

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر

روش‌شناسی پژوهش در نظام‌های زراعی: از نظریه تا اجرا

تألیف و گردآوری:

مجید غلامحسینی

استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر،
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

سرشناسه	: غلامحسینی، مجید، ۱۳۴۰-
عنوان و نام پدیدآور	: روش‌شناسی پژوهش در نظام‌های زراعی: از نظریه تا اجرا/ تألیف و گردآوری مجید غلامحسینی؛ [تهیه‌کننده] موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر؛ ویراستاران علمی فرید گل‌زردی، ابوالفضل فرجی، حمیدرضا فنائی.
مشخصات نشر	: تهران: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، معاونت آموزش و ترویج کشاورزی، نشر آموزش کشاورزی، ۱۴۰۵.
مشخصات ظاهری	: ۳۵۲ ص. جدول (بخشی رنگی)، نمودار (بخشی رنگی).
شابک	: 978-622-363-151-1
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیبا
یادداشت	: ص.ع. به انگلیسی: Research Methodology in Agricultural Systems: From Theory to Implementation.
یادداشت	: یادداشت: کتابنامه
یادداشت	: یادداشت: نمایه
موضوع	: نظام‌های زراعی -- تحقیق -- روش‌شناسی Cropping systems -- Research -- Methodology
شناسه افزوده	: گل‌زردی، فرید، ۱۳۶۲ -، ویراستار شناسه افزوده: فرجی، ابوالفضل، ۱۳۴۹ -، ویراستار
شناسه افزوده	: فنائی، حمیدرضا، ۱۳۵۲ -، ویراستار
شناسه افزوده	: موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر
شناسه افزوده	: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. معاونت آموزش و ترویج. نشر آموزش کشاورزی
رده‌بندی کنگره	: S ۶۰۲/۵ رده‌بندی دیویی: ۶۳۱/۵۸ شماره کتابشناسی ملی: ۱۰۵۴۱۰۸۲ اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیبا

ISBN: 978-622-363-151-1

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۳۶۳-۱۵۱-۱



روش‌شناسی پژوهش در نظام‌های زراعی: از نظریه تا اجرا

تألیف و گردآوری: مجید غلامحسینی

ویراستاران علمی: فرید گل‌زردی، ابوالفضل فرجی و حمیدرضا فنائی

ناشر: نشر آموزش کشاورزی - معاونت ترویج و آموزش کشاورزی

شمارگان: ۱۰۰ جلد

چاپ اول: ۱۴۰۵

قیمت:

مسئولیت درستی مطالب کتاب با مؤلف است

این کتاب تحت شماره ۳۱۴۰۵۲۱ مورخ ۱۴۰۵/۰۴/۲۱ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی به ثبت رسیده است.

نشانی: کرج، بلوار شهید فهمیده، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر،

تلفن: ۰۲۶-۳۲۷۰۰۴۲-۳

تقدیم به

همسر عزیزم، سرکار خانم دکتر همتی، که با شکیبایی،
همدلی و همفکری‌های ارزشمندش در تمام مراحل نگارش
این اثر، همواره مایه دلگرمی و پشتوانه من بوده است و
به دفتر دلبنده، مریم، که امید و روشنائی‌بخش فرdahاست.

پیشگفتار

گذر از نگاه تک‌بعدی و جزء‌نگر به رویکرد کل‌نگر و سیستمی، امروزه نه یک انتخاب، بلکه یک الزام گریزناپذیر در تحقیقات کشاورزی است. پژوهش‌های نظام‌محور که پیوندهای پیچیده میان خاک، آب، گیاه، اقلیم و همچنین ابعاد اقتصادی و اجتماعی را به صورت یکپارچه ارزیابی می‌کنند، کلید دستیابی به پایداری در تولیدات زراعی محسوب می‌شوند. با وجود اهمیت بنیادین این رویکرد، جای خالی یک منبع جامع و بومی که بتواند محققان را از مبانی نظری تا پیچیدگی‌های اجرا و تحلیل آماری این نوع پژوهش‌ها در شرایط اقلیمی و ساختاری ایران هدایت کند، همواره در ادبیات علمی کشور احساس می‌شد. کتاب حاضر، «روش‌شناسی پژوهش در نظام‌های زراعی: از نظریه تا اجرا»، دقیقاً در پاسخ به این خلأ اساسی در نظام پژوهشی کشاورزی کشور نگاشته شده است. در مورد روش‌شناسی نگارش این اثر، ذکر این نکته ضروری است که چرا عنوان تلفیقی (تألیف و گردآوری) برای آن انتخاب شده است. این کتاب، صرفاً ترجمه یک منبع واحد خارجی نیست؛ بلکه اثری است که بخش گردآوری آن، شامل استخراج و یکپارچه‌سازی مفاهیم، داده‌های فنی و روش‌شناسی‌های پیشرفته از ده‌ها منبع علمی معتبر جهانی (اعم از مقالات، کتب مرجع تخصصی و گزارش‌های فنی ایستگاه‌های تحقیقاتی مانند روتامستد) است. اما بخش تألیف که ساختار اصلی و شش فصلی کتاب را شکل

می‌دهد، رسالت پل زدن میان این مفاهیم پراکنده جهانی و واقعیت‌های بومی کشاورزی ایران را بر عهده دارد؛ چرا که پژوهش‌های نظام‌محور و کل‌نگر در مقیاس جامع در کشور ما کمتر انجام شده است. در این راستا، تألیف شامل ایجاد یک ساختار منطقی و آموزشی جدید، تحلیل تطبیقی مفاهیم جهانی با واقعیت‌های بومی (مانند چالش‌های پایداری در ایران) و ارائه مثال‌های متعدد محاسباتی و کاربردی در فصل‌های تحلیلی است.

این اثر با هدف پاسخگویی به نیازهای علمی و کاربردی طیف وسیعی از مخاطبان، از جمله پژوهشگران مؤسسات تحقیقاتی، اعضای هیئت علمی دانشگاه‌ها، دانشجویان تحصیلات تکمیلی در رشته‌های علوم زراعی و اکولوژی کشاورزی، و همچنین سیاست‌گذاران کلان بخش کشاورزی تدوین شده است. بر اساس همین رویکرد، تلاش شده است ساختار کتاب، خواننده را در یک مسیر منطقی از نظریه تا اجرا هدایت کند. این سفر علمی از فصل اول آغاز می‌شود، جایی که چارچوب‌های مفهومی و نظری بنا نهاده شده و گذار از جزءنگری به کل‌نگری به عنوان پارادایم اصلی کتاب تبیین می‌گردد. سپس در فصل دوم، به بعد انسانی و سازمانی این گذار پرداخته و اصول شکل‌گیری و مدیریت تیم‌های پژوهشی میان‌رشته‌ای، که پیش‌نیاز اجرای تحقیقات کل‌نگر هستند، مورد بحث قرار می‌گیرد. فصل سوم وارد مرحله برنامه‌ریزی عملیاتی شده و با ارائه ابزارهای کاربردی، چگونگی طراحی یک پروژه نظام زراعی را تشریح می‌کند. فصل چهارم به عنوان قلب فنی و محاسباتی کتاب، به پیچیده‌ترین بخش کار، یعنی طراحی و تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت اختصاص یافته و با ارائه مطالعات موردی، نحوه مدیریت چالش‌هایی چون همبستگی زمانی را به صورت عملی نشان می‌دهد. پس از تحلیل داده‌ها، فصل پنجم با تمرکز بر ارزیابی پایداری و معرفی ابزار ارزیابی چرخه حیات، به نتایج آماری، معنای اکولوژیک و اقتصادی می‌بخشد. سرانجام، فصل ششم با ارائه الگوهای عملیاتی برای مدیریت راهبردی، مالی و گزارش‌دهی و همچنین بومی‌سازی تجربیات جهانی برای شرایط ایران، این چرخه را کامل کرده و مسیر اجرا را نهایی می‌سازد.

در مسیر تدوین این اثر، بر خود لازم می‌دانم از مسئولین محترم و همکاران گرامی در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر که با حمایت‌های همه‌جانبه خود، بستر مناسبی را برای توسعه پژوهش‌های نظام‌محور و تدوین این کتاب فراهم آوردند، صمیمانه سپاسگزاری نمایم. در پایان، لازم به تأکید است که اگرچه تلاش فراوانی صورت گرفته تا اثری جامع، دقیق و کاربردی در حوزه روش‌شناسی مطالعات نظام‌های زراعی ارائه گردد، اما این نوشتار نیز مانند هر تلاش علمی دیگر، خالی از خطا و کاستی نیست. بنابراین، نویسندگان نقد‌ها، نظرات اصلاحی و بازخوردهای ارزشمند خوانندگان گرامی، به‌ویژه اساتید، پژوهشگران و دانشجویان عزیز را ارج نهاده و از آن‌ها برای ارتقای این اثر در چاپ‌های آتی، صمیمانه استقبال می‌کند.

چشم‌ها را باید شست جور دیگر باید دید **(سهراب سپهری)**

مجید غلامحسینی
زمستان ۱۴۰۴

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۷	فصل اول: چارچوب‌های مفهومی و رویکردهای پژوهشی در نظام‌های زراعی
۷	۱-۱. شناخت نظام‌های زراعی: از تعریف تا طبقه‌بندی
۱۴	۲-۱. مفاهیم و چهارچوب‌های نظام‌های زراعی
۱۸	۳-۱. پیوند پژوهش و اجرا در نظام‌های زراعی
۱۹	۴-۱. پژوهش‌های سامانه‌ای در نظام‌های زراعی
۲۱	۵-۱. گذار از جزءنگری به کل‌نگری
۲۵	۶-۱. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل اول
۲۶	منابع
۳۱	فصل دوم: سازماندهی و همکاری در پژوهش‌های نظام‌های زراعی
۳۲	۱-۲. طراحی و توسعه تیم پژوهشی مشارکتی
۳۳	۲-۲. رهبر پروژه در پژوهش‌های میان‌رشته‌ای
۳۴	۳-۲. تشکیل هسته اصلی تیم پژوهشی
۳۶	۴-۲. تعامل پژوهشگران و کشاورزان در مطالعات نظام‌های زراعی
۳۹	۵-۲. توسعه و ارتقای فرهنگ همکاری در پژوهش‌های نظام‌های زراعی
۴۱	۶-۲. استفاده از نقشه‌ها و مدل‌های مفهومی برای تسهیل درک پروژه توسط تیم
۴۳	۷-۲. راهکارهای برنامه‌ریزی و اجرای جلسات مؤثر
۴۷	۸-۲. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل دوم
۴۸	منابع
۵۱	فصل سوم: برنامه‌ریزی پژوهش‌های نظام‌های زراعی
۵۲	۱-۳. فرآیند تدوین و طراحی پروژه‌های پژوهشی
۵۷	۳-۱-۱. بررسی پیشینه پژوهش و مطالعات مرتبط

۵۷	۳-۱-۲. شناسایی مسئله در پژوهش‌های نظام‌های زراعی،.....
۵۸	۳-۱-۳. تدوین اهداف و مقاصد پژوهشی.....
۵۹	۳-۱-۴. طراحی آزمایش‌های پژوهشی متناسب با اهداف.....
۶۱	۳-۲. انتخاب محل اجرای پژوهش‌های نظام‌های زراعی.....
۶۳	۳-۳. تمایزات پژوهش‌های نظام‌های زراعی در ایستگاه‌های تحقیقاتی.....
۶۴	۳-۱-۱. طراحی تیمارها.....
۶۷	۳-۳-۲. ابعاد واحد آزمایشی و پیامدهای عملیاتی-اقتصادی.....
۶۸	۳-۳-۳. شیوه مدیریت محصولات.....
۷۰	۳-۳-۴. اجرای آزمایش‌های تکمیلی در مقیاس کوچک.....
۷۰	۳-۴. ماهیت بلندمدت پژوهش‌های نظام‌های زراعی.....
۷۳	۳-۵. مدیریت آزمایش‌ها و پروتکل‌های داده.....
۷۴	۳-۶. پژوهش‌های نظام‌های زراعی در مزارع کشاورزان.....
۷۶	۳-۶-۱. معیارها و فرآیند گزینش مزارع هدف.....
۸۱	۳-۶-۲. روش شناسی طراحی آزمایش‌ها در مزارع کشاورزان.....
۸۴	۳-۷. تامین مالی پژوهش‌های نظام‌های زراعی.....
۸۷	۳-۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل سوم.....
۸۸	منابع.....
۹۱	فصل چهارم: طراحی و تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی.....
۹۲	۴-۱. تاریخچه طراحی آزمایش‌های بلندمدت.....
۹۶	۴-۲. ملاحظات اساسی پیش از آغاز آزمایش‌های بلندمدت.....
۹۷	۴-۳. اصول بنیادین طراحی آزمایش‌های زراعی بلندمدت.....
۹۹	۴-۴. ابعاد و شکل واحدهای آزمایشی.....
۱۰۱	۴-۵. تمهیدات راهبردی برای به‌روزرسانی و پویایی آزمایش‌های بلندمدت.....
۱۰۴	۴-۶. شروع آزمایش: رویکردهای استاندارد و پلکانی.....
۱۰۵	۴-۶-۱. طراحی استاندارد آزمایش‌های بلندمدت و چالش‌های آن.....
۱۰۹	۴-۶-۲. بازنگری در طراحی آزمایش‌های بلندمدت با روش پلکانی.....

- ۷-۴. اهمیت تیمارهای تناوبی در طراحی آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی..... ۱۱۳
- ۷-۴-۱. اصطلاحات پایه و مفاهیم کلیدی در آزمایش‌های تناوبی..... ۱۱۴
- ۷-۴-۲. انواع آزمایش‌های تناوبی..... ۱۱۷
- ۷-۴-۳. نکات تکمیلی در طراحی آزمایش‌های تناوبی..... ۱۲۶
- ۸-۴. دوره‌های زمانی در آزمایش‌های بلندمدت..... ۱۳۰
- ۸-۴-۱. مدیریت زمانی تیمارها در آزمایش‌های بلندمدت..... ۱۳۲
- ۹-۴. مدیریت تغییرات تکنولوژیک و به‌روزرسانی عملیات زراعی در آزمایش‌های بلندمدت..... ۱۳۷
- ۱۰-۴. روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها در آزمایش‌های بلند مدت زراعی..... ۱۳۸
- ۱۰-۴-۱. آماره‌های خلاصه و روش‌های تک‌متغیره..... ۱۴۰
- ۱۰-۴-۲. تحلیل ثبات و ثبات نسبی..... ۱۴۷
- ۱۰-۴-۳. تجزیه و تحلیل چند متغیره داده‌ها..... ۱۵۶
- ۱۰-۴-۱-۳. تجزیه واریانس چند متغیره..... ۱۵۸
- ۱۰-۴-۲-۳. تحلیل مولفه‌های اصلی..... ۱۶۲
- ۱۰-۴-۳-۳. تحلیل تشخیصی متعارف..... ۱۶۷
- ۱۰-۴-۴-۳. تحلیل خوشه‌ای..... ۱۷۳
- ۱۰-۴-۵-۳. مدل‌سازی معادله ساختاری..... ۱۷۹
- ۱۰-۴-۶-۳. تحلیل مسیر..... ۱۸۵
- ۱۰-۴-۷-۳. تحلیل سری زمانی..... ۱۸۹
- ۱۰-۴-۴-۴. مدل‌سازی ساختار همبستگی برای تحلیل آزمایش‌های بلندمدت..... ۱۹۴
- ۱۰-۴-۱-۴-۱. ساختارهای همبستگی رایج..... ۱۹۷
- ۱۰-۴-۲-۴. مطالعه موردی محاسباتی: مقایسه رویکرد سنتی و مدرن در تحلیل داده‌های تکرارشونده..... ۲۰۰
- ۱۰-۴-۵-۵. تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت با طراحی پلکانی..... ۲۰۸
- ۱۰-۴-۶-۶. تفکیک اثرات ثابت و تصادفی در طراحی استاندارد با استفاده از فرضیات تکمیلی..... ۲۱۴
- ۱۰-۴-۷-۷. تحلیل پیشرفته روندهای زمانی: مدل‌های غیرخطی و تحلیل نقطه شکست..... ۲۲۲

۲۲۳	 مدل‌های غیرخطی
۲۲۸	 ۲-۷-۱۰-۴. تحلیل نقطه شکست
۲۳۳	 ۸-۱۰-۴. تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت با تیمارهای تناوبی
۲۳۶	 ۱-۸-۱۰-۴. مطالعه موردی: تحلیل آماری و مدل‌سازی روند در آزمایش‌های بلندمدت تناوبی
۲۴۵	 ۲-۸-۱۰-۴. نکات تکمیلی و راهنمای عملیاتی در تحلیل آزمایش‌های تناوبی
۲۴۸	 ۹-۱۰-۴. ملاحظات عملیاتی آماری: مدیریت داده‌های گمشده و پایش کیفیت
۲۵۱	 ۱۱-۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل چهارم
۲۵۲	 منابع
۲۶۳	 فصل پنجم: ارزیابی پایداری در نظام‌های زراعی: روش‌ها و شاخص‌ها
۲۶۵	 ۱-۵. روش‌های ارزیابی پایداری در نظام‌های زراعی
۲۶۹	 ۱-۱-۵. اهمیت تعیین مقیاس‌های زمانی و مکانی در ارزیابی پایداری
۲۷۰	 ۲-۵. انتخاب شاخص‌ها و داده‌های مورد نیاز
۲۷۳	 ۱-۲-۵. ابعاد چهارگانه شاخص‌های پایداری: یک چارچوب کل‌نگر
۲۸۷	 ۳-۵. سنجش جامع پایداری: نرمال‌سازی و تلفیق شاخص‌ها
۲۸۸	 ۱-۳-۵. روش‌های استانداردسازی و وزن‌دهی به شاخص‌ها
۲۹۰	 ۲-۳-۵. تحلیل هم‌افزایی‌ها و بده‌بستان‌ها
۲۹۳	 ۴-۵. اعتبارسنجی شاخص‌ها و تحلیل حساسیت نتایج
۲۹۵	 ۵-۵. چالش‌های عملیاتی و بومی‌سازی شاخص‌های پایداری در ایران
۲۹۸	 ۶-۵. ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی با رویکرد چرخه حیات
۳۰۰	 ۱-۶-۵. مبانی، مراحل اجرا و کاربردهای LCA در تحلیل پایداری
۳۰۳	 ۲-۶-۵. مطالعه موردی محاسباتی: تحلیل تطبیقی ردپای کربن در نظام‌های خاک‌ورزی متداول و حفاظتی گندم
۳۰۶	 ۳-۶-۵. کاربردهای ارزیابی چرخه حیات در تحلیل پایداری
۳۰۸	 ۴-۶-۵. نقاط قوت و محدودیت‌های روش ارزیابی چرخه حیات
۳۰۹	 ۷-۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل پنجم

منابع	۳۱۱
فصل ششم: مدیریت اجرایی و راهبردی در پژوهش‌های نظام‌های زراعی	۳۲۱
۱-۶. راهنمای عملی راه‌اندازی پروژه: از تصویب تا استقرار در مزرعه	۳۲۲
۲-۶. مدیریت مالی پروژه‌های تحقیقاتی	۳۲۵
۱-۲-۶. الگوی نمونه برای ساختار بودجه‌بندی پروژه	۳۲۶
۳-۶. مدیریت تعهدات و پایش پیشرفت	۳۲۹
۱-۳-۶. زمان‌بندی عملیاتی و مدیریت فازهای اجرا	۳۲۹
۲-۳-۶. شاخص‌های کلیدی عملکرد برای ارزیابی تیم	۳۳۱
۴-۶. مدیریت انتشارات علمی و اخلاق پژوهش	۳۳۲
۵-۶. درس‌هایی از یک قرن تجربه: بازخوانی مدیریتی مطالعه موردی روتامستد	۳۳۴
۱-۵-۶. تحلیل تطبیقی و بومی‌سازی تجربیات جهانی برای شرایط ایران	۳۴۱
۶-۶. چالش‌ها و ضرورت‌های پایداری در آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی	۳۴۳
۶-۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل ششم	۳۴۶
سخن پایانی	۳۴۶
منابع	۳۴۸
فهرست واژه‌ها	۳۴۹

مقدمه

کشاورزی ایران، همگام با تحولات جهانی، با چالش‌های متعددی در ابعاد مختلف مواجه است. در کنار فشارهای فزاینده تولیدی و اقتصادی، بهره‌برداران بخش کشاورزی با پیامدهای پیچیده زیست‌محیطی ناشی از کشاورزی فشرده، از جمله بحران کمی و کیفی منابع آب، آلودگی‌های ناشی از مصرف بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تهدید تنوع زیستی دست به گریبان هستند. بسیاری از این چالش‌ها، ریشه در خود نظام‌های تولید کشاورزی دارند. این طیف وسیع از مشکلات، مواردی چون تغییرات اقلیمی و جنگل‌زدایی در مقیاس کلان را در بر می‌گیرد و تا پیامدهای مستقیم‌تری نظیر تخریب تنوع زیستی، تشکیل مناطق مرده اکولوژیک^۱، بحران منابع آبی، آلودگی‌های محیطی، فرسایش خاک، تجمع پسماندها، ناپایداری درآمد کشاورزان و مهاجرت روستاییان به شهرها ادامه می‌یابد.

برای مواجهه مؤثر با این چالش‌های چندبعدی و دستیابی به نظام‌های کشاورزی پایدار، لازم است تحقیقات کشاورزی به سمت تولید دانشی حرکت کند که همزمان سه هدف کلیدی حفاظت از محیط زیست، تأمین درآمد پایدار برای بهره‌برداران و پایداری اجتماعات روستایی را محقق سازد. این امر مستلزم تحولی اساسی در پارادایم

۱. مناطق مرده (حوزه‌های کم‌اکسیژن آب‌های طبیعی) عمدتاً در نتیجه فعالیت‌های کشاورزی متداول، به‌ویژه از طریق رواناب کودهای شیمیایی ایجاد می‌شوند که با تحریک رشد جلبک‌ها و مصرف اکسیژن در فرآیند تجزیه، حیات آبزیان را تهدید می‌کنند (Bailey et al., 2020).

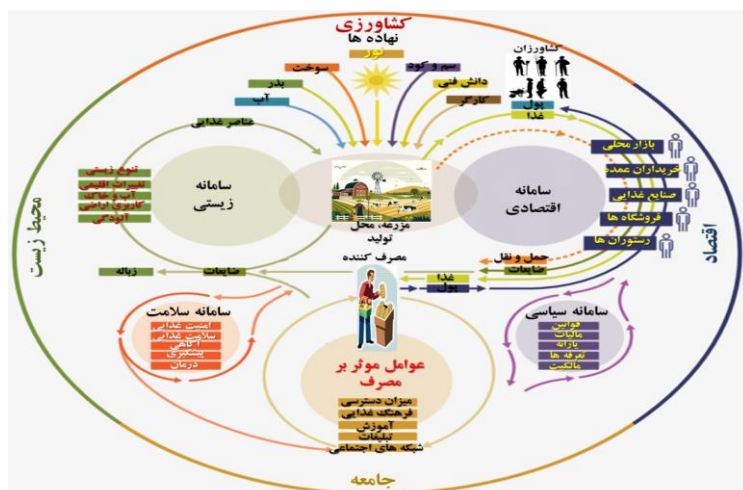
پژوهش‌های^۱ کشاورزی است، به طوری که از ارزیابی‌های تک‌بعدی مانند عملکرد یا سودآوری، به سوی رویکردهای چندمعیاره که ابعاد سه‌گانه پایداری (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) را پوشش می‌دهد، تغییر کند. پژوهش‌های نظام‌های زراعی با ماهیت کل‌نگر و سیستماتیک خود، چارچوب پژوهشی مناسبی برای این تحول محسوب می‌شوند. این رویکرد قادر است همزمان به نیازهای تولیدی پاسخ گوید، اهداف زیست‌محیطی را پشتیبانی کند و پایداری اجتماعی را تقویت نماید. از طریق تحلیل تعاملات پیچیده بین نظام‌های تولید زراعی، پیامدهای زیست‌محیطی و آثار اجتماعی، این پارادایم پژوهشی نوین می‌تواند راهکارهای عملیاتی برای چالش‌های موجود ارائه دهد و زمینه‌ساز معیشت پایدار برای جامعه کشاورزی باشد.

شکل ۱ چارچوب مفهومی یک نظام تولید کشاورزی را به همراه اجزای تشکیل‌دهنده و روابط متقابل بین این اجزا ارائه می‌نماید. پژوهش‌های نظام‌های زراعی با اتخاذ رویکردی جامع‌نگر، کلیه ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و بهداشتی نظام‌های زراعی را مورد توجه قرار می‌دهند. این نوع پژوهش‌ها در حالت مطلوب خود، مشارکت فعالانه ذی‌نفعان متعددی از جمله کشاورزان (تولیدکنندگان)، پژوهشگران چندرشته‌ای، مروجین کشاورزی و نمایندگان نهادهای سیاست‌گذار و اجرایی را جلب می‌نماید. تلفیق تخصص‌های متنوع این ذی‌نفعان، امکان توسعه راهکارهای عملی و کاربردی برای چالش‌های واقعی بخش کشاورزی را فراهم می‌سازد. این رویکرد مشارکتی در مقایسه با پژوهش‌های تک‌رشته‌ای مرسوم، منجر به خلق طیف وسیع‌تری از راهکارهای نوآورانه می‌گردد. در این پارادایم پژوهشی، تعامل مستمر محققان، مروجین و کشاورزان، به توسعه مستمر سامانه‌های مدیریتی جدیدی منجر می‌شود که از طریق شبکه‌های ترویجی گسترده‌تر نسبت به روش‌های ترویجی سنتی، به اشتراک گذاشته

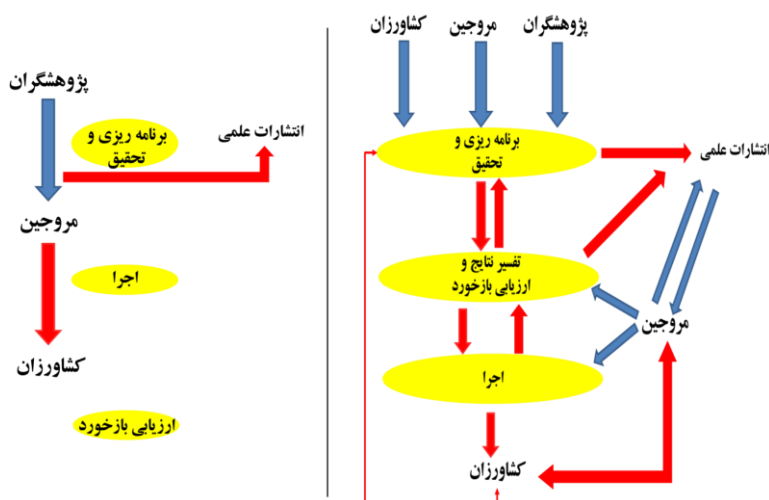
1. Research paradigm

پارادایم پژوهشی به عنوان یک چارچوب فلسفی و نظری در تحقیقات علمی معرفی می‌شود که رویکرد پژوهشگر را به جهانی‌بینی، روش‌شناسی و تفسیر داده‌ها شکل می‌دهد (Rehman and Alharthi, 2016).

می‌شوند. این فرآیند مشارکتی، امکان یادگیری متقابل کلیه بازیگران در تمامی مراحل پژوهش را فراهم می‌نماید (شکل ۲).



شکل ۱. نقشه سیستم غذایی. برگرفته از WorldLink (2024) با اندکی تغییرات.



شکل ۲. مقایسه تطبیقی جریان اطلاعات در دو پارادایم پژوهشی؛ سمت چپ، روش مرسوم پژوهش‌های کشاورزی (جریان خطی و یکسویه) و سمت راست، الگوی پژوهش‌های نظام‌های زراعی (جریان شبکه‌ای و چندسویه) را نشان می‌دهد. پیکان‌های آبی نمایانگر اطلاعات ورودی و پیکان‌های قرمز، نشان‌دهنده انتشار اطلاعات هستند. برگرفته از Nery et al. (2024) با اندکی تغییرات.

پژوهش در نظام‌های زراعی به صورت ذاتی مستلزم همکاری میان‌رشته‌ای است، به طوری که ابتدا محققان حوزه‌های مختلف علوم کشاورزی در طراحی و اجرای پژوهش مشارکت می‌کنند و سپس با همکاری متخصصان علوم اجتماعی، اقتصادی و سیاسی به تحلیل عوامل کلانی مانند ساختار بازارها، چارچوب‌های قانونی و مؤلفه‌های تأثیرگذار بر فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان می‌پردازند. تجارب پژوهشی گذشته به وضوح نشان می‌دهد که رویکردهای تک‌رشته‌ای در علوم کشاورزی قادر به تأمین همزمان اهداف تولید پایدار، رونق اقتصادی و حفظ سلامت اکوسیستم‌های زراعی نبوده‌اند. برای نمونه، بسیاری از مطالعات مرتبط با چالش‌های زیست‌محیطی نظیر آلودگی منابع آبی، فرسایش خاک یا کاهش تنوع زیستی، صرفاً توسط محققان علوم کشاورزی و محیط‌زیست و بدون مشارکت سایر رشته‌ها انجام شده‌اند. چنین پژوهش‌هایی عمدتاً بر اصلاح روش‌های تولید متمرکز بوده و به دلیل غفلت از ابعاد اجتماعی-اقتصادی، از اثربخشی عملیاتی محدودی برخوردار بوده‌اند. به طور مشابه، سیاست‌گذاری‌های صرفاً اقتصادی که با هدف حداکثرسازی سوددهی طراحی می‌شوند، معمولاً نتوانسته‌اند تنوع اکولوژیک و شرایط اقلیمی خاص هر منطقه را که برای مدیریت پایدار نظام‌های تولیدی ضروری است، مدنظر قرار دهند. در مقابل، پژوهش‌های نظام‌های زراعی با گردهم آوردن متخصصان رشته‌های مختلف و تلفیق نظریه‌های زراعی، اکولوژیک، اقتصادی و جامعه‌شناختی، امکان درک جامع‌تری از عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری کشاورزان و مصرف‌کنندگان و پیامدهای این تصمیمات بر عملکرد سیستم‌های تولیدی، اقتصاد مزرعه، محیط‌زیست و ساختارهای اجتماعی را فراهم می‌سازند.

گذار از پژوهش‌های تک‌رشته‌ای و جزءنگر به تحقیقات چندرشته‌ای و کل‌نگر، فرآیندی پیچیده و چالش‌برانگیز محسوب می‌شود که مستلزم تحولات بنیادین در پارادایم‌های پژوهشی است. این تحولات، بازنگری اساسی در طراحی آزمایش‌ها، روش‌شناسی تحقیق و چارچوب‌های تحلیلی را شامل می‌شود. پژوهش‌های نظام‌های

زراعی، به عنوان الگویی از این رویکرد جامع‌نگر، مستلزم بازتعریف مفاهیم پایه‌ای در درک نظام‌های تولیدی، بازاندیشی در شیوه‌های همکاری علمی و ابداع روش‌های نوین طراحی آزمایش است. اجرای موفقیت‌آمیز این گونه مطالعات، علاوه بر همکاری‌های بین‌رشته‌ای فشرده، مستلزم الزاماتی همچون کار تیمی طولانی‌مدت است که عموماً در محیط‌های پژوهشی کشور چندان مرسوم نیست. افزون بر این، چنین رویکردی به سرمایه‌گذاری زمانی قابل توجهی در هر دو افق کوتاه‌مدت و بلندمدت نیاز داشته و با چالش‌های نهادی متعددی، از جمله تأمین منابع مالی پایدار و لزوم بازنگری در نظام‌های ارزیابی پژوهشگران، مواجه است.

همگام با تحولات جهانی، نظام کشاورزی ایران نیز ناگزیر از حرکت به سمت الگوهای تولید پایدار و بهینه‌سازی مصرف منابع است. در این راستا، روش‌های مدیریت پایدار مزرعه نظیر کشت گیاهان پوششی، مدیریت تلفیقی آفات، کشاورزی حفاظتی و نظام‌های تناوبی توسط کشاورزان پیشرو به طور فزاینده‌ای مورد استقبال قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، تغییر ترجیحات مصرف‌کنندگان به سمت محصولات ارگانیک و سالم، محرکی کلیدی در تسریع پذیرش این شیوه‌های پایدار توسط جامعه کشاورزی محسوب می‌شود. در پاسخ به این تحولات، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر به عنوان یکی از ارکان اصلی پژوهش‌های کشاورزی کشور، با تأسیس کارگروه تخصصی نظام‌های زراعی، رویکردهای بین‌رشته‌ای را در اولویت‌های پژوهشی خود جای داده است. مأموریت اصلی این کارگروه، برنامه‌ریزی و توسعه پژوهش‌های کاربردی در حوزه نظام‌های زراعی، از جمله کشاورزی حفاظتی، نظام‌های کم‌نهاد، تولید ارگانیک و دیگر روش‌های پایدار تولید محصولات کشاورزی است.

حتی پژوهشگرانی که در حوزه‌های تخصصی محدودتر فعالیت می‌کنند، می‌توانند با مشارکت در چارچوب پژوهش‌های نظام‌های زراعی، از دیدگاه جامع‌نگر این رویکرد بهره‌مند گردند. افزون بر این، هنگامی که محققان تأثیر کار خود را در بستر گسترده‌تر

نظام‌های کشاورزی، محیط زیست و جامعه مورد توجه قرار دهند، انگیزه و اثربخشی فعالیت‌های پژوهشی آنان به طور محسوسی افزایش خواهد یافت. در شرایط کنونی، آینده کشاورزی کشور بر اساس دو الزام کلیدی در حال شکل‌گیری است: نخست، دستیابی به تولید پایدار (به‌عنوان خواست بهره‌برداران) و دوم، تأمین نیاز بازار به محصولات کافی، سالم و مقرون‌به‌صرفه (به‌عنوان خواست جامعه). در چنین چشم‌اندازی، پژوهش‌های نظام‌های زراعی با رویکرد جامع‌نگر خود، می‌توانند و باید در صدر اولویت‌های تحقیقات کشاورزی قرار گیرند. امید است این نوشتار بتواند سهمی در توسعه و ترویج این پارادایم نوین پژوهشی ایفا نماید.

فصل اول

چارچوب‌های مفهومی و رویکردهای پژوهشی در نظام‌های زراعی

ذره‌ها پیوسته شد با ذره‌ها تا پدید آید همه ارض و سماء
(مولانا)

۱-۱. شناخت نظام‌های زراعی: از تعریف تا طبقه‌بندی

نظام‌های زراعی را می‌توان با رویکردهای مختلفی تعریف و توصیف نمود. در ادبیات علمی، اصطلاحات متنوعی نظیر سیستم کشاورزی، نظام کشت، کشاورزی ارگانیک، حفاظتی و اکولوژیک برای معرفی این نظام‌ها بر اساس مبانی فلسفی، ویژگی‌های ساختاری یا شیوه‌های مدیریتی به کار رفته است. از منظر مفهومی، نظام زراعی به مجموعه‌ای منسجم از منابع تولید اشاره دارد که در قالب تریبی خاص و در پاسخ به شرایط محیطی (فیزیکی و بیولوژیکی) و مؤلفه‌های اجتماعی-اقتصادی، توسط کشاورز مدیریت و سازماندهی می‌شود (Bezner Kerr et al., 2017). این نظام‌ها را می‌توان بر اساس شاخص‌های مختلف طبقه‌بندی نمود که خلاصه‌ای از آن‌ها به همراه اهمیت پژوهشی هر کدام، در جدول ۱-۱ ارائه شده است.

جدول ۱-۱. طبقه‌بندی نظام‌های زراعی بر اساس مبانی مختلف و اهمیت پژوهشی آن‌ها

مبنای طبقه‌بندی	انواع نظام‌ها و توضیح مختصر	اهمیت پژوهشی
بر اساس اندازه مزارع	اشتراکی: مدیریت جمعی مزارع و منابع تولید. غیراشتراکی: مدیریت مستقل و انفرادی (شامل: مزارع کوچک و بزرگ مقیاس).	تفاوت در مقیاس، بر انتخاب روش تحقیق (ایستگاهی یا در مزرعه)، طراحی آماری (اندازه کرت) و قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج تأثیر گذار است.
بر اساس نسبت نهاده‌ها	فشرده ^۱ : حداکثر بازدهی با نهاده (آب، کود، انرژی) زیاد در واحد سطح. گسترده ^۲ : حداقل نهاده در زمین‌های وسیع.	محور اصلی در ارزیابی پایداری. پژوهش‌ها اغلب به دنبال مقایسه کارایی مصرف نهاده‌ها در این دو نظام هستند.
بر اساس تنوع تولید	تخصصی: بیش از ۵۰ درصد درآمد از یک محصول (مثال: کشت و صنعت نیشکر). متنوع: کشت ترکیبی و تناوبی محصولات (مثال: شرکت شهید رجایی دزفول).	تنوع، خود یک تیمار کلیدی در پژوهش‌های پایداری است. این طبقه‌بندی برای ارزیابی تاب‌آوری ^۳ اقتصادی و اکولوژیک اهمیت دارد.
بر اساس تأمین آب	آبی: تولید وابسته به آبیاری. دیم: تولید متکی به بارش‌های طبیعی.	در پژوهش‌های ایران، این تفکیک به دلیل بحران آب، حیاتی است. روش تحقیق باید برای سنجش دقیق بهره‌وری آب بهینه شود.
بر اساس نوع تناوب	کشت-آیش: استراحت زمین برای احیای حاصلخیزی. غله-مرتع ^۴ : تناوب غلات با بقولات علوفه‌ای (مانند یونجه یکساله). تناوب متنوع: چرخش برنامه‌ریزی شده گیاهان زراعی مختلف. گیاهان چندساله: کشت یک گونه برای چند سال متوالی (مثال: نیشکر یا یونجه).	تناوب، هسته مرکزی پژوهش‌های نظام‌های زراعی است.

1. Intensive
2. Extensive
3. Resilience
4. Ley farming

ادامه جدول ۱-۱

مبنای طبقه‌بندی	انواع نظام‌ها و توضیح مختصر	اهمیت پژوهشی
بر اساس شاخص شدت تناوب ^۱	پایین (کمتر از ۳۰ درصد): کشت موقت و رهاسازی طولانی (کشاورزی نوبتی).	شاخصی کلیدی برای ارزیابی فشار بر منابع خاک و پایداری بلندمدت سیستم. در پژوهش‌ها برای سنجش سلامت خاک استفاده می‌شود.
	متوسط (۳۰-۵۰ درصد): یک سال کشت و یک سال آیش (مانند گندم-آیش).	
	بالا (بیش از ۵۰ درصد): کشت هر ساله زمین.	
	بسیار بالا (بیش از ۱۰۰ درصد): کشت متوالی یا مخلوط در یک سال.	
بر اساس محصول تولیدی	غذای انسان: تولید مستقیم غلات، حبوبات، سبزیجات و غیره.	تحلیل‌های اقتصادی به این طبقه‌بندی وابسته است.
	خوراک دام: تولید تخصصی علوفه (مانند یونجه، ذرت علوفه‌ای و غیره).	
	تلفیقی: تولید همزمان غذای انسان و دام.	
بر اساس درجه تجاری‌سازی	معیشتی (غیرتجاری): تولید صرفاً برای تأمین نیاز خانوار.	اهداف پژوهش بر اساس این طبقه‌بندی کاملاً متفاوت خواهد بود (برای مثال افزایش عملکرد در نظام تجاری، در مقابل کاهش ریسک در نظام معیشتی).
	نیمه‌تجاری: بخشی برای مصرف و بخشی برای فروش محلی.	
	تجاری: تولید کاملاً بازارمحور (کشت و صنعت‌ها).	

برخی از مهم‌ترین نظام‌های زراعی که توسط محققان کشاورزی، سیاست‌گذاران و کشاورزان مورد استفاده قرار می‌گیرند، به شرح زیر تعریف می‌شوند:

1. Rotational intensity index

این شاخص معیاری کمی برای ارزیابی شدت بهره‌برداری از زمین است که درصد استفاده از آن را در یک چرخه تناوب نشان می‌دهد. این شاخص از طریق رابطه: $\left[\frac{\text{تعداد کل محصولات کشت شده در چرخه تناوب}}{\text{تعداد کل سال‌های چرخه تناوب}} \right] \times 100$ محاسبه می‌شود. به عنوان مثال، در تناوب ۳ ساله گندم-یونجه-آیش (۲ سال کشت)، شاخص شدت تناوب ۶۶/۷ درصد است. شاخص‌های بالاتر بیانگر استفاده فشرده‌تر از زمین و مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده دوره‌های آیش طولانی‌تر هستند.

• **کشاورزی متداول^۱ (فشرده^۲):** نظامی تولیدی مبتنی بر تک کشتی و مکانیزاسیون بالا که با هدف دستیابی به حداکثر عملکرد، از نهاده‌های شیمیایی (کود و آفت کش) و منابع آب و انرژی به صورت فشرده استفاده می‌کند. اگرچه این نظام بازدهی کمی بالایی دارد، اما با چالش‌های جدی نظیر آلودگی محیط‌زیست، کاهش حاصلخیزی خاک در بلندمدت و وابستگی شدید به نهاده‌های خارجی مواجه است (Tilman et al., 2002).

• **کشاورزی معیشتی^۳:** یک نظام تولیدی کم‌نهاده و در مقیاس کوچک است که در آن کشاورزان با استفاده از دانش بومی و روش‌های سنتی، محصولات متنوعی را عمدتاً برای تأمین نیاز غذایی خانواده کشت می‌کنند. مزایای آن شامل پایداری بالا، وابستگی کم به بازار و حفظ تنوع زیستی است؛ در مقابل، بازدهی پایین و آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی از محدودیت‌های اصلی آن محسوب می‌شود. این نظام نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی خانوارهای روستایی در کشورهای در حال توسعه دارد (Fernando et al., 2021).

• **کشاورزی حفاظتی^۴:** کشاورزی حفاظتی نظامی تولیدی است که با تلفیق اصول پایداری محیطی و بهره‌وری اقتصادی طراحی شده است. این روش بر سه پایه اصلی استوار است که در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است:



شکل ۱-۱. سه اصل اساسی کشاورزی حفاظتی. برگرفته از (FAO (2024).

1. Conventional farming
2. Intensive farming
3. Subsistence farming
4. Conservation farming

• **کشاورزی کم‌نهاده^۱ و پرنهاده^۲:** در نظام زراعی کم‌نهاده، استفاده از منابع خارج از مزرعه مانند مواد شیمیایی (سموم، کودها و غیره)، سوخت و آب به حداقل می‌رسد. در این سیستم تلاش می‌شود چرخه‌های مواد غذایی و انرژی تا حد امکان بسته باشند و از منابع داخلی مزرعه شامل کنترل بیولوژیک آفات، انرژی خورشیدی یا بادی، نیتروژن حاصل از تثبیت زیستی، مواد مغذی کودهای سبز، آلی یا ذخایر خاک برای تولید استفاده شود (Gliessman, 2018). کشاورزی پرنهاده ویژگی‌هایی متضاد با کشاورزی کم‌نهاده دارد. شکل ۱-۲ مهم‌ترین ویژگی‌های هر یک از این نظام‌های زراعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲. مقایسه نظام‌های کشاورزی کم‌نهاده و پرنهاده. شکل از نویسنده.

• **کشاورزی تلفیقی^۳:** در این نظام کشاورزی، از ترکیب روش‌های تولید مرسوم و ارگانیک استفاده می‌شود تا توازن بین عملکرد کمی و کیفی محصول و صرفه‌ی اقتصادی ایجاد شود (Muhie, 2022). برای مثال، در این سیستم، حاصلخیزی خاک از طریق کمپوست، کودهای سبز و مواد آلی بهبود می‌یابد؛ اما در عین حال، در موارد

1. Reduced- or low-input farming
2. Hight input farming
3. Integrated farming

ضروری از کودهای شیمیایی و سموم نیز برای بهبود تولید، کنترل آفات و بیماری‌ها بهره گرفته می‌شود.

• **نظام تولید دام جایگزین^۱:** در این روش تولید، برخلاف نظام‌های رایج در دامپروری صنعتی، اساس تولید بر پایه چرای دام در مراتع طبیعی استوار است (Bernués et al., 2011). نمونه بارز این شیوه در ایران، الگوی چرای چرخشی عشایر بختیاری است که در آن از دوره‌های چرای فشرده کوتاه‌مدت همراه با دوره‌های استراحت طولانی‌مدت استفاده می‌شود تا امکان بازسازی و احیای مراتع فراهم گردد.

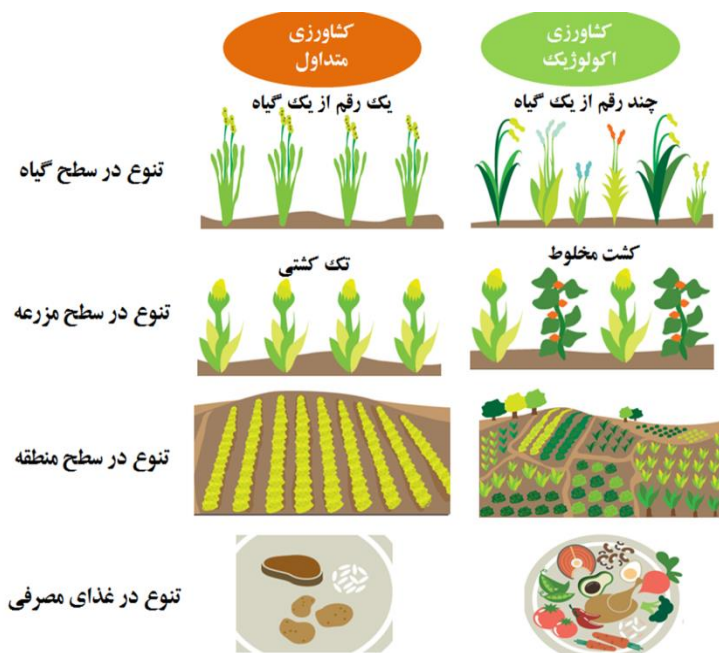
• **نظام تولید تلفیقی محصول و دام^۲:** در این روش، بخش عمده‌ای از خوراک دام در زمین‌های زراعی یا مراتعی تولید می‌شود که در مالکیت یا تحت مدیریت مستقیم دامدار قرار دارد. این نظام تولیدی از سازوکارهای حمایتی سازمان‌های دولتی و خصوصی کشاورزی بهره می‌برد تا دامداران را در برابر نوسانات قیمت بازار نهاده‌ها و خوراک دام بیمه کند (Thornton and Herrero, 2015).

• **کشاورزی ارگانیک^۳:** نظامی تولیدی که در آن استفاده از هرگونه نهاده مصنوعی (مانند کودهای شیمیایی، سموم، هورمون‌ها یا دستکاری‌های ژنتیکی) ممنوع است. تولید در این نظام، صرفاً بر پایه نهاده‌های طبیعی (نظیر کودهای زیستی، کمپوست و حشرات مفید) و اصول اکولوژیک استوار می‌باشد. محصولات این نظام که کشاورزی بیولوژیک نیز نامیده می‌شود، ملزم به اخذ گواهی استاندارد ارگانیک هستند (Dhaliwal et al., 2021).

• **کشاورزی اکولوژیک^۴:** این نظام تولیدی بر پایه اصول اکولوژیک استوار است که شامل مدیریت زیستی آفات، حفظ چرخه مواد مغذی، استفاده پایدار از منابع طبیعی، بهبود

-
1. Alternative livestock production systems
 2. Integrated crop–livestock farming systems
 3. Organic farming
 4. Ecological farming

کیفیت خاک و حفاظت از منابع آب می‌باشد (Magdoff, 2007). در این سیستم، حفظ تنوع زیستی نقش محوری ایفا می‌کند (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳. مقایسه سطح تنوع زیستی در نظام‌های کشاورزی متداول و اکولوژیک. شکل از نویسنده.

• **کشاورزی دقیق^۱:** یک چارچوب مدیریتی پیشرفته مبتنی بر دانش و فناوری است که با تلفیق ابزارهایی نظیر سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنجش از راه دور و فناوری اعمال متغیر نهاده‌ها، به دنبال بهینه‌سازی عملکرد اقتصادی از طریق مدیریت کارآمد نهاده‌ها و افزایش بهره‌وری عوامل تولید می‌باشد (Tendulkar, 2021).

علاوه بر این ده نظام تولیدی معرفی شده، که بر مجموعه‌های منحصربه‌فردی از شیوه‌ها، راهکارهای مدیریتی و در برخی موارد فلسفه‌ها تمرکز دارند، تعاریف دیگری نیز

از نظام‌های زراعی و عمدتاً بر پایه محصولات تولید شده وجود دارد. به عنوان مثال نظام زراعی ذرت-سویا در آمریکا و یا نظام زراعی گندم بنیان در ایران. در این کتاب، اصطلاح نظام زراعی به هر سامانه یکپارچه تولیدی اطلاق می‌شود که در آن تولید محصولات کشاورزی (غذا، خوراک دام، الیاف و منابع انرژی) صورت می‌پذیرد. این تعریف همچنین کلیه ابعاد اجتماعی، سیاسی و اقتصادی مرتبط با این سامانه‌های تولیدی را نیز در بر می‌گیرد.

۱-۲. مفاهیم و چهارچوب‌های نظام‌های زراعی

مفاهیم پیش‌رو با الهام از نظریه عمومی سیستم‌ها و اکوسیستم‌ها^۱، شالوده بوم‌شناسی کشاورزی^۲ را شکل داده‌اند و برای تحلیل نظام‌های زراعی و توسعه تحقیقات بین‌رشته‌ای ضروری هستند (Drinkwater, 2002, 2009).

• **نظام‌های زراعی با مرزهای مکانی و زمانی منحصر به فرد تعریف می‌شوند.** این مرزها را می‌توان به دو شیوه اصلی تعیین نمود: الف) مرزهای فیزیکی ثابت: در مقیاس‌های محدود (مانند یک مزرعه خاص) و بازه‌های زمانی معین، این مرزها کاملاً مشخص هستند؛ برای مثال، محدوده فیزیکی یک واحد تولیدی را می‌توان با مختصات جغرافیایی دقیق تعیین کرد. ب) مرزهای توصیفی پویا: در سطوح کلان‌تر، تعریف نظام‌ها نیازمند استفاده از مرزهای توصیفی^۳ است. این رویکرد، عوامل فرهنگی-اجتماعی مؤثر بر تولید (از جمله باورها و سنت‌های جامعه روستایی، دانش بومی، الگوهای تصمیم‌گیری محلی و روابط اجتماعی) را در بر می‌گیرد. در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، تعیین مرزهای مکانی و زمانی تابع اهداف تحقیق، ساختار محیط‌زیست، مؤلفه‌های اجتماعی-اقتصادی و تصمیمات مدیریتی (دولت یا کشاورز) است. از این‌رو، پس از طرح پرسش‌های تحقیق،

1. General systems theory and ecosystems

2. Agroecology

3. Descriptive boundaries

نخستین گام عملیاتی، شناسایی مرزهایی است که با مسئله مورد بررسی همسو باشند (Shreck et al., 2006). برای نمونه، در پژوهش‌های حوزه آبخیز، طراحی مطالعه کاملاً به هدف وابسته است. به عنوان مثال برای بررسی تأثیر روش کشت بر عملکرد، آزمایشی کوتاه‌مدت (یک تا دو سال) کفایت می‌کند؛ حال آنکه مطالعه دینامیک عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک، نیازمند پایش بلندمدت (چندساله) است. این تمایز زمانی، مشابه تفاوت میان مطالعات مزرعه‌ای و منطقه‌ای در بُعد مکانی است.

• **یک نظام زراعی از زیر واحدها و اثرات متقابل آنها تشکیل شده است.** در یک نظام زراعی زیر واحدها می‌توانند به صورت سلسله مراتبی (مدل تو در تو یا درختی) یا غیرسلسله مراتبی با هم تعامل داشته باشند. در اکوسیستم‌ها به صورت عام و در نظام‌های زراعی به صورت خاص، تعامل واحدها و زیر واحدهای تشکیل دهنده به صورت سلسله مراتبی از اهمیت بیشتری برخوردار است (Kolasa, 2006). سامانه‌های کشاورزی از زیرواحدهای منحصربه‌فردی تشکیل شده‌اند که هم می‌توانند در قالب سلسله مراتب تو در تو (از مزارع کوچک تا نظام زراعی شهرستان) سازمان یابند و هم روابط غیرسلسله‌مراتبی داشته باشند. در الگوی دوم، مانند مورد واحدهای دامپروری-زراعی، زیرواحدها از طریق روابط متقابل (تأمین خوراک و کود) به هم پیوند می‌خورند که ماهیتی افقی دارد.

• **فرآیندهای رخ داده در نظام زراعی در مقیاس‌ها و نرخ‌های متفاوتی روی می‌دهند.** همان‌گونه که هر سامانه به مرزهای زمانی و مکانی مشخصی محدود می‌شود، فرآیندهای درون آن نیز دارای گستره‌های مکانی و زمانی با مقادیر متفاوتی هستند. برای نمونه، فرآیندی مانند چرخه عناصر غذایی می‌تواند در مقیاس‌های گوناگونی جریان یابد: از چند میلی گرم در محیط ریزوسفر (محیط ریشه) تا چند گرم در سطح یک گیاه کامل، و از یک مزرعه منفرد تا مقیاس یک مجموعه کشاورزی (شامل چندین مزرعه مستقل) (Strock et al., 2005). به همین ترتیب، فرآیندهای وابسته به زمان می‌توانند از مقیاس زمانی چند دقیقه تا چند قرن متغیر باشند. برای نمونه، تغییر در فراهمی نیتروژن خاک یا نوسانات جمعیت آفات در نتیجه‌ی تعادل شکارگر-طعمه ممکن است در طول یک فصل

رشد اتفاق افتد. در مقابل، تغییرات محسوس در مواد آلی پایدار خاک یا بروز مقاومت علف‌های هرز به علفکش‌ها ممکن است به سال‌ها یا حتی دهه‌ها زمان برای ظهور نیاز داشته باشد. حتی تشکیل یک سانتیمتر مکعب از خاک زراعی می‌تواند فرآیندی چندصدساله باشد. از آنجا که فرآیندهای مختلف یک سامانه به صورت همزمان به حالت پایدار پویا^۱ نمی‌رسند، در برنامه‌ریزی پژوهش‌ها باید چارچوب‌های زمانی متمایز این فرآیندها را مد نظر قرار داد. این ملاحظه به ویژه هنگام انتقال از یک نظام زراعی به نظامی دیگر، یا تغییر از یک شیوه مدیریتی (مانند کنترل فیزیکی علف‌های هرز) به شیوه‌ای دیگر (مثل کنترل شیمیایی علف‌های هرز) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که اثرات به ارث رسیده (اثرات موروثی)^۲ از نظام یا روش مدیریتی پیشین ممکن است با روش‌های جدید اعمال شده در سامانه وارد تعامل یا اثرات متقابل شوند.

• **عملکرد نظام زراعی تابعی از ساختار آن است.** در اکوسیستم‌های کشاورزی، ویژگی‌های ساختاری (مانند نوع خاک، شرایط اقلیمی، تنوع زیستی و شیوه‌های مدیریت) بر خصوصیات عملکردی از قبیل میزان محصول، حفظ نیتروژن، انتشار گازهای گلخانه‌ای و

1. Dynamic steady-state conditions

مفهوم کلیدی حالت پایدار پویا، وضعیتی را توصیف می‌کند که در آن، علی‌رغم جریان و تبادل مستمر مواد و انرژی (مانند فرآیندهای همزمان تجزیه ماده آلی و افزودن کود)، ویژگی‌های کلی و ساختاری سیستم (مانند میانگین کل ماده آلی خاک) در بلندمدت حول یک نقطه تعادل، ثابت باقی می‌ماند (Francis et al., 2003). به بیان دقیق‌تر، این وضعیت نه یک سکون ایستا و عاری از تحول، بلکه یک تعادل پویا است که در آن، علی‌رغم جریان مداوم مواد و انرژی، نرخ ورودی‌ها با نرخ خروجی‌ها به برابری رسیده است.

2. Legacy effects

اثرات موروثی به پیامدهای ماندگار مدیریت‌های پیشین (نظیر خاک‌ورزی یا تناوب) بر ویژگی‌های کنونی خاک و اکوسیستم اشاره دارد که می‌تواند نتایج تیمارهای جدید را تحت الشعاع قرار دهد. برای نمونه، گزارش شده است که جایگزینی آیش با گیاهان پوششی، مدت‌ها پیش از آنکه تغییری در کربن آلی کل ایجاد کند، بر جامعه تجزیه‌کننده‌های خاک تأثیر می‌گذارد (Simon et al., 2022).

همچنین ویژگی‌های مفهومی مانند پایداری^۱ و انعطاف‌پذیری^۲ تأثیر مستقیم دارند (Walters et al., 2016). این رابطه دوسویه بین ساختار و عملکرد، چارچوبی ارزشمند برای طراحی نظام‌های زراعی به منظور بهینه‌سازی ویژگی‌های خاص یا درک تفاوت‌های بین نظام‌های زراعی مختلف فراهم می‌سازد. برای مثال، در اکوسیستم‌های طبیعی، تنوع زیستی بالاتر معمولاً با افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری سیستم همراه است (Jackson et al., 2007). بر این اساس، مدیریت و ارتقای تنوع گونه‌ای می‌تواند به عنوان راهبردی کلیدی در تحقق نظام‌های زراعی پایدار مورد توجه قرار گیرد.

• **نظام‌های زراعی، سامانه‌هایی باز محسوب می‌شوند.** این ویژگی بیانگر آن است که سامانه‌های زراعی همواره در حال تبادل انرژی، عناصر غذایی، موجودات زنده و اطلاعات با محیط پیرامون خود هستند (Gliessman, 2014, 2018). از این‌رو، کمی‌سازی جریان‌های درون سامانه‌ای و برون سامانه‌ای - شامل انتقال عناصر غذایی، محاسبه موازنه جرم و تحلیل چرخه عمر - برای درک جامع عملکرد و اثرات این سامانه‌ها از اهمیت حیاتی برخوردار است. به عنوان نمونه، سنجش دقیق جریان عناصر غذایی در یک نظام زراعی، پیش‌نیاز اساسی برای ارزیابی تأثیر روش‌های مدیریتی بر حاصلخیزی پایدار خاک محسوب می‌شود.

• **ویژگی‌های نوظهور^۳.** هر یک از نظام‌های زراعی دارای ویژگی‌های نوظهوری هستند که صرفاً در سطوح بالای سازمان‌دهی سامانه پدیدار می‌شوند؛ از این‌رو، بررسی مجزای اجزا یا زیرواحدها، امکان شناسایی و درک کامل آن‌ها را فراهم نمی‌سازد (Lengnick, 2015). در نظام‌های زراعی، کیفیت خاک نمونه‌ای بارز از این ویژگی‌هاست، زیرا برآیند برهم‌کنش‌های پویای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی در محیط خاک می‌باشد (Carter et al., 2004). به همین ترتیب، پایداری سامانه تولید نیز از جمله

1. Sustainability

2. Flexibility

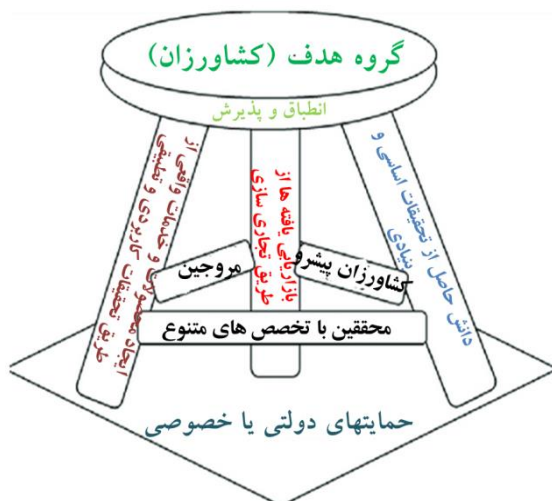
3. Emergent properties

این خصوصیات ویژه محسوب می‌شود که حاصل تعاملات پیچیده و اثرات متقابل عناصر متعدد درون سامانه‌ای است (Chase and Grubinger, 2014).

