

هرباریوم‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های داده‌ای تنوع زیستی، از مجموعه‌های گیاهی تا پایگاه‌های داده هوشمند

فرخ قهرمانی نژاد^{۱*}، حمید نظری^۲، مریم خواجه پیری^۳، احسان حسینی^۱

۱. گروه علوم گیاهی، دانشگاه خوارزمی
۲. گروه زیست‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۳. گروه زیست‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
fgh@khu.ac.ir
نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

هرباریوم‌ها که در گذشته عمدتاً به‌عنوان مجموعه‌هایی فیزیکی از گیاهان خشک‌شده شناخته می‌شدند، امروزه به زیرساخت‌های عظیم داده‌محور برای پایش و مدیریت تنوع زیستی تغییر ماهیت داده‌اند. هر نمونه هرباریومی، فراتر از یک نمونه فیزیکی، ثبتي دقیق از حضور گونه در ابعاد زمان و مکان است که زیربنای مطالعات گوناگونی از رده‌بندی و سیستماتیک مولکولی گرفته تا مدل‌سازی توزیع گونه‌ها، پایش تغییرات اقلیمی و پژوهش‌های باستان‌شناسی را تشکیل می‌دهد. در این مقاله، با اتخاذ رویکردی تحلیلی، ابتدا مفهوم هرباریوم در قالب یک سیستم داده‌ای تبیین شده، سپس چرخه عمر یک نمونه از برنامه‌ریزی جمع‌آوری تا دیجیتال‌سازی و بهره‌برداری نوین علمی تشریح می‌گردد. تمرکز اصلی این پژوهش بر نقش فناوری‌های نوظهور نظیر توالی‌یابی نسل جدید، داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی در تحول کارکردهای هرباریوم است. همچنین ابعاد حقوقی و اخلاقی بین‌المللی از جمله پروتکل ناگویا در مدیریت این مجموعه‌ها بررسی می‌شود. در نهایت، با نگاهی به وضعیت هرباریوم‌های مرجع، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده این زیرساخت‌های حیاتی مورد واکاوی قرار می‌گیرد تا نقشه راهی برای گذار از انبار نمونه به پایگاه داده‌های هوشمند ترسیم شود.

کلید واژگان: تنوع زیستی، دیجیتال‌سازی، توالی‌یابی DNA، مدل‌سازی توزیع گونه‌ها، پروتکل ناگویا، هوش مصنوعی

مقدمه

تنوع زیستی سیاره زمین با سرعتی بی‌سابقه در حال تغییر است و در این میان، درک صحیح از الگوهای توزیع و فرایندهای تکاملی گیاهان، بیش از هر زمان دیگری به دسترسی به داده‌های دقیق و تاریخی وابسته است. هرباریوم‌ها (گیاکده‌ها) که به طور سنتی به عنوان گنجینه‌های فیزیکی از گیاهان خشک‌شده شناخته می‌شدند، امروزه در آستانه یک تحول بنیادین قرار دارند. این نهادها دیگر تنها مخازنی برای گیاه‌شناسی سنتی نیستند، بلکه به عنوان زیرساخت‌های داده‌ای تنوع زیستی^۳ در قرن بیست و یکم بازتعریف شده‌اند [۱]. هر نمونه هرباریومی در دنیای امروز، یک واحد اطلاعاتی چندبعدی است که داده‌های ریخت‌شناسی، ژنتیکی، بوم‌شناختی و زمانی را در خود نهفته دارد.

با ظهور عصر دیجیتال و پیشرفت در فناوری‌های تصویربرداری با وضوح بالا، مفهوم هرباریوم مجازی مرزهای فیزیکی را درنوردیده و امکان دسترسی جهانی به داده‌های مجموعه‌ها را فراهم کرده است [۲]. (شکل ۱).

علاوه بر این، استخراج DNA از نمونه‌های تاریخی و استفاده از روش‌های توالی‌یابی نسل جدید (NGS)، هرباریوم‌ها را به



شکل ۱. دیجیتال‌سازی نمونه‌های هرباریومی، دسترسی جهانی و ماندگاری بی‌پایان این گنجینه‌های گیاهی را برای نسل‌های آینده تضمین می‌کند.

بیوبانک‌های ژنومیک تبدیل کرده است که پاسخگوی پرسش‌های پیچیده در حوزه فیلوژنی و حفاظت زیستی هستند [۳]. از سوی دیگر، چالش‌های جهانی نظیر تغییر اقلیم، تقاضا برای تحلیل‌های کلان‌داده بر پایه نمونه‌های هرباریومی را افزایش داده است تا بتوان تغییرات در زمان گلدهی و جابه‌جایی محدوده‌های جغرافیایی گونه‌ها را با دقت پیش‌بینی کرد [۴].

مقاله حاضر با اتخاذ رویکردی تحلیلی و داده‌محور، بر نقش نوین هرباریوم‌ها به عنوان زیرساخت‌های اطلاعاتی در مطالعات هوشمند

1. NGS: Next-Generation Sequencing
2. Big Data

3. Biodiversity Data Infrastructures

که بر روی برگه‌های مقوایی با ابعاد استاندارد نصب و برچسب‌گذاری شده‌اند. اما در نگرش نوین، هر نمونه فراتر از یک نمونه فیزیکی، یک حسگر زیستی و یک رکورد داده‌ای^۱ در مقیاس زمان و مکان محسوب می‌شود [۱]. در این نگاه، اعتبار علمی هر نمونه منوط به وجود سه گانه اطلاعاتی (نام گونه، مکان دقیق و زمان ثبت) است. داده‌های هرباریومی می‌توانند الگوهای تنوع زیستی را با دقت مناسبی بازنمایی کرده، در بسیاری موارد نسبت به داده‌های حاصل از مشاهدات عمومی، سوگیری کمتری داشته باشند [۷][۶]. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، طبق استانداردهای بین‌المللی تبادل داده‌های تنوع زیستی، یک رکورد کامل هرباریومی باید شامل موارد زیر باشد.



