

نمونه‌برداری در علوم محیطی: اصول و روش‌ها با تأکید بر پوشش گیاهی و

عامل‌های بوم‌شناختی^۱

محمدعلی زارع چاهوکی^{۲،۳}

چکیده

نمونه‌برداری در علوم محیطی به‌عنوان پایه‌ای اساسی برای جمع‌آوری داده‌های معتبر و واکاوی پدیده‌های بوم‌شناختی شناخته می‌شود. بررسی حاضر با تمرکز بر پوشش گیاهی و عامل‌های بوم‌شناختی، به واکاوی اصول، روش‌ها و چالش‌های نمونه‌برداری در محیط‌های طبیعی می‌پردازد. روش‌های اصلی شامل نمونه‌برداری غیرتصادفی، تصادفی، طبقه‌بندی‌شده، خوشه‌ای، مکانی و تلفیقی هستند که هر یک با توجه شرایط و پیچیدگی‌های بوم‌نظام‌های طبیعی، چالش‌ها در جمع‌آوری داده‌ها در محیط‌های طبیعی، هدف‌ها و مقیاس مکانی-زمانی پژوهش و نوع متغیرهای مورد بررسی، گزینش می‌شوند. برای بررسی عامل‌های بوم‌شناختی در جامعه‌های گیاهی، گزینش صحیح واحدهای نمونه‌برداری و ابزارها، روش نمونه‌برداری و استفاده از فناوری‌های نوین مانند GIS^۴ و سنجش از دور، در کاهش خطا، نبود قطعیت و افزایش دقت داده‌ها نقش کلیدی دارند. افزون بر این، توجه به ناهمگنی مکانی و پراکنش گونه‌ها، تکرار زمانی نمونه‌برداری و تعیین اندازه و شمار نمونه بهینه، کیفیت داده‌ها و تعمیم‌پذیری نتایج را تضمین می‌کند. رویکرد این بررسی، ارائه چارچوب تلفیقی برای گزینش روش‌های نمونه‌برداری با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در بررسی‌های پوشش گیاهی و بوم‌نظام‌های ناهمگن است که امکان کاهش خطا، نبود قطعیت و بهینه‌سازی هزینه‌ها را فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که ترکیب روش‌های سنتی و فناوری‌های نوین مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور همراه با رعایت اصول آماری و طراحی پژوهش بر پایه هدف‌های آن، نه تنها دقت داده‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه توانایی ارائه توصیه‌های مدیریتی عملی برای حفاظت و مدیریت بوم‌نظام‌های مرتعی را نیز بهبود می‌دهد.

واژگان کلیدی: بوم‌نظام‌های طبیعی، پایش محیطی، دقت نمونه‌برداری، فناوری‌های نوین، نبود قطعیت.

مقدمه

با توجه به گستردگی جامعه آماری در علوم محیطی، در بیشتر موردها، امکان سرشماری و اندازه‌گیری ویژگی‌های همه افراد جامعه وجود ندارد. از این‌رو، نمونه‌برداری به‌عنوان یکی از پایه‌های اصلی پژوهش‌های علوم محیطی، نقشی کلیدی در شناخت وضعیت بوم‌نظام‌ها و واکاوی پویایی آن‌ها دارد. داده‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌برداری مبنای اصلی درک روابط پیچیده

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۳

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۲۷

۲- پست الکترونیک نویسنده مسئول: mazare@ut.ac.ir

۳- استاد دانشگاه تهران، تهران.

بین اجزای زیستی و غیرزیستی محیط هستند و بر اساس آن‌ها می‌توان الگوهای بوم‌شناختی را شناسایی و پیامدهای مدیریتی یا اقلیمی را پیش‌بینی کرد (Yoccoz *et al.*, 2001). در این میان، پوشش گیاهی که بازتاب‌دهنده شرایط بوم‌شناختی و تغییر عامل‌های محیطی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف است، جایگاه ویژه‌ای در نمونه‌برداری دارد. بررسی ساختار، گوناگونی و پراکنش جامعه‌های گیاهی نه تنها وضعیت بوم‌نظام را آشکار می‌کند، بلکه به عنوان شاخصی برای ارزیابی سلامت بوم‌نظام‌ها و اثربخشی اقدام‌های مدیریتی استفاده می‌شود (Krebs, 2014).

در ایران، به دلیل گوناگونی زیاد اقلیمی (از بیابان‌های خشک مرکزی تا جنگل‌های نیمه‌مرطوب هیرکانی و مراتع کوهستانی زاگرس)، طراحی و اجرای نمونه‌برداری با چالش‌های ویژه‌ای همراه است. در منطقه‌های بیابانی، پراکنش گیاهان به صورت لکه‌ای و پراکنده است و روش‌های نقطه‌ای یا نوار خطی^۱ برای برآورد دقیق‌تر پوشش توصیه می‌شوند (زارع چاهوکی، ۱۴۰۱). در مقابل، مراتع نیمه‌خشک که از نظر اقتصادی و بوم‌شناختی بسیار پراهمیت هستند، به دلیل ترکیب گیاهان علفی، بوته‌ای و درختچه‌ای، نیازمند طراحی ترکیبی شامل قطعه نمونه‌های کوچک برای گونه‌های علفی و قطعه‌های بزرگتر برای گونه‌های درختچه‌ای می‌باشند (Higgins, 2020). همچنین، در ارتفاع‌های کوهستانی با شیب‌های تند و ریزاقلیم‌های گوناگون، استفاده از طرح‌های طبقه‌بندی‌شده بر پایه جهت جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا، توصیه می‌شود تا نمایی واقعی از گوناگونی پوشش گیاهی به دست آید (Mörsdorf *et al.*, 2015).

با وجود این، اهمیت نمونه‌برداری پوشش گیاهی با محدودیت‌ها و منابع خطای گوناگون روبه‌رو است. از یک سو، تغییرهای فصلی و سالانه در مقدار بارش و دما می‌تواند بر تراکم و تولید زیستی گیاهان تأثیرگذار باشد و موجب تغییر در داده‌های حاصل از نمونه‌برداری شود (Lisner, 2020). از سوی دیگر، خطاهای مشاهده‌گر در تخمین چشمی پوشش یا تشخیص گونه‌ها منبعی جدی از نبود قطعیت است که در بررسی‌های پوشش گیاهی به‌ویژه در جامعه‌های گوناگون مراتع بسیار گزارش شده است. افزون بر این، محدودیت‌های عملی مانند دشواری دسترسی به ارتفاع‌ها، پراکندگی جغرافیایی گسترده مراتع و شرایط اقلیمی نامساعد (گرمای شدید بیابان یا بارش‌های ناگهانی کوهستان) بر گزینش روش و شمار نمونه‌ها تأثیر مستقیم دارد (Sparrow *et al.*, 2020).

بر این اساس، طراحی درست نمونه‌برداری در علوم محیطی باید بر پایه اصولی مانند تناسب با مقیاس فضایی و زمانی، گزینش روش مناسب برای نوع پوشش گیاهی و به‌کارگیری طرح‌های ترکیبی برای کاهش خطا و افزایش دقت باشد. استفاده از قطعه نمونه‌های همیشگی و پایش‌های طولانی‌مدت، امکان واکاوی روندهای بلندمدت تغییر پوشش گیاهی را فراهم کرده و ابزار مهمی برای پیش‌بینی اثر تغییرهای اقلیمی و سنجش اثربخشی سیاست‌های مدیریتی مراتع به‌شمار می‌رود (زارع چاهوکی، ۱۴۰۱). از این رو، پژوهش حاضر با هدف مشخص کردن اصول و روش‌های نمونه‌برداری در علوم محیطی، تمرکز ویژه‌ای بر پوشش گیاهی و عامل‌های بوم‌شناختی دارد و می‌کوشد چارچوبی کاربردی برای بهبود بررسی‌های بوم‌شناختی ارائه دهد.

چالش‌های نمونه‌برداری در علوم محیطی

جمع‌آوری داده‌ها در علوم محیطی به‌طور معمول در محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی و محیط‌های طبیعی صورت می‌گیرد. برای جمع‌آوری داده‌ها در محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی مانند نهالستان، گلخانه، آزمایشگاه، استخر پرورش

ماهی یا هر محیط کنترل‌شده دیگر، به دلیل محیط کنترل‌شده، جمع‌آوری داده‌ها ساده‌تر و بر مبنای اصول طرح‌های آزمایشی است، اما در صورتی که جمع‌آوری داده‌ها در محیط‌های طبیعی انجام شود، با توجه به تغییرپذیری متغیرهای محیطی، شرایط پیچیده‌تر است و باید شیوه علمی دقیقی برای نمونه‌برداری اتخاذ شود (زارع چاهوکی، ۱۴۰۱). نمونه‌برداری در محیط‌های طبیعی با چالش‌های گوناگونی روبه‌رو است که می‌تواند بر دقت و اعتبار داده‌ها تأثیر بگذارد. برخی از این چالش‌ها در ادامه آورده شده‌اند.

ناهمگنی مکانی^۱

بوم‌نظام‌های طبیعی از نظر ویژگی‌های عامل‌های محیطی مانند پستی-بلندی، اقلیم، خاک، و پوشش گیاهی دارای تنوع هستند. برای نمونه، در مراتع نیمه‌خشک ایران، گونه‌های علفی بیشتر در دشت‌ها و در کوهپایه‌ها گسترش دارند، در حالی که گونه‌های درختچه‌ای در شیب‌ها یا منطقه‌هایی با رطوبت بیشتر تجمع می‌کنند. این ناهمگنی‌ها موجب می‌شود که واحد نمونه‌برداری گزینشی نماینده کل منطقه نباشد (Legendre & Legendre, 2012). برای رفع این دشواری باید از روش‌های نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده یا طرح‌های ترکیبی استفاده کرد.

تغییرهای زمانی^۲

پوشش گیاهی و عامل‌های محیطی در طول زمان دارای تغییر روزانه، فصلی یا سالانه هستند. برای نمونه، در مراتع کوهستانی زاگرس، گونه‌های یکساله در نخستین روزهای بهار رشد می‌کنند، در حالی که در تابستان اغلب خشک می‌شوند و پوشش غالب، به گیاهان چندساله تغییر می‌یابد. داده‌های جمع‌آوری‌شده تنها در یک فصل، نمی‌تواند بیانگر تغییرهای بوم‌نظام در کل سال باشد (Krebs, 2014). بنابراین، پایش‌های فصلی و چندساله برای درک پویایی واقعی بوم‌نظام‌ها ضروری است.

تأثیر عامل‌های انسانی^۳

نمونه‌برداری ممکن است زیر تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند چرای دام، تغییر کاربری و گردشگری باشد (Kent, 2012). برای کاهش تأثیر عامل‌های انسانی، لازم است محل‌های نمونه‌برداری تا حد امکان دورتر از منطقه‌های زیر تأثیر فعالیت‌های انسانی گزینش شوند. همچنین، در صورت نیاز به ارزیابی تأثیر عامل‌های انسانی، ضروری است با گزینش شاخص‌های مناسب اثر فعالیت‌های انسانی نیز تعیین شود.

نبود قطعیت و خطا^۴

خطاهای انسانی (مانند تخمین چشمی درصد پوشش)، خطاهای ابزاری (برای نمونه در روش نقطه‌ای) و گزینش نامناسب شمار نمونه‌ها از عامل‌های عمده نبود قطعیت در داده‌های میدانی هستند (Regan et al., 2002). در مراتع کشور که اغلب ترکیبی از گونه‌های علفی، بوته‌ای و درختچه‌ای هستند، احتمال خطا در شناسایی گونه‌ها و گزینش درست راهبرد نمونه‌برداری، زیاد است. همچنین، پراکنش خوشه‌ای گونه‌های گیاهی موجب می‌شود که برآوردهای تصادفی ساده با سوگیری همراه باشد. به‌کارگیری آموزش‌های استاندارد برای تیم‌های میدانی و استفاده از فناوری‌هایی مانند عکسبرداری هوایی و تصویربرداری پهپادی برای صحت‌سنجی داده‌ها می‌تواند این خطاها را کاهش دهد.

گونه‌های نادر یا پراکنش نامتعادل^۵

یکی دیگر از چالش‌های نمونه‌برداری مراتع، خطر نادیده گرفتن گونه‌های نادر یا گونه‌هایی است که به‌صورت لکه‌ای پخش شده‌اند (Thompson, 2015). برای رفع این مشکل باید در طراحی سیستم نمونه‌برداری افزون بر افزایش شمار نمونه‌ها و دقت در گزینش واحد و ابزار نمونه‌برداری، از روش نمونه‌برداری تلفیقی استفاده کرد.

محدودیت دسترسی به واحدهای نمونه‌برداری

در برخی از مکان‌ها، دسترسی به واحدهای نمونه‌برداری به دلیل مانع‌های جغرافیایی یا قانونی دشوار است. این موضوع می‌تواند به محدودیت در گزینش واحدهای نمونه‌برداری و کاهش دقت داده‌ها بیانجامد (Anderson & Gaston, 2013). برای نمونه در مراتع کوهستانی با شیب‌های تند، دسترسی به محل‌های نمونه‌برداری دشوار است. بارش‌های ناگهانی، لغزش زمین یا مقررات حفاظتی نیز می‌توانند مانع انجام نمونه‌برداری شوند. استفاده از پهپادها و داده‌های سنجش از دور در چنین موردی، ابزاری کارآمد برای جمع‌آوری داده‌های جاهای سخت‌دسترس را فراهم می‌آورد.

هزینه زیاد نمونه‌برداری

جمع‌آوری داده‌های محیطی اغلب نیازمند زمان و هزینه چشمگیری است. این موضوع می‌تواند به محدودیت در شمار نمونه‌ها و کاهش دقت نتایج بیانجامد (Krebs, 2014 و Thompson, 2015). برای رفع این دشواری، استفاده از طرح‌های نمونه‌برداری بهینه و ترکیب داده‌های میدانی با تصاویر ماهواره‌ای توصیه می‌شود.

پیچیدگی بوم‌نظام^۱

در بوم‌نظام مراتع، عامل‌های متعدد بوم‌شناختی و انسانی در ارتباط پیچیده با همدیگر موجب ایجاد تغییرهای زمانی و مکانی در پوشش گیاهی می‌شوند. یکی دیگر از چالش‌ها این است که نمونه‌برداری سنتی کنونی باید بتواند ارتباط‌های پیچیده در اجزای بوم‌نظام را پوشش دهد (Turner et al., 2015). طراحی سیستم‌های نمونه‌برداری چندمقیاسی و یکپارچه‌سازی داده‌ها از منابع مختلف (زمینی، پهپادی و سنجش از دور) راهکاری برای پوشش این پیچیدگی‌ها است. چالش‌های نمونه‌برداری در محیط‌های طبیعی، از ناهمگنی مکانی و تغییرهای زمانی تا تأثیر عامل‌های انسانی و هزینه‌های زیاد، همگی بیانگر ضرورت طراحی دقیق و چندسطحی سیستم نمونه‌برداری در پژوهش‌های علوم محیطی هستند. در ایران، به دلیل گوناگونی زیاد اقلیمی و پیچیدگی بوم‌شناختی، این چالش‌ها، شدت بیشتری دارند. ترکیب اصول آماری پیشرفته، پایش‌های دوره‌ای و استفاده از فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور می‌تواند ضمن کاهش خطاها، داده‌هایی معتبر برای مدیریت پایدار مراتع کشور فراهم کند.

اصول نمونه‌برداری در علوم محیطی

نمونه‌برداری به عنوان یکی از پایه‌های اساسی پژوهش‌های علوم محیطی، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت و اعتبار نتایج دارد. گزینش نادرست روش، ابزار یا مقیاس نمونه‌برداری می‌تواند به سوگیری، خطای آماری و تفسیرهای نادرست بیانجامد (Krebs, 2014). از این رو، طراحی سیستم نمونه‌برداری باید بر اساس اصول علمی دقیق، ویژگی‌های بوم‌نظام مورد بررسی، مقیاس، هدف‌های پژوهش و محدودیت‌های منابع صورت گیرد. در ادامه مهم‌ترین اصول نمونه‌برداری بیان می‌شوند.

تعیین هدف‌ها و پرسش/فرضیه پژوهش

نخستین گام در طراحی هر سیستم نمونه‌برداری، تعیین هدف‌ها و پرسش‌ها یا فرضیه‌های پژوهش است. پژوهشگر باید بداند چه متغیرهایی را در چه مقیاسی و برای چه هدفی اندازه‌گیری می‌کند. برای نمونه، اگر هدف ارزیابی اثر چرای دام بر گوناگونی گیاهی مراتع در منطقه زاگرس باشد، گزینش شاخص‌های گوناگونی و تراکم گونه‌های گیاهی اولویت دارد. درحالی‌که در بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جنگل‌های هیرکانی، تمرکز بر تغییرهای ترکیب گونه‌ای و باززایی ضروری است.

(Kent, 2012). تعیین دقیق هدف‌ها، از بروز نمونه‌برداری‌های پرهزینه و غیرضروری جلوگیری کرده و به افزایش کارایی پژوهش کمک می‌کند.

تعیین واحدهای نمونه‌برداری

واحد نمونه‌برداری می‌تواند از یک فرد (گیاه، حیوان یا انسان) تا یک منطقه گسترده (مانند فرد جامعه) متغیر باشد. گزینش این واحد به‌طور کامل به هدف‌های بررسی، مقیاس مکانی-زمانی، ویژگی‌های جامعه آماری و منابع در دسترس، بستگی دارد. واحدهای نمونه‌برداری باید به گونه‌ای گزینش شوند که همگن باشند، از سوگیری جلوگیری شده باشد و نمایندگی جامعه آماری را تضمین کنند.

در بررسی‌های جامعه‌شناسی گیاهی، شناسایی و تعریف دقیق واحد پایه‌ای برای نمونه‌برداری و واکاوی‌های بوم‌شناختی از اهمیت بنیادین برخوردار است. این واحد که با عنوان فرد جامعه یا فیتوسنوز^۱ شناخته می‌شود، به سطحی گفته می‌شود که از نظر ترکیب گونه‌ای، به‌طور نسبی همگن است، ساختار فیزیونومیک^۲ و شرایط بوم‌شناختی انسجام و یکنواختی نسبی دارد. در حقیقت، فرد جامعه نماینده‌ای از یک جامعه گیاهی مشخص است که در فضای طبیعی محدود، الگوی ثابتی از حضور گونه‌ها را نشان می‌دهد. تشخیص این واحد در مرحله‌های آغازین پژوهش، گام مهمی برای استقرار درست قطعه نمونه‌ها و تفسیر دقیق داده‌ها است (Chytrý *et al.*, 2020; Kent, 2012).

مرز فرد جامعه به‌طور معمول از طریق تغییر آشکار در ترکیب گونه‌ای، ساختار فیزیونومیک یا ویژگی‌های فیزیکی-بوم‌شناختی محیط قابل شناسایی است. در شرایطی که در یک مرتع، دخالت عامل‌های انسانی کمینه باشد و پایداری محیطی برقرار بماند، انتظار می‌رود که پوشش گیاهی با شرایط محیطی در تعادل باشد. در چنین وضعیتی واحدهای تکرارشونده‌ای از جامعه‌های گیاهی با الگوهای مکانی به نسبت قابل پیش‌بینی شکل می‌گیرند. این فرض بوم‌شناختی، مبنایی برای طراحی نقشه واحدهای نمونه‌برداری و تعیین دقیق‌تر مرز فرد جامعه به‌شمار می‌رود.

با توجه به ماهیت مکانی داده‌های پوشش گیاهی، استفاده از فناوری‌های نوین مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های سنجش از دور به‌عنوان ابزار مکمل در تعیین حدود فرد جامعه و تهیه نقشه واحدهای نمونه‌برداری موضوعی اجتناب‌ناپذیر است. از مهمترین داده‌هایی که می‌توان در این زمینه از آن‌ها بهره گرفت، مدل رقومی ارتفاع^۳ است که امکان استخراج نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا را فراهم می‌آورد. همچنین، ترکیب این نقشه‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی، نقشه‌های خاک (در صورت وجود) و تصویرهای ماهواره‌ای با قدرت جداسازی مناسب می‌تواند مبنای تهیه نقشه اولیه واحدهای نمونه‌برداری (فرد جامعه یا واحدهای همگن بوم‌شناختی) باشد. فرآیند روی هم‌گذاری لایه‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، اگر با گزینش درست طبقه‌ها (برای نقشه‌های ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت)، وزن‌دهی به لایه‌ها و روش‌های مناسب روی هم‌گذاری انجام شود، می‌تواند به تهیه نقشه‌ای با دقت پذیرفتنی بیانجامد که بازتابی از وضعیت واقعی الگوهای بوم‌شناختی در منطقه است (Jensen, 2015).

پس از تهیه نقشه اولیه واحدهای نمونه‌برداری باید با استفاده از تصویرهای سنجش از دور و عکس‌های هوایی، دقت و اعتبار مکانی مرزها ارزیابی و اصلاح شود. در پایان، گام مهم و تکمیلی، پیمایش میدانی و مقایسه داده‌های مکانی با واقعیت زمینی است. در این مرحله، داده‌های کیفی و کمی حاصل از مشاهده‌های مستقیم، نقش مهمی در بازنگری نقشه واحدهای

نمونه‌برداری دارند. چنین روندی موجب می‌شود که مرزهای فرد جامعه نه تنها بر پایه داده‌های محیطی و الگوهای فضایی، بلکه با اتکا به درستی میدانی و واقعیت زیستی پوشش گیاهی تعیین شوند.

بدیهی است که هرچه این فرآیند با دقت بیشتری انجام شود، نتایج حاصل از نمونه‌برداری‌ها و واکاوی‌های آماری قابل اعتمادتر خواهد بود. به همین دلیل، تعیین فرد جامعه نباید موضوعی تنها ظاهری یا بر پایه دآوری‌های ذهنی باشد، بلکه باید بر مبنای روش‌های کمی و مستند بر پایه فناوری‌های مکانی و دانش بوم‌شناسی انجام شود. در این صورت می‌توان اطمینان داشت که واحدهای تعریف‌شده به‌عنوان فرد جامعه، پایه‌ای دقیق برای جمع‌آوری داده‌ها جهت تعیین ساختار و عملکرد جامعه‌های گیاهی را فراهم می‌کنند.

توجه به مقیاس^۱ در نمونه‌برداری محیطی

مقیاس در نمونه‌برداری پژوهش‌های علوم محیطی که با داده‌های مکانی^۲ سر و کار دارند، یکی از مهمترین مفاهیم است که بر گزینش شمار نمونه، روش نمونه‌برداری، نوع متغیرهای مورد اندازه‌گیری، دقت، تعمیم‌پذیری و تفسیر نتایج تأثیر مستقیم دارد. گزینش مقیاس مناسب به معنای تعیین اندازه، گسترش و چگونگی نمونه‌برداری است که با هدف‌های بررسی، ویژگی‌های بوم‌نظام و محدودیت‌های منابع (زمان، هزینه و نیروی انسانی) باید هماهنگ باشد. مقیاس به بُعدهای مکانی و زمانی رخداد یک پدیده یا فرآیند محیطی اشاره دارد و دو مؤلفه اصلی مکانی و زمانی دارد. ناهمخوانی مقیاس بررسی با هدف‌های پژوهش می‌تواند موجب خطاهای تفسیری شود. برای نمونه، نتایج حاصل از داده‌های مقیاس کوچک به کل بوم‌نظام تعمیم نمی‌یابند.

برای گزینش و مدیریت مقیاس مناسب در نمونه‌برداری محیطی، استفاده از فن‌های کمی اهمیت ویژه‌ای دارد. از جمله این فن‌ها می‌توان به واکاوی واریوگرام^۳ برای تعیین دامنه همبستگی مکانی متغیرها و فاصله بهینه بین جاهای نمونه اشاره کرد. روش‌های نمونه‌برداری تصادفی، نظام‌مند و تصادفی طبقه‌بندی‌شده نیز بسته به ناهمگنی مکانی و گستره مورد بررسی کاربرد دارند. همچنین، الگوسازی‌های آماری و مکانی مانند کریجینگ^۴ و میانگین وزنی معکوس فاصله^۵ ابزارهای مؤثری برای برآورد مقدارهای محیطی در مقیاس‌های بزرگ‌ترند. افزون بر این، استفاده از شاخص‌های گوناگونی و ناهمگنی برای تعیین شمار بهینه نمونه‌ها و بهره‌گیری از واکاوی چندمقیاسی به‌منظور بررسی الگوهای مکانی و زمانی در سطح‌های مختلف، به دقت و اعتبار نتایج کمک می‌کند.

در کنار این روش‌ها، بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تخصصی نیز نقشی کلیدی در مدیریت مقیاس نمونه‌برداری دارد. نرم‌افزارهایی مانند ArcGIS و QGIS به‌طور گسترده برای طراحی شبکه‌های نمونه‌برداری، واکاوی الگوهای مکانی و انجام واکاوی‌های فضایی استفاده میشوند (ESRI, 2020). ابزارهای زمین-آماري^۶ مانند GS* و GeoDa امکان بررسی همبستگی مکانی، واکاوی ساختار فضایی داده‌ها و محاسبه و مدل‌سازی واریوگرام را فراهم می‌سازند. همچنین، زبان‌های برنامه‌نویسی و محیط‌های واکاوی داده مانند R (با بسته‌هایی مانند raster، spatstat، gstat و rasterio) و Python (با کتابخانه‌هایی مانند geopandas، pykrige و rasterio) در اجرای واکاوی‌های پیشرفته مکانی، شبیه‌سازی الگوهای فضایی و توسعه طرح‌های نمونه‌برداری پیچیده کاربرد گسترده‌ای دارند (Bivand et al., 2013). افزون بر این، نرم‌افزارهای پردازش تصویرهای سنجش از دور مانند ENVI و ERDAS Imagine در تعیین مقیاس‌های مناسب نمونه‌برداری بر پایه داده‌های ماهواره‌ای، استخراج ویژگی‌های پوشش زمین و پایش تغییرهای بوم‌نظام‌ها نقش مؤثری دارند (Lillesand et al., 2015).

ابزار نمونه‌برداری

ابزارهای نمونه‌برداری در علوم محیطی به مجموعه‌ای از تجهیزات و دستگاه‌ها گفته می‌شود که برای جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی از محیط طبیعی، شامل پوشش گیاهی، خاک، آب، اقلیم، سایر عامل‌های بوم‌شناختی و همچنین ویژگی‌های بهره‌برداران انسانی به کار گرفته می‌شوند. استفاده صحیح از این ابزارها به پژوهشگر امکان می‌دهد تا نمونه‌ها و اطلاعات محیطی را با کمترین خطا و بیشترین دقت ثبت کند و نتایج قابل اعتماد برای واکاوی‌های بوم‌شناختی و مدیریتی ارائه دهد. گزینش ابزار مناسب بسته به هدف بررسی، نوع و پراکنش جامعه نمونه، مقیاس نمونه‌برداری، و متغیرهای مورد بررسی تعیین می‌شود. در ادامه فهرست این ابزارها ارائه می‌شود (جدول ۱).

جدول ۱- مقایسه ابزارهای نمونه‌برداری در علوم محیطی.

گروه ابزار	نمونه ابزار	دقت	هزینه	نیاز به آموزش	محدودیت‌ها	مقیاس مناسب
مصاحبه	مصاحبه فردی، گروهی	متوسط	پایین	کم تا متوسط	سوگیری پاسخ، تأثیر عامل‌های اجتماعی	محلی
پرسشنامه	کاغذی، برخط	متوسط	پایین	کم تا متوسط	کیفیت وابسته به طراحی پرسش‌ها	محلی تا ناحیه‌ای
قطعه نمونه و نوار خطی	قطعه نمونه، نوار خطی یا ترکیبی	زیاد	پایین تا متوسط	متوسط	زمان پر، محدود به مساحت کوچک محلی تا ناحیه‌ای	
بزارهای آزمایشگاهی	اسیدپت‌سنج، هدایت الکتریکی سنج، رطوبت‌سنج	زیاد	متوسط	کم تا متوسط	نیازمند واسنجی و شرایط پایدار محلی/آزمایشگاهی	
ابزارهای پایش میدانی و فضایی	دماسنج، باران‌سنج، GPS، پهپاد، سیستم اطلاعات جغرافیایی	متوسط تا بسیار زیاد	متوسط تا زیاد	متوسط تا زیاد	هزینه نگهداری و داده‌برداری، محدودیت فنی حتی جهانی	محلی تا منطقه‌ای در سیستم اطلاعات جغرافیایی و در پهپاد

۱- **ویژگی‌های انسانی بهره‌برداران**- برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به رفتار، دانش، و نگرش بهره‌برداران از ابزارهایی مانند مصاحبه‌های ساختاریافته و پرسشنامه‌ها استفاده می‌شود. این داده‌ها می‌توانند در واکاوی‌های بوم‌شناختی-اجتماعی و مدیریت منابع طبیعی نقش کلیدی داشته باشند.

۲- **پوشش گیاهی**- برای اندازه‌گیری ویژگی‌های پوشش گیاهی از قطعه نمونه (پلات) یا نوار خطی استفاده می‌شود. در شرایطی که پراکنش گیاهان تصادفی یا یکنواخت است، استفاده از قطعه نمونه مناسب است. در صورتی که پراکنش گیاهان کپه‌ای یا تغییرپذیری زیاد پوشش مشاهده شود، استفاده از نوار خطی ترجیح داده می‌شود. همچنین، امکان ترکیب دو روش نمونه‌برداری با قطعه نمونه‌ها در امتداد نوار وجود دارد تا الگوهای مکانی پوشش گیاهی دقیق‌تر ارزیابی شود.

۳- **خاک**- نمونه‌های خاک پس از برداشت از عرصه و آماده‌سازی در آزمایشگاه با استفاده از ابزارهایی مانند اسیدپت‌سنج، هدایت الکتریکی سنج، رطوبت‌سنج و دیگر تجهیزات تخصصی بررسی می‌شوند. گزینش ابزار و شاخص بستگی به ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک و هدف، بررسی دارد.

۴- **اقلیم**- برای اندازه‌گیری داده‌های اقلیمی از داده‌نگارها برای ثبت پیوسته دما، رطوبت، تبخیر، بارش و سرعت باد استفاده می‌شود. همچنین برای جمع‌آوری نمونه‌های بارش می‌توان از بطری‌های باران‌سنج بهره برد و برای جمع‌آوری ذره‌های معلق یا نمونه‌های هوا، از پمپ‌های مکش هوا استفاده می‌شود.

۵- سایر ویژگی‌های بوم‌شناختی - برای اندازه‌گیری ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت و سایر شاخص‌های محیطی از ابزارهایی مانند GPS و سایر حسگرهای محیطی استفاده می‌شود. افزون بر این، نرم‌افزارهای تخصصی مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزارهای تجزیه و واکاوی مکانی و پهنپایه‌ها نقش مؤثری در جمع‌آوری داده‌های گسترده، مدل‌سازی الگوهای فضایی و تعیین مقیاس نمونه‌برداری دارند.

تعیین اندازه و شمار نمونه

نمونه‌برداری در پژوهش‌های محیطی باید به گونه‌ای طراحی شود که نماینده جامعه آماری باشد. گزینش نامناسب اندازه و شمار نمونه می‌تواند به خطای نمونه‌برداری، سوگیری و نتایج غیرقابل اعتماد بیانجامد. در نمونه‌برداری از پوشش گیاهی و عامل‌های بوم‌شناختی، این موضوع به دلیل ناهمگنی بوم‌نظام‌ها و پراکنش نامتعادل گونه‌ها اهمیت دوچندان دارد (Krebs, 2014). اندازه و شمار نمونه به وضعیت همگنی یا ناهمگنی جامعه آماری مورد بررسی، مقدار دقت مورد نیاز، امکانات در دسترس و نوع ابزار نمونه‌برداری بستگی دارد. هر چه شمار نمونه بیشتر باشد، دقت نتایج بیشتر می‌شود، البته لازم است با افزایش شمار نمونه، کنترل همگنی نیز صورت گیرد.

برای تعیین شمار نمونه برحسب نوع متغیرهای مورد بررسی با استفاده از روش‌های آماری، پراکنش آن‌ها و آزمونی که سپس قرار است تجزیه و واکاوی با آن انجام شود، رابطه‌های مختلفی ارائه شده است. در صورتی که داده‌ها پیوسته باشند، رابطه ۱ ارائه شده است (Krebs, 2014).

$$n = \frac{t^2 cv^2}{d^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، n شمار نمونه لازم، t از جدول t با $n-1$ درجه آزادی در سطح معنی‌دار مورد نظر، s انحراف معیار داده‌ها، $\bar{X}$ میانگین مقدارهای نمونه‌گیری اولیه، d درصد خطای قابل قبول و CV ضریب تغییرات که برابر است با $CV = \frac{s}{\bar{X}}$. هنگامی که داده‌ها نسبتی باشند، رابطه تعیین شمار نمونه به صورت زیر است (Krebs, 2014).

$$n = \frac{t^2 (pq)}{d^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، t از جدول t با درجه آزادی $n-1$ و سطح معنی‌دار مورد نظر، p نسبت مشاهده‌شده و q برابر است با $1-p$ و d خطای مطلق است.

اگر شمار افراد جامعه معلوم باشد، از رابطه زیر که به رابطه کوکران^۱ معروف است، برای تعیین شمار نمونه در مورد متغیرهای کمی استفاده می‌شود:

$$n = \frac{N t^2 s^2}{N d^2 + t^2 s^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه، N شمار افراد جامعه مورد بررسی، S^2 واریانس داده‌ها، t و d نیز پیش از این گفته شد. در صورتی که شمار افراد جامعه نامحدود باشد، از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$n = \frac{t^2 s^2}{d^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

اگر متغیرهای مورد بررسی کیفی باشند، رابطه کوکران برای جامعه محدود به صورت زیر است.

$$n = \frac{\frac{t^2 pq}{d^2}}{1 + \frac{t^2 pq}{N(d^2 - 1)}}$$

رابطه ۵

در صورتی که شمار افراد جامعه نامحدود باشد، از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$n = \frac{t^2 pq}{d^2}$$

رابطه ۶

تعیین اندازه و شمار نمونه در بررسی جامعه‌های گیاهی نیازمند ترکیبی از روش‌های آماری، مشاهده‌های میدانی و فناوری‌های نوین است. گزینش نادرست این ویژگی می‌تواند موجب داده‌برداری نادرست و تصمیم‌گیری‌های اشتباه بیانجامد. برای کاهش خطا، توصیه می‌شود از روش‌های استاندارد و نرم‌افزارهای تخصصی استفاده شود.

تعیین منطقه‌های همگن بوم‌شناختی به‌عنوان واحدهای نمونه‌برداری با استفاده از فناوری‌های نوین مانند داده‌های سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، الگوی رقومی ارتفاع و سایر نقشه‌های رقومی می‌تواند با تخمین اولیه متغیرهای محیطی به گزینش درست شمار بهینه نمونه‌ها کمک کند (زارع چاهوکی، ۱۴۰۱ و Longley et al., 2015 Anderson & Gaston, 2013).

روش‌های نمونه‌برداری

گزینش و پیاده‌سازی روش نمونه‌برداری مناسب، ترکیبی از دانش، هنر و فناوری است. افزون بر توجه به شرایط جامعه آماری مورد بررسی، هدف‌های پژوهش، مقیاس مکانی-زمانی، ابزار نمونه‌برداری و متغیرهای مورد بررسی که در گزینش روش مناسب نمونه‌برداری مؤثر هستند، استفاده از فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، امکان نمونه‌برداری در مقیاس‌های بزرگتر و پیچیده‌تر را فراهم می‌کنند. در ادامه شرایط استفاده از هر روش نمونه‌برداری بیان می‌شود (زارع چاهوکی، ۱۴۰۱).

نمونه‌برداری غیرتصادفی^۱ در این روش، گزینش نمونه بر اساس سلیقه، تشخیص و صلاحدید پژوهشگر انجام می‌شود. نتایج به‌دست آمده از این روش نمونه‌برداری، تعمیم‌پذیر نیست. یعنی پژوهشگر نمی‌تواند مقدارهای محاسبه‌شده برای شاخص‌های نمونه را به جامعه آماری تعمیم دهد و پارامترهای جامعه را از آن‌ها نتیجه‌گیری کند.

نمونه‌برداری تصادفی^۲ از این روش در شرایط جامعه آماری همگن استفاده می‌شود. در این روش، تمام عناصر، احتمال مساوی برای گزینش شدن دارند. داده‌های تولیدی از این روش ناریب است و بهترین شرایط را برای تجزیه و واکاوی آماری دارند. مهمترین محدودیت استفاده از این روش در علوم محیطی این است که امکان کدگذاری همه افراد جامعه برای گزینش تصادفی از بین آن‌ها وجود ندارد. همچنین، در بوم‌شناختی، استفاده از این روش نمونه‌برداری دارای محدودیت‌های زیر است (Krebs, 2014).

- ❖ گزینش تصادفی نمونه‌ها ممکن است موجب شود که بعضی از نمونه‌ها دور از دسترس قرار گیرند و اطلاعات حاصل، هزینه و زمان صرف‌شده را جبران نکند.
- ❖ در نمونه‌برداری از پوشش گیاهی، گزینش تصادفی نمونه‌ها ممکن است برحسب اتفاق روی کپه‌هایی قرارگیرد که پوشش گیاهی انبوهی داشته باشند. برعکس، ناحیه‌های بدون پوشش با شدت کمتری نمونه‌گیری شده و در نتیجه تمامی تغییرهای پوشش گیاهی در نمونه‌گیری وارد نشود.
- ❖ نمونه‌برداری تصادفی از گونه‌های نادر اغلب برآوردی کمتر از حد لازم ارائه می‌دهد.

نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده^۱ - در شرایطی از این روش استفاده می‌شود که جامعه آماری ناهمگن است، اما با طبقه‌بندی بتوان همگن‌سازی کرد.

نمونه‌برداری خوشه‌ای^۲ - از این روش در جامعه بسیار گسترده یا پراکنده استفاده می‌شود. در این روش برعکس دیگر روش‌ها، واحد نمونه‌برداری فرد یا یک عضو نیست، بلکه گروهی هستند که به صورت طبیعی شکل گرفته و گروه خود را تشکیل داده‌اند. به همین دلیل، نمونه‌برداری خوشه‌ای زمانی به کار می‌رود که گزینش گروهی از اعضا، امکان‌پذیرتر و آسانتر از گزینش اعضای جامعه باشد. برای نمونه، اگر هدف بررسی گونه‌های گیاهی ویژه در یک کشور باشد، این امکان وجود دارد که این گونه‌ها در مکان‌های مختلف کشور به صورت پراکنده وجود داشته باشند. در این شرایط بهترین روش نمونه‌برداری، شناسایی هر جمعیت یا جامعه یا خوشه‌هایی از هر جامعه و سپس گزینش تصادفی هر نمونه در خوشه‌هاست.

نمونه‌برداری مکانی^۳ - این روش نمونه‌برداری بیشتر برای بررسی پدیده‌ها و ویژگی‌های مکان‌ها و ناحیه‌های جغرافیایی به کار می‌رود. در فضای جغرافیایی پدیده‌ها و متغیرهای گوناگونی وجود دارند که گاهی بعد طبیعی دارند مانند جنس زمین، گونه‌های گیاهی، ریزاقلیم‌ها، کمیت و کیفیت آب و مانند آن و گاه بعد انسانی دارند مانند وضعیت اجتماعی و اقتصادی بهره‌برداران و مانند آن و گاهی نیز ترکیب هر دو بعد طبیعی و انسانی را دارند مانند عنصرهای مکانی روستا، شهر، راه‌های ارتباطی، کارخانه، منطقه‌های گردشگری، سد، کشتزار و مانند این‌ها. هر کدام از پدیده‌ها و عنصرهای یادشده مکان و فضای جغرافیایی خاصی را به خود اختصاص داده‌اند و بررسی تمام آن‌ها ممکن نیست. از این‌رو، پژوهشگر ناچار است با گزینش شماری از مکان‌ها یا ناحیه‌های جغرافیایی آن‌ها را بررسی کند. در این روش نمونه‌گیری، واحدهای نمونه انواع مختلفی دارند مانند نمونه نقطه‌ای، سطح یا قطعه و خطی. نمونه‌برداری مکانی و زمانی با استفاده از شبکه‌های سنجش و دستگاه‌های ثبت داده‌های محیطی، به‌ویژه در پایش پوشش گیاهی در زمان‌های مختلف، اهمیت زیادی دارد.

نمونه‌برداری تلفیقی^۴ - نمونه‌برداری تلفیقی به ترکیب دو یا چند روش نمونه‌برداری اشاره دارد که با هدف بهره‌مندی از سودمندی‌های هر روش و کاهش محدودیت‌های آن‌ها طراحی می‌شود. این روش به‌ویژه در پژوهش‌های محیطی که با پیچیدگی بوم‌نظام‌ها، ناهمگنی مکانی و تغییرهای زمانی روبه‌رو هستند، کاربرد دارد.

با تلفیق دو روش نمونه‌برداری غیرتصادفی و تصادفی در روش تصادفی-سیستماتیک، نمونه اولیه به‌طور تصادفی گزینش و نمونه‌های دیگر با افزایش یک فاصله ثابت از آن مشخص خواهند شد. همچنین، با تلفیق دو روش طبقه‌بندی‌شده و تصادفی، ابتدا جامعه به طبقه‌های همگن تقسیم و نمونه‌برداری تصادفی در هر طبقه انجام می‌شود. با ترکیب دو روش طبقه‌بندی‌شده و خوشه‌ای، جامعه به طبقه‌های همگن تقسیم شده و نمونه‌برداری خوشه‌ای در هر طبقه انجام می‌شود. برای نمونه، در بررسی کیفیت آب دریاچه‌ها، تقسیم بر اساس ژرفا و نمونه‌برداری خوشه‌ای در هر ژرفا، انجام می‌شود (Lohr, 2021). ترکیب روش‌های نمونه‌برداری و استفاده از فناوری‌های نوین مانند داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به بهبود دقت و کاهش هزینه در منطقه‌های گسترده و دشواری دسترسی، کمک کند (Anderson & Gaston, 2013). ترکیب درست روش‌های نمونه‌برداری با توجه به شرایط منطقه مورد بررسی، هدف‌های پژوهش، ابزار نمونه‌برداری، مقیاس بررسی و نوع متغیرهای مورد بررسی می‌تواند راهکاری مؤثر برای چیرگی بر چالش‌های نمونه‌برداری در محیط‌های پیچیده و ناهمگن باشد. این روش در کاهش خطاها، افزایش دقت، کاهش هزینه‌ها و ایجاد پوشش گسترده‌تر در نمونه‌برداری مؤثر است، هر

نمونه‌برداری در علوم محیطی: اصول و روش‌ها با تأکید بر پوشش گیاهی و عامل‌های بوم‌شناختی

چند که استفاده از روش‌های ترکیبی به دانش تخصصی و تجهیزات نیاز دارد. در جدول ۲ سودمندی‌ها و محدودیت‌های روش‌های نمونه‌برداری ارائه شده است.

جدول ۲- مقایسه سودمندی‌ها و محدودیت‌های روش‌های نمونه‌برداری در علوم محیطی.

روش نمونه‌برداری	سودمندی‌ها	محدودیت‌ها
غیرتصادفی	ساده، سریع و کم‌هزینه، مناسب برای بررسی‌های مقدماتی یا پایلوت، امکان گزینش منطقه‌های مورد نظر پژوهشگر (انعطاف‌پذیری زیاد)، احتمال نادیده گرفتن گونه‌های نادر.	نتایج تعمیم‌ناپذیر به جامعه آماری، سوگیری شدید در داده‌ها،
تصادفی	داده‌ها بدون سوگیری و تعمیم‌پذیر، امکان استفاده در واکاوی‌های آماری، شفافیت در گزینش نمونه‌ها.	دشواری پیاده‌سازی در جامعه‌های گسترده یا سخت‌دسترس، احتمال افتادن تصادفی نمونه‌ها در منطقه‌های غیرنماینده (برای نمونه لکه‌های متراکم و تُنک)، کارایی پایین در مورد گونه‌های نادر.
طبقه‌بندی‌شده	استفاده در جامعه‌های ناهمگن، امکان مقایسه دقیق طبقه‌های بوم‌شناختی (برای نمونه شیب، خاک یا ارتفاع از سطح دریا).	نیاز به اطلاعات پایه و نقشه‌های دقیق، افزایش هزینه و زمان طراحی اولیه.
خوشه‌ای	مناسب برای جامعه‌های بسیار گسترده و پراکنده، کاهش هزینه و زمان در بررسی‌های مّلی منطقه‌ای، کاربردی در بررسی گونه‌های پراکنده.	خطای بیشتر به دلیل همبستگی درون‌خوشه‌ای، کاهش دقت نسبت به نمونه‌برداری تصادفی یا طبقه‌بندی‌شده، نیازمند تعیین خوشه‌های طبیعی یا منطقی.
مکانی	مناسب برای بررسی‌های جغرافیایی و فضایی، امکان استفاده از واحدهای نقطه‌ای، خطی یا سطحی، ترکیب‌پذیر با سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های سنجش از دور، کاربردی در پایش زمانی و مکانی پوشش گیاهی.	نیازمند داده‌های مکانی دقیق و تجهیزات فنی، هزینه زیاد ایجاد شبکه‌های سنجش و ثبت داده
تلفیقی	بهره‌مندی همزمان از سودمندی‌های چند روش، کاهش خطا و افزایش دقت، انعطاف‌پذیر در شرایط محیطی گوناگون، کاهش هزینه‌ها با استفاده از ترکیب مناسب.	نیازمند تخصص زیاد در طراحی سیستم نمونه‌برداری، افزایش دقت، پیچیدگی در واکاوی و تفسیر داده‌ها، وابستگی به فناوری‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و RS.

اندازه‌گیری و ثبت داده‌های بوم‌شناختی

عامل‌های بوم‌شناختی مانند پستی و بلندی، خاک، اقلیم و عامل انسانی بر پراکنش و ترکیب پوشش گیاهی تأثیر دارند و ضروری است این داده‌ها نیز به همراه داده‌های پوشش گیاهی و هماهنگ با روش نمونه‌برداری اندازه‌گیری و ثبت شوند (Kent, 2012). برای ثبت داده‌ها می‌توان از سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های دورکاری بهره‌گیری کرد (Harris & King, 2021).

مدیریت نبود قطعیت و خطاها در نمونه‌برداری

نبود قطعیت یکی از چالش‌های اساسی در پژوهش‌های علوم محیطی است و می‌تواند بر کیفیت داده‌ها و اعتبار نتایج پژوهش تأثیر جدی بگذارد؛ نبود قطعیت ممکن است از منابع مختلفی ناشی شود. از جمله گزینش نادرست مقیاس یا واحد نمونه‌برداری، طراحی غیربهبینه شبکه نمونه‌برداری، استفاده از ابزار نامناسب، خطاهای انسانی در برداشت میدانی و نیز خطاهای ناشی از روش‌های آزمایشگاهی و پردازش داده (Harris & King, 2021). افزون بر این، تغییر ذاتی در بوم‌نظام‌ها و ناهمگنی مکانی و زمانی نیز بر مقدار نبود قطعیت می‌افزایند.

برای مدیریت این نبود قطعیت، چند راهبرد کلیدی وجود دارد. نخست، باید طراحی نمونه‌برداری با دقت و بر اساس استانداردهای علمی انجام گیرد. استفاده از طرح‌های نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده یا تصادفی-سیستماتیک می‌تواند به کاهش سوگیری و افزایش نمایندگی داده‌ها کمک کند (Thompson, 2015). دوم، گزینش و واسنجی درست ابزارهای اندازه‌گیری اهمیت دارد، زیرا ابزارهای بدون واسنجی مناسب می‌توانند خطاهای نظام‌مند ایجاد کنند.

در مرحله واکاوی داده، بهره‌گیری از روش‌های آماری پیشرفته می‌تواند نقش مهمی در مدیریت نبود قطعیت داشته باشد. برای نمونه، روش‌های واکاوی حساسیت امکان شناسایی متغیرهایی را فراهم می‌کند که بیشترین تأثیر را بر نتایج دارند. الگوسازی آماری و مکانی مانند رگرسیون چندمتغیره، کریجینگ و الگوهای سلسله‌مراتبی نیز به پژوهشگر اجازه می‌دهند تا تغییرهای مکانی-زمانی و خطاهای نمونه‌برداری را بهتر مدیریت کند (Guisan & Zimmermann, 2000). افزون بر این، استفاده از روش‌های اعتبارسنجی تقاطعی^۱ و تقسیم داده به مجموعه‌های آموزش و آزمون می‌تواند در ارزیابی دقت الگوها و کاهش نبود قطعیت پیش‌بینی‌ها مؤثر باشد.

در پایان، مستندسازی دقیق فرایند نمونه‌برداری، شفاف‌سازی منابع احتمالی خطا و گزارش مقدار نبود قطعیت در نتایج از الزام‌های پژوهش‌های محیطی است. این اقدام‌ها نه تنها توانایی بازتولید داده‌ها را افزایش می‌دهند، بلکه امکان مقایسه یافته‌ها در پژوهش‌های مختلف و در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت را نیز فراهم می‌کند (Beven, 2023).

نتیجه‌گیری

نمونه‌برداری و تولید داده‌های دقیق و با اعتبار زیاد، اساس هر پژوهش علمی است. در علوم محیطی و به‌ویژه بوم‌نظام‌های مرتعی، از آن‌جا که شرایط محیطی و پوشش گیاهی در زمان و مکان متغیر هستند و پیچیدگی زیادی در بوم‌نظام در ارتباط‌های بین متغیرهای بوم‌شناختی وجود دارد، ضروری است که سیستم نمونه‌برداری مناسبی متناسب با این شرایط طراحی شود. در پژوهش‌های بوم‌شناسی با چالش‌های زیادی از جمله ناهمگنی مکانی و زمانی، محدودیت دسترسی به واحدهای نمونه‌برداری، هزینه زیاد نمونه‌برداری، خطاهای نمونه‌برداری نبود قطعیت، نادیده گرفتن گونه‌های نادر، تأثیر عامل‌های انسانی و پیچیدگی بوم‌نظام روبه‌رو هستیم. برای رفع این چالش‌ها ضروری است سیستم نمونه‌برداری متناسب با ویژگی‌های بوم‌نظام‌های مرتعی طراحی شود.

در طراحی این سیستم افزون بر این که باید به اصول نمونه‌برداری شامل هدف‌های پژوهش، تعیین واحدهای نمونه‌برداری، مقیاس زمانی و مکانی، ابزار نمونه‌برداری، تعیین اندازه و شمار نمونه، روش نمونه‌برداری، ثبت داده‌های بوم‌شناختی و مدیریت نبود قطعیت و خطاها در نمونه‌برداری توجه کرد، لازم است از روش‌های تلفیقی و همچنین فناوری‌های نوین مانند تصویرهای ماهواره‌ای، پهبادها، حسگرهای زیست‌محیطی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و نقشه‌های رقومی استفاده کرد. در این حالت افزون بر کاهش زمان و هزینه نمونه‌برداری، داده‌های دقیق و با اعتبار تولید می‌شوند.

منابع

- زارع چاهوکی محمدعلی، ۱۴۰۱. روش تحقیق در علوم محیطی. انتشارات جهاد دانشگاهی تهران، ۲۸۸ صفحه.
- Anderson, K. & Gaston, K.J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.

- Beven, K. (2023). Evolving concepts of uncertainty. In J. Wainwright & M. Mulligan (Eds.), *Environmental modelling: Finding simplicity in complexity* (3rd ed., pp. 15-34). John Wiley & Sons, Ltd.
- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R* (2nd ed.). New York, NY: Springer, 405 p.
- Bonham, C. D. (2013). *Measurements for terrestrial vegetation* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 246 p.
- Chytrý, M., Hennekens, S.M., Jiménez-Alfaro, B., Knollová, I., Dengler, J. et al. (2020). European Vegetation Archive (EVA): New developments and applications in vegetation science. *Journal of Vegetation Science*, 31(4), 733-735.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2020). *ArcGIS Desktop: Release 10.8*. Redlands, CA: Author.
- Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Harris, M., & King, R. (2021). Utilizing sensor networks for environmental monitoring. *Environmental Monitoring*, 37(4), 202-214.
- Higgins, K.F. (2020). Vegetation sampling and management. In: Wildlife Techniques Manual. Mörsdorf, M. A., et al. (2015). Definition of sampling units begets conclusions in ecology. *Ecological Indicators*, 57, 556-559.
- Jensen, J.R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Boston, MA: Pearson Education, Inc, 623 p.
- Kent, M. (2012). *Vegetation description and data analysis: A practical approach* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell. 414 pp.
- Krebs, C.J. (2014). *Ecological methodology* (3rd ed.). Boston, MA: Pearson Education, Inc. 624 pp.
- Legendre, P. & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3rd English ed.). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 1006 pp.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 720 p.
- Lisner, A. (2020). Everyone makes mistakes: A case study of sampling errors in vegetation surveys. *Applied Vegetation Science*, 23(3), 512-520.
- Lohr, S.L. (2021). *Sampling: Design and analysis* (3rd ed.). Boca Raton, FL, USA: Chapman & Hall/CRC Press, 674 p.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. & Rhind, D.W. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 477 p.
- Mörsdorf, M.A., Ravolainen, V.T., Støvern, L.E., Yoccoz, N.G., Jónsdóttir, I.S. & Bråthen, K.A. (2015). Definition of sampling units begets conclusions in ecology: The case of habitats for plant communities. *Peer Journal*, 3, e815, 1-24.
- Regan, H.M., Colyvan, M. & Burgman, M.A. (2002). A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. *Ecological Applications*, 12(2), 618-628.
- Sparrow, B.D., McDonald, T. & McIntyre, S. (2020). A vegetation and soil survey method for surveillance monitoring. *Australian Ecology*, 45(1), 157-174.
- Thompson, S.K. (2015). *Adaptive sampling*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 265 p.
- Turner, W., Rondinini, C., Pettorelli, N., Mora, B., Leidner, A.K. et al. (2015). Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 182, 173-176.
- Yoccoz, N.G., Nichols, J.D. & Boulinier, T. (2001). Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(8), 446-453.

Sampling in Environmental Sciences; Principles and Methods with Emphasis on Vegetation and Ecological Factors

Zare Chahouki, M.A.^{1, 2}

Sampling in the environmental sciences is recognized as a fundamental basis for collecting reliable data and for analyzing ecological phenomena. This review, with an emphasis on vegetation and associated ecological factors, examines the principles, methods, and challenges of sampling in natural environments. Primary sampling approaches include non-probability (non-random), probability (random), stratified, cluster, spatial, and integrated (hybrid) designs, each is selected according to the conditions and complexity of natural ecosystems, the practical challenges of field data collection, the study's spatiotemporal scale and objectives, and the types of variables under investigation. For the assessment of ecological drivers in plant communities, correct selection of sampling units and instruments, appropriate sampling protocols, and the incorporation of modern technologies such as geographic information systems (GIS) and remote sensing play a central role in reducing measurement error and uncertainty and in increasing data accuracy and precision. Moreover, explicit consideration of spatial heterogeneity and species distributions, temporal replication of sampling, and the determination of optimal sample size and sampling intensity ensure data quality and the generalizability of findings. This review presents an integrated framework for selecting sampling methods that leverages remote sensing and GIS data in vegetation studies of heterogeneous ecosystems, thereby enabling error and uncertainty reduction and cost optimization. The findings indicated that combining traditional field methods with advanced technologies (e.g., GIS and remote sensing), together with adherence to statistical principles and objective-driven study design, not only improves data accuracy but also strengthens the capacity to provide practical management recommendations for the conservation and sustainable management of rangeland ecosystems.

Key words: Environmental monitoring, Natural ecosystems, Novel technologies, Sampling accuracy, Uncertainty.

1. Corresponding author's Email: mazare@ut.ac.ir

2. Professor of University of Tehran, Tehran.