۱-۳. پیوند پژوهش و اجرا در نظام‌های زراعی

با شناخت ماهیت پیچیده و چندبعدی نظام‌های زراعی، این پرسش کلیدی مطرح می‌شود که فرآیند تولید دانش در این سیستم‌ها چگونه باید سازماندهی شود تا به تغییر واقعی در مزرعه منجر گردد؟ برخلاف پژوهش‌های کلاسیک که ممکن است صرفاً بر تولید دانش متمرکز باشند، در نظام‌های زراعی هدف نهایی نوآوری پایدار است. برای دستیابی به این هدف، نمی‌توان به یک نوع پژوهش اکتفا کرد، بلکه هماهنگی میان سه حوزه پژوهشی ضروری است که به مدل سه‌پایه نوآوری^۱ شهرت دارد (Blackswan, 2010) (شکل ۴-۱). این سه پایه عبارتند از: (۱) تحقیقات بنیادی (تولید دانش پایه)، (۲) تحقیقات کاربردی و تطبیقی (تبدیل دانش به راهکار عملی)، و (۳) ترویج و تجاری‌سازی (انتقال و اشاعه یافته‌ها به بهره‌برداران). برای تأثیرگذاری واقعی، هر سه پایه باید به صورت متوازن توسعه یافته و در نهایت از طریق همکاری محققان، مروجان و کشاورزان پیشرو، به گروه هدف (کشاورزان) متصل شوند. موفقیت این فرآیند مستلزم آن است که نوآوری نهایی، قابلیت تکرارپذیری با هزینه معقول داشته و نیاز مشخصی را برآورده سازد. این امر نیازمند سرمایه‌گذاری کافی و توجه به داده‌های متنوع (فراتر از نتایج صرفاً تحقیقاتی) مانند شرایط محیطی و سیاست‌های جاری است. اگرچه بهره‌گیری از تمام انواع تحقیقات (بنیادی تا ترویجی) در این مسیر اجتناب‌ناپذیر است، اما کلیدی‌ترین عامل در خلق نوآوری مؤثر، شناخت دقیق نیازهای بهره‌برداران (کشاورزان) و تبدیل این دانش به اقدامات عملی می‌باشد.

1. The three-legged stool model



شکل ۱-۴. مدل سه پایه نوآوری در تحقیقات نظام‌های زراعی.
برگرفته از (Blackswan (2010 با اندکی تغییرات.

۴-۱. پژوهش‌های سامانه‌ای^۱ در نظام‌های زراعی

پژوهش‌های سامانه‌ای با هدف درک عملکرد نظام‌های پیچیده به عنوان یک کل، بر مطالعه تعاملات و اثرات متقابل بین اجزای تشکیل دهنده تمرکز دارند. این رویکرد در نظام‌های زراعی به دنبال شناخت روابط پویا بین اجزا و عملکرد یکپارچه سامانه است، در حالی که پژوهش‌های جزءنگر سنتی بر تجزیه و تحلیل مستقل اجزا تأکید می‌کنند (Shrestha and Clements, 2003). پژوهش کل‌نگر بر دو اصل استوار است: نخست آنکه سامانه‌های پیچیده با تعاملات غیرخطی و بازخوردهای خودتنظیم‌کننده مشخص می‌شوند، و دوم اینکه کل سامانه دارای ویژگی‌هایی فراتر از جمع ساده اجزای آن است. این نگرش در تضاد با مفروضات پژوهش‌های تقلیل‌گرایانه است که سامانه‌ها را قابل تجزیه به اجزای مستقل و توصیف از طریق جمع خطی می‌دانند (Wapner and Demick, 2000).

1. Systems research

در حالی که پژوهش‌های جزءنگر همواره بخش اصلی روش‌های تحقیق را تشکیل می‌دهند، تحقیقات سامانه‌ای به‌ویژه پژوهش‌های بین‌رشته‌ای^۱ ابزاری تکمیلی برای درک بهتر پیچیدگی‌های دنیای واقعی فراهم می‌آورند. این رویکرد بر روابط متقابل میان نظام‌های تولید و سامانه‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی مرتبط تأکید دارد. پیشینه تحقیقات نظام‌های زراعی به حدود ۲۰۰ سال پیش بازمی‌گردد؛ زمانی که نخستین مطالعات بلندمدت درباره تناوب زراعی در نظام‌های مختلف آغاز گردید (Collinson, 2000). در دهه‌های بعد، با گرایش پژوهش‌های زراعی به راهکارهای مدیریتی زودبازده مانند مصرف کودهای شیمیایی، علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها که نتایج آنها به‌راحتی در چارچوب پژوهش‌های جزءنگر قابل ارزیابی بود، توجه به پژوهش‌های کل‌نگر و بلندمدت نظام‌های زراعی کاهش یافت. اما در اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی، سازمان‌های بین‌المللی فعال در حوزه کشاورزی و توسعه روستایی به‌دلیل توانایی این رویکرد در غلبه بر محدودیت‌های تحقیقات مرسوم کشاورزی - که صرفاً بر افزایش تولید بدون توجه به پیامدهای محیطی و اجتماعی متمرکز بود - به پژوهش‌های نظام‌های زراعی علاقه‌مند شدند. این روند موجب نهادینه‌شدن چنین تحقیقاتی در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ در مراکز پژوهشی ملی و بین‌المللی سراسر جهان گردید (Baker and Norman, 1990). در ایالات متحده، توجه به تحقیقات نظام‌های زراعی در دهه ۱۹۸۰ عمدتاً تحت تأثیر جنبش کشاورزی پایدار شکل گرفت (Edwards, 1990). همزمان، بوم‌شناسان به توسعه نظریه‌هایی درباره اکوسیستم‌های کشاورزی^۲ پرداختند که در نهایت به ظهور چارچوب مفهومی جدیدی به نام آگرواکولوژی^۳ یا بوم‌شناسی کشاورزی انجامید. آگرواکولوژی با ارائه مبانی نظری مستحکم، سهم بسزایی در توسعه تفکر کل‌نگر در کشاورزی ایفا کرده

1. Interdisciplinary systems research

2. Agroecosystems

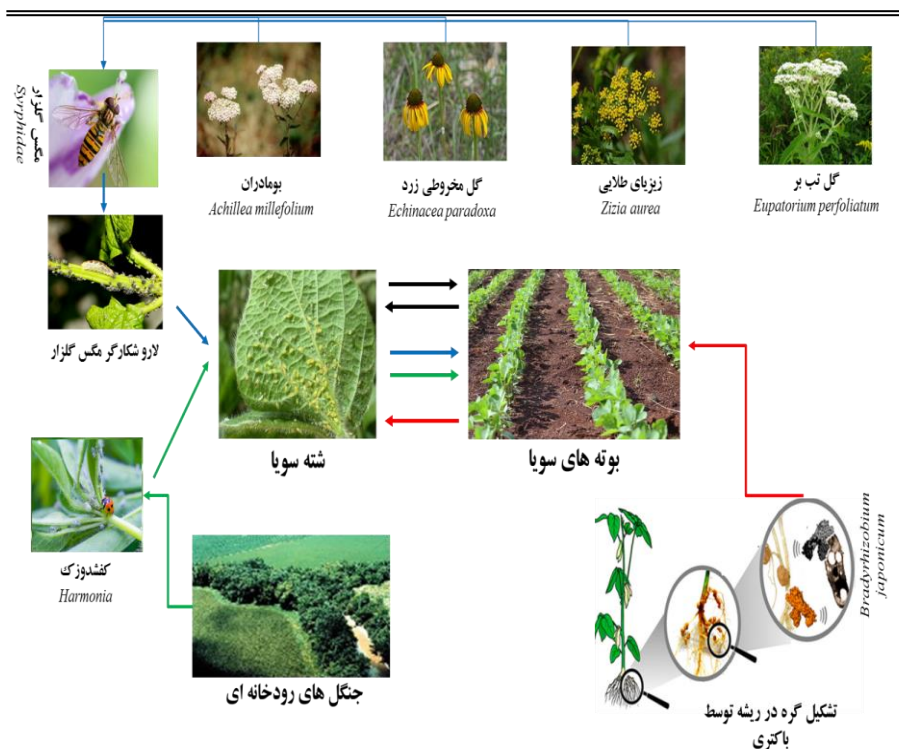
3. Agroecology

است (Gliessman, 2014). بسیاری از مبانی نظری مطرح شده در این کتاب نیز ریشه در مفاهیم آگرواکولوژی و پژوهش‌های مبتنی بر اکوسیستم‌های کشاورزی دارد.

۵-۱. گذار از جزءنگری به کل‌نگری

گذار از پژوهش جزءنگر به کل‌نگر، فرآیندی تحول‌آفرین است که مستلزم بازاندیشی در مبانی نظری، بازتعریف شیوه‌های عملیاتی و بازآرایی تیم‌های تحقیقاتی است. این دگرگونی مفهومی را می‌توان در سه محور اساسی ترسیم نمود:

• **بازاندیشی.** محققان باید از نگرش تک‌بعدی و روابط خطی علی، به دیدگاهی جامع‌نگر گذار کنند که کلیت سیستم و پیوندهای پویای آن را مدنظر قرار می‌دهد. گام نخست در این گذار، تدوین مدل مفهومی^۱ جامعی است که با ترسیم عناصر، تعاملات و بازخوردها، چارچوبی برای درک رفتار کل‌نگر سامانه فراهم می‌کند (Henriyadi et al., 2022). به عنوان نمونه، در مواجهه با طغیان شته سویا، رویکرد جزءنگر می‌پرسد: چگونه شته را کنترل کنیم؟ و بر آزمایش سموم متمرکز می‌شود. در مقابل، رویکرد کل‌نگر می‌پرسد: کدام فرآیندهای درون‌مزرعه‌ای، جمعیت شته را تنظیم می‌کنند؟. پاسخ به این سوال کل‌نگر، نیازمند ترسیم نقشه مفهومی مانند شکل ۱-۵ است که شبکه‌ای از عوامل اکولوژیک را نشان می‌دهد: مانند باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن که مقاومت گیاه را افزایش می‌دهند (Dean et al., 2009)، گیاهان بومی میزبان شکارگران طبیعی و حضور کفشدوزک‌ها (دشمن طبیعی) که در زیستگاه‌های مجاور زمستان‌گذرانی می‌کنند (Gardiner et al., 2009). این مدل مفهومی کل‌نگر، راهکارهای بهم‌پیوسته و جامع‌تری برای مدیریت تلفیقی آفات ارائه می‌دهد (Ragsdale et al., 2011).



شکل ۱-۵. مدل مفهومی کنترل شته سویا در پژوهش کل‌نگر. شکل از (Ragsdale et al. 2011).

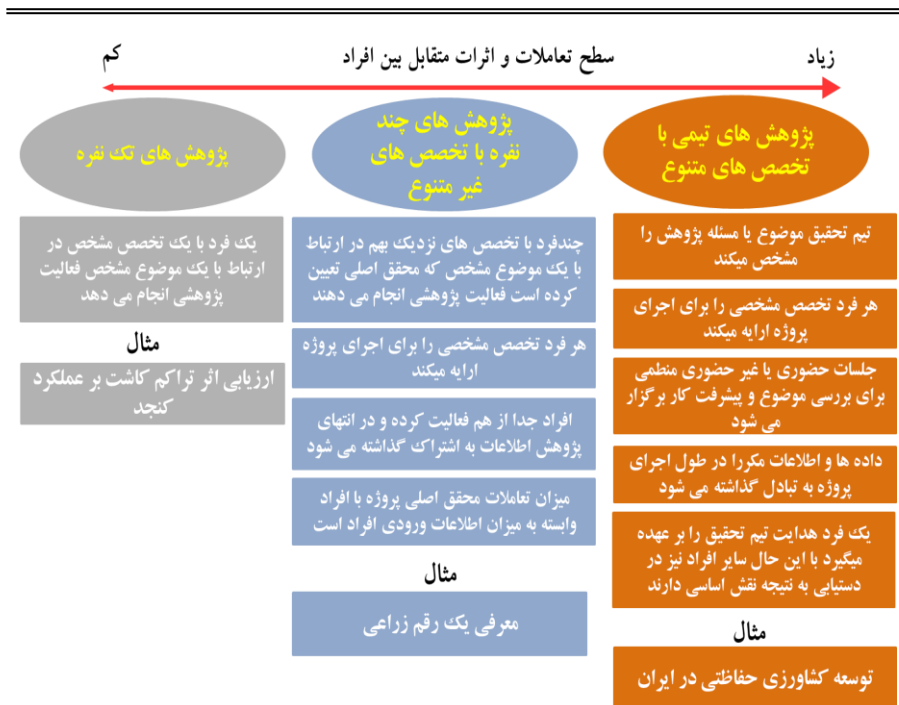
• **بازطراحی.** پژوهش‌های سامانه‌ای نیازمند بازتعریف شیوه‌های عملیاتی در طراحی و ارزیابی آزمایش‌ها هستند. بازطراحی موفق باید بر یک روش‌شناسی تکرارپذیر^۱ استوار باشد که در آن سیستم‌های زراعی پیشنهادی، ابتدا بر اساس مدل‌های مفهومی یا شبیه‌سازی‌ها طراحی و سپس در شرایط میدانی به صورت تکرارشونده ارزیابی و اصلاح می‌شوند (Debaeke et al., 2009). این بازطراحی باید در ابعاد زمانی و مکانی مناسب صورت پذیرد. از نظر زمانی، این فرآیند اغلب با استفاده از چارچوب‌هایی مانند مدل سه افق^۲ اجرا می‌شود که شامل بهینه‌سازی سیستم فعلی، گذار به سیستم‌های میانی و تحول

1. Iterative methodology

2. Three horizons model

بنیادی و ایجاد سیستم‌های نوین می‌باشد (Sharpe et al., 2016). در این بازطراحی، تمرکز پژوهش باید از اهداف تک‌بعدی (مانند حداکثرسازی عملکرد) فراتر رفته و به سمت ارزیابی جامع پایداری هدایت شود. ارزیابی نهایی سیستم‌های بازطراحی شده باید در مقیاس مزرعه‌ای یا ناحیه‌ای انجام شده و سنجش همزمان شاخص‌های اکولوژیک (مانند کیفیت خاک، تنوع زیستی و کارایی مصرف نهاده)، اقتصادی (سودآوری و ریسک‌پذیری) و اجتماعی (مانند پذیرش کشاورز) را شامل شود.

• **بازآرایی.** تحقق پژوهش‌های سامانه‌ای، مستلزم بازآرایی ساختار تیم‌های تحقیقاتی است. برخلاف پژوهش‌های جزءنگر تک‌رشته‌ای، مطالعات نظام‌های زراعی ماهیتی عمیقاً میان‌رشته‌ای^۱ دارند و نیازمند همکاری مستمر متخصصان مختلف (نظیر متخصصان زراعت و اصلاح نباتات، علوم خاک، آمار، اقتصاد، جامعه‌شناسی و ...) می‌باشند (شکل ۱-۶). موفقیت چنین تیم‌هایی در گرو ایجاد زبان مشترک، تعریف یکپارچه از اهداف پروژه و وجود رهبری توانمند است که می‌تواند بین تخصص‌های مختلف هم‌افزایی ایجاد کند. مدیریت مؤثر پروژه باید اطمینان حاصل کند که تخصص‌های متنوع در یک چارچوب مفهومی مشترک و تحت مدیریت زمانی و مالی کارآمد، به سوی یک راه حل نوآورانه حرکت کنند. تشکیل یک تیم میان‌رشته‌ای مؤثر، مستلزم ارزیابی دقیق شایستگی‌ها و ساختاردهی مناسب است. برای اطمینان از تشکیل تیمی کارآمد و جامع، پیشنهاد می‌شود در فاز برنامه‌ریزی پروژه، چک‌لیستی مطابق جدول ۱-۲ برای سازماندهی اعضای تیم تکمیل گردد.



شکل ۱-۶. مقایسه پژوهش‌های تک‌نفره جزءنگر با پژوهش‌های تیمی کل‌نگر. شکل از نویسنده.

جدول ۱-۲. چک‌لیست تشکیل و سازماندهی تیم پژوهشی سامانه‌ای

ملاحظات و کنترل نهایی	معیار سازماندهی
آیا تمام تخصص‌های علمی مورد نیاز برای پژوهش (مانند علوم گیاهی، خاک، اقتصاد، آمار و ...) پوشش داده شده‌اند؟	پوشش‌دهی تخصص‌های کلیدی
آیا رهبر تیم، مهارت‌های مدیریت پروژه قوی و دیدگاه کل‌نگر لازم برای همگرا کردن فعالیت‌های رشته‌های مختلف را دارد؟	رهبر دارای دیدگاه کل‌نگر
آیا تیم در مورد مدل مفهومی (مانند شکل ۱-۵) و اهداف نهایی پروژه به زبان و درک مشترکی رسیده‌اند؟	زبان و هدف مشترک
آیا همکاران میدانی، مروجان یا رابطان جامعه هدف (کشاورزان) برای اتصال نتایج به عمل، در تیم حضور دارند؟	حضور رابطان اجرایی و ترویجی
آیا تمامی اعضا، مشارکت در این پژوهش را فرصتی برای رشد حرفه‌ای و نه صرفاً وظیفه‌ای اضافی می‌دانند؟	تعهد به کار تیمی میان‌رشته‌ای

۱-۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل اول

فصل اول، چارچوب نظری و مفهومی لازم برای درک پژوهش‌های نظام‌های زراعی را تبیین کرد و با تعریف این نظام‌ها و طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس ابعاد مختلفی همچون اندازه، شدت نهاده و مقیاس زمانی و مکانی، زمینه‌ای برای شناخت ماهیت کل‌نگر آن‌ها فراهم آورد. در این فصل، نظام‌های زراعی به عنوان سامانه‌هایی باز و دارای ویژگی‌های نوظهور معرفی شدند که این ویژگی‌ها بر ضرورت طراحی آزمایش‌های بلندمدت و استفاده از روش‌های ارزیابی جامع تأکید دارند. همچنین، برای دستیابی به نوآوری پایدار، مدل هماهنگی سه‌گانه تحقیقات (بنیادی، کاربردی و ترویجی) و لزوم اتصال آن به بهره‌برداران تشریح گردید. هسته اصلی تحول در روش‌شناسی پژوهش کشاورزی، گذار از رویکرد جزءنگری به کل‌نگری یا پژوهش سامانه‌ای است که این گذار در سه محور اساسی شامل بازاندیشی (تغییر پارادایم از روابط خطی به تدوین مدل‌های مفهومی جامع)، بازطراحی (حرکت به سوی روش‌شناسی تکرارپذیر در توسعه سیستم‌های زراعی و ارزیابی چندبعدی پایداری) و بازآرایی (تشکیل تیم‌های تحقیقاتی میان‌رشته‌ای با رهبری توانمند برای همگرایی تخصص‌ها) خلاصه می‌شود. مفاهیم تبیین شده در این فصل، به‌ویژه در محور سه‌گانه نوآوری، به‌طور مستقیم مبنای فصول بعدی کتاب را تشکیل می‌دهند و زمینه را برای فصل دوم که بر چگونگی شکل‌دهی و مدیریت تیم‌های میان‌رشته‌ای متمرکز است، فراهم می‌سازند.

منابع

- Bailey, A., Meyer, L., Pettingell, N., Macie, M. & Korstad, J. (2020). Agricultural practices contributing to aquatic dead zones. In: Ecological and Practical Applications for Sustainable Agriculture. Bauddh, K., Kumar, S., Singh, R., Korstad, J. (eds). Springer, Singapore. 350 Pages.
- Baker, D. & Norman, D. (1990). The farming systems research and extension approach to small farmer development. In: Agroecology and Small Farm Development. Altieri, M. and Hecht, S. (eds). CRC Press: Boca Raton, FL. pp. 91–104.
- Bernués, A., Ruiz, R., Olaizola, A., Villalba, D., & Casasús, I. (2011). Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European Mediterranean context: Synergies and trade-offs. *Livestock Science*, 139(1-2), 44-57.
- Bezner Kerr, R., Blackie, M., Christinck, A., Conroy, C., Drinkwater, L. E., Jackson, L. E., Kanyama-Phiri, G., Lamboll, R., Morrone, V., Morton, J., Pound, B., Schipanski, M., Snapp, S., Stathers, T., Thorne, P., Tripp, R., Wellard, K. & Weltzien, E. (2017). *Agricultural Systems* (Second Edition). Academic Press. 550 Pages.
- Blackswan. 2010. The 3-Legged Stool of Innovation: Driving Innovation Success. Blackswan Whitepaper Series.
- Burch, K., Guthman, J. & Gugganig, M. (2023). Social science – STEM collaborations in agriculture, food and beyond: an STSFAN manifesto. *Agriculture and Human Values*, 40, 939-949.
- Carter, M.R., Andrews, S. & Drinkwater, L.E. (2004). Systems approaches for improving soil quality. In: Managing soil quality-challenges in modern agriculture. Schjonning, P., Christensen, B.T. and Elmholt, S. (eds). pp. 261–281. CAB International: Oxford, UK.
- Chase, L. & Grubinger, V. (2014). *Food, farms and community*. University of New Hampshire Press: Durham, NH.
- Collinson, T.G. M. (2000). A history of farming systems research. Wallingford, UK: CABI Publishing. pp. 432.
- Dean, J.M., Mescher, M.C. & Demoraes, C.M. (2009). Plant-rhizobia mutualism influences aphid abundance on soybean. *Plant and Soil*, 323(1), 187–196.
- Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J. M., Faloya, V., & Saulas, P. (2009). Iterative design and evaluation of rule-

- based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agronomy for sustainable development*, 29(1), 73-86.
- Dhaliwal, S.S, Sharma, V, Mandal, A, Krishna Naresh, R, & Verma, G. (2021). Improving soil micronutrient availability under organic farming. *Advances in Organic Farming*. Woodhead Publishing. 93-114.
- Drinkwater, L.E. (2002). Cropping systems research: reconsidering agricultural experimental approaches. *HortTechnology*, 12(3), 355–361.
- Drinkwater, L.E. (2009). Ecological knowledge: Foundation for sustainable organic agriculture. In: *Ecology in organic farming systems*. Francis, C.A. (eds). American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Edwards, C.A. (1990). *Sustainable agricultural systems*. CRC Press. 400 Pages.
- FAO. (2024). Conservation agriculture. Available online at: <http://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/what-is-conservation-agriculture/en/> (accessed August 2024).
- Fernando, A., Oteiza, F. & Rud, J.P. (2021). Climate change and agriculture: Subsistence farmers' response to extreme Heat. *American Economic Journal: Economic Policy*, 13(1), 1-35.
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., ... & Poincelot, R. (2003). Agroecology: The ecology of food systems. *Journal of sustainable agriculture*, 22(3), 99-118.
- Gardiner, M.M., Landis, D.A., Gratton, C., DiFonzo, C.D., O'Neal, M., Chacon, J. M., Wayo, M.T., Schmidt, N.P., Mueller, E.E. & Heimpel, G.E. (2009). Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the north-central USA. *Ecological Applications*, 19(1), 143-154.
- Gliessman, S.R. (2014). *The ecology of sustainable food systems*, Third Edition. CRC Press: Boca Raton, FL.
- Gliessman, S. (2018). Defining agroecology. *Agroecology and sustainable food systems*, 42(6), 599-600.
- Henriyadi, H., Esichaikul, V. & Anutariya, C. (2022). A conceptual model for development of small farm management information system: A case of indonesian smallholder chili farmers. *Agriculture*, 12(6), 866.
- Jackson, L., Pascual U. & Hodgkin, T. (2007). Utilizing and conserving agrobiodiversity in agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121, 196-210.

- Kolasa, J. (2006). A community ecology perspective on variability in complex systems: The effects of hierarchy and integration. *Ecological Complexity*, 3(1), 71-79.
- Lengnick, L. (2015). *Resilient agriculture*. New Society Publishers: Gabriola, BC. 265 Pages.
- Magdoff, F. (2007). Ecological agriculture: Principles, practices, and constraints1. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(2), 109-117.
- Muhie, S.H. (2022). Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100446.
- Nery, L.M., da Cunha e Silva, D.C. & Sabonaro, D.Z. (2024). Agriculture technology transfer: A multicriteria analysis for decision making. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 15515–15533.
- Ragsdale, D.W., Landis, D.A., Brodeur, J., Heimpel, G.E. & Desneux, N. (2011). Ecology and management of the soybean aphid in North America. *Annual review of entomology*, 56, 375-399.
- Rehman, A. A., & Alharthi, K. (2016). An introduction to research paradigms. *International journal of educational investigations*, 3(8), 51-59.
- Sharpe, B., Hodgson, A., Leicester, G., Lyon, A., & Fazey, I. (2016). Three horizons: a pathways practice for transformation. *Ecology and Society*, 21(2).
- Shreck, A., Getz, C. & Feenstra, G. (2006). Social sustainability, farm labor, and organic agriculture: Findings from an exploratory analysis. *Agronomy and Human Values*, 23, 439-449.
- Shrestha, A. & Clements, D.R. (2003). Emerging trends in cropping systems research. *Journal of Crop Production*, 8(1-2), 1-13.
- Simon, L.M., Obour, A.K., Holman, J.D. & Roozeboom, K.L. (2022). Long-term cover crop management effects on soil properties in dryland cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 328, 107852.
- Strock, J.S., Bruening, D., Apland J.D. & Mulla, D.J. (2005). Farm nutrient management practices in two geographically diverse watersheds in the cottonwood river watershed of Minnesota, USA. *Water Air and Soil Pollution*, 165, 211-231.
- Tendulkar, A. (2021). Introduction to precision agriculture: Overview, concepts, world interest, policy, and economics. In: *Precision agriculture technologies for food security and sustainability*. Sherine, M., El-Kader, A. and El-Basioni B.M.M (eds). IGI Global. pp. 1-22.

-
- Thornton, P. K., & Herrero, M. (2015). Adapting to climate change in the mixed crop and livestock farming systems in sub-Saharan Africa. *Nature Climate Change*, 5(9), 830-836.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- Walters, J.P., Archer, D.W., Sassenrath, G.F., Hendrickson, J.R., Hanson, J.D., Halloran, J.M., Vadas, P. & Alarcon, V.J. (2016). Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modeling. *Ecological Modelling*, 333, 51-65.
- Wapner, S. & Demick, J. (2000). Assumptions, methods, and research problems of the holistic, developmental, systems-oriented perspective. In: *Theoretical Perspectives in Environment-Behavior Research*. Wapner, S., Demick, J., Yamamoto, T., Minami, H. (eds). Springer, Boston, MA.
- WorldLink. (2024). Nourish Food System Map. Available at www.nourishlife.org.

فصل دوم

سازماندهی و همکاری در پژوهش‌های نظام‌های زراعی

گرد هم آمدن آغاز است، همراه ماندن پیشرفت است و همکاری کردن موفقیت
(هنری فورد)

با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش‌های نظام‌های زراعی، درک مزرعه (به‌عنوان محل تولید) در چارچوب یک سامانه پیچیده است، رویکردهای بین‌رشته‌ای عموماً کارآمدترین روش برای اجرای اینگونه پروژه‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، این رویکرد می‌تواند با چالش‌هایی همراه باشد؛ چراکه مشارکت‌کنندگان ناگزیرند به پرسش‌ها و مسائلی فراتر از حیطه تخصصی خود بپردازند. افزون بر این، همکاری با متخصصان رشته‌های دیگر نیز دشوار است، زیرا بسیاری از محققان به استقلال و کنترل بالا بر فرآیند پژوهش خود عادت دارند و عموماً با پژوهشگران حوزه‌های مشابه (مانند همکاری متخصصان به‌نژادی و به‌زراعی در معرفی ارقام جدید) تعامل می‌کنند و کمتر تجربه همکاری با متخصصان رشته‌های دورتر (مانند همکاری بین محققان به‌زراعی، بیماری‌شناسی گیاهی و اقتصاد کشاورزی) را دارند. از سوی دیگر، برخی پژوهشگران ممکن است اشتراک‌گذاری تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی و اطلاعات با اعضای

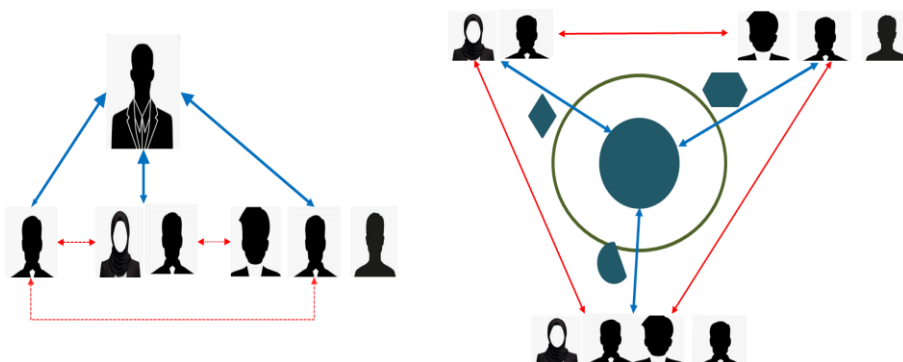
غیردانشگاهی تیم تحقیق (مانند کشاورزان، مصرف‌کنندگان یا برنامه‌ریزان بخش کشاورزی) را چالشی اساسی تلقی کنند. با وجود تمام این دشواری‌ها، کار تیمی و تصمیم‌گیری مشارکتی، سنگ بنای موفقیت در پژوهش‌های بین‌رشته‌ای مانند نظام‌های زراعی است. همان‌گونه که در فصل پیشین اشاره شد، سامان‌دهی تیم تحقیق یکی از ارکان اصلی پژوهش‌های کل‌نگر است که مستلزم بهره‌گیری از توانمندی‌های جمعی یک تیم متنوع برای پاسخگویی به پرسش‌های پژوهش است.

۱-۲. طراحی و توسعه تیم پژوهشی مشارکتی

در محیط‌های دانشگاهی و مؤسسات پژوهشی، گروه‌های تحقیقاتی معمولاً متشکل از محققانی با حوزه‌های تخصصی مرتبط هستند که تحت هدایت یک مدیر پروژه فعالیت می‌کنند. این ساختار که پس از پژوهش‌های فردی، رایج‌ترین شیوه تحقیقاتی در کشور محسوب می‌شود، نیاز کمتری به تعامل مستمر بین اعضا دارد و به محققان اجازه می‌دهد بر اساس روش‌های مرسوم خود به صورت موازی کار کنند و در پایان پروژه برای یکپارچه‌سازی نتایج گرد هم آیند. با این حال، این رویکرد اگرچه برای برخی پروژه‌ها مناسب است^۱، معمولاً به مدلی تقسیم‌بندی شده محدود می‌شود و باعث می‌گردد اعضا از درک تعاملات پیچیده در سامانه تولید باز بمانند. در مقابل، پژوهش‌های میان‌رشته‌ای مستلزم عملکرد یکپارچه تیم تحقیقاتی در تمام مراحل از طراحی تا اجرا و تحلیل است که منجر به درک جامع‌تری از سامانه مورد مطالعه می‌شود. این رویکرد با به‌کارگیری رهبری مشترک و تقویت فرهنگ کار تیمی، بستری برای گفت‌وگو آزاد، تصمیم‌گیری مشارکتی و هم‌بستگی متقابل در راستای تحقق اهداف مشترک ایجاد می‌کند (شکل ۱-۲).

۱. به عنوان مثال، در فرآیند معرفی یک رقم زراعی جدید، معمولاً یک متخصص به‌نژادگر به عنوان رهبر پروژه، همراه با تیمی از پژوهشگران حوزه‌های به‌نژادی و به‌زراعی، مراحل مختلف پژوهش و معرفی رقم را هدایت و اجرا می‌کنند.

با این حال یکی از چالش‌های اصلی این رویکرد نوین، مدیریت تضاد اولویت‌های رشته‌ای است. برای مثال، ممکن است یک اقتصاددان، سودآوری کوتاه‌مدت را اولویت بداند، در حالی که متخصص علوم خاک بر پایداری بلندمدت خاک (یک هدف بلندمدت) تمرکز دارد. خط‌مشی عملی برای حل این تعارض، بازگشت به مدل مفهومی (که در فصل اول تشریح شد) و اهداف مشترک پروژه است. تیم باید در همان ابتدا، شاخص‌های موفقیت چندبعدی را به صورت مکتوب تعریف کند که هم اهداف اقتصادی (مانند بازگشت سرمایه) و هم اهداف اکولوژیک (مانند افزایش ماده آلی خاک) را پوشش می‌دهد. در صورت بروز اختلاف، تصمیم‌گیری نهایی باید بر اساس این شاخص‌های مورد توافق جمعی (و نه بر اساس اولویت یک رشته خاص) اتخاذ شود.



شکل ۲-۱. مقایسه رویکرد سنتی (چپ) و نوین (راست) در سازماندهی تیم پژوهشی. رویکرد سنتی، سلسله‌مراتبی و متمرکز بر رهبر است و تبادل اطلاعات بین گروه‌های تخصصی محدود می‌باشد (پیکان‌های قرمز نقطه‌چین). در مقابل، رویکرد نوین مبتنی بر تعامل مستمر و پویا (پیکان‌های قرمز) بین تمام اعضای تیم است. در این الگو، هر گروه تخصصی (اشکال پیرامونی) با ارائه مدل فرضی خود، در شکل‌گیری یک چارچوب کلی و زبان مشترک (دایره مرکزی) مشارکت می‌کند.

۲-۲. رهبر پروژه در پژوهش‌های میان‌رشته‌ای

رهبران مؤثر، قلب تپنده پروژه‌های کل‌نگر هستند. وظیفه اصلی رهبر در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، صرفاً مدیریت اداری نیست، بلکه ایجاد همگرایی بین تخصص‌های مختلف است. این رهبران باید قادر به درک عمیق رویکردهای پژوهشی رشته‌های مختلف

باشند و با تسهیل گفتمان آزاد و تصمیم‌گیری مشارکتی، تیم را از مجموعه‌ای از متخصصان منفرد به یک واحد پژوهشی یکپارچه تبدیل کنند. این نقش، نیازمند ترکیبی از مهارت‌های مدیریتی پیشرفته، توانایی سازماندهی، انعطاف‌پذیری فکری و مهارت‌های ارتباطی قوی است (Lepore et al. 2023). رهبر پروژه با تمرکز مستمر بر پرسش‌های اصلی تحقیق، باید بتواند تعامل سازنده‌ای بین پژوهشگران و ذی‌نفعان غیرپژوهشی (مانند کشاورزان) ایجاد کند. شکل ۲-۲، مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی مورد نیاز برای یک رهبر تیم تحقیقاتی میان‌رشته‌ای را در پنج بُعد اصلی خلاصه می‌کند.



شکل ۲-۲. ویژگی‌های کلیدی رهبر تیم در پژوهش‌های نظام‌های زراعی.
برگرفته از Bertino and Shoja (2019) با اندکی تغییرات.

۲-۳. تشکیل هسته اصلی تیم پژوهشی

پس از انتخاب رهبر پروژه، گام حیاتی بعدی، شکل‌دهی به هسته مرکزی تیم است. با توجه به ماهیت چندوجهی و عملیاتی پژوهش‌های نظام‌های زراعی، موفقیت

پروژه در گرو ایجاد تعادل میان دانش نظری و توان اجرایی است. از این‌رو، هسته اصلی تیم نباید صرفاً به محققان پژوهشی محدود شود، بلکه باید ساختاری منسجم را ایجاد کند که در آن، تخصص‌های علمی و مهارت‌های میدانی به صورت مکمل عمل نمایند. بر این اساس، اعضای کلیدی تیم در دو گروه اصلی قابل طبقه‌بندی هستند که در ادامه به تشریح نقش و ویژگی‌های هر یک پرداخته می‌شود.

• **اعضای علمی و پژوهشی تیم:** ترکیب اعضای تیم پژوهشی نقشی تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پروژه‌های بین‌رشته‌ای دارد. فراتر از صرف گردآوری تخصص‌های مکمل، اعضای تیم باید از روحیه کار جمعی، انعطاف‌پذیری و اشتیاق برای یادگیری از حوزه‌های تخصصی دیگر برخوردار باشند. مدیریت هوشمندانه انتظارات اعضا و ایجاد حس تعلق خاطر، همسویی میان اهداف فردی و جمعی را تضمین می‌کند. همچنین، ترکیب متعادلی از پژوهشگران مجرب (برای دانش نظری) و جوان (برای نوآوری) می‌تواند به پویایی تیم کمک کرده و حمایت سایر اعضا از مسئولیت‌های یکدیگر، موفقیت جمعی را تضمین می‌نماید (Oh and Choi, 2020).

• **همکاران میدانی و اجرایی در پژوهش‌های نظام‌های زراعی:** در میان همکاران غیرپژوهشی تیم تحقیقاتی، کشاورزان به عنوان شرکای استراتژیک در پژوهش‌های نظام‌های زراعی جایگاه ویژه‌ای دارند. در انتخاب کشاورزان برای مشارکت در پروژه، معیارهایی همچون سابقه همکاری موفق با محققان، توجه به یافته‌های علمی و درک عمیق از سامانه‌های زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که این ویژگی‌ها عموماً در کشاورزان پیشرو به خوبی یافت می‌شود. تداوم حضور کشاورزان از مرحله طراحی تا اجرا و ارزیابی پروژه نیز از الزامات اساسی محسوب می‌شود. علاوه بر این، مشارکت فعال کارشناسان فنی مزارع، مروجان کشاورزی و نمایندگان سازمان‌های مرتبط (نظیر سازمان حفاظت محیط زیست) که آشنایی عملی با شرایط مزرعه دارند، می‌تواند ابعاد جدیدی به پژوهش ببخشد. با این حال گسترده‌گی مشارکت سایر ذی‌نفعان تابعی از تعریف سیستم

تولید و اهداف پروژه است (Turner et al., 2023). این افراد با ارائه دیدگاه‌های مکمل، هم در گردآوری داده‌ها و هم در تحلیل نتایج نقش مؤثری ایفا می‌کنند. همان‌گونه که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، ترکیب هوشمندانه این تخصص‌های متنوع در قالب یک تیم بین‌رشته‌ای، چارچوبی جامع برای پیشبرد پژوهش‌های کاربردی در حوزه نظام‌های زراعی ایجاد می‌کند.



شکل ۲-۳. ساختار تیم پژوهشی نظام‌های زراعی با ترکیب تخصص‌های بین‌رشته‌ای و ذی‌نفعان کلیدی. شکل از نویسنده.

۲-۴. تعامل پژوهشگران و کشاورزان در مطالعات نظام‌های زراعی

مشارکت فعال کشاورزان در پژوهش‌های نظام‌های زراعی از اهمیت راهبردی برخوردار است و طراحی سازوکارهای کارآمد برای تعامل میان جامعه بهره‌بردار و محققان از ضروریات این حوزه پژوهشی محسوب می‌شود. در این زمینه سه مدل اصلی تصمیم‌گیری و مدیریت پروژه‌های تحقیقاتی قابل تمایز است: علم‌محور، کشاورز‌محور و مشارکتی (Lilja and Ashby, 1999). در مدل علم‌محور که در تحقیقات مرسوم کاربرد گسترده‌ای دارد، هدایت پروژه کاملاً در اختیار محققان است و اولویت‌های پژوهشی آنان جهت‌گیری کلی تحقیق را تعیین می‌کند. در این الگو، اگرچه کشاورزان برای بازدید از

مزارع تحقیقاتی و ارائه نظرات دعوت می‌شوند، اما این تعامل در اکثر موارد به مراحل پایانی پروژه محدود می‌شود. مدل کشاورزمحور که در کشور ما چندان مورد توجه قرار نگرفته است، کشاورزان را در جایگاه تعیین‌کننده اهداف و اولویت‌های تحقیقاتی قرار می‌دهد و نقش محققان عمدتاً به ارائه راهکارهای فنی و روش‌شناختی محدود می‌شود. در مقابل، مدل مشارکتی که مناسب‌ترین روش برای پژوهش‌های نظام‌های زراعی به شمار می‌رود، مستلزم همکاری مستمر و تعامل دوسویه محققان و کشاورزان در تمام مراحل پژوهش است. در این الگو، طرفین به صورت مشترک در تدوین اهداف، اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری‌های پژوهشی مشارکت داشته و حضور فعال کشاورزان مجرب کمک می‌کند تا پروژه بازتاب‌دهنده واقعیت‌های نظام‌های تولید باشد (Turner et al., 2023). بهره‌گیری از رویدادهایی مانند روز مزرعه، کارگاه‌های آموزشی و نمایشگاه‌های تحقیقاتی که مورد استقبال جامعه کشاورزی قرار می‌گیرد، می‌تواند به عنوان نقطه آغاز مناسبی برای جلب مشارکت کشاورزان در پروژه‌های پژوهشی عمل کند. این تعاملات نه تنها زمینه‌ساز شناسایی مسائل و چالش‌های واقعی مزرعه می‌شود، بلکه به تدوین پرسش‌های پژوهشی کاربردی و هدفمند نیز یاری می‌رساند.

با این حال، باید توجه داشت که کشاورزان و سایر ذی‌نفعان غیرپژوهشی درگیر در مطالعات نظام‌های زراعی با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند که مدیریت کارآمد آنها نیازمند آمادگی حرفه‌ای تیم تحقیقاتی و توانمندی‌های رهبری است. برخلاف پژوهشگران که مشارکت در تحقیقات بخشی از مسئولیت‌های شغلی آنها محسوب می‌شود، برای کشاورزان و سایر همکاران غیرپژوهشی، این مشارکت مستلزم انگیزه‌بخشی و ایجاد ارزش افزوده است. از این رو، ضروری است پروژه به نتایج ملموس و کاربردی منجر شود که برای این گروه‌ها جذابیت و سودمندی داشته باشد. جبران هزینه‌های مشارکت، چه به صورت مستقیم (پرداخت‌های نقدی) و چه غیرمستقیم (منافع عملی و دانش فنی)، محرکی کلیدی برای ارتقای سطح همکاری محسوب می‌شود. در واقع، ایجاد

مشارکت‌های پایدار بین جامعه علمی و کشاورزان فرآیندی تدریجی است که مستلزم گفت‌وگوی مستمر، شکیبایی و تلاش مداوم است. بایستی با ایجاد اعتماد متقابل در طول اجرای پروژه، فضایی فراهم آورد تا این ارتباطات بر پایه دوستی، تبادل نظر و همکاری بلندمدت استوار گردد. این رویکرد نظام‌مند می‌تواند به توسعه روابط سودمند و متقابل بین کشاورزان و محققان منجر شود.

با این حال تفاوت در اولویت‌های تحقیقاتی میان پژوهشگران و کشاورزان امری متداول است که تیم پژوهشی باید با درایت کامل آن را مدیریت کند. در حالی که محققان عموماً به دنبال توسعه دانش پایه درباره عملکرد نظام‌های تولیدی هستند، کشاورزان بیشتر به حل مشکلات عملی و بهبود عملکرد مزرعه خود توجه دارند. این تفاوت‌های طبیعی، ضرورت توجه همزمان به هر دو دسته از اهداف را در طراحی برنامه تحقیقاتی ایجاب می‌کند. در پژوهش‌های مشارکتی نظام‌های زراعی، رابطه پژوهشگران و کشاورزان مبتنی بر اصل برابری و احترام متقابل است و هیچ‌گونه سلسله‌مراتبی بین آنها وجود ندارد. چالش‌های اجرایی از جمله محدودیت‌های تجهیزاتی و تفاوت در امکانات بین مزارع کشاورزان و ایستگاه‌های تحقیقاتی ممکن است باعث توقف یا تأخیر در پیشرفت پروژه شود. این تفاوت‌ها به ویژه در طراحی واحدهای آزمایشی که مستلزم مشارکت فعال کشاورزان در ارائه مزارع خود است، باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. از آنجا که برخلاف پژوهشگران، فعالیت‌های تحقیقاتی منبع اصلی درآمد کشاورزان محسوب نمی‌شود، جبران مناسب زمان و تخصصی که در پروژه سرمایه‌گذاری می‌کنند - چه به صورت مستقیم و چه غیرمستقیم - نه تنها اقدامی عادلانه، بلکه برای تضمین مشارکت مستمر آنان ضروری است (Douthwaite et al., 2017).

برای عملیاتی کردن مدل مشارکتی، صرفاً حضور کشاورز کافی نیست، بلکه باید از روش‌های دقیق مشارکتی استفاده کرد. اساس این همکاری، رعایت پروتکل‌های اخلاقی است. پژوهشگران موظفند قبل از شروع هرگونه جمع‌آوری داده، رضایت آگاهانه را به

صورت شفاف از کشاورز همکار دریافت کنند و اهداف، ریسک‌ها و نحوه استفاده از داده‌های مزرعه ایشان را به وضوح تشریح نمایند. در جنبه فنی نیز، می‌توان از روش‌هایی مانند نمونه‌برداری مشارکتی^۱ استفاده کرد که در آن، کشاورز در تصمیم‌گیری برای محل، زمان و روش نمونه‌برداری (مثلاً خاک یا آفات) مشارکت مستقیم دارد تا اطمینان حاصل شود که نمونه‌ها بازتاب‌دهنده واقعیت‌های مدیریتی مزرعه (و نه فقط یک کورت آزمایشی مشخص) هستند (Gonsalves, 2005).

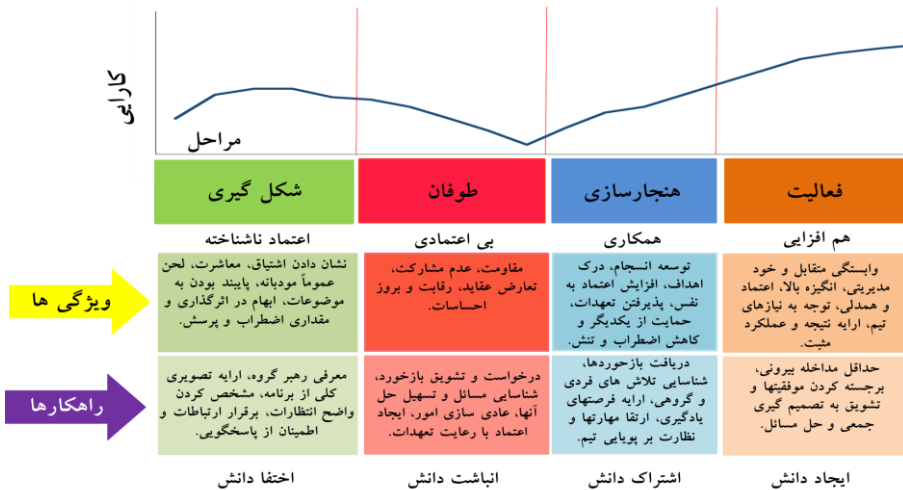
۲-۵. توسعه و ارتقای فرهنگ همکاری در پژوهش‌های نظام‌های زراعی

بر اساس دیدگاه پژوهشگران علوم اجتماعی، شکل‌گیری تیم‌های پژوهشی مؤثر، فرآیندی تدریجی است که از مراحل مشخصی عبور می‌کند (شکل ۲-۴). این فرآیند از شکل‌گیری^۲ (آشنایی اعضا)، عبور از چالش‌ها و تنش‌های طبیعی در مرحله طوفان^۳، رسیدن به هنجارسازی^۴ (تعریف اهداف و استانداردهای مشترک) و نهایتاً ورود به مرحله فعالیت و هم‌افزایی^۵ (اوج بلوغ و کارایی تیمی) تشکیل شده است (Miller, 2003; Jackson et al., 2014). گذار موفقیت‌آمیز از این مراحل، نیازمند مدیریت هوشمندانه و ایجاد فرهنگ همکاری است.

در ادامه، مجموعه‌ای از رهنمودها جهت ارتقای فرهنگ همکاری و تقویت کار تیمی در تحقیقات نظام‌های زراعی ارائه شده است:

گفتمان گروهی و تصمیم‌گیری مشارکتی: شروع سریع و بدون تأخیر گفت‌وگوهای صریح میان اعضای تیم درباره شیوه‌های کار جمعی و فرآیندهای

-
1. Participatory sampling
 2. Forming
 3. Storming
 4. Norming
 5. Performing



شکل ۲-۴. مراحل تکامل تیم تحقیقاتی بین‌رشته‌ای: از شکل‌گیری تا فعالیت.

برگرفته از (Miller 2003) با اندکی تغییرات.

تصمیم‌گیری اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مباحث باید تفاوت‌های رویکردهای متمرکز و مشارکتی به وضوح تبیین شود. بهره‌گیری از خرد جمعی در اتخاذ تصمیمات، کیفیت نتایج را ارتقا می‌بخشد.

رهبری تسهیل‌گر: هسته رهبری یا فرد سرپرست تیم باید با برخورداری از ویژگی‌های تسهیل‌گری، زمینه مشارکت فعال تمام اعضا و پذیرش مسئولیت‌های مشترک را فراهم آورد. این رویکرد موجب تقویت حس تعلق و تعهد در بین اعضای تیم می‌شود.

فرآیند یکپارچه‌سازی تیم: شروع فرآیند هماهنگ‌سازی اعضا از ابتدای پروژه و تلفیق جلسات رسمی با تعاملات غیررسمی، به ایجاد انسجام گروهی کمک شایانی می‌کند.

ایجاد زبان مشترک: تدوین تعاریف واحد و مورد توافق از مفاهیم کلیدی پروژه برای تمامی اعضا ضروری است. برای مثال، در خصوص نظام زراعی حفاظتی باید تعریفی جامع ارائه شود که کلیه اصول بنیادین آن را پوشش دهد و از تقلیل‌گرایی یا توجه صرف به بخشی از اصول، پرهیز گردد.

فرهنگ گفت‌وگوی آزاد: توسعه فضایی که در آن اعضا بتوانند بدون دغدغه، نظرات و انتقادات خود را مطرح کنند، از ارکان اساسی کار تیمی موفق است. دریافت و پاسخگویی سازنده به بازخوردهای اعضا نیز در این زمینه حائز اهمیت است.

ترکیب کار و تعاملات غیررسمی: ادغام فرآیندهای برنامه‌ریزی و تدوین پروپوزال با فعالیت‌های جمعی غیررسمی مانند وعده‌های غذایی مشترک، به تسریع تبدیل گروه به تیم منسجم کمک می‌کند.

مدیریت اطلاعات بین‌رشته‌ای: تعیین دقیق اطلاعاتی که باید بین رشته‌های مختلف مبادله شود و تهیه برنامه زمانی مشخص برای این تبادلات، موجب ارتقای ارتباطات و درک متقابل می‌گردد.

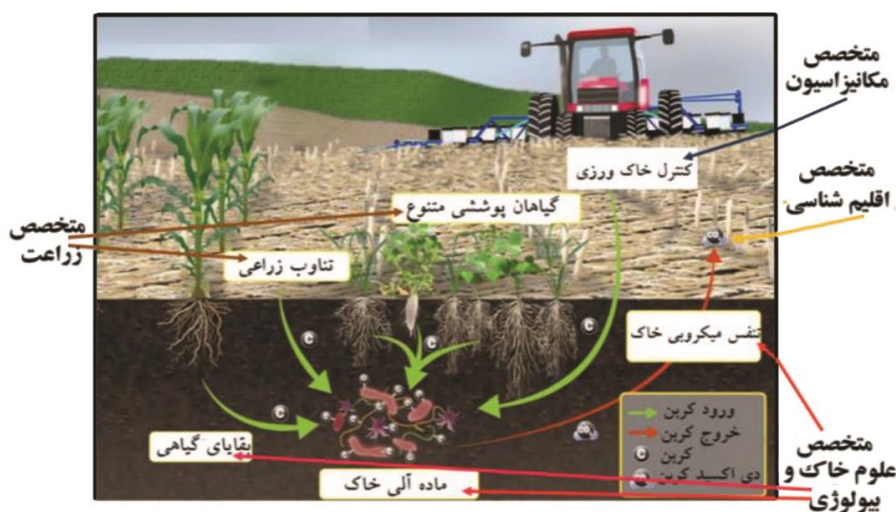
ادغام اعضای جدید: آشناسازی کامل اعضای تازه‌وارد با رویکردهای یکپارچه و شیوه‌های کار تیمی، از الزامات حفظ انسجام گروه است؛ بنابراین نباید پیش‌فرض را بر این گذاشت که افراد جدید به‌طور خودکار با اصول کار جمعی آشنایی دارند.

مدیریت خروج اعضا: طراحی راهبردهای مدون برای جایگزینی اعضای خارج‌شده و توزیع مسئولیت‌های آنان میان سایر اعضا، به حفظ پویایی و کارایی تیم کمک می‌کند. این فرآیند باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که اختلالی در روند پژوهشی ایجاد نکند.

۲-۶. استفاده از نقشه‌ها و مدل‌های مفهومی برای تسهیل درک پروژه توسط تیم

نقشه‌ها و مدل‌های مفهومی به‌عنوان ابزارهای تصویری، در پژوهش‌های بین‌رشته‌ای کاربرد ویژه‌ای داشته و با ارائه بازنمایی مشترک از مفاهیم، به درک متقابل دیدگاه‌های تخصصی اعضای تیم کمک می‌کنند (Tan et al., 2021). در پژوهش‌های پیچیده نظام‌های زراعی، نقشه‌های مفهومی با دو روش اصلی توسعه می‌یابند: (۱) روش تفکیکی-تجمیعی^۱ که در آن اعضا ابتدا نقشه‌های فردی طراحی کرده و سپس آن‌ها را تلفیق

می‌کنند، و ۲) روش مشارکتی یکپارچه^۱ که مبتنی بر طراحی جمعی نقشه از ابتدا است. هر دو این روش‌ها با تسهیل درک بین‌رشته‌ای، ابزارهای ارزشمندی برای ایجاد زبان مشترک در تیم‌های پژوهشی محسوب می‌شوند (Van den Bossche et al., 2011). نقشه‌های مفهومی را می‌توان در قالب‌های متنوعی از جمله سلسله جداول، شکل‌های گرافیکی، جداول زمانی، نمودارها و غیره نشان داد. به عنوان مثال، شکل ۲-۵ یک نقشه مفهومی گرافیکی ساده از چرخه کربن در یک نظام زراعی حفاظتی ارائه می‌کند. اینگونه مدل‌ها و نقشه‌های مفهومی به هریک از افراد تیم تحقیق (مانند پژوهشگران رشته‌های مختلف) کمک می‌کنند تا نقش خود را در فرآیندهای کلیدی به‌وضوح درک کنند. از این طریق با شناسایی نقاط تأثیرپذیر و راهکارهای ارتقای سیستم، مشارکت هدفمند و هماهنگ‌دی-نفعان برای بهینه‌سازی نظام زراعی ممکن می‌شود.

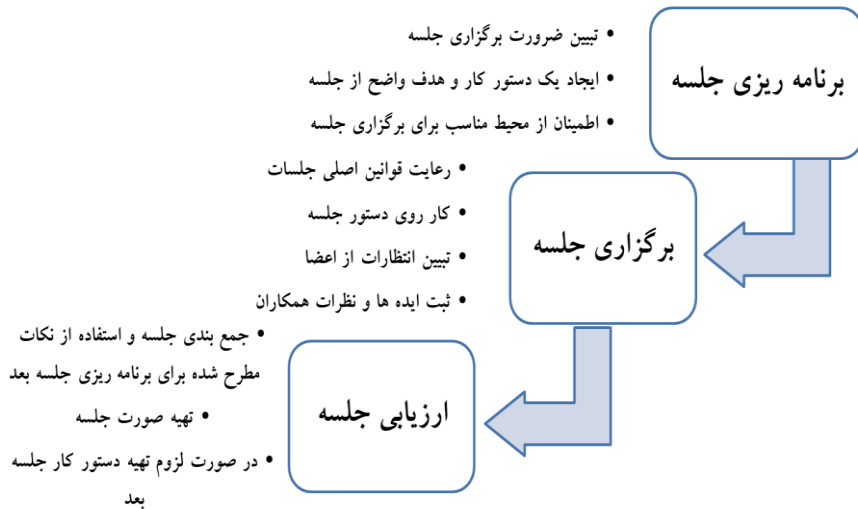


شکل ۲-۵. نقشه مفهومی ساده‌شده چرخه کربن در نظام زراعی حفاظتی که حوزه‌های تأثیرگذاری اعضای تیم تحقیق را در سیستم مشخص می‌کند. برگرفته از Freitag et al. (2024) با اندکی تغییرات.

1. Collaborative holistic approach

۲-۲. راهکارهای برنامه‌ریزی و اجرای جلسات مؤثر

فرآیند تصمیم‌گیری جمعی در تیم‌های بین‌رشته‌ای چالش‌برانگیز است. در حالی که معمولاً بر سر اهداف مشترک توافق وجود دارد، اغلب در مورد مسیرهای دستیابی به آن اهداف اختلاف نظر وجود دارد. این امر لزوم بهره‌گیری از خرد جمعی و سازوکارهای تصمیم‌گیری مشارکتی مؤثر را برای حصول توافق، آشکار می‌سازد. اهمیت جلسات مؤثر در پژوهش‌های نظام‌های زراعی به اندازه‌ای حیاتی است که تقریباً هیچ چیز به مانند برگزاری جلسات غیرضروری، طولانی و غیرکارآمد نمی‌تواند به سرعت روحیه همکاری را تضعیف نماید. در این راستا، طراحی جلسات پویا و هدفمند به عنوان عاملی کلیدی در موفقیت تیم‌های تحقیقاتی محسوب می‌شود. مراحل مختلف پروژه مستلزم رویکردهای متفاوتی در برگزاری جلسات است. به عنوان مثال در مرحله شکل‌گیری تیم، جلسات می‌بایست بر ایجاد شناخت متقابل و بسترسازی برای همکاری متمرکز باشند، در حالی که در مراحل بعدی، اولویت به برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های عملیاتی اختصاص می‌یابد. توجه به این نکته ضروری است که تعدد بی‌رویه جلسات یا طولانی‌شدن غیرمنطقی آنها می‌تواند به کاهش تدریجی مشارکت اعضا منجر شود. یک جلسه استاندارد می‌بایست دارای ساختار مشخصی شامل: (۱) اهداف واضح و دستور کار مدون، (۲) مرور دستاوردهای جلسه، و (۳) تعیین اقدامات بعدی و ارزیابی نتایج باشد (شکل ۲-۶). در نهایت، فضای حاکم بر جلسات باید مشوق مشارکت فعال و پیشبرد اهداف پژوهشی باشد. هر دو گروه کشاورزان و پژوهشگران با برنامه‌های روزانه فشرده‌ای مواجه هستند که ممکن است در صورت عدم مشاهده نتایج ملموس از پیشرفت پروژه، انگیزه‌ی خود را برای مشارکت مستمر در جلسات از دست بدهند. این واقعیت ضرورت مدیریت بهینه زمان جلسات توسط تیم اصلی پروژه را پررنگ می‌سازد. در این راستا، شفاف‌سازی اهداف و انتظارات از کشاورزان - شامل دلایل درخواست مشارکت و شرح دقیق نقش‌آفرینی مورد انتظار - از ملزومات اساسی است. در شرایط محدودیت زمانی، می‌توان از حضور نمایندگی بهره‌گرفت که در آن منتخبانی از هر دو گروه پژوهشگران و



شکل ۲-۶. مراحل طراحی و اجرای یک جلسه مؤثر. شکل از نویسنده.

کشاورزان مسئولیت پیگیری جلسات را بر عهده می گیرند. اگرچه این رویکرد برای تصمیم گیری‌های فوری و اجرایی مناسب است، اما نمی تواند جایگزین جلسات اصلی با حضور تمام ذی‌نفعان شود. به موازات این راهکار، بهره گیری از فناوری‌های ارتباطی (مانند وینارها) و ابزارهای نوین مدیریت پروژه مانند Trello, Asana یا Microsoft Planner می تواند انعطاف پذیری لازم را فراهم آورد. این ابزارها به تیم‌های میان‌رشته‌ای کمک می کنند تا وظایف، مهلت‌ها و مسئولیت‌های هر عضو را به صورت شفاف پیگیری کرده و از پیشرفت هماهنگ پروژه اطمینان حاصل نمایند.