شکل ۲. داده‌های یک نمونه ثبت شده هرباریومی، طبق استانداردهای بین‌المللی.

تغییرات اقلیمی و بررسی جابه‌جایی تقویم گلدهی گیاهان در طول سده‌ها است [۹].

علاوه بر نمونه‌های خشک استاندارد، هرباریوم‌های پیشرو برای پاسخ به نیازهای پژوهشی نوین، مجموعه‌های زیر را نیز ادغام کرده‌اند.

– **بانک بافت و DNA:** نگهداری قطعات گیاهی در سیلیکاژل یا فریزرهای دمای فوق پایین جهت تضمین کیفیت استخراج اسیدهای نوکلئیک برای مطالعات نسل جدید توالی‌یابی (NGS) [۱۰].

شکل ۳ بخشی از دمای ذخیره شده در هرباریوم باغ گیاه‌شناسی کیو را که در ظروف مخصوص شماره‌گذاری شده‌اند نشان می‌دهد.



شکل ۳. ظروف مخصوص ذخیره DNA در هرباریوم باغ گیاه‌شناسی کیو لندن (تصویر از وبسایت باغ گیاه‌شناسی کیو).

تنوع زیستی و فناوری‌های مرتبط تمرکز دارد. هدف از این نوشتار، تبیین جایگاه هرباریوم در اکوسیستم داده‌های علمی نوین و بررسی چالش‌های انتقال از هرباریوم سنتی به دیجیتال در راستای مدیریت پایدار تنوع زیستی است.

مقاله حاضر در ادامه مطالعه قهرمانی [۵]، با تمرکز بر نقش داده محور و فناوری‌ها تدوین شده است.

۲- هرباریوم به عنوان یک سیستم داده‌ای

۱-۲. تعریف هرباریوم در نگاه داده محور

در تعاریف کلاسیک، هرباریوم مجموعه‌ای از نمونه‌های گیاهی است

– **هویت زیستی و تبارشناختی:** نام علمی به‌روز (شامل سرده، گونه و واحدهای زیرگونه‌ای) که بر اساس آخرین تغییرات رده‌بندی در پایگاه‌هایی مثل IPNI اصلاح شده باشد.

– **اطلاعات گردآوری:** نام گردآورنده و شماره جمع‌آوری که امکان ردیابی نمونه در سایر مجموعه‌ها را فراهم می‌کند.

– **فرا داده‌های مکانی و بوم‌شناختی:** مختصات جغرافیایی دقیق (طول و عرض جغرافیایی)، از سطح دریا و شرح ویژگی‌های زیستگاه. دقت این داده‌ها برای تحلیل‌های مدرن نظیر مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (SDM) حیاتی است [۸].

– **فرا داده‌های زمانی:** تاریخ دقیق جمع‌آوری که زیربنای مطالعات



شکل ۴. مجموعه‌هایی که علاوه بر نمونه‌های خشک استاندارد، در هرباریوم‌ها نگهداری می‌شوند. نمونه‌های بافت زنده (سمت راست) پس از قرار گرفتن در سیلیکاژل، در فریزر قرار داده می‌شوند.

این ساختار نظام مند داده‌ها باعث می‌شود هرباریوم به عنوان یک زیرساخت در شبکه جهانی اطلاعات تنوع زیستی عمل کرده و از مرزهای یک انبار فیزیکی فراتر رود.

۳- تحول تاریخی هرباریوم‌ها: از مخزن فیزیکی تا زیرساخت دیجیتال

۳-۱. مسیر جهانی: از مجموعه‌های پزشکی تا کلان‌داده

هرباریوم‌ها از مهم‌ترین منابع علمی در مطالعات گیاه‌شناسی، تنوع زیستی و تاریخ طبیعی به شمار می‌آیند و نمونه‌های نگهداری شده در آن‌ها، علاوه بر کاربردهای تاکسونومیک و شناسایی گونه‌ها، به عنوان اسناد تاریخی ارزشمند برای بررسی تغییرات فلور، پراکنش گیاهان و تحولات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷]. بخش قابل توجهی از مجموعه‌های ارزشمند هرباریومی جهان حاصل سفرهای علمی و اکتشافی قرن نوزدهم است که با هدف مطالعه مناطق ناشناخته، انجام شدند. در این سفرها پژوهشگران علاوه بر مطالعات جغرافیایی و طبیعی، اقدام به گردآوری نمونه‌های گیاهی کردند که امروزه اهمیت فراوانی در بازسازی پوشش گیاهی گذشته و مطالعات تاریخی دارند [۱۸] [۱۹]. نمونه‌ای برجسته از این اهمیت، مجموعه گیاهان گردآوری شده در سفر علمی چادبورن^۲ به گرینلند در سال ۱۸۶۰ است که شامل بیش از ۲۲۰ نمونه گیاهی و ۹۳ آرایه بوده و به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و منظم‌ترین مجموعه‌های هرباریومی غرب گرینلند شناخته می‌شود. بررسی مجدد این نمونه‌ها پس از گذشت بیش از ۱۶۰ سال نشان داده است که مجموعه‌های هرباریومی کهن همچنان دارای ارزش علمی، تاریخی و تاکسونومیک قابل توجهی هستند و می‌توانند در مطالعات فلور تاریخی، تغییرات محیطی و تاریخ اکتشافات علمی مورد استفاده قرار گیرند [۲۰] [۲۱].

ریشه‌های هرباریوم مدرن به دوران رنسانس در اروپا (قرن شانزدهم) بازمی‌گردد؛ زمانی که «لوکا گینی»^۳، پزشک و گیاه‌شناس ایتالیایی، برای اولین بار روش خشک کردن گیاهان تحت فشار و چسباندن

– زیلاریوم: بایگانی نمونه‌های چوبی جهت مطالعات آناتومی، درخت‌گاه‌شناسی یا دندروولوژی و شناسایی گونه‌های تجاری (شکل ۴)
– مجموعه‌های نگهداری شده در مایع: نگهداری نمونه‌ها در محلول‌های تثبیت‌کننده (مانند FAA) برای حفظ ساختار سه‌بعدی اندام‌های ظریف و گل‌های پیچیده که در روش خشک کردن از بین می‌روند (شکل ۴).

موانع فنی ناشی از نمونه‌های DNA کم کیفیت و تخریب شده که در نمونه‌های بسیار قدیمی یا به خوبی خشک نشده یافت می‌شوند، در بسیاری از موارد به وسیله فناوری‌های توالی‌یابی نسل جدید برطرف شده‌اند. در نتیجه، از اوایل قرن بیست و یکم، حجم عظیم دیگری از داده‌های ژنتیکی و فیلوژنتیکی استخراج شده از مجموعه‌های تاریخ طبیعی در دسترس قرار گرفت [۱۱] [۱۲] [۱۳] [۱۴] [۱۵].

۲-۲. اصطلاحات کلیدی و نقش آن‌ها در استانداردسازی علمی

برای اینکه هرباریوم از یک مجموعه شخصی به یک سیستم مرجع جهانی تبدیل شود، بکارگیری اصطلاحات و استانداردهای زیر الزامی است.

نمونه شاهد: این نمونه‌ها سندیت علمی پژوهش‌ها هستند. هرگونه تحقیق در حوزه‌های فیتوشیمی، ژنتیک یا اکولوژی بدون سپردن نمونه شاهد به یک هرباریوم رسمی، فاقد قابلیت تکرارپذیری علمی است [۱۶].

نمونه تیپ: این نمونه‌ها در واقع استاندارد طلایی نام‌گذاری گیاه‌شناسی هستند. هر نام علمی جدیدی که منتشر می‌شود، باید به یک نمونه فیزیکی (معمولاً هولوتیپ) در یک هرباریوم معتبر متصل باشد. این نمونه‌ها به دلیل ارزش غیرقابل جایگزین، معمولاً در بخش‌های با امنیت بالا نگهداری می‌شوند.

اکسیکاتا^۱: توزیع مجموعه‌های شماره‌دار همسان بین هرباریوم‌های مختلف جهان، نه تنها ضریب ایمنی حفظ داده‌ها را بالا می‌برد، بلکه به هماهنگی بین‌المللی در تفسیر گونه‌ها کمک شایانی می‌کند.

1. Exsiccata
2. Paul A. Chadbourne

3. Luca Ghini

هرباریوم در منابع کلاسیک به کار نرفته است، اما دانشمندان معروفی همچون ابوعلی سینا در کتاب *قانون* در طب و زکریای رازی در *الحاوی*، با دقت زیادی به توصیف ویژگی‌های ریخت‌شناسی و دارویی گیاهان پرداخته‌اند. پزشکان و عطاران در گذشته برای حفظ اصالت داروها، نمونه‌های خشک گیاهی را در بسته‌بندی‌های خاصی نگهداری می‌کردند که می‌شود آن را فرمی اولیه از مجموعه‌های گیاهی دانست. تحول مدرن هرباریوم در ایران با تأسیس مدرسه دارالفنون آغاز شد. با شکل‌گیری دانشگاه‌های مختلف، هرباریوم‌های دانشگاهی و ملی متعددی ایجاد شدند. امروزه، هرباریوم‌های ایران نه تنها به عنوان آرشیو فلوریستیک، بلکه به عنوان مراکز اصلی مطالعات فیلوژنی مولکولی و پایش تنوع زیستی در منطقه غرب آسیا شناخته می‌شوند و در حال گذار به سمت دیجیتال‌سازی مرجع هستند [۵].

۴- چرخه عمر نمونه هرباریومی: از میدان تا پایگاه داده (رویکرد مرحله‌به‌مرحله)

تبدیل یک گیاه در طبیعت به یک نمونه استنادی در هرباریوم، فرایندی دقیق است که استاندارد بودن هر مرحله از آن، ارزش علمی نهایی نمونه را تعیین می‌کند. شکل ۵ چرخه عمر نمونه هرباریومی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. چرخه و مراحل که یک نمونه هرباریومی پشت سر می‌گذارد. نگهداری ایمن نمونه و داده‌ها • به روزرسانی و پشتیبان‌گیری • انتقال دانش و نمونه به نسل‌های آینده

گام ۲: جمع‌آوری میدانی و ثبت کلان-داده‌ها

نمونه باید نماینده واقعی جمعیت باشد. اولویت با جمع‌آوری گیاهان کامل (شامل ریشه، ساقه، برگ، گل و در صورت امکان میوه) است - شماره جمع‌آوری: هر نمونه باید یک شماره منحصر به فرد دریافت کند که به عنوان کد شناسایی در تمام پایگاه‌های داده آتی عمل می‌کند.

- ثبت صحرائی: یادداشت ویژگی‌هایی که پس از خشک شدن از

آن‌ها بر روی کاغذ را برای اهداف آموزشی و مطالعه گیاهان دارویی ابداع کرد [۵]. در قرون هفدهم و هجدهم، عصر سفرهای اکتشافی، هرباریوم‌ها از مجموعه‌های شخصی به نهادهای علمی تبدیل شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده توسط کاشفانی نظیر بانک و سولاندر، شالوده هرباریوم‌های عظیم امروزی مانند هرباریوم باغ گیاه‌شناسی کیو (Kew) و هرباریوم موزه تاریخ طبیعی پاریس (P) را بنا نهادند که در ایندکس هرباریومی از مهم‌ترین و شاخص‌ترین هرباریوم‌های دنیا به شمار می‌روند [۲۲].

در قرن هجدهم، کارل لینه به صورت نظام‌مند از نمونه‌های هرباریومی برای تدوین نامگذاری دونامی، جایگاه هرباریوم را به عنوان استاندارد مرجع در رده‌بندی تثبیت کرد. در قرن نوزدهم و بیستم، با گسترش موزه‌های تاریخ طبیعی، هرباریوم‌ها به ابزار اصلی مطالعات فلوریستیک و تکاملی تبدیل شدند [۲۳]. امروزه در قرن بیست‌ویکم، هرباریوم‌ها شاهد تحولی بنیادین هستند؛ جایی که دیجیتال‌سازی و ایجاد پایگاه‌های داده برخط (مانند GBIF و iDigBio)، این مراکز را از مخازن فیزیکی محدود به زیرساخت‌های جهانی و در دسترس برای تحلیل‌های کلان‌داده تبدیل کرده است [۱].

۳-۲. پیشینه در ایران: از طب سنتی تا هرباریوم‌های نوین

سنت مستندسازی گیاهان در ایران پیشینه‌ای کهن دارد. گرچه واژه

گام ۱: برنامه‌ریزی و الزامات قانونی

پیش از عزیمت به میدان، تعیین اهداف پژوهشی (مانند بررسی‌های فلوریستیک، فیلوژنتیک یا تبارشناسی) جهت انتخاب ابزار مناسب ضروری است. در این مرحله، اخذ مجوزهای قانونی از سازمان‌های متولی منطقه بر پروتکل ناگوبا برای دسترسی به ذخایر ژنتیکی الزامی است [۵]. تجهیزات باید شامل پرس‌های استاندارد، کاغذهای خشک‌کن با قدرت جذب بالا، GPS با دقت زیاد و دفاتر یادداشت ضدآب باشد.

دست می‌روند (مانند رنگ دقیق گلبرگ‌ها، بوی گیاه، وجود لاتکس و ارتفاع گیاه زنده) اساسی است. امروزه استفاده از نرم افزارهای ثبت داده میدانی برای ثبت مستقیم مختصات و زمان، ضریب خطای انسانی را به شدت کاهش داده است [۲۴].

گام ۳: پرس و آماده سازی نمونه

هدف از این مرحله، خشک کردن سریع نمونه برای جلوگیری از فساد بافتی و در عین حال حفظ ویژگی‌های ریخت‌شناسی است.

– **آرایش نمونه:** برگ‌ها باید به گونه‌ای قرار گیرند که هم سطح رویی و هم سطح زیرین قابل مشاهده باشد. اندام‌های متراکم باید برش داده شوند تا از ایجاد برآمدگی و حبس رطوبت جلوگیری شود.

– **مدیریت رطوبت:** تعویض روزانه کاغذهای مرطوب یا استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن با دمای کنترل‌شده (۴۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد) برای حفظ کیفیت DNA و جلوگیری از رشد قارچ‌ها ضروری است [۲۵].

گام ۴: نصب^۱ و برچسب‌گذاری

در این مرحله، گیاه بر روی مقواهای استاندارد بدون اسید نصب می‌شود.

– **فنون نصب:** استفاده از چسب‌های خنثی یا نوارچسب‌های پارچه‌ای و در مورد اندام‌های سنگین، دوختن با نخ‌های کتان توصیه می‌شود.

– **برچسب:** برچسب هرباریومی شناسنامه نمونه است. علاوه بر نام علمی و اطلاعات مکانی، افزودن بارکد فیزیکی در این مرحله، اتصال نمونه به دنیای دیجیتال را برقرار می‌سازد.

گام ۵: انبارش و حفاظت پایدار

نگهداری فیزیکی در محیطی با دمای ثابت (۱۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی زیر ۵۰٪ برای پیشگیری از تخریب زیستی الزامی است.

مدیریت آفات: امروزه روش‌های غیرشیمیایی مانند انجامد نمونه‌های جدید در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت جایگزین سموم خطرناک شده است تا سلامت محققان و کیفیت بافت برای استخراج DNA حفظ شود [۲۶].

گام ۶: دیجیتال‌سازی و اشتراک‌گذاری داده‌ها

دیجیتال‌سازی نقطه عطفی است که نمونه را از قفسه‌های تاریک به شبکه جهانی اطلاعات متصل می‌کند.

– **تصویربرداری:** تهیه اسکن‌های با وضوح ۶۰۰ dpi (نقطه در اینچ) یا بالاتر که شامل خط‌کش مدرج و نمودار رنگ^۲ باشد.

– **یکپارچه‌سازی:** ورود کلان‌داده‌ها به پایگاه‌های داده استاندارد (مانند نرم‌افزار Specify) و اتصال آن به شبکه‌های همکاری بین‌المللی نظیر GBIF، امکان استفاده از نمونه را در تحلیل‌های کلان‌داده فراهم می‌کند [۱] [۲۵].

گام ۷: بهره‌برداری چندمنظوره

در نهایت، نمونه وارد چرخه خدمت‌رسانی به علم می‌شود:

– **پژوهشی:** استخراج DNA برای فیلوژنی مولکولی یا آنالیز عناصر شیمیایی.

– **حفاظتی:** استفاده از نقاط ثبت‌شده برای تعیین مناطق مهم گیاهی (IPAs).

– **آموزشی و قانونی:** مستندسازی فلوربستیک برای اثبات مالکیت‌های معنوی ملی یا ارائه شواهد در دعاوی زیست‌محیطی.

۵- کاربردهای هرباریوم در علوم و مدیریت تنوع زیستی

هرباریوم‌ها امروزه از نقش سنتی خود به عنوان بایگانی‌های ساکن خارج شده و به آزمایشگاه‌های زنده تبدیل شده‌اند که پاسخگوی پیچیده‌ترین پرسش‌های زیست‌شناختی و زیست‌محیطی هستند.

۵-۱. سیستماتیک، فیلوژنی و انقلاب ژنومیک

هرباریوم‌ها زیربنای اصلی تاکسونومی و توصیف تنوع زیستی زمین هستند. هر تجدیدنظر رده‌بندی یا مونوگراف یا شرح آرایه‌های جدید، مستلزم بررسی دقیق ریخت‌شناسی مقایسه‌ای در نمونه‌های هرباریومی است.

– **نقش نمونه‌های تیپ:** این نمونه‌ها به عنوان استانداردهای عینی برای نام‌گذاری علمی عمل می‌کنند و بدون دسترسی به آن‌ها، پایداری نام‌گذاری گیاهی از بین می‌رود.

– **فیلوژنی مولکولی:** با ظهور فناوری‌های نوین استخراج DNA از نمونه‌های تاریخی، هرباریوم‌ها به منبعی بی‌بدیل برای ترسیم درخت حیات تبدیل شده‌اند. این امر به‌ویژه برای گونه‌هایی که در مناطق صعب‌العبور قرار دارند یا منقرض شده‌اند، حیاتی است [۱۰].

۵-۲. تغییر اقلیم و مدل‌سازی پیش‌دستانه توزیع گونه‌ها

یکی از راهبردی‌ترین کاربردهای نوین هرباریوم، استفاده از داده‌های مکانی^۱ برای مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (SDM) است [۲۶].

– **پایش تغییرات فنولوژیک:** بررسی نمونه‌های جمع‌آوری شده در طول بیش از یک قرن نشان می‌دهد که زمان گل‌دهی بسیاری از گونه‌ها در پاسخ به گرمایش زمین تغییر کرده است [۹].

– **پیش‌بینی الگوهای آتی:** با ترکیب داده‌های هرباریومی و

1. Mounting
2. Color checker

3. Georeferenced data

قدیمی، تنوع ژنتیکی از دست رفته در ارقام مدرن کشاورزی را شناسایی و بازیابی می‌کند.

– **قوم گیاه‌شناسی و طب سنتی:** برچسب‌های هرباریومی اغلب حاوی یادداشت‌های میدانی ارزشمندی درباره نام‌های محلی، مصارف دارویی و روش‌های سنتی استفاده از گیاهان توسط مردم محلی هستند. در موارد متعددی، این برچسب‌ها تنها سند مکتوب از دانش بومی در گذشته محسوب می‌شوند که می‌تواند سرمنشا تولید داروهای جدید باشند [۵].

شکل ۶ بخشی از پیوند هرباریوم با کشاورزی، دانش بومی و تغذیه را نشان می‌دهد.



شکل ۶. پیوند هرباریوم‌ها با کشاورزی، امنیت غذایی و دانش بومی؛ از حفاظت تنوع ژنتیکی گیاهان زراعی تا ثبت دانش سنتی جوامع محلی.

مداوم آفات در مجموعه‌های فیزیکی مستلزم بودجه پایدار است. همچنین، نیاز به متخصصانی که علاوه بر گیاه‌شناسی، در حوزه «بیوانفورماتیک» و «مدیریت پایگاه داده» مهارت داشته باشند، بیش از پیش احساس می‌شود.

– **کند بودن فرایند دیجیتال‌سازی:** بسیاری از مجموعه‌های دانشگاهی ایران هنوز دارای بانک اطلاعاتی آنلاین نیستند. این موضوع باعث می‌شود داده‌های ارزشمند ایران در تحلیل‌های جهانی تنوع زیستی (مانند GBIF) غایب باشند [۵].

– **ملاحظات حقوقی و اخلاقی:** اجرای دقیق مفاد «پروتکل ناگوبا» در تبادلات بین‌المللی نمونه‌ها و حفاظت از حقوق حاکمیتی بر ذخایر ژنتیکی، نیازمند تدوین آیین‌نامه‌های داخلی منسجم‌تر در هرباریوم‌ها است.

۲-۶ چشم‌انداز و نقشه راه آینده

ایجاد شبکه ملی هرباریوم‌های ایران: یکپارچه‌سازی پایگاه‌های داده پراکنده در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی در قالب یک پلتفرم

متغیرهای بیوکلیماتیک^۱، می‌توان جابه‌جایی محدوده پراکنش گونه‌ها را پیش‌بینی کرد. این تحلیل‌ها ابزاری کلیدی برای تعیین مناطق حفاظت‌شده آینده و شناسایی گونه‌های در معرض انقراض ناشی از تغییر اقلیم هستند [۱].

۵-۳. کشاورزی، امنیت غذایی و دانش بومی (قوم گیاه‌شناسی)

هرباریوم‌ها گنجینه‌ای از خویشاوندان وحشی گیاهان زراعی هستند که حاوی ژن‌های مقاوم به تنش‌های محیطی، آفات و بیماری‌ها هستند.

– **اصلاح نباتات:** محققان با بازگشت به نمونه‌های هرباریومی

۵-۴. باستان‌شناسی، پالئوبوتانی و تاریخ علم

کاربردهای هرباریوم مرزهای زیست‌شناسی را درنور دیده و به علوم انسانی و زمین‌شناسی پیوند خورده است.

– **گیاه باستان‌شناسی:** نمونه‌های هرباریومی به عنوان مجموعه‌های مرجع برای شناسایی بقایای گیاهی، دانه‌های میکروسکوپی و گرده‌های استخراج شده از سایت‌های باستانی و لایه‌های رسوبی استفاده می‌شوند.

– **تاریخ علم و تبادلات علمی:** هر برگه هرباریوم، سندی از تاریخ سفرهای اکتشافی، روابط بین‌المللی دانشمندان و تحول اندیشه علمی در گذر زمان است. دست‌نوشته‌های دانشمندان بزرگ بر روی این برگه‌ها، منابعی دست اول برای مورخان علم جهت بازسازی شبکه‌های تبادل دانش در سده‌های گذشته است.

۶-۱. چالش‌های کنونی

کمبود بودجه و نیروی متخصص: نگهداری استاندارد و پایش

1. Bioclimatic variables

واحد، می‌تواند ایران را به قطب داده‌های گیاهی غرب آسیا تبدیل کند.

- **بهره‌گیری از هوش مصنوعی:** استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی خودکار گونه‌ها از روی تصاویر اسکن شده و استخراج متاداده‌ها، می‌تواند سرعت دیجیتال سازی را در ایران به شکل توان‌نمایی افزایش دهد [۲۷].

- **هرباریوم به مثابه بیوبانک:** تجهیز هرباریوم‌ها به امکانات نگهداری بافت در دمای فوق‌پایین، آن‌ها را از آرشیوهای خشک به بانک‌های ژنومیک تبدیل می‌کند که پشتیبان برنامه‌های اصلاح نباتات و امنیت غذایی کشور خواهد بود.

۷- در نظر گرفتن مجموعه‌های تاریخ طبیعی به عنوان هم‌نویسندگی^۱ مقالات پژوهشی

هر چند مجموعه‌های تاریخ طبیعی در بسیاری از حوزه‌های پژوهشی افق‌های تازه‌ای گشوده‌اند، سهم حیاتی آن‌ها در مقالات پژوهشی علمی غالباً تنها در بخش قدرانی‌ها ذکر می‌شود و از این رو، مشارکت‌های بنیادی آن‌ها در پژوهش و کشف علمی به‌سختی قابل ردیابی است. در نتیجه، نقش واقعی مجموعه‌های تاریخ طبیعی تا حد زیادی نادیده گرفته شده و ارزش واقعی آنان نمایان نمی‌شود. این وضعیت در نهایت می‌تواند پایداری آن‌ها و توان آینده‌شان برای پشتیبانی از پژوهش علمی را با اختلال مواجه کند. استدلال ما این است که مجموعه‌های تاریخ طبیعی می‌توانند در آن مواردی که مشارکت آن‌ها حیاتی است، از طریق هم‌نویسندگی کامل مقالات علمی به دیده‌شدگی مناسب و مشروع دست یابند. این مشارکت می‌تواند به‌صورت موردبه‌مورد^۲ تعیین شود. وظایف زیربنایی که چنین هم‌نویسندگی‌ای را توجیه می‌کنند شامل گردآوری و نگهداری مجموعه‌ها، شناسایی‌های تاکسونومیک، تصدی‌گری علمی^۳، کار با نمونه‌ها، و حفاظت بلندمدت نمونه‌های مرجع/شاهد^۴ است. متأسفانه، تمامی این فرایندهای زمان‌بر و پرهزینه اغلب نادیده گرفته می‌شوند، با آن که مستلزم مهارت‌ها و رویه‌های متعدد، دانش تخصصی، و تخصص تاکسونومیک مبتنی بر تجربه‌ای گسترده و

جمعی هستند که طی نسل‌ها به‌دست آمده است.

مجموعه‌های تاریخ طبیعی، صرفاً به‌عنوان نام یک نهاد یا گروه، باید به‌عنوان نویسنده مقالاتی که از مجموعه‌های آن‌ها مشتق شده‌اند، فهرست شوند. چنین رویکردی می‌تواند به افزایش دیده شدن علمی مجموعه‌های تاریخ طبیعی، تقویت همکاری‌های پژوهشی و حمایت پایدار از فرایندهای تصدی‌گری علمی کمک کند.

در نهایت، امید می‌رود که این امر از تعطیلی‌های بیشتر مجموعه‌های تاریخ طبیعی جلوگیری کند و آگاهی نسبت به اهمیت آموزش و جذب تاکسونومیست‌های سطح بالا را برای گردآوری بیشتر مواد در میدان و مدیریت و تصدی‌گری مجموعه‌های تاریخ طبیعی افزایش دهد؛ همان‌گونه که پیش‌تر نیز توسط دیگران مورد تأکید قرار گرفته است [۲۸].

۸- نتیجه‌گیری

هرباریوم‌ها در قرن بیست و یکم از حالت سنتی خود خارج شده و به عنوان گره‌های حیاتی در شبکه جهانی اطلاعات زیستی ایفای نقش می‌کنند. همان‌طور که در پژوهش‌های پیشین بر اهمیت تاریخی و مبانی این نهادها تأکید شد [۵]، مقاله حاضر نشان داد که ارزش افزوده هرباریوم‌های مدرن در قابلیت تبدیل شدن نمونه فیزیکی به داده دیجیتال نهفته است. هر نمونه هرباریومی سندی است که به ما اجازه می‌دهد گذشته را بازسازی، حال را پایش و آینده تنوع زیستی را در برابر تهدیداتی چون تغییر اقلیم پیش‌بینی کنیم. برای هرباریوم‌های ایران، حرکت به سمت استانداردسازی داده‌ها، دیجیتال‌سازی گسترده و پیوستن به کنسرسیوم‌های جهانی، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت ملی برای صیانت از میراث طبیعی و علمی کشور است. خلاصه‌ای از انواع داده‌ها، فناوری‌ها و کاربردهای پژوهشی هرباریوم‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

طراحی تمامی تصاویر مقاله با بهره‌گیری از ابزار هوش مصنوعی Gemini انجام شده است.

جدول ۱. تحول کارکرد هرباریوم‌ها از مجموعه‌های گیاهی تا زیرساخت داده‌ای

خروجی و کاربرد پژوهش	فناوری/روش مرتبط	نوع داده مورد استفاده	حوزه کاربرد هرباریوم
شناسایی و توصیف گونه‌های جدید	میکروسکوپی، کلیدهای شناسایی، پایگاه‌های تاکسونومیک	داده‌های ریخت‌شناسی، نمونه‌های تیپ	رده‌بندی و تاکسونومی
بازسازی روابط تکاملی گیاهان	DNA Barcoding, NGS, Herbarium Genomics	توالی‌های ژنتیکی	فیلوژنی و ژنومیک
پیش‌بینی تغییر پراکنش گونه‌ها	تحلیل کل‌داده، GIS، SDM، داده‌های مکانی و زمانی نمونه‌ها	داده‌های پراکنش و اقلیمی	پایش تغییر اقلیم
بررسی تغییر زمان گلدهی در اثر گرمایش زمین	تحلیل سری زمانی، هوش مصنوعی	داده‌های فنولوژیک تاریخی	تغییر اقلیم
تعیین مناطق حفاظتی و گونه‌های در معرض خطر	مدل‌سازی توزیع گونه‌ها	داده‌های مکانی و حضور گونه‌ها	حفاظت و مدیریت
شناسایی ژن‌های مقاوم به تنش	ژنومیک تطبیقی	توالی‌های ژنومی	اصلاح نباتات و تنش‌های محیطی
حفظ دانش بومی و کشف ترکیبات دارویی	مستندسازی دیجیتال، آرشیو داده	تصاویر اسکن شده با وضوح 600dpi، داده‌های OCR	قوم‌گیاه‌شناسی و طب سنتی
شناسایی خودکار گونه‌ها و استخراج فراداده	مدیریت هوشمند هرباریوم	داده‌های روی برچسب‌ها	دیجیتال‌سازی مجموعه‌ها
گیاه‌باستان‌شناسی	میکروسکوپی، تصویربرداری پیشرفته	نمونه‌های هرباریومی قدیمی	مطالعه فلورهای گذشته

منابع

- Heberling, J.M. (2021). Herbaria as big data sources of plant traits. *International Journal of Plant Sciences*, 183(2). <https://doi.org/10.1086/717623>.
- King, L., Stark, J.F. & Cooke, P. (2016). Experiencing the digital world: The cultural value of digital engagement with heritage. *Heritage & Society*, 9(1), 76-101. <https://doi.org/10.1080/2159032X.2016.1246156>.
- Bakker F.T. (2017). Herbarium genomics: skimming and plastomics from archival specimens. *Webbia*, 72(1), 35-45. <https://doi.org/10.1080.00837792.2017/1313383>.
- Nithaniyal S., Asir B. & Sarkar K. (2025). Recovery of DNA signatures from historical herbarium specimens using chloroplast and nuclear barcodes. *Ecological Genetics and Genomics*, 100356, 35. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2025.100356>.
۱. قهرمانی‌نژاد، ف.، نظری، ح.، خواجه‌پیری، م.، و حسینی، ا. (۱۴۰۴). هرباریوم؛ حافظه‌ای سبز از تنوع زیستی زمین. *مجله زیست‌شناسی ایران*، ۸ (۱۶)، ۲۴۲-۲۱۸.
- Daru, B.H. & Rodriguez, J. (2023). Mass production of unvouchered records fails to represent global biodiversity patterns. *Nature Ecology & Evolution*, 7, 816-831.
- Greve, M., Lykke, A.M., Fagg, C.W., Gereau, R.E., Lewis, G.P., Marchant, R., Marshall, A.R., Ndayishimiye, J., Bogaert, J., Svenning, J.C. (2016). Realising the potential of herbarium records for conservation biology, *South African Journal of Botany*, 105, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.017>.
- Klopper, R.R., Steyn, H.M., Baider, C., Bytebier, B., Dayaram, A., Florens, F.B.V., Rakotonirina, N., Raimondo, D., Sosef, M. & le Roux M.M. (2025). Digitisation of herbarium specimens to the benefit of research: An African perspective focusing on South Africa and Western Indian Ocean Island states. *Plants, People, Planet*, 1-15. <https://doi.org/10.1002/ppp3.70117>.
- Solakis-Tena, A., Casimiro-Soriguer Solanas, F. & Hidalgo-Triana, N. (2025). Retrospective phenology in western Mediterranean plants: revealing climate change patterns through herbarium specimens. *AoB Plants*, 17(6), plaf064. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plaf064>.
- Burbano H.A. & Gutaker R.M. (2023). Ancient DNA genomics and the renaissance of herbaria. *Science*, 382(6666), 59-63. <https://doi.org/10.1126/science.adi1180>.

11. Wandeler, P., Hoeck, P.E.A. & Keller, L.F. 2007. Back to the future: Museum specimens in population genetics. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(12), 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.08.017>
12. Staats, M., Erkens, R.H.J., Van de Vossen, B., Wieringa, J.J., Kraaijeveld, K., Stielow, B., Geml, J., Richardson, J.E. & Bakker, F.T. (2013). Genomic treasure troves: Complete genome sequencing of herbarium and insect museum specimens. *PLoS One*, 8(7), e69189. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069189>
13. Suchan, T., Pitteloud, C., Gerasimova, N. S., Kostikova, A., Schmid, S., Arrigo, N., Pajkovic, M., Ronikier, M., Alvarez, N. (2016). Hybridization capture using RAD probes (hyRAD), a new tool for performing genomic analyses on collection specimens. *PLoS One*, 11(3), e0151651. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151651>
14. Zedane, L., Hong-Wa, C., Murienne, J., Jeziorski, C., Baldwin, B.G. & Besnard G. (2016). Museomics illuminate the history of an extinct, paleoendemic plant lineage (*Hesperelaea*, *Oleaceae*) known from an 1875 collection from Guadalupe Island, Mexico. *Biological Journal of the Linnean Society*, 117, 44–57.
15. Silva, C., Besnard, G., Piot, A., Razanatsoa, J., Oliveira, R.P. & Vorontsova, M.S. (2017). Museomics resolve the systematics of an endangered grass lineage endemic to north-western Madagascar. *Annals of Botany* (Oxford), 119, 339–351. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw208>
16. Viveiros-Moniz, M., García-Muñoz, A., Matias, L., Abdelaziz, M. & Muñoz-Pajares, A.J. (2025). Monitoring biodiversity in the global change era: The importance of herbaria and genetic diversity. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 67, 125862. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2025.125862>.
17. James, S.A., Soltis, P.S., Belbin, L., Chapman, A.D., Nelson, G., Paul, D.L., Collins, M. (2018). Herbarium data: global biodiversity and societal botanical needs for novel research. *Applications in Plant Sciences*, 6(2), e1024. doi: 10.1002/aps3.1024.
18. Kane, E.K. (1856). *Arctic explorations*. Philadelphia: Childs & Peterson.
19. Lange, J. (1890). *Conspectus Florae Groenlandicae*. Meddelelser om Grønland.
20. Gilman, A.V. (2025). Botany of the 1860 Chadbourne expedition from Williams and Bowdoin Colleges to Labrador and Greenland. Part 1: Greenland. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas* 19(2)107–128 <https://doi.org/10.17348/jbrit.v19.i2.1403>
21. Fredskild, B. (1996). A phytogeographical study of the vascular plants of West Greenland. *Meddelelser om Grønland*.
22. Thiers, B. M. (2026) (updated continuously). Index Herbariorum. <https://sweetgum.nybg.org/science/ih/>
23. Davis, C.C. (2023). The herbarium of the future. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(5), 412–423. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.11.015>.
24. Bridson, D. & Forman, L. (1992). *The herbarium handbook*. Royal Botanic Gardens, Kew.
25. Paton, A., Antonelli, A., Carine, M., Forzza, R.C., Davies, N., Demissew, S., Dröge, G., Fulcher, T., Grall, A., Holstein, N., Jones, M., Liu, U., Miller, J., Moat, J., Nicolson, N., Ryan, M., Sharrock, S., Smith, D., Thiers, B., Victor, J., Wilkinson, T., Dickie, J. (2020). Plant and fungal collections: current status, future perspectives. *Plants, People, Planet*, 2, 499–514.
26. Willis, C.G., Ellwood, E.R., Primack, R.B., Davis, C.C., Pearson, K.D., Gallinat, A.S., Yost, J.M., Nelson, G., Mazer, S.J., Rossington, N.L., Sparks, T.H. & Soltis, P.S. (2017). Old plants, new tricks: Phenological research using herbarium specimens. *Trends in Ecology & Evolution*, 32(7), 531–546. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.03.015>
27. Pearson, K.D., Nelson, G., Aronson, M.F.J., Bonnet, P., Brenskelle, L., Davis, C.C., Denny, E.G., Ellwood, E.R., Goëau, H., Heberling, J.M., Joly, A., Lorieul, T., Mazer, S.J., Meineke, E.K., Stucky, B.J., Sweeney, P., White, A.E. & Soltis, P.S. (2020). Machine learning using digitized herbarium specimens to advance phenological research. *Bioscience*, 70(6), 610–620. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa044>.
28. Ferreira, C., Ríos-Saldaña, C.A. & Delibes-Mateos, M. (2016). Hail local fieldwork, not just global models. *Nature*, 326, 534. <https://doi.org/10.1038/534326b>