۷
۴-۳-۱ تغییرات هیستون ۵۷
۴-۳-۲ پروفایل متیلاسیون DNA در گیاهان ۵۸
۴-۴ کاربرد اپی‌ژنومیکس در کشاورزی ۵۹
۴-۴-۱ ظهور پدیده هتروزیس ۵۹
۴-۴-۲ مدل‌سازی و بهبود ژنوتیپ‌های گیاهی ۵۹
۴-۵ چالش‌های فناوری اپی‌ژنومیکس ۶۲
۴-۶ چشم‌انداز فناوری اپی‌ژنومیکس ۶۲
منابع ۶۲
۵. پان‌ژنومیکس ۶۵
۵-۱ کاربرد پان‌ژنومیکس در کشاورزی ۶۷
۵-۱-۱ بازیابی ژن‌های ازدست‌رفته در فرآیند اهلی‌سازی و برنامه‌های اصلاحی ۶۷
۵-۱-۲ افزایش مقاومت به تنش‌های زیستی ۶۸
۵-۲ چالش‌های فناوری پان‌ژنومیکس ۶۹
۵-۳ چشم‌انداز فناوری پان‌ژنومیکس ۶۹
منابع ۶۹
۶. ترانس‌کریپتومیکس ۷۲
۶-۱ RNA-Seq ۷۳

۶-۲ کاربرد ترانس‌کریپتومیکس در کشاورزی ۷۵
۶-۲-۱ شناسایی RNAهای غیرکدکننده جدید ۷۷
۶-۲-۲ بررسی نحوه تکامل ۷۸
۶-۲-۳ شبکه‌سازی فرآیندهای زیستی ۷۹
۶-۲-۴ بررسی مراحل رشد و نمو ۸۱
۶-۲-۵ شناسایی فرآیند نمو با استفاده از ترانس‌کریپتومیکس تک سلول ۸۱
۶-۲-۶ کاربرد ترانس‌کریپتومیکس در افزایش تحمل به تنش ۸۳
۶-۳ چالش‌های فناوری ترانس‌کریپتومیکس ۸۴
۶-۴ چشم‌انداز فناوری ترانس‌کریپتومیکس ۸۴
منابع ۸۵
۷. پروتئومیکس ۸۹
۷-۱ لزوم مطالعه پروتئوم ۹۲
۷-۲ کاربرد پروتئومیکس در کشاورزی ۹۵
۷-۲-۱ افزایش مقاومت به تنش‌های زیستی ۹۵
۷-۲-۲ افزایش تحمل به تنش‌های غیرزیستی ۹۶
۷-۲-۳ بهبود عملکرد محصول ۹۸
۷-۳ چالش‌های فناوری پروتئومیکس ۱۰۰
۷-۴ چشم‌انداز فناوری پروتئومیکس ۱۰۰
منابع ۱۰۱
۸. متابولومیکس ۱۰۷
۸-۱ ولاتیلومیکس ۱۱۲
۸-۲ کاربرد متابولومیکس در کشاورزی ۱۱۳
۸-۲-۱ بررسی مراحل رشد و نمو ۱۱۴
۸-۲-۲ طبقه‌بندی و بررسی تنوع گونه‌های گیاهی ۱۱۴
۸-۲-۳ شناسایی ژنوتیپ‌های تراریخته ۱۱۴
۸-۲-۴ ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی ۱۱۵
۸-۲-۵ افزایش کیفیت محصولات کشاورزی ۱۱۶
۸-۲-۶ افزایش مقاومت به تنش ۱۱۷
۸-۳ چالش‌های متابولومیکس ۱۱۹

۸-۴ چشم‌انداز متابولومیکس ۱۲۰
منابع ۱۲۲
۹. یونومیکس ۱۲۶
۹-۱ یونومیکس و ارتباط آن با سایر اُمیکس‌ها ۱۳۰
۹-۲ کاربرد یونومیکس در کشاورزی ۱۳۲
۹-۳ چالش‌های فناوری یونومیکس ۱۳۴
۹-۴ چشم‌انداز فناوری یونومیکس ۱۳۵
منابع ۱۳۵
۱۰. فنومیکس ۱۳۷
۱۰-۱ ابزارهای فنومیکس ۱۳۹
۱۰-۲ اسپکترانومیکس ۱۴۱
۱۰-۳ چالش‌ها و چشم‌انداز فناوری فنومیکس ۱۴۴
منابع ۱۴۵
۱۱. بیوانفورماتیک ۱۴۸
۱۱-۱ تدوین پایگاه داده‌ها ۱۴۹
۱۱-۲ ابزارها و الگوریتم‌های توسعه‌یافته برای آنالیزهای اختصاصی ۱۵۱
۱۱-۳ کاربرد بیوانفورماتیک در کشاورزی ۱۵۳
۱۱-۳-۱ اصلاح ژرم‌پلاسم گیاهی ۱۵۳
۱۱-۳-۲ شناسایی و القای مقاومت نسبت به تنش‌های محیطی ۱۵۴
۱۱-۳-۳ اتوماسیون کشاورزی ۱۵۵
۱۱-۳-۴ کشاورزی دقیق با استفاده از سنجش از راه دور ۱۵۶
۱۱-۳-۵ آنالیز داده‌های اُمیکس ۱۵۸
۱۱-۴ چالش‌های فناوری بیوانفورماتیک ۱۶۱
۱۱-۵ چشم‌انداز فناوری بیوانفورماتیک ۱۶۱
منابع ۱۶۲
۱۲. مطالعات اُمیکس در مقابله با تنش‌های زیستی ۱۶۶
۱۲-۱ استفاده از مولتی‌اُمیکس برای تشخیص تنش گیاه ۱۶۷
۱۲-۲ استفاده از ابزار مولتی‌اُمیکس در واکنش گیاه با میکروب‌ها ۱۶۷
۱۲-۳ مسیر پیشِ رو در تحقیقات مولتی‌اُمیکس برای مقابله با بیماری‌های گیاهی ۱۶۸

۱۲-۴ مطالعه موردی در اکولوژی بیماری‌های گیاهی تحت شرایط محیطی در حال تغییر ۱۶۹
منابع ۱۷۰
۱۳. مطالعات اُمیکس در مقابله با تنش‌های غیرزیستی ۱۷۴
۱۳-۱ فناوری‌های اُمیکس برای درک تحمل تنش غیرزیستی ۱۷۵
۱۳-۲ بیان ژن و شبکه تنظیمی در پاسخ به تنش غیرزیستی ۱۷۶
۱۳-۳ فناوری‌های اُمیکس: ابزارهای نوظهور در مقابله با تنش‌های غیرزیستی ۱۷۸
۱۳-۳-۱ راهبردهای ژنتیک رو به جلو ۱۷۹
۱۳-۳-۲ راهبردهای ژنتیک معکوس ۱۸۲
۱۳-۴ یونومیکس به عنوان ابزاری قدرتمند برای درک تنش غیرزیستی ۱۸۵
۱۳-۵ نقش متابولومیکس در درک تنش غیرزیستی ۱۸۶
منابع ۱۸۸

پیشگفتار

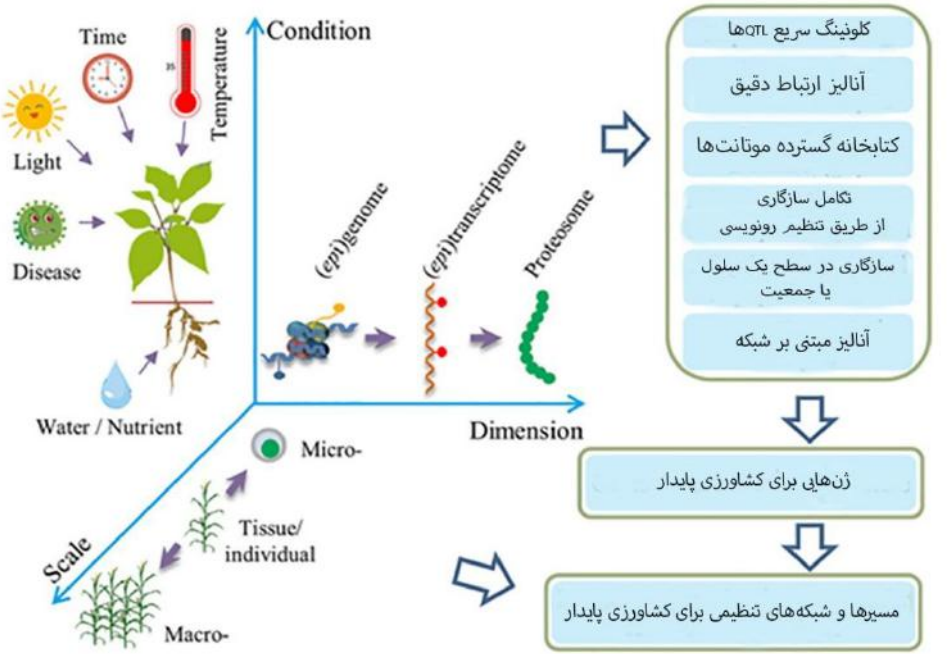
جمعیت رو به رشد انسانی و تغییرات آب‌وهوایی از چالش‌های بی‌سابقه‌ای است که جوامع انسانی و دولت‌ها را با مشکل تأمین غذا مواجه ساخته است. برای مقابله با این فشارها بایستی به دنبال افزایش کمّی و کیفی محصولات زراعی و همچنین افزایش سازگاری و مقاومت آن‌ها در برابر شرایط متغیر محیطی باشیم. در سال‌های اخیر توسعه فناوری اُمیکس با ارائه نسل جدید روش‌های گزینش و اصلاح پربازده، افق جدیدی را در فرآیند بهبود صفات گیاهی و نیز افزایش پایداری محصولات کشاورزی گشوده است.

فناوری‌هایی که امروزه در اختیار داریم توانسته‌اند داده‌هایی را در سطح وسیع مانند ژنوم، ترانس‌کریپتوم، پروتئوم، متابولوم و فنوم فراهم آورند. در ادامه رویکردهای بیوانفورماتیک مدرن و یادگیری ماشین (Machine learning) نیز به ما کمک می‌کنند تا این داده‌های چندبعدی ناهمگن را پردازش نموده و با مشخص‌نمودن فرآیندهای موثر در مثلث ارتباطی بین ژنوم-فنوم-محیط زیست، از آن‌ها برای اصلاح هدفمند و موثر گیاهان بهره‌برداری نماییم. مجموعه داده‌های حاصل از اُمیکس برای مطالعه نحوه تعامل گیاه با سایر موجودات زنده و محیط زیست آن‌ها بسیار مفید خواهد بود. با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های حاصل در فناوری‌های موجود و افزایش توان محاسباتی در مطالعات اُمیکس، همچنان در مراحل آغازین شناخت مسیرهای بیوشیمیایی و شبکه‌های سلولی در اغلب گیاهان قرار داریم. از این‌رو لزوم انجام مطالعات اُمیکس برای اصلاح هدفمند گیاهان، کشاورزی دقیق و تولید پایدار در بخش کشاورزی از ضروریات مهم و چالش‌های اصلی در بخش تحقیقات کشاورزی محسوب می‌شود.

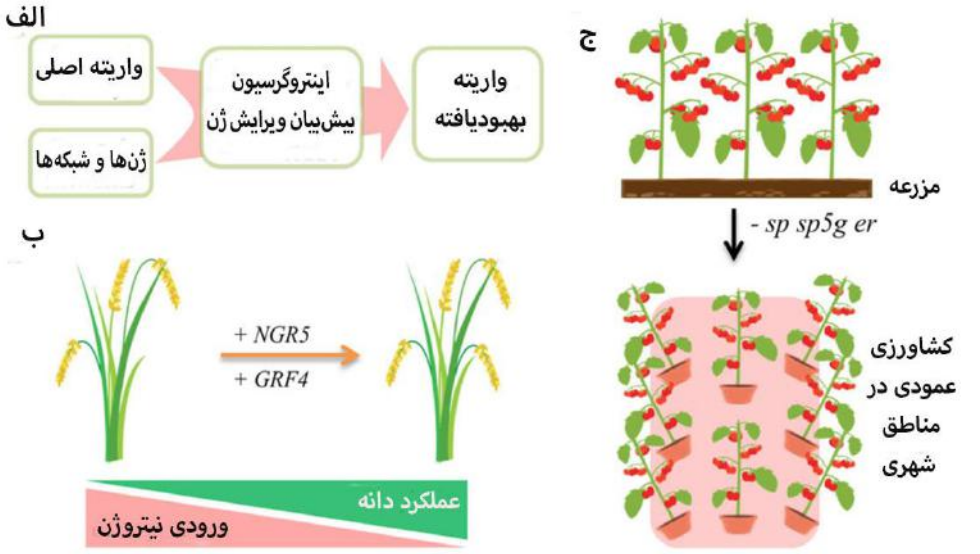
در کتاب حاضر سعی شده است اطلاعاتی هر چند مختصر درباره روش‌های اُمیکس و کاربرد آن‌ها در کشاورزی ارائه شود تا خوانندگان این کتاب به ویژه افرادی که دغدغه پیاده‌سازی برنامه‌های اصلاحی در بخش کشاورزی را دارند بتوانند سرنخ‌ها و اطلاعات مفیدی را برای تحقیقات بیشتر در این زمینه و پیشبرد برنامه‌های خود به‌دست آورند. این کتاب در ۱۳ فصل تدوین شده است. در فصل ۱، مقدمه‌ای در خصوص لزوم مطالعات اُمیکس بیان شده و در فصل ۲ اجزای اُمیکس به اختصار بیان شده است. در فصل‌های ۳ تا ۱۰ نیز در خصوص هر یک از روش‌های اُمیکس نظیر ژنومیکس، اپی‌ژنومیکس، پان‌ژنومیکس، ترانس‌کریپتومیکس، پروتئومیکس، متابولومیکس، یونومیکس و فنومیکس مطالبی ارائه شده است. در فصل ۱۱ در خصوص نقش بیوانفورماتیک در مطالعات اُمیکس بحث شده است و در فصل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب در خصوص مطالعات اُمیکس به منظور افزایش مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی صحبت شده است. لازم به ذکر است این مجموعه بر اساس جدیدترین کتاب‌ها و مقاله‌های لاتین تدوین شده است که در هر بخش منابع آن آورده شده است و تاکنون چنین اثری به زبان فارسی در داخل کشور به چاپ نرسیده است. ما در این کتاب تلاش نموده‌ایم قدمی هر چند کوچک برای معرفی و توسعه این فناوری‌ها در کشور عزیزمان ایران برداریم و امید داریم در آینده شاهد چاپ مجموعه‌های کاملتری از موضوع مطرح‌شده در این کتاب باشیم.

و مِنَ‌الله التوفیق

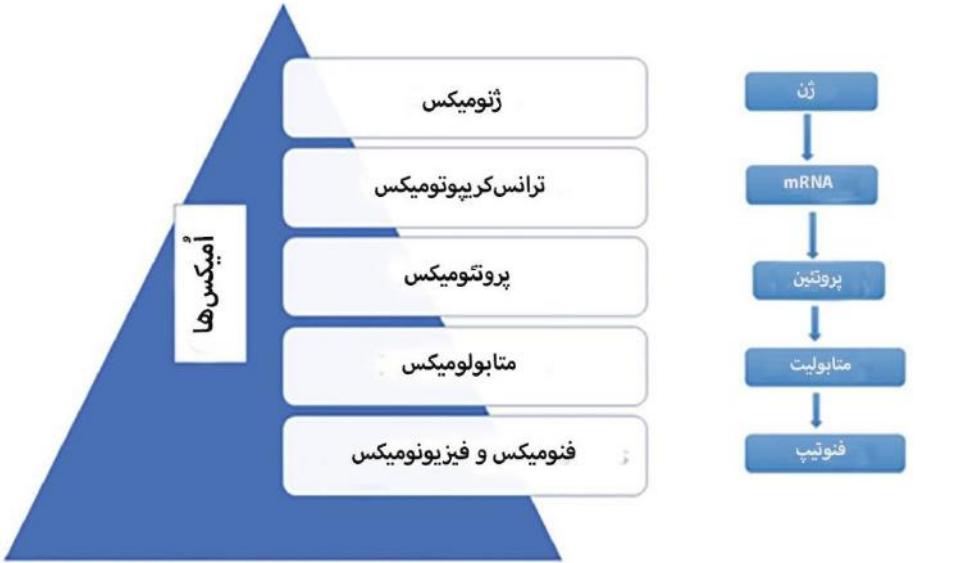
پدیدآورندگان



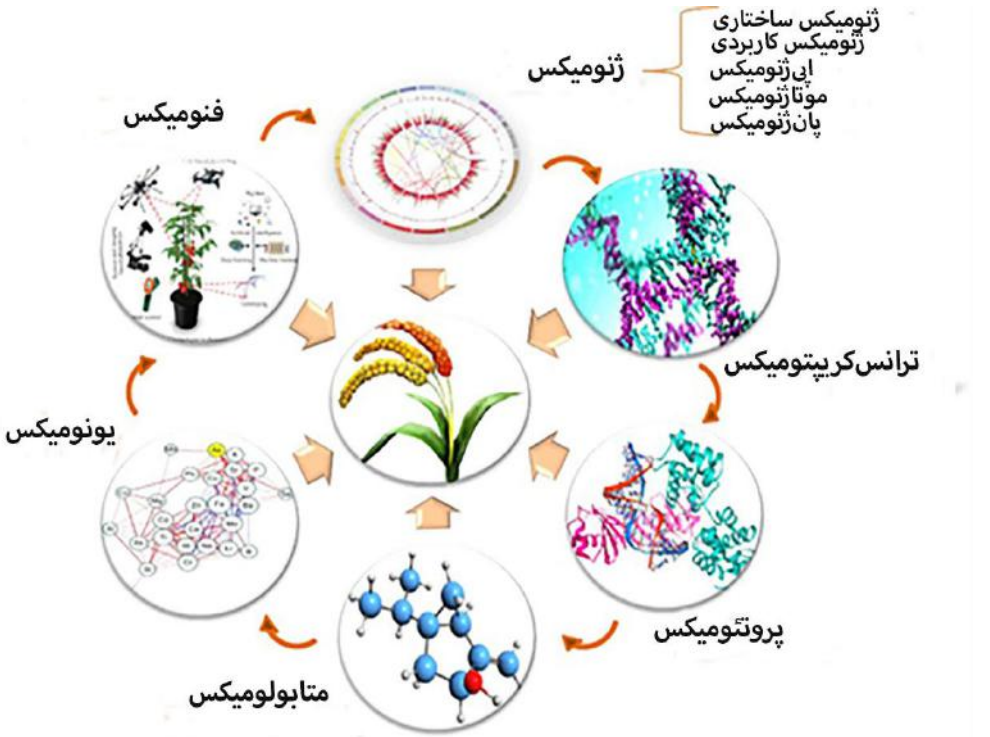
شکل۱-۱ روند شناسایی ژن‌ها و مسیرهای گیاهی مهم برای توسعه کشاورزی پایدار که از طریق داده‌های اُمیکس به‌دست می‌آید (Li and Yang, 2020).



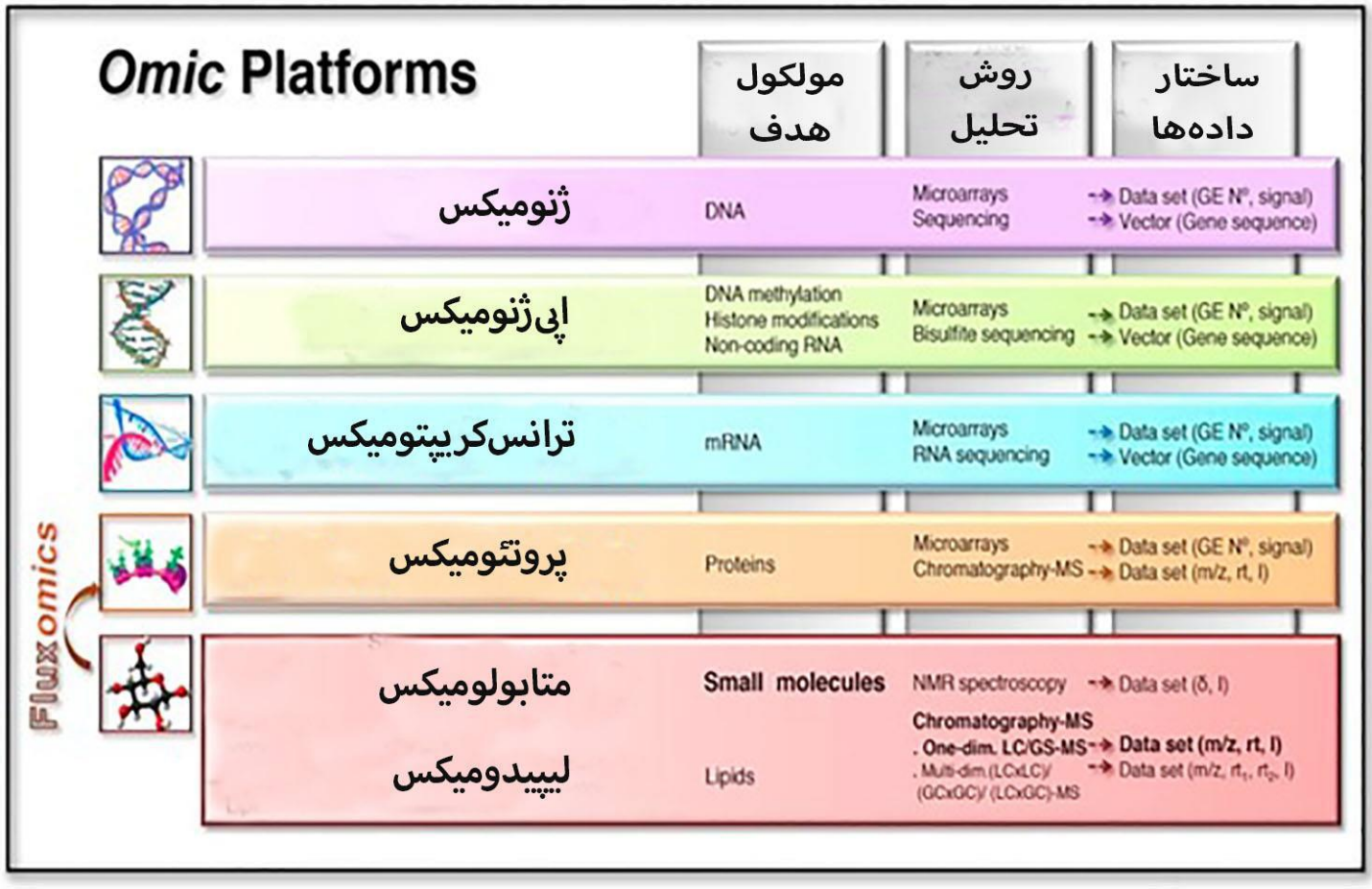
شکل ۱-۲ اصلاح محصولات زراعی برای کشاورزی پایدار. (الف): راهبردهایی برای بهبود گیاهان فعلی با دانشِ به‌دست‌آمده از طریق داده‌های اُمیکس. (ب): مثالی برای نشان دادن افزایش بازده و کاهش ورودی نیتروژن زمانی که دو ژن (NGR5 و GRF4) به واریته زراعی وارد شدند. GRF4، فاکتور تنظیم‌کننده رشد ۴. NGR5، فاکتور پاسخ رشد پنجه با واسطه نیتروژن ۵. (ج): مثالی برای نشان‌دادن تغییرات در معماری گیاه که آن را برای کشت در محیط شهری با خاموش‌کردن سه ژن مناسب می‌کند (سه ژن شامل *sp*، خودهرس؛ *sp5g*، پارالوگ sp؛ *er*، ایستاده) (Li and Yang, 2020).



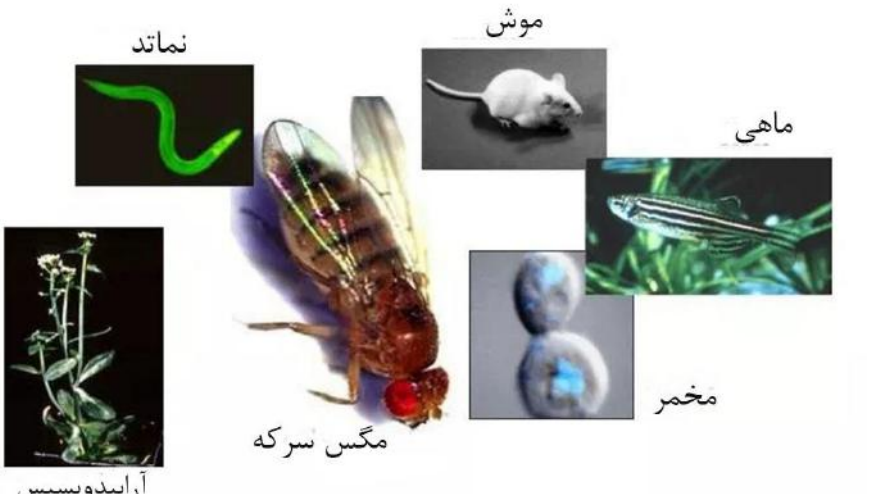
شکل۲-۱ شمایی از انواع اُمیکس‌ها و ارتباط آن‌ها.



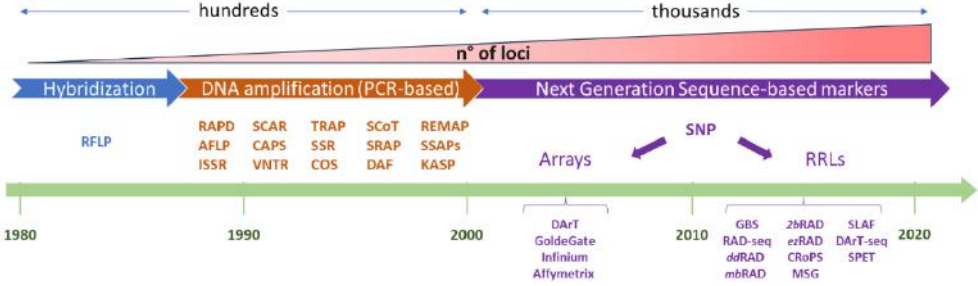
شکل۲-۲ شمایی از انواع اُمیکس‌ها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر



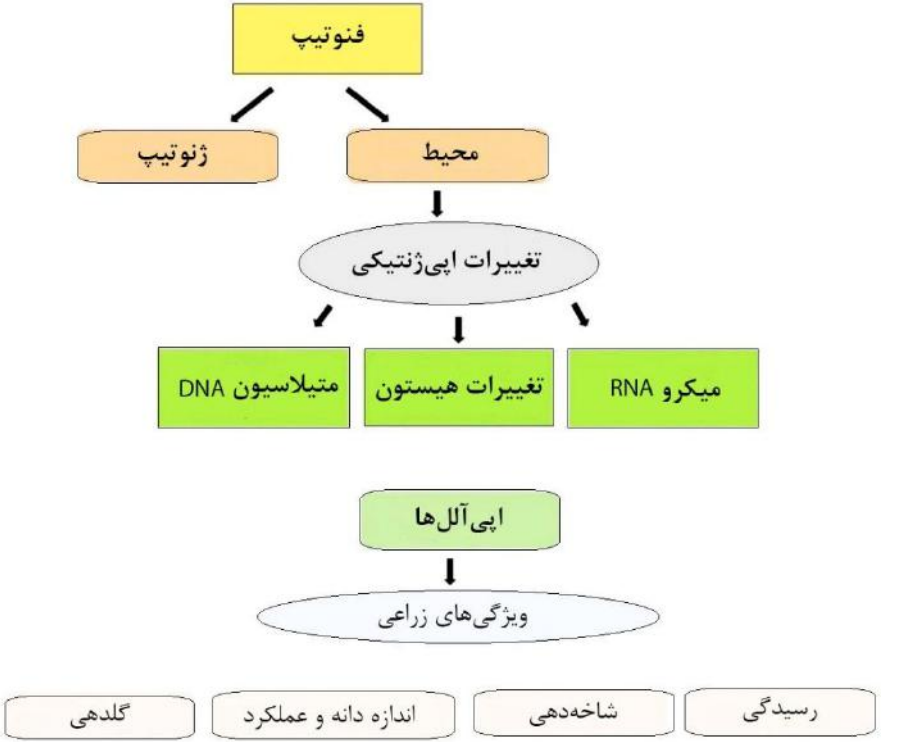
شکل۲-۳ مسیری از روش‌های اُمیکس، مولکول‌های هدف و روش جمع‌آوری داده‌ها.



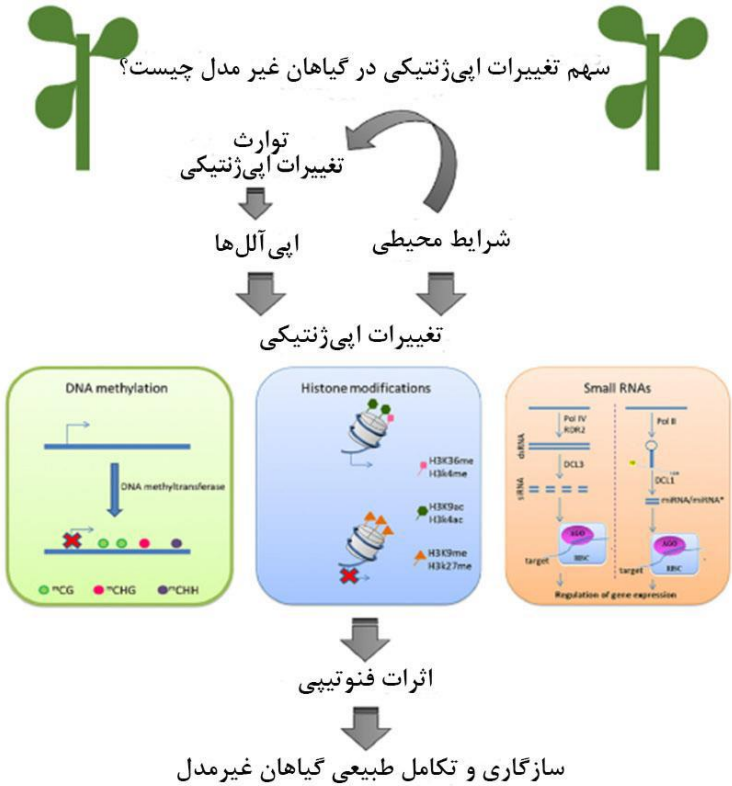
شکل۳-۱ موجودات زنده مدل در مطالعات ژنتیک و ژنومیکس.



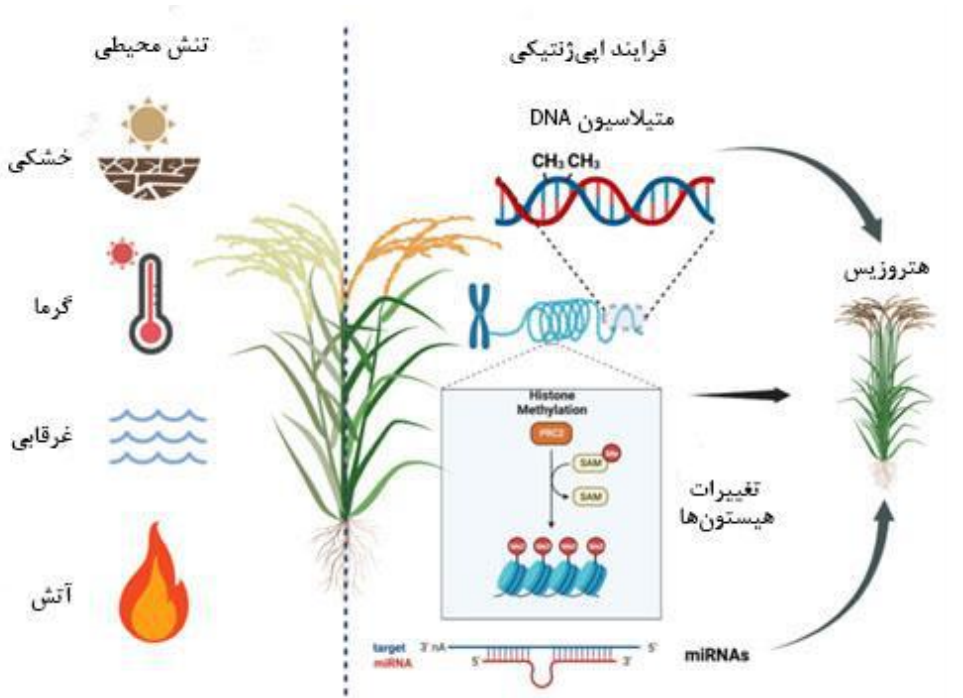
شکل۳-۳ فرآیند توسعه نشانگرهای مولکولی. با پیشرفت روش‌های ژنومیکس، بازدهی تشخیص تنوع ژنتیکی از مقیاس ۱۰۰ جایگاه ژنی در نشانگرهای مبتنی بر PCR به بیش از ۱۰۰۰ جایگاه ژنی در روش‌های مبتنی بر ژنوتایپینگ افزایش یافته است (برگرفته از Tripodi، ۲۰۲۳).



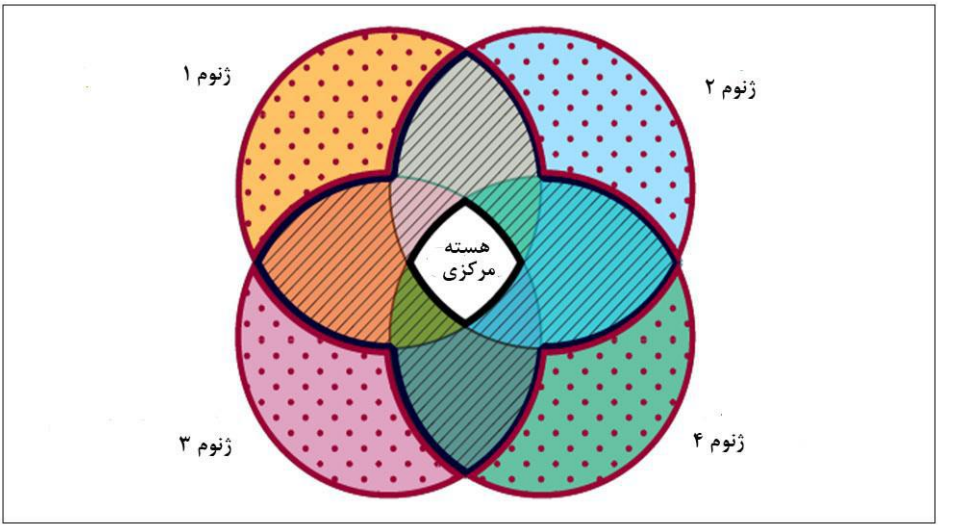
شکل۴-۱ استفاده از اپی‌آلل‌ها برای بهبود صفات زراعی مختلف (برگرفته از Gupta and Salgotra، ۲۰۲۲).



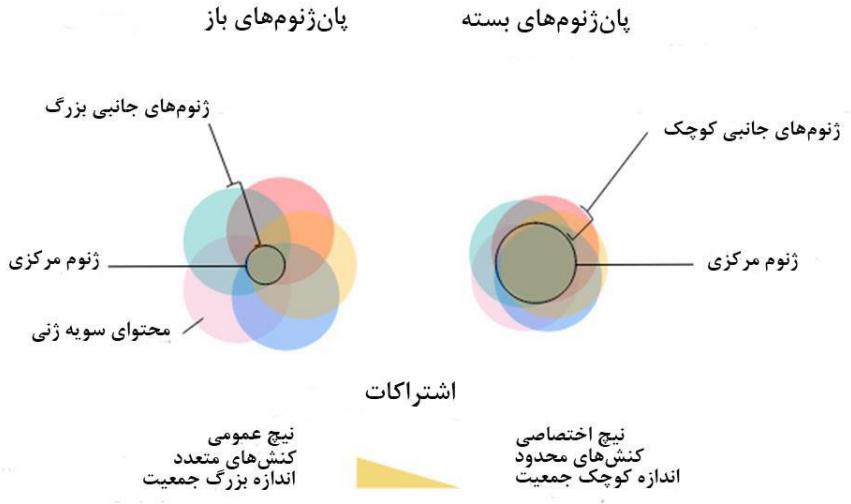
شکل۴-۲ تغییرات اپی‌ژنتیکی می‌تواند به سازگاری و تکامل گیاهان غیرمدل کمک کند (برگرفته از: Thiebaut و همکاران، ۲۰۱۹).



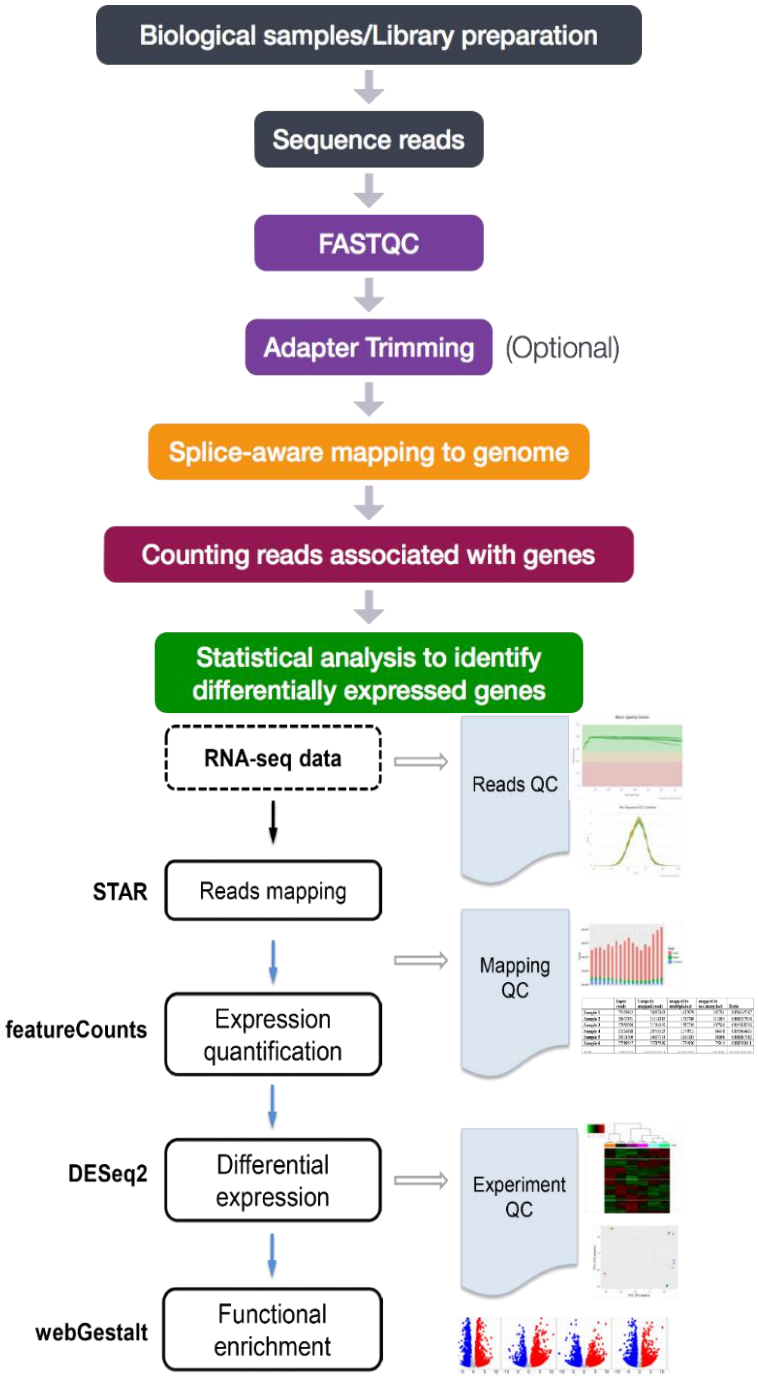
شکل۴-۳ استفاده از اپی‌ژنومیکس به منظور ظهور پدیده هتروزیس در برنامه اصلاح گیاهان.



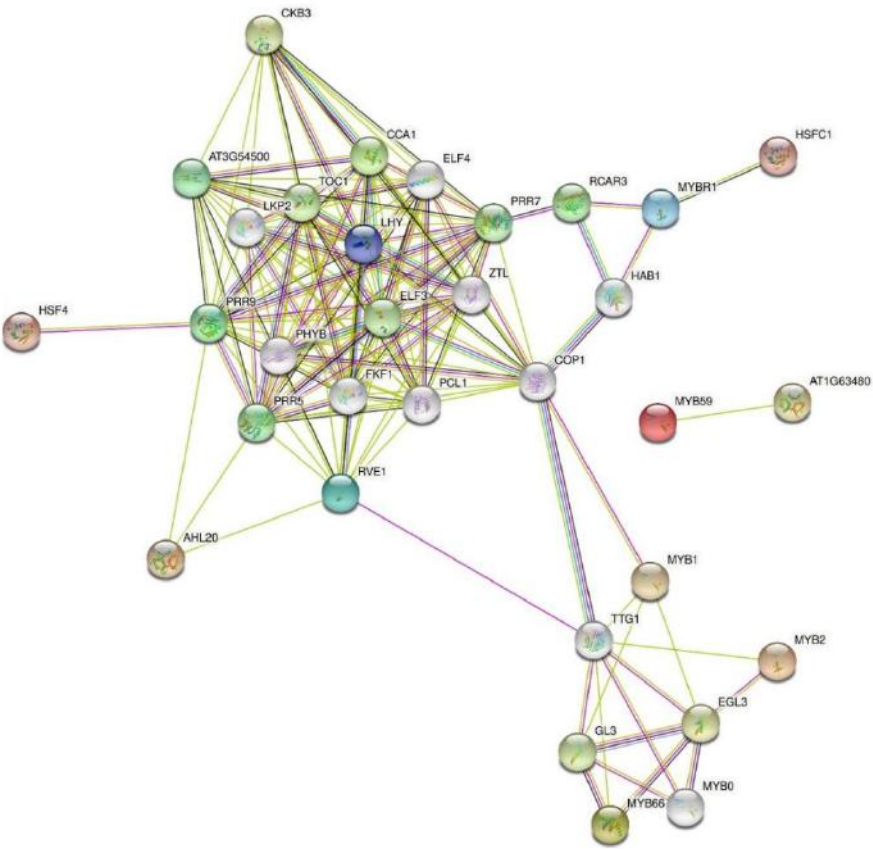
شکل۵-۱ در پان‌ژنوم، می‌توان دو دسته از ژن‌ها را شناسایی نمود: ژنوم هسته یا Core، شامل ژن‌هایی است که در همه ژنوم‌های مورد تجزیه و تحلیل وجود دارد و ژنوم جانبی یا Accessory که در همه ژنوم‌ها وجود ندارد.



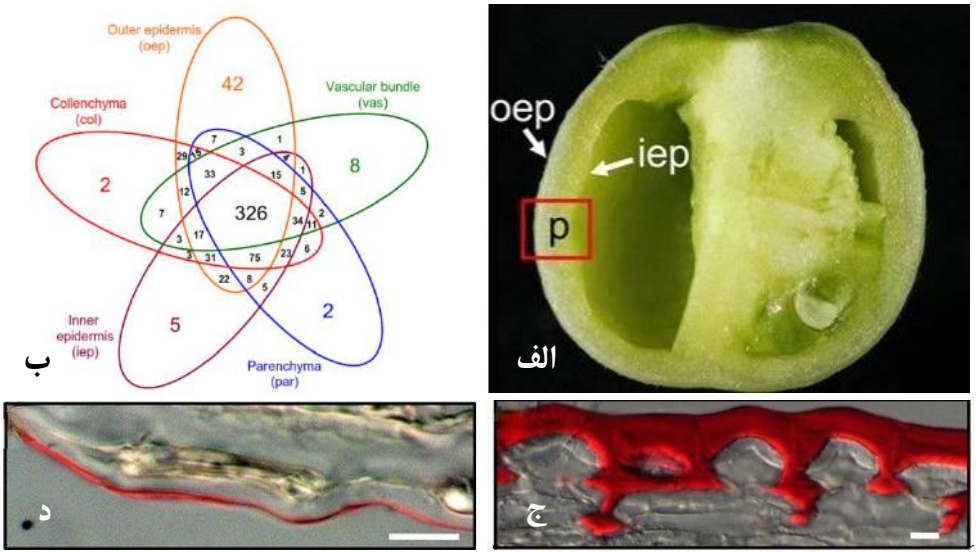
شکل۵-۲ شماتیک مقایسه پان‌ژنوم‌های بسته و باز.



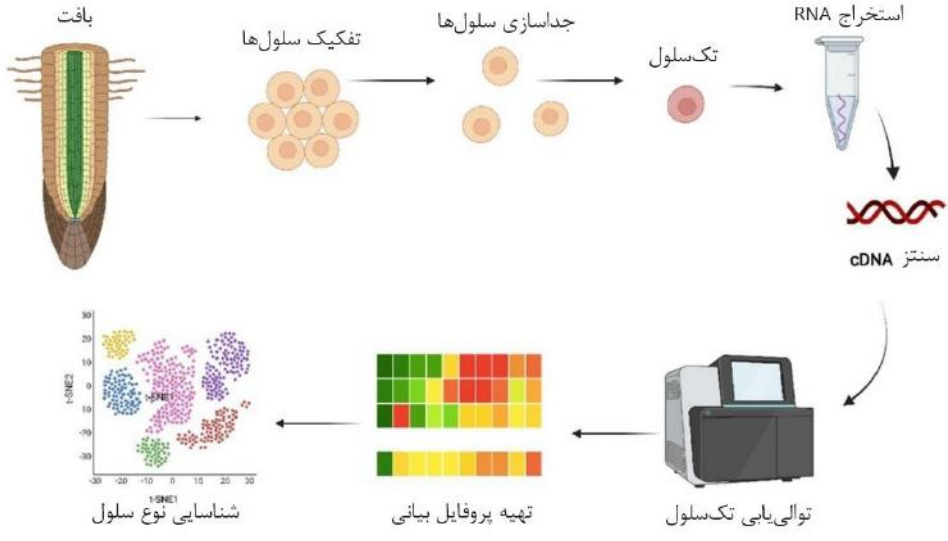
شکل۶-۲ شمایی از مسیر آنالیز RNA-seq در موجودات زنده.



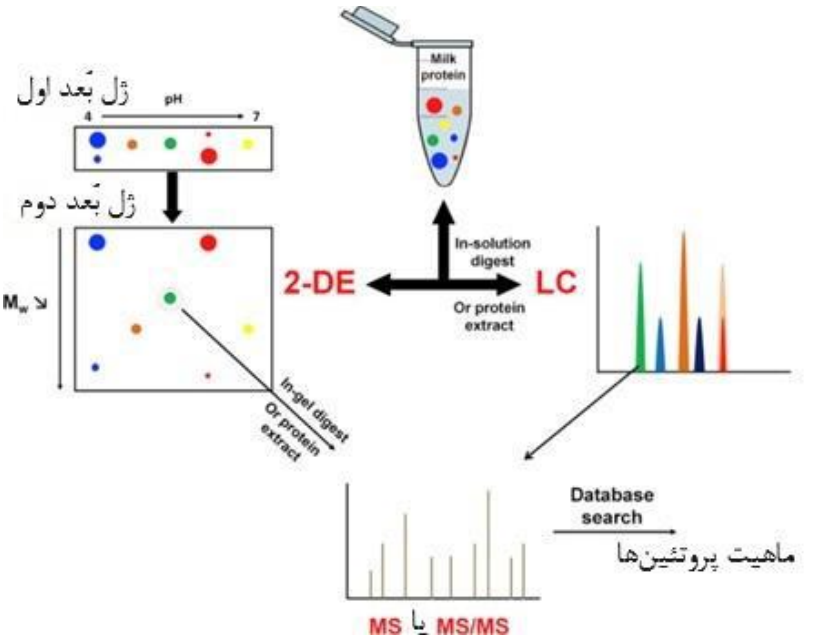
شکل۶-۳ شبکه ارتباط پروتئینی فاکتورهای رونویسی موثر در مراحل مختلف جنین‌زایی سوماتیکی گیاه آرابیدوپسیس . پروتئین‌های مرتبط با ساعت زیستی در مرکز خوشه پروتئینی قرار گرفته‌اند (برگرفته از Khadem و همکاران، ۲۰۲۳).



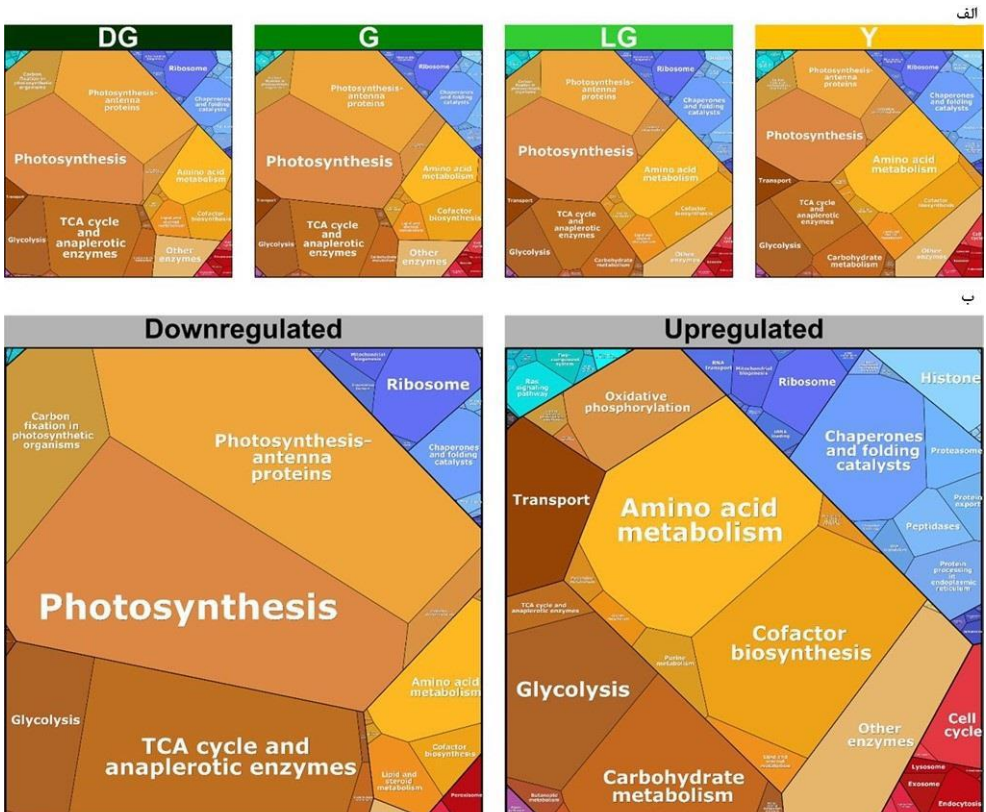
شکل۶-۴ شناسایی کوتیکول در سطح داخلی اپیدرم پریکارپ میوه گوجه‌فرنگی. (الف) اپیدرم خارجی (oep) و داخلی (iep) در پریکارپ (p) میوه گوجه‌فرنگی، (ب) پروفایل بیانی ژن‌های مرتبط با کوتیکول در بافت‌های مختلف پریکارپ میوه گوجه‌فرنگی، (ج و د) لایه کوتیکول رنگ‌آمیزی شده در اپیدرم خارجی (ج) و داخلی (د) پریکارپ میوه گوجه‌فرنگی (برگرفته از Matas و همکاران، ۲۰۱۱).



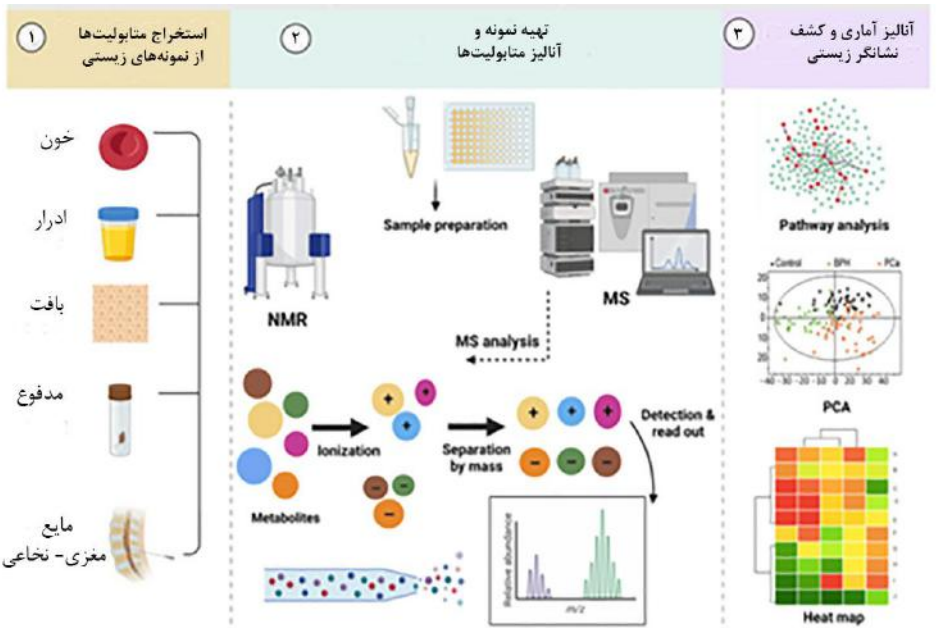
شکل۶-۵ نحوه توالی‌یابی RNA تک سلول. این فرآیند با شناسایی و جداسازی سلول‌های هدف از بافت گیاهی آغاز شده و پس از استخراج RNA، سنتز cdna، توالی‌یابی و تهیه پروفایل بیانی در نهایت نوع سلول مشخص می‌شود (برگرفته از Bawa و همکاران، ۲۰۲۲).



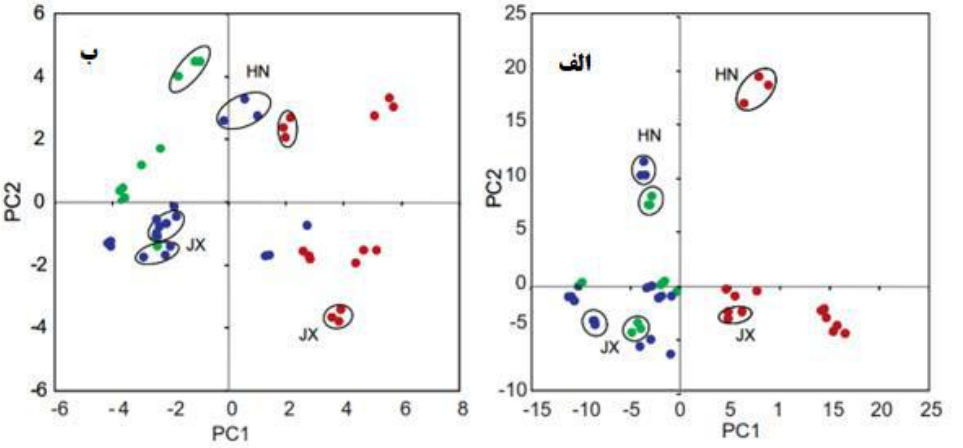
شکل۷-۱ شمایی از مسیر آنالیز پروتئومیکس با استفاده از الکتروفورز دوبعدی.



شکل۷-۳ محتوای پروتئوم برگ در فرآیند پیری. (الف) عملکرد محتوای پروتئوم برگ در ۴ مرحله رشدی دارای بالاترین میزان کلروفیل (DG)، ۴۵ درصد کلروفیل (G)، ۲۵ درصد کلروفیل (LG) و ۶٫۵ درصد کلروفیل (Y)، (ب) عملکرد کلی محتوای پروتئوم دارای افزایش و کاهش فعالیت در فرآیند پیری برگ (برگرفته از Tamary و همکاران، ۲۰۱۹).

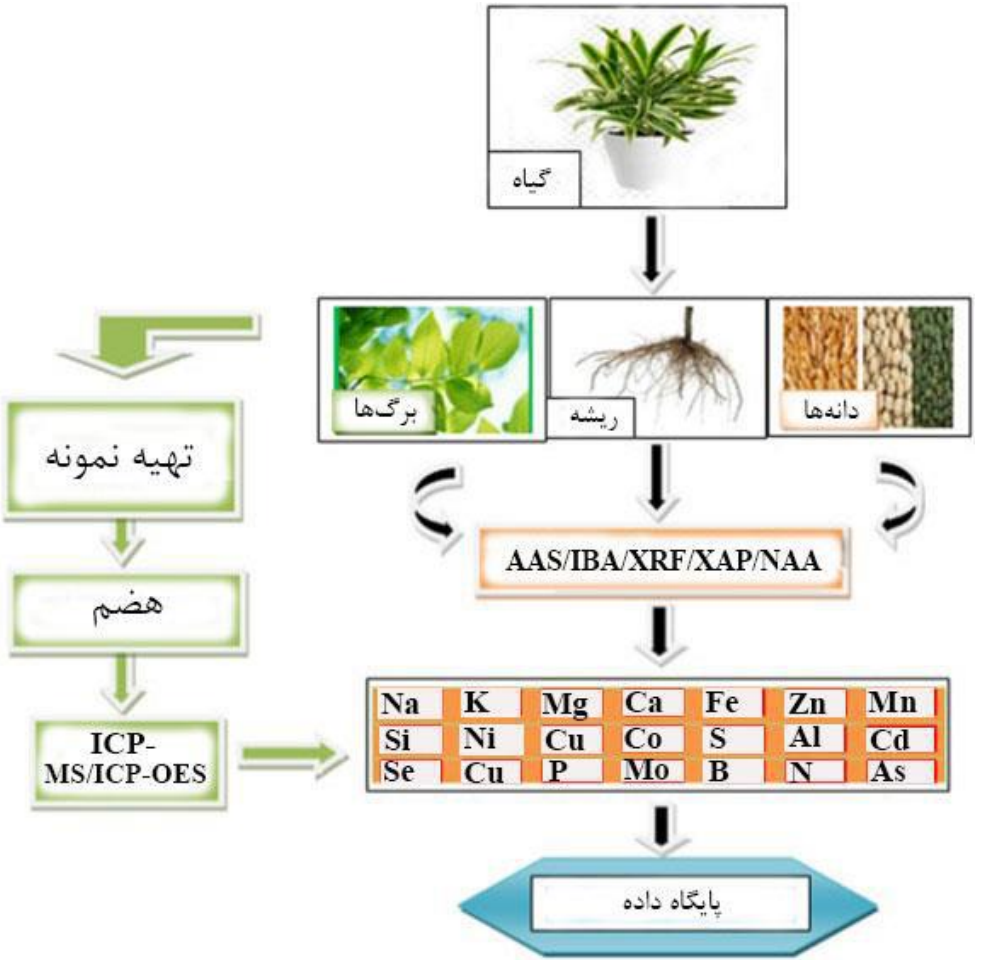


شکل۸-۱ شمایی از مسیر آنالیز متابولومیکس برای شناسایی متابولیت‌ها.

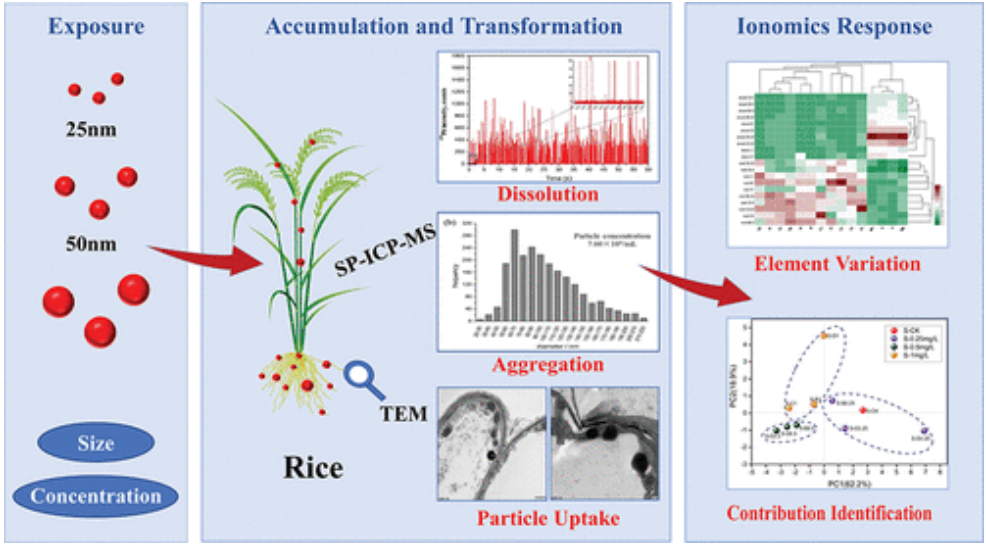


شکل۸-۲ آنالیز GC-FID اجزای قطبی اسیدها، اسیدآمینه‌ها و آمین‌ها (الف) قندها و الکل‌های قندی (ب) در ژنوتیپ وحشی (●) و ژنوتیپ‌های جهش‌یافته Os-lpa-XS110-1 (●) و Os-lpa-XS110-2 (●) رقم Xiushui 110 گیاه برنج (برگرفته از فرانک و همکاران، ۲۰۰۷).

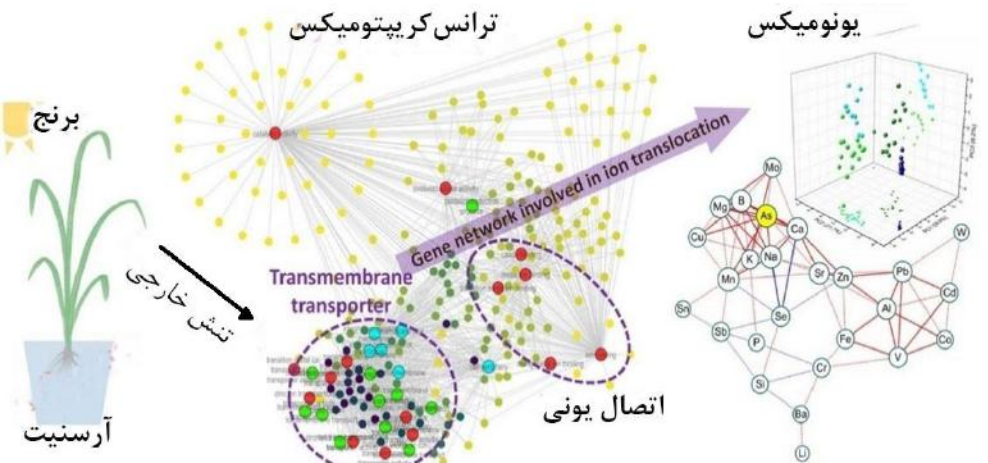
شکل۸-۳ کاربرد گسترده فناوری متابولومیکس در علوم زیستی و به‌خصوص کشف ترکیبات دارویی جدید برای درمان بیماری‌ها.



شکل۹-۱ شمایی از مسیر آنالیز یونومیکس در گیاهان.

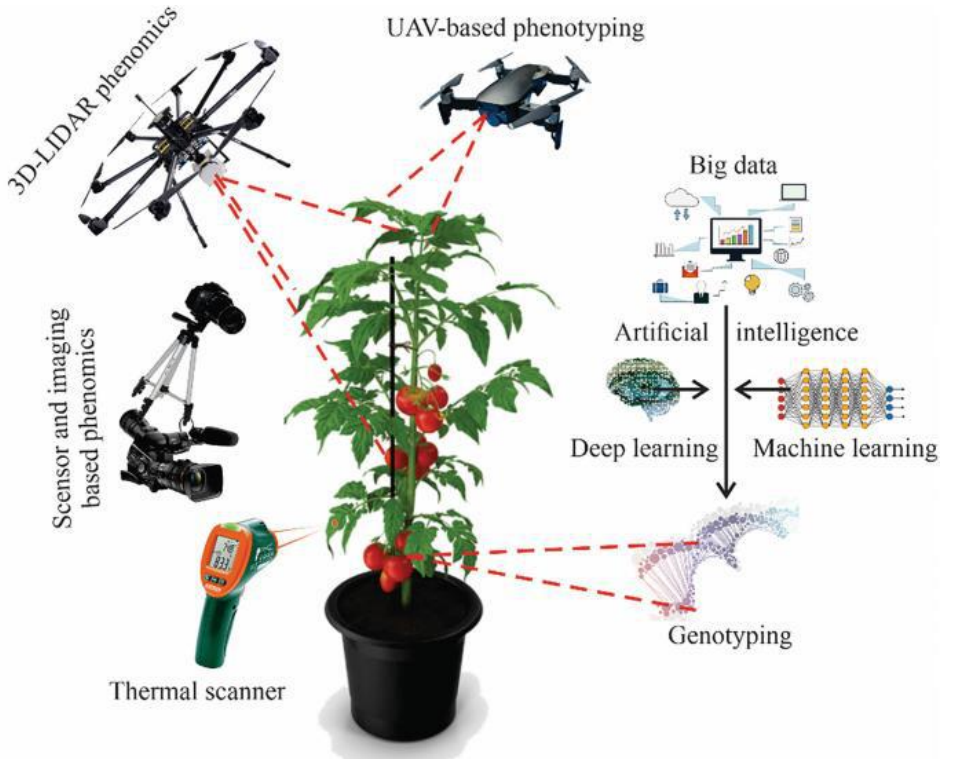


شکل۹-۲ آنالیز یونومیکس در گیاه برنج تحت تأثیر نانوذرات پلاتینیوم (برگرفته از Zhou و همکاران، ۲۰۰۳).

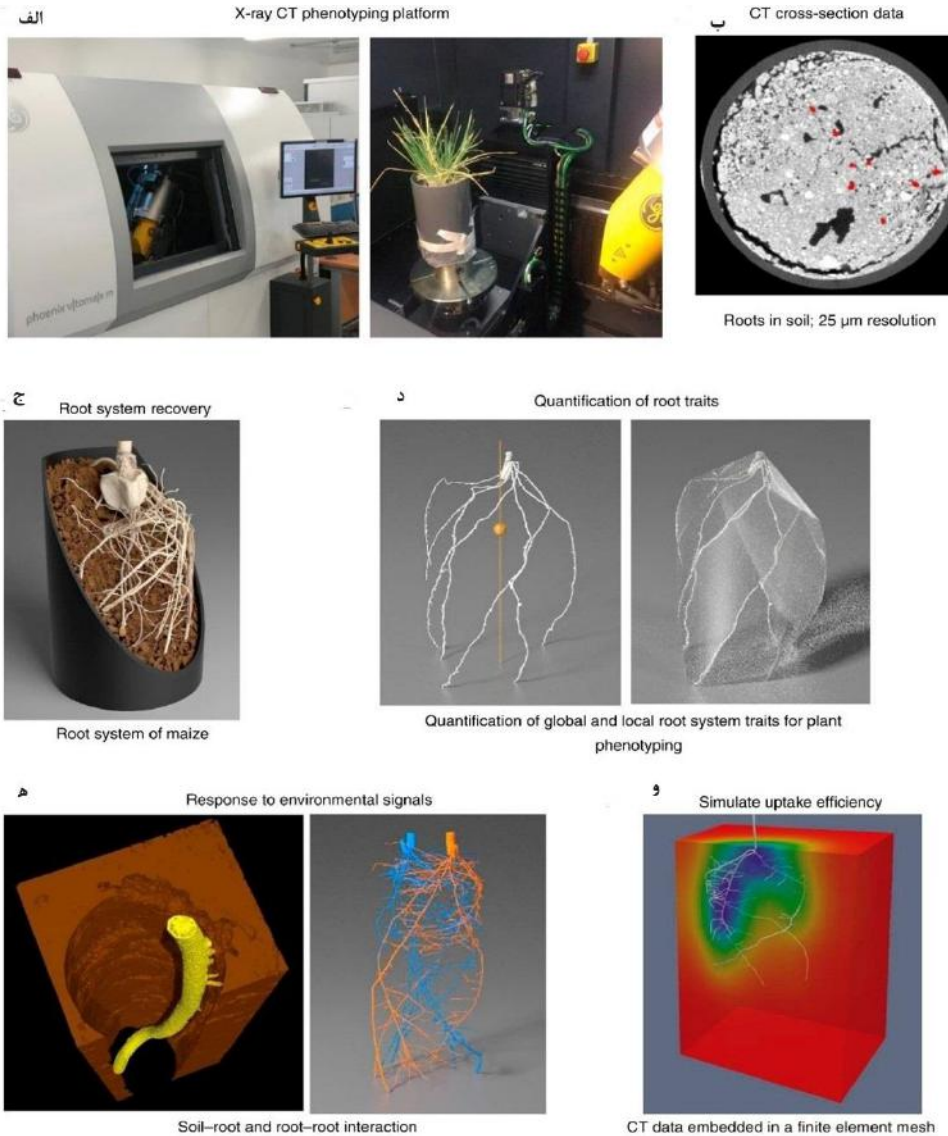


شکل۹-۳ ارتباط بین ترانس‌کریپتومیکس و یونومیکس در گیاه برنج در پاسخ به تنش آرسنیت (برگرفته از Xiao و همکاران، ۲۰۲۱).

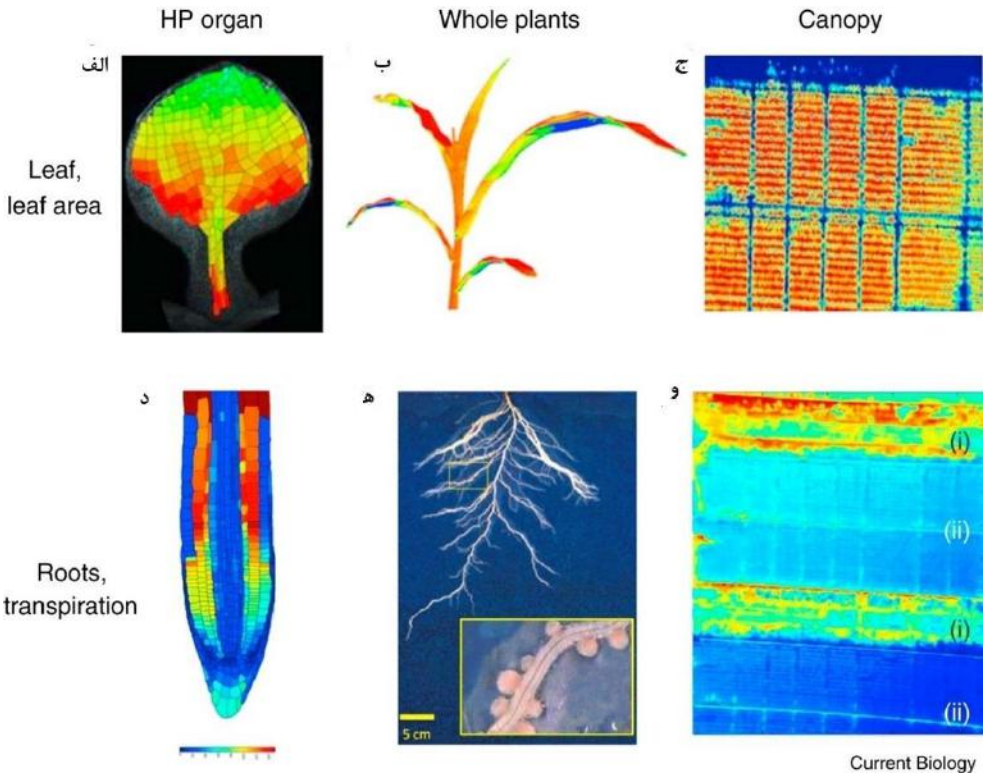
شکل۹-۴ شماتیک یونومیکس و کاربردهای مختلف آن در توسعه کشاورزی (برگرفته از Ali و همکاران، ۲۰۲۱).



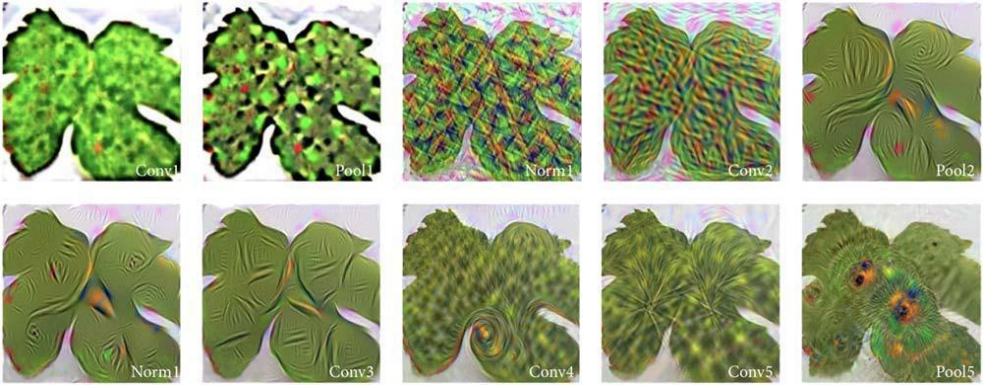
شکل۱۰-۱ پیشرفت‌ها در کاربرد ابزارهای فنومیکس در کشاورزی برای مدیریت، کشاورزی پایدار و به‌نژادی گیاهی.



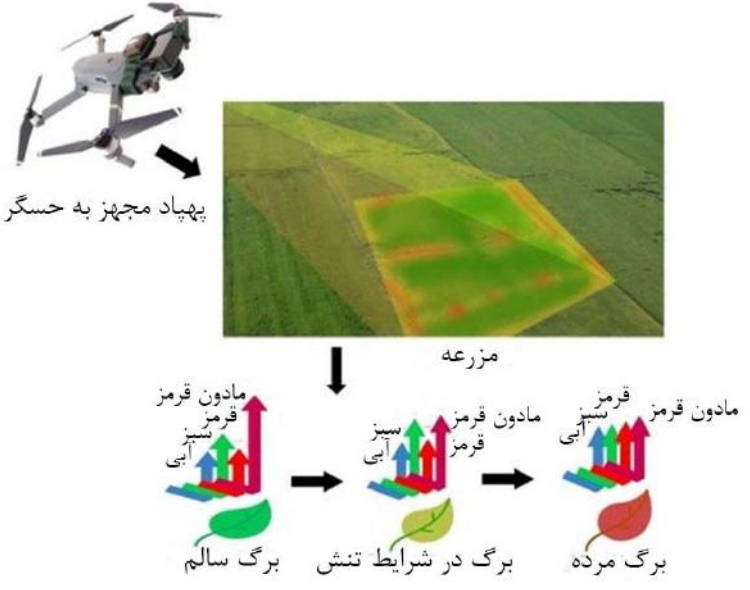
شکل ۱۰-۲ مسیر کسب اطلاعات فنوتیپی ریشه گیاه با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس (μCT). (الف) سیستم اسکن μCT برای تصویربرداری غیرتهاجمی از ستون‌های حاوی گیاهان رشدیافته در خاک (با وضوح بین ۰.۵ تا ۱۵۰ میکرومتر). (ب) نمونه تصویر مقطعی دوبعدی ایجاد شده با اسکنر μCT که مواد ریشه (قرمز) و ساختار ناهمگن خاک (خاک و آب به رنگ خاکستری، فضاهای هوا به رنگ سیاه) را نشان می‌دهد. (ج) نرم‌افزار تجزیه و تحلیل تصویر را می‌توان برای بازیابی سیستم ریشه ذرت از داده‌های حجیم μCT پس از کسب هزاران برش تصویر دوبعدی، (د) و تعیین کمّیت صفات سیستم ریشه، (ه) کشف پاسخ‌های جدید ریشه به سیگنال‌های محیطی، مانند نحوه الگوهای توزیع آب خاک در موقعیت ریشه‌های جانبی (و) مدل‌های پارامتری برای شبیه‌سازی رشد و جستجوی منابع طبیعی توسط سیستم‌های ریشه. (برگرفته از Tardieu و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۱۰-۳ تکنیک‌های جدید تصویربرداری در مقیاس اندام با سیستم‌های با دقت بالا (HP)، در مقیاس گیاهی و در مقیاس تاج پوشش. (الف) نقشه حرارتی نشان‌دهنده نرخ انبساط سطحی برگ با استفاده از تصویربرداری با گذشت زمان و مدل‌سازی کامپیوتری (قرمز به سبز، رشد سریع تا آهسته) (ب) نمایش سه‌بعدی یک گیاه ذرت از تصاویر متعدد، با توان عملیاتی ۱۰۰۰ بوته در روز. رنگ‌ها میزان نور دریافتی هر پیکسل گیاه را نشان می‌دهند. (ج) تصویر چندطیفی (NDVI) از یک مزرعه. رنگ‌های قرمز به طور فزاینده نشان‌دهنده افزایش سطح برگ در واحد متر مربع خاک است. (د) تصویر یک بیوسنسور اکسین در ریشه اولیه آرابیدوپسیس که با تصویربرداری کانفوکال به‌دست آمده است (ه) سیستم ریشه کل گیاه در یک ریزوترون با توان عملیاتی ۱۰۰۰ بوته در روز تصویربرداری شده است (و) تصویر یک تاج پوششی در نور مادون قرمز حرارتی. رنگ‌های قرمز به‌طور فزاینده نشان‌دهنده میزان تعرق کمتر است که اغلب به سیستم ریشه نامطلوب مرتبط است. مناطق افقی با رنگ‌های متمایز: (i) قطعه بدون آبیاری، (ii) قطعه با آبیاری (i) (برگرفته از Tardieu و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل۱۱-۱ تصویرسازی خروجی لایه‌بندی به منظور شناسایی علائم بیماری در برگ گیاه (برگرفته از Sladojevic و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل۱۱-۲ شماتیک نحوه وقوع تنش در مزرعه‌ها و اکوسیستم‌های طبیعی توسط سیستم‌های سنجش از راه دور مجهز به فناوری آنالیز تصویر (برگرفته از Sharma و همکاران، ۲۰۲۲).