شایان توجه است که بخش قابل توجهی از زمان جلسات صرف تبادل نظر و اشتراک گذاری اطلاعات میان اعضای تیم می گردد. این واقعیت ضرورت برنامه‌ریزی واقع‌بینانه برای دستور کار جلسات را نمایان می‌سازد؛ به گونه‌ای که تلاش برای گنجاندن حجم بالایی از فعالیت‌ها یا موضوعات متنوع در یک جلسه واحد، نه تنها کارایی ندارد بلکه ممکن است به کاهش کیفیت مشارکت منجر شود. از سوی دیگر، موارد حساسی مانند تصمیم گیری‌های راهبردی یا الحاق اعضای جدید به تیم، مستلزم اختصاص جلسات

ویژه با دستور کار متمرکز و زمان‌بندی مناسب می‌باشد. در برنامه‌ریزی جلسات پژوهشی نظام‌های زراعی، توجه به ملاحظات اجرایی برای حفظ پویایی و کارایی تیم ضروری است. جدول ۱-۲ خلاصه‌ای از این ملاحظات کلیدی را ارائه می‌دهد:

جدول ۱-۲. چک‌لیست ملاحظات کلیدی برای برنامه‌ریزی جلسات پژوهشی مؤثر

محور برنامه‌ریزی	اقدامات و راهکارهای اجرایی
۱. انتخاب هدفمند شرکت‌کنندگان	• تفکیک جلسات به دو گروه: تخصصی (صرفاً اعضای علمی) و فراگیر (با حضور کشاورزان و ذی‌نفعان). • تطبیق سطح مشارکت افراد با ماهیت تصمیمات مورد نیاز در جلسه.
۲. بهینه‌سازی زمان	• کوتاه و متمرکز نگه داشتن جلسات (به‌ویژه پس از تثبیت اولیه تیم و اهداف). • طراحی محتوا به گونه‌ای که ارزش زمانی حضور برای همه شرکت‌کنندگان محسوس باشد.
۳. دسترسی و حضور	• ارزیابی هزینه-فایده حضور فیزیکی (لحاظ کردن زمان سفر اعضا). • انعطاف‌پذیری در به‌کارگیری روش‌های جایگزین (وبینار، ویدئو کنفرانس و غیره) در صورت نیاز.
۴. مدیریت دستور کار	• تهیه و توزیع دستور کار مدون، حداقل چند روز پیش از جلسه. • اولویت‌بندی موضوعات و تخصیص زمان دقیق به هر بخش. • ارسال پیش‌نیازهای اطلاعاتی برای مطالعه قبل از جلسه.
۵. آماده‌سازی اعضا	• اطمینان از آگاهی کامل اعضا نسبت به اهداف مشخص جلسه پیش از شروع. • فراهم کردن مستندات لازم جهت آمادگی اعضا برای ارائه نظرات تخصصی.

برای برگزاری مؤثر جلسات پژوهشی، لازم است ساختار مدیریتی مشخصی اتخاذ گردد که در آن نقش‌های مدیر جلسه (مسئول هدایت و نظم‌بندی مباحث) و منشی جلسه (مسئول ثبت دقیق تصمیمات و اقدامات) به صورت مجزا تعریف شوند تا کارایی و بی‌طرفی جلسه حفظ شود. همچنین مدیریت بهینه زمان از طریق تعیین سهم‌زمانی مشخص برای هر شرکت‌کننده و نظارت مستمر ناظر زمان بر رعایت این محدوده‌های زمانی ضروری است. در خصوص فرآیند تصمیم‌گیری، تیم پژوهشی می‌بایست پیش از شروع جلسه، روش تصمیم‌گیری مناسب (اعم از اجماعی، رأی‌گیری اکثریتی یا تصمیم‌گیری مشورتی توسط رهبر تیم پس از ارزیابی جامع نظرات) را به صورت جمعی انتخاب نماید تا شفافیت و کارایی تصمیم‌ها تضمین گردد (Bryson and Carroll, 2007). البته شایان ذکر است در فرآیند تصمیم‌گیری‌ها، انعطاف‌پذیری در انتخاب روش‌ها متناسب با ماهیت هر موضوع می‌تواند موجب ارتقای سطح مشارکت و تعهد اعضا گردد. با این حال، در تیم‌های میان‌رشته‌ای که تفاوت دیدگاه‌ها امری طبیعی است، بروز اختلاف نظر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین، رهبر تیم باید سازوکارهای شفاف برای مدیریت تعارض^۱ پیش‌بینی کند. هدف، سرکوب دیدگاه‌های تخصصی نیست، بلکه حل اختلاف از طریق یافتن راه‌حل‌های برد-برد است. در این راستا می‌توان از روش‌هایی مانند مذاکره مبتنی بر اصول^۲ استفاده کرد که در آن، تمرکز از مواضع فردی به اهداف مشترک پروژه معطوف می‌شود (Fisher et al., 2011). علاوه بر سازوکار تصمیم‌گیری، سنجش اثربخشی تیمی^۳ نیز باید به صورت دوره‌ای انجام شود و به پایان پروژه موکول نگردد. می‌توان از ابزارهای ارزیابی ساده مانند پرسشنامه‌های سلامت تیم^۴ (Gavens et al., 2018) یا برگزاری جلسات بازبینی پس از اقدام^۵ (Morrison, 1999) پس از هر مرحله کلیدی پژوهش (مانند

-
1. Conflict management
 2. Principled negotiation
 3. Team effectiveness assessment
 4. Team health checklists
 5. After-action reviews

پایان فصل زراعی) استفاده کرد. این ابزارها به شناسایی سریع موانع همکاری، رفع مشکلات ارتباطی و تقویت نقاط قوت تیم کمک می‌کنند.

در پایان باید اشاره شود که اثربخشی کار گروهی، مستلزم برقراری ارتباطات حرفه‌ای مبتنی بر احترام متقابل و برابری میان تمامی مشارکت‌کنندگان است. در این راستا، فضای جلسات پژوهشی باید بر پایه اصول رفتاری سازنده‌ای همچون گوش دادن فعال، پاسداشت دیدگاه‌های متفاوت، پرهیز از پیش‌داوری و رعایت نوبت در گفتمان استوار باشد. اجتناب از مجادلات غیرضروری و قطع نکردن صحبت دیگران، نشان‌دهنده بلوغ تیم در تعاملات علمی است. در نهایت، برای تضمین کارایی هر نشست، فرآیند باید با تصویب نهایی تصمیمات کلیدی، تعیین دقیق مسئولیت‌های اجرایی و زمان‌بندی اقدامات به پایان رسد؛ همچنین ارزیابی کیفیت جلسه و برنامه‌ریزی برای نشست‌های آتی، تکمیل‌کننده این چرخه مدیریتی خواهد بود.

۲-۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل دوم

این فصل بر محور سوم تحول روش‌شناسی، یعنی بازآرایی تیم تحقیقاتی، متمرکز بود و چالش‌های عملیاتی گذار از پژوهش فردی به پژوهش تیمی میان‌رشته‌ای را بررسی کرد. تفاوت بنیادی بین ساختار سلسله‌مراتبی سنتی و رویکرد شبکه‌ای و مشارکتی نوین تشریح گردید و بر نقش محوری رهبر پروژه به عنوان تسهیل‌گر و ایجادکننده همگرایی تأکید شد. فصل دوم نشان داد که موفقیت پژوهش سامانه‌ای صرفاً در گرو تخصص علمی اعضا نیست، بلکه به مدیریت هوشمندانه تعاملات انسانی و سازمانی وابسته است. در این راستا، به اهمیت مشارکت فعال کشاورزان پرداخته شد و بر لزوم استفاده از روش‌های دقیق مشارکتی، از جمله رعایت پروتکل‌های اخلاقی (مانند اخذ رضایت آگاهانه) و نمونه‌برداری مشارکتی، تأکید گردید. همچنین، چالش‌های اجتناب‌ناپذیر کار تیمی، مانند مدیریت تعارض و تضاد اولویت‌های رشته‌ای، بررسی و راه‌حل‌های عملی برای آن‌ها (مانند مذاکره مبتنی بر اصول و تعریف شاخص‌های موفقیت چندبعدی) ارائه شد. در

نهایت، ابزارهای عملیاتی برای حفظ پویایی تیم، از جمله برگزاری جلسات مؤثر، سنجش اثربخشی تیمی و بهره‌گیری از نرم‌افزارهای مدیریت پروژه، معرفی گردید. با مشخص شدن ساختار تیم و سازوکارهای همکاری در این فصل، فصل سوم به سراغ گام بعدی، یعنی فرآیند عملیاتی برنامه‌ریزی و اجرای خود پژوهش خواهد رفت.

منابع

- Bertino, F. and Shoja, M.M. (2019). Qualities of Research Scientists: Personality and Leadership Attributes of Research Team Members. In A Guide to the Scientific Career (eds M. Shoja, A. Arynchyna, M. Loukas, A.V. D'Antoni, S.M. Buerger, M. Karl and R.S. Tubbs).
- Bryson, J. M., & Carroll, A. R. (2007). Public participation fieldbook. St. Paul, MN: University of Minnesota.
- Douthwaite, B., Apgar, J. M., Schwarz, A.-M., Attwood, S., Senaratna Sellamuttu, S., & Clayton, T. (2017). A new professionalism for agricultural research for development. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 15(3), 238–252. <https://doi.org/10.1080/14735903.2017.1314754>
- Fisher, R., Ury, W. L., & Patton, B. (2011). *Getting to yes: Negotiating agreement without giving in*. Penguin.
- Freitag, M., Friedrich, T., & Kassam, A. (2024). The carbon footprint of Conservation Agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2331949.
- Gavens, L., Holmes, J., Bühringer, G., McLeod, J., Neumann, M., Lingford-Hughes, A., ... & Meier, P. S. (2018). Interdisciplinary working in public health research: a proposed good practice checklist. *Journal of Public Health*, 40(1), 175-182.
- Gonsalves, J. F. (2005). Participatory research and development for sustainable agriculture and natural resource management: a sourcebook (Vol. 1). IDRC.
- Jackson, D., Sibson, R., & Riebe, L. (2014). Undergraduate perceptions of the development of team-working skills. *Education+ Training*, 56(1), 7-20.
- Lepore, D., Dolui, K., Tomashchuk, O., Shim, H., Puri, C., Li, Y., & Spigarelli, F. (2023). Interdisciplinary research unlocking innovative solutions in healthcare. *Technovation*, 120, 102511.

- Lilja, N., & Ashby, J. A. (1999). Types of participatory research based on locus of decision making. Participatory Research and Gender Analysis Working Document 6. Consultative Group on International Agricultural Research: Cali, Colombia.
- Miller, D. L. (2003). The stages of group development: A retrospective study of dynamic team processes. *Canadian Journal of Administrative Sciences/Revue Canadienne des Sciences de l'Administration*, 20(2), 121-134.
- Morrison, J. E. (1999). Foundations of the after action review process (Vol. 42). United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Oh, M., & Choi, S. (2020). The competence of project team members and success factors with open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(3), 51.
- Tan, E., de Weerd, J. G., & Stoyanov, S. (2021). Supporting interdisciplinary collaborative concept mapping with individual preparation phase. *Educational Technology Research and Development*, 69, 607-626.
- Turner, J. A., Percy, H., Hall, A., & Klerkx, L. (2023). Re-orientating agricultural research to address complex challenges: Legitimacy dynamics of a hybrid research organisation. *Journal of Rural Studies*, 103, 103137.
- Van den Bossche, P., Gijssels, W., Segers, M., Woltjer, G., & Kirschner, P. (2011). Team learning: building shared mental models. *Instructional science*, 39, 283-301.

فصل سوم

برنامه ریزی پژوهش های نظام های زراعی

یک پاسخ تقریبی به پرسشی درست، بسیار ارزشمندتر از یک پاسخ دقیق
به پرسشی نادرست است
(جان توکی)

به گفته فریدلند و همکاران (Friedland et al., 2018)، هر پژوهش استاندارد از چهار مرحله اصلی زیر تشکیل می شود:

• **تدوین فرضیات پژوهشی:** پژوهش با فرمول بندی دقیق یک یا چند فرضیه علمی آغاز می شود که پرسش های کلیدی تحقیق را هدف قرار می دهد. این مرحله مستلزم بررسی جامع پیشینه پژوهش و نیازسنجی دقیق است تا فرضیات مطرح شده از اصالت و ارتباط کافی برخوردار باشند.

• **طراحی روش شناسی پژوهش:** انتخاب و اجرای مناسب ترین روش های علمی برای آزمون فرضیات، هسته اصلی هر پژوهش را تشکیل می دهد. این مرحله شامل طراحی دقیق آزمایش ها، انتخاب جامعه آماری مناسب، و تعیین شاخص های ارزیابی معتبر است که همگی باید با ماهیت سوالات پژوهشی تناسب داشته باشند.

• **تحلیل و تلفیق یافته‌ها:** تفسیر نظام‌مند نتایج با استفاده از روش‌های تحلیلی معتبر انجام می‌پذیرد. در این مرحله، پژوهشگر باید داده‌ها را در چارچوب دانش موجود قرار دهد، روابط علی را شناسایی کند، و به تلفیق یافته‌ها با توجه به اهداف اولیه پژوهش بپردازد.

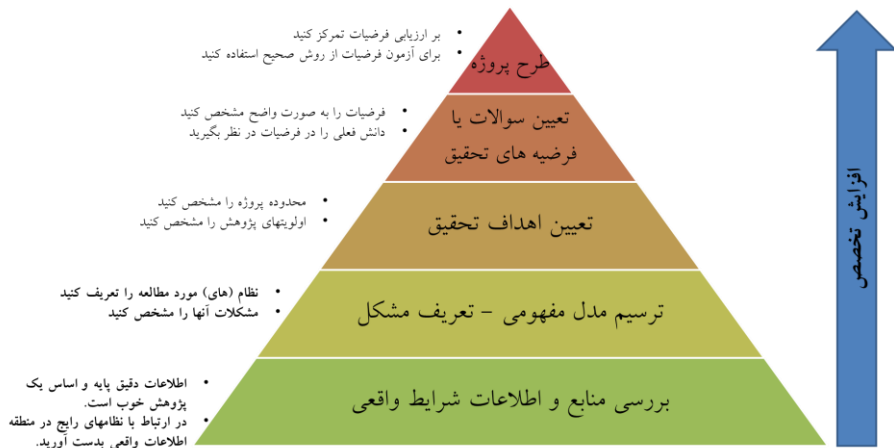
• **انتشار نتایج پژوهش:** انتشار به‌موقع و شفاف یافته‌های پژوهشی از طریق کانال‌های علمی معتبر، آخرین و حیاتی‌ترین مرحله فرآیند پژوهش محسوب می‌شود. این مرحله شامل تهیه گزارش‌های فنی، مقالات علمی، و در برخی موارد ارائه نتایج به بهره‌برداران عملیاتی است.

این چارچوب چهار مرحله‌ای برای پژوهش‌های نظام‌های زراعی نیز کاربرد دارد، هرچند برخی مراحل در مطالعات بین‌رشته‌ای با دشواری‌های خاصی همراه است. تعریف دقیق مسئله، تعیین اهداف و طراحی مناسب آزمایش‌ها زمانی که اعضای تیم از تخصص‌های مختلفی برخوردارند و زبان علمی مشترکی ندارند، چالش‌برانگیزتر می‌شود. برای نمونه، در حالی که متخصص اقتصاد کشاورزی به دنبال حداکثرسازی سودآوری است، متخصص به‌زراعی ممکن است بر کارایی مصرف نهاده‌ها تمرکز کند و متخصص خاک‌شناسی افزایش ماده آلی خاک را هدف قرار دهد؛ اهدافی که لزوماً همسو نیستند. افزون بر این، تجربه محدود بسیاری از پژوهشگران در همکاری‌های فشرده بین‌رشته‌ای، بر پیچیدگی کار می‌افزاید. با وجود این چالش‌ها، موفقیت در پژوهش‌های نظام‌های زراعی در گرو عبور نظام‌مند از این موانع است؛ از این‌رو، در ادامه فرآیندی ساختارمند و مرحله‌به‌مرحله برای تدوین و طراحی این پروژه‌ها ارائه می‌شود تا مسیر همگرایی تخصص‌ها و اهداف هموار گردد.

۳-۱. فرآیند تدوین و طراحی پروژه‌های پژوهشی

فرآیند تعریف پروژه پژوهشی با تبادل دانش و اطلاعات میان اعضای تیم آغاز می‌گردد، سپس با تبیین دقیق مسئله و تدوین اهداف پژوهش ادامه می‌یابد و نهایتاً با

فرمول‌بندی پرسش‌ها و فرضیات تحقیق که مبنای طراحی آزمایش‌ها قرار می‌گیرند، تکمیل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۱ ملاحظه می‌شود، این مراحل در پژوهش‌های نظام‌های زراعی از ساختار منسجمی پیروی می‌کنند. یکی از نکات کلیدی در این فرآیند، لزوم بازنگری مستمر مسائل پژوهشی در طول اجرا و حفظ انعطاف‌پذیری لازم در پیشبرد پروژه است. به عنوان نمونه، اگرچه برآورد اولیه بودجه در مراحل ابتدایی انجام می‌پذیرد، اما تخصیص نهایی منابع مالی می‌بایست با توجه به اولویت‌بندی اهداف و نیازهای عملیاتی که در طول اجرای پروژه مشخص می‌شوند، مورد بازبینی قرار گیرد. تجربه نشان داده است که پژوهش‌های نظام‌های زراعی زمانی به بهترین نتایج دست می‌یابند که فرآیند بازنگری و بهینه‌سازی به صورت مستمر و گام‌به‌گام در تمام مراحل توسعه و اجرای پروژه انجام پذیرد (Debaeke et al., 2009).



شکل ۳-۱. الگوی طراحی و پیشبرد پروژه تحقیقاتی. شکل از نویسنده

برای اطمینان از پوشش تمام جنبه‌های کلیدی در مرحله حساس برنامه‌ریزی، پژوهشگران می‌توانند از چک‌لیست معیارمحور زیر (جدول ۳-۱) به عنوان راهنمای گام‌به‌گام استفاده کنند. این چک‌لیست به تیم کمک می‌کند تا از مراحل اولیه (تعریف مسئله) تا مراحل نهایی (تأمین مالی) را به صورت نظام‌مند پیش ببرد.

جدول ۳-۱. چک‌لیست گام به گام برنامه‌ریزی و طراحی پروژه در نظام‌های زراعی

فاز	گام کلیدی	سوالات کنترلی (آیا انجام شده است؟)
فاز ۱: تعریف مسئله	۱. شناسایی مسئله اصلی	آیا مسئله به وضوح تعریف شده و مورد توافق ذی‌نفعان (به‌ویژه کشاورزان) است؟
	۲. تدوین مدل مفهومی	آیا مدل مفهومی ترسیم شده و مرزهای سیستم مشخص است؟
فاز ۲: تشکیل تیم	۳. بازآرایی تیم	آیا تخصص‌های کلیدی (زراعت، خاک، آمار، اقتصاد و ...) در تیم حضور دارند؟
	۴. تعیین رهبر پروژه	آیا رهبر تیم با وظایف تسهیل‌گری و ایجاد زبان مشترک مشخص شده است؟
فاز ۳: طراحی روشن‌شناسی	۵. تعریف اهداف و فرضیات	آیا اهداف به صورت شفاف تعریف شده‌اند؟ آیا فرضیات قابل آزمون هستند؟
	۶. انتخاب محل اجرا	پژوهش ایستگاهی است یا در مزرعه؟ (در ادامه این فصل بحث می‌شود).
فاز ۴: اجرا و لجستیک	۷. طراحی تیمارها	آیا تیمارها نماینده کل سیستم (و نه فقط یک عامل) هستند؟ آیا تیمار شاهد (نظام رایج منطقه) به درستی انتخاب شده است؟
	۸. طراحی آماری (در فصول بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد)	آیا طرح آماری (مثلاً بلوک، کرت خردشده، پلکانی) با اهداف پروژه همخوانی دارد؟ آیا تعداد تکرار کافی است؟
	۹. برنامه‌ریزی اجرایی	آیا جدول زمان‌بندی دقیق عملیات (کاشت، داشت، برداشت) و مسئول هر بخش مشخص است؟
	۱۰. مدیریت داده	آیا پروتکل جمع‌آوری، استانداردسازی و ذخیره داده‌ها تعریف شده است؟ (در ادامه فصل بحث می‌شود)

ادامه جدول ۱-۳

فاز	گام کلیدی	سوالات کنترلی (آیا انجام شده است؟)
فاز ۵: مدیریت منابع	۱۱. تحلیل ریسک	آیا ریسک‌های احتمالی (مانند خشکسالی، حذف کشاورز همکار، قطع بودجه) شناسایی شده‌اند؟ (ماتریس ریسک در ادامه ارائه می‌شود).
	۱۲. تأمین مالی	آیا بودجه‌بندی (شامل هزینه‌های عملیاتی و نیروی انسانی) به صورت دقیق انجام و به حامی مالی ارائه شده است؟

همان‌طور که در چک‌لیست برنامه‌ریزی (جدول ۱-۳) اشاره شد، شناسایی ریسک‌ها بخش جدایی‌ناپذیر طراحی پروژه است. پژوهش‌های نظام‌های زراعی به دلیل ماهیت بلندمدت، وابستگی شدید به شرایط اقلیمی و اتکا به همکاری بهره‌برداران (مانند کشاورزان)، در معرض عدم قطعیت‌های فراوانی قرار دارند. استفاده از یک ماتریس ارزیابی ریسک^۱ به تیم تحقیق کمک می‌کند تا ریسک‌های بالقوه را شناسایی کرده، احتمال وقوع و شدت اثر آن‌ها را ارزیابی کند و از پیش، راهکارهای کاهش ریسک را تدوین نماید. جدول ۲-۳ نمونه‌ای از یک ماتریس ریسک کاربردی برای پژوهش‌های نظام‌های زراعی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳. نمونه ماتریس ارزیابی و مدیریت ریسک در پژوهش‌های نظام‌های زراعی

نوع ریسک	شرح ریسک (سناریوی احتمالی)	احتمال وقوع (زیاد/متوسط/کم)	شدت اثر (زیاد/متوسط/کم)	راهکار کاهش ریسک (اقدام پیشگیرانه)
۱. ریسک اقلیمی	وقوع خشکسالی شدید یا سرمای بی‌موقع که منجر به از دست رفتن کامل آزمایش در یک سال شود.	متوسط تا زیاد (بسته به منطقه)	زیاد	انتخاب مکان‌های پژوهش در دو منطقه اقلیمی متفاوت. در نظر گرفتن آبیاری تکمیلی اضطراری (حتی در طرح‌های تنش خشکی و دیم) در پروپوزال.

ادامه جدول ۲-۳

نوع ریسک	شرح ریسک (سناریوی احتمالی)	احتمال وقوع (زیاد/متوسط /کم)	شدت اثر (زیاد/متوسط /کم)	راهکار کاهش ریسک (اقدام پیشگیرانه)
۲. ریسک فنی/اجرایی	خرابی ناگهانی ادوات تخصصی	متوسط	زیاد	پیش‌بینی بودجه تعمیر و نگهداری در پروپوزال.
	(مانند کارنده‌های کشاورزی حفاظتی) در زمان اوج کار (کاشت).			شناسایی ادوات جایگزین (مثلاً در سایر موسسات، شرکت‌های خصوصی یا مراکز جهاد) از قبل.
	قطع یا تأخیر جدی در تخصیص بودجه			تقسیم پروژه به فازهای اجرایی کوتاه‌مدت با خروجی‌های مشخص.
۳. ریسک مالی	پروژه توسط سازمان حامی در میانه اجرای آزمایش بلندمدت.	متوسط	زیاد	تلاش برای جذب حامیان مالی متعدد
۴. ریسک انسانی (مشارکتی)	انصراف کشاورز همکار کلیدی در میانه اجرای پژوهش در مزرعه	متوسط	زیاد	انتخاب کشاورزان علاقه‌مند و پیشرو از ابتدا.
				امضای تفاهم‌نامه شفاف (با جبران خدمات مالی یا غیرمالی).
				انتخاب مزارع جایگزین (پشتیبان) از ابتدای پژوهش.
۵. ریسک انسانی (تیم تحقیق)	خروج یکی از اعضای کلیدی تیم (مانند متخصص آمار) به دلیل انتقال یا بازنشستگی در طول پروژه بلندمدت.	کم تا متوسط	زیاد	مستندسازی دقیق تمام پروتکل‌ها و داده‌ها
				آموزش نیروی انسانی جایگزین (دانشجویان دکتری) از ابتدای پروژه.

۳-۱-۱. بررسی پیشینه پژوهش و مطالعات مرتبط

پژوهشگران فعال در حوزه نظام‌های زراعی نمی‌توانند پرسش‌های تحقیقاتی را به صورت مجرد و بدون ارتباط با واقعیات مزرعه طراحی کنند. همانند سایر پژوهش‌های علمی، تدوین مسائل، سوالات و فرضیات پژوهشی در این حوزه مستلزم آگاهی عمیق از دانش موجود - هم در بعد نظری و هم عملی - است. این دانش جامع از سه منبع اصلی حاصل می‌شود: یافته‌های علمی منتشرشده، اطلاعات زراعی، اکولوژیکی و اقتصادی نظام‌های کشاورزی محلی و منطقه‌ای، و همچنین مشاهدات و تجربیات ارزشمند کشاورزان، مروجان و خود پژوهشگران. در تیم‌های تحقیقاتی سازمان‌یافته، اگرچه هریک از متخصصان درجاتی از آشنایی با نظام‌های تولید محلی را دارند، اما نقاط ابهام و کمبود اطلاعات معمولاً در حین مواجهه با مسائل عملی و طراحی آزمایش‌ها خود را نشان می‌دهند. بهترین راهکار برای پر کردن این خلاء اطلاعاتی، برگزاری جلسات تخصصی جهت شناسایی دقیق داده‌های مورد نیاز و سپس تقسیم مسئولیت جمع‌آوری آنها بین اعضای تیم است. نکته حائز اهمیت این است که هرچه تنوع تخصص‌های حاضر در تیم بیشتر باشد، ضرورت تقویت تبادل اطلاعات بین‌رشته‌ای - که سنگ بنای اصلی موفقیت پروژه محسوب می‌شود - پررنگ‌تر خواهد بود. این تعامل سازنده نهایتاً به شکل‌گیری طرح پژوهشی جامع‌تر و کاربردی‌تری منجر خواهد شد.

۳-۱-۲. شناسایی مسئله در پژوهش‌های نظام‌های زراعی

در پژوهش‌های متعارف، محققان معمولاً مسائل را در چارچوب تخصصی خود تعریف و دسته‌بندی می‌کنند و بر این اساس، نقشه‌ای ذهنی از برنامه تحقیقاتی خود ترسیم می‌نمایند. این نقشه‌ها عموماً شامل اهداف پژوهش، پیش‌فرض‌های مرتبط با مسئله مورد مطالعه، مجموعه‌ای از پرسش‌های تحقیقاتی و طرحی برای پاسخگویی به این پرسش‌هاست. اما در پژوهش‌های نظام‌های زراعی که ماهیتی بین‌رشته‌ای دارند، تیم تحقیقاتی باید از تعاریف محدود و رشته‌محور فراتر رفته و مسئله را به گونه‌ای فرمول‌بندی

کند که بتواند دیدگاه‌های متنوع اعضا را تلفیق نموده و مبنایی جامع برای دستیابی به اهداف پژوهشی فراهم آورد. این رویکرد منجر به ایجاد مدل‌های مفهومی گسترده‌ای می‌شود که تعاملات بین اجزای مختلف نظام را به وضوح نشان داده و چارچوبی نظام‌مند برای پاسخ به پرسش‌های تحقیق فراهم می‌کنند. همانگونه که در فصل پیشین اشاره شد، این مدل‌های مفهومی به عنوان نقطه آغازین همکاری‌های بین‌رشته‌ای عمل کرده و اطمینان می‌دهند که تمامی اعضای تیم با درکی مشترک از نظام و پرسش‌های پژوهشی، کار خود را آغاز می‌کنند (Heemskerk et al., 2003). مهمترین ویژگی‌های کلیدی یک مدل مفهومی کارآمد عبارتند از (Fortuin et al., 2011):

- شامل پرسش‌های اصلی تحقیق باشد
 - دارای محدوده و مرزهای مشخصی باشد
 - اجزای نظام و روابط متقابل آنها را به روشنی تعریف کند
 - چارچوبی منطقی برای پاسخگویی به پرسش‌های تحقیق ارائه دهد
 - مورد پذیرش تمامی اعضای تیم قرار گیرد به طوری که هر عضو بتواند بخش مرتبط با تخصص خود را در آن شناسایی کند
 - برای کلیه ذی‌نفعان پروژه، حتی آنان که پیشینه پژوهشی ندارند، قابل فهم باشد
- این مدل‌های مفهومی به عنوان ابزاری راهبردی، مسیر پیشرفت پروژه را هموار ساخته و تضمین می‌کنند که پژوهش از جامعیت و انسجام لازم برخوردار است.

۳-۱-۳. تدوین اهداف و مقاصد پژوهشی

پس از حصول توافق جمعی بر سر مدل مفهومی نظام مورد مطالعه، تیم تحقیقاتی وارد مرحله تعیین اهداف و مقاصد پروژه می‌شود. این مرحله که نقطه عطفی در شکل‌گیری همکاری‌های بین‌رشته‌ای محسوب می‌شود، مستلزم بررسی و تلفیق دیدگاه‌های تمامی اعضا درباره اهداف و پرسش‌های تحقیق است. در این فرآیند، با اولویت‌بندی ایده‌های مطرح‌شده، اهداف نهایی پروژه به شکلی متمرکز و عملیاتی تعریف می‌شوند. نقش رهبر

تیم در این مرحله از اهمیت حیاتی برخوردار است. رهبر پروژه موظف است اطمینان حاصل نماید که اهداف تعیین شده علاوه بر دارا بودن قابلیت تحقق، منافع و دغدغه‌های تمامی ذی‌نفعان به‌ویژه کشاورزان را نیز پوشش دهد. غفلت از این امر ممکن است به کاهش انگیزه مشارکت کنندگان و احساس بی‌تأثیری آنان در پیشبرد پروژه منجر شود که در نهایت به کاهش کیفیت و اثرگذاری پژوهش می‌انجامد. بنابراین، تدوین اهدافی که برای تمامی طرف‌های درگیر معنادار و سودمند باشد، ضامن موفقیت پروژه‌های مشارکتی نظام‌های زراعی است (Easton and Rosenzweig, 2015).

۳-۱-۴. طراحی آزمایش‌های پژوهشی متناسب با اهداف

پس از تبیین اهداف و مقاصد پژوهش، مرحله حیاتی طراحی آزمایش‌های پروژه آغاز می‌گردد. در این مرحله، تیم تحقیقاتی ضمن تدوین طرح کلی آزمایش‌ها، روش‌های اجرا، تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج را نیز مشخص می‌نماید. نکته حائز اهمیت آنکه پژوهش‌های نظام‌های زراعی باید از همان مراحل آغازین، متضمن برنامه‌ای مدون جهت انتقال یافته‌ها به جامعه کشاورزی باشند. در این فرآیند، با توجه به ماهیت و اهداف پروژه، پرسش‌ها و فرضیات پژوهشی به دقت طراحی می‌شوند تا چارچوب مناسبی برای آزمایش‌ها فراهم آید. برخی از فرضیات کلیدی در پژوهش‌های نظام‌های زراعی می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- نظام‌های زراعی با تنوع زیستی بالاتر از پایداری اکولوژیکی بیشتری نسبت به نظام‌های تک‌کشتی برخوردارند (Carof et al., 2022)
- نظام‌های زراعی پیشرفته ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش ذخیره کربن خاک، موجب ارتقای کیفیت منابع آب و خاک می‌گردند (Khangura et al., 2023)
- نظام‌های تلفیقی گیاه و دام در مقایسه با نظام‌های تک‌محصولی، ریسک‌های اقتصادی و زیست‌محیطی کمتری به همراه دارند (Shanmugam et al., 2024)

- نظام زراعی حفاظتی نسبت به روش‌های متداول، از کارایی بالاتری در مصرف نهاده‌ها برخوردار است (Mulimbi et al., 2023)
- مقاومت نظام‌های زراعی ارگانیک در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی بیشتر از نظام‌های متداول می‌باشد (Azarbad, 2022).

پس از تدوین فرضیات پژوهشی، گام بعدی طراحی آزمایش‌های مناسب برای ارزیابی این فرضیات است. این مرحله در پژوهش‌های نظام‌های زراعی غالباً با چالش‌های خاصی همراه است. نخست آنکه فقدان یک مدل مفهومی جامع از سامانه مورد مطالعه می‌تواند به طراحی ناکارآمد آزمایش‌ها منجر شود. دوم آنکه تفاوت در روش‌شناسی رشته‌های مختلف ممکن است فرآیند طراحی را با دشواری مواجه سازد، به ویژه زمانی که اعضای تیم تجربه کافی در کارهای بین‌رشته‌ای نداشته باشند. برای غلبه بر این چالش‌ها، پیشنهاد می‌شود هر یک از اعضای تیم رویکرد پژوهشی خود را در قالب ارائه‌هایی تخصصی تشریح کنند. این ارائه‌ها باید به طور خاص به پروژه جاری مرتبط بوده، روش‌های پیشنهادی و دلایل انتخاب آن‌ها را به وضوح تبیین نمایند. برگزاری جلسات بحث و تبادل نظر پس از هر ارائه، به درک متقابل اعضا از روش‌شناسی رشته‌های مختلف کمک شایانی می‌کند. این فرآیند نه تنها شناخت جامعی از رویکردهای پژوهشی مختلف ایجاد می‌نماید، بلکه طراحی آزمایش‌های بین‌رشته‌ای را نیز تسهیل می‌کند.

فرآیند طراحی آزمایش‌ها عموماً در دو مرحله اصلی صورت می‌پذیرد. مرحله نخست به برنامه‌ریزی کلان پروژه می‌پردازد که شامل انتخاب مکان پژوهش، تعیین چارچوب زمانی و شناسایی نظام‌ها و فرآیندهای زراعی مورد مطالعه است. مرحله دوم شامل تصمیم‌گیری‌های عملیاتی است که با توجه به اهداف پژوهش و محدودیت‌های بودجه‌ای اتخاذ می‌شوند. این مرحله عمدتاً بر تعیین اندازه نمونه‌ها، تعداد تکرار آزمایش‌ها و شناسایی متغیرهای کلیدی اندازه‌گیری شده متمرکز است. دقت در این تصمیم‌گیری‌ها تأثیر مستقیمی بر کیفیت و قابلیت اعتماد نتایج پژوهش خواهد داشت.

۳-۲. انتخاب محل اجرای پژوهش‌های نظام‌های زراعی

در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، دو رویکرد اصلی برای انتخاب محل اجرای تحقیق وجود دارد (Drinkwater, 2002). رویکرد نخست مبتنی بر استفاده از نظام‌های زراعی شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های تحقیقاتی است که در آن آزمایش‌ها با تیمارهای کنترل شده و تکرارپذیر طراحی می‌شوند. این روش برای پاسخگویی به سوالات دقیق و خاص پژوهشی مناسب است. در مقابل، رویکرد دوم از مزارع واقعی کشاورزان در منطقه بهره می‌گیرد که امکان مطالعه نظام‌های تولید در شرایط واقعی را فراهم می‌آورد (Shennan et al., 1991). انتخاب هر یک از این دو رویکرد به ماهیت اهداف و فرضیات پژوهش بستگی دارد و هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را داراست. در برخی موارد، سوالات پژوهشی به طور مشخص محل اجرای تحقیق را تعیین می‌کنند. به عنوان مثال، بررسی مسیر حرکتی نیتروژن تثبیت شده توسط گیاهان لگوم یا کربن آلی اضافه شده به خاک مستلزم استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار و شرایط کنترل شده آزمایشگاهی است که در مزارع کشاورزی قابل اجرا نیست. از سوی دیگر، مطالعاتی که به بررسی اثرات پوشش گیاهی در مقیاس وسیع یا تاثیر تناوب زراعی بر جمعیت آفات می‌پردازند، باید حتماً در مزارع واقعی انجام شوند، به این دلیل که مقیاس اجرا تأثیر مستقیمی بر نتایج پژوهش دارد. با وجود مزایای پژوهش در مزارع واقعی، در شرایط کنونی ایران، پژوهش‌های شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های تحقیقاتی از رواج بیشتری برخوردار است. این امر عمدتاً به دلیل کنترل بهتر شرایط آزمایش و سهولت در مدیریت عوامل محیطی است. اجرای پژوهش‌های نظام‌های زراعی در ایستگاه‌های تحقیقاتی از چندین مزیت کلیدی برخوردار است که مهمترین آنها عبارتند از:

- امکان مقایسه نظام‌های زراعی مختلف در شرایط کنترل‌شده، با حداقل‌سازی تأثیر عوامل متغیر مانند ویژگی‌های خاک، سوابق مدیریتی، سطح مهارت کشاورزان، شرایط زیست‌محیطی پیرامون و تغییرات اقلیمی خرد

• قابلیت مطالعه و ارزیابی نظام‌های زراعی نوین و پیشرفته‌ای که هنوز در مزارع کشاورزان به کار گرفته نشده‌اند

• امکان پیگیری و تحلیل تغییرات تدریجی نظام‌های زراعی در طول زمان، به این دلیل که تمامی نظام‌های مورد مطالعه از شرایط اولیه یکسان و تعریف شده آغاز می‌شوند. این ویژگی‌ها به محققان امکان می‌دهد تا با دقت و کنترل بیشتری به بررسی اثرات خاص هر نظام زراعی بپردازند و نتایج قابل اعتمادی را به دست آورند.

علی‌رغم مزایای متعدد، پژوهش‌های انجام شده در ایستگاه‌های تحقیقاتی با چالش‌های خاصی نیز همراه است. نخست آنکه جمع‌آوری داده‌ها از یک مکان واحد، امکان بررسی تأثیر متغیرهای محیطی مانند ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی و تنوع زیستی بر عملکرد نظام‌های زراعی را محدود می‌سازد. همچنین، شبیه‌سازی دقیق شرایط واقعی مزارع کشاورزی در محیط‌های تحقیقاتی غالباً با دشواری‌هایی همراه است. حتی با وجود راهنمایی‌های دقیق کشاورزان، کارشناسان ایستگاه‌ها ممکن است فاقد مهارت‌ها یا تجهیزات لازم برای بازآفرینی کامل فعالیت‌های کشاورزان باشند. از دیگر محدودیت‌های این روش می‌توان به عدم امکان بررسی جامع فرآیندهای اکوسیستمی در مقیاس وسیع و نیز مسائل اجتماعی-اقتصادی پیچیده اشاره کرد. همچنین، محدودیت‌های زمانی موجود در پژوهش‌های ایستگاهی^۱، امکان مطالعه فرآیندهای زیستی بلندمدت را که ممکن است دهه‌ها به طول بیانجامد تا آثارشان ظاهر شود، به شدت کاهش می‌دهد.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، در ایران بهره‌گیری از مزارع کشاورزان به عنوان بستر مطالعاتی، در مقایسه با ایستگاه‌های تحقیقاتی کمتر مرسوم است. این مسئله عمدتاً ناشی از این تصور است که محدودیت‌های چنین مطالعاتی بر مزایای آن فزونی دارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به چالش‌های کنترل مدیریت مزرعه اشاره کرد، جایی که کشاورزان

۱. در این مورد برای مثال تعریف پروژه‌ها در سامانه‌های پژوهشی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی محدودیت زمانی پنج ساله دارد.

ممکن است بدون هماهنگی با پژوهشگران، برنامه‌های خود را تغییر دهند. همچنین، نصب و نگهداری تجهیزات تحقیقاتی در این مزارع اغلب دشوار است. پراکندگی جغرافیایی و دسترسی سخت به مزارع نیز هزینه‌های مطالعاتی را افزایش می‌دهد. با این حال، با طراحی هوشمندانه و انتخاب دقیق مزارع می‌توان بسیاری از این محدودیت‌ها را کاهش داد. بزرگ‌ترین مزیت پژوهش در مزارع واقعی، مطالعه نظام‌های زراعی در مقیاس و شرایط واقعی تولید است که امکان درک عمیق‌تری از فرآیندهای کشاورزی را فراهم می‌آورد. انتخاب چندین مزرعه در مناطق مختلف می‌تواند به نتایجی منجر شود که برای طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی و مدیریتی قابل تعمیم باشد. همچنین، با انتخاب مزارعی که سال‌ها با روش‌های مشخصی مدیریت شده و به ثبات نسبی رسیده‌اند، می‌توان از اثرات دوره گذار^۱ جلوگیری کرد.

در نهایت، مؤثرترین راهبرد پژوهشی، رویکردی تلفیقی است که هم از امکانات ایستگاه‌های تحقیقاتی و هم از مزارع واقعی کشاورزان بهره می‌برد. این ترکیب هوشمندانه می‌تواند محدودیت‌های هر روش را با مزایای روش دیگر جبران کند و به نتایج جامع‌تری منجر شود. چنین رویکردی به ویژه در پژوهش‌های نظام‌های زراعی که نیازمند درک همزمان ابعاد فنی و واقعیت‌های عملی هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۳-۳. تمایزات پژوهش‌های نظام‌های زراعی در ایستگاه‌های تحقیقاتی

پژوهش‌های نظام‌های زراعی در ایستگاه‌های تحقیقاتی از چند جنبه بنیادی با آزمایش‌های زراعی متعارف تفاوت دارند. این تمایزات عمدتاً در انتخاب تیمارهای

1. Transition effect

دوره گذار به فاصله زمانی اطلاق می‌شود که طی آن یک نظام کشاورزی از شیوه مدیریتی فعلی به الگوی جدیدی تغییر می‌کند و به دنبال این تحول، معمولاً با کاهش موقت تولید مواجه می‌شود. به عنوان نمونه، هنگام تغییر از نظام زراعی متداول (با تنوع زیستی محدود و وابسته به نهاده‌های شیمیایی) به نظامی زراعی ارگانیک با تنوع زیستی بالاتر و حذف نهاده‌های شیمیایی، کشاورزان در سال‌های نخست اغلب شاهد کاهش عملکرد محصول و افزایش خسارت آفات خواهند بود (Koudahe et al., 2022).

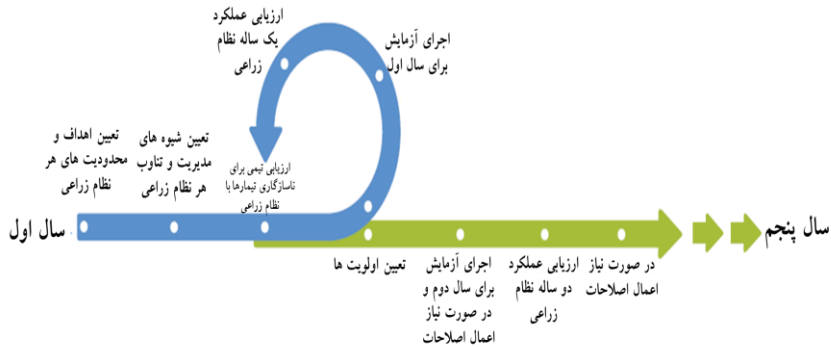
پژوهشی، شیوه مدیریت محصولات، اجرای آزمایش‌های تکمیلی در مقیاس کوچک در کنار آزمایش اصلی، ماهیت بلندمدت پژوهش‌های نظام‌های زراعی و نهایتاً مدیریت آزمایش‌ها نمود می‌یابد. در ادامه، هر یک از این موارد به تفصیل تشریح می‌گردد.

۳-۱-۳. طراحی تیمارها

تعیین تیمارهای مناسب در پژوهش‌های نظام‌های زراعی نیازمند نگرشی متفاوت از آزمایش‌های زراعی متعارف است. برخلاف تحقیقات سنتی که در آنها عدم اعمال تیمار به عنوان شاهد در نظر گرفته می‌شود، در اینگونه مطالعات معمولاً نظام مرسوم کشاورزی منطقه به عنوان مبنای مقایسه انتخاب می‌گردد. برای مثال، ممکن است روش‌های خاک‌ورزی متداول با شیوه‌های کم‌خاک‌ورزی همراه با تنوع در تناوب زراعی مقایسه شوند. با این حال، انتخاب تیمار شاهد در این پژوهش‌ها تا حد زیادی به دیدگاه محققان و شرایط محلی بستگی دارد. در طراحی تیمارها باید دقت شود که هر تیمار نماینده واقعی یک نظام زراعی کامل باشد. به عبارت دیگر، تغییر در یک بخش از نظام زراعی مستلزم تعدیل سایر بخش‌های مرتبط است. برای نمونه، هنگام بررسی تأثیر گیاهان پوششی، لازم است مواردی مانند تاریخ کشت و میزان مصرف کود نیز متناسب با هر تیمار تنظیم شوند. ثابت نگه داشتن سایر عوامل در چنین مقایسه‌ای می‌تواند به برداشت‌های نادرست منجر گردد. این اصل در مقایسه نظام‌های کاملاً متفاوت مانند کشاورزی ارگانیک و متعارف اهمیت بیشتری می‌یابد، جایی که تفاوت‌ها باید در ابعاد مختلفی از تناوب زراعی تا نوع نهاده‌ها و زمان‌بندی کشت اعمال شود.

نکته حائز اهمیت آن است که طراحی تیمارها باید با مشارکت فعال کشاورزان و ارزیابی مستمر همراه باشد. در واقعیت، کشاورزان هر تغییر در نظام زراعی را با تعدیل سایر عوامل مدیریتی همراه می‌کنند. به عنوان نمونه، ورود یک محصول جدید مانند کنجد به تناوب زراعی مستلزم بازنگری در برنامه‌های کشت قبل و بعد و حتی روش‌های مبارزه با علف‌های هرز است. این رویکرد پویا و یکپارچه که در شکل ۳-۲ نشان شده

است، تضمین می‌کند که نتایج پژوهش انعکاسی واقعی از عملکرد نظام‌های زراعی در شرایط مزرعه باشد و بتواند راهکارهای عملی برای کشاورزان ارائه دهد.



شکل ۳-۲. چارچوب اجرا و ارزیابی نظام‌های زراعی با مشارکت ذی‌نفعان کلیدی. برای دستیابی به ارزیابی دقیق و واقع‌گرایانه، مشارکت فعال پژوهشگران، کشاورزان و مروجان در تمام مراحل ضروری است. برگرفته از Drinkwater (2002) با اندکی تغییرات.

مطالعه درینک‌واتر و همکاران (Drinkwater et al., 1995) نمونه‌ای مناسب از طراحی دقیق تیمارها در پژوهش‌های نظام‌های زراعی ارائه می‌دهد. در این آزمایش بلندمدت که چهار نظام زراعی مختلف را مقایسه کرده است، اگرچه تمامی تیمارها بر تولید محصولات ارگانیک متمرکز بودند، اما تفاوت‌های معناداری در محدودیت‌های تولید و اولویت‌های مدیریتی بین آنها مشاهده می‌شود (جدول ۳-۳).

جدول ۳-۳. عوامل اصلی تعیین‌کننده تیمارها برای چهار نظام زراعی مطالعه شده توسط درینک‌واتر و همکاران (Drinkwater et al., 1995)

هدف	نظام زراعی رایج در منطقه	استفاده از گیاهان پوششی در تناوب	کاهش حضور گیاهان زراعی پرنهاده در تناوب	کاهش شدت خاک‌ورزی
حداکثر درآمد در هکتار	حداکثر درآمد در هکتار	حداکثر درآمد در هکتار	حداکثر درآمد در هکتار	حداکثر درآمد در هکتار
اقتصادی	هکتار	در هکتار	هکتار	در هکتار
محدودیت اصلی	زمین	زمین	نیروی کارگری	نیروی کارگری

ادامه جدول ۳-۳

کاهش شدت خاک‌ورزی	کاهش حضور گیاهان زراعی پرنهاده در تناوب	استفاده از گیاهان پوششی در تناوب	نظام زراعی رایج در منطقه
یک محصول اصلی (در طول چهار سال آزمایش، چهار محصول اصلی کشت شد)	یک سال در میان جایگزینی محصول اصلی با آیش و گیاهان پوششی (در طول چهار سال آزمایش، دو محصول اصلی کشت شد)	یک محصول اصلی (در طول چهار سال آزمایش، چهار محصول اصلی کشت شد)	یک محصول اصلی در صورت امکان دو محصول (در طول چهار سال آزمایش، شش محصول اصلی کشت شد)

اولویت‌های مدیریتی

افزایش سلامت خاک از طریق کاهش عملیات خاک‌ورزی	کاهش جمعیت علف‌های هرز	افزایش سلامت خاک از طریق گیاهان پوششی	حاصلخیزی بالای خاک	اول
کاهش جمعیت علف‌های هرز	افزایش سلامت خاک از طریق گیاهان پوششی	کاهش جمعیت علف‌های هرز	کنترل علف‌های هرز	دوم
کاهش هزینه نهاده‌ها	کاهش هزینه نهاده‌ها	کاهش هزینه نهاده‌ها	سلامت خاک	سوم

همانگونه که پیش‌تر اشاره شد، پیش از طراحی و اجرای هر آزمایش جدید در زمینه نظام‌های زراعی، ضروری است تحقیقات قبلی - به ویژه مطالعاتی که در شرایط اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی مشابه انجام شده‌اند - به دقت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند. این

1. Cropping intensity

تعداد گیاهان برداشت شده در هر سال زراعی.

مرور جامع از سوابق پژوهشی، اساس محکمی برای مطالعات آینده فراهم می‌کند. در فرآیند طراحی تیمارها و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها، باید به گونه‌ای عمل شود که همزمان دو هدف اساسی محقق گردد: از یک سو ارائه راهکارهای عملی و کاربردی برای بهره‌برداران و از سوی دیگر تولید دانش جدید درباره فرآیندهای اکولوژیک مؤثر در نظام‌های زراعی (Meynard et al., 2012). این رویکرد دوجبهی، پژوهش‌های نظام‌های زراعی را از تحقیقات صرفاً نظری متمایز می‌سازد. همچنین این تعادل ظریف بین کاربردی بودن و علمی بودن، چالش اصلی پژوهشگران در طراحی تیمارها در این حوزه است.

۳-۲. ابعاد واحد آزمایشی و پیامدهای عملیاتی-اقتصادی

یکی از تفاوت‌های بنیادین پژوهش‌های نظام‌های زراعی، گرایش به استفاده از واحدهای آزمایشی (کرت‌های) بزرگ است تا بتوان شرایط واقعی مزرعه را بهتر شبیه‌سازی کرد. این رویکرد اگرچه اعتبار نتایج را (به‌ویژه برای مطالعه آفات متحرک، تنوع زیستی، یا فرسایش) افزایش می‌دهد، اما مستلزم تحلیل دقیق هزینه-فایده و بررسی پیامدهای عملیاتی است. از آنجا که مدیریت کرت‌های بزرگ با ادوات آزمایشی کوچک یا نیروی انسانی مقدور نیست، استفاده از ادوات مکانیزه در مقیاس واقعی (نظیر تراکتور و کمباین) ضرورت می‌یابد که این موضوع، پیچیدگی‌های اجرایی ایستگاه تحقیقاتی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، اگرچه اثر حاشیه‌ای در کرت‌های بزرگ نسبت به مرکز کرت کاهش می‌یابد (Gomez and Gomez, 1984)، اما مدیریت حاشیه بین دو کرت با مدیریت‌های کاملاً متضاد (مانند شخم کامل در مجاورت عدم شخم) به چالشی عملیاتی تبدیل می‌شود. همچنین، عملیات زراعی، نمونه‌برداری و برداشت داده از این واحدهای بزرگ، بسیار زمان‌برتر بوده و به نیروی انسانی بیشتری نسبت به کرت‌های کوچک متداول نیاز دارد. از منظر اقتصادی (هزینه-فایده)، فایده اصلی این رویکرد در کسب داده‌های واقعی‌تر و قابلیت تعمیم‌پذیری مستقیم نتایج برای کشاورز نهفته است. در مقابل، هزینه اجرای آن، افزایش شدید بودجه پروژه می‌باشد. این هزینه‌ها شامل مصرف

سوخت بیشتر، استهلاک ادوات سنگین، نیاز به نیروی کار بیشتر برای نمونه‌برداری و عملیات، و اشغال مساحت قابل توجهی از زمین گران‌قیمت ایستگاه تحقیقاتی است. در نتیجه، تصمیم برای انتخاب ابعاد کرت، نیازمند یک توازن مناسب بین دقت آماری، واقع‌گرایی اکولوژیک و محدودیت‌های بودجه‌ای و عملیاتی است.

۳-۳-۳. شیوه مدیریت محصولات

در آزمایش‌های زراعی متداول، تمرکز غالباً بر کشت یک محصول مشخص در زمانی معین است و سایر گیاهان به‌منظور افزایش دقت در بررسی اثر تیمارها، به‌عنوان علف هرز کنترل می‌شوند. اما در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، شرایط متفاوت است؛ در این مطالعات، تیمارهایی با تناوب‌های زراعی کاملاً متمایز مقایسه می‌شوند که ممکن است منجر به عدم تشابه محصولات کشت‌شده در یک سال زراعی واحد گردد. نکته حائز اهمیت آن است که در چنین پژوهش‌هایی، نوع محصول صرفاً یکی از عوامل متعدد مؤثر بر عملکرد کلی نظام زراعی محسوب می‌شود. به‌منظور اعمال و مدیریت تناوب زراعی در طراحی این آزمایش‌ها، دو رویکرد اصلی وجود دارد (Peterson et al., 1999):

رویکرد تناوب زراعی به عنوان تیمار پژوهشی: در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، آنگاه که هدف ارزیابی کارایی و عملکرد کلی نظام باشد، تمرکز صرف بر عملکرد تک‌تک محصولات ضرورتی ندارد. در این رویکرد، هر تناوب زراعی به‌عنوان یک تیمار مستقل لحاظ شده و تفاوت‌های ساختاری میان تناوب‌ها، مبنای تمایز نظام‌های زراعی مختلف قرار می‌گیرد. برای نمونه، یکی از وجوه افتراق بنیادین میان نظام‌های ارگانیک و متداول، اتکای نظام ارگانیک به تناوب برای مدیریت آفات و بیماری‌هاست، در حالی که نظام متداول عمدتاً بر سموم شیمیایی تکیه دارد.

به‌منظور مقایسه نظام‌هایی که شامل کشت محصولات متنوع در سال‌های متوالی هستند، بهره‌گیری از معیارهای اقتصادی (مانند نسبت هزینه به درآمد) یا شاخص‌های عملکرد نسبی در قیاس با میانگین منطقه، راهگشاست. افزون بر این، تغییرات ویژگی‌های

خاک تحت تأثیر تناوب‌های مختلف نیز می‌تواند به‌عنوان شاخصی کلیدی در ارزیابی پایداری نظام‌ها مدنظر قرار گیرد. با تداوم آزمایش در گذر زمان، از وزن نتایج سالانه کاسته شده و اهمیت تحلیل روند در بلندمدت برجسته می‌گردد؛ چنان‌که پس از یک دوره ده‌ساله، تحلیل روندهای عملکردی می‌تواند نوسانات جزئی میان‌سالی را کمرنگ کرده و تمایزهای ساختاری و واقعی میان نظام‌های زراعی را آشکار سازد. این نگرش بلندمدت، بستری را برای ارزیابی جامع‌تر تأثیر تناوب بر پایداری و کارایی نظام‌های زراعی فراهم می‌آورد.

رویکرد تناوب به عنوان عامل غیر تیماری: در این رهیافت، طراحی آزمایش باید به‌نحوی باشد که مقایسه عملکرد محصولات در نظام‌های زراعی متفاوت، طی یک فصل زراعی واحد امکان‌پذیر گردد. لازمه این امر، حضور همزمان محصول مورد نظر در فازهای مشخصی از تمامی تناوب‌ها است. بهره‌گیری از طرح آماری کرت‌های خردشده راهکاری کارآمد در این زمینه محسوب می‌شود؛ بدین صورت که نظام‌های مدیریتی کلان (مانند متداول، ارگانیک و حفاظتی) در کرت‌های اصلی و توالی‌های تناوبی در کرت‌های فرعی جای می‌گیرند (Singh and Masuku, 2012). نکته کلیدی در این طراحی، رعایت اصل کشت فازی^۱ است؛ بدین معنا که تعداد کرت‌های فرعی باید دقیقاً با طول دوره تناوب (تعداد سال‌ها) برابر باشد تا تمامی فازهای تناوب در هر سال زراعی در مزرعه حضور داشته باشند (Johnston and Poulton, 2018). این آرایش، ارزیابی همزمان و دقیق تأثیر نوع نظام زراعی و جایگاه گیاه در تناوب بر عملکرد را در شرایط محیطی یکسان میسر می‌سازد (جزئیات فنی و تحلیل آماری این آزمایش‌های بلندمدت در فصول آتی به تفصیل تشریح خواهد شد).

۳-۴. اجرای آزمایش‌های تکمیلی در مقیاس کوچک

در بسیاری از پژوهش‌های نظام‌های زراعی، آزمایش‌های تکمیلی در مقیاس کوچک در کنار آزمایش اصلی طراحی می‌شوند. این آزمایش‌های فرعی که ممکن است در داخل یا خارج از قطعات اصلی اجرا شوند، به بررسی روش‌های نوین مدیریت مزرعه یا حل مشکلات پیش‌آمده در آزمایش اصلی می‌پردازند (Drinkwater, 2002). اینگونه ارزیابی‌های سریع و کوتاه مدت معمولاً شامل مواردی مانند آزمایش ارقام جدید، الگوهای کاشت، تراکم‌های مختلف و سایر فاکتورهای مشابه می‌شود. هرچند در این آزمایش‌های کوچک تمام متغیرهای آزمایش اصلی مورد بررسی قرار نمی‌گیرند، اما نتایج حاصل از آنها می‌تواند به بهبود مدیریت آزمایش اصلی و حتی پیشگیری از شکست آن کمک شایانی کند. برای دستیابی به بهترین نتایج، توصیه می‌شود در هر آزمایش تکمیلی تنها یک عامل خاص مورد بررسی قرار گیرد تا رابطه علی آن با سایر اجزای نظام زراعی به وضوح مشخص شود. به عنوان نمونه کاربردی، در پروژه توسعه کشاورزی حفاظتی ایران، مشکل خوابیدگی بوته‌های گندم به عنوان چالشی اساسی مطرح بود. به همین منظور، آزمایش‌های تکمیلی متعددی برای بررسی تأثیر کاهش میزان بذر مصرفی و تراکم کاشت در رفع این معضل طراحی و اجرا شد (مکاتبات شخصی، محمدرضا جلال کمالی، ۱۴۰۳). همچنین، آزمایش‌های مقایسه ارقام مختلف نیز می‌تواند در انتخاب مناسب‌ترین رقم برای هر نظام زراعی بسیار مؤثر باشد. این رویکرد تکمیلی به پژوهشگران امکان می‌دهد تا ضمن حفظ ساختار اصلی پژوهش، به حل مشکلات عملی و بهبود نظام‌های زراعی بپردازند.

۳-۴. ماهیت بلندمدت پژوهش‌های نظام‌های زراعی

بررسی بسیاری از فرآیندهای اکوسیستم‌های زراعی، به ویژه تغییرات ماده آلی خاک، نیازمند بازه‌های زمانی حداقل ده ساله است (Jaskulska et al., 2023). برای دستیابی به داده‌های قابل اعتماد، اینگونه مطالعات باید دو تا سه چرخه کامل تناوب زراعی را پوشش

دهند که معمولاً به ۱۰ تا ۱۲ سال زمان نیاز دارد. نتایج حاصل از اولین چرخه تناوب که عموماً سه تا چهار سال به طول می‌انجامد، اغلب تنها مرحله گذار را نشان می‌دهد و تصویر کاملی از پتانسیل واقعی نظام زراعی جدید ارائه نمی‌کند (Peterson et al., 1999). درک عمیق نظام‌های زراعی مستلزم برنامه‌ریزی دقیق مطالعات بلندمدت با نمونه‌برداری‌های منظم از خاک، گیاهان، عوامل بیماری‌زا، آفات و علف‌های هرز است. طراحی این پژوهش‌ها باید به گونه‌ای باشد که یافته‌های آن قابلیت تعمیم به طیف وسیعی از محصولات، انواع خاک و شرایط اقلیمی مختلف را داشته باشد. بر این اساس، یکی از ارکان اساسی پژوهش‌های نظام‌های زراعی، تداوم و طولانی‌مدت بودن آنهاست. بر اساس تعریف کورشنز (Körschens, 2006) آزمایش‌های بلندمدت از نظر مدت زمان به سه دسته آزمایش‌های کلاسیک (بیش از ۵۰ سال)، میان مدت (بین ۲۰ تا ۵۰ سال) و جوان (کمتر از ۲۰ سال اما در حال ادامه) تقسیم می‌شوند. مقدمه‌ای بر این آزمایش‌ها، آزمایش‌هایی با طول زمان کمتر (۵ تا ۱۰ سال) می‌باشد که سازوکارها و امکان‌سنجی نظام‌های زراعی را در بر می‌گیرد.

بررسی تجربیات جهانی (مانند Robertson et al., 2008) نشان می‌دهد که موفقیت پروژه‌های تحقیقاتی بلندمدت در گرو رعایت هفت اصل بنیادین است. این اصول که در جدول ۳-۴ خلاصه شده‌اند، چارچوبی برای تضمین پایداری و اثربخشی این پژوهش‌ها فراهم می‌آورند.

جدول ۳-۴. هفت ویژگی کلیدی پروژه‌های تحقیقاتی موفق در نظام‌های زراعی

شرح و اهمیت	ویژگی کلیدی
موفقیت این پژوهش‌ها مستلزم حمایت مستمر سازمانی است. هسته مرکزی پروژه نیازمند بودجه و برنامه‌ریزی بلندمدت و قطعی است، در حالی که پروژه‌های جانبی می‌توانند به صورت انعطاف‌پذیر و با جذب منابع مقطعی به آن ملحق شوند.	۱. تعهد پایدار علمی و اداری
تخصیص بلندمدت یک سایت تحقیقاتی، نیازمند ایجاد ستادی کارآمد است که جریان سریع و دوطرفه اطلاعات را میان مدیران، محققان، مروجان و کشاورزان تسهیل نماید.	۲. پشتیبانی نهادی مستمر
وجود یک چارچوب روش‌شناختی شفاف، نه تنها ساختار اجرایی پروژه را شکل می‌دهد، بلکه به عنوان نقشه‌ای برای سازماندهی و اولویت‌بندی فرضیات عمل می‌کند.	۳. الگوی پژوهشی مدون
تمرکز بر یک پرسش علمی بنیادین و کلیدی، مانع از پراکندگی منابع شده و مسیر اصلی تحقیقات را در طول سالیان متمادی هدایت می‌کند.	۴. فرضیه محوری قوی
استفاده از کورت‌های بزرگ که بازتاب‌دهنده شرایط واقعی مزارع کشاورزان باشند، امکان استفاده از ادوات واقعی و اصلاح عملیاتی تیمارها را فراهم می‌سازد.	۵. اجرا در مقیاس مزرعه‌ای
طراحی آماری یکپارچه که بتواند مراکز تحقیقاتی پراکنده در مناطق مختلف را به هم پیوند دهد، منجر به ایجاد پایگاه‌های داده ملی و معتبر می‌گردد. این شبکه، تعمیم‌پذیری نتایج را افزایش داده و هزینه‌های سنگین پژوهش را توجیه می‌کند.	۶. شبکه‌سازی و پایگاه داده
حفظ و نگهداری نظام‌مند نمونه‌های گیاهی و خاکی در بانک ژن یا آرشیو خاک، این امکان را می‌دهد که در آینده و با پیشرفت فناوری‌های تحلیلی، فرضیات نوینی بر روی نمونه‌های گذشته آزموده شوند.	۷. آرشیو داده‌ها و نمونه‌ها

۳-۵. مدیریت آزمایش‌ها و پروتکل‌های داده

مدیریت نادرست مزرعه در طول اجرای آزمایش‌های زراعی می‌تواند تغییرات نامطلوبی فراتر از نوسانات طبیعی اقلیمی در نتایج ایجاد نماید. این مسئله در پژوهش‌های بلندمدت که هزینه‌های سنگین مالی و زمانی به همراه دارند، از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است. برای تضمین کیفیت، تکرارپذیری و اعتبار بلندمدت داده‌ها، تدوین یک پروتکل مدیریت داده پیش از شروع اجرای آزمایش، ضروری است. این پروتکل باید شامل موارد زیر باشد:

• **شیوه‌های برداشت و استانداردسازی داده‌ها:** در گام اول، شیوه‌های برداشت داده باید مشخص شوند؛ برای این منظور، فرم‌های استاندارد ثبت داده (چه کاغذی و چه دیجیتال) طراحی می‌شوند که به وضوح مشخص می‌کنند چه کسی، چه زمانی و چگونه داده را برداشت می‌کند (مانند یادداشت‌های میدانی دقیق از شرایط اقلیمی و عملیات زراعی). همزمان، استانداردسازی داده‌ها برای جلوگیری از ابهام در تحلیل‌های آتی ضروری است؛ این کار شامل استفاده از واحدهای اندازه‌گیری یکسان (مثلاً کیلوگرم در هکتار به جای گرم در کرت)، نام‌گذاری ثابت برای تیمارها و کدهای مشخص برای متغیرها می‌باشد.

• **پایگاه داده و متادیتا:** در گام دوم، مدیریت داده‌ها نیازمند ایجاد یک پایگاه داده^۱ مرکزی است تا داده‌های خام در فایل‌های اکسل پراکنده روی کامپیوترهای شخصی باقی نمانند. این پایگاه داده (نظیر Access) یا ساختار پوשה‌بندی استاندارد روی سرور، باید از قابلیت نسخه‌بندی برخوردار باشد. در کنار این ساختار، بخش حیاتی متادیتا^۲ قرار دارد که اغلب نادیده گرفته می‌شود. متادیتا باید شامل تمام اطلاعات لازم برای درک داده‌ها در ۱۰ سال آینده باشد، از جمله: جزئیات کامل طرح آماری، مختصات جغرافیایی دقیق کرت‌ها،

1. Database

2. Metadata

تاریخ دقیق هر نمونه‌برداری، روش آزمایشگاهی استفاده‌شده و ثبت تمام رویدادهای غیرمنتظره (مانند شیوع آفات، خرابی ادوات، یا خطای انسانی در اعمال تیمار) در طول اجرای آزمایش.

• **ذخیره‌سازی و بایگانی داده‌ها:** در گام سوم، ذخیره داده‌ها نیازمند یک رویه مشخص برای پشتیبان‌گیری^۱ منظم از پایگاه داده، هم به صورت محلی و هم ابری، می‌باشد. در کنار ثبت و ضبط داده‌ها، فرآیند بایگانی نیز باید اجرا شود که طی آن، نمونه‌های فیزیکی (خاک، گیاه و غیره) به دقت برچسب‌گذاری و در شرایط استاندارد بایگانی شده و همچنین داده‌های نهایی و متادیتا در یک مخزن امن برای استفاده‌های آتی ذخیره گردند.

در نهایت، طراحی آزمایش باید به گونه‌ای باشد که امکان به‌روزرسانی روش‌ها و ورود فناوری‌های جدید به ساختار اصلی پژوهش فراهم شود. استقلال آزمایش از افراد خاص و آموزش جامع کارگران محلی و کارشناسان (که نقش محوری در اجرای دقیق پروتکل‌های داده‌برداری ایفا می‌کنند) ضامن حفظ یکپارچگی آزمایش در بلندمدت است.

۳-۶. پژوهش‌های نظام‌های زراعی در مزارع کشاورزان

در بسیاری از موارد، ماهیت اهداف پژوهشی ایجاب می‌کند که مطالعات نظام‌های زراعی در شرایط واقعی و در مزارع فعال کشاورزان انجام پذیرد. این رویکرد پژوهشی به‌ویژه در پنج مورد زیر برتری محسوسی نسبت به مطالعات ایستگاهی دارد (Ellis and Paustian, 2024; Tripp and Woolley, 1989):

• **پژوهش‌هایی در مقیاس کلان،** مطالعات مربوط به اثرات پوشش گیاهی، الگوهای استفاده از اراضی، مباحث اقتصادی، راهکارهای بازاریابی و ساختار مالی واحدهای کشاورزی که نیازمند بررسی در شرایط واقعی و گسترده هستند.

1. Backup

• **مطالعات تعاملات پیچیده**، پژوهش‌هایی که بر تعاملات متقابل سیستم‌ها تمرکز دارند، مانند مدیریت یکپارچه آفات با تأکید بر کنترل بیولوژیک، که در محیط مزارع نتایج واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهند.

• **بررسی مسائل اجتماعی و زیست‌محیطی**، تحقیقاتی که اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی نظام‌های زراعی را در سطح کلان ارزیابی می‌کنند و نیازمند داده‌های میدانی از شرایط واقعی هستند.

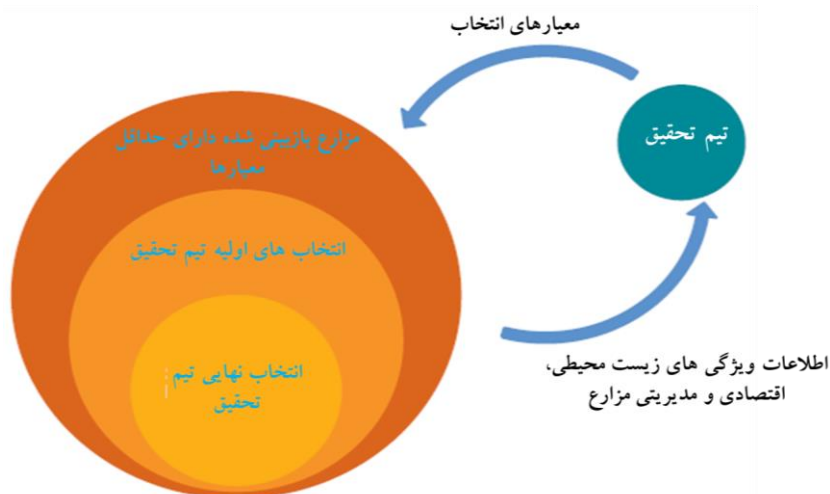
• **مطالعات تأثیر تغییرات محیطی**، پژوهش‌های مربوط به تعامل بین ویژگی‌های محیطی (مانند نوع خاک، بافت، یا توپوگرافی) و مدیریت زراعی، مانند ارزیابی روش‌های خاک‌ورزی در اراضی شیب‌دار که شبیه‌سازی دقیق آن در ایستگاه‌های تحقیقاتی دشوار است.

• **تحقیقات کاربردی بهبود مدیریت**، مطالعاتی که هدف آنها توسعه روش‌های مدیریتی جدید است و نیازمند تخصص یا تجهیزات خاصی هستند که ممکن است در ایستگاه‌های تحقیقاتی موجود نباشند.

گذار از محیط کنترل‌شده ایستگاه‌های تحقیقاتی به شرایط واقعی مزارع کشاورزان، گامی ضروری برای اطمینان از کاربردی بودن و پذیرش فناوری‌های نوین در نظام‌های زراعی است. با این حال، اجرای موفقیت‌آمیز این نوع پژوهش‌ها با پیچیدگی‌های اجرایی و علمی خاصی همراه است که عدم توجه به آن‌ها می‌تواند اعتبار نتایج را مخدوش سازد. برای مدیریت این چالش‌ها، فرآیند پژوهش در مزرعه^۱ نیازمند اتخاذ تدابیر ویژه‌ای در دو محور اساسی است: نخست، گزینش دقیق مکان اجرا که باید نماینده واقعی شرایط منطقه باشد و دوم، طراحی روش‌مند آزمایش که بتواند محدودیت‌های اجرایی کشاورز را با الزامات آماری تلفیق نماید. در ادامه، این دو رکن کلیدی به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۶-۱. معیارها و فرآیند گزینش مزارع هدف

فرآیند انتخاب مزارع کشاورزی برای اجرای پژوهش‌های میدانی نظام‌های زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این انتخاب معمولاً طی فرآیندی تکراری از جمع‌آوری اطلاعات و تصمیم‌گیری انجام می‌پذیرد (شکل ۳-۳). در این مسیر، تیم تحقیقاتی ضمن بررسی مزارع کشاورزان مختلف، ممکن است طرح آزمایشی را نیز متناسب با شرایط مزارع موجود تعدیل کند. اگرچه شناسایی اولیه مزارع در مرحله تدوین پروپوزال امکان‌پذیر است، اما انتخاب نهایی بهتر است پس از تأمین قطعی بودجه پژوهش صورت گیرد. مهم‌ترین اصل در این فرآیند، کنترل و به حداقل رساندن متغیرهای مخدوش‌کننده است که این متغیرها به طور مستقیم به اهداف خاص پژوهش وابسته هستند. به عنوان مثال، در مطالعات تأثیر مدیریت زراعی بر ویژگی‌های خاک، عواملی مانند موقعیت جغرافیایی مزرعه یا پوشش گیاهی مجاور ممکن است چندان حائز اهمیت نباشند، در حالی که نوع خاک، سنگ بستر و سابقه کاربری اراضی از عوامل تعیین‌کننده محسوب می‌شوند. در مقابل، در پژوهش‌های مربوط به جمعیت‌شناسی آفات، پارامترهایی مانند زیستگاه‌های اطراف، شرایط میکروکلیمایی و وسعت مزرعه از ملاحظات اساسی به شمار می‌آیند. پرواضح است که با افزایش تنوع تخصص‌های دخیل در پژوهش، دامنه متغیرهای مخدوش‌کننده نیز گسترش می‌یابد؛ ازاین‌رو، شناسایی مزارعی که تمامی الزامات کنترل این متغیرها را برآورده سازند، به چالشی پیچیده بدل می‌گردد. این پیچیدگی لزوم برنامه‌ریزی دقیق و انعطاف‌پذیری در طراحی پژوهش را دوچندان می‌سازد (Drinkwater, 2002).



شکل ۳-۳. فرآیند تناوبی انتخاب مزارع پژوهشی: از غربال‌گری اولیه تا گزینش نهایی بر اساس معیارهای تیم تحقیق.
شکل از: Drinkwater (2002).

انتخاب صحیح مزرعه، سنگ بنای موفقیت در پژوهش‌های میدانی است. رعایت فرآیند گام‌به‌گام زیر می‌تواند به تیم تحقیق در گزینش هوشمندانه مزارع هدف کمک کند (جدول ۳-۵).

جدول ۳-۵. فرآیند گام‌به‌گام و معیارهای انتخاب مزارع کشاورزان برای پژوهش‌های نظام‌های زراعی

گام اجرایی	شرح اقدامات و الزامات
۱. آماده‌سازی تیم	اطمینان از تسلط تمامی اعضای تیم تحقیق بر متدولوژی و چالش‌های خاص پژوهش در مزرعه پیش از شروع فرآیند انتخاب.
۲. تعیین معیارهای غربالگری	تعریف شفاف معیارهای اصلی انتخاب شامل: موقعیت مکانی، مقیاس مزرعه، نوع محصول، بافت خاک و سابقه مدیریتی.
۳. ارزیابی اولیه (پایش)	شناسایی و بازدید مقدماتی از مزارع بالقوه جهت جمع‌آوری اطلاعات پایه و مشورت اولیه با مالکان.
۴. توسعه بانک مزارع	در مطالعات گسترده، شناسایی تعداد بیشتری از مکان‌های بالقوه (بیش از نیاز نهایی) برای داشتن حق انتخاب پس از اعمال معیارهای دقیق.

ادامه جدول ۳-۵

گام اجرایی	شرح اقدامات و الزامات
۵. بازدید تخصصی و گروهی	انجام بازدیدهای میدانی با حضور تیمی از متخصصان رشته‌های مختلف (خاک، زراعت، گیاه‌پزشکی) برای تأیید فنی نهایی مزارع.
۶. آزمون‌های تشخیصی	انجام آنالیزهای اولیه (مانند آزمون خاک یا پایش وضعیت آفات) به عنوان داده‌های تکمیلی برای تصمیم‌گیری نهایی.
۷. تعیین مزارع جایگزین (ذخیره)	انتخاب و حفظ چند مزرعه به عنوان گزینه جایگزین برای مدیریت ریسک انصراف کشاورز یا تغییر ناگهانی برنامه کشت.
۸. ارزیابی عامل انسانی	اولویت دادن به مزارعی که کشاورزان آن‌ها دارای انگیزه بالا، روحیه مشارکت‌جو و ترجیحاً سابقه همکاری در طرح‌های تحقیقاتی باشند.
۹. نظام انگیزشی و جبران خدمت	پیش‌بینی سازوکار جبران زحمات کشاورز (پرداخت مالی یا ارائه خدمات فنی) و طراحی آزمایش‌های تکمیلی کوتاه‌مدت برای حل مشکلات فوری آن‌ها.

جهت نظام‌مند کردن فرآیند انتخاب و اطمینان از قابلیت مقایسه مزارع مختلف، استفاده از یک فرم ارزیابی معیارمحور توصیه می‌شود. این فرم به تیم تحقیق کمک می‌کند تا مزارع بالقوه را بر اساس معیارهای یکسان ارزیابی کرده و بهترین گزینه‌ها را برای اجرای پژوهش در مزرعه انتخاب نماید (جدول ۳-۶).

جدول ۳-۶. نمونه فرم معیارمحور برای ارزیابی و انتخاب مزرعه همکار (پژوهش در مزرعه)

اطلاعات پایه مزرعه

نام کشاورز همکار: ---، آدرس/مختصات GPS مزرعه: ---، ارزیاب (پژوهشگر): ---، تاریخ بازدید: ---

ویژگی‌های اختصاصی مزرعه	معیار ارزیابی	توضیحات	امتیاز (۱= ضعیف، ۵= عالی)
معیارهای فیزیکی (یکنواختی)	نوع خاک و بافت	آیا بافت خاک (مثلاً لومی) برای اهداف پژوهش مناسب و در سطح مزرعه یکنواخت است؟	

ادامه جدول ۳-۶			
ویژگی‌های اختصاصی مزرعه	معیار ارزیابی	توضیحات	امتیاز (۱=ضعیف، ۵=عالی)
معیارهای فیزیکی (یکنواختی)	سابقه مدیریت	سابقه تناوب و مدیریت قبل مزرعه تا چه حد مشخص و یکنواخت است؟ (ارزیابی اثرات موروثی)	
	توپوگرافی و شیب	آیا مزرعه نسبتاً مسطح است تا از ایجاد واریانس ناشی از شیب جلوگیری شود؟	
معیارهای مدیریتی (اجرایی)	سیستم فعلی کشاورز	آیا سیستم فعلی کشاورز (مثلاً حفاظتی، متداول) با اهداف و تیمارهای پژوهش همخوانی دارد؟	
	مقیاس و اندازه	آیا اندازه مزرعه برای اجرای طرح آماری (اندازه کرت‌ها و تکرارها) کافی است؟	
	تجهیزات موجود	آیا کشاورز به ادوات مورد نیاز (تراکتور، کارنده، سمپاش) دسترسی دارد؟	
معیارهای همکاری (انسانی)	علاقه و انگیزه کشاورز	کشاورز تا چه حد نسبت به اهداف پژوهش کنجکاو، علاقه‌مند و مشتاق به همکاری است؟	

ادامه جدول ۳-۶			
ویژگی‌های اختصاصی مزرعه	معیار ارزیابی	توضیحات	امتیاز (۱=ضعیف، ۵=عالی)
معیارهای همکاری (انسانی)	تجربه همکاری قبلی	آیا کشاورز سابقه میزبانی تحقیقات قبلی را داشته و چالش‌های آن را درک می‌کند؟	
	پذیرش ریسک	آیا کشاورز ریسک‌های احتمالی (مانند کاهش عملکرد احتمالی در برخی تیمارها) را می‌پذیرد؟	
معیارهای لجستیکی	دسترسی به مزرعه	آیا دسترسی به مزرعه (جاده) برای تردد پژوهشگران و ادوات در طول سال آسان است؟	
	امنیت تجهیزات	آیا امکان نصب و نگهداری امن تجهیزات (سنسورها، تشکک تبخیر و ...) در مزرعه وجود دارد؟	
جمع‌بندی نهایی ☐ عالی (انتخاب اول) ☐ خوب (انتخاب دوم) ☐ متوسط (ذخیره) ☐ نامناسب			

۳-۶-۲. روش‌شناسی طراحی آزمایش‌ها در مزارع کشاورزان

پژوهش‌های نظام‌های زراعی در بستر مزارع کشاورزان، از طریق رویکردهای اجرایی متعددی قابل پیاده‌سازی است که مهم‌ترین آن‌ها در ادامه تشریح می‌گردد:

• **مقایسه مزارع جفت‌شده:** این روش که متداول‌ترین شیوه مطالعه نظام‌های زراعی در مزارع کشاورزان محسوب می‌شود، بر این اصل استوار است که با انتخاب و تطبیق دقیق مزارع، می‌توان اثرات نامطلوب متغیرهای مخدوش‌کننده را به حداقل رساند. در این طرح پژوهشی، هر جفت مزرعه به منزله یک تکرار آماری در نظر گرفته می‌شود تا امکان به‌کارگیری روش‌های استاندارد تحلیل آماری (مانند آزمون t زوجی) فراهم گردد (Reganold et al., 1993). کارایی این روش زمانی بهینه است که پژوهش از پیچیدگی تخصصی کمتری برخوردار بوده و مزارع مورد مقایسه، توزیع جغرافیایی و محیطی همگنی داشته باشند. اما با افزایش تنوع تخصص‌های درگیر در مطالعه، فرآیند تعیین جفت‌های مناسب دشوارتر می‌شود، زیرا تعداد معیارهای ضروری برای همسان‌سازی مزارع افزایش می‌یابد (Jeanneaux et al., 2022). برای نمونه، در مطالعه تأثیر شدت خاک‌ورزی بر ویژگی‌های خاک، شاید نوع خاک تنها معیار اصلی تطبیق باشد؛ در حالی که در بررسی تأثیر نظام‌های زراعی بر پویایی آفات، مجموعه‌ای از معیارها شامل نوع خاک، مساحت مزرعه، ریزاقليم و پوشش گیاهی حاشیه مزارع باید همسان‌سازی شوند. واضح است که اگر مزارع جفت‌شده از نظر جغرافیایی پراکنده باشند یا در ویژگی‌های محیطی کلیدی (مانند بافت خاک یا اکولوژی منظر) تفاوت فاحش داشته باشند، مقایسه آن‌ها بدون کنترل آماری این متغیرهای مخدوش‌کننده (مانند استفاده از کوواریانس)، به نتایج معتبری نخواهد انجامید. بنابراین، این روش علی‌رغم سادگی ظاهری، مستلزم وسواس علمی در مرحله‌گزینش مزارع و پایش دقیق تمام عوامل محیطی اثرگذار است.

• **مقایسه گروه‌های مزارع^۱:** در شرایطی که امکان جفت‌سازی نظریه‌نظیر مزارع وجود ندارد، روش مقایسه گروهی با بهره‌گیری از تحلیل‌های آماری چندمتغیره، جایگزینی کارآمد محسوب می‌شود (Wander and Bollero, 1999). این رویکرد با رفع محدودیت نیاز به تطابق دقیق تک‌تک مزارع، انعطاف‌پذیری قابل‌توجهی در فرآیند نمونه‌برداری ایجاد می‌کند. در این روش، مزارع بر مبنای متغیرهای محیطی یا شیوه‌های مدیریتی مشابه طبقه‌بندی می‌شوند، به گونه‌ای که توزیع متغیرهای مخدوش‌کننده در میان گروه‌ها متوازن گردد (Bojneck and Latruffe, 2013). اگرچه این گروه‌بندی امکان مقایسه نظام‌های زراعی را در مقیاس‌های وسیع‌تر و شرایط واقعی‌تر فراهم می‌آورد، اما دستیابی به نتایج معتبر در آن، مستلزم داشتن حجم نمونه کافی و تسلط بر روش‌های آماری پیشرفته است. مزیت راهبردی این روش، توانایی تفکیک و بررسی همزمان تأثیر عوامل محیطی (Needelman et al., 1999) و مدیریتی (Drinkwater et al., 1995) بر عملکرد کل نظام زراعی است که آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای مطالعات پیچیده چندعاملی تبدیل می‌کند.

• **مطالعه موردی عمیق^۲:** ارزش و کارایی این روش زمانی آشکار می‌شود که نیاز به درکی عمیق (اعم از کمی و کیفی) از یک نظام زراعی منحصربه‌فرد وجود داشته باشد. برخلاف پژوهش‌های مقایسه‌ای که بر سنجش اثرات شیوه‌های مدیریتی مختلف متمرکز هستند، این روش بر تحلیل تعاملات درونی و پویایی‌های یک نظام زراعی مشخص معطوف است (Steinheimer et al., 1998). در این رویکرد، هدف اصلی واکاوی جزئیات عملکردی هر نظام به صورت مجزا است، نه قیاس آن با سایر نظام‌ها. از این رو، این روش به‌ویژه در بررسی نظام‌های زراعی نوآورانه که توسط خود کشاورزان توسعه یافته‌اند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعات موردی نقش بسزایی در تولید

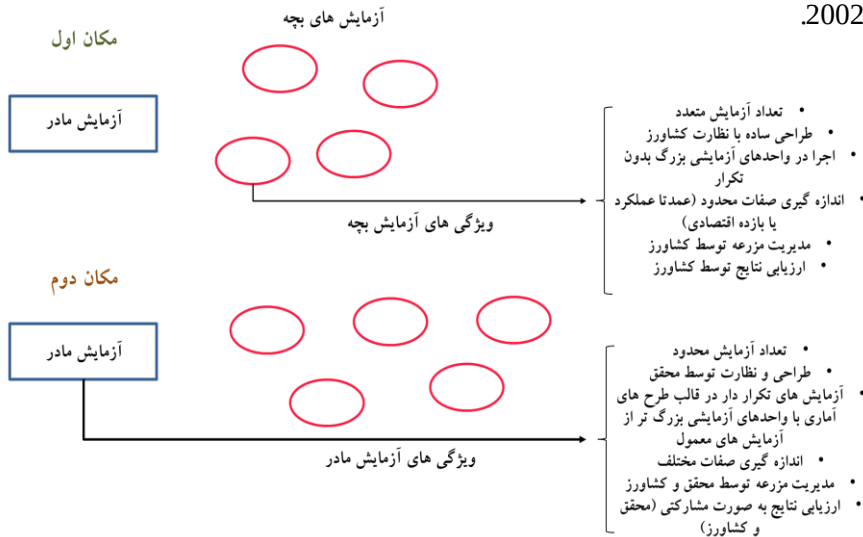
1. Farm group comparison

2. In-depth case study

فرضیات جدید و ارائه بینش‌های نوین درباره عملکرد سیستم در شرایط واقعی مزرعه ایفا می‌کنند، چراکه اغلب منجر به کشف روابط و مکانیسم‌های پنهانی می‌شوند که در مطالعات مقایسه‌ای وسیع، مغفول می‌مانند. مزیت راهبردی این روش، توانایی ارائه تحلیلی همه‌جانبه از تمامی ابعاد یک نظام زراعی، از مؤلفه‌های فنی و مدیریتی تا پیامدهای اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی، در مقیاس مزرعه است؛ ویژگی‌ای که آن را به ابزاری ارزشمند برای توسعه دانش بنیادین در علوم زراعی تبدیل می‌کند (Robert, 2013).

• **آزمایش‌های مادر-بچه**^۱: این روش پژوهشی پیشرفته و مشارکتی، با تلفیق هوشمندانه مطالعات ایستگاهی و مزرعه‌ای، چارچوبی جامع برای توسعه و بومی‌سازی فناوری‌های نوین فراهم می‌آورد. ساختار این طرح از دو جزء اصلی تشکیل شده است که شامل (۱) آزمایش مادر که این آزمایش در ایستگاه‌های تحقیقاتی (یا مزارع مرکزی) تحت مدیریت کامل پژوهشگران اجرا می‌شود. ویژگی بارز آن، بررسی طیف وسیعی از تیمارها (مثلاً ۱۰ تا ۲۰ گزینه مدیریتی یا ژنوتیپ) در قالب طرح‌های آماری دقیق (مانند بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ یا ۴ تکرار) است تا امکان تحلیل دقیق اثرات متقابل و مکانیسم‌های فیزیولوژیک فراهم گردد. (۲) آزمایش‌های بچه که به آزمایش‌ها اقماری نیز معروف هستند و مستقیماً در مزارع متعدد کشاورزان و با مشارکت فعال آنان اجرا می‌گردند. برخلاف آزمایش مادر، در اینجا تنها زیرمجموعه‌ای کوچک از تیمارهای برتر (مثلاً ۲ تا ۳ تیمار منتخب) در کنار شاهد کشاورز و معمولاً بدون تکرار در هر مزرعه (هر مزرعه حکم یک تکرار را دارد) کشت می‌شوند (Pawera et al., 2024). این ساختار دوگانه (که ویژگی‌های کلیدی آن در شکل ۴-۳ نشان داده شده است)، مزیتی راهبردی ایجاد می‌کند به نحوی که آزمایش‌های مادر امکان کنترل دقیق متغیرها و درک چرایی پدیده را فراهم می‌کنند، در حالی که شبکه وسیع آزمایش‌های بچه، اعتبارسنجی یافته‌ها در شرایط واقعی

و متنوع اکولوژیک و مدیریتی را میسر می‌سازد. افزون بر این، مشارکت مستقیم کشاورزان در انتخاب تیمارها برای مزارع خود، فرآیند پذیرش نوآوری را تسریع کرده و بازخورد واقعی از محدودیت‌های اجرایی را به پژوهشگران منتقل می‌کند (Snapp, 2002).



شکل ۴-۳. ویژگی‌های آزمایش‌های مشارکتی مادر - بچه.
برگرفته از (Snapp (2002) با اندکی تغییرات.

۳-۷. تأمین مالی پژوهش‌های نظام‌های زراعی

به عنوان یک اصل، توصیه می‌شود برنامه‌ریزی برای تأمین بودجه پروژه‌های بین‌رشته‌ای، از جمله پژوهش‌های نظام‌های زراعی، زودتر از تحقیقات متداول آغاز شود (Bark et al., 2024). در مطالعات تک‌رشته‌ای، محققان معمولاً پس از تعیین اهداف و طراحی برنامه آزمایشی، برآورد بودجه انجام می‌دهند، چراکه با نیازهای مالی حوزه تخصصی خود آشنا هستند. اما این رویکرد در پروژه‌های بلندمدت چندرشته‌ای کمتر کارآمد است. از این رو، ضروری است برنامه‌ریزی برای جلب حمایت‌های مالی در اسرع وقت آغاز گردد و در طول اجرای پروژه نیز امکان بازنگری و تعدیل توزیع منابع وجود داشته باشد. به طور کلی، رابطه مستقیمی میان تأمین منابع مالی با مدت زمان و کیفیت

اجرای پروژه‌های بین‌رشته‌ای وجود دارد (Klein, 2008). پروژه‌های نظام‌های زراعی که بیش از ده سال به طول انجامیده‌اند و همچنان ادامه دارند، عمدتاً از پشتوانه‌های مالی متعدد و مطمئنی برخوردار بوده‌اند. در مقابل، برخی طرح‌ها به دلیل کمبود بودجه متوقف شده یا به اهداف نهایی خود نرسیده‌اند. نمونه بارز این مورد، پروژه توسعه کشاورزی حفاظتی در ایران است که در ابتدا با حمایت مالی مرکز بین‌المللی تحقیقات ذرت و گندم^۱ آغاز شد، اما با قطع این حمایت‌ها به دلیل تحریم‌های بین‌المللی، نتوانست به نتایج مطلوب دست یابد. حتی در پروژه‌هایی که از پشتیبانی مالی اولیه برخوردارند، معمولاً برای تحقیقات تکمیلی و نوآورانه پس از مرحله آزمایشی، نیاز به جذب بودجه خارج از مؤسسه تحقیقاتی یا دانشگاه وجود دارد. حمایت‌های مالی این نهادها عموماً تنها هزینه‌های سال‌های اولیه را پوشش می‌دهد و برای اجرای پژوهش‌های بلندمدت، شناسایی منابع مالی متنوع ضروری است.

در پروژه‌های بزرگ و پیچیده، بهتر است در مراحل اولیه، منابع مالی متعددی شناسایی شود و صرفاً به حمایت‌های مؤسسه یا دانشگاه متبوع اکتفا نشود. در جلسات تیم تحقیقاتی، همان‌گونه که درباره پروپوزال، روش اجرا و مباحث علمی بحث می‌شود، گفت‌وگو در مورد مسائل مالی و شیوه تأمین آن نیز باید صورت گیرد تا اهداف پیشنهادی برای حامیان مالی، شفاف و قابل دسترس باشد. برای جلوگیری از اختلال در روند پژوهش، نخست باید برآورد دقیقی از نیازهای مالی انجام شود. دوم، اهداف و برنامه کاری باید با مأموریت تعیین شده در پروپوزال همسو باشد. سوم، بودجه باید به صورت منطقی و عادلانه میان افراد و مؤسسات مشارکت‌کننده توزیع گردد. همانند دیگر جنبه‌های برنامه‌ریزی پروژه (مانند انتخاب تیم‌ها)، تعیین و تخصیص بودجه نیز فرآیندی مشارکتی است که مستلزم برگزاری جلسات متعدد برای بحث و تصمیم‌گیری است. این روش بودجه‌بندی مشارکتی تضمین می‌کند که طراحی آزمایش و تخصیص منابع مالی به موازات یکدیگر و با مشارکت تمام اعضا پیش می‌رود. تأمین مالی پایدار و مدیریت بودجه، پاشنه آشیل بسیاری

از پژوهش‌های بین‌رشته‌ای است. برای عبور از این چالش، کاربست راهبردهای مدیریتی زیر (برگرفته از Pfirman and Martin, 2010) توصیه می‌شود (جدول ۳-۷).

جدول ۳-۷. راهبردهای کلیدی مدیریت مالی و بودجه‌بندی در پژوهش‌های بین‌رشته‌ای

راهبرد مدیریتی	اقدامات اجرایی و نکات کلیدی
۱. تناسب بودجه با اهداف	• تدوین بودجه‌ای واقع‌بینانه که بازتاب‌دهنده محدوده واقعی پروژه باشد. • اتخاذ رویکرد محافظه‌کارانه در تعیین اهداف و درخواست بودجه‌ای اندکی بیش از حد نیاز (به‌عنوان حاشیه اطمینان) برای پوشش ریسک‌های احتمالی.
۲. شفافیت در تخصیص	• پرهیز از کاهش غیرمنطقی هزینه‌ها در مراحل اولیه که می‌تواند منجر به اختلاف در تیم شود. • تعیین دقیق مسئولیت‌های مالی هر بخش پس از نهایی شدن اهداف.
۳. نقش محوری رهبر تیم	• مشخص کردن سهم هر فرد یا گروه از بار مالی پروژه برای توزیع عادلانه منابع. • اخذ برآورد هزینه‌های تفکیکی از هر یک از اعضای تیم در مرحله پروپوزال.
۴. انعطاف‌پذیری و بازبینی	• نظارت مستمر بر هزینه‌کرد و ایجاد تعادل میان منافع فردی اعضا و نیازهای کلی پروژه. • آمادگی برای بازنگری و تعدیل طرح در مواجهه با محدودیت‌های مالی (که در پروژه‌های بین‌رشته‌ای رایج است).
۵. مدیریت بهینه هزینه‌ها	• استفاده از فرآیند تعدیل بودجه به عنوان فرصتی برای شناسایی و تمرکز بر اولویت‌های کلیدی و حذف اهداف غیرضروری. • ایجاد توازن میان هزینه‌های نگهداری آزمایش و جمع‌آوری داده. • تخصیص ردیف بودجه مشخص برای جبران خدمات کشاورزان همکار (در طرح‌های مزرعه‌ای) و حق‌الزحمه محققان مستقل. • هم‌افزایی در هزینه‌ها (مانند استفاده مشترک از یک نمونه خاک برای چندین آنالیز مختلف).

۳-۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل سوم

این فصل به جنبه‌های عملیاتی برنامه‌ریزی و اجرای پژوهش‌های نظام‌های زراعی پرداخت و چارچوبی گام به گام برای گذار از تئوری به اجرا ارائه داد. فرآیند تدوین پروژه از بررسی پیشینه تا طراحی نهایی آزمایش تشریح شد و برای افزایش کارایی این فرآیند، ابزارهای عملیاتی معیارمحور شامل چک‌لیست برنامه‌ریزی پروژه و ماتریس ارزیابی ریسک معرفی گردیدند. در ادامه، تفاوت‌های کلیدی اجرای پژوهش در ایستگاه‌های تحقیقاتی در مقابل مزارع کشاورزان بررسی شد. برای پژوهش‌های ایستگاهی، بر چالش‌های طراحی تیمارهای سیستمی و پیامدهای عملیاتی-اقتصادی استفاده از کرت‌های بزرگ (شامل تحلیل هزینه-فایده و نیاز به ادوات واقعی مزرعه) تأکید گردید. برای پژوهش‌های در مزرعه، معیارهای انتخاب مزارع همکار بررسی و یک نمونه فرم ارزیابی مزرعه برای استانداردسازی این فرآیند ارائه شد. همچنین روش‌های مختلف طراحی آزمایش در مزرعه، از جمله مقایسه جفت مزارع و طرح پیشرفته مادر-بچه، معرفی شدند.

در نهایت، با توجه به ماهیت بلندمدت این پژوهش‌ها، اهمیت حیاتی مدیریت آزمایش‌ها و پروتکل‌های داده‌مورد تأکید قرار گرفت. دستورالعمل‌های روشنی برای شیوه‌های استاندارد برداشت داده، ایجاد پایگاه داده مرکزی، تدوین متادیتا و رویه‌های بایگانی داده‌ها ارائه شد تا از اعتبار و ماندگاری نتایج در طول زمان اطمینان حاصل شود. با نهایی شدن برنامه‌ریزی و اجرا، فصل چهارم به سراغ یکی از پیچیده‌ترین و حیاتی‌ترین جنبه‌های این پژوهش‌ها، یعنی طراحی و تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت خواهد رفت.

منابع

- Azarbad, H. (2022). Conventional vs. organic agriculture—which one promotes better yields and microbial resilience in rapidly changing climates?. *Frontiers in Microbiology*, 13, 903500.
- Bark, R. H., Kragt, M. E., & Robson, B. J. (2016). Evaluating an interdisciplinary research project: Lessons learned for organisations, researchers and funders. *International journal of project management*, 34(8), 1449-1459.
- Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J. M., Faloya, V., & Saulas, P. (2009). Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agronomy for sustainable development*, 29(1), 73-86.
- Bojnec, Š., & Latruffe, L. (2013). Farm size, agricultural subsidies and farm performance in Slovenia. *Land use policy*, 32, 207-217.
- Carof, M., Godinot, O., & Le Cadre, E. (2022). Biodiversity-based cropping systems: A long-term perspective is necessary. *Science of the Total Environment*, 838, 156022.
- Drinkwater, L. E. (2002). Cropping systems research: Reconsidering agricultural experimental approaches. *HortTechnology*, 12(3), 355-361.
- Drinkwater, L. E., Letourneau, D. K., Workneh, F. A. H. C., Van Bruggen, A. H. C., & Shennan, C. (1995). Fundamental differences between conventional and organic tomato agroecosystems in California. *Ecological applications*, 5(4), 1098-1112.
- Easton, G. S., & Rosenzweig, E. D. (2015). Team leader experience in improvement teams: A social networks perspective. *Journal of Operations Management*, 37, 13-30.
- Ellis, E., & Paustian, K. (2024). Importance of on-farm research for validating process-based models of climate-smart agriculture. *Carbon Balance and Management*, 19(1), 16.
- Fortuin, K. P., Van Koppen, C. S. A., & Leemans, R. (2011). The value of conceptual models in coping with complexity and interdisciplinarity in environmental sciences education. *BioScience*, 61(10), 802-814.
- Friedland, A. J., Folt, C. L., & Mercer, J. L. (2018). *Writing successful science proposals*. Yale University Press.
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. John Wiley & sons.
- Heemskerk, M., Wilson, K., & Pavao-Zuckerman, M. (2003). Conceptual models as tools for communication across disciplines. *Conservation Ecology*, 7(3).

- Jaskulska, I., Lemanowicz, J., Dębska, B., Jaskulski, D., & Breza-Boruta, B. (2023). Changes in soil organic matter and biological parameters as a result of long-term strip-till cultivation. *Agriculture*, 13(12), 2188.
- Jeanneaux, P., Desjeux, Y., Enjolras, G., & Latruffe, L. (2022). Farm valuation: A comparison of methods for French farms. *Agribusiness*, 38(4), 786-809.
- Johnston, A. E., & Poulton, P. R. (2018). The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop production and soil fertility; the Rothamsted experience. *European journal of soil science*, 69(1), 113-125.
- Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative agriculture—a literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. *Sustainability*, 15(3), 2338.
- Klein, J. T. (2008). Evaluation of interdisciplinary and transdisciplinary research: a literature review. *American journal of preventive medicine*, 35(2), S116-S123.
- Körschens, M. (2006). The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research—a review. *Plant Soil Environ*, 52(Special Issue), 1-8.
- Koudahe, K., Allen, S. C., & Djaman, K. (2022). Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 343-354.
- Meynard, J. M., Dedieu, B., & Bos, A. P. (2012). Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. *Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic*, 405-429.
- Mulimbi, W., Nalley, L. L., Strauss, J., & Ala-Kokko, K. (2023). Economic and environmental comparison of conventional and conservation agriculture in South African wheat production. *Agrekon*, 62(2), 133-151.
- Needelman, B. A., Wander, M. M., Bollero, G. A., Boast, C. W., Sims, G. K., & Bullock, D. G. (1999). Interaction of tillage and soil texture biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1326-1334.
- Pawera, L., Manickam, R., Wangungu, C., Bonnarith, U., Schreinemachers, P., & Ramasamy, S. (2024). Guidance on farmer participation in the design, testing and scaling of agricultural innovations. *Agricultural Systems*, 218, 104006.
- Peterson, C., L.E. Drinkwater, and P. Wagoner. 1999. *Farming Systems Trial*. Rodale Institute: Kutztown, PA.

-
- Pfirman, S., & Martin, P. J. (2010). Facilitating interdisciplinary scholars. *The Oxford handbook of interdisciplinarity*, 387-403.
- Reganold, J. P., Palmer, A. S., Lockhart, J. C., & Macgregor, A. N. (1993). Soil quality and financial performance of biodynamic and conventional farms in New Zealand. *Science*, 260(5106), 344-349.
- Robert, K. (2013). *Case study research and applications: Design and methods*. Sage publications.
- Robertson, G. P., Allen, V. G., Boody, G., Boose, E. R., Creamer, N. G., Drinkwater, L. E., ... & Wall, D. H. (2008). Long-term agricultural research: A research, education, and extension imperative. *BioScience*, 58(7), 640-645.
- Shanmugam, P. M., Sangeetha, S. P., Prabu, P. C., Varshini, S. V., Renukadevi, A., Ravisankar, N., ... & Gopi, M. (2024). Crop–livestock-integrated farming system: A strategy to achieve synergy between agricultural production, nutritional security, and environmental sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1338299.
- Shennan, C., Drinkwater, L. E., van Bruggen, A. H., Letourneau, D. K., & Workneh, F. (1991, February). Comparative study of organic and conventional tomato production systems: An approach to on-farm systems studies. In *Sustainable agriculture research and education in the field: A proceedings* (pp. 109-132). National Academy Press Washington, DC.
- Singh, A. S., & Masuku, M. B. (2012). An insight in statistical techniques and design in agricultural and applied research. *World Journal of Agricultural Sciences*, 8(6), 568-584.
- Snapp, S. (2002). Quantifying farmer evaluation of technologies: the mother and baby trial design. *Quantitative analysis of data from participatory methods in plant breeding*, 9.
- Steinheimer, T. R., Scoggin, K. D., & Kramer, L. A. (1998). Agricultural chemical movement through a field-size watershed in Iowa: subsurface hydrology and distribution of nitrate in groundwater. *Environmental science & technology*, 32(8), 1039-1047.
- Tripp, R., & Woolley, J. (1989). The planning stage of on-farm research: Identifying factors for experimentation. *CIMMYT*.
- Wander, M. M., & Bollero, G. A. (1999). Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 961-971.

فصل چهارم

طراحی و تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی

مشاوره با متخصص آمار پس از اتمام آزمایش، غالباً محدود به درخواست احیای آزمایشی مرده است. او شاید بتواند تشخیص دهد که چرا آزمایش ناکام ماند (رونالد فیشر)

آزمایش‌های بلندمدت که هسته اصلی پژوهش‌های نظام‌های زراعی را تشکیل می‌دهند، از نظر طراحی و محتوای آماری به‌طور قابل توجهی با آزمایش‌های متداول تفاوت دارند. هر آزمایش بلندمدت مجموعه‌ای از مسائل منحصر به فرد در برنامه‌ریزی، اجرا، تجزیه و تحلیل و تفسیر دارد که نیازمند توجه دقیق است. همان‌طور که روش‌های متعددی برای طراحی آزمایش‌های نظام‌های زراعی وجود دارد، روش‌های مختلفی نیز برای تجزیه و تحلیل داده‌های این آزمایش‌ها پیشنهاد شده است. نکته حائز اهمیت این است که در هر آزمایش بلندمدت، طراحی آزمایش و روش‌های آماری مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل داده‌ها باید با سؤالات، فرضیه‌ها و اهداف پژوهش هماهنگ باشند. بنابراین، دستورالعمل واحدی برای طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل داده‌ها وجود ندارد. همچنین باید توجه داشت که طراحی و تجزیه و تحلیل آزمایش‌های بلندمدت و چندبعدی نظام‌های زراعی می‌تواند چالش برانگیز باشد. از این رو، حضور متخصص یا تیم آماری

مسلط به آزمایش‌های پیچیده در گروه تحقیق ضرورت دارد؛ چرا که این امر، طراحی دقیق و منطبق با اهداف پژوهش و همچنین تحلیل معتبر نتایج را تضمین می‌کند. این فصل، با مروری بر تاریخچه و ضرورت آزمایش‌های بلندمدت آغاز شده و ضمن تبیین اصول طراحی (نظیر طرح‌های پلکانی و تناوبی)، بر چالش‌های آماری ویژه مانند همبستگی زمانی تمرکز دارد. در ادامه، با ارائه یک مطالعه موردی محاسباتی جامع و کدهای کاربردی نرم‌افزار SAS، فرآیند عملیاتی تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل‌های آمیخته^۱ و انتخاب ساختار کوواریانس مناسب تشریح می‌گردد. در نهایت، ارائه راهنمای تصویری انتخاب مدل و مباحث پیشرفته‌ای همچون تحلیل روندهای غیرخطی^۲، مسیر پژوهشگر را برای استخراج نتایج معتبر از داده‌های پیچیده هموار می‌سازد.

۴-۱. تاریخچه طراحی آزمایش‌های بلندمدت

تغییر نگرش به سمت سیاست‌های کشاورزی پایدار و نظام‌های زراعی کم‌نهاد، موجب احیای توجه به پژوهش‌های بلندمدت زراعی شده است. در حال حاضر، ده‌ها آزمایش تحقیقاتی بلندمدت زراعی با بیش از نیم قرن سابقه اجرا در جهان وجود دارد که بیشتر آنها در کشورهای پیشرفته کشاورزی مانند ایالات متحده آمریکا و انگلستان در حال انجام است (Johnston and Poulton, 2018). متأسفانه در ایران، سابقه مدون و مشخصی از چنین آزمایش‌های بلندمدت زراعی در دسترس نیست. این در حالی است که نتایج اینگونه آزمایش‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره جنبه‌های مختلف نظام‌های زراعی ارائه می‌دهد. تغییرات و اصلاحات اعمال شده در این آزمایش‌ها طی سال‌های متمادی، به‌واقع بازتابی از تحول نگرش‌های مدیریت زراعی در مناطق و کشورهای مجری این طرح‌هاست. دستاورد این مطالعات بلندمدت، پذیرش گسترده بسیاری از اصول مدیریت زراعی و خاک بوده است که امروزه نه تنها در کشورهای مجری، بلکه در سطح جهانی در

1. Mixed models

2. Non-linear trend analysis

حال اجرا می‌باشد. جدول ۴-۱ فهرستی از مهم‌ترین طرح‌های پژوهشی با بیش از ۵۰ سال سابقه را نشان می‌دهد که هم‌اکنون در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی آمریکا در حال اجرا هستند.

جدول ۴-۱. فهرست برخی از آزمایش‌های بلندمدت زراعی فعال در ایالات متحده آمریکا

سال شروع	محل اجرا	نام پروژه	گیاه اصلی	تعداد تیمار	تعداد تکرار	هدف مطالعه
۱۹۴۱	USDA ^۱ ، مونتانا،	تحقیقات فرسایش مک کریدی	ذرت، سویا	۷	۴	ارزیابی فرسایش خاک
۱۹۵۱	دانشگاه کورتل، نیویورک،	آهک یک	ذرت، یونجه، شبدر	۱۱	۸	تاثیر آهک و الگوی کشت
۱۹۵۲	دانشگاه پرودو، ایندیانا،	کود- تناوب	ذرت، سویا، گندم	۲۲	۲	تاثیر کود- تناوب
۱۹۵۳	دانشگاه آیرن، آلاباما،	مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم	متنوع	۱۶	۳	ارزیابی حاصلخیزی خاک
۱۹۵۴	دانشگاه داکوتای شمالی، فارگو،	برموگراس چندساله	برموگراس	۶	۲	تاثیر نیتروژن
۱۹۵۵	دانشگاه لویزیانا، بوسیرسیتی،	گیاهان پوششی زمستانه	پنبه	۸	۴	تاثیر نیتروژن و بقولات
۱۹۵۵	دانشگاه داکوتای شمالی، تایدواتر،	مطالعه درازمدت فسفر	سویا، ذرت	۵×۴	۳	ارزیابی فسفر باقیمانده در خاک

1. United states department of agriculture

ادامه جدول ۴-۱

هدف مطالعه	تعداد تکرار	تعداد تیمار	گیاه اصلی	نام پروژه	محل اجرا	سال شروع
تاثیر نیتروژن	۴	۲×۳×۴	ذرت	مقادیر و منابع کود نیتروژن	دانشگاه مینوسوتا، لمبرتون،	۱۹۵۹
ارزیابی حاصلخیزی خاک	۵	۱۸	ذرت، سویا	کودهای نیتروژن، فسفر، پتاسیم	دانشگاه کانزاس، ترابیون،	۱۹۶۱
ارزیابی حاصلخیزی خاک	۲	۴×۴×۴	متنوع	حاصلخیزی	دانشگاه ویسکانسین،	۱۹۶۲
تاثیر کودهای آلی	۳	۵	متنوع	کودهای آلی	ارلینگتون،	
pH خاک	۳	۵	متنوع	pH حاصلخیزی	USDA،	۱۹۶۳
تاثیر عملیات آماده سازی زمین	۴	۴	گندم، نخود سبز	توالی گندم-نخود	آروگون،	

اقتباس از آینه بند (۱۳۸۴) با تغییراتی.

تا پیش از اواسط قرن نوزدهم، هیچ یک از آزمایش‌های بلند مدت زراعی از طرح‌های تکراری برخوردار نبودند. قدیمی‌ترین آزمایش بلند مدت دارای تکرار، آزمایش تناوبی کالار^۱ در ایالت آلابامای آمریکا است که از سال ۱۹۱۱ آغاز شده است. با این حال، حتی در این آزمایش نیز توزیع تیمارهای مربوط به حاصلخیزی خاک درون بلوک‌ها به صورت تصادفی انجام نشده بود. بسیاری از پژوهش‌های درازمدت زراعی با رویکرد جدید و منطبق با اصول طرح‌های پژوهشی، عمدتاً از دهه ۱۹۵۰ به بعد آغاز شده‌اند (جدول ۴-۱). این آزمایش‌ها شامل تیمارهای تکراری در قالب طرح‌های آزمایشی استاندارد مانند

بلوک‌های کامل تصادفی، آرایش کرت‌های خرد شده و طرح‌های فاکتوریل هستند که امکان انجام تحلیل‌های آماری دقیق و ارزیابی علمی نتایج را فراهم می‌سازند. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، انگلستان در کنار آمریکا - و حتی پیش از آن - در زمینه تحقیقات بلندمدت زراعی پیشگام بوده است. مجموعه آزمایش‌های مرکز تحقیقات روثامستد^۱ با سابقه‌ای بیش از یک قرن، مهم‌ترین مطالعات درازمدت زراعی در انگلستان به شمار می‌رود. این ایستگاه پژوهشی در حال حاضر بین ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کرت آزمایشی با سوابق چندساله تا بیش از ۱۰۰ سال را مدیریت می‌کند. نکته قابل توجه آنکه نمونه‌ها و داده‌های حاصل از طرح‌های پژوهشی قدیمی این مرکز همچنان جمع‌آوری، ثبت و در گزارش‌های سالانه منتشر می‌شوند.^۲

با وجود چالش‌های اجرایی و هزینه‌های بالای نگهداری، تداوم آزمایش‌های بلندمدت زراعی به دلایل راهبردی متعددی که در جدول ۴-۲ خلاصه شده است، اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

جدول ۴-۲. دلایل و توجیهات علمی برای اجرا و تداوم آزمایش‌های بلندمدت زراعی

محور اهمیت	شرح و کارکرد در پژوهش‌های نظام‌های زراعی
ارزش آموزشی و پژوهشی	این آزمایش‌ها به‌عنوان اسناد زنده و معتبر مطالعات زراعی، آزمایشگاهی طبیعی و منبعی ارزشمند برای آموزش دانشجویان و پژوهشگران محسوب می‌شوند.
پایش تغییرات تدریجی	امکان رصد تغییراتی که دینامیک کندی دارند (مانند تغییرات ماده آلی خاک یا شیوع پاتوژن‌های خاک‌زی) و در آزمایش‌های کوتاه‌مدت قابل تشخیص نیستند، فراهم می‌شود.
بستر تحقیقات جامع	کرت‌های آزمایشی تثبیت‌شده با سطوح متفاوت حاصلخیزی، بستری آماده و ایده‌آل برای تعریف پروژه‌های تکمیلی و چندجانبه (مانند فیزیولوژی یا میکروبیولوژی) ایجاد می‌کنند.

1. Rothamsted research

۲. قابل دسترسی به آدرس <https://repository.rothamsted.ac.uk>

ادامه جدول ۴-۲

محور اهمیت	شرح و کارکرد در پژوهش‌های نظام‌های زراعی
بانک اطلاعات آینده	آرشیو نظام‌مند نمونه‌های گیاهی و خاکی، امکان آنالیزهای مجدد با فناوری‌های پیشرفته آینده و آزمودن فرضیات جدید بر روی داده‌های تاریخی را میسر می‌سازد.
ارزش اکولوژیک	آزمایش‌های بلند مدت تصویر دقیقی از تأثیر تجمعی مدیریت‌های زراعی بر تنوع زیستی، جوامع گیاهی و موجودات زنده خاک در مقیاس‌های زمانی طولانی ارائه می‌دهند.
مرجع مدل‌سازی	داده‌های سری زمانی این آزمایش‌ها، دقیق‌ترین منبع برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های زراعی، به‌ویژه در پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم، به شمار می‌روند.

به نقل از Watson et al., 2024; Liebig et al., 2024

۴-۲. ملاحظات اساسی پیش از آغاز آزمایش‌های بلندمدت

پیش از شروع طراحی آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی، توجه به چند عامل حیاتی ضروری است. مهم‌ترین مسئله، تغییرپذیری مکانی خاک به دلیل وسعت محل اجرای آزمایش است که باید با انتخاب مکان یکنواخت و آگاهی از سابقه تاریخی زمین به حداقل برسد. برای ارزیابی این یکنواختی، روش‌های متعددی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نمونه‌برداری شبکه‌ای خاک، اجرای آزمایش کشت یکنواختی^۱ برای سنجش تغییرات عملکرد، و همچنین بهره‌گیری از روش‌های زمین‌آمار و نقشه‌برداری دقیق اشاره کرد. این ارزیابی‌های اولیه، نه تنها چارچوبی برای نمونه‌برداری‌های آتی فراهم می‌آورند، بلکه نقاط مرجع معتبری نیز برای مقایسه‌های زمانی ایجاد می‌کنند. در طول

1. Uniformity trial

آزمایش کشت یکنواختی نوعی آزمایش زراعی است که در آن، یک رقم واحد در کل سطح مزرعه با عملیات زراعی کاملاً یکسان کشت می‌شود و محصول آن در واحدهای کوچک برداشت و ثبت می‌گردد. هدف اصلی این آزمایش، سنجش ناهمگنی خاک و تعیین شکل و اندازه بهینه کرت‌های آزمایشی برای کاهش خطای آزمایش است (Gomez and Gomez, 1984).

اجرای آزمایش نیز می‌توان با نمونه‌برداری از نقاط مشخص شده در ارزیابی اولیه، تغییرات را ثبت و بررسی کرد. اگرچه این ارزیابی‌های مقدماتی زمان‌بر و هزینه‌بر هستند، اما سرمایه‌گذاری اولیه در این مرحله برای دستیابی به نتایج معتبر در بلندمدت کاملاً ضروری و منطقی است (Radočaj et al., 2023).

در پژوهش‌های نظام‌های زراعی که بر روندها و تغییرات بلندمدت متمرکز هستند، ثبت دقیق داده‌های اولیه پیش از شروع آزمایش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مشخصه‌هایی مانند پتانسیل عملکرد مزرعه و ویژگی‌های خاک در ابتدای آزمایش، نقش کلیدی در درک تغییرات آتی و حتی اصلاح روند پژوهش ایفا می‌کنند. برای مزارعی با پیشینه مدیریتی یکنواخت و تثبیت شده (نظیر تناوب طولانی‌مدت گندم-آیش)، اختصاص یک سال به کشت یکنواخت و ثبت شاخص‌های پایه کفایت می‌کند. در مقابل، در اراضی دارای سابقه مدیریتی ناهمگن (برای مثال، وجود قطعاتی با مدیریت شیمیایی و ارگانیک در کنار هم)، ضروری است بازه‌ای دو تا سه ساله به کشت یکسان و پایش دقیق عملکرد و ویژگی‌های خاک اختصاص یابد تا ضمن کاهش اثرات موروثی پیشین، نقطه شروع^۱ معتبری برای آغاز آزمایش فراهم گردد (Loughin, 2006). علاوه بر این، جمع‌آوری و بایگانی نمونه‌های اولیه مانند خاک و اطلاعات مربوط به جمعیت آفات و علف‌های هرز در ابتدای پروژه، می‌تواند به طور قابل توجهی به تحقیقات آینده کمک نماید.

۳-۴. اصول بنیادین طراحی آزمایش‌های زراعی بلندمدت

طراحی آزمایش‌های زراعی بر سه مفهوم بنیادین استوار است: تصادفی‌سازی^۲، تکرار^۳ و بلوک‌بندی^۴ (قطعه‌بندی) که در آزمایش‌های بلندمدت نیز کاربرد دارند. تصادفی‌سازی به عنوان یکی از اصول کلیدی طراحی آزمایش، با توزیع تصادفی تیمارها بر روی

1. Baseline
2. Randomization
3. Replication
4. Blocking

کرت‌های آزمایشی، موجب کاهش سوگیری و افزایش اعتبار نتایج می‌شود. از سوی دیگر، تکرار اندازه‌گیری‌ها که معمولاً با تغییر و عدم قطعیت همراه هستند، امکان تخمین دقیق‌تر اثرات تیمارها و افزایش صحت و قابلیت اطمینان آزمایش را فراهم می‌آورد. تلفیق تصادفی‌سازی و تکرار برای تخمین خطای آزمایش ضروری است. تعیین تعداد مناسب تکرارها تحت تأثیر دو عامل اصلی قرار دارد: اولاً در شرایطی که نوسان داده‌ها بیشتر باشد - که در آزمایش‌های بلندمدت شایع است - به تکرارهای بیشتری نیاز خواهد بود. ثانیاً برای تشخیص اختلافات کوچک بین تیمارها نیز تعداد تکرار بیشتری مورد نیاز است (Lipsey, 1990). با این حال، افزایش بیش از حد تکرارها به ویژه در آزمایش‌های نظام‌های زراعی با واحدهای آزمایشی بزرگ، موجب دشواری در کنترل عوامل و افزایش هزینه‌های اجرایی می‌شود. بنابراین تعداد تکرارها باید به گونه‌ای تعیین شود که از نظر آماری و اقتصادی بهینه باشد. پژوهشگرانی مانند کوکران و کاکس (Cochran and Cox, 1957) روش‌هایی برای تعیین تعداد تکرار ارائه کرده‌اند.

بلوک‌بندی نیز به عنوان روشی برای طبقه‌بندی واحدهای آزمایشی مشابه، با کنترل تغییرات ناخواسته، دقت تخمین اثر تیمارها را افزایش می‌دهد. البته کارایی این روش تنها پس از اجرای آزمایش قابل ارزیابی است. در آزمایش‌های مزرعه‌ای، بلوک‌بندی باید در جهت عمود بر شیب زمین انجام شود و عدم رعایت این اصل موجب افزایش خطای آزمایش می‌شود. متأسفانه اهمیت مدیریت بلوک‌ها در بسیاری از پژوهش‌های زراعی نادیده گرفته می‌شود. هدف اصلی بلوک‌بندی، کنترل بخشی از تغییرات ناخواسته برای افزایش دقت در ارزیابی اثر تیمارهاست. بنابراین کلیه عملیات مدیریتی و اندازه‌گیری‌ها باید با در نظر گرفتن بلوک‌ها برنامه‌ریزی شوند. به عنوان مثال، هر گونه وقفه در عملیات زراعی مانند کاشت باید در انتهای بلوک ایجاد شود یا برای وجین علف‌های هرز، هر بلوک به یک کارگر یا تیم مجزا اختصاص یابد. این رویکرد موجب می‌شود تفاوت‌های زمانی و مدیریتی به جای تأثیر بر خطای آزمایش، به عنوان تفاوت بین بلوک‌ها در نظر گرفته شوند.

۴-۴. ابعاد و شکل واحدهای آزمایشی

در طراحی پژوهش‌های نظام‌های زراعی، انتخاب ابعاد مناسب واحدهای آزمایشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برخلاف آزمایش‌های زراعی متداول، این پژوهش‌ها نیازمند واحدهای آزمایشی بزرگ‌تری هستند تا بتوانند شرایط واقعی مزرعه را به طور مؤثر شبیه‌سازی کنند. این رویکرد از چند جهت حائز اهمیت است. از یک سو، نتایج حاصل از کرت‌های بزرگ برای کشاورزان ملموس‌تر بوده و امکان انتقال یافته‌های تحقیقاتی به مزارع واقعی با استفاده از تجهیزات معمول کشاورزی فراهم می‌شود. از سوی دیگر، محققان را قادر می‌سازد تا تحلیل‌های دقیق‌تری از جنبه‌های مختلف مانند جریان انرژی و مسائل اقتصادی ارائه دهند. همچنین ابعاد واحدهای آزمایشی تأثیر مستقیمی بر کیفیت و دقت اجرای پژوهش دارد. واحدهای بزرگ‌تر موجب کاهش اثرات حاشیه‌ای^۱ شده و شرایط واقعی‌تری را برای مطالعه پارامترهایی مانند خرداقلیم‌ها، جمعیت آفات و بیماری‌ها، کنترل علف‌های هرز و کیفیت عملیات خاک‌ورزی فراهم می‌کنند (Janzen, 1995). برای مثال، در آزمایش‌های بلندمدت، مشکل علف‌های هرز در واحدهای کوچک بسیار بارزتر است، چرا که گیاهان بالغ به راحتی می‌توانند بذرها را در سطح کرت پخش کنند. همچنین، در مطالعات مربوط به آفات متحرک یا دشمنان طبیعی آنها که تحرک بالایی دارند، تنها استفاده از واحدهای آزمایشی بزرگ می‌تواند نتایج قابل اعتمادی ارائه دهد (Hatheway, 1961). در مقابل، استفاده از واحدهای کوچک آزمایشی با چالش‌های متعددی همراه است. در مورد تیمارهای خاک‌ورزی، واحدهای کوچک اغلب منجر به آماده‌سازی ناکافی زمین، اعمال نادرست تیمارها و فشردگی خاک ناشی از تردد مکرر ادوات می‌شوند. این محدودیت‌ها می‌تواند بر کیفیت نتایج پژوهش تأثیر منفی بگذارد.

همچنین استفاده از واحدهای آزمایشی بزرگ امکان نمونه‌برداری مکرر توسط تیم‌های تحقیقاتی مختلف را فراهم کرده و فضای کافی برای اجرای تیمارهای تکمیلی در اختیار محققان قرار می‌دهند. علاوه بر این انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی آزمایش‌ها

1. Border effect

ایجاد می‌کنند. با این حال، باید توجه داشت که افزایش ابعاد واحدهای آزمایشی، هزینه‌های اجرایی و نگهداری پژوهش را به ویژه در مورد محصولات با نیاز کارگری زیاد مانند سبزی و صیفی‌جات به طور محسوسی افزایش می‌دهد. بنابراین، تیم تحقیقاتی باید همواره بین مزایای علمی واحدهای بزرگ و محدودیت‌های اقتصادی موجود تعادل مناسبی برقرار کند تا بتواند به نتایج مطلوب و قابل اعتمادی دست یابد.

یکی از چالش‌های اساسی در آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی، مسئله جابجایی و حرکت خاک درون و بین کرت‌هاست که به ویژه در مطالعات مربوط به روش‌های مختلف خاک‌ورزی و تهیه زمین حائز اهمیت است. تحقیقات انجام شده در ایستگاه تحقیقاتی روتامستد نشان داده است که این پدیده در خاک‌های با بافت سبک می‌تواند تأثیر بسیار بیشتری از آنچه تصور می‌شود داشته باشد و به عنوان یکی از منابع مهم خطا در نتایج آزمایش‌های بلندمدت محسوب شود (Poulton et al., 2024). این جابجایی خاک نه تنها بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر کشت تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند موجب انتشار بیماری‌ها و آفات گیاهی بین واحدهای آزمایشی مختلف شود. این مسئله به ویژه زمانی حادث می‌شود که تیمارهای آزمایشی از نظر مدیریت آفات و بیماری‌ها با یکدیگر تفاوت داشته باشند. برای کاهش اثرات نامطلوب جابجایی خاک، می‌توان سه راهکار اساسی را به کار گرفت. اول، در عملیات متوالی آماده‌سازی زمین، بهتر است جهت اجرای عملیات به صورت متناوب تغییر کند. به عبارت دیگر، باید از انجام مکرر عملیات خاک‌ورزی در یک جهت ثابت خودداری شود. دوم، شدت عملیات خاک‌ورزی در کرت‌ها باید تا حد امکان کاهش یابد. استفاده از روش‌های کم‌خاک‌ورزی یا بی‌خاک‌ورزی می‌تواند در این زمینه بسیار مؤثر باشد. سوم، استفاده صحیح و با دقت از ماشین‌آلات کشاورزی ضروری است. به عنوان مثال، میزان جابجایی خاک به سمت عقب هنگام استفاده از کولتواتورهای روتاری^۱ می‌تواند بسته به روش استفاده، از حداقل تا

حداکثر متغیر باشد. بنابراین، به کارگیری صحیح این ادوات و تنظیم مناسب آنها می‌تواند به میزان قابل توجهی از جابجایی ناخواسته خاک جلوگیری کند.

۴-۵. تمهیدات راهبردی برای به‌روزرسانی و پویایی آزمایش‌های بلندمدت

یکی از چالش‌های بنیادین در مدیریت آزمایش‌های بلندمدت، ایجاد تعادل میان ثبات (برای حفظ سری‌های زمانی) و انعطاف‌پذیری (برای پاسخ به پرسش‌های نوین) است. تجربیات گذشته نشان می‌دهد که طراحی اولیه باید دارای نوعی پیش‌بینی‌پذیری ساختاری باشد. بر اساس منابع معتبر (Loughin et al., 2007; McRae and Ryan, 1996)، مهم‌ترین تمهیدات فنی برای تضمین این قابلیت به‌روزرسانی به شرح زیر می‌باشد:

- سرمایه‌گذاری استراتژیک در طراحی اولیه (تعداد تکرار و ابعاد کرت): در فاز طراحی اولیه، افزایش تعداد تکرارها فراتر از حداقل‌های آماری معمول، نه صرفاً برای افزایش دقت، بلکه به‌عنوان یک سرمایه‌گذاری استراتژیک عمل می‌کند. تکرارهای اضافی در آینده می‌توانند نقش حیاتی در تغییر ساختار آزمایش ایفا کنند؛ به این صورت که می‌توان با کاهش تعداد تکرارها در فازهای بعدی، فضای لازم را برای معرفی تیمارهای جدید بدون آسیب به بدنه اصلی طرح فراهم کرد. مکمل این راهبرد، در نظر گرفتن ابعاد وسیع برای کرت‌های اصلی است. اگر پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیاز به اصلاح آزمایش از طریق معرفی تیمارهای جدید باشد، کرت‌های اولیه باید چنان وسیع طراحی شوند که امکان تقسیم آن‌ها به واحدهای کوچک‌تر وجود داشته باشد. این فضای اضافی تضمین می‌کند که پس از تقسیم کرت، همچنان سطح برداشت مفید کافی برای نمونه‌برداری دقیق و حذف اثرات حاشیه‌ای باقی مانده و امکان تردد ماشین‌آلات کشاورزی نیز سلب نگردد (Loughin, 2006).

- حفظ کرت‌های شاهد به‌عنوان مرجع زمانی: حفظ و تداوم تیمارهای شاهد در تمام طول دوره آزمایش، خط قرمزی است که نباید نادیده گرفته شود. این کرت‌ها تنها ابزار معتبر برای تفکیک اثرات تیمار از تغییرات محیطی و اقلیمی در گذر زمان هستند. بدون

وجود تیمارهای شاهد پایدار، هرگونه تغییر در عملکرد یا کیفیت خاک در سال‌های آتی، می‌تواند به اشتباه به مدیریت جدید نسبت داده شود، در حالی که ممکن است ناشی از روند طبیعی تغییر اقلیم یا ویژگی‌های ذاتی خاک باشد (Johnston and Poulton, 2018).

• **معماری آماری انعطاف‌پذیر (طراحی فاکتوریل و کرت‌های خردشده):** برای حفظ قابلیت توسعه، توصیه می‌شود از طراحی‌های فاکتوریل متوازن (مانند ساختارهای 2^n یا 3^n که در جدول ۳-۴ نشان داده شده است) استفاده شود. این تقارن در سطوح تیمار، امکان اضافه کردن فاکتورهای جدید را در آینده با کمترین پیچیدگی آماری میسر می‌سازد (جدول ۳-۴). یکی از کارآمدترین روش‌های به‌روزرسانی، تبدیل طرح ساده به کرت‌های خردشده است. در این رویکرد، تیمارهای قدیمی و تثبیت‌شده به عنوان فاکتور اصلی^۱ در نظر گرفته می‌شوند و تیمار جدید (مانند یک رقم اصلاح‌شده یا روش نوین آبیاری) به عنوان فاکتور فرعی^۲ بر روی آن‌ها اعمال می‌گردد. این تکنیک به پژوهشگر اجازه می‌دهد بدون برهم زدن سابقه تاریخی زمین، اثر متقابل مدیریت گذشته و تکنولوژی جدید را ارزیابی کند (McRae and Ryan, 1996).

• **مدیریت چرخه زمانی تغییرات:** زمان‌بندی اعمال تغییرات در آزمایش‌های بلندمدت باید با چرخه تعادل سیستم هماهنگ باشد. سیستم‌های زراعی پس از هر تغییر مدیریتی، وارد یک فاز گذار^۳ می‌شوند که در آن داده‌ها نوسان زیادی دارند. توصیه‌های علمی تأکید دارند که تغییرات جدید بهتر است به انتهای دوره‌های چرخشی (مثلاً پایان یک دوره کامل تناوب) موکول شود تا سیستم به یک شرایط تعادل نسبی رسیده باشد. تغییر تیمار در میانه یک فاز ناپایدار، تفسیر داده‌ها را با ابهام روبرو می‌سازد (Loughin et al., 2007).

-
1. Main plot
 2. Sub-plot
 3. Transition phase

جدول ۴-۳. تغییر یک آزمایش فاکتوریل دو عاملی با دو سطح
در هر عامل به یک آزمایش سه عاملی با دو سطح در هر عامل

آزمایش اولیه							آزمایش اصلاح شده						
بلوک	A	B	منابع تغییر	درجه آزادی	تکرار	بلوک	A	B	C	منابع تغییر	درجه آزادی		
۱	۱	۱	تکرار	۳	۱	۱	۱	۱	۱	تکرار	۱		
۱	۱	۱	A	۱	۱	۱	۱	۲	۲	A	۱		
۱	۲	۱	B	۱	۱	۱	۲	۱	۲	B	۲		
۱	۲	۲	A×B	۱	۱	۱	۲	۲	۱	A×B	۱		
۱	۲	۱	خطا	۹	۱	۲	۱	۱	۲	C	۱		
۱	۲	۱			۱	۲	۱	۲	۱	A×C	۱		
۱	۲	۲			۱	۲	۲	۱	۱	B×C	۱		
۱	۲	۲			۱	۲	۲	۲	۲	A×B×C	۱		
۶	۳	۱	خطا		۲	۱	۱	۱	۱				
	۳	۱			۲	۱	۱	۲	۲				
	۳	۲			۲	۱	۲	۱	۲				
	۳	۲			۲	۲	۲	۲	۱				
	۴	۱			۲	۲	۱	۱	۲				
	۴	۱			۲	۲	۲	۲	۱				
	۴	۲			۲	۲	۲	۱	۱				
	۴	۲			۲	۲	۲	۲	۲				

در آزمایش اصلاح شده، اثر متقابل $A \times B \times C$ با بلوک‌ها اختلاط یافته.

• مستندسازی فراداده‌ها و طراحی پیمانه‌ای^۱: ثبت دقیق متغیرهای محیطی (مانند داده‌های روزانه اقلیمی و تغییرات فیزیکی خاک) فراتر از نیازهای روزمره، برای تفسیر تغییرات در دهه‌های آینده حیاتی است. همچنین، بهره‌گیری از رویکرد طراحی پیمانه‌ای پیشنهاد می‌شود. در این رویکرد، آزمایش کلان به چندین ماژول یا بلوک مستقل تقسیم

می‌شود که هریک دارای هویت و فرضیات مستقل هستند (McRae and Ryan, 1996). این ساختار به مدیران پروژه اجازه می‌دهد در صورت بروز محدودیت‌های بودجه‌ای یا تغییر اولویت‌ها، یک ماژول خاص را حذف یا تغییر دهند، بدون آنکه یکپارچگی آماری و ساختاری کل آزمایش فروپاشد.

۴-۶. شروع آزمایش: رویکردهای استاندارد و پلکانی

پژوهش‌های نظام‌های زراعی ذاتاً با رویکردی بلندمدت طراحی و اجرا می‌شوند تا اثرات پایدار و تجمعی تیمارها و روش‌های مختلف مدیریت زراعی را بر طیف وسیعی از صفات اکولوژیک و زراعی مورد ارزیابی قرار دهند. در معماری این آزمایش‌ها، نقطه شروع و نحوه ورود تیمارها به بستر زمان، مؤلفه‌ای تعیین‌کننده در اعتبار آماری نتایج و قابلیت تعمیم آن‌هاست. رویکرد متداول که در ادبیات علمی به طراحی استاندارد^۱ شهرت دارد، شامل اعمال همزمان تمام تیمارها در کلیه واحدهای آزمایشی و سپس انجام اندازه‌گیری‌های تکرارشونده در طول یک دوره چندساله است (Edmondson, 2005). این آزمایش‌ها معمولاً بر اساس طرح‌های پایه معتبری نظیر بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش‌های فاکتوریل یا کرت‌های خردشده اجرا می‌شوند. نکته کلیدی و متمایزکننده در این روش، همزمانی کامل سن آزمایش (مدت زمان سپری‌شده از اعمال تیمار) با سال تقویمی است (Loughin, 2006). در این ساختار، داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مکرر، عمدتاً برای درک اثرات تجمعی و ارزیابی برهمکنش تیمار در زمان تحلیل می‌شوند تا پایداری سیستم در درازمدت سنجیده شود.

با این حال، واقعیت اجتناب‌ناپذیر در آزمایش‌های مزرعه‌ای این است که اندازه‌گیری‌ها همواره تحت سیطره عوامل محیطی غیرقابل کنترل قرار دارند؛ عواملی که می‌توانند اثرات متفاوتی بر کارایی تیمارهای مختلف داشته باشند. به عنوان نمونه، یک نظام زراعی حفاظتی ممکن است در سال‌های خشک عملکردی برتر نسبت به روش

1. Standard design

متداول نشان دهد، اما با وقوع سال‌های مرطوب، این مزیت کاهش یافته یا حتی معکوس شود (Zhang et al., 2022). در تحلیل آماری این آزمایش‌ها، چالش اصلی و گلوگاه فنی، تفکیک اثرات ثابت (ناشی از طول مدت اعمال تیمار یا سن آزمایش) از نوسانات تصادفی (ناشی از تغییرات اقلیمی سالانه) است (Richter and Kroschewski, 2006). این عوامل تصادفی محیطی که خارج از کنترل پژوهشگر هستند، اگر به درستی مدیریت نشوند، به عنوان متغیرهای مزاحم عمل کرده و تفسیر نتایج را به انحراف می‌کشانند. در طراحی استاندارد، به دلیل اینکه تمام تکرارها در یک سال واحد شروع می‌شوند، اثر سن آزمایش با اثر سال کاملاً درهم آمیخته می‌شود؛ بدین معنا که پژوهشگر نمی‌تواند با قطعیت بگوید که آیا تغییر مشاهده‌شده در سال پنجم ناشی از پنج سال اعمال تیمار است یا صرفاً بازتابی از شرایط اقلیمی خاص سال پنجم می‌باشد. بنابراین، برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد و تفکیک این اثرات درهم تنیده، به کارگیری استراتژی‌های طراحی پیشرفته‌تر و روش‌های تحلیلی دقیق، از اهمیتی حیاتی برخوردار است.

۴-۶-۱. طراحی استاندارد آزمایش‌های بلندمدت و چالش‌های آن

در طراحی استاندارد یا مرسوم آزمایش‌های بلندمدت، که معمولاً در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا می‌شود، تمام تیمارها به طور همزمان در کلیه تکرارها آغاز می‌گردند. همان‌طور که در جدول ۴-۴ نشان داده شده است، این رویکرد مبتنی بر تخصیص تصادفی تیمارها به واحدهای آزمایشی در هر بلوک و انجام اندازه‌گیری‌های منظم سالانه (زمان ۱، زمان ۲، ...) به صورت همزمان برای تمامی کرت‌هاست. اگرچه این روش از نظر اجرایی ساده و کم‌هزینه به نظر می‌رسد، اما با محدودیت‌های ساختاری و آماری جدی مواجه است که اعتبار نتایج را در درازمدت تحت‌الشعاع قرار می‌دهد.

جدول ۴-۴. طرح‌واره یک آزمایش بلند مدت پنج ساله با سه تکرار، پنج تیمار و پنج زمان اندازه‌گیری

سال ۱	سال ۲	سال ۳	سال ۴	سال ۵	الی آخر	تیمار	بلوک
زمان ۱	زمان ۲	زمان ۳	زمان ۴	زمان ۵	الی آخر		
...						۱	۱
...						۳	
...						۵	
...						۴	
...						۲	
...						۵	۲
...						۴	
...						۲	
...						۱	
...						۳	
...						۱	۳
...						۲	
...						۵	
...						۳	
...						۴	

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این نوع طراحی به شدت نسبت به شرایط محیطی سال‌های اولیه حساس است؛ به‌طوری‌که وقوع هرگونه خطا یا تنش غیرمنتظره در مراحل آغازین، می‌تواند تا ۶۰ درصد از نتایج سال‌های آتی را متأثر سازد و یک اثر ماندگار کاذب^۱ ایجاد کند (Pearson et al., 2019). علاوه بر حساسیت به شرایط اولیه، تجمع تدریجی خطاهای اندازه‌گیری نیز چالش دیگری است؛ بررسی‌ها حاکی از آن است که این خطاها می‌توانند سالانه بین ۱۲ تا ۱۵ درصد انباشته شده و در نهایت منجر به انحراف

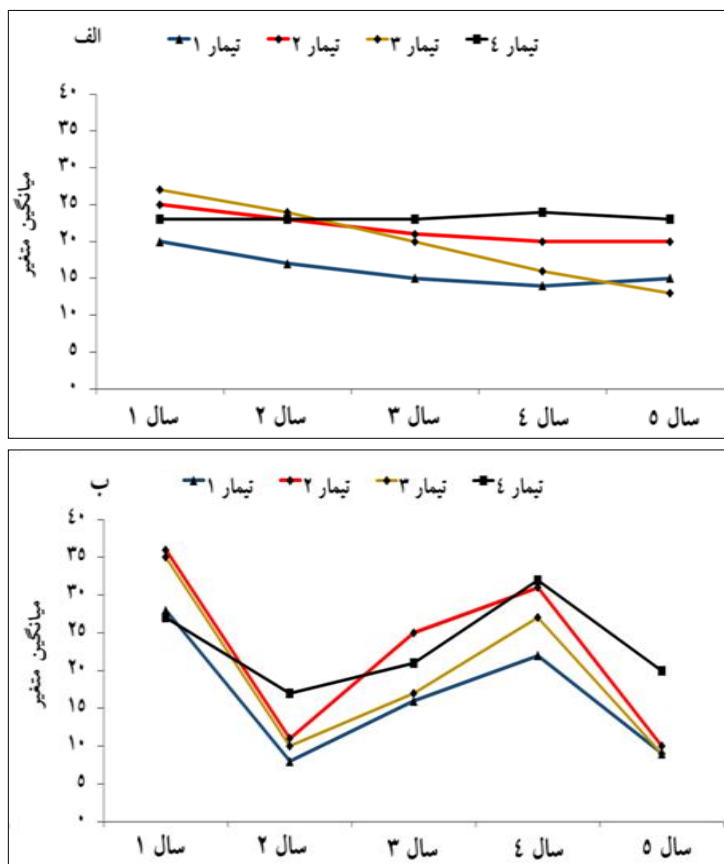
1. Artifact

قابل توجه نتایج شوند (Johnson, 2021). همچنین، وابستگی متقابل^۱ داده‌های جمع‌آوری‌شده در سال‌های متوالی، در اغلب موارد موجب نقض فرض استقلال خطاها شده و به برآوردهای نادرست از تأثیر واقعی تیمارها می‌انجامد (Li & Zhang, 2022). افزون بر این، ناتوانی این طرح‌ها در سازگاری با تغییرات پیش‌بینی‌نشده اقلیمی، در شرایط کنونی که تغییر اقلیم به واقعیتی اجتناب‌ناپذیر بدل شده، محدودیتی اساسی محسوب می‌شود (McIntosh & Smith, 2020).

چالش بنیادین در طراحی استاندارد، ناتوانی در تفکیک اثرات واقعی تیمار از تأثیرات نوسانی محیط است. زمانی که عوامل محیطی (مانند بارندگی یا دما) به طور یکنواخت بر تمام کرت‌های آزمایشی اثر می‌گذارند، عملکرد کل آزمایش در سال‌های مساعد افزایش و در سال‌های نامساعد کاهش می‌یابد. این هم‌راستایی تغییرات، به‌ویژه در تیمارهای حساس به محیط، امکان تشخیص اثر خالص مدیریتی را دشوار می‌سازد. نمونه بارز این مسئله در ارزیابی ارقام مقاوم به خشکی نیز مشاهده می‌شود، جایی که نتایج به شدت تحت سیطره رژیم رطوبتی سال آزمایش قرار گرفته و اثرات محیطی بر میانگین‌های بلندمدت غالب می‌شوند. باید توجه داشت که هدف غایی آزمایش‌های بلندمدت، شناخت پتانسیل ذاتی تیمارهاست، نه صرفاً ثبت واکنش‌های گذرا به شرایط محیطی غیرقابل تکرار (Watson et al., 2024). در این طراحی، به دلیل همزمانی شروع تمام تکرارها، مجموعه اندازه‌گیری‌های مکرر در هر کرت تحت تأثیر یک توالی مشترک و منحصر به فرد از رویدادهای محیطی قرار می‌گیرند. این پدیده به معنای تداخل کامل^۲ سن آزمایش با سال تقویمی است (Loughin, 2006). به عبارت دیگر، اگر آزمایش در سالی متفاوت آغاز می‌شد، ممکن بود الگوی نتایج کاملاً دگرگون شود. این وابستگی به تاریخچه اقلیمی، تعمیم‌پذیری نتایج را به شدت محدود می‌کند. برای درک بهتر این چالش، داده‌های فرضی ارائه‌شده در شکل ۴-۱ قابل تأمل است.

1. Autocorrelation

2. Complete confounding



شکل ۴-۱. مقایسه میانگین‌های نظری و مشاهده‌شده چهار تیمار در یک مطالعه پنج‌ساله فرضی با طراحی استاندارد، بدون (قسمت الف) و با (قسمت ب) در نظر گرفتن اثرات تصادفی سالانه و اثرات متقابل تیمار $\times$ سال. داده‌ها از (Loughin 2006).

در بخش (الف) شکل ۴-۱، روند میانگین‌های واقعی تیمارها در شرایط ایده‌آل و بدون نوسانات محیطی ترسیم شده است که نشان‌دهنده پتانسیل ذاتی سیستم است. اما در بخش (ب)، با افزودن اثرات تصادفی سالانه و برهمکنش تیمار با سال، الگوی نتایج به کلی تغییر کرده و بیشتر بازتابی از نوسانات محیطی است تا اثر تیمار. مقایسه این دو بخش به وضوح نشان می‌دهد که چگونه نوسانات سالانه می‌توانند برآوردهای میانگین را دچار انحراف سیستماتیک کنند. این پدیده که در مطالعات میدانی نیز به کرات گزارش شده،

بیانگر آن است که سهم عمده‌ای از تغییرات عملکرد (اغلب بین ۳۰ تا ۶۰ درصد) صرفاً ناشی از اثرات سالانه است (Amin et al., 2015; Raza et al., 2019). مصداق عینی این چالش در تولید گندم کشور قابل مشاهده است؛ جایی که در سال‌های مساعد اقلیمی، بارها خود کفای اعلام شده، اما با بروز خشکسالی در سال بعد، این دستاورد ناپایدار از بین رفته و نیاز به واردات مجدد ایجاد شده است.

بنابراین، اگر پژوهشگری بخواهد صرفاً بر اساس داده‌های یک سال خاص (مثلاً سال دوم در شکل ۴-۱) قضاوت کند، با خطای فاحشی روبرو خواهد شد؛ چرا که در آن سال، میانگین‌ها به دلیل شرایط نامساعد محیطی، بسیار پایین‌تر از پتانسیل واقعی برآورد شده‌اند. این مسئله ضرورت بازنگری در روش‌شناسی پژوهش‌های بلندمدت را آشکار می‌سازد: در غیاب مدل‌های تحلیلی پیشرفته یا طراحی‌های اصلاح‌شده (مانند روش پلکانی)، اعتماد به نتایج تحلیل‌های مرسوم برای پاسخ به سؤالات اصلی پژوهش، مخاطره‌آمیز خواهد بود. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، راهکار اساسی، حرکت به سوی مدل‌های آماری پیشرفته‌تر (مانند مدل‌های آمیخته) و بازطراحی ساختار آزمایش‌هاست. مدل‌های جدید باید قادر باشند الگوهای زمانی میانگین‌های واقعی و ماهیت اثرات تصادفی را به صورت همزمان در تحلیل لحاظ کنند، در حالی که طراحی‌های تجدیدنظر شده می‌بایست امکان تفکیک دقیق‌تر سیگنال (اثر تیمار) از نویز (نوسانات محیطی) را فراهم آورند. این تحول روش‌شناختی، به‌ویژه در حوزه تصمیم‌گیری‌های کلان کشاورزی که نیازمند داده‌های متقن و تکرارپذیر است، از اهمیتی راهبردی برخوردار بوده و غفلت از آن می‌تواند به اتلاف منابع و سیاست‌گذاری‌های ناپایدار منجر شود.

۴-۶-۲. بازنگری در طراحی آزمایش‌های بلندمدت با روش پلکانی^۱

محدودیت بنیادین و پاشنه آشیل در طراحی‌های مرسوم آزمایش‌های بلندمدت (طراحی استاندارد)، تکرارناپذیری شرایط محیطی است که تیمارها در طول زمان تجربه می‌کنند. این محدودیت باعث می‌شود که نتایج به شدت تحت تأثیر شرایط خاص

سال‌های اجرا قرار گیرند و اعتبار تعمیم‌پذیری آن‌ها کاهش یابد. در این راستا، هرگونه اصلاح ساختاری در طراحی که امکان تکرار زمانی^۱ را فراهم آورد، به گونه‌ای که دوره‌های پس از اعمال تیمار در بسترهای زمانی متفاوت تکرار شوند، گامی رو به جلو و ضروری محسوب می‌شود. با توجه به دشواری و یا به عبارت دقیق‌تر، غیرممکن بودن تکرار کامل یک آزمایش چندساله در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، طراحی پلکانی به عنوان راهکاری عملی، کارآمد و آماری معتبر پیشنهاد شده است (Casler, 2015) (جدول ۴-۵).

فلسفه اجرایی این روش بر توزیع زمانی نقطه آغاز استوار است (Loughin et al., 2007). بدین صورت که اجرای آزمایش به جای شروع همزمان، به صورت مرحله‌ای و با تأخیر زمانی انجام می‌پذیرد؛ تکرار اول در سال اول، تکرار دوم در سال دوم و به همین ترتیب سایر تکرارها تا تکمیل تعداد مورد نیاز، وارد فاز اجرایی می‌شوند (جدول ۴-۵). این رویکرد هوشمندانه چندین مزیت کلیدی و راهبردی به همراه دارد: نخست آنکه هر تکرار در بستر محیطی و اقلیمی متفاوتی آغاز و ادامه می‌یابد که این امر موجب شکستن همبستگی کامل بین سن آزمایش و سال تقویمی می‌شود (Loughin, 2006). دوم، امکان ارزیابی تیمارها در طیف وسیع‌تری از سال‌های زراعی فراهم می‌گردد و نهایتاً، توزیع فشار کاری و هزینه‌ها در طول زمان، مدیریت اجرا را از نظر اقتصادی بهینه می‌سازد (Orchard et al., 2000).

زمانی که چندین تکرار با این الگوی زمانی وجود داشته باشد، اندازه‌گیری‌ها در سنین مشخصی از آزمایش (مثلاً سال سوم اعمال تیمار) در چندین سال تقویمی متفاوت انجام می‌شود. این استراتژی، امکان جمع‌آوری داده‌ها تحت شرایط محیطی متنوع را فراهم می‌آورد که دو دستاورد عمده دارد: نخست، با نمونه‌برداری از جامعه‌ای وسیع‌تر از شرایط محیطی، قابلیت اطمینان و تعمیم‌پذیری نتایج را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد؛ و دوم،

جدول ۴-۵. طرح‌واره یک آزمایش بلند مدت با طراحی پلکانی

بلوک	تیمار	سال ۱	سال ۲	سال ۳	سال ۴	سال ۵	سال ۶	سال ۷	الی آخر
		زمان ۱	زمان ۲	زمان ۳	زمان ۴	زمان ۵	زمان ۶	زمان ۷	زمان ۸
۱	۱								...
	۳								...
	۵								...
	۴								...
	۲								...
۲	۵								زمان ۷
	۴								زمان ۶
	۲								زمان ۵
	۱								زمان ۴
	۳								زمان ۳
۳	۱								زمان ۲
	۲								زمان ۱
	۵								زمان ۶
	۳								زمان ۵
	۴								زمان ۴

امکان تفکیک دقیق‌تر اثر خالص تیمار از نویزهای محیطی را میسر می‌سازد. به بیان دیگر، طراحی پلکانی با توزیع زمانی شروع تیمارها، به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا ارزیابی کند که آیا یک تغییر مشاهده‌شده ناشی از ماهیت تیمار است یا صرفاً بازتابی از یک سال اقلیمی خاص؛ و این مهم بدون نیاز به افزایش غیرمنطقی هزینه‌ها یا مدت زمان کلی مطالعه

محقق می‌شود. این ویژگی به‌ویژه در پژوهش‌های کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند کشور ما که با نوسانات شدید آب‌وهوایی مواجه هستند، از اهمیتی حیاتی برخوردار است.

اجرای آزمایش‌های بلندمدت با این متدولوژی، سابقه‌ای دیرینه و تثبیت‌شده در پژوهش‌های زراعی (Martin et al., 1998; Orchard et al., 2000) و حتی سایر رشته‌های اکولوژیک (Walters et al., 1988) دارد. با این وجود، محققان علوم زراعی هنوز چنان‌که باید با این شیوه سازگار نشده‌اند. این عدم استقبال می‌تواند ناشی از دو عامل باشد: نخست، غفلت از کاستی‌های ذاتی روش‌های متداول (استاندارد) در تفکیک اثرات زمان؛ و دوم، چالش‌های لجستیکی و مدیریتی ناشی از ناهمزمانی عملیات زراعی در کرت‌های مختلف (مثلاً نیاز به مدیریت همزمان کرت‌های سال اول و سال سوم در کنار هم). با این حال، نادیده انگاشتن مزایای آماری طراحی پلکانی، بهایی سنگین در کاهش اعتبار علمی نتایج دارد. در طراحی پلکانی، داده‌های حاصل از بلوک‌های مختلف در هر سال تقویمی، متأثر از اثرات تصادفی محیطی مرتبط با همان سال هستند، اما چون این بلوک‌ها در سنین آزمایشی متفاوتی قرار دارند، امکان مدل‌سازی ریاضی این اثرات فراهم می‌شود. برتری مطلق این روش نسبت به طراحی استاندارد در این است که نوسانات کنترل‌نشده اندازه‌گیری‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، ارزیابی و از اثرات ثابت تیمارها تفکیک می‌شوند. از منظر آماری، طراحی پلکانی تنها طرح معتبر برای تمایز قائل شدن بین اثرات ثابت زمان (مدت تیمار) و اثرات تصادفی سال (اقلیم) در آزمایش‌های بلندمدت محسوب می‌شود (Loughin et al., 2007). این روش امکان محاسبه دقیق میانگین‌های تیمارها و خطاهای استاندارد را در هر مقطع زمانی فراهم می‌کند که نشان‌دهنده نتایج قابل‌انتظار و تعمیم‌یافته در اجرای آزمایش در مناطق و سال‌های دیگر است (Loughin, 2006). در بخش‌های بعدی، جزئیات مربوط به نحوه پیچیده اما قدرتمند تجزیه و تحلیل داده‌های این نوع آزمایش‌ها ارائه خواهد شد.

۴-۷. اهمیت تیمارهای تناوبی در طراحی آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی

تیمارهای تناوبی به عنوان هسته مرکزی و شریان حیاتی پژوهش‌های بلندمدت در نظام‌های زراعی شناخته می‌شوند، چرا که تنها بستر معتبر برای ارزیابی واقع‌بینانه تأثیرات راهکارهای مدیریتی نوین در مقایسه با مطالعات کوتاه‌مدت هستند. اهمیت این تیمارها در ماهیت تدریجی و تجمعی اثرات آن‌ها نهفته است؛ به گونه‌ای که آشکار شدن کامل مزایا یا معایب یک نظام زراعی جدید در جنبه‌های کلیدی نظیر کنترل بیولوژیک علف‌های هرز، پویایی جمعیت آفات یا تغییرات محتوای ماده آلی خاک، ممکن است نیازمند گذشت چندین سال یا حتی چندین چرخه کامل تناوب باشد (Saulic et al., 2022). در واقع، عملکرد محصولات در یک نظام تناوبی، تابعی مستقل از شرایط سال جاری نیست، بلکه به شدت وابسته به تاریخچه کشت^۱ و مدیریت‌های اعمال‌شده در گذشته است. این ویژگی منحصر به فرد که به حافظه اکولوژیک^۲ سیستم اشاره دارد، تناوب‌های زراعی را به ابزاری بی‌بدیل برای مطالعه تأثیرات بلندمدت بر شاخص‌های کلیدی پایداری، به‌ویژه حاصلخیزی خاک، تبدیل کرده است (Skinulienė et al., 2024).

با این وجود، علی‌رغم اهمیت بنیادین این موضوع در درک پایداری، طراحی و تحلیل آزمایش‌های بلندمدت با تیمارهای تناوبی در تحقیقات کشاورزی (به‌ویژه در سطح ملی) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. دلیل این کم‌توجهی را می‌توان در چالش‌های اجرایی و ساختاری این نوع پژوهش‌ها جستجو کرد؛ نیاز به دوره‌های زمانی طولانی‌تر، هزینه‌های اجرایی بالاتر و پیچیدگی‌های تحلیلی ناشی از همبستگی‌های زمانی، موانعی جدی برای پژوهشگران محسوب می‌شوند. با این حال، باید پذیرفت که نتایج حاصل از چنین مطالعاتی، تنها پایگاه داده علمی معتبر برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی صحیح در سطح مزرعه و سیاست‌گذاری‌های کلان جهت دستیابی به امنیت غذایی پایدار را فراهم

1. Cropping history

2. Ecological memory

می‌آورد. با توجه به محدودیت شدید سابقه اجرای آزمایش‌های بلندمدت دارای تیمارهای تناوبی در کشور، ضروری است پیش از ورود به مباحث پیچیده طراحی، با اصول و اصطلاحات بنیادین و استاندارد این نوع مطالعات آشنا شویم تا بستر مناسبی برای طراحی دقیق و اجرای کارآمد پژوهش‌های آتی در این حوزه فراهم گردد.

۴-۷-۱. اصطلاحات پایه و مفاهیم کلیدی در آزمایش‌های تناوبی

برای طراحی و تحلیل دقیق آزمایش‌های تناوبی، ابتدا لازم است واژگان تخصصی این حوزه به روشنی تعریف شوند، زیرا ابهام در این مفاهیم می‌تواند منجر به خطاهای جدی در طراحی آماری گردد. بنیادی‌ترین مفهوم، تناوب زراعی^۱ است که به توالی^۲ برنامه‌ریزی‌شده‌ای از محصولات اشاره دارد که در سال‌ها یا فصل‌های متوالی در یک قطعه زمین کشت می‌شوند و دارای الگوی تکرارشونده هستند (آینه‌بند، ۱۳۸۴). در این ساختار، هر محصول در توالی به عنوان یک جزء تناوب شناخته می‌شود و اگر یک محصول خاص بیش از یک بار در توالی ظاهر شود، هر بار وقوع آن یک دوره^۳ مجزا محسوب می‌گردد. تکرار مداوم این توالی کشت مشخص، مفهوم چرخه محصولات^۴ را شکل می‌دهد.

یکی از چالش‌برانگیزترین مفاهیم در طراحی آزمایش، تمایز بین دوره و فاز^۵ است. زمانی که دو قطعه زمین دارای الگوی تناوبی کاملاً یکسانی باشند اما در یک سال مشخص، در مراحل متفاوتی از آن الگو قرار داشته باشند (مثلاً در سال جاری، زمین اول زیر کشت گندم و زمین دوم زیر کشت آیش باشد)، اصطلاحاً گفته می‌شود که این دو قطعه در فازهای مختلف تناوب قرار دارند. تعداد کل این فازهای ممکن، که برابر با طول

1. Crop rotation

2. Sequence

3. Period

4. Cycle of crops

5. Phase

مدت تناوب بر حسب سال است، به عنوان دوره چرخه شناخته می‌شود (Yates, 1954). درک مفهوم فاز، پیش‌نیاز اصلی برای اجرای طراحی فازی^۱ است که در آن تمام فازهای یک تناوب به طور همزمان در هر سال اجرا می‌شوند تا اثرات اقلیمی سالانه خشتی گردد (Johnsto and Poulton, 2018). در آزمایش‌های نظام‌های زراعی، ساختار تناوب می‌تواند تنوع زیادی داشته باشد؛ از تک کشتی تا کشت‌های متراکم (چند محصول در سال) یا دوره‌های آیش. نکته حائز اهمیت این است که طول دوره تناوب همواره بر اساس سال زراعی تعیین می‌شود، نه تعداد محصولات. برای مثال، یک تناوب سه ساله ممکن است شامل چهار محصول (گندم در سال اول، کلزا در سال دوم، و گندم (پاییزه) و کنجد (تابستانه) در سال سوم) باشد، اما از نظر طراحی آماری، همچنان یک تناوب سه‌ساله (با دوره ۳) محسوب می‌شود. همچنین، آیش نیز به عنوان یک جزء فعال و تأثیرگذار در تناوب (از نظر ذخیره رطوبت و عناصر غذایی) لحاظ می‌گردد، هرچند محصولی برای برداشت نداشته باشد. شناخت دقیق این مفاهیم، زیربنای تحلیل اثرات توالی است. این اثرات به تأثیرات متقابل و ماندگار محصولات بر یکدیگر در طول زمان اشاره دارد که فراتر از اثرات کوتاه‌مدت است و شامل تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، دینامیک بانک بذر علف‌های هرز و تنوع جوامع میکروبی می‌شود. از آنجا که ظهور کامل این اثرات معمولاً نیازمند گذشت چندین چرخه کامل تناوب است، مطالعات تناوبی ذاتاً نیازمند افق زمانی طولانی‌تری نسبت به سایر پژوهش‌های زراعی هستند.

برای شفاف‌سازی و درک عملیاتی این مفاهیم، یک تناوب زراعی فرضی ۳ ساله شامل گندم - جو - آیش را در نظر بگیرید. جدول ۴-۶ نحوه پیاده‌سازی این مفاهیم را در بستر زمان و مکان نشان می‌دهد.

جدول ۴-۶. نمایش مفاهیم چرخه، دوره و فاز در یک تناوب زراعی ۳ ساله (گندم - جو - آیش)

کرت شماره ۱ آغازگر فاز ۱	کرت شماره ۲ آغازگر فاز ۲	کرت شماره ۳ آغازگر فاز ۳
سال		
۱ گندم	جو	آیش
۲ جو	آیش	گندم
۳ آیش	گندم	جو
۴ گندم	جو	آیش
۵ جو	آیش	گندم
۶ آیش	گندم	جو

در این مثال، تناوب همان توالی مشخص گندم ← جو ← آیش است که الگوی کشت را تعیین می‌کند. دوره، طول زمان لازم برای تکمیل یک دور کامل از این توالی است که در اینجا سه سال می‌باشد. مفهوم چرخه به تکرار کامل این دوره در طول زمان اشاره دارد؛ به طوری که سال‌های اول تا سوم چرخه اول و سال‌های چهارم تا ششم چرخه دوم را تشکیل می‌دهند. نکته کلیدی در درک فاز و طراحی فازی در ستون‌های جدول نهفته است. در بالای هر ستون، عنوان آغازگر فاز (که در آزمایش‌های تناوبی به عنوان سری^۱ نیز شناخته می‌شود)، به واحد فیزیکی زمین (کرت) اشاره دارد که نقطه شروع متفاوتی در توالی تناوب دارد. برای مثال، آغازگر فاز ۱ بدین معناست که زمین شماره ۱ در سال اول با محصول اول تناوب (گندم) کار خود را شروع می‌کند، در حالی که زمین شماره ۲ با محصول دوم (جو) آغاز به کار می‌نماید. این آرایش موجب می‌شود که اگرچه هر سه قطعه زمین از یک الگوی تناوبی واحد پیروی می‌کنند، اما در هر سال مشخص، در مرحله متفاوتی از آن قرار داشته باشند. حضور همزمان هر سه محصول (هر سه فاز) در مزرعه در سال اول (و تمام سال‌های بعد)، مصداق بارز یک طراحی کاملاً

1. Series

فازی^۱ است که امکان تفکیک اثرات اقلیمی سالانه از اثرات ذاتی تناوب را برای پژوهشگر فراهم می‌سازد.

۴-۷-۲. انواع آزمایش‌های تناوبی

اصطلاح آزمایش تناوبی^۲ در متون علمی برای توصیف دست کم سه گونه متفاوت از مطالعات مزرعه‌ای مرتبط با نظام‌های زراعی به کار می‌رود (Payne, 2015). گونه نخست که پترسون (Patterson, 1964) آن را آزمایش‌های تناوبی کوتاه‌مدت^۳ نامیده است، بر کشت توالی‌های مختلف گیاهی در کرت‌های آزمایشی طی یک دوره چندساله (معمولاً دو تا سه سال) تمرکز دارد. در این روش، پس از اعمال تیمارهای تناوبی، یک محصول مشترک که به آن گیاه آزمایشی^۴ می‌گویند، در تمام کرت‌ها کشت می‌شود. عملکرد و ویژگی‌های این گیاه آزمایشی، به عنوان معیاری برای سنجش و ارزیابی اثرات باقیمانده از توالی‌های کشت قبلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نمونه بارز و کلاسیک این روش، پژوهش پاینه (Payne, 2015) درباره تأثیر تناوب‌های کشت بر شیوع بیماری‌ها در گندم زمستانه است. جزئیات اجرایی یکی از چهار تکرار این آزمایش در جدول ۴-۷ ارائه شده است. در این طرح، چهار ترکیب مختلف از محصولات در سال‌های اول و دوم کشت شده‌اند که یک ساختار فاکتوریل ۲×۲ را تشکیل می‌دهند: (۱) گندم یا غیرگندم در سال اول، و (۲) گندم یا غیرگندم در سال دوم. محصولی که در سال سوم به صورت یکسان در تمام کرت‌ها کشت می‌شود (گندم)، آثار متقابل این چهار توالی مختلف را منعکس کرده و همان‌گونه که اشاره شد، به عنوان گیاه آزمایشی شناخته می‌شود.

-
1. Fully phased design
 2. Rotation experiment
 3. Short-term rotation experiments
 4. Test-crop

جدول ۴-۷. یک تکرار از آزمایش تناوبی کوتاه مدت پاینه (Payne, 2015)

کرت					سال	
۴	۳	۲	۱			
لویا	گندم	سیب زمینی	گندم	۱	گیاهان تیمار	
سیب زمینی	سیب زمینی	گندم	گندم	۲		
گندم	گندم	گندم	گندم	۳	گیاه آزمایشی	

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد در بسیاری از آزمایش‌های تناوبی، عملکرد دوگانه برخی محصولات است که همزمان هم به عنوان تیمار و هم به عنوان محصول آزمایشی جزئی^۱ عمل می‌کنند (Preece, 1986). این محصولات، داده‌های تکمیلی ارزشمندی را پیش از پایان دوره آزمایش فراهم می‌آورند. در آزمایش مورد بحث (جدول ۴-۷)، گندم کشت‌شده در سال دوم نقش یک محصول آزمایشی جزئی را ایفا می‌کند؛ زیرا امکان مقایسه مستقیم تأثیرات پیش‌کشت‌های سال اول (گندم در برابر سیب‌زمینی) را بر روی عملکرد خود فراهم می‌سازد.

نوع دوم از مطالعات تناوبی، تحت عنوان آزمایش‌های تناوبی ثابت^۲ شناخته می‌شود. در این روش، اثر تیمارهای مختلف (به عنوان مثال تیمارهای کودی) بر محصولات یک تناوب زراعی مشخص و تثبیت‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Cady and Mason, 1964). اعمال تیمارها در این طرح می‌تواند به صورت سالانه (تکرار در هر سال) یا در بازه‌های زمانی چندساله (مثلاً یک بار در هر چرخه تناوب) صورت پذیرد. یکی از چالش‌های طراحی در این روش، هماهنگی چرخه تیمار با چرخه تناوب است. اگر هر دو چرخه هم‌زمان باشند (مثلاً هر دو سه ساله)، هر محصول در هر بار کشت، تحت تأثیر تیمار یکسانی قرار می‌گیرد که تفسیر نتایج را ساده می‌کند. اما اگر دوره‌ها متفاوت باشند (مثلاً

1. Partial test crop

2. Fixed rotation experiments

تیمار هر دو سال یک‌بار و تناوب هر سه سال یک‌بار)، ترکیب محصول و تیمار در چرخه‌های متوالی تغییر می‌کند که تحلیل را پیچیده‌تر می‌سازد.

برای اجرای صحیح این آزمایش‌ها و رعایت اصول آماری، زمین آزمایش به بخش‌های مجزایی تقسیم می‌شود که به آن‌ها سری می‌گویند. تعداد سری‌ها باید برابر با تعداد سال‌های تناوب باشد تا هر یک از مراحل تناوب در هر سال در یکی از سری‌ها حضور داشته باشد (Singh and Jones, 2002). برای درک بهتر، یک آزمایش فرضی با تناوب سه ساله سیب‌زمینی-جو-گندم را در نظر بگیرید که در آن دو تیمار کودی (مصرف کود دامی و عدم مصرف) مقایسه می‌شوند. در این طرح، فرض بر این است که تیمار کود دامی فقط در سال کشت سیب‌زمینی اعمال می‌شود و محصولات بعدی (جو و گندم) از اثرات باقیمانده آن استفاده می‌کنند. جدول ۴-۸ ساختار اجرایی این آزمایش را در طول ۶ سال (دو چرخه کامل) نشان می‌دهد. با وجود سه سری مختلف، در هر سال تمام محصولات تناوب در مزرعه حضور دارند. همچنین جدول ۴-۹ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان عملکرد سیب‌زمینی را در طول زمان پایش کرد. همین الگو برای جو (اثر باقیمانده سال اول) و گندم (اثر باقیمانده سال دوم) نیز صادق است.

جدول ۴-۸. یک بلوک (تکرار) از آزمایش تناوبی با توالی «سیب‌زمینی-جو-گندم» برای مقایسه دو تیمار (کود دامی و شاهد). (در هر سال، هر سه محصول در سری‌های مختلف حضور دارند)

سال	سری ۱	سری ۲	سری ۳
۱	سیب‌زمینی (+کود)	گندم	جو
۱	سیب‌زمینی (شاهد)	گندم	جو
۲	جو	سیب‌زمینی (+کود)	گندم
۲	جو	سیب‌زمینی (شاهد)	گندم
۳	گندم	جو	سیب‌زمینی (+کود)
۳	گندم	جو	سیب‌زمینی (شاهد)
۴	سیب‌زمینی (+کود)	گندم	جو
۴	سیب‌زمینی (شاهد)	گندم	جو

ادامه جدول ۴-۸

سال	سری ۱	سری ۲	سری ۳
۵	جو	سیب‌زمینی (+کود)	گندم
۵	جو	سیب‌زمینی (شاهد)	گندم
۶	گندم	جو	سیب‌زمینی (+کود)
۶	گندم	جو	سیب‌زمینی (شاهد)

جدول ۴-۹. زمان‌بندی مقایسه عملکرد سیب‌زمینی در طول ۶ سال آزمایش. (خانه‌های پر شده نشان‌دهنده زمانی است که سیب‌زمینی در آن سری کشت شده و قابل برداشت و مقایسه است)

سال	سری ۱	سری ۲	سری ۳
۱	سیب‌زمینی (+کود) در مقابل شاهد	-	-
۲	-	سیب‌زمینی (+کود) در مقابل شاهد	-
۳	-	-	سیب‌زمینی (+کود) در مقابل شاهد
۴	سیب‌زمینی (+کود) در مقابل شاهد	-	-
۵	-	سیب‌زمینی (+کود) در مقابل شاهد	-
۶	-	-	سیب‌زمینی (+کود) در مقابل شاهد

همان‌طور که در جدول ۴-۸ مشاهده می‌شود، برای رعایت اصل آماری حضور تمام فازهای تناوب در هر سال، زمین آزمایش به سه بخش مجزا یا سری تقسیم شده است. در این آرایش فازی، سری اول با سیب‌زمینی، سری دوم با گندم (فاز سوم تناوب) و سری سوم با جو (فاز دوم تناوب) آغاز می‌گردد. این طراحی تضمین می‌کند که در هر سال زراعی از سال اول تا ششم، هر سه محصول تناوب به طور همزمان در مزرعه حضور داشته

باشند. این امر از آن جهت حیاتی است که اگر در یک سال خاص، مثلاً سالی با خشکسالی شدید، تنها گندم در مزرعه باشد و سیب‌زمینی کشت نشده باشد، امکان تفکیک اثر اقلیم سال از اثر نوع گیاه برای پژوهشگر وجود نخواهد داشت و نتایج دچار سوگیری خواهد شد. نکته قابل توجه در ساختار جدول ۴-۸، وجود دو ردیف مجزا برای هر سال زراعی است. این تفکیک به دلیل ماهیت مقایسه‌ای آزمایش است که در آن اثر تیمار کود دامی در برابر شاهد (عدم مصرف کود) ارزیابی می‌شود. بدین ترتیب، در هر سال و برای هر سری، دو وضعیت متفاوت ترسیم شده است. ردیف اول، بیانگر وضعیت کرت‌هایی است که تیمار کود دامی را دریافت کرده‌اند (یا تحت تأثیر اثر باقیمانده آن هستند) و ردیف دوم نشان‌دهنده وضعیت کرت‌های شاهد است که هیچ‌گونه کود دامی دریافت نکرده‌اند. این آرایش دقیق به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا در هر سال زراعی، عملکرد هر محصول (مثلاً سیب‌زمینی یا گندم) را در شرایط تیمار شده، مستقیماً با شاهد همان سال و همان سری مقایسه نماید و اثر خالص تیمار را با حذف اثرات محیطی سالانه برآورد کند.

همچنین جدول ۴-۹ نیز منطق تحلیل آماری را برای یکی از محصولات، در این مثال سیب‌زمینی، نشان می‌دهد. از آنجا که سیب‌زمینی تنها هر سه سال یک‌بار در هر سری کشت می‌شود، داده‌های عملکرد آن به صورت منقطع و چرخشی به دست می‌آید. بدین ترتیب که در سال اول، تنها می‌توان عملکرد سیب‌زمینی را در سری یک مقایسه کرد که نشان‌دهنده اثر مستقیم کود است، در حالی که در سال دوم، نوبت به سری دو می‌رسد تا زیر کشت سیب‌زمینی برود و در سال سوم، سری سه میزبان این محصول خواهد بود. این جدول به وضوح نشان می‌دهد که برای تکمیل یک دور کامل از داده‌های سیب‌زمینی در تمام قطعات زمین، به گذشت سه سال نیاز است. نکته حائز اهمیت دیگر این است که الگوی مشابهی اما با تاخیر زمانی برای جو و گندم نیز وجود دارد؛ با این تفاوت که مقایسه عملکرد جو در سری‌های مختلف نشان‌دهنده اثر باقیمانده سال اول و مقایسه عملکرد گندم نشان‌دهنده اثر باقیمانده سال دوم کود دامی خواهد بود. این ساختار

ماتریسی به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا دینامیک بلندمدت و اثرات تجمعی تیمارها را در گذر زمان و در بستر تغییرات محیطی ردیابی نماید.

سومین و پرکاربردترین نوع از مطالعات تناوبی در تحقیقات پیشرفته نظام‌های زراعی، آزمایش‌های چندتناوبی^۱ هستند. در این روش، تیمارهای تناوبی مختلف که ممکن است دارای دوره‌های زمانی مساوی یا نامساوی باشند، به طور همزمان با یکدیگر مقایسه می‌شوند (Payne, 2015). ویژگی متمایز و بنیادین این رویکرد آن است که برخلاف آزمایش‌های کوتاه‌مدت، محصولات مختلف هر تناوب نقش تیمار را ایفا می‌کنند و لزومی ندارد که تمام کرت‌های مورد مقایسه در یک زمان مشخص، محصول یکسانی داشته باشند. این آزمایش‌ها در واقع نسخه تکامل‌یافته‌ای از آزمایش‌های تناوبی کوتاه‌مدت هستند، با این تفاوت حیاتی که گیاهان مشترک کشت شده در تمام کرت‌ها (گیاهان آزمایشی)، نقشی محوری و بلندمدت در ارزیابی اثرات متقابل تناوب‌های مختلف ایفا می‌کنند. انتخاب این محصولات آزمایشی از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است و می‌تواند بر اساس معیارهای متنوعی صورت گیرد از جمله انتخاب گیاهان اصلی و استراتژیک نظام زراعی (مانند گندم در سیستم‌های گندم‌بنیان)، استفاده از گیاهان حساس به اثرات تناوب، بهره‌گیری از ترکیبی از چند محصول آزمایشی برای بررسی اثرات متنوع، و یا تکرار یک محصول آزمایشی در چرخه‌های متعدد (Bursztyn and Steinberg, 2001).

چالش اصلی در این روش، طراحی ساختار آزمایشی دقیقی است که بتواند مقایسه‌های معناداری بین تناوب‌هایی با طول دوره‌های متفاوت فراهم آورد. با این وجود، در مواردی که تمام تناوب‌ها طول دوره یکسانی داشته باشند، می‌توان آن‌ها را به عنوان گونه‌های مختلف یک تناوب اصلی در نظر گرفت که در این صورت، تفاوت‌های گیاهی در مراحل مختلف، در واقع بیانگر تیمارهای مختلف خواهند بود. از نظر اجرایی، این روش نیز مشابه آزمایش‌های تناوبی ثابت، نیازمند تقسیم زمین به بخش‌های مجزا (سری‌ها) برای استقرار

مراحل مختلف تیمارهاست؛ این تقسیم‌بندی امکان مدیریت مستقل و ارزیابی جداگانه هر تناوب را فراهم می‌سازد. این روش به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در انتخاب محصولات آزمایشی و طراحی ساختار تناوب، امکان بررسی جامع‌تری از اثرات متقابل و پیچیده در نظام‌های زراعی را فراهم می‌کند، هرچند که با پیچیدگی‌های طراحی و اجرایی بیشتری نیز همراه است. همین ویژگی‌ها باعث شده است که این روش به عنوان یکی از کاربردی‌ترین رویکردها در مطالعات بلندمدت نظام‌های زراعی شناخته شود.

در طراحی پایه این نوع آزمایش‌ها، رعایت اصل طراحی کاملاً فازی ضروری است؛ بدین معنا که هر بلوک باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که تمام مراحل (فازهای) تمام تناوب‌ها را پوشش دهد. این استراتژی، مقایسه کامل و دقیق بین تیمارهای تناوبی مختلف را حتی زمانی که دوره‌های رشد آن‌ها با هم برابر نیستند، ممکن می‌سازد. آزمایش کلاسیک یتس (Yates, 1954) نمونه برجسته‌ای از این طراحی هوشمندانه است که در آن سه نظام تناوبی متفاوت با ویژگی‌های منحصربه‌فرد زیر مورد مقایسه قرار گرفتند:

- تناوب ۳ ساله: یک سال برنج، دو سال گیاهان علوفه‌ای.
- تناوب ۴ ساله (نوع اول): دو سال برنج، دو سال گیاهان علوفه‌ای.
- تناوب ۴ ساله (نوع دوم): یک سال برنج، سه سال گیاهان علوفه‌ای.

جدول ۴-۱۰ ساختار اجرایی یکی از سه بلوک این آزمایش را نشان می‌دهد. از آنجا که مجموع فازهای این سه تناوب برابر با ۱۱ فاز است (۳ فاز برای تناوب اول، ۴ فاز برای تناوب دوم و ۴ فاز برای تناوب سوم)، هر بلوک آزمایشی نیازمند ۱۱ کرت مجزا است تا بتواند تمام مراحل را در خود جای دهد. در این چارچوب، هر کرت به یکی از فازهای تناوبی اختصاص یافته و ترتیب قرارگیری آن‌ها در بلوک بر اساس برنامه تناوبی از پیش طراحی شده تنظیم می‌گردد. نکته کلیدی در تفسیر این جدول، درک رابطه میان زمان (سطرها) و مکان (ستون‌ها) است. سه ستون اول به سه فاز تناوب اول (سه‌ساله)، چهار ستون بعدی به چهار فاز تناوب دوم (چهارساله) و چهار ستون آخر به چهار فاز تناوب سوم (چهارساله) اختصاص یافته‌اند. این آرایش ماتریسی تضمین می‌کند که در هر سال زراعی،

تمام مراحل رشد هر سه تناوب به طور همزمان در مزرعه حضور داشته باشند و اثرات محیطی سالانه بر روی تمام فازها یکسان اعمال شود.

در جدول ۴-۱۰، گیاه برنج که نقش گیاه آزمایشی را ایفا می‌کند، با حروف پررنگ و اندیس‌های ۱ تا ۴ متمایز شده‌اند تا امکان مقایسه سیستماتیک فراهم گردد. برنج ۱ نماینده تک کشت برنج در تناوب سه ساله است؛ برنج ۲ و برنج ۳ به ترتیب سال اول و دوم کشت برنج در تناوب چهارساله را نشان می‌دهند که امکان بررسی اثر کشت متوالی کشت پشت سرهم برنج را فراهم می‌آورد؛ و برنج ۴ نماینده تک کشت برنج در تناوب چهارساله با دوره استراحت طولانی‌تر است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دوره اجرای این پژوهش ۱۲ سال تعیین شده است که این عدد، کمترین مضرب مشترک طول دوره‌های تناوب (۳ و ۴ سال) می‌باشد. این همزمان‌سازی زمانی^۱ استراتژیک به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا دقیقاً در پایان سال دوازدهم، زمانی که تمام تناوب‌ها چرخه‌های کامل خود را (۴ دور برای تناوب اول و ۳ دور برای تناوب‌های دوم و سوم) به اتمام رسانده‌اند، اثرات تجمعی و بلندمدت آن‌ها را با هم مقایسه کند.

این مدت زمان طولانی ۱۲ سال، اگرچه از نظر اجرایی چالش‌برانگیز است، اما مزیت اصلی آن امکان ارزیابی اثرات متقابل تناوب‌های مختلف و بررسی تأثیرات بلندمدت نظام‌های زراعی بر عملکرد محصولات اصلی و علوفه‌ای می‌باشد. اجرای موفقیت‌آمیز این ساختار آزمایشی پیچیده، مستلزم رعایت دقیق سه ملاحظه کلیدی است. نخست، مدیریت دقیق فضا و زمان کشت که شامل برنامه‌ریزی عملیاتی برای هر فاز تناوبی می‌شود. دوم، ثبت منظم و سیستماتیک داده‌ها برای هر کرت که به دلیل تنوع محصولات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. و سوم، کنترل یکسان شرایط محیطی در تمام کرت‌ها که برای اطمینان از صحت نتایج و قابلیت مقایسه ضروری می‌باشد. علی‌رغم این پیچیدگی‌های اجرایی، مزیت اصلی این روش، توانایی جمع‌آوری داده‌های قابل اعتماد و جامع درباره تأثیرات مختلف تناوب‌های زراعی است.

تنبؤ ۳ (۴ ساله)	تنبؤ ۲ (۴ ساله)	تنبؤ ۱ (۳ ساله)
سری ۱۱	سری ۱۰	سری ۹
سری ۸	سری ۷	سری ۶
سری ۵	سری ۴	سری ۳
سری ۱	سری ۲	سری ۳

[illegible]

۴-۷-۳. نکات تکمیلی در طراحی آزمایش‌های تناوبی

در طراحی آزمایش‌های تناوبی، رعایت اصول استاندارد آماری نظیر تصادفی‌سازی و تکرار تیمارها شرط لازم است، اما کافی نیست. اصل حیاتی دیگری که اعتبار علمی این آزمایش‌ها به آن وابسته است، رعایت کشت فازی می‌باشد؛ بدین معنا که تمامی فازهای یک تناوب (تمام محصولات دخیل در چرخه) باید در هر سال زراعی به طور همزمان در مزرعه حضور داشته باشند. اگرچه اجرای آزمایش‌های چندتناوبی بدون رعایت این اصل (مثلاً شروع تمام کرت‌ها با یک محصول واحد) از نظر اجرایی ساده‌تر است، اما تجزیه و تحلیل و تفسیر نتایج در چنین شرایطی با چالش‌های آماری جدی و گاه بن‌بست‌های تحلیلی مواجه می‌شود (Li et al., 2023). برای درک عمیق‌تر این ضرورت، می‌توان دو استراتژی متفاوت را در اجرای یک تناوب چهارساله مقایسه کرد. در استراتژی نخست (طراحی فازی)، هر چهار محصول تناوب در هر سال زراعی و در تکرارهای مستقل کشت می‌شوند. در مقابل، در استراتژی دوم، کل سطح آزمایش در سال اول به محصول اول، سال دوم به محصول دوم و الی آخر اختصاص می‌یابد. اگرچه روش دوم ممکن است دقت نتایج را برای یک محصول خاص در یک سال معین (به دلیل تکرار بالا) افزایش دهد، اما برای دستیابی به یک دور کامل از داده‌های تناوبی، نیازمند زمانی چهار برابر طولانی‌تر است. این تأخیر زمانی، دو پیامد منفی دارد. نخست اینکه با گذشت زمان طولانی، ممکن است تیمارهای مورد مطالعه (مثلاً یک رقم خاص) پیش از پایان آزمایش، اهمیت و کاربرد عملی خود را از دست بدهند؛ و دوم، اثرات تیمارها بر محصولات مختلف تحت شرایط آب‌وهوایی کاملاً متفاوتی ارزیابی می‌شود (مثلاً گندم در سال خشک و ذرت در سال تر). این ناهمزمانی منجر به تداخل^۱ اثرات تیمار با اثرات سال (اقلیم) می‌گردد و تفکیک اینکه تغییر عملکرد ناشی از مدیریت تناوب بوده یا نوسانات جوی، غیرممکن می‌شود. بنابراین، پذیرش پیچیدگی اجرایی و هزینه بالاتر روش

1. Confounding

فازی (که نیازمند زمین وسیع‌تر و مدیریت همزمان محصولات متعدد است)، یک سرمایه‌گذاری ضروری برای دستیابی به داده‌های معتبر و قابل تفکیک در پژوهش‌های بلندمدت محسوب می‌شود.

همچنین طراحی روش نخست (طراحی فازی) این مزیت راهبردی را دارد که مهم‌ترین اصل آزمایش‌های زراعی، یعنی تکرار تیمارها در سال‌های مختلف، در بازه زمانی کوتاه‌تری محقق می‌گردد. نکته کلیدی در این روش، وجود تکرارهای مستقل برای هر فاز از تیمارهای تناوبی در هر سال زراعی است؛ ویژگی‌ای که هم دقت ارزیابی اثر تیمارها بر هر محصول را افزایش می‌دهد و هم امکان محاسبه خطاهای استاندارد معتبر برای تحلیل نتایج سالانه را فراهم می‌سازد. اگرچه دستورالعمل قطعی برای تعیین تعداد تکرارها وجود ندارد، اما این تعداد معمولاً بر اساس امکانات اجرایی موجود و با در نظر گرفتن عواملی نظیر تعداد محصولات، تنوع تیمارها و سطح دقت آماری مورد نیاز تعیین می‌شود. مزیت آماری این روش، امکان اعمال کامل اصول استاندارد طراحی آزمایش‌ها، شامل بلوک‌بندی و تصادفی‌سازی جداگانه برای هر فاز در هر بلوک است. این ساختار به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا در پایان هر سال زراعی، تحلیل موقت اما معتبری از نتایج داشته باشد. در مقابل، در روش‌های فاقد تکرارهای سالانه (استراتژی دوم)، تحلیل صحیح مستلزم صبر برای جمع‌آوری داده‌های چندساله و ناگزیر به پذیرش این پیش‌فرض مخاطره‌آمیز است که برخی اثرات متقابل سال و تیمار ناچیز بوده و می‌توان آن‌ها را به عنوان خطای آزمایش نادیده گرفت.

آزمایش‌های چندتناوبی، صرف‌نظر از اینکه با کدام الگوی اجرایی (شروع همزمان تمام فازها یا شروع پلکانی) پیاده‌سازی شوند، نیازمند گذر از یک فاز انتقالی هستند که در ادبیات علمی به سال‌های مقدماتی^۱ شهرت دارد (Yates, 1954). داده‌های حاصل از این دوره معمولاً از تحلیل‌های آماری اصلی کنار گذاشته می‌شوند؛ زیرا در این بازه زمانی،

1. Preliminary years

سیستم در حال استقرار است و اثرات تجمعی و واقعی تیمارهای تناوبی هنوز به‌طور کامل در محیط آزمایش تثبیت نشده‌اند. هدف راهبردی از در نظر گرفتن این دوره، حذف اثرات تاریخچه قبلی زمین و ایجاد یکنواختی در سیستم پیش از ارزیابی نهایی تیمارهاست تا اطمینان حاصل شود که تفاوت‌های مشاهده‌شده در عملکرد، ناشی از ماهیت تناوب است و نه شرایط اولیه ناهمگن (Olesen et al., 2000). طول این دوره استقرار، تابعی از ماهیت تیمارها و پویایی سیستم است، اما یک قاعده کلی وجود دارد که با افزایش طول دوره تناوب، مدت زمان سال‌های مقدماتی نیز باید افزایش یابد تا فرصت کافی برای بروز اثرات متقابل فراهم شود (Payne, 2015). برای نمونه، در یک تناوب کوتاه مدت سه‌ساله، لحاظ کردن یک سال به‌عنوان دوره مقدماتی معمولاً کفایت می‌کند، در حالی که برای تناوب‌های طولانی‌تر (مانند شش ساله)، این بازه زمانی جهت اطمینان از استقرار کامل اثرات، به دو سال یا بیشتر افزایش می‌یابد. عدم رعایت این دوره تنفس، می‌تواند منجر به ورود پارازیت به داده‌ها و استنتاج‌های نادرست در سال‌های اولیه گردد.

انتخاب راهبرد آغاز آزمایش، خواه به صورت شروع همزمان تمام فازها و خواه به روش پلکانی، تصمیمی فنی است که باید با توجه به مؤلفه‌های متعددی نظیر اهداف اختصاصی پژوهش و به‌ویژه تاریخچه کشت مزرعه اتخاذ گردد. اهمیت تاریخچه زمین از آنجا ناشی می‌شود که اگر در سال زراعی پیش از شروع آزمایش، محصولی (مانند گندم) در کل مزرعه کشت شده باشد که خود یکی از اجزای تناوب مورد مطالعه است، شروع همزمان تمام فازها می‌تواند چالش برانگیز باشد. در چنین سناریویی، برخی از کرت‌ها (که باید با گندم شروع شوند) ناگزیر با شرایط کشت متوالی (گندم پس از گندم) مواجه می‌شوند، در حالی که سایر کرت‌ها شرایط متفاوتی دارند. این ناهمگنی اولیه، یک اثر نامطلوب و مخدوش‌کننده بر نتایج سال‌های نخست تحمیل می‌کند که باید در تحلیل‌ها مدنظر قرار گیرد. علاوه بر ملاحظات زراعی، مدیریت ریسک نیز در انتخاب روش شروع نقشی تعیین‌کننده دارد. با توجه به پیچیدگی ذاتی و هزینه‌های سنگین آزمایش‌های تناوبی بلندمدت، روش پلکانی نوعی حاشیه ایمنی برای پژوهشگر ایجاد می‌کند. چنانچه در

طراحی اولیه یا اجرای سال نخست اشکالی رخ دهد (مثلاً انتخاب نادرست یک رقم یا شکست در استقرار یک تیمار)، در روش پلکانی تنها یک سری (یک تکرار زمانی) تحت تأثیر قرار می‌گیرد و امکان اصلاح یا تکرار آن با هزینه و تبعات کمتر وجود دارد. در مقابل، در روش شروع همزمان، بروز چنین خطایی می‌تواند کل ساختار آزمایش و تمام تکرارها را به طور همزمان مخدوش سازد. این واقعیت، ضرورت برنامه‌ریزی راهبردی و آینده‌نگرانه را در فاز طراحی اولیه آزمایش‌های تناوبی، جهت به حداقل رساندن ریسک شکست، بیش از پیش آشکار می‌سازد.

یکی دیگر از چالش‌های فنی در طراحی پایه آزمایش‌های چندتناوبی، به‌ویژه زمانی که تعداد تناوب‌های مورد بررسی زیاد است، افزایش ناگزیر ابعاد بلوک‌های آزمایشی است. بزرگ شدن بلوک‌ها معمولاً منجر به کاهش یکنواختی خاک درون بلوک و در نتیجه افزایش خطای آزمایش می‌گردد. برای غلبه بر این مشکل، راهکار نخست، اجرای هر مرحله از تناوب در یک ناحیه یا سری مجزا است. به عنوان نمونه، در یک تناوب سه ساله گندم-گندم-کلزا، می‌توان زمین آزمایش را به سه سری مجزا تقسیم کرد که هر کدام به یک فاز شروع کننده اختصاص دارد. در این روش، در هر یک از این سطوح (سری‌ها)، کرت‌های مربوط به یک تکرار کامل از تیمارها به صورت یک بلوک مستقل گروه‌بندی می‌شوند که باعث کوچکتر شدن بلوک‌ها و افزایش دقت می‌گردد. راهکار پیشرفته‌تر برای کاهش بیشتر اندازه بلوک‌ها، استفاده از تکنیک آماری اختلاط^۱ است. در این روش، به جای اینکه تمام سری‌ها در هر بلوک حضور داشته باشند، سری‌ها به گروه‌های کوچکتری تقسیم می‌شوند که از نظر آماری قابل مقایسه هستند. دو سری مختلف (خواه از یک تناوب مشابه و خواه از تناوب‌های متفاوت) زمانی با توجه به یک محصول آزمایشی خاص قابل مقایسه محسوب می‌شوند که حداقل در یک سال مشترک، آن محصول آزمایشی در هر دو سری کشت شده باشد (Patterson, 1964).

برای درک عملی این مفهوم، به جدول ۴-۱۰ (آزمایش تناوب برنج و گیاهان علوفه‌ای) بازگردیم. اگر بخواهیم سری اول (از تناوب ۱) را با سری پنجم (از تناوب ۲) مقایسه کنیم، مشاهده می‌شود که در سری اول، برنج در سال‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ کشت شده است؛ در حالی که در سری پنجم، کشت برنج در سال‌های ۲، ۳، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱ انجام گرفته است. بنابراین، این دو سری در سال‌های هفتم و دهم دارای کشت مشترک برنج هستند و در نتیجه در این سال‌ها قابل مقایسه می‌باشند. در مقابل، سری اول با سری‌های دوم و سوم (از همان تناوب ۱) فاقد هرگونه سال مشترک در کشت برنج هستند و بنابراین مستقیماً قابل مقایسه نیستند. با به کارگیری این مفهوم و گروه‌بندی سری‌های قابل مقایسه در بلوک‌های ناقص^۱، می‌توان برخی از سری‌های تناوبی غیرضروری را حذف کرد که این امر به کاهش چشمگیر طول بلوک‌ها و افزایش دقت آزمایش منجر می‌شود.

۴-۸. دوره‌های زمانی در آزمایش‌های بلندمدت

در معماری آزمایش‌های بلندمدت، مدیریت زمان نقشی هم‌سنگ با مدیریت مکان ایفا می‌کند. همان‌گونه که در آزمایش‌های زراعی متداول از بلوک‌بندی برای کنترل تغییرات مکانی و کاهش خطای آزمایش استفاده می‌شود، در مطالعات درازمدت نیز می‌توان تغییرات زمانی را از طریق تقسیم طول عمر آزمایش به چندین دوره مدیریت کرد. فلسفه این تقسیم‌بندی بر این اصل استوار است که در طول هر دوره، تا زمانی که چارچوب اصلی آزمایش حفظ شود، تغییرات ذاتی در ویژگی‌های هر واحد آزمایشی نسبتاً ناچیز و قابل کنترل خواهد بود. طول هر دوره بر اساس بازه ثبات مدیریتی تعریف می‌شود؛ یعنی مدت زمانی که مدیریت واحدهای آزمایشی ثابت یا تقریباً ثابت باقی می‌ماند (McRae and Ryan, 1996). این دوره‌ها می‌توانند بر اساس معیارهای مختلفی نظیر مدت‌زمان لازم برای تکمیل یک چرخه مدیریتی، زمان مورد نیاز برای تکمیل ارزیابی‌های خاص، یا بازه زمانی لازم برای ظهور تفاوت‌های معنی‌دار بین تیمارها تعریف شوند.

چالش اصلی در تعیین طول دوره، زمانی بروز می‌کند که آزمایش شامل چندین تناوب با طول‌های متفاوت باشد. در آزمایش‌های دارای تناوب واحد، هر دوره به سادگی از ابتدا تا انتهای یک چرخه تناوب تعریف می‌شود؛ اما در آزمایش‌هایی که تناوب‌های متفاوت با مدت زمان نابرابر (مثلاً ۳ و ۴ ساله) را مقایسه می‌کنند، تعریف دوره پیچیده‌تر است. در این شرایط، یک دوره زمانی استاندارد هنگامی تکمیل می‌شود که تمامی تناوب‌ها به صورت همزمان چرخه‌های خود را به پایان رسانده باشند (رسیدن به کمترین مضرب مشترک سال‌ها) (Yates, 1954). اگرچه در عمل ممکن است به دلایل فنی یا اجرایی، طول دوره برای برخی تیمارها متفاوت در نظر گرفته شود، اما رعایت اصل یکسان بودن طول دوره مطالعه برای تمام واحدها، فرآیند تجزیه و تحلیل آماری را به مراتب ساده‌تر و دقیق‌تر می‌سازد. نکته حائز اهمیت دیگر، پویایی ساختار آزمایش در گذر از یک دوره به دوره دیگر است. آزمایش‌های بلندمدت نباید ساختاری غیرقابل تغییر داشته باشند (Lindenmayer and Likens, 2009). در شروع هر دوره جدید، ممکن است نیاز باشد که ساختار تیمارها مورد بازنگری قرار گیرد. برای نمونه، در حالی که تیمارهای پایه (مانند روش‌های اصلی خاک‌ورزی) در دوره جدید تداوم می‌یابند، ممکن است تیمارهای تکمیلی (مانند یک رقم جدید یا سطح کودی متفاوت) به زیرواحدهای آزمایش افزوده شوند تا پاسخگوی پرسش‌های جدید باشند. حتی اگر آزمایش به اهداف اولیه خود دست یافته باشد، می‌توان آن را با تعریف اهداف نوین در دوره‌های بعدی ادامه داد. با این حال، شرط حیاتی در این به‌روزرسانی، رعایت اصل تفکیک‌پذیری است؛ بدین معنا که افزودن تیمارهای جدید باید به گونه‌ای طراحی شود که آثار آن‌ها از اثرات باقیمانده^۱ تیمارهای قبلی کاملاً قابل تمایز باشد. از این‌رو، طراحی اولیه آزمایش باید دارای چنان انعطاف‌پذیری و ظرفیتی باشد که امکان افزودن لایه‌های جدید تیماری را در مراحل بعدی، بدون مخدوش کردن تاریخچه آزمایش، فراهم آورد (Mead et al., 2012).

۴-۸-۱. مدیریت زمانی تیمارها در آزمایش‌های بلندمدت

زمان‌بندی اعمال تیمارها، بعدی پیچیده و تعیین‌کننده در طراحی آزمایش‌های بلندمدت است. برخلاف آزمایش‌های کوتاه‌مدت که تیمارها معمولاً الگوی ثابتی دارند، در مطالعات درازمدت سناریوهای متنوعی وجود دارد از جمله تیمارها ممکن است تنها یک‌بار در نقطه شروع اعمال شوند (مانند اصلاح‌کننده‌های خاک)، به صورت سالانه تکرار گردند (مانند کوددهی)، یا با فواصل زمانی منظم و نامنظم اعمال شوند. انتخاب استراتژی مناسب، کاملاً وابسته به ماهیت پرسش پژوهشی است: آیا هدف، سنجش پایداری اثرات باقیمانده یک مداخله تک‌مرحله‌ای است؟ یا ارزیابی اثرات تجمعی^۱ ناشی از کاربرد مکرر نهاده‌ها مدنظر است؟ درک دقیق تفاوت میان این اثرات برای تفسیر داده‌ها ضروری است. جدول ۴-۱۱ طبقه‌بندی جامعی از انواع آزمایش‌های بلندمدت بر اساس الگوی زمانی اعمال تیمار و ماهیت اطلاعات قابل استخراج از آن‌ها ارائه می‌دهد.

در آزمایش‌هایی که تیمارها تنها در نقطه شروع (سال اول) اعمال می‌شوند (مانند یک بار مصرف کودهای دیررها یا اصلاح‌کننده‌های خاک)، هدف اصلی تعیین روند زوال یا ماندگاری اثرات در سیستم است. اگرچه طرح‌های آزمایشی متداول برای شروع این مطالعات مناسب هستند، اما تحلیل داده‌های حاصل در طول زمان، مستلزم تنظیم مدل‌های آماری برای در نظر گرفتن همبستگی‌های سریالی^۲ در واحدهای آزمایشی است؛ چرا که داده‌های سال‌های بعد مستقل از سال اول نیستند. در مقابل، در آزمایش‌هایی که تیمارها به صورت تکرار سالانه (مانند کوددهی یا خاک‌ورزی هر ساله) اعمال می‌شوند، تمرکز بر روی اثرات تجمعی نهاده‌ها بر عملکرد و سلامت خاک است. در این حالت، طرح‌های فاکتوریل (مانند 2^n یا 3^n) انعطاف‌پذیری بالایی برای افزودن عوامل جدید در دوره‌های بعدی فراهم می‌کنند. حالت سوم، اعمال تیمارها با فواصل زمانی ثابت است (مثلاً هر ۳

1 Cumulative effects

2. Autocorrelation

سال یک‌بار). این رویکرد امکان مقایسه جالبی را فراهم می‌کند: می‌توان اثر تجمعی یک بار کاربرد حجم زیاد کود (مثلاً ۳۰ تن در هکتار در سال اول) را با کاربرد سالانه مقادیر کمتر (۱۰ تن در سال) مقایسه کرد و اطلاعات ارزشمندی درباره اثرات مستقیم، باقیمانده و تجمعی به دست آورد.

جدول ۴-۱۱. طبقه‌بندی آزمایش‌های بلندمدت بر اساس الگوی زمانی اعمال تیمار و ماهیت اثرات قابل ارزیابی

الگوی زمانی اعمال تیمار	ماهیت اثرات قابل ارزیابی (نوع اطلاعات)	مثال
۱. فقط در سال اول (نقطه شروع)	صرفاً اثرات باقیمانده در گذر زمان	کاربرد یک‌باره اصلاح‌کننده‌های دیرپا (مانند بیوچار، زئولیت یا آهک) در شروع آزمایش برای سنجش دوام اثر آن‌ها در خاک طی ۱۰ سال.
۲. تکرار در هر سال (پیوسته)	اثرات تجمعی و روند تغییرات سیستم	کاربرد سالانه کودهای شیمیایی (مانند اوره) یا سیستم‌های خاک‌ورزی (مانند بی‌خاک‌ورزی) در تمام سال‌های آزمایش برای بررسی تغییرات تدریجی ماده آلی خاک.
۳. با فواصل زمانی ثابت (متناوب)	تفکیک اثرات مستقیم (سال اعمال)، باقیمانده (سال‌های بعد) و تجمعی	کاربرد حجم زیادی از کود دامی (مثلاً ۳۰ تن) هر ۳ سال یک‌بار؛ جهت مقایسه اثر مستقیم (سال اول) با اثر باقیمانده (سال‌های دوم و سوم).
۴. چرخشی یا متغیر	اثرات مستقیم و باقیمانده (با پیچیدگی در تفکیک)	اعمال تیمارهای خاص فقط بر روی یک گیاه معین در تناوب (مثلاً کاربرد علف‌کش اختصاصی فقط در سال‌های کشت گندم و عدم کاربرد در سال‌های کشت کلزا).
۵. آزمایش‌های اصلاح‌شده	اثرات مستقیم تیمار جدید + اثرات باقیمانده (تداخلی) تیمار قدیم	تقسیم کرت‌های یک آزمایش ۲۰ ساله (که قبلاً تیمار کودی داشتند) به دو نیمه برای اعمال یک تیمار جدید (مانند رقم) و سنجش برهمکنش آن با سابقه حاصلخیزی خاک.

برگرفته از (Clarke et al., 1996; McRae and Ryan, 1996)

سناریوی چهارم به اعمال تیمارها با الگوی چرخشی یا متغیر اختصاص دارد. این رویکرد زمانی اتخاذ می‌شود که چارچوب کلی آزمایش ثابت است، اما اعمال تیمار وابسته به مرحله خاصی از تناوب یا شرایط متغیر مزرعه می‌باشد. برای نمونه، ممکن است یک تیمار حفاظتی خاص (مانند علف‌کش اختصاصی) تنها در سال‌هایی که محصولی معین (مانند گندم) کشت می‌شود اعمال گردد و در سال‌های کشت محصول دیگر (مانند کلزا) متوقف شود. این استراتژی به پژوهشگر امکان می‌دهد تا تعامل میان اثر مستقیم تیمار بر گیاه هدف و اثر باقیمانده آن بر گیاهان بعدی در چرخه تناوب را با دقت تفکیک و مدل‌سازی نماید. در چنین طرح‌هایی، استفاده از مربع‌های لاتین یا مجموعه‌های متعامد، ابزار قدرتمندی برای کنترل اثرات باقیمانده مرتبه اول و بالاتر محسوب می‌شود.

پيچيده‌ترين و در عين حال کارآمدترین سناریو در مدیریت آزمایش‌های بلندمدت، مربوط به آزمایش‌های اصلاح‌شده^۱ است. زمانی که اهداف علمی یک دوره از آزمایش محقق شده باشد، می‌توان به جای خاتمه دادن به آزمایش، از همان بستر ارزشمند (که دارای سابقه مشخصی است) برای پاسخگویی به پرسش‌های پژوهشی جدید استفاده نمود. شرط بنیادین برای موفقیت در این رویکرد، انتخاب هوشمندانه تیمارهای جدید است؛ بدین معنا که تیمارهای دوره جدید باید با تیمارهای دوره قبلی متعامد باشند. این ویژگی آماری به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا اثرات مستقیم تیمار جدید را مستقل از اثرات باقیمانده (تداخلی) تیمار قدیم برآورد کند. برای درک عملی این مفهوم، جدول ۴-۱۲ یک آزمایش فرضی سه دوره‌ای را به تصویر می‌کشد که در آن سه عامل مدیریتی متفاوت (خاک‌ورزی، آبیاری و کنترل علف‌هزر) به ترتیب در سه دوره زمانی متوالی بر روی همان واحدهای آزمایشی اعمال شده‌اند. طرح آماری به کار رفته در این مثال، مجموعه متعامد مربع لاتین^۲ با ۱۶ واحد آزمایشی (در قالب ۴ ردیف و ۴ ستون) است که امکان تفکیک دقیق اثرات مستقیم و باقیمانده را فراهم می‌آورد. در دوره اول، تنها تیمار

1. Modified experiments

2. Orthogonal set of Latin squares

خاک‌ورزی اعمال شده است. در دوره دوم، تیمار آبیاری اضافه می‌شود، اما تحلیل آن باید با در نظر گرفتن اثر باقیمانده خاک‌ورزی انجام شود. در دوره سوم، با ورود تیمار کنترل علف‌هرز، پیچیدگی تحلیل به اوج خود می‌رسد.

جدول ۴-۱۲. ساختار اجرایی یک آزمایش اصلاح‌شده سه دوره‌ای (با طرح مربع لاتین)
(در هر دوره زمانی، یک لایه تیماری جدید بر روی لایه‌های قبلی اضافه شده است)

۴	۳	۲	۱
خاک‌ورزی متداول	خاک‌ورزی	کم خاک‌ورزی،	بی خاک‌ورزی،
تعدیل شده، آبیاری	متداول، آبیاری	آبیاری قطره‌ای،	آبیاری غرقابی،
بارانی، بدون کنترل	نشئی، کنترل علف-	کنترل علف‌هرز	کنترل علف‌هرز
علف‌هرز	هرز تلفیقی	شیمایی	مکانیکی
خاک‌ورزی متداول،	کم خاک‌ورزی،	بی خاک‌ورزی،	خاک‌ورزی متداول
تعدیل شده، آبیاری	آبیاری قطره‌ای،	آبیاری غرقابی،	تعدیل شده، آبیاری
بارانی، بدون کنترل	کنترل علف‌هرز	کنترل علف‌هرز	بارانی، بدون کنترل
علف‌هرز تلفیقی	شیمایی	مکانیکی	علف‌هرز
کم خاک‌ورزی،	بی خاک‌ورزی،	خاک‌ورزی متداول	خاک‌ورزی متداول،
آبیاری قطره‌ای،	آبیاری غرقابی،	تعدیل شده، آبیاری	آبیاری نشئی، کنترل
کنترل علف‌هرز	کنترل علف‌هرز	بارانی، بدون کنترل	علف‌هرز تلفیقی
شیمایی	مکانیکی	علف‌هرز	
کم خاک‌ورزی،	خاک‌ورزی متداول	خاک‌ورزی متداول،	کم خاک‌ورزی،
آبیاری قطره‌ای،	تعدیل شده، آبیاری	آبیاری نشئی، کنترل	آبیاری قطره‌ای،
کنترل علف‌هرز	بارانی، بدون کنترل	علف‌هرز تلفیقی	کنترل علف‌هرز
مکانیکی	علف‌هرز		شیمایی

هر بخش از جدول (هر سلول) نشان‌دهنده ترکیب تیمارهایی است که آن واحد آزمایشی در طول سه دوره دریافت کرده است. آزمایش دارای سه دوره زمانی است و هر یک از تیمارها (خاک‌ورزی، آبیاری و کنترل علف‌هرز) در یک دوره زمانی اعمال شده‌اند.

تحلیل جامع داده‌های چنین آزمایشی نیازمند انجام آنالیز واریانس جداگانه برای هر دوره است، همان‌طور که در جدول ۴-۱۳ خلاصه شده است. نکته کلیدی در این جدول،

تغییر در منابع تغییر و درجات آزادی با پیشرفت زمان است. در دوره اول، تحلیل ساده است (اثر خاک‌ورزی + خطا). در دوره دوم، امکان ارزیابی همزمان اثرات باقیمانده (عامل قبلی) و اثرات مستقیم (عامل فعلی) وجود دارد، مشروط بر اینکه این اثرات به صورت افزایشی^۱ عمل کنند. اما چالش اصلی در دوره سوم رخ می‌دهد؛ جایی که با ورود عامل سوم، درجات آزادی برای برآورد خطا به شدت کاهش می‌یابد. این واقعیت نشان می‌دهد که انتخاب تیمارهای جدید متعامد، تنها در صورتی امکان‌پذیر است که چنین ظرفیتی از همان فاز طراحی اولیه پیش‌بینی شده باشد. اگرچه برنامه‌ریزی برای این قابلیت در شروع مطالعه هزینه‌چندانی ندارد، اما غفلت از آن می‌تواند دست پژوهشگر را برای اصلاحات آتی در آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی کاملاً ببندد.

جدول ۴-۱۳. روند تغییر در ساختار آنالیز واریانس در طول سه دوره آزمایش
(توجه شود که چگونه با افزودن لایه‌های تیماری جدید، مدل پیچیده‌تر می‌شود)

دوره اول		دوره دوم		دوره سوم	
منابع تغییر	درجه آزادی	منابع تغییر	درجه آزادی	منابع تغییر	درجه آزادی
ردیف	۳	ردیف	۳	ردیف	۳
ستون	۳	ستون	۳	ستون	۳
تیمار	۳	تیمار خاک‌ورزی	۳	تیمار خاک‌ورزی	۳
خاک‌ورزی		(باقیمانده)		(باقیمانده)	
خطا	۶	تیمار آبیاری	۳	تیمار آبیاری	۳
		(مستقیم)		(باقیمانده)	
		خطا	۳	تیمار کنترل علف	۳
				هرز (مستقیم)	
				خطا	۰

در دوره سوم این مثال خاص، به دلیل اشباع درجات آزادی توسط تیمارها، درجه آزادی خطا به صفر می‌رسد که نشان‌دهنده لزوم پیش‌بینی تکرارهای بیشتر در طراحی اولیه است

۹-۴. مدیریت تغییرات تکنولوژیک و به‌روزرسانی عملیات زراعی در آزمایش‌های بلندمدت

یکی از معضلات ذاتی در آزمایش‌های بلندمدت، مواجهه با تناقض حفظ ثبات در برابر لزوم به‌روزرسانی است. بدیهی است که تغییر شیوه‌های مدیریت زراعی در طول اجرای پژوهش می‌تواند یکنواختی سری‌های زمانی داده‌ها را مخدوش کند؛ اما از سوی دیگر، اصرار بر روش‌های قدیمی باعث می‌شود که آزمایش پس از گذشت چند سال، از واقعیت‌های فنی روز فاصله گرفته و نتایج آن غیر کاربردی شود. بنابراین، به‌روزرسانی روش‌های مدیریت مزرعه در مؤلفه‌هایی نظیر آرایش کاشت، تراکم، ارقام و نهاده‌ها در آزمایش‌های بلند مدت امری اجتناب‌ناپذیر است. در بحث عملیات زراعی (تراکم و آرایش کاشت)، اگر تصمیم بر آن باشد که مدیریت‌ها دقیقاً مشابه سال شروع آزمایش ثابت نگه داشته شوند، پژوهش پویایی خود را از دست می‌دهد. برای مثال، در گذشته تراکم مطلوب کشت کنگد ۱۸ تا ۲۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته می‌شد (منصوری، ۱۳۸۸)، اما پژوهش‌های متأخر نشان داده‌اند که با اصلاح ژنتیکی و مدیریتی، افزایش تراکم این گیاه تا ۳۰ بوته در مترمربع نیز می‌تواند موجب افزایش عملکرد شود (غلامحسینی و همکاران، ۱۴۰۲). نمونه دیگر، تغییر الگوی کشت از یک خط روی پشته به دو خط روی پشته است که کارایی مصرف منابع را بهبود می‌بخشد (غلامحسینی و همکاران، ۱۴۰۱). برای مدیریت علمی این تغییرات، راهکار پیشنهادی این است که در بازه‌های زمانی مشخص (مثلاً هر چهار تا شش سال یک‌بار)، یک بازنگری فنی انجام شده و اصلاحات لازم بر اساس آخرین یافته‌های علمی اعمال شود (Poulton et al., 2024). این رویکرد دوره‌ای، ضمن حفظ ساختار کلی آزمایش، از فرسودگی تکنولوژیک آن جلوگیری می‌کند.

چالش دوم مربوط به مدیریت ژرم پلاسما (ارقام) است. با گذشت زمان، ارقام قدیمی از رده خارج شده و بذرها نایاب می‌شود؛ لذا انجام یک آزمایش ۱۰ ساله با یک رقم

ثابت عملاً غیرممکن است. در این شرایط، راهکار صحیح انتخاب گروه‌های عملکردی مشابه است؛ بدین معنا که هنگام جایگزینی، از ارقام جدیدی استفاده شود که از نظر تیپ رشد، طول دوره رسیدگی و پتانسیل ژنتیکی به گروه قبلی نزدیک باشند. اصرار بر استفاده از ارقام منسوخ، تنها منجر به تولید داده‌هایی می‌شود که برای کشاورزان پیشرو فاقد ارزش کاربردی است. در زمینه مدیریت تغذیه و نهاده‌های شیمیایی نیز اصل بر حفظ میزان عنصر مؤثر است، نه منبع کود. با توجه به تحولات بازار و فناوری (مانند جایگزینی سوپر فسفات معمولی با تریپل، یا جایگزینی نیتрат آمونیوم با اوره در ایران)، پژوهشگر باید بر تأمین مقدار ثابت و مشخصی از عناصر خالص (N, P, K) تمرکز کند. این رویکرد به تیم تحقیق اجازه می‌دهد تا ضمن همگامی با تغییرات بازار نهاده‌ها، پیوستگی تیمارهای تغذیه‌ای را در درازمدت حفظ نماید. نکته حیاتی در تمام این تغییرات، مستندسازی دقیق زمان و ماهیت تغییرات است تا در تحلیل‌های آماری نهایی، بتوان اثرات ناشی از تغییر تکنولوژی را از اثرات تیمار تفکیک نمود.

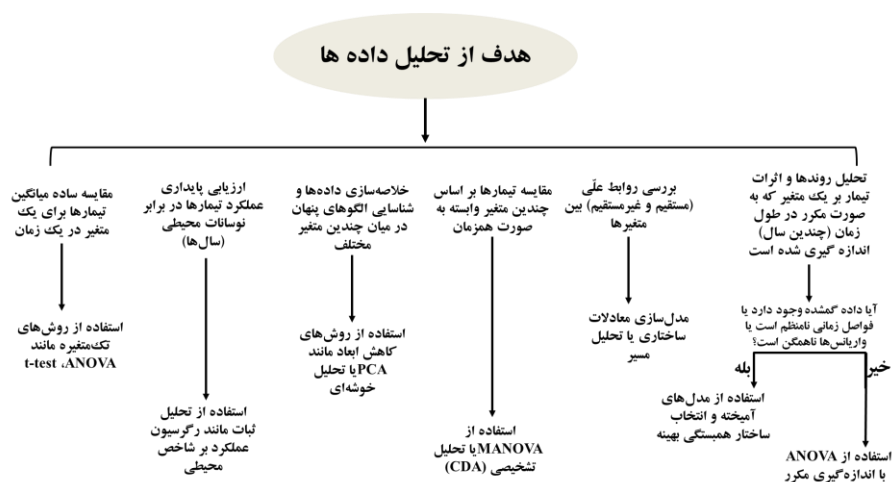
۴-۱۰. روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها در آزمایش‌های بلند مدت زراعی

آزمایش‌های نظام‌های زراعی به دلیل ماهیت بلندمدت و ساختار پیچیده تیمارهای تناوبی و مدیریتی، همواره با طیف وسیعی از عوامل غیرقابل کنترل و مخدوش‌کننده مواجه هستند؛ عواملی که تفکیک اثرات آن‌ها از منابع اصلی تغییرات، چالشی جدی محسوب می‌شود (Teasdale and Cavigelli, 2010). این پیچیدگی ذاتی ایجاب می‌کند که پژوهشگران برای استخراج نتایج معتبر، به جای یک روش واحد، بر ترکیبی هوشمندانه از رویکردهای آماری تکیه کنند. در گام نخست، روش‌های تک‌متغیره کلاسیک نظیر آنالیز واریانس^۱ و مقایسات میانگین، ابزاری کارآمد برای ارزیابی جداگانه صفات کلیدی مانند عملکرد محصول، شاخص‌های حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب به شمار می‌روند. با این حال، این روش‌ها در تبیین روابط پیچیده میان‌متغیری و الگوهای پنهان

1. ANOVA

سیستم، محدودیت‌های ذاتی دارند. زمانی که داده‌ها الگوهای همبسته مشخصی را در طول زمان نشان می‌دهند یا نیاز به درک تعاملات چندجانبه بین متغیرهای محیطی و مدیریتی وجود دارد، روش‌های تحلیل چندمتغیره ضرورت می‌یابند. این روش‌ها قادرند با کاهش ابعاد داده‌ها و ایجاد متغیرهای ترکیبی جدید، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تفاوت‌های تیماری را شناسایی کرده و تصویری جامع‌تر از رفتار سیستم ارائه دهند. افزون بر این، در سال‌های اخیر و با توسعه توان محاسباتی، رویکرد مدل‌سازی ساختار همبستگی^۱ در قالب مدل‌های آمیخته^۲، جایگاه ویژه‌ای در تحلیل‌های زراعی یافته است. اهمیت این رویکرد از آنجا ناشی می‌شود که در آزمایش‌های بلندمدت، داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های متوالی از یک کرت واحد، مستقل از یکدیگر نیستند (نقض فرض استقلال خطاها) و نادیده گرفتن این وابستگی زمانی در روش‌های سنتی، منجر به نتایج گمراه‌کننده می‌شود. در پژوهش‌های جامع‌نگر، هیچ روش آماری به تنهایی پاسخگوی تمام پرسش‌ها نیست؛ بلکه دستیابی به نتایج قابل اعتماد مستلزم تلفیق هوشمندانه تحلیل‌های تک‌متغیره، چندمتغیره و مدل‌سازی‌های پیشرفته است تا بتوان پویایی‌های سیستم زراعی را از زوایای مختلف واکاوی کرد. بنابراین، انتخاب استراتژی تحلیلی مناسب، تابعی مستقیم از اهداف پژوهش و ساختار داده‌ها است. برای تسهیل این فرآیند تصمیم‌گیری، شکل ۴-۲ فلوچارت راهنمایی را ارائه می‌دهد که پژوهشگران را در انتخاب متناسب‌ترین روش تحلیلی یاری می‌رساند. در ادامه این فصل، جزئیات فنی و اجرایی هر یک از این روش‌ها به تفکیک مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

-
1. Modeling the correlation structure
 2. Mixed Models



شکل ۴-۲. فلوجارت راهنمای انتخاب روش آماری مناسب در پژوهش‌های نظام‌های زراعی

۴-۱۰-۱. آماره‌های خلاصه و روش‌های تک‌متغیره

در تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌های زراعی بلندمدت، رویکرد آماره‌های خلاصه^۱ یا متغیرهای مشتق‌شده^۲، راهکاری کارآمد و عمل‌گرایانه برای غلبه بر پیچیدگی‌های داده‌های اندازه‌گیری مکرر است. فلسفه این روش، تقلیل مجموعه داده‌های سری زمانی پیچیده به یک یا چند شاخص تک‌عددی معنادار برای هر واحد آزمایشی است تا امکان تحلیل آن‌ها با روش‌های آماری استاندارد (مانند ANOVA) فراهم شود. در این رویکرد، به جای درگیر شدن با همبستگی‌های زمانی بین سال‌ها، ویژگی‌های کلیدی منحنی پاسخ گیاه یا سیستم در طول زمان استخراج می‌شود. انتخاب نوع آماره خلاصه، تابعی مستقیم از پرسش بیولوژیک تحقیق است. طیف وسیعی از شاخص‌ها در این روش قابل محاسبه هستند: از شاخص‌های تجمعی نظیر مجموع عملکرد کل یا میانگین دوره (برای سنجش بهره‌وری کلی)، تا شاخص‌های توصیف‌کننده تغییرات مانند دامنه تغییرات (برای سنجش ثبات)، شیب خط رگرسیون (برای ارزیابی روند صعودی یا نزولی سیستم)،

1. Summary statistics
2. Derived variables

و یا شاخص پیشرفته‌تر سطح زیر منحنی^۱ که تصویری جامع از عملکرد سیستم در کل دوره زمانی ارائه می‌دهد (Mead et al., 2012). پس از محاسبه این شاخص‌ها برای هر کرت، داده‌های حاصله مستقل از زمان تلقی شده و با روش‌های تک‌متغیره قدرتمند تحلیل می‌شوند. مزیت راهبردی این روش، سادگی اجرا، تفسیر شفاف نتایج برای مخاطبان غیر آماری، و عدم نیاز به فرضیات پیچیده در مورد ساختار ماتریس کوواریانس است؛ چرا که با تجمع داده‌ها، مشکل همبستگی سریالی عملاً دور زده می‌شود.

با این وجود، به کارگیری این روش نیازمند ظرافت‌های آماری ویژه‌ای است. نخست آنکه آماره انتخابی باید از نظر بیولوژیکی معنادار باشد؛ محاسبه میانگین برای داده‌هایی که روندی غیرخطی یا نوسانی شدید دارند، ممکن است گمراه‌کننده باشد. همچنین، حساسیت به داده‌های پرت^۲ در این روش بالاست و در صورت وجود توزیع‌های غیرنرمال، استفاده از آماره‌های مقاوم (مانند میانه به جای میانگین) یا تبدیل داده‌ها ضروری است (Quinn and Keough, 2002). اما مهم‌ترین محدودیت ذاتی این رویکرد، از دست رفتن اطلاعات زمانی است. با خلاصه کردن ۱۰ سال داده در یک عدد (مثلاً میانگین)، الگوهای ظریف تعامل تیمار $\times$ زمان (مانند اینکه یک تیمار فقط در سال‌های خشک برتر بوده است) پنهان می‌مانند. چالش آماری دیگر، پدیده تورم خطای نوع اول^۳ ناشی از آزمون‌های چندگانه است. زمانی که پژوهشگر چندین آماره خلاصه مختلف (میانگین، حداکثر، شیب و...) را به طور جداگانه آزمون می‌کند، احتمال اینکه حداقل یکی از این آزمون‌ها به تصادف معنی‌دار شود (مشکل مقایسه‌های چندگانه)، به شدت افزایش می‌یابد (Chen et al., 2017). برای کنترل این خطا، استفاده از روش‌های اصلاحی نظیر اصلاح بونفرونی^۴ (که بسیار محافظه‌کارانه است) (Ott and Longnecker, 2010) یا روش

1. Area under the curve (AUC)

2. Outliers

3. Type I error inflation

4. Bonferroni correction

مدرن‌تر کنترل نرخ کشف کاذب^۱ (Storey, 2002) توصیه می‌شود. بنابراین، اگرچه روش آماره‌های خلاصه ابزاری ارزشمند برای پاسخ به سوالات کلی (مانند کدام تیمار در مجموع بهتر بود؟) است، اما برای واکاوی دینامیک‌های پیچیده و لحظه‌ای سیستم، ممکن است ناکافی باشد.

برای درک عمیق‌تر کارایی روش آماره‌های خلاصه و گذر از تعاریف نظری به کاربرد اجرایی، بررسی یک مثال محاسباتی ضروری است. یکی از متداول‌ترین پرسش‌ها در آزمایش‌های بلندمدت این است که آیا عملکرد محصول در طول زمان روندی صعودی، نزولی یا ثابت داشته است؟. تحلیل واریانس ساده روی میانگین عملکرد چندساله، قادر به پاسخگویی به این پرسش نیست، زیرا پویایی زمان را حذف می‌کند. در این شرایط، استفاده از شیب خط رگرسیون به عنوان یک متغیر مشتق‌شده، راهگشا خواهد بود. فرض کنید در یک آزمایش ۱۰ ساله گندم، دو تیمار مدیریتی شامل خاک‌ورزی متداول (Conv) و حفاظتی (Cons) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار مقایسه شده‌اند. برای تحلیل روند، به جای درگیر شدن با پیچیدگی‌های سری زمانی، می‌توان برای هر کرت آزمایشی یک رگرسیون خطی ساده بین عملکرد و سال برازش داد و شیب این خط (b) را محاسبه کرد. این شیب، نشان‌دهنده نرخ افزایش یا کاهش عملکرد در آن کرت خاص است و به عنوان داده جدید وارد آنالیز واریانس می‌شود. در ادامه، کد اجرایی نرم‌افزار SAS برای انجام این تحلیل ارائه شده است. در این کد، داده‌های خام ۱۰ ساله مستقیماً در درون دستور وارد شده‌اند تا فرآیند اجرا یکپارچه باشد.

1. False discovery rate (FDR)

روش کنترل نرخ کشف کاذب برخلاف روش‌های سنتی که احتمال وقوع حتی یک خطا را کنترل می‌کنند، درصد خطاها را در بین نتایج معنادار گزارش‌شده مدیریت می‌کند و معمولاً قدرت آماری بالاتری را برای شناسایی اثرات واقعی حفظ می‌نماید (Storey, 2002).


```

DATA wheat_longterm;
  INPUT Year Rep Tillage$ Yield;
  DATALINES;
  1 1 Conv 5.0
  2 1 Conv 4.9
  3 1 Conv 4.8
  4 1 Conv 4.7
  .
  ... سایر داده‌ها ۱۰ سال ...
  .
  3 3 Cons 4.4
  4 3 Cons 4.5
  5 3 Cons 4.7
  6 3 Cons 4.8
  7 3 Cons 5.0
  8 3 Cons 5.1
  9 3 Cons 5.3
  10 3 Cons 5.4
  ;
RUN;
PROC SORT DATA=wheat_longterm;
  BY Tillage Rep;
RUN;
PROC REG DATA=wheat_longterm OUTEST=slopes NOPRINT;
  BY Tillage Rep;
  MODEL Yield = Year;
RUN;
PROC GLM DATA=slopes;
  CLASS Tillage;
  MODEL Year = Tillage;
  LSMEANS Tillage / STDERR PDIF;
  TITLE "Comparison of Yield Trends (Slopes)";
RUN;

```

در دستور فوق، ابتدا با استفاده از گام DATA و DATALINES، داده‌های خام شامل سال، تکرار، تیمار و عملکرد وارد می‌شوند. سپس برای انجام تحلیل رگرسیون روی تک‌تک واحدهای آزمایشی، داده‌ها با دستور PROC SORT بر اساس تیمار و تکرار مرتب می‌گردند. هسته اصلی تحلیل، رویه PROC REG است که با استفاده از دستور

BY، برای هر کرت به صورت جداگانه مدل رگرسیونی عملکرد بر حسب سال را برازش می‌دهد. گزینه $OUTEST=slopes$ پارامترهای خط برازش شده (شامل عرض از مبدأ و شیب) را در یک مجموعه داده جدید ذخیره می‌کند. نکته مهم این است که در فایل خروجی، نام متغیر مربوط به شیب خط، همان نام متغیر مستقل در مدل رگرسیون (در اینجا Year) خواهد بود. در نهایت، رویه PROC GLM بر روی این داده‌های جدید اجرا می‌شود تا میانگین شیب‌ها را بین تیمارهای مختلف مقایسه کند. پس از اجرای دستور فوق، نرم‌افزار SAS خروجی‌های متعددی تولید می‌کند که مهم‌ترین آن‌ها برای تفسیر نتایج، جدول مقایسه میانگین‌هاست. جدول ۴-۱۴ خلاصه نتایج حاصل از آنالیز واریانس شیب‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۴. مقایسه میانگین شیب تغییرات عملکرد (تن در هکتار در سال) در دو سامانه خاک‌ورزی

تیمار خاک‌ورزی	میانگین شیب (b)	خطای استاندارد	سطح معنی‌داری تفاوت دو میانگین (P-value)
خاک‌ورزی متداول (Conv)	-۰/۱۱۹	۰/۰۰۴۵	$\leq ۰/۰۰۰۱$
خاک‌ورزی حفاظتی (Cons)	+۰/۱۵۷	۰/۰۰۴۵	

علامت منفی نشان‌دهنده روند کاهشی و علامت مثبت نشان‌دهنده روند افزایشی عملکرد در طول زمان است

همان‌طور که در جدول ۴-۱۴ مشاهده می‌شود، تفاوت بسیار معنی‌داری بین روند تغییرات عملکرد در دو سامانه وجود دارد. در سامانه متداول، میانگین شیب منفی (-۰/۱۱۹) برآورد شده است؛ این عدد به زبان بدین معناست که عملکرد گندم در این سامانه با گذشت زمان دچار زوال تدریجی شده و سالانه حدود ۱۱۹ کیلوگرم در هکتار کاهش یافته است. در مقابل، سامانه حفاظتی با میانگین شیب مثبت (+۰/۱۵۷)، رفتار کاملاً متفاوتی نشان داده و بهبود پایداری خاک در آن منجر به افزایش سالانه عملکرد به میزان ۱۵۷ کیلوگرم در هکتار گردیده است. این مثال به روشنی نشان می‌دهد که چگونه استفاده

از یک متغیر مشتق شده (در اینجا شیب خط)، می‌تواند پویایی‌های پنهان سیستم را که در میانگین‌گیری ساده گم می‌شوند، آشکار سازد.

نمونه‌ای واقعی از کارایی روش‌های تجزیه و تحلیل تک متغیره در تحلیل نظام‌های زراعی پیچیده، مطالعه بلندمدت کاویگلی و همکاران (Cavigelli et al., 2008) است. این پژوهش با ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر بازه زمانی طولانی، تنوع چشمگیر در نظام‌های زراعی (از متداول تا ارگانیک)، و ثبت همزمان شاخص‌های زراعی، اکولوژیک و اقتصادی، بستری ایده‌آل برای نشان دادن قدرت تحلیل‌های آماری کلاسیک فراهم آورده است. در این آزمایش، پنج نظام زراعی متمایز (جدول ۴-۱۵) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش کرت‌های خردشده مورد مقایسه قرار گرفتند. تنوع تیمارها شامل تفاوت در تناوب، شدت خاک‌ورزی، منبع تغذیه (شیمیایی و آلی) و استراتژی مدیریت علف‌های هرز بود.

جدول ۴-۱۵. مشخصات نظام‌های زراعی و عوامل مدیریتی مورد مطالعه در آزمایش کاویگلی و همکاران (Cavigelli et al., 2008) (نظام زراعی به عنوان عامل اصلی و تناوب به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. گیاهان ایتالیک به صورت پوششی کشت شده‌اند)

نظام زراعی	تناوب	سال‌های اجرای تناوب	عملیات خاک‌ورزی	تامین عناصر غذایی	روش کنترل علف‌های هرز
متداول	ذرت/چاودار - سویا - گندم	۳	شخم، دیسک و تسطیح	کودهای شیمیایی	علف کش
حفاظتی	ذرت/چاودار - سویا - گندم	۳	دیسک و تسطیح	کودهای شیمیایی	علف کش
ارگانیک ۲ ساله	ذرت/چاودار - سویا/ماشک	۲	شخم، دیسک و تسطیح	تثبیت بیولوژیک نیتروژن + منابع آلی	زراعی

ادامه جدول ۴-۱۵

نظام زراعی	تناوب	سال‌های اجرای تناوب	عملیات خاک‌ورزی	تامین عناصر غذایی	روش کنترل علف‌های هرز
ارگانیک ۳ ساله	ذرت/چاودار - سویا/گندم - ماشک	۳	شخم، دیسک و تسطیح	تثبیت بیولوژیک نیتروژن + منابع آلی	زراعی
ارگانیک ۶ ساله	ذرت/چاودار - سویا - گندم - یونجه (۳ سال)	۶	شخم، دیسک و تسطیح	تثبیت بیولوژیک نیتروژن + منابع آلی	زراعی

در گام نخست تحلیل، محققان با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) ساده بر روی داده‌های ۱۰ ساله، تفاوت‌های معنی‌داری را بین نظام‌ها آشکار کردند: نظام‌های ارگانیک اگرچه در برخی شاخص‌ها مطلوب بودند، اما در عملکرد ذرت و سویا افت معنی‌داری نسبت به نظام‌های متداول نشان دادند. برای واکاوی علل این افت، در گام دوم از تحلیل کوواریانس (ANCOVA) بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که ۷۰ تا ۷۵ درصد از کاهش عملکرد ذرت در نظام‌های ارگانیک، ناشی از محدودیت دسترسی به نیتروژن و ۲۵ تا ۳۰ درصد آن مربوط به رقابت علف‌های هرز بوده است. نکته آموزنده در این پژوهش، تلفیق طراحی خلاقانه با تحلیل ساده برای اثبات روابط علی و معلولی است. محققان برای کمی‌سازی دقیق خسارت علف‌هرز، در دل کرت‌های اصلی، ریزکرت‌هایی^۱ ایجاد کردند که در آن‌ها علف‌های هرز به طور کامل وجین می‌شدند. سپس با استفاده از معادله ساده زیر، سهم دقیق علف‌هرز در کاهش عملکرد محاسبه گردید:

درصد افت عملکرد = [(عملکرد در کرت وجین‌شده - عملکرد در کرت اصلی) /
عملکرد در کرت وجین‌شده] × ۱۰۰

این رویکرد گام به گام نشان می‌دهد که حتی با ابزارهای آماری پایه، اگر طراحی آزمایش هوشمندانه باشد، می‌توان به بینش‌های عمیقی درباره مکانیزم‌های عملکردی سیستم دست یافت.

۴-۱۰-۲. تحلیل ثبات و ثبات نسبی

در کنار روش‌های تک‌متغیره کلاسیک (مانند ANOVA)، تحلیل ثبات^۱ و ثبات نسبی^۲ از ابزارهای مکمل و ارزشمندی هستند که در پژوهش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی کاربرد گسترده‌ای دارند. یکی از اهداف راهبردی در این گونه آزمایش‌ها، سنجش تاب‌آوری و پایداری عملکرد تیمارهای مدیریتی در بستر نوسانات اقلیمی در گذر زمان است (Johnston and Poulton, 2018). در این راستا، تحلیل دقیق اثر متقابل سال $\times$ تیمار اهمیتی دوچندان می‌یابد؛ هرچند تفسیر این اثرات صرفاً با تکیه بر جداول تجزیه واریانس، به دلیل ماهیت پیچیده و چندوجهی عوامل اقلیمی، اغلب دشوار و ناکافی است (Vargas et al., 2015). برای غلبه بر این چالش تفسیری، رویکرد استاندارد، اندازه‌گیری کمی ثبات عملکرد در طول زمان است. از دیدگاه آماری، یک سیستم پایدار و مطلوب سیستمی است که ضمن حفظ میانگین عملکرد بالا، حداقل نوسان را در پاسخ به تغییرات محیطی نشان دهد. به بیان دقیق‌تر (بر اساس مدل‌های رگرسیونی)، چنین سیستمی باید دارای ضریب رگرسیون خطی نزدیک به یک و انحراف از خط رگرسیون نزدیک به صفر باشد (Crossa et al., 2015).

در عمل، تحلیل ثبات (روش فینلی و ویلکینسون^۳) از طریق برآزش یک مدل رگرسیون خطی بین عملکرد هر تیمار (متغیر وابسته) و میانگین عملکرد تمام تیمارها در هر سال (به عنوان شاخص محیطی یا متغیر مستقل) انجام می‌پذیرد (Finlay and Wilkinson, 1963). این روش مقایسه‌ای نیازمند داشتن داده‌های کافی از سال‌های متعدد است تا بتوان

-
1. Stability analysis
 2. Relative stability analysis
 3. Finlay and Wilkinson

تفاوت‌های معنی‌دار در شیب خطوط (پاسخ به محیط) و عرض از مبدأ (عملکرد پایه) را تعیین کرد (Greveniotis et al., 2023). در چارچوب نظریه فینلی و ویلکینسون (Finlay and Wilkinson, 1963)، تفسیر پایداری و سازگاری اکولوژیک تیمارها بر اساس تلفیق دو شاخص میانگین عملکرد و ضریب شیب رگرسیو (b) صورت می‌گیرد. بر این اساس، مقادیر مختلف شیب به شرح زیر تفسیر می‌شوند:

• **ضریب نزدیک به یک ($b \approx 1$):** نشان‌دهنده پایداری متوسط است؛ بدین معنا که تغییرات عملکرد تیمار، همگام با تغییرات محیطی است. اگر این ضریب با میانگین عملکرد بالا همراه باشد، تیمار دارای سازگاری عمومی^۱ بوده و برای طیف وسیعی از محیط‌ها مناسب است.

• **ضریب به‌طور معنی‌داری بزرگتر از یک ($b > 1$):** بیانگر حساسیت بالای تیمار به تغییرات محیطی است. این نظام‌های زراعی در محیط‌های مساعد (تر سالی یا نهاده بالا) عملکردی فوق‌العاده دارند، اما در محیط‌های نامساعد به شدت دچار افت می‌شوند. این حالت بیانگر سازگاری خصوصی با محیط‌های مساعد^۲ است.

• **ضریب به‌طور معنی‌داری کوچکتر از یک ($b < 1$):** نشان‌دهنده مقاومت بالا در برابر تغییرات محیطی است. این نظام‌ها در محیط‌های ضعیف و کم‌بازده، عملکردی بالاتر از میانگین دارند، اما توانایی پاسخگویی مناسب به بهبود شرایط محیطی را ندارند. این حالت، سازگاری خصوصی با محیط‌های نامساعد^۳ نامیده می‌شود.

این تکنیک به‌ویژه در آزمایش‌های بلندمدت فاقد تکرار مکانی، که در مطالعات سیستمی رایج هستند، دو مزیت راهبردی دارد. نخست، برآورد معتبری از عملکرد مورد انتظار در محیط‌های مختلف فراهم می‌کند و دوم، امکان ترسیم تصویری شفاف از الگوی برهمکنش تیمار با محیط را میسر می‌سازد. با این حال، در سناریوهای خاصی که آزمایش

-
1. General adaptability
 2. Specific adaptability to favorable environments
 3. Specific adaptability to unfavorable environments

صرفاً در یک مکان ثابت اجرا شده و هدف بررسی روند زمانی است، استفاده از رگرسیون ساده (برازش عملکرد در برابر سال تقویمی) ممکن است بر روش تحلیل ثبات ارجحیت داشته باشد (Richter and Kroschewski, 2006). تفاوت ظریف اما بنیادین این دو روش در متغیر مستقل آن‌هاست: در تحلیل ثبات، متغیر مستقل پتانسیل محیطی سال (میانگین عملکرد) است، در حالی که در رگرسیون ساده، متغیر مستقل خود زمان (سال) است. انتخاب میان این دو رویکرد، تابعی از اهداف اختصاصی پژوهش و ساختار داده‌های موجود می‌باشد.

برای تشریح عملیاتی این روش، داده‌های یک آزمایش ده ساله گندم را در نظر بگیرید که در آن چهار نظام زراعی شامل متداول (Conv)، کم‌نهاد (Low)، ارگانیک (Org) و حفاظتی (Cons) مقایسه شده‌اند. هدف از این تحلیل، تعیین پایداری عملکرد این نظام‌ها در مواجهه با نوسانات اقلیمی سالانه است. نخستین گام در این روش، محاسبه شاخص محیطی برای هر سال است که عبارت است از میانگین عملکرد تمام تیمارها در آن سال خاص؛ بدین معنا که هرچه این عدد بزرگتر باشد، نشان‌دهنده شرایط محیطی مساعدتر است. جدول ۱۶-۴ داده‌های خام و شاخص محیطی محاسبه‌شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد. در گام بعدی، برای هر نظام زراعی یک رگرسیون خطی برازش داده می‌شود که در آن عملکرد نظام در هر سال به عنوان متغیر وابسته و شاخص محیطی همان سال به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود.

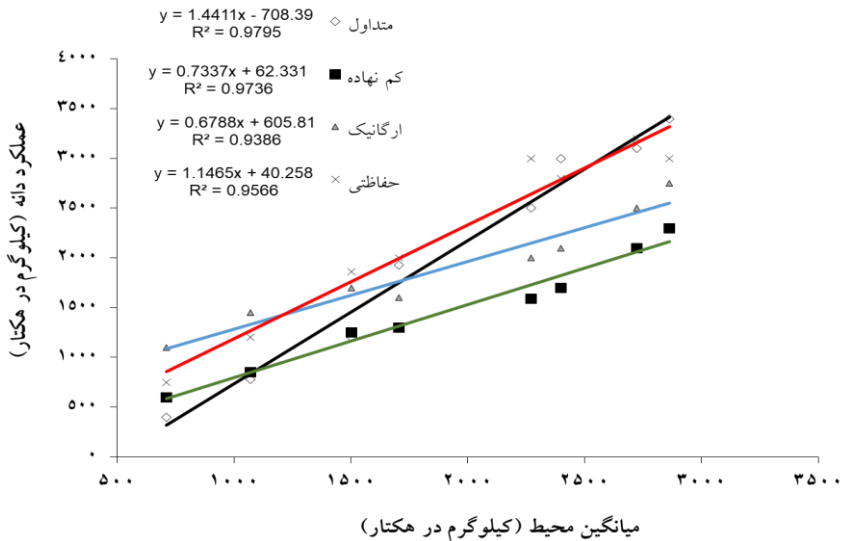
جدول ۴-۱۶. داده‌های خام و محاسبه شاخص محیطی برای تحلیل ثبات (داده‌های فرضی)

سال	نظام متداول (Conv)	نظام کم‌نهاد (Low)	نظام ارگانیک (Org)	نظام حفاظتی (Cons)	شاخص محیطی (میانگین سال) (EnvIndex)
۱	۸۵۰	۸۰۰	۱۵۰۰	۱۲۰۰	۱۰۸۸
۲	۱۲۵۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۱۷۰۰	۱۳۳۸
...	...	...	...	...	...
۱۰	۳۶۵۰	۲۳۰۰	۲۷۵۰	۳۴۵۰	۳۰۳۸

در ادامه، کد اجرایی نرم‌افزار SAS برای انجام این تحلیل ارائه شده است.

```
DATA stability_analysis;
  INPUT Year EnvIndex Yield_Conv Yield_Low Yield_Org
  Yield_Cons;
  DATALINES;
  1 1088 850 800 1500 1200
  2 1338 1250 1300 1100 1700
  ... سایر داده‌های ۱۰ سال ...
  10 3038 3650 2300 2750 3450
  ;
RUN;
PROC REG DATA=stability_analysis;
  MODEL Yield_Conv = EnvIndex;
  MODEL Yield_Low = EnvIndex;
  MODEL Yield_Org = EnvIndex;
  MODEL Yield_Cons = EnvIndex;
  TITLE "Finlay-Wilkinson Stability Analysis";
RUN;
```

در دستور فوق، ابتدا با استفاده از گام DATA، داده‌های سالانه شامل سال، شاخص محیطی (EnvIndex) و عملکرد چهار نظام زراعی وارد می‌شود. سپس رویه PROC REG برای برازش مدل‌های رگرسیونی فراخوانی می‌گردد. در این رویه، برای هر نظام زراعی یک دستور MODEL مجزا تعریف شده است که در آن عملکرد آن نظام (مثلاً Yield_Conv) بر روی شاخص محیطی برازش می‌شود. خروجی اصلی این تحلیل (شکل ۴-۳)، پارامترهای معادله خط، به‌ویژه ضریب شیب است که به عنوان معیار پایداری تفسیر می‌شود.



شکل ۴-۳. رابطه رگرسیونی بین عملکرد دانه گندم و شاخص میانگین محیطی در ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی مختلف با استفاده از روش تحلیل ثبات (بر اساس داده‌های فرضی).

خروجی این تحلیل، معادله خط رگرسیون برای هر نظام است که تفسیر ضرایب شیب آن، بینش عمیقی از رفتار اکولوژیک سیستم‌ها ارائه می‌دهد. در این مثال فرضی، نظام متداول با شیبی به‌طور معنی‌داری بزرگتر از یک (۱/۴۴)، حساسیت بالایی به تغییرات محیطی نشان می‌دهد. این الگوی بیانگر سازگاری خصوصی با محیط‌های مساعد است؛ بدین معنا که این نظام در سال‌های مطلوب (ترسالی و نهاده کافی) پتانسیل تولید خود را به حداکثر می‌رساند، اما در شرایط نامساعد محیطی با افت شدید عملکرد مواجه می‌شود و ریسک بالایی دارد. در قطب مخالف، نظام‌های ارگانیک با شیب‌های کمتر از یک، از پایداری بیولوژیک بالایی برخوردارند. این نظام‌ها در محیط‌های ضعیف و پرتنش، عملکردی فراتر از میانگین مورد انتظار ارائه می‌دهند (مقاومت بالا)، اما در سال‌های مساعد توانایی بهره‌برداری حداکثری از منابع را نداشته و افزایش عملکرد محدودی را تجربه می‌کنند. در این میان، نظام حفاظتی با شیبی نزدیک به یک (۱/۱۴)، رفتاری متعادل و سازگاری عمومی مطلوبی از خود نشان می‌دهد؛ ویژگی‌ای که بیانگر توانایی این نظام

در حفظ پایداری در شرایط سخت و همزمان، پاسخگویی مناسب به بهبود شرایط محیطی است. این تحلیل تصویری به پژوهشگر کمک می‌کند تا فراتر از میانگین عملکرد، ریسک و پتانسیل پاسخ هر نظام زراعی را در سناریوهای مختلف اقلیمی درک نماید.

علاوه بر تحلیل ثبات کلاسیک، روش تحلیل ثبات نسبی نیز ابزاری قدرتمند برای ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد نظام‌های زراعی است. این تکنیک که مبتنی بر تابع خطی رابطه بین جفت تیمارها یا الگوهای کشت مختلف عمل می‌کند (Raun et al., 1993)، اگرچه در اصل برای مقایسه ثبات الگوهای کشت مخلوط نسبت به تک کشتی توسعه یافته است (حبیب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷)، اما ماهیت مفهومی آن امکان کاربرد گسترده در مقایسه انواع نظام‌های زراعی را فراهم می‌آورد. مبنای محاسباتی این روش آماری، بررسی الگوی پراکنش نتایج دو تیمار مورد مقایسه در سال‌های مختلف است. در این تحلیل، رابطه رگرسیونی بین اختلاف عملکرد دو تیمار (محور Y) و میانگین عملکرد آن دو تیمار (محور X) در هر سال ارزیابی می‌شود (Raun et al., 1993).

برای درک عملیاتی چگونگی استفاده از روش تحلیل ثبات نسبی در مقایسه مستقیم نظام‌های زراعی، داده‌های فرضی یک آزمایش ۱۰ ساله گندم را مطابق جدول ۴-۱۶ که در آن چهار نظام مدیریتی شامل متداول، کم‌نهاد، ارگانیک و حفاظتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، در نظر می‌گیریم. هدف پژوهشگر در این تحلیل، پاسخ به این پرسش است که کدام یک از این نظام‌ها در مقایسه با دیگری، ثبات عملکرد بیشتری در برابر نوسانات محیطی نشان می‌دهد؟ نخستین گام در این روش، آماده‌سازی و مرتب‌سازی داده‌های عملکرد سالانه هر نظام است. در گام بعدی، استراتژی تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS طراحی می‌شود. در تحلیل ثبات نسبی، برای هر جفت نظام مورد مقایسه (مثلاً نظام زراعی متداول و کم‌نهاد)، دو متغیر جدید محاسبه می‌شود: یکی اختلاف عملکرد دو نظام به عنوان متغیر وابسته و دیگری میانگین عملکرد آن‌ها به عنوان متغیر

مستقل یا همان شاخص محیطی. سپس یک مدل رگرسیون خطی برازش داده می‌شود که در آن ضریب شیب خط، معیار قضاوت درباره پایداری نسبی خواهد بود.

• **شیب نزدیک به صفر:** نشان‌دهنده تغییرات هم‌جهت و ثبات یکسان در هر دو تیمار است (شکل ۴-۴-الف)

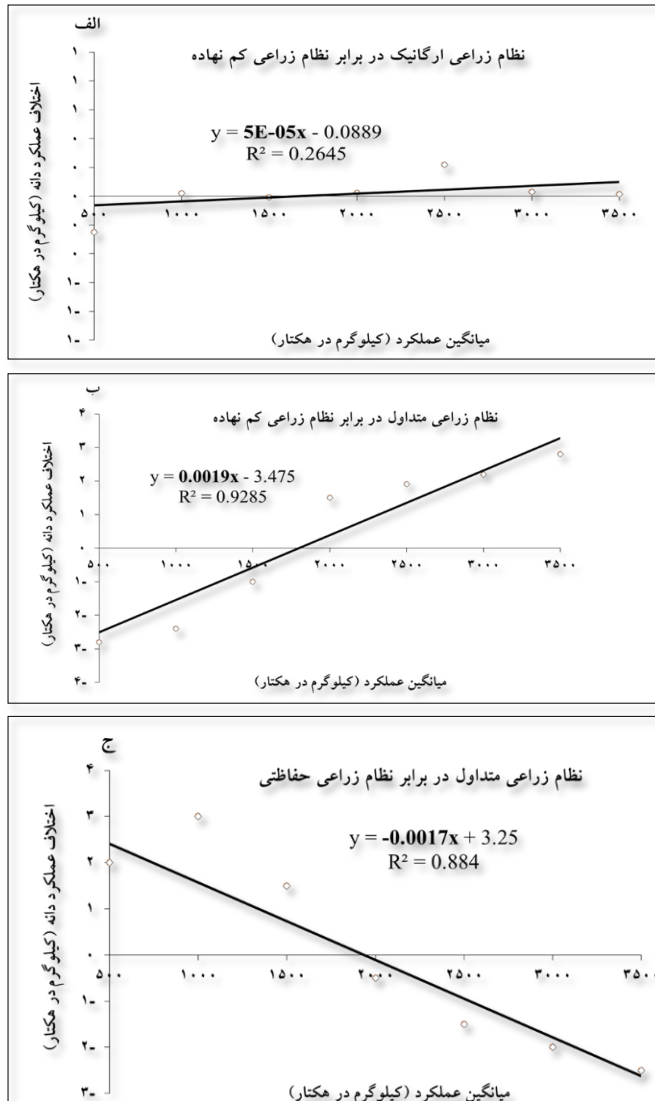
• **شیب مثبت:** بیانگر آن است که با بهبود شرایط محیطی (افزایش میانگین عملکرد)، اختلاف عملکرد به نفع تیمار دوم افزایش می‌یابد؛ بدین معنا که تیمار اول نوسانات بیشتری داشته و ثبات کمتری نسبت به تیمار دوم دارد (شکل ۴-۴-ب).

• **شیب منفی:** حاکی از ثبات بیشتر تیمار اول در مقایسه با تیمار دوم است (شکل ۴-۴-ج).

کد اجرایی نرم‌افزار SAS برای انجام این تحلیل به شرح زیر است.

```
DATA relative_stability;
  INPUT Year Yield_Conv Yield_Low Yield_Org Yield_Cons;
  Diff1 = Yield_Org - Yield_Low;
  Mean1 = (Yield_Org + Yield_Low) / 2;
  Diff2 = Yield_Conv - Yield_Low;
  Mean2 = (Yield_Conv + Yield_Low) / 2;
  Diff3 = Yield_Conv - Yield_Cons;
  Mean3 = (Yield_Conv + Yield_Cons) / 2;
  DATALINES;
  1 850 800 1500 1200
  2 1250 1300 1100 1700
  ... سایر داده‌های ۱۰ سال ...
;
RUN;
PROC REG DATA=relative_stability;
  MODEL Diff1 = Mean1;
  MODEL Diff2 = Mean2;
  MODEL Diff3 = Mean3;
  TITLE "Relative Stability Regression Analysis";
RUN;
```

در دستور فوق، ابتدا با استفاده از گام DATA، داده‌های خام عملکرد وارد شده و بلافاصله متغیرهای مورد نیاز برای تحلیل ثبات نسبی (اختلاف و میانگین عملکرد) برای سه سناریوی مقایسه‌ای محاسبه می‌شوند. سپس رویه PROC REG فراخوانی می‌شود تا مدل‌های رگرسیونی را برای هر سناریو برازش دهد. در دستور MODEL، متغیر اختلاف (Diff) بر روی متغیر میانگین (Mean) برازش داده می‌شود. خروجی این تحلیل، ضرایب شیب است که تفسیر آن‌ها بر اساس الگوهای نظری پیش‌گفته انجام می‌گیرد. در این مثال فرضی، سناریوی نخست به مقایسه نظام ارگانیک با کم‌نهاد اختصاص دارد (شکل ۴-۴ الف). در این حالت، ضریب شیب بسیار ناچیز (نزدیک به صفر)، حاکی از افقی بودن تقریبی خط رگرسیون است؛ یافته‌ای که نشان می‌دهد هر دو نظام نوسانات مشابهی در برابر تغییرات محیطی داشته و هیچ‌یک برتری آشکاری در پایداری نسبت به دیگری ندارند. در سناریوی دوم (مقایسه نظام متداول با کم‌نهاد)، مشاهده یک ضریب شیب مثبت (شکل ۴-۴ ب) بیانگر آن است که با بهبود شرایط محیطی و افزایش میانگین عملکرد، فاصله عملکرد نظام متداول از کم‌نهاد بیشتر می‌شود؛ این بدین معناست که نظام متداول به محیط حساس‌تر بوده و در شرایط مساعد جهش عملکردی دارد، اما نظام کم‌نهاد ثبات بیشتری از خود نشان می‌دهد. در سناریوی سوم (مقایسه نظام متداول با حفاظتی)، یک ضریب منفی (شکل ۴-۴ ج) نشان می‌دهد که نظام متداول در محیط‌های ضعیف عملکرد بهتری را حفظ کرده و با بهبود محیط، اختلاف آن با نظام حفاظتی کاهش می‌یابد که این الگو مؤید پایداری بیولوژیک بالای نظام متداول در برابر تنش‌های محیطی در این آزمایش خاص است. این روش تحلیلی با ارائه معیاری کمی برای سنجش پایداری نسبی، امکان مقایسه مستقیم سیستم‌های مختلف را در طیفی از شرایط محیطی فراهم می‌سازد. مزیت راهبردی آن در این است که نه تنها میزان عملکرد، بلکه الگوی واکنش سیستم‌ها به بهبود یا افول شرایط محیطی را نیز آشکار می‌کند؛ ویژگی‌ای که آن را به ابزاری ارزشمند برای انتخاب پایداری‌ترین نظام مدیریتی در مطالعات بلندمدت تبدیل کرده است.



شکل ۴-۴. مقایسه تحلیل ثبات نسبی بین نظام‌های زراعی مختلف بر اساس داده‌های فرضی عملکرد دانه گندم. این شکل به صورت شماتیک سه حالت مختلف از روابط بین نظام‌های زراعی را نمایش می‌دهد: (الف) رابطه با شیب نزدیک به صفر که نشان‌دهنده ثبات مشابه بین دو نظام زراعی است؛ (ب) رابطه با شیب مثبت که بیانگر ثبات بالاتر نظام زراعی دوم (نظام کم‌نهاده) نسبت به نظام اول (نظام متداول) است؛ و (پ) رابطه با شیب منفی که حاکی از ثبات بیشتر نظام زراعی اول (نظام متداول) در مقایسه با نظام دوم (نظام حفاظتی) می‌باشد. این تحلیل بر اساس مقایسه زوجی عملکرد در شرایط محیطی مختلف انجام شده و امکان ارزیابی کمی پایداری نسبی را فراهم می‌کند.

۴-۱۰-۳. تجزیه و تحلیل چند متغیره داده‌ها

نظام‌های زراعی به عنوان سیستم‌های پیچیده طبیعی-تولیدی، ذاتاً ماهیتی چندبعدی دارند و توصیف جامع آن‌ها مستلزم اندازه‌گیری و تحلیل همزمان مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی، محیطی و اقتصادی است. در این اکوسیستم‌ها، متغیرهای متنوعی نظیر عملکرد محصول، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، کارایی مصرف منابع و شاخص‌های پایداری، نه به صورت جزایر مستقل، بلکه در تعامل پیچیده و دینامیک با یکدیگر عمل می‌کنند. این درهم‌تنیدگی و تعاملات چندجانبه موجب می‌شود که روش‌های تک‌متغیره سنتی که هر صفت را به صورت مجزا تحلیل می‌کنند، در ترسیم تصویری کامل و واقعی از رفتار سیستم ناتوان باشند. در مقابل، روش‌های آماری چندمتغیره با محوریت قرار دادن ماتریس همبستگی‌های درونی بین متغیرها، ابزاری قدرتمند برای کشف الگوهای پنهان، کاهش ابعاد داده‌ها بدون از دست دادن اطلاعات کلیدی، و شناسایی روابط غیرخطی بین عوامل مختلف فراهم می‌آورند. به‌ویژه در شرایطی که هدف پژوهش، طبقه‌بندی نظام‌های زراعی بر اساس چندین شاخص همزمان یا واکاوی تأثیر متقابل مدیریت‌های مختلف بر جنبه‌های گوناگون سیستم باشد، تحلیل چندمتغیره از یک انتخاب آماری به یک ضرورت روش‌شناختی تبدیل می‌شود.

این روش‌ها طیف وسیعی از الگوریتم‌ها و تکنیک‌های پردازش داده را شامل می‌شوند که برای اهداف متنوعی همچون کاهش حجم داده‌ها، طبقه‌بندی، تخمین پارامترها و آزمون فرضیه‌های پیچیده به کار می‌روند (Yeater and Villamil, 2018). تمایز بنیادین این رویکرد با روش‌های تک‌متغیره در نگرش سیستمی آن است؛ بدین معنا که در اینجا اندازه‌گیری‌های تکراری انجام‌شده در طول زمان یا مکان، نه به عنوان اعداد گسسته، بلکه به مثابه یک بردار پاسخ چندمتغیری مدل‌سازی می‌شوند. تحلیل چندمتغیره با بهره‌گیری از ساختار کوواریانس داده‌ها، اثرات تیمارها را بر اساس بهینه‌ترین ترکیب خطی از متغیرهای پاسخ مقایسه می‌کند و امکان ارزیابی جامع تمامی تیمارها در تمام مقاطع زمانی را در قالب

یک تحلیل واحد فراهم می‌آورد. اگرچه وجود همبستگی بین متغیرها می‌تواند چالش برانگیز باشد، اما همزمان فرصتی برای درک عمیق‌تر سیستم است؛ از این رو در پژوهش‌های زراعی، معمولاً با کاهش داده‌ها به مؤلفه‌های اصلی یا ترکیبات خطی کوچکتر، از ابهام در تفسیر نتایج جلوگیری می‌شود (Saed-Moucheshi et al., 2013). به کارگیری این روش‌ها مزایای راهبردی متعددی دارد از جمله ارائه تفسیری مطمئن‌تر در شرایطی که کنترل تمام متغیرها دشوار است (Todorov et al., 2020)، کنترل دقیق‌تر خطای نوع اول نسبت به انجام آزمون‌های تک‌متغیره مکرر و توانایی منحصربه‌فرد در آشکارسازی الگوهای پنهان و اثرات متقابل چندگانه (Di Felice et al., 2012).

با وجود این مزایا، استفاده از تحلیل‌های چندمتغیره با چالش‌های ذاتی همراه است که غفلت از آن‌ها می‌تواند اعتبار نتایج را مخدوش سازد. نخستین چالش، دشواری تفسیر نتایج است؛ خروجی این تحلیل‌ها اغلب به صورت متغیرهای انتزاعی (ترکیبات خطی جدید) ارائه می‌شود که فاقد معنای فیزیکی مستقیم و ملموس متغیرهای اولیه (مانند کیلوگرم در هکتار) هستند. این پیچیدگی زمانی تشدید می‌شود که تعداد متغیرها یا دفعات اندازه‌گیری نسبت به درجات آزادی خطا زیاد باشد، که منجر به کاهش توان آزمون برای تشخیص تفاوت‌های واقعی می‌گردد (Bhandari, 2025). چالش دوم، نیاز مبرم به حجم نمونه بزرگ برای تضمین پایداری ماتریس‌های همبستگی است. یک قاعده تجربی پذیرفته‌شده پیشنهاد می‌کند که برای هر متغیر مورد بررسی، بین ۵ تا ۲۰ مشاهده (نمونه) در نظر گرفته شود (Osborne and Costello, 2004). این بدان معناست که در یک پژوهش جامع زراعی با ۵۰ متغیر، محقق نیاز به جمع‌آوری ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مشاهده خواهد داشت که در بسیاری از مطالعات بلندمدت، محدودیت‌های اجرایی و بودجه‌ای مانع تحقق آن می‌شود.

خوشبختانه، پیشرفت‌های اخیر در الگوریتم‌های آماری و توسعه نرم‌افزارهای تخصصی، کاربرد این تحلیل‌ها را تسهیل کرده و امکان مدیریت داده‌های پیچیده را با

کارایی بیشتری فراهم آورده‌اند. در ادامه این فصل، با ارائه مثال‌های عینی و محاسباتی، مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های چندمتغیره که در مقایسه نتایج پژوهش‌های نظام‌های زراعی به کار گرفته می‌شوند، تشریح خواهند شد.

۴-۱۰-۳-۱. تجزیه واریانس چند متغیره^۱

تجزیه واریانس چندمتغیره به عنوان سنگ بنای روش‌های آماری چندمتغیره، راهکاری قدرتمند برای بررسی همزمان تفاوت‌های گروهی بر روی مجموعه‌ای از متغیرهای وابسته است. در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، که هدف معمولاً مقایسه جامع سیستم‌های مختلف کشت (مانند ارگانیک در برابر متداول) بر اساس طیفی از شاخص‌هاست، استفاده از تحلیل واریانس تک‌متغیره (ANOVA) برای تک‌تک صفات، با دو محدودیت جدی مواجه است. نخست، انجام آزمون‌های مکرر و جداگانه برای هر متغیر، احتمال وقوع خطای نوع اول (یافتن تفاوت معنی‌دار تصادفی) را به شدت افزایش می‌دهد. دوم و مهم‌تر، ANOVA قادر به در نظر گرفتن همبستگی‌های بیولوژیک و اکولوژیک بین متغیرها نیست؛ برای مثال، بین عملکرد دانه و جذب نیتروژن یا بین ماده آلی خاک و تخلخل خاک روابط درونی وجود دارد که تحلیل جداگانه، آن‌ها را نادیده می‌گیرد. در مقابل، MANOVA با ایجاد یک ترکیب خطی جدید از متغیرهای وابسته (که واریانس بین گروهی را نسبت به واریانس درون گروهی به حداکثر می‌رساند)، این همبستگی‌ها را در مدل لحاظ می‌کند (Sartori et al., 2021). این روش قادر است تفاوت‌هایی را آشکار سازد که در تحلیل‌های تک‌متغیره پنهان می‌مانند. برای مثال، ممکن است دو نظام زراعی از نظر عملکرد یا کیفیت خاک به تنهایی تفاوت معنی‌داری نداشته باشند، اما وقتی این دو صفت به صورت توأم و در فضای چندبعدی بررسی شوند، تمایز آن‌ها آشکار گردد. استفاده موفق از این روش مستلزم رعایت پیش‌فرض‌های خاصی نظیر نرمال بودن چندمتغیره داده‌ها و همبستگی ماتریس‌های واریانس-کوواریانس (تساوی ماتریس‌های پراکندگی در

1 Multivariate analysis of variance (MANOVA)

بین گروه‌ها) است. همچنین، توجه به حجم نمونه در MANOVA حیاتی است؛ به طور تجربی توصیه می‌شود که تعداد کل نمونه‌ها حداقل ۱۰ تا ۲۰ برابر تعداد متغیرهای وابسته باشد تا آزمون از توان کافی برخوردار گردد (Sarstedt, 2019).

برای درک عملیاتی کاربرد تجزیه واریانس چندمتغیره در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، یک آزمایش فرضی ۵ ساله را در نظر بگیرید که در آن سه نظام مدیریتی شامل کم‌نهاد (LowInput)، متداول (Conventional) و تلفیقی (Integrated) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار مقایسه شده‌اند. هدف پژوهشگر در این تحلیل، پاسخ به این پرسش است که آیا این نظام‌ها از نظر مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی و خاکی با هم تفاوت کلی دارند یا خیر. به جای تحلیل جداگانه متغیرها که همبستگی‌های درونی را نادیده می‌گیرد، پژوهشگر سه متغیر وابسته کلیدی شامل عملکرد دانه (Yield)، درصد کربن آلی خاک (SOC) و کارایی مصرف نیتروژن (NUE) را همزمان انتخاب کرده است تا بتواند بردار میانگین این صفات را در بین نظام‌ها مقایسه کند. در ادامه، کد اجرایی نرم‌افزار SAS برای انجام این تحلیل ارائه شده است. در این کد، داده‌های خام مستقیماً در درون دستور وارد شده‌اند تا فرآیند اجرا یکپارچه باشد.

```
DATA cropping_systems;
  INPUT System$ Block Yield SOC NUE;
  DATALINES;
  LowInput 1 4.2 1.5 55
  LowInput 2 4.0 1.6 58
  LowInput 3 4.3 1.4 54
  LowInput 4 4.1 1.5 56
  Conventional 1 6.5 0.9 40
  Conventional 2 6.8 0.8 38
  Conventional 3 6.4 0.9 41
  Conventional 4 6.6 0.8 39
  Integrated 1 5.8 1.2 48
  Integrated 2 5.9 1.3 50
  Integrated 3 5.7 1.2 49
  Integrated 4 6.0 1.3 47
  ;
```

```

RUN;
PROC GLM DATA=cropping_systems;
  CLASS System Block;
  MODEL Yield SOC NUE = System Block;
  MANOVA H=System / PRINTE PRINTH SHORT;
  LSMEANS System / STDERR PDIF;
RUN;
QUIT;

```

در دستور فوق، ابتدا با استفاده از گام DATA، داده‌های خام شامل نوع نظام، بلوک و سه متغیر وابسته وارد می‌شوند. سپس رویه PROC GLM که قابلیت تحلیل‌های چندمتغیره را دارد، فراخوانی می‌گردد. در دستور MODEL، هر سه متغیر وابسته (Yield, SOC, NUE) در سمت چپ معادله و متغیرهای مستقل (System, Block) در سمت راست قرار می‌گیرند که این ساختار به نرم‌افزار اعلام می‌کند که یک تحلیل چندمتغیره مدنظر است. دستور کلیدی MANOVA با گزینه H=System، آزمون فرضیه چندمتغیره را به طور اختصاصی برای اثر تیمار سیستم درخواست می‌کند. همچنین گزینه‌های PRINTE و PRINTH برای نمایش ماتریس‌های همبستگی خطاها و فرضیات به کار می‌روند که برای بررسی پیش‌فرض‌های آزمون ضروری هستند. در نهایت، دستور LSMEANS میانگین‌های حداقل مربعات را برای هر متغیر محاسبه می‌کند تا تفسیر دقیق‌تر نتایج پس از آزمون کلی امکان‌پذیر شود.

پس از اجرای دستور MANOVA، نخستین گام در تفسیر نتایج، بررسی جدول آزمون‌های چندمتغیره (جدول ۴-۱۷) است. مقدار آماره لامبدای ویلکز در این پژوهش بسیار ناچیز (۰/۰۰۰۴) و آماره F حاصل از آن (۶۵/۲۹) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار برآورد شده است. این نتیجه از نظر آماری بیانگر آن است که بردار پاسخ متغیرهای وابسته در بین سه نظام زراعی تفاوت فاحشی دارد و اثر تیمار نظام زراعی بر ترکیب همزمان صفات عملکردی و محیطی قطعی است. همچنین، بررسی ماتریس همبستگی خطاها نشان‌دهنده وجود همبستگی منفی شدید بین عملکرد و کارایی مصرف

نیترژن (۰/۹۴-) و همبستگی منفی متوسط بین عملکرد و کربن آلی خاک (۰/۶۰-) است که ضرورت استفاده از تحلیل چندمتغیره را برای کنترل این روابط درونی تأیید می‌کند. جدول ۴-۱۷. نتایج آزمون چندمتغیره برای مقایسه نظام‌های زراعی بر اساس بردار متغیرهای وابسته (عملکرد، کربن آلی و کارایی نیترژن)

آماره چندمتغیره	مقدار (Value)	آماره F	درجه آزادی صورت	درجه آزادی مخرج
لامبدای ویلکز ^۱	۰/۰۰۰۴	۶۵/۲۹**	۶	۸

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد.

برای بررسی دقیق‌تر این تفاوت‌ها، جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴-۱۸) الگوی متضاد صفات را در نظام‌های مختلف آشکار می‌سازد. نظام متداول اگرچه بالاترین عملکرد دانه (۶/۵۸ تن در هکتار) را به خود اختصاص داده، اما در شاخص‌های پایداری یعنی کربن آلی خاک (۰/۸۵ درصد) و کارایی مصرف نیترژن (۳۹/۵۰) ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است که نشان‌دهنده هزینه بالای اکولوژیک برای دستیابی به حداکثر تولید است. در قطب مخالف، نظام کم‌نهاد با وجود دستیابی به بالاترین کیفیت خاک و کارایی مصرف، کمترین عملکرد اقتصادی را ثبت کرده است. در این میان، تحلیل همزمان متغیرها ارزش نظام تلفیقی را برجسته می‌کند؛ این نظام توانسته است با عملکردی قابل قبول (۵/۵۸ تن در هکتار)، تعادلی بهینه میان تولید و خدمات اکوسیستمی برقرار سازد. این استنتاج جامع که فراتر از نگاه تک‌بعدی به عملکرد است، قدرت تحلیل چندمتغیره را در شناسایی نظام‌های پایدار نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۸. مقایسه میانگین حداقل مربعات (LSMeans) صفات مورد مطالعه

در نظام‌های زراعی مختلف

نظام زراعی	عملکرد دانه (t ha ⁻¹)	کربن آلی خاک (%)	کارایی مصرف نیتروژن (kg kg ⁻¹)
متداول	۶/۵۸ a	۰/۸۵ c	۳۹/۵۰ c
تلفیقی	۵/۸۵ b	۱/۲۵ b	۴۸/۵۰ b
کم نهاده	۴/۱۵ c	۱/۵۰ a	۵۵/۷۵ a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند.

۴-۱۰-۳-۲. تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱

در مطالعات نظام‌های زراعی که مستلزم بررسی سیستم‌ها از جنبه‌های مختلف و اندازه‌گیری متغیرهای متعدد است، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های آمار چندمتغیره برای کاهش ابعاد داده‌ها و تفسیر ساختار پنهان آنها مطرح می‌شود. برخلاف آزمایش‌های زراعی متداول که اغلب بر یک یا دو صفت (مانند عملکرد دانه) متمرکز هستند، پژوهش‌های نظام‌های زراعی معمولاً شامل اندازه‌گیری طیف وسیعی از متغیرهای خاک، گیاه، محیط، بیولوژیک و اقتصاد می‌شوند. هنگامی که تعداد این متغیرها افزایش می‌یابد، تحلیل‌های سنتی مانند رگرسیون ساده یا مقایسه‌های زوجی همبستگی، به دلیل پدیده همخطی^۲ و افزونگی^۳ بین متغیرها، با چالش‌های جدی مواجه می‌شوند. به علاوه، احتمال خطای نوع اول در آزمون‌های مکرر نیز افزایش می‌یابد (Rotaru et al., 2012). تحلیل مؤلفه‌های اصلی با تبدیل مجموعه‌ای از متغیرهای اولیه و مرتبط به تعدادی مؤلفه‌های اصلی^۴ غیرمرتبط، این مشکل را حل می‌کند. این مؤلفه‌ها ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه هستند و به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که مؤلفه اول بیشترین واریانس موجود در داده‌ها، و مؤلفه‌های بعدی به ترتیب بیشترین

1. Principal components analysis (PCA)

2. Multicollinearity

3. Redundancy

4. Principal components

واریانس باقیمانده (با شرط متعامد بودن نسبت به مؤلفه‌های قبلی) را حفظ کنند. به عبارت دیگر، PCA با شناسایی الگوهای پنهان در داده‌ها، امکان خلاصه‌سازی اطلاعات را فراهم می‌آورد، به طوری که معمولاً ۲ تا ۴ مؤلفه اصلی اولیه می‌توانند بخش عمده‌ای (اغلب بیش از ۷۰ درصد) از تغییرپذیری کل سیستم را توضیح دهند (Greenacre et al., 2022). این ویژگی باعث شده است که PCA به ابزاری ضروری در تحلیل داده‌های پیچیده نظام‌های زراعی تبدیل شود؛ زیرا نه تنها مشکل ابعاد بالای داده‌ها را حل می‌کند و همخطی را حذف می‌نماید، بلکه با نمایش بردارهای ضرایب^۱ و امتیازات^۲، تفسیر روابط بین عوامل مختلف و گروه‌بندی نظام‌های زراعی را نیز تسهیل می‌نماید. در عمل، پژوهشگران با استفاده از این روش می‌توانند نظام‌های زراعی را بر اساس ترکیبی از مؤلفه‌های اصلی که بیانگر جنبه‌های مختلف عملکرد سیستم هستند، مقایسه و ارزیابی کنند.

برای درک عملیاتی نحوه عملکرد PCA، یک مطالعه فرضی را در نظر بگیرید که در آن چهار نظام زراعی مختلف (متداول، تلفیقی، ارگانیک، حفاظتی) در یک آزمایش ۱۰ ساله ارزیابی شده‌اند. پژوهشگر به منظور ارزیابی جامع، شش متغیر کلیدی را منطبق با جدول ۴-۱۹ برای هر تیمار اندازه‌گیری کرده است. هدف این است که مشخص شود چگونه این متغیرهای مرتبط با هم ترکیب می‌شوند تا تصویری کلی از تفاوت نظام‌های زراعی به دست دهند و کدام مؤلفه‌ها بیشترین تفاوت را ایجاد می‌کنند.

1. Loadings

2. Scores

جدول ۴-۱۹. داده‌های خام فرضی برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی

نظام زراعی	عملکرد Yield (t ha ⁻¹)	کربن آلی SOC (%)	زیست‌توده میکروبی SMB (mg kg ⁻¹)	هزینه تولید Cost (\$ ha ⁻¹)	کارایی آب WUE (kg/m ³)	پروتئین Protein (%)
متداول (Conv)	۷/۵	۰/۹	۲۰۰	۴۰	۱/۴	۱۰/۵
تلفیقی (Int)	۶/۵	۱/۵	۳۵۰	۳۰	۱/۸	۱۱/۸
ارگانیک (Org)	۴	۲/۲	۵۵۰	۱۵	۲/۵	۱۲/۸
حفاظتی (Cons)	۵/۵	۱/۸	۴۵۰	۲۵	۲	۱۲

DATA agroeco_data;

INPUT System\$ Yield SOC SMB Cost WUE Protein;

DATALINES;

Conv 7.5 0.9 200 40 1.4 10.5

Int 6.5 1.5 350 30 1.8 11.8

Org 4.0 2.2 550 15 2.5 12.8

Cons 5.5 1.8 450 25 2.0 12.0

;

RUN;

PROC PRINCOMP DATA=agroeco_data N=6 OUT=pca_scores

OUTSTAT=outpca;

VAR Yield SOC SMB Cost WUE Protein;

TITLE 'PCA Analysis of Cropping Systems';

RUN;

PROC SGPLOT DATA=pca_scores;

SCATTER X=Prin1 Y=Prin2 / DATALABEL=System

MARKERATTRS=(SYMBOL=CIRCLEFILLED SIZE=10);

XAXIS LABEL="Prin1";

YAXIS LABEL="Prin2";

TITLE "Distribution of Cropping Systems based on PCA";

RUN;

در دستور فوق، رویه PROC PRINCOMP برای انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی

فراخوانی شده است. از گزینه‌ی OUTSTAT=outpca برای ذخیره‌ی اطلاعات آماری

کلیدی (شامل مقادیر ویژه و بردارهای ویژه) و از $OUT=pca_scores$ برای ذخیره‌ی مختصات جدید سیستم‌های زراعی در فضای مؤلفه‌های اصلی (نمرات) استفاده شده است. پس از آن، رویه PROC SGPLOT به صورت جداگانه، یک نمودار پراکنش را بر اساس نمرات مؤلفه اول (Prin1) در محور افقی و مؤلفه دوم (Prin2) در محور عمودی ترسیم می‌کند و با استفاده از دستور $DATALABEL=System$ ، نام سیستم‌های زراعی (مانند Conv و Org) در کنار نقاط مربوطه نمایش داده می‌شود، که تفسیر بصری نتایج را فراهم می‌سازد.

نتایج این آزمایش فرضی نشان می‌دهد که مؤلفه اول (PC1) به تنهایی با مقدار ویژه ۵/۹۲۴، بیش از ۹۸ درصد از کل تغییرپذیری موجود در شش متغیر اولیه را تبیین می‌کند. این نتیجه نشان‌دهنده‌ی یک ساختار داده‌ای بسیار قوی و اساساً تک‌بعدی است که تمام تفاوت‌های میان نظام‌های زراعی را می‌توان در یک محور اصلی خلاصه کرد (جدول ۴-۲۰). برای تفسیر ماهیت این محور، باید به ضرایب بردار ویژه در (۴-۲۱) توجه کرد. مؤلفه اول دارای ضرایب مثبت قوی و تقریباً یکسان (حدود ۰/۴۱+) با متغیرهای کربن آلی خاک، زیست‌توده میکروبی، کارایی مصرف آب و پروتئین دانه است که همگی شاخص‌هایی از پایداری زیست‌محیطی و کیفیت محصول محسوب می‌شوند. در مقابل، این مؤلفه دارای ضرایب منفی قوی (حدود ۰/۴۱-) با متغیرهای عملکرد دانه و هزینه تولید است که شاخص‌های شدت تولید هستند. بنابراین، مؤلفه اول را می‌توان به عنوان محور تقابل تولید فشرده و پایداری اکولوژیک تفسیر کرد. همچنین مؤلفه دوم (PC2) تنها کمتر از ۱ درصد واریانس را توجیه می‌کند (جدول ۴-۲۰) و نشان‌دهنده‌ی یک تفاوت جزئی است، اما با این وجود بیشترین بار را بر روی متغیرهای پروتئین و عملکرد دارد و می‌تواند به عنوان محور ثانویه کیفیت و تناژ در نظر گرفته شود.

همچنین، ترسیم نمودار بای‌پلات^۱ (که ترکیبی از امتیازات نظام‌های زراعی و بردارهای متغیرها است)، تحلیل ساختار داده‌ها را به شکلی شفاف برای پژوهشگر امکان‌پذیر

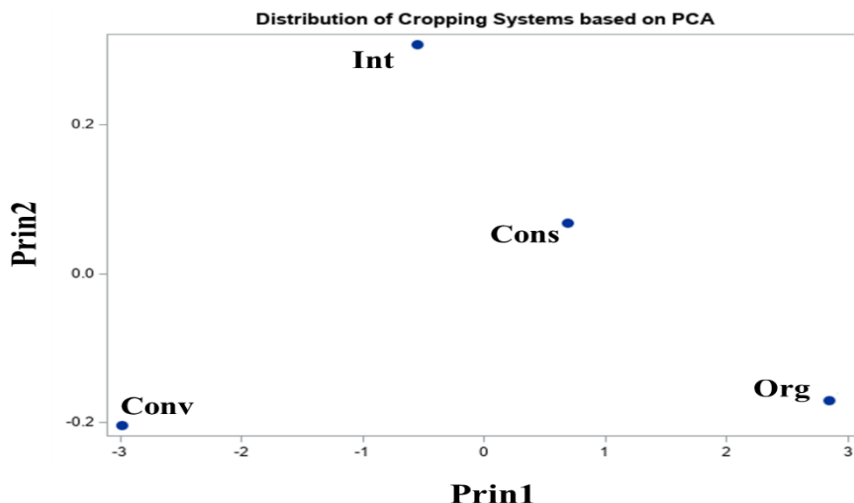
می‌سازد. چنانکه در شکل ۴-۵ مشهود است، نظام‌هایی که در سمت مثبت محور اول (Prin1) جانمایی شده‌اند (نظیر ارگانیک و حفاظتی)، با شاخص‌های پایداری و کیفیت بالا متمایز می‌شوند؛ حال آنکه نظام‌های واقع در سمت منفی این محور (مانند متداول و تلفیقی)، عمدتاً بر تولید کمی بالاتر و صرف هزینه‌های بیشتر متمرکز هستند. در مجموع، تحلیل مؤلفه‌های اصلی با تقلیل پیچیدگی داده‌های چندبعدی و نمایش تصویری روابط، ابزاری کارآمد برای شناسایی تضادهای عملکردی و گروه‌بندی نظام‌های مدیریتی بر اساس شباهت‌های ذاتی آن‌ها در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد.

جدول ۴-۲۰. مقادیر ویژه و سهم واریانس تجمعی مؤلفه‌های اصلی در تحلیل سیستم‌های زراعی

مؤلفه اصلی	مقدار ویژه (Eigenvalue)	سهم واریانس (%)	سهم تجمعی (%)
PC1	۵/۹۲۴	۹۸/۷۴	۹۸/۷۴
PC2	۰/۰۵۷	۰/۹۵	۹۹/۶۹
PC3	۰/۰۱۹	۰/۳۱	۱۰۰
PC4	۰/۰	۰/۰	۱۰۰

جدول ۴-۲۱. بردارهای ویژه یا ضرایب متغیرهای اصلی برای دو مؤلفه اول

متغیر	مؤلفه اول (PC1)	مؤلفه دوم (PC2)
عملکرد	-۰/۴۱	+۰/۶۱
کربن آلی خاک	+۰/۴۱	+۰/۲۵
زیست توده میکروبی	+۰/۴۱	+۰/۱۲
هزینه تولید	-۰/۴۱	+۰/۱۰
کارایی مصرف آب	+۰/۴۱	-۰/۳۱
پروتئین دانه	+۰/۴۰	+۰/۶۶



شکل ۴-۵. نمودار پراکنش^۱ نظام‌های زراعی بر اساس دو مؤلفه اصلی اول.

۴-۱۰-۳. تحلیل تشخیصی متعارف^۲

تحلیل تشخیصی متعارف (CDA) به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته آمار چندمتغیره در رده‌ی یادگیری با نظارت^۳، در شناسایی الگوهای آماری با هدف تعیین مرزهای بهینه تفکیک بین طبقات مختلف عمل می‌کند (Cruz-Castillo et al., 1994). این روش به ویژه در پژوهش‌های نظام‌های زراعی که نیاز به مقایسه و تفکیک سیستم‌های مختلف مدیریتی (مانند متداول، حفاظتی یا ارگانیک) بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای پیوسته اندازه‌گیری شده (نظیر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک) وجود دارد، کاربرد فراوانی یافته است. ماهیت این تحلیل به گونه‌ای است که همزمان دو هدف اصلی و متضاد را دنبال می‌کند. نخست آنکه تنوع بین گروه‌های مختلف را به حداکثر ممکن می‌رساند و دوم آنکه تنوع درون هر گروه را به حداقل می‌رساند تا نسبت واریانس بین گروهی به واریانس درون گروهی (آزمون F) به بالاترین حد خود برسد (Matthew et

1. Scatter plot

2. Canonical discriminant analysis (CDA)

3. Supervised learning

1994, al.). این فرآیند از طریق تبدیل مجموعه داده‌های اولیه به مجموعه‌ای کوچکتر از متغیرهای جدید به نام توابع تشخیصی متعارف^۱ انجام می‌پذیرد. هر یک از این توابع، در واقع یک ترکیب خطی از متغیرهای مستقل اولیه هستند که به صورت متعامد^۲ و مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند. ویژگی کلیدی این توابع آن است که حداکثر قدرت تفکیک‌کنندگی گروه‌ها را در خود متمرکز می‌نمایند. تابع تشخیصی اول (CD1) بیشترین قدرت تفکیک را حمل می‌کند و توابع بعدی، به ترتیب قدرت تفکیک باقیمانده را توضیح می‌دهند (Johnson and Wichern, 2007). در مطالعات نظام‌های زراعی، این روش می‌تواند به پژوهشگران کمک کند تا نه تنها تفاوت‌های اساسی بین سیستم‌های مدیریتی مختلف را شناسایی کنند، بلکه اهمیت نسبی هر متغیر اولیه (مثلاً بیومس میکروبی یا کربن آلی) را در این تفکیک مشخص نمایند. مزیت اصلی CDA در مقایسه با روش‌هایی نظیر PCA، توانایی آن در ارائه تصویری روشن از تفاوت‌های بین گروهی و امکان پیش‌بینی عضویت مشاهدات جدید در گروه‌های موجود است.

برای درک نحوه عملکرد CDA، یک مطالعه فرضی در نظر گرفته شده است که در آن سه نظام زراعی مختلف (متداول (Conventional)، تلفیقی (Integrated) و ارگانیک (Organic)) در یک طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار ارزیابی شده‌اند. هدف این است که مشخص شود کدام یک از چهار شاخص خاکی (کربن آلی (SOC)، بیومس میکروبی (SMB)، مقاومت به نفوذ (PR) و درصد تجمعات پایدار در آب (WSA)) بیشترین نقش را در تفکیک این سه نظام از یکدیگر دارند. در ادامه، دستور SAS برای انجام تحلیل CDA، همراه با داده‌های فرضی این آزمایش ارائه شده است.

```
DATA agroeco_cda;
  INPUT System$ SOC SMB PR WSA;
  DATALINES;
  Conventional 1.0 250 1200 15
```

-
1. Canonical discriminant functions
 2. Orthogonal

```

Conventional 0.9 220 1350 12
Conventional 1.1 270 1150 16
Integrated 1.5 380 900 25
Integrated 1.4 360 950 23
Integrated 1.6 400 850 27
Organic 2.1 550 600 40
Organic 2.0 520 650 38
Organic 2.2 580 550 42
;
RUN;
PROC CANDISC DATA=agroeco_cda OUT=cda_scores;
  CLASS System;
  VAR SOC SMB PR WSA;
  TITLE 'Canonical Discriminant Analysis of Cropping Systems';
RUN;

```

در این دستور، رویه PROC CANDISC برای انجام تحلیل تشخیصی متعارف فراخوانی شده است. در این دستور گزاره OUT=cda_scores نمرات تشخیصی^۱ هر مشاهده را بر روی توابع تشخیصی استخراج شده ذخیره می‌کند. این نمرات برای ترسیم نمودار پراکنش تفکیکی گروه‌ها، ضروری هستند. دستور CLASS System متغیر گروه‌بندی (نظام‌های زراعی) را به عنوان طبقه‌ی مورد نظر برای تفکیک تعریف می‌کند، در حالی که دستور VAR متغیرهای پیوسته (شاخص‌های خاکی) را که به عنوان متغیرهای مستقل برای تفکیک استفاده خواهند شد، مشخص می‌نماید.

نتایج جدول ۴-۲۲ نشان می‌دهد که تابع تشخیصی اول (Can1) با همبستگی کانونی بسیار بالا (۰/۹۹۵) و مقدار ویژه ۱۰۶/۷، به تنهایی ۹۷/۶ درصد از کل قدرت تفکیک‌کنندگی مدل را تأمین می‌کند و از نظر آماری کاملاً معنی‌دار است ($P < 0.01$). در مقابل، تابع دوم غیرمعنی‌دار بوده و سهم ناچیزی در تفکیک دارد. برای درک ماهیت این تابع قدرتمند، به ضرایب ساختار کانونی در جدول ۴-۲۳ توجه کنید. تابع اول دارای همبستگی مثبت بسیار قوی (بالای ۰/۹۶) با شاخص‌های کیفیت بیولوژیک و فیزیکی

خاک (WSA, SMB, SOC) و همبستگی منفی قوی ($-۰/۹۳$) با مقاومت به نفوذ (که شاخص فشردگی خاک است) می‌باشد. بنابراین، این تابع را می‌توان به عنوان محور سلامت خاک نام‌گذاری کرد. بررسی میانگین نمرات کلاسی در جدول ۴-۲۴، جایگاه هر نظام را روی این محور مشخص می‌سازد. نظام ارگانیک با نمره مثبت بسیار بالا ($+۱۱/۶۱$) در قطب مثبت این محور (سلامت خاک بالا) قرار دارد. نظام متداول با نمره منفی شدید ($-۸/۱۸$) در قطب منفی (فشردگی بالا و کیفیت پایین) جای گرفته و نظام تلفیقی با نمره میانی ($-۳/۴۳$) وضعیتی بینابینی دارد. این تحلیل به روشنی اثبات می‌کند که متغیرهای بیولوژیک و ساختاری خاک، قوی‌ترین شاخص‌های متمایزکننده نظام‌های مدیریتی هستند و روش CDA با موفقیت توانسته است این مرزهای تفکیک را با دقت آماری بالا ترسیم نماید.

جدول ۴-۲۲. آماره‌های چندمتغیره و آزمون معناداری توابع تشخیصی متعارف

تابع تشخیصی (Canonical Function)	همبستگی کانونی (Canonical Correlation)	مقدار ویژه (Eigenvalue)	نسبت واریانس (%)	لامبدای ویلکز	آماره F	سطح معنی‌داری (Pr > F)
۱	۰/۹۹۵	۱۰۶/۷۲	۹۷/۶۱	۰/۰۰۲۶	۱۴/۰۵	۰/۰۰۲۳
۲	۰/۸۵۰	۲/۶۱	۲/۳۹	۰/۲۷۶۷	۳/۴۸	۰/۱۲۹۶

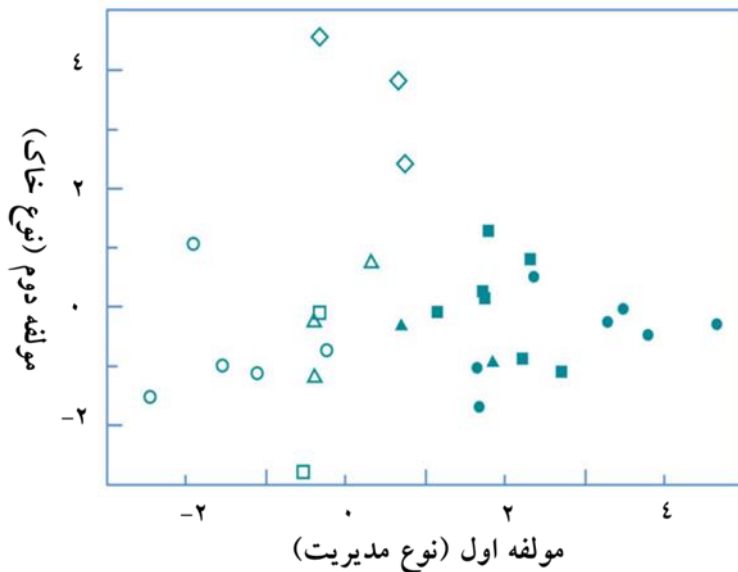
جدول ۴-۲۳. همبستگی بین متغیرهای اصلی و توابع تشخیصی (ساختار کانونی کل)

متغیر (شاخص خاکی)	تابع تشخیصی اول (Can1)	تابع تشخیصی دوم (Can2)
کربن آلی	+۰/۹۷	-۰/۲۲
بیوماس میکروبی	+۰/۹۷	-۰/۲۶
مقاومت به نفوذ	+۰/۹۶	-۰/۲۷
درصد تجمعات پایدار در آب	-۰/۹۳	+۰/۳۶

جدول ۴-۲۴. میانگین نمرات کلاسی نظام‌های زراعی بر روی توابع تشخیصی

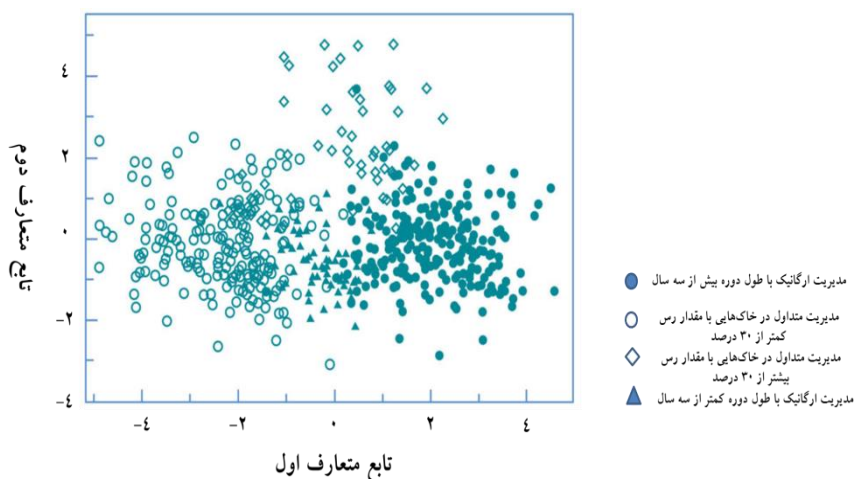
نظام زراعی	میانگین روی تابع اول (Can1)	میانگین روی تابع دوم (Can2)
ارگانیک	+۱۱/۶۱	+۰/۴۳
تلفیقی	-۳/۴۳	-۱/۷۹
متداول	-۸/۱۸	+۱/۳۶

مطالعه‌ی جامع درینک‌واتر و همکاران (Drinkwater et al., 1995) نمونه‌ای برجسته و آموزشی از کاربرد همزمان روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیصی متعارف در واکاوی سیستم‌های پیچیده زراعی محسوب می‌شود. در این پژوهش پنج‌ساله، محققان به مقایسه نظام‌های تولید ارگانیک و متداول پرداختند و برای غلبه بر پیچیدگی‌های ذاتی سیستم، پایگاه داده‌ای عظیم شامل حداقل ۳۰ متغیر مختلف (بیولوژیک، شیمیایی و فیزیکی) را در قالب ۱۱۰۰ مشاهده جمع‌آوری کردند که به صورت مکرر در طول مراحل فنولوژیک گیاه اندازه‌گیری شده بود. در فاز نخست تحلیل، نتایج حاصل از PCA آشکار ساخت که شیوه‌های مدیریتی مختلف، تأثیر معناداری بر مجموعه‌ای از خصوصیات بیولوژیکی و شیمیایی خاک داشته‌اند؛ به‌طوری‌که تفاوت‌های قابل توجهی در کیفیت خاک میان نظام‌های ارگانیک و متداول ایجاد شده بود. این تحلیل همچنین مشخص کرد که تنوع مشاهده‌شده در ویژگی‌های خاک، عمدتاً ناشی از دو عامل کلیدی است: نوع مدیریت (ارگانیک یا متداول) و خصوصیات ذاتی خاک (مانند بافت) (شکل ۴-۶). بر این اساس، پژوهشگران با استفاده از امتیازات PCA توانستند مزارع را به چهار زیرمجموعه متمایز تفکیک کنند: نظام‌های ارگانیک با سابقه بیش از سه سال، نظام‌های ارگانیک با سابقه کمتر از سه سال، و نظام‌های متداول که بر اساس بافت خاک به دو گروه (رس کمتر و بیشتر از ۳۰ درصد) تقسیم شدند.



شکل ۴-۶. تعیین عوامل اصلی تاثیرگذار بر ویژگی‌های خاک با استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی. از درینک واتر و همکاران (Drinkwater et al., 1995)

در گام بعدی، برای تدقیق این یافته‌ها از روش CDA استفاده شد تا پاسخ دو پرسش کلیدی روشن شود: نخست آنکه آیا اثرات مدیریتی در بلندمدت (بیش از سه سال) مشهودتر است؟ و دوم اینکه کدام ویژگی‌های خاک بیشترین قدرت تفکیک‌کنندگی را برای نوع مدیریت دارند؟ نتایج نهایی نشان داد که تحلیل‌های چندمتغیره موفق به شناسایی تفاوت‌های ساختاری در کیفیت خاک شده‌اند که با روش‌های تک‌متغیره سنتی قابل تشخیص نبودند (شکل ۴-۷). این مطالعه به وضوح اثبات می‌کند که چگونه تلفیق روش‌های اکتشافی (مانند PCA) با روش‌های تفکیکی (مانند CDA) می‌تواند ابعاد جدیدی از داده‌های پیچیده را آشکار سازد و بینش عمیق‌تری نسبت به دینامیک بلندمدت نظام‌های زراعی ارائه دهد.



شکل ۴-۸. تحلیل تشخیصی متعارف از تیمارهای ارگانیک و متداول برای ویژگی‌های خاک به تفکیک اثرات متاثر از مدیریت و خواص ذاتی خاک. از درینک واتر و همکاران (Drinkwater et al., 1995)

۴-۱۰-۳-۴. تحلیل خوشه‌ای^۱

تحلیل خوشه‌ای به عنوان یکی از کلیدی‌ترین روش‌های اکتشافی در آمار چندمتغیره، ابزاری قدرتمند برای گروه‌بندی مشاهدات (مانند مزارع، ارقام یا تیمارهای آزمایشی) بر اساس میزان شباهت ذاتی آن‌ها به یکدیگر است. برخلاف روش‌هایی نظیر تحلیل تشخیص که در آن گروه‌ها از پیش تعریف شده‌اند، تحلیل خوشه‌ای یک روش بدون نظارت^۲ است که در آن پژوهشگر بدون هیچ پیش‌فرض ذهنی، به دنبال کشف ساختار طبیعی و الگوهای پنهان در داده‌ها می‌گردد (فروزش و همکاران، ۱۳۹۴). در علوم زراعی، این روش کاربردهای گسترده‌ای دارد؛ از ناحیه‌بندی اگرواکولوژیک و طبقه‌بندی ژرم‌پلاسم‌ها گرفته تا شناسایی الگوهای مدیریت مزرعه در مطالعات پیمایشی. در ادبیات آماری، دو رویکرد اصلی برای خوشه‌بندی وجود دارد: روش‌های سلسله‌مراتب^۳ و روش‌های

1. Cluster analysis
2. Unsupervised
3. Hierarchical

تقسیمی^۱ یا غیر سلسله‌مراتب (Jain and Dubes, 1988). در روش‌های سلسله‌مراتب که در کشاورزی بسیار پرکاربرد هستند، الگوریتم با محاسبه ماتریس فاصله (مانند فاصله اقلیدسی برای داده‌های کمی) شروع شده و طی یک فرآیند تکراری، شبیه‌ترین نمونه‌ها را با هم ادغام می‌کند تا در نهایت یک ساختار درختی یا دندروگرام^۲ شکل گیرد. روش وارد^۳ به دلیل توانایی بالا در تشکیل خوشه‌های کروی و متراکم، محبوب‌ترین الگوریتم سلسله‌مراتب در پژوهش‌های زراعی است (Nerurkar et al., 2018; Johnson and Wichern, 2007). در مقابل، روش‌های تقسیمی مانند کی-مینز^۴ زمانی ارجحیت دارند که حجم داده‌ها بسیار زیاد باشد و پژوهشگر فرضیه‌ای درباره تعداد نهایی خوشه‌ها داشته باشد (Tiwari and Misra, 2011). موفقیت در این تحلیل مستلزم طی کردن دقیق پنج گام اساسی است: انتخاب واحدهای نمونه‌برداری، گزینش متغیرهای متمایزکننده، انتخاب معیار شباهت (فاصله)، انتخاب الگوریتم خوشه‌بندی و در نهایت، اعتبارسنجی و تفسیر بیولوژیک خوشه‌های حاصله.

برای درک عملیاتی این روش، فرض کنید پژوهشگری می‌خواهد تنوع نظام‌های زراعی موجود در یک دشت بزرگ را مطالعه کند. او اطلاعات ۱۵ مزرعه مختلف (F1 تا F15) را که مدیریت‌های متفاوتی (از کاملاً صنعتی تا معیشتی و اکولوژیک) دارند، جمع‌آوری کرده است. هدف این است که این ۱۵ مزرعه را بر اساس چهار متغیر کلیدی شامل عملکرد دانه (Yield, t ha^{-1}) به عنوان شاخص تولید، درصد ماده آلی خاک (SOM) به عنوان شاخص کیفیت خاک، کارایی مصرف انرژی (EnergyEff) به عنوان شاخص کارایی و سود خالص ($\text{PROFIT, \$ ha}^{-1}$) به عنوان شاخص اقتصادی خوشه‌بندی

-
1. Prtitioning
 2. Dendrogram
 3. Ward's method
 4. K-means

کند تا الگوهای کشت یا تیپ‌های مدیریتی منطقه را شناسایی نماید. در ادامه، کد اجرایی نرم‌افزار SAS جهت انجام این تحلیل، به همراه داده‌های فرضی آزمایش، ارائه شده است.

```
DATA farming_systems;
  INPUT FarmID$ Yield SOM EnergyEff Profit;
  DATALINES;
F1  7.5 0.8 1.2 150
F2  7.2 0.9 1.3 145
F3  7.8 0.7 1.1 160
F4  7.0 0.8 1.2 140
F5  4.5 2.2 2.5 110
F6  4.2 2.4 2.6 105
F7  4.8 2.1 2.4 115
F8  5.5 1.5 1.8 130
F9  5.8 1.6 1.9 135
F10 5.2 1.4 1.7 125
F11 3.0 2.8 3.0  80
F12 2.8 2.9 3.1  75
F13 3.2 2.7 2.9  85
F14 7.4 0.8 1.2 155
F15 5.6 1.5 1.8 132
;
RUN;
PROC      STDIZE      DATA=farming_systems      OUT=std_systems
METHOD=STD;
  VAR Yield SOM EnergyEff Profit;
RUN;
PROC      CLUSTER      DATA=std_systems      METHOD=WARD
OUTTREE=tree PRINT=10;
  VAR Yield SOM EnergyEff Profit;
  ID FarmID;
  TITLE 'Cluster Analysis of Farming Systems';
RUN;
PROC TREE DATA=tree GRAPHICS HORIZONTAL;
  ID FarmID;
  TITLE 'Dendrogram of Farming Systems (Ward Method)';
RUN;
```

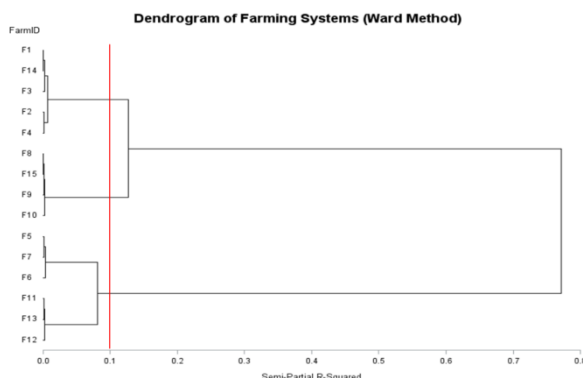
در دستور فوق، گام نخست پیش از هرگونه خوشه‌بندی، استانداردسازی داده‌ها با استفاده از رویه PROC STDIZE است. از آنجا که متغیرهای ورودی دارای واحدهای

اندازه‌گیری کاملاً متفاوتی هستند (مانند درصد برای ماده آلی، تن در هکتار برای عملکرد و دلار در هکتار برای سود)، عدم استانداردسازی باعث می‌شود متغیرهایی با مقیاس عددی بزرگتر، وزن نامتناسبی در محاسبه فاصله اقلیدسی پیدا کرده و نتایج را مخدوش کنند. این رویه تمام متغیرها را به میانگین صفر و واریانس یک تبدیل می‌کند تا وزن یکسانی در تحلیل داشته باشند. در ادامه، رویه PROC CLUSTER با متد WARD برای گروه‌بندی سلسله‌مراتبی فراخوانی شده است. این متد با کمینه‌سازی واریانس درون‌خوشه‌ای، معمولاً خوشه‌های فشرده و کروی تولید می‌کند که تفسیر آن‌ها در مطالعات زراعی آسان‌تر است. گزینه $\text{OUTTREE}=\text{tree}$ نتایج سلسله‌مراتب ادغام را در یک فایل جداگانه ذخیره می‌کند تا بعداً توسط PROC TREE برای ترسیم نمودار گرافیکی (دندروگرام) استفاده شود. همچنین گزینه $\text{PRINT}=10$ تاریخچه ۱۰ مرحله آخر فرآیند ادغام را در خروجی نمایش می‌دهد که برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها لازم است. بررسی روند تغییرات در جدول تاریخچه خوشه‌بندی (جدول ۴-۲۵) نشان می‌دهد که تا مرحله رسیدن به ۳ خوشه، ضریب تعیین مدل (R^2) همچنان در سطح مطلوبی (۰/۸۹۹) باقی مانده است، اما با ادغام این ۳ خوشه به ۲ خوشه، کیفیت برازش بافتی ناگهانی مواجه شده و R^2 به ۰/۷۷۲ تقلیل می‌یابد. این نقطه شکست آماری^۱، مبنایی قوی برای انتخاب ۳ خوشه به عنوان ساختار بهینه داده‌ها فراهم می‌آورد. با ردیابی اعضای هر خوشه در دندروگرام و تطبیق آن با ویژگی‌های مزارع، ماهیت اکولوژیک و مدیریتی این سه گروه آشکار می‌شود (شکل ۴-۹). خوشه نخست که شامل مزارع پربازده منطقه است، با عملکرد و سودآوری بالا اما کارایی انرژی پایین‌تر متمایز می‌شود که بیانگر الگوی کشت متداول و نهاده‌محور است. در مقابل، خوشه دوم مزارعی را در بر می‌گیرد که اگرچه عملکرد متوسطی دارند، اما از نظر ماده آلی خاک و کارایی مصرف انرژی در بالاترین سطح قرار دارند و نماینده تیپ مدیریتی پایدار یا اکولوژیک هستند. خوشه سوم نیز شامل مزارع معیشتی با نهاده و بازده پایین است. در مجموع، تحلیل خوشه‌ای با این رویکرد،

ابزاری قدرتمند برای تیپ‌بندی^۱ نظام‌های زراعی فراهم می‌کند که به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا در میان انبوهی از داده‌های ناهمگن، الگوهای مدیریتی پنهان را شناسایی کرده و توصیه‌های ترویجی خود را متناسب با ویژگی‌های هر خوشه هدفمند سازند.

جدول ۴-۲۵. تاریخچه مراحل پایانی ادغام خوشه‌ها در تحلیل خوشه‌ای به روش وارد

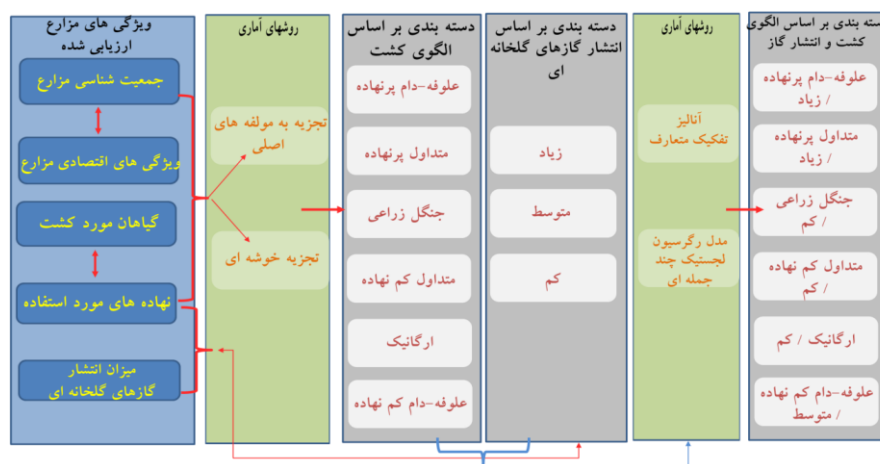
تعداد خوشه‌ها	خوشه‌های ادغام‌شده	فراوانی (Freq)	R2 نیمه‌جزئی	R2 کل
۴	CL8+CL11	۵	۰/۰۰۶۷	۰/۹۷۹
۳	CL5+CL7	۶	۰/۰۸۰۴	۰/۸۹۹
۲	CL4+CL6	۹	۰/۱۲۶۹	۰/۷۷۲
۱	CL2+CL3	۱۵	۰/۷۷۲۱	۰/۰



شکل ۴-۹. دندروگرام حاصل از خوشه‌بندی ۱۵ مزرعه بر اساس شاخص‌های عملکردی و پایداری (خط قرمز رسم شده نشان‌دهنده سطح برش بهینه برای تفکیک مزارع به سه خوشه مجزا است).

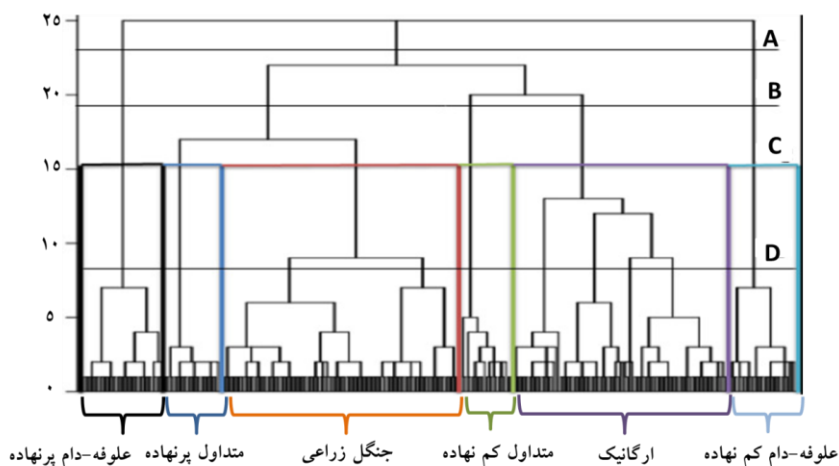
پژوهش جامع موسافیری و همکاران (Musafiri et al., 2020) نمونه‌ای برجسته از کاربرد تلفیقی و موفقیت‌آمیز تحلیل خوشه‌ای در کنار سایر تکنیک‌های پیشرفته چندمتغیره محسوب می‌شود (شکل ۴-۱۰). در این مطالعه که بر روی ۳۰۰ واحد بهره‌برداری در کنیا صورت گرفت، محققان با اتخاذ رویکردی چندمرحله‌ای برای غلبه بر پیچیدگی داده‌ها، ابتدا از تحلیل مؤلفه‌های اصلی جهت کاهش ابعاد متغیرها و حذف

همخطی استفاده کردند. سپس با بهره‌گیری از نمرات حاصله در تحلیل خوشه‌ای، مزارع را بر مبنای شاخص‌های کلیدی نظیر ویژگی‌های دموگرافیک بهره‌برداران، وضعیت اقتصادی، الگوی کشت و سطح مصرف نهاده‌ها گروه‌بندی نمودند که منجر به شناسایی تیپ‌های مدیریتی متمایز گردید (شکل ۴-۱۱). در گام‌های نهایی، اعتبار و تمایز آماری گروه‌بندی حاصله با استفاده از تحلیل تشخیصی متعارف تأیید شد و با به کارگیری مدل رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای^۱، ارتباط میان نظام‌های تولیدی شناسایی شده و پتانسیل انتشار گازهای گلخانه‌ای مدل‌سازی گردید. این پژوهش به روشنی اثبات می‌کند که چگونه ترکیب هوشمندانه روش‌های اکتشافی (مانند خوشه‌بندی) با روش‌های تاییدی و پیش‌بینی‌کننده، می‌تواند درکی عمیق و جامع از ساختار نظام‌های زراعی و پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها فراهم آورد.



شکل ۴-۱۰. مدل مفهومی طراحی شده برای دسته‌بندی مزارع منطقه تاراکا-نیتی کنیا با استفاده از زنجیره روش‌های آماری چندمتغیره (PCA → Cluster → CDA → Logit).
برای آگاهی از جزئیات اجرایی به موسافیری و همکاران (Musafiri et al., 2020) مراجعه کنید.

1. Multinomial Logistic Regression



شکل ۴-۱۱. دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای دسته‌بندی نظام‌های تولیدی در منطقه تاراکانیتی کنیا. خطوط افقی A، B، C و D نقاط برش احتمالی را نشان می‌دهند که در این مطالعه، نقطه برش C برای تعریف نهایی تیپ‌های زراعی انتخاب شده است. برگرفته از موسافیری و همکاران (Musafiri et al., 2020).

۴-۱۰-۳-۵. مدل‌سازی معادله ساختاری^۱

مدل‌سازی معادله ساختاری (SEM) به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین رهیافت‌های تحلیل چندمتغیره، ابزاری قدرتمند برای آزمون و برازش مدل‌های نظری پیچیده در سیستم‌های زراعی است. تمایز بنیادین این روش با سایر تکنیک‌های آماری (مانند رگرسیون)، در توانایی آن برای بررسی همزمان شبکه‌ای از روابط علی^۲ در هم تنیده و مدیریت خطاهای اندازه‌گیری است (Hair et al., 2021). این روش به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا تغییرات زمانی و پویایی سیستم را نیز در مدل خود لحاظ کنند (Smith et al., 2014). در مطالعات نظام‌های زراعی، SEM به دلیل دو ویژگی کلیدی به ابزاری انعطاف‌پذیر تبدیل شده است: نخست، امکان شناسایی و تفکیک مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم. برای نمونه، رابطه بین مصرف کود و عملکرد ممکن است مستقیم و غیرخطی (تابع درجه دو) باشد

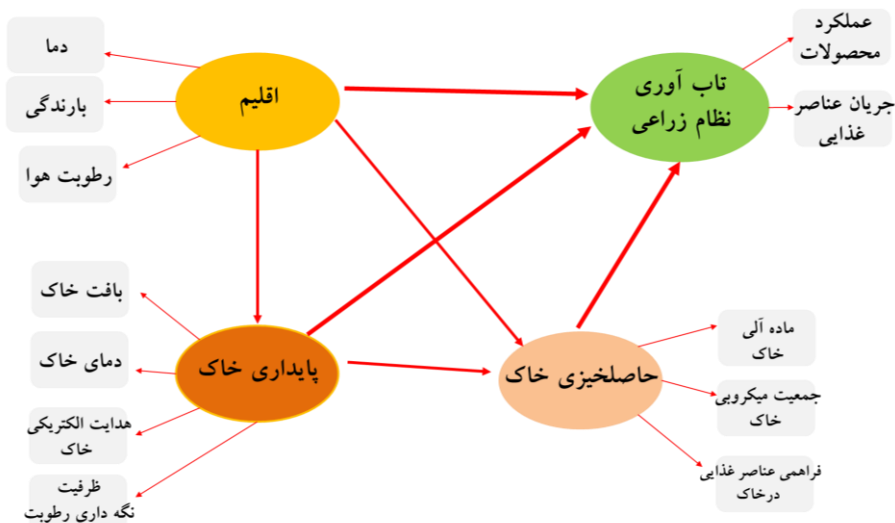
1. Structural equation modeling (SEM)

2. Casual

(Gholamhoseini et al., 2013)، در حالی که تأثیر حشرات شکارگر بر عملکرد، مسیری غیرمستقیم از طریق کنترل جمعیت آفات دارد که ترکیبی از روابط کوواریانسی و رگرسیونی است (Schneider et al., 2015). دوم، قابلیت منحصربه‌فرد SEM در مدل‌سازی متغیرهای پنهان^۱ است (Pugesek et al., 2003). این‌ها مفاهیم انتزاعی نظیر تاب‌آوری نظام زراعی^۲ یا کیفیت خاک هستند که مستقیماً قابل سنجش نیستند، اما می‌توان آن‌ها را از طریق مجموعه‌ای از سنج‌های آشکار^۳ (مانند کربن آلی، بافت خاک و تنوع زیستی) استخراج کرد (شکل ۴-۱۲). برخلاف روش‌های سنتی که خطای مدل را یکباره محاسبه می‌کنند، SEM منابع غیرقابل توضیح تغییرات را به عنوان خطاهای پنهان جداگانه مدل‌سازی می‌کند که دقت برآوردها را افزایش می‌دهد (Grace, 2006).

با این وجود، بهره‌گیری از این روش با چالش‌های جدی همراه است. انتخاب مدل نامناسب که بازتاب‌دهنده واقعیت بیولوژیک سیستم نباشد، می‌تواند به برآوردهای اریب منجر شود (Sarkar et al., 2021). همچنین، SEM ذاتاً به حجم نمونه‌های بزرگ^۴ نیاز دارد و اجرای آن در نمونه‌های کوچک با ناپایداری محاسباتی مواجه می‌شود (Kline, 2023). علاوه بر این، پیچیدگی مدل‌سازی نیازمند حضور تخصص آماری بالا در تیم پژوهشی است تا از تفسیر نادرست روابط درهم‌تنیده جلوگیری شود (Tabri and Elliott, 2012).

-
1. Latent
 2. Agricultural resilience
 3. Manifest
 4. Large sample size



شکل ۴-۱۲. نمونه‌ای از مدل‌سازی معادلات ساختاری که روابط بین اجزای یک نظام زراعی را با تاکید بر اقلیم و ویژگی‌های خاک نشان می‌دهد. توجه شود که که پیکان‌ها از متغیرهای پنهان به متغیرهای آشکار اشاره می‌کنند. شکل از نویسنده.

برای درک عملیاتی نحوه اجرای مدل‌سازی معادلات ساختاری، یک سناریوی پژوهشی فرضی را در نظر بگیرید. فرض کنید پژوهشگری اطلاعات ۲۰۰ مزرعه گندم را جمع‌آوری کرده است تا به این پرسش پاسخ دهد: آیا عملیات خاک‌ورزی حفاظتی مستقیماً باعث افزایش عملکرد می‌شود، یا این تأثیر از طریق بهبود سلامت خاک رخ می‌دهد؟ در این مدل نظری، سلامت خاک یک متغیر پنهان در نظر گرفته شده است که مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست، اما توسط سه سنج یا متغیر آشکار شامل درصد کربن آلی (SOC)، نیتروژن کل (TN) و تنفس میکروبی (Resp) تعریف می‌شود. همچنین متغیر خاک‌ورزی (Tillage) به عنوان متغیر مستقل برون‌زا^۱ و عملکرد دانه (Yield) به عنوان متغیر وابسته نهایی در مدل لحاظ شده‌اند. هدف این تحلیل، برآورد ضرایب مسیر برای دو رابطه است: یکی اثر غیرمستقیم خاک‌ورزی بر عملکرد (از مسیر ارتقای سلامت خاک) و دیگری اثر مستقیم آن.

1. Exogenous independent variable

با توجه به ماهیت روش SEM که مستلزم حجم نمونه‌های بالا است (در اینجا ۲۰۰ مشاهده)، درج مستقیم تمامی داده‌های خام در کد اجرایی یا متن کتاب، چندان منطقی نیست. روش استاندارد و حرفه‌ای در نرم‌افزارهایی مانند SAS، استفاده از ماتریس همبستگی^۱ به عنوان ورودی داده‌هاست. این ماتریس، خلاصه آماری دقیق تمام ۲۰۰ مشاهده است که شامل ضرایب همبستگی بین متغیرها، میانگین‌ها و انحراف معیارها می‌باشد. در ادامه، دستور اجرایی SAS ارائه شده است که در آن ابتدا ماتریس همبستگی داده‌ها وارد شده و سپس با استفاده از رویه PROC CALIS، مدل ساختاری و مدل اندازه‌گیری به صورت همزمان برازش داده می‌شوند.

```
DATA soil_health_matrix(TYPE=CORR);
  INPUT _TYPE_$ _NAME_$ Tillage SOC TN Resp Yield;
  DATALINES;
CORR Tillage 1.00 . . . .
CORR SOC 0.65 1.00 . . .
CORR TN 0.60 0.75 1.00 . .
CORR Resp 0.55 0.80 0.70 1.00 .
CORR Yield 0.40 0.60 0.55 0.50 1.00
STD . 0.50 0.80 0.40 1.20 2.50
MEAN . 2.00 1.50 1.20 3.50 6.50
N . 200 200 200 200 200
;
RUN;
PROC CALIS DATA=soil_health_matrix METHOD=ML;
  VAR Tillage SOC TN Resp Yield;
  PATH
    SoilHealth -> SOC = 1.0,
    SoilHealth -> TN,
    SoilHealth -> Resp,
    Tillage -> SoilHealth,
    SoilHealth -> Yield,
    Tillage -> Yield;
  TITLE 'SEM Analysis using PATH Syntax';
RUN;
```


در دستور فوق، به جای استفاده از داده‌های خام که برای حجم نمونه‌های بالا (مانند ۲۰۰ مشاهده) حجیم و غیرعملی است، از ماتریس همبستگی (همراه با میانگین و انحراف معیار) به عنوان ورودی استاندارد استفاده شده است. رویه PROC CALIS با روش برآورد حداکثر درستنمایی^۱ فراخوانی شده و از گزاره PATH برای تعریف ساختار مدل بهره می‌برد که دقیقاً منطبق بر نمودار ترسیمی فرضیات است. در بخش PATH، مدل به دو جزء تفکیک شده است: نخست مدل اندازه‌گیری که در آن متغیر پنهان (SoilHealth) از طریق سنجه‌های آشکار (SOC, TN, Resp) تعریف می‌شود؛ و دوم مدل ساختاری که مسیرهای علی مستقیم و غیرمستقیم بین خاک‌ورزی، سلامت خاک و عملکرد را ترسیم می‌کند. نکته مهم در این دستور، تثبیت ضریب مسیر SOC $\rightarrow$ SoilHealth روی عدد ۱ است؛ این اقدام تکنیکی جهت شناسایی مدل^۲ و تعیین مقیاس برای متغیر پنهان ضروری است تا نرم‌افزار بتواند پارامترهای مجهول را برآورد نماید.

بررسی شاخص‌های برازش در این آزمایش فرضی (جدول ۴-۲۶) نشان می‌دهد که مدل ساختاری پیشنهادی، تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد. مقدار نسبت کای اسکوئر به درجه آزادی (۲/۰۶)، شاخص برازش تطبیقی ($CFI = ۰/۹۹$) و ریشه میانگین مربعات خطای برآورد ($RMSEA = ۰/۰۷۳$) همگی در محدوده مطلوب قرار دارند که اعتبار ساختار نظری مدل را تأیید می‌کند. نتایج جدول ضرایب مسیر (۴-۲۷) حاوی یک یافته بیولوژیک جالب است: اثر مستقیم مدیریت خاک‌ورزی بر عملکرد دانه گندم ($-۰/۰۸$) از نظر آماری معنی‌دار نیست، اما اثر آن بر متغیر پنهان سلامت خاک بسیار قوی و مثبت ($۰/۶۹$) است. به نوبه خود، سلامت خاک نیز تأثیر قوی و معنی‌داری ($۰/۶۹$) بر عملکرد نهایی دارد. این یافته‌ها به روشنی اثبات می‌کنند که عملیات خاک‌ورزی حفاظتی، به خودی خود عامل افزایش عملکرد نیست، بلکه نقش آن تسهیل‌گری است؛

1. Maximum likelihood (ML)

2. Model identification

بدین معنا که با بهبود ویژگی‌های کیفی خاک (مانند کربن آلی و تنفس میکروبی)، بستر لازم را برای افزایش پتانسیل تولید فراهم می‌آورد. این نوع استنتاج مبتنی بر سازوکار^۱ که نقش میانجی‌گری^۲ سلامت خاک را آشکار می‌سازد، قدرت منحصربه‌فرد SEM را در فراتر رفتن از همبستگی‌های ساده و تبیین روابط علی پیچیده در نظام‌های زراعی نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲۶. شاخص‌های نیکویی برازش مدل ساختاری پیشنهادی برای تأثیر خاک‌ورزی بر عملکرد

شاخص برازش	مقدار محاسبه شده	معیار پذیرش	وضعیت
Chi-Square / df	۲/۰۶	کمتر از ۳	مطلوب
RMSEA	۰/۰۷۳	کمتر از ۰/۰۸	مطلوب
CFI	۰/۹۹۳	بیشتر از ۰/۹۰	مطلوب
SRMR	۰/۰۱۹	بیشتر از ۰/۰۸	مطلوب

معیارهای برازش مطلوب (دو ستون معیار پذیرش و وضعیت) بر اساس استانداردهای پیشنهادی هو و بنتلر (Hu and Bentler, 1999) و مک‌کالوم و همکاران (MacCallum et al., 1996) تعیین شده‌اند.

جدول ۴-۲۷. برآورد ضرایب مسیر استاندارد شده و آزمون معنی‌داری

مسیر (رابطه)	نوع اثر	ضریب استاندارد (β)	معنی‌داری (t-value)
خاک‌ورزی ← سلامت خاک	مستقیم	۰/۶۹	۱۷/۲۲**
سلامت خاک ← عملکرد	مستقیم	۰/۶۹	۹/۱۸**
خاک‌ورزی ← عملکرد	مستقیم	-۰/۰۸	۰/۹۴ ^{ns}
سلامت خاک ← کربن آلی (SOC)	اندازه‌گیری	۰/۹۴	۵۷/۵۳**
سلامت خاک ← نیتروژن کل (TN)	اندازه‌گیری	۰/۸۲	۳۰/۰۴**
سلامت خاک ← تنفس میکروبی (Resp)	اندازه‌گیری	۰/۸۴	۳۴/۷۲**

** معنی‌دار در سطح یک درصد، ns غیر معنی‌دار.

جهت فلش‌ها نشان‌دهنده تأثیرگذاری متغیر سمت راست بر متغیر سمت چپ است.

1. Mechanistic
2. Mediation

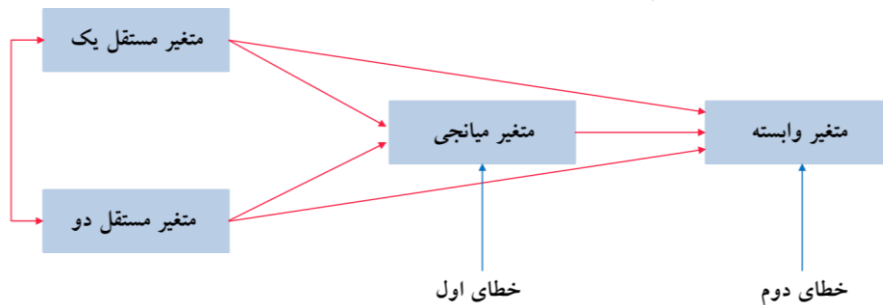
۴-۱۰-۳-۶. تحلیل مسیر^۱

تحلیل مسیر به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته آماری و زیرمجموعه‌ای از مدل‌سازی معادلات ساختاری، با هدف بررسی دقیق و کمی‌سازی روابط مستقیم و غیرمستقیم بین متغیرها از طریق تفکیک فرآیندهای علی توسعه یافته است (Lleras, 2005). این روش که بر جریان یک‌طرفه و فرضی روابط بین متغیرها استوار است، ابزاری کارآمد برای آزمون مدل‌های مفهومی پیچیده در پژوهش‌های زراعی محسوب می‌شود. در این تحلیل، نمودار درون‌داد^۲ که بر اساس تئوری‌ها و فرضیات پیشین پژوهش طراحی می‌شود، در مقابل نمودار برون‌داد^۳ که نتایج واقعی و کمی تحلیل آماری را نمایش می‌دهد، مورد آزمون و ارزیابی قرار می‌گیرد (کوچ، ۱۳۹۴). مزیت راهبردی تحلیل مسیر نسبت به روش‌های رگرسیونی سنتی، در توانایی آن برای واکاوی ساختار درونی همبستگی‌هاست (شکل ۴-۱۳). در حالی که رگرسیون چندگانه تنها اثر مستقیم متغیرها را نشان می‌دهد، تحلیل مسیر قادر است همبستگی مشاهده‌شده بین دو متغیر را به سه مؤلفه تفکیک کند: اثر مستقیم، اثر غیرمستقیم (از طریق متغیرهای واسطه) و اثر کاذب (ناشی از علیت مشترک). این قابلیت، امکان بررسی همزمان روابط چندگانه در قالب یک شبکه علی و ارزیابی میزان واقعی بودن روابط را با تفکیک سهم متغیرهای مورد مطالعه از متغیرهای خارجی فراهم می‌آورد (Deng and Yuan, 2023).

با این حال، باید توجه داشت که تحلیل مسیر به خودی خود علیت را اثبات نمی‌کند، بلکه اگر مدل فرضی صحیح باشد، اطلاعاتی کمی درباره جهت، شدت و قدرت روابط ارائه می‌دهد (Shipley, 2016). این روش به مشخصات مدل^۴ بسیار حساس است؛ به‌طوری‌که ورود نابجای متغیرهای غیرضروری یا حذف متغیرهای کلیدی می‌تواند نتایج

-
1. Path analysis
 2. Input diagram
 3. Output diagram
 4. Model specification

را به شدت مخدوش کند (Scheiner et al., 2000). همچنین، موفقیت در اجرای آن مستلزم رعایت پیش‌فرض‌های رگرسیونی نظیر نرمال بودن داده‌ها، استقلال خطاها و داشتن حجم نمونه کافی (حداقل ۱۰ تا ۲۰ نمونه به ازای هر متغیر در مدل) است (Petratis et al., 1996).



شکل ۴-۱۳. مدل مفهومی ساده تحلیل مسیر. شکل از نویسنده.

برای درک عملیاتی چگونگی استفاده از تحلیل مسیر در پژوهش‌های زراعی، یک آزمایش فرضی را در نظر بگیرید که در آن پژوهشگری با جمع‌آوری داده از ۵۰ مزرعه گندم در یک نظام کم‌نهاد، قصد دارد مکانیسم تأثیرگذاری ماده آلی خاک بر عملکرد دانه را واکاوی کند. فرضیه علمی این پژوهش بر این اصل استوار است که ماده آلی خاک علاوه بر اثر مستقیم (از طریق بهبود ساختمان و نگهداری رطوبت)، به صورت غیرمستقیم و از طریق افزایش نیتروژن قابل جذب و در نتیجه بهبود ارتفاع بوته نیز بر عملکرد نهایی تأثیر می‌گذارد. برای آزمون این مدل علی، چهار متغیر کلیدی اندازه‌گیری شده‌اند که شامل ماده آلی خاک (OM) به عنوان متغیر مستقل برون‌زا، نیتروژن قابل جذب (N_Avail) و ارتفاع بوته (Height) به عنوان متغیرهای میانجی و عملکرد دانه (Yield) به عنوان متغیر وابسته نهایی می‌باشند. از آنجا که هدف اصلی تحلیل مسیر، تفکیک همبستگی‌های مشاهده‌شده به اثرات مستقیم و غیرمستقیم است، در این مطالعه به جای استفاده از داده‌های خام، از ماتریس همبستگی بین این صفات به عنوان ورودی تحلیل استفاده می‌شود که خلاصه‌ای دقیق از روابط خطی بین متغیرها در جامعه مورد مطالعه

است. برای این تحلیل نیز از رویه PROC CALIS استفاده می‌کنیم. برای سهولت و دقت، به جای داده‌های خام، ماتریس همبستگی این متغیرها (که از ۵۰ مزرعه به دست آمده) را در کد وارد می‌کنیم.

```
DATA wheat_path_matrix(TYPE=CORR);
  INPUT _TYPE_$ _NAME_$ OM N_Avail Height Yield;
  DATALINES;
N      .      50      50      50      50
CORR OM      1.00      .      .      .
CORR N_Avail 0.70      1.00      .      .
CORR Height 0.50      0.60      1.00      .
CORR Yield 0.55      0.65      0.80      1.00
;
RUN;
PROC CALIS DATA=wheat_path_matrix METHOD=ML EFFPART;
  PATH
    OM -> N_Avail,
    OM -> Yield,
    N_Avail -> Height,
    N_Avail -> Yield,
    Height -> Yield;
  TITLE 'Path Analysis of Factors Affecting Wheat Yield';
RUN;
```

در دستور فوق، از ماتریس همبستگی به عنوان ورودی داده‌ها استفاده شده است. رویه PROC CALIS با دستور PATH فراخوانی شده که در آن شبکه روابط فرضی (شامل تأثیرات ماده آلی بر نیتروژن و عملکرد، و زنجیره تأثیر نیتروژن بر ارتفاع و عملکرد) دقیقاً مطابق با نمودار مفهومی ترسیم شده است. ویژگی کلیدی این دستور، استفاده از گزینه EFFPART است؛ این گزینه به نرم‌افزار فرمان می‌دهد که علاوه بر ضرایب مسیر استاندارد (اثرات مستقیم)، به طور خودکار اثرات غیرمستقیم (حاصل ضرب ضرایب مسیرهای واسطه) و اثرات کل (مجموع اثرات مستقیم و غیرمستقیم) را نیز محاسبه و در جداول خروجی گزارش کند. این تفکیک کمی، ابزار اصلی پژوهشگر برای درک مکانیسم‌های اثرگذاری و وزن‌دهی به اهمیت هر مسیر در مدل نهایی است.

نتایج تجزیه و تحلیل این آزمایش فرضی در دو جدول ۴-۲۸ و ۴-۲۹ ارایه شده است. بررسی شاخص‌های برآزش در جدول ۴-۲۸ نشان می‌دهد که مقدار کای اسکوئر غیرمعنی‌دار ($P=0/32$) و شاخص RMSEA برابر با صفر برآورد شده است. اما مهم‌ترین یافته این تحلیل در جدول ۴-۲۹ نهفته است که مکانیسم واقعی تأثیرگذاری ماده آلی خاک را آشکار می‌سازد. اگرچه ضریب همبستگی ساده بین ماده آلی و عملکرد ($0/55$) نسبتاً بالا بود، اما تفکیک اثرات نشان می‌دهد که اثر مستقیم این متغیر بر عملکرد ($0/09$) بسیار ناچیز و از نظر آماری غیرمعنی‌دار است. در مقابل، سهم عمده‌ای از تأثیر ماده آلی (بیش از ۸۰ درصد از اثر کل) به صورت غیرمستقیم و از طریق زنجیره علی افزایش نیتروژن قابل جذب خاک ← افزایش ارتفاع گیاه ← افزایش عملکرد اعمال می‌شود. این یافته اثبات می‌کند که در این نظام زراعی کم‌نهاد، ماده آلی نقش پشتیبان تغذیه‌ای را ایفا می‌کند و نه صرفاً یک عامل فیزیکی. این دقیقاً همان سناریویی است که ارزش تحلیل مسیر را اثبات می‌کند. اگر پژوهشگر فقط رگرسیون ساده می‌گرفت، ممکن بود اثر ماده آلی را کم‌اهمیت برآورد کند، اما تحلیل مسیر نشان داد که این متغیر محرک اصلی سیستم است که اثرش را از طریق واسطه‌ها اعمال می‌کند. همچنین، ارتفاع بوته به عنوان قوی‌ترین متغیر با اثر مستقیم ($0/63$)، نشان‌دهنده اهمیت تولید بیوماس رویشی در تعیین عملکرد نهایی در شرایط این آزمایش است. چنین بینشی که تنها از طریق تحلیل مسیر حاصل می‌شود، به پژوهشگران توصیه می‌کند که برای افزایش عملکرد در این نظام‌ها، تمرکز مدیریتی خود را بر راهکارهایی معطوف کنند که کارایی چرخه نیتروژن و رشد رویشی را هدف قرار می‌دهند.

جدول ۴-۲۸. شاخص‌های نیکویی برازش مدل تحلیل مسیر برای ارزیابی عوامل مؤثر بر عملکرد گندم

شاخص برازش	مقدار محاسبه شده	معیار پذیرش	وضعیت مدل
Chi-Square	۰/۹۷	$P\text{-value} > ۰/۰۵$	عالی (عدم تفاوت معنی‌دار بین مدل و داده)
RMSEA	۰/۰	کمتر از ۰/۰۵	عالی
CFI	۱/۰۰	بیشتر از ۰/۹۵	عالی
GFI	۰/۹۹	بیشتر از ۰/۹۰	عالی

معیارهای برازش مطلوب (دو ستون معیار پذیرش و وضعیت مدل) بر اساس استانداردهای پیشنهادی هو و بنتلر (Hu & Bentler, 1999) و مک کالوم و همکاران (MacCallum et al., 1996) تعیین شده‌اند.

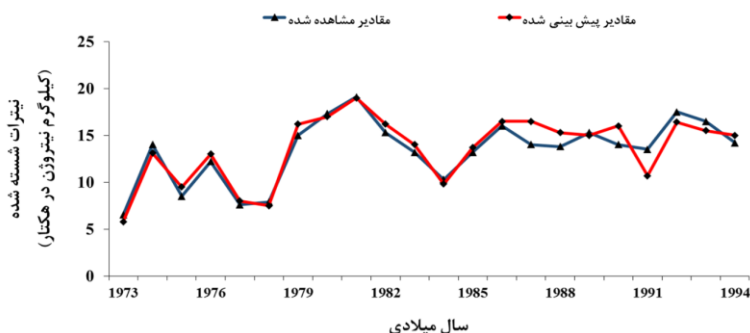
جدول ۴-۲۹. تفکیک اثرات مستقیم، غیرمستقیم و کل متغیرهای مستقل بر عملکرد دانه گندم (بر اساس ضرایب استاندارد)

مسیر تأثیرگذاری	اثر مستقیم	اثر غیرمستقیم	اثر کل	وضعیت آماری (اثر مستقیم)
ماده آلی خاک ← عملکرد	۰/۰۹	۰/۴۱	۰/۵۰	غیرمعنی‌دار
نیترژن قابل جذب ← عملکرد	۰/۲۱	۰/۳۸	۰/۵۹	معنی‌دار در سطح ۱۰ درصد
ارتفاع بوته ← عملکرد	۰/۶۳	-	۰/۶۳	معنی‌دار در سطح ۱ درصد
ماده آلی خاک ← نیترژن	۰/۷۰	-	۰/۷۰	معنی‌دار در سطح ۱ درصد

۴-۱۰-۳-۷. تحلیل سری زمانی^۱

تحلیل سری زمانی به عنوان یک روش آماری پیشرفته برای بررسی داده‌های جمع‌آوری شده در توالی‌های زمانی طولانی، فراتر از توصیف ساده تغییرات عمل کرده و امکان ایجاد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده دقیق بر اساس روندهای گذشته را فراهم می‌آورد (Shumway et al., 2000). این روش که بر پایه مدل‌سازی رفتار دینامیک و وابسته به زمان پدیده‌ها استوار است، در پژوهش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی کاربرد ویژه‌ای دارد؛ زیرا بسیاری از فرآیندهای اکولوژیک (مانند تغییرات ماده آلی خاک یا دینامیک

جمعیت آفات) ماهیتی تدریجی داشته و حساسیت بالایی به نوسانات اقلیمی نشان می‌دهند. برخلاف روش‌های آماری معمول که فرض استقلال خطاها را دارند، تحلیل سری زمانی صراحتاً همبستگی خودکار^۱ داده‌ها را در مدل لحاظ می‌کند. کارایی این روش در مطالعات کلاسیک و معتبری نظیر پژوهش‌های استرانگ و همکاران (Stronge et al., 1997) و تیلور و مورکرافت (Taylor and Morecroft, 2009) به اثبات رسیده است. در مطالعه نخست، محققان با تحلیل مجموعه داده‌های ۲۱ ساله، مدلی برای پیش‌بینی نوسانات غلظت نیترات در حوضه آبریز کشاورزی توسعه دادند که نشان داد متغیرهای میزان بارندگی و کارایی مصرف کود نیتروژنی مهم‌ترین پیشران‌های تغییرات کیفی آب هستند (شکل ۴-۱۴). در مطالعه دوم، تمرکز بر پویایی تنوع زیستی پس از گذار به مدیریت ارگانیک بود؛ استفاده از ۱۲ سال داده‌های پایش مداوم و تحلیل سری زمانی آشکار ساخت که اگرچه در سال‌های اول تغییرات اندک بود، اما در بلندمدت افزایش معنی‌داری در تنوع گروه‌های حیاتی نظیر پروانه‌ها و حشرات شکارگر رخ داده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تحلیل سری زمانی چگونه قادر است الگوهای پنهان و روندهای غیرخطی را در داده‌های بلندمدت نظام‌های زراعی آشکار سازد و بینشی ارزشمند برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی آینده‌نگر فراهم آورد.



شکل ۴-۱۴. مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده به روش تحلیل سری زمانی از نیترات شسته شده در بازه زمانی ۱۹۷۳ تا ۱۹۹۴ در حوضه آبریز. برگرفته از استرانگ و همکاران (Stronge et al., 1997).

1. Autocorrelation

برای درک عملیاتی این روش، یک سناریوی فرضی در آزمایش‌های بلندمدت را در نظر بگیرید. فرض کنید پژوهشگری به مدت ۲۰ سال (از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹) میزان کربن آلی خاک (SOC) را در یک نظام زراعی حفاظتی اندازه‌گیری کرده است. هدف، برآزش یک مدل سری زمانی برای درک روند گذشته و پیش‌بینی^۱ وضعیت کربن خاک برای ۵ سال آینده است. در نرم‌افزار SAS، رویه PROC ARIMA استانداردترین ابزار برای این نوع تحلیل است. در ادامه، کد نرم‌افزار شامل داده‌های فرضی این آزمایش برای انجام تحلیل ارائه می‌شود.

```
DATA soil_carbon_series;
  INPUT Year SOC @@;
  DATALINES;
  1380 0.85 1381 0.88 1382 0.90 1383 0.87 1384 0.92
  1385 0.95 1386 0.94 1387 0.98 1388 1.02 1389 1.05
  1390 1.03 1391 1.08 1392 1.12 1393 1.15 1394 1.14
  1395 1.18 1396 1.22 1397 1.25 1398 1.23 1399 1.28
  ;
RUN;
ODS GRAPHICS ON;
PROC          ARIMA          DATA=soil_carbon_series
PLOTS(ONLY)=FORECAST(FORECAST);
  IDENTIFY VAR=SOC;
  ESTIMATE P=1 METHOD=ML;
  FORECAST LEAD=5 OUT=forecast_results ID=Year INTERVAL=1
PRINTALL;
  TITLE 'Time Series Forecasting of Soil Organic Carbon';
RUN;
ODS GRAPHICS OFF;
```

در دستور فوق، داده‌های ۲۰ ساله کربن آلی وارد شده‌اند. رویه PROC ARIMA سه گام اصلی اجرا می‌شود: گام اول (IDENTIFY) که ویژگی‌های آماری سری زمانی

(مانند مانایی^۱ و خودهمبستگی^۲) را بررسی می‌کند؛ گام دوم (ESTIMATE) که پارامترهای مدل (در اینجا مدل اتورگرسیو مرتبه اول یا AR1) را برآورد می‌نماید؛ و گام سوم (FORECAST) که با استفاده از مدل برازش‌شده، مقادیر کربن آلی را برای ۵ سال آینده (LEAD=5) پیش‌بینی می‌کند. این قابلیت پیش‌بینی، ویژگی متمایز تحلیل سری زمانی نسبت به سایر روش‌های آماری است. همچنین در این کد عبارت ODS GRAPHICS ON بعد از معرفی داده‌ها، موتور گرافیکی نرم‌افزار SAS را فعال می‌کند که برای تولید نمودارهای استاندارد و باکیفیت ضروری است. در خط فرمان PROC ARIMA، گزینه $PLOTS(ONLY)=FORECAST(FORECAST)$ به نرم‌افزار فرمان می‌دهد که نمودار سری زمانی را ترسیم کند؛ این نمودار به طور خودکار شامل نقاط داده‌های واقعی (مشاهده‌شده)، خط روند پیش‌بینی شده برای ۵ سال آینده و یک نوار سایه‌دار در اطراف آن است که دامنه اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد. همچنین دستور $ID=Year$ در خط FORECAST تضمین می‌کند که محور افقی نمودار به درستی با سال‌های شمسی (۱۳۸۰ تا ۱۴۰۴) برچسب‌گذاری شود.

نتایج تحلیل این آزمایش فرضی در قالب دو جدول ۴-۳۰ و ۴-۳۱ و شکل ۴-۱۵ ارائه شده است. نتایج جدول ۴-۳۰ نشان می‌دهد که مدل سری زمانی برازش‌شده، با دقت بسیار بالایی رفتار دینامیک تغییرات کربن آلی خاک را توصیف می‌کند. پارامتر کلیدی در این مدل، ضریب خودهمبستگی (AR1) است که مقدار آن ۰/۹۸۵ برآورد شده و از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است. نزدیکی این ضریب به عدد یک، حاوی پیامی بیولوژیک است: سیستم خاک دارای اینرسی^۳ یا حافظه اکولوژیک^۴ بسیار قوی است؛ بدین معنا که وضعیت ماده آلی در هر سال، به شدت تابع وضعیت سال قبل است و

-
1. Stationarity
 2. Autocorrelation
 3. Inertia
 4. Ecological memory

نوسانات آبی و کوتاه‌مدت تأثیر کمی بر روند کلی دارند. این یافته ریاضی، با ماهیت بیولوژیک تجزیه کند هوموس و پایداری کربن در خاک‌های تحت مدیریت حفاظتی کاملاً سازگار است.

برای درک بصری آینده سیستم، شکل ۴-۱۵ و جدول پیش‌بینی (۴-۳۱) تصویر روشنی ارائه می‌دهند. همان‌طور که پیداست، روند صعودی ذخیره کربن که در دو دهه گذشته مشاهده شده، در ۵ سال آینده نیز ادامه خواهد داشت، اما شیب این افزایش به تدریج ملایم‌تر شده و به سمت یک سطح ثابت در محدوده ۱/۲۷ درصد میل می‌کند. این رفتار مجانبی^۱ نشان می‌دهد که خاک مزرعه در حال نزدیک شدن به ظرفیت اشباع کربن خود است. همچنین، گسترش تدریجی دامنه اطمینان در سال‌های انتهایی پیش‌بینی، بیانگر افزایش عدم قطعیت طبیعی در پیش‌بینی‌های بلندمدت است. این تحلیل به مدیران مزرعه هشدار می‌دهد که نرخ افزایش کربن در سال‌های آتی کندتر خواهد شد و برای حفظ روند صعودی، شاید نیاز به مداخلات جدید (مانند افزودن کودهای آلی) باشد. در مجموع، تحلیل سری زمانی با گذر از توصیف گذشته و ارائه پیش‌بینی‌های کمی از رفتار آینده سیستم، ابزاری راهبردی برای مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی بلندمدت در پژوهش‌های پایداری محسوب می‌شود؛ قابلیت‌هایی که سایر روش‌های آماری از ارائه آن ناتوان هستند.

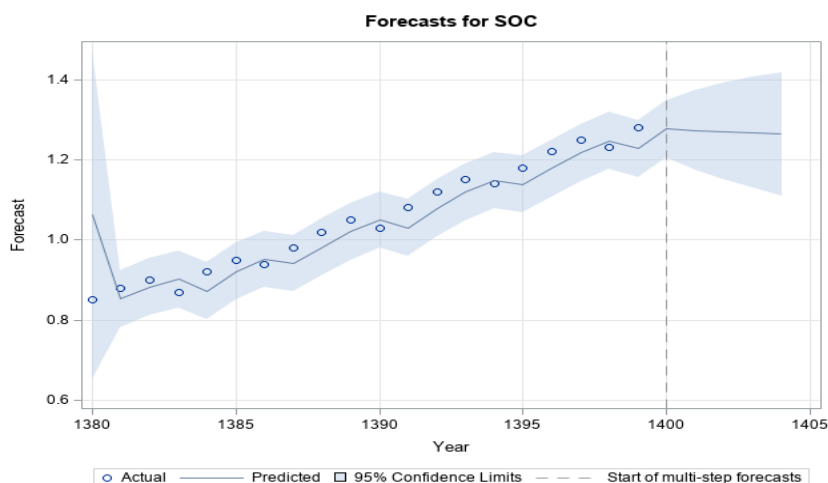
جدول ۴-۳۰. برآورد پارامترهای مدل سری زمانی برای توصیف پویایی کربن آلی خاک

نام پارامتر	نماد	برآورد	خطای استاندارد	آماره t	مفهوم بیولوژیک
میانگین ثابت	μ	۱/۰۶۳**	۰/۴۰۱	۲/۶۵	سطح پایه تعادل کربن در سیستم
ضریب خودهمبستگی	AR(1)	۰/۹۸۵**	۰/۰۵۵	۱۷/۹۲	حافظه سیستم (شدت وابستگی به سال قبل)

** معنی‌دار در سطح یک درصد.

جدول ۴-۳۱. پیش‌بینی روند تغییرات کربن آلی خاک (%) برای ۵ سال آینده بر اساس مدل برازش شده

سال آینده (Obs)	مقدار پیش‌بینی شده (Forecast)	خطای استاندارد	حد پایین اطمینان ۹۵٪	حد بالا اطمینان ۹۵٪
۱۴۰۰	۱/۲۷۷	۰/۰۳۶	۱/۲۰۶	۱/۳۴۷
۱۴۰۱	۱/۲۷۴	۰/۰۵۱	۱/۱۷۴	۱/۳۷۳
۱۴۰۲	۱/۲۷۱	۰/۰۶۲	۱/۱۵۰	۱/۳۹۱
۱۴۰۳	۱/۲۶۷	۰/۰۷۱	۱/۱۲۹	۱/۴۰۶
۱۴۰۴	۱/۲۶۴	۰/۰۷۸	۱/۱۱۱	۱/۴۱۸



شکل ۴-۱۵. روند تغییرات مشاهده‌شده (۲۰ سال گذشته) و پیش‌بینی شده (۵ سال آینده) درصد کربن آلی خاک بر اساس مدل ARIMA. ناحیه هاشورخوره نشان‌دهنده دامنه اطمینان ۹۵ درصد برای پیش‌بینی‌ها است.

۴-۱۰-۴. مدل‌سازی ساختار همبستگی^۱ برای تحلیل آزمایش‌های بلندمدت

مدل‌سازی ساختار همبستگی در تحلیل داده‌های بلندمدت نظام‌های زراعی، یک رهیافت آماری پیشرفته و تخصصی برای مدیریت داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مکرر در کرت‌های آزمایشی است. این روش به طور اختصاصی برای حل چالش

همبستگی سریالی^۱ توسعه یافته است. در این رویکرد، برخلاف روش‌های کلاسیک که همبستگی را نادیده می‌گیرند یا ساده‌سازی می‌کنند، ساختار دقیق همبستگی بین داده‌ها مدل‌سازی شده و سپس تحلیل واریانس ترکیبی با لحاظ کردن این ساختار انجام می‌پذیرد (Loughin, 2006). در تحقیقات نظام‌های زراعی که داده‌ها ذاتاً دارای وابستگی زمانی هستند، این روش برتری‌های آشکاری نسبت به تحلیل‌های سنتی (مانند طرح کرت‌های خردشده در زمان) دارد؛ زیرا طرح‌های سنتی فرض می‌کنند همبستگی بین تمام زمان‌ها یکسان است، اما مدل‌سازی ساختار همبستگی قادر است الگوهای واقعی و متفاوت وابستگی بین اندازه‌گیری‌هایی با فواصل زمانی مختلف را به درستی تبیین کند (Payne, 2015).

توسعه ابزارهای محاسباتی قدرتمند در سال‌های اخیر، از جمله رویه PROC MIXED در نرم‌افزار SAS و بسته‌های تخصصی nlme و lme4 در محیط برنامه‌نویسی R، این امکان را برای پژوهشگران فراهم آورده است که ساختارهای متنوع همبستگی را آزمون کرده و با استفاده از معیارهای انتخاب مدل نظیر معیار اطلاعات آکائیک^۲ (AIC) بهترین و برازنده‌ترین ساختار را برگزینند. این متدولوژی، دقت برآوردها را افزایش داده و امکان واکاوی دقیق‌تر اثرات اصلی تیمار، روند زمان و به‌ویژه اثر متقابل آن‌ها را مهیا می‌سازد. همچنین، از طریق تعریف کنتراست‌های^۳ هدفمند، مقایسه‌های جامع‌تر و معنادارتری بین

1. Serial correlation

همبستگی بین مشاهدات متوالی در طول زمان؛ به طوری که مقدار یک متغیر در زمان t به مقدار آن در زمان $t-1$ وابسته است. این پدیده در آزمایش‌های اندازه‌گیری مکرر رایج است و فرض استقلال خطاها را نقض می‌کند (Box et al., 2015).

2. Akaike information criterion (AIC)

معیاری برای انتخاب بهترین مدل آماری از میان مجموعه‌ای از مدل‌های کاندیدا است. این شاخص بر پایه مفهوم آنتروپی اطلاعات بنا شده و با ایجاد تعادل میان نیکویی برازش و پیچیدگی مدل (تعداد پارامترها)، از برازش بیش‌ازحد جلوگیری می‌کند. در مقایسه مدل‌ها (مثلاً مقایسه ساختارهای کوواریانس مختلف)، مدلی که دارای مقدار AIC کمتری باشد، به عنوان مدل برتر شناخته می‌شود (Akaike, 2003).

3. Contrasts

تیمارها در مقاطع زمانی مختلف امکان‌پذیر می‌شود (Loughin et al., 2007). با این وجود، باید اذعان داشت که این روش با محدودیت‌هایی نیز همراه است؛ پیچیدگی محاسباتی بالا و نیاز به مهارت‌های پیشرفته آماری و برنامه‌نویسی برای رفع مشکلات عدم همگرایی مدل، از جمله چالش‌های اجرایی آن محسوب می‌شوند (Littell, 1989; Bolker et al., 2009). مطالعات مرجعی نظیر پژوهش پاینه (Payne, 2015) نشان داده‌اند که به‌ویژه در حضور الگوهای همبستگی پیچیده، این روش بینشی به مراتب عمیق‌تر و دقیق‌تر از روش‌های سنتی ارائه می‌دهد و بستر مطمئن‌تری برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در جهت پایداری سیستم‌های زراعی فراهم می‌کند.

در تحقیقات نظام‌های زراعی، یکی از گلوگاه‌های نظری در تحلیل داده‌های اندازه‌گیری مکرر، نقض فرض بنیادین استقلال واحدهای آزمایشی است (Jones and Singh, 2000). مبنای آمار کلاسیک بر این اصل استوار است که خطای یک کرت باید مستقل از سایر واحدها باشد؛ به طوری که انحراف از میانگین در یک واحد، حاوی اطلاعاتی درباره رفتار سایر واحدها نباشد. اما در آزمایش‌های بلندمدت زراعی با طراحی استاندارد (شروع همزمان تیمارها)، این استقلال وجود خارجی ندارد، زیرا تمامی کرت‌ها در هر سال زراعی، تحت سیطره مشترک اثرات تصادفی سال (نوسانات اقلیمی و محیطی) قرار می‌گیرند (Roy et al., 2007). برای مثال، وقوع یک سال پر باران موجب می‌شود عملکرد تمام کرت‌ها به طور همسو افزایش یابد که این امر همبستگی مثبت بین خطاها ایجاد می‌کند. در پژوهش‌های کوتاه‌مدت، می‌توان با تکرار آزمایش در سال‌های متعدد و وارد کردن اثر تصادفی سال و تعامل سال $\times$ تیمار در مدل، این مشکل را مرتفع کرد. اما در آزمایش‌های بلندمدت استاندارد، این راهکار به بن‌بست می‌رسد؛ زیرا اجرای مجدد یک آزمایش ۲۰ ساله در زمان‌های مختلف عملاً غیرممکن است و حتی در صورت امکان، وارد کردن اثر تصادفی سال در مدل، منجر به خنثی شدن یا درهم‌آمیختگی آن با

اثرات اصلی زمان (مدت تیمار) می‌شود.^۱ راهکار برون‌رفت از این چالش ساختاری، استفاده از مدل‌های خطی تعمیم‌یافته آمیخته^۲ با تعریف ساختارهای همبستگی سفارشی^۳ است (Stroup et al., 2024). این مدل‌های پیشرفته قادرند هم‌زمان اثرات ثابت (تیمار)، اثرات تصادفی (بلوک) و الگوی پیچیده وابستگی بین مشاهدات را مدل‌سازی کرده و برآوردهای ناریب ارائه دهند (Bolker et al., 2009).

۴-۱۰-۱. ساختارهای همبستگی رایج

انتخاب ساختار همبستگی مناسب، گامی تعیین‌کننده در برازش صحیح مدل‌های آمیخته است. در نرم‌افزارهای آماری پیشرفته، طیف وسیعی از الگوهای کوواریانس تعریف شده است که هر یک فرضیات خاصی درباره نحوه ارتباط داده‌ها در طول زمان (همبستگی) و میزان پراکندگی آن‌ها (واریانس) دارند. به طور کلی، این ساختارها را می‌توان بر اساس دو معیار کلیدی طبقه‌بندی کرد: نخست اینکه آیا همبستگی بین سال‌ها با افزایش فاصله زمانی کاهش می‌یابد یا ثابت می‌ماند؟ و دوم اینکه آیا واریانس خطا در تمام سال‌های آزمایش یکسان (همگن) است یا تحت تأثیر نوسانات محیطی تغییر می‌کند (ناهمگن)؟ (Roy, 2007). در ادامه، پرکاربردترین ساختارهای مورد استفاده در آزمایش‌های زراعی که پوشش‌دهنده سناریوهای مختلف محیطی و مدیریتی هستند، تشریح می‌گردند.

• **خانواده خودهمبسته^۴**، در میان ساختارهای متنوع همبستگی، ساختار خودهمبسته مرتبه اول^۵ (AR(1)) به عنوان ابزاری کلیدی برای مدل‌سازی داده‌های طولی زراعی، نظیر

۱. لازم به توضیح است که در اینجا، منظور از زمان (Time)، دوره سپری‌شده از آغاز اعمال تیمار (سن آزمایش) است و منظور از سال (Year)، سال تقویمی وقوع آزمایش است. در طراحی استاندارد، این دو با هم تداخل کامل دارند.

2. Generalized linear mixed models (GLMMs)
3. Custom correlation structures
4. Autoregressive
5. Autoregressive Order 1 (AR(1))

آزمایش‌های چندساله عملکرد محصول، شناخته می‌شود. این ساختار که توسط وربک (Verbeke, 2000) تبیین شده است، بر این فرض منطقی استوار است که همبستگی میان اندازه‌گیری‌های متوالی، تابعی از فاصله زمانی آن‌هاست و به صورت نمایی با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. برای درک عملی این مفهوم، یک مطالعه ۱۰ ساله روی عملکرد آفتابگردان را در نظر بگیرید. اگر ضریب همبستگی بین سال‌های متوالی (مثلاً سال اول با دوم) برابر با ۰/۸ باشد، در ساختار $AR(1)$ انتظار می‌رود که این همبستگی برای سال‌های با فاصله دو سال (سال اول با سوم) به ۰/۶۴ (حاصل ۰/۸ به توان دو) و برای فاصله نه سال (سال اول با دهم) به حدود ۰/۱۳ (حاصل ۰/۸ به توان نه) تقلیل یابد. شرط لازم برای استفاده از ساختار استاندارد $AR(1)$ ، برقراری فرض همگنی واریانس^۱ است؛ بدین معنا که واریانس عملکرد در تمام سال‌های آزمایش ثابت (مثلاً برابر با ۲ تن در هکتار) فرض می‌شود (Gomez and Gomez, 1984).

با این حال، واقعیت‌های زراعی همواره با این فرض سازگار نیستند. نوسانات شدید اقلیمی در آزمایش‌های بلندمدت، اغلب منجر به نقض فرض همگنی و ایجاد واریانس‌های متفاوت در سال‌های مختلف می‌شود. در چنین شرایطی، ساختار خودهمبسته ناهمگن^۲ ($ARH(1)$) راهکاری واقع‌بینانه‌تر ارائه می‌دهد. در همان مثال آفتابگردان، اگر وقوع خشکسالی در سال‌های دوم و پنجم منجر به افزایش پراکندگی داده‌ها شود (مثلاً واریانس در این سال‌ها به ترتیب به ۳/۵ و ۴/۵ تن در هکتار برسد، در حالی که سال‌های نرمال واریانس ۲ تن دارند)، مدل $AR(1)$ کارایی خود را از دست می‌دهد. در مقابل، ساختار $ARH(1)$ ضمن حفظ الگوی کاهش نمایی همبستگی، با تعریف پارامترهای مجزا برای واریانس هر سال، انعطاف‌پذیری لازم برای مدل‌سازی این ناهمگنی را فراهم می‌آورد (Wolfinger, 1996). این رویکرد به‌ویژه در مواجهه با رویدادهای حدی اقلیمی

1. Homogeneity of variance

2. Autoregressive Heterogeneous ($ARH(1)$)

که همزمان بر میانگین و پراکندگی عملکرد اثر می‌گذارند، ضروری است. انتخاب نهایی میان این دو ساختار (و سایر ساختارها) باید بر مبنای قضاوت آماری دقیق با استفاده از معیارهای اطلاعاتی نظیر آکائیک (AIC) و بیزی^۱ (BIC) و همچنین بررسی مفروضات (مانند آزمون لون^۲ برای همگنی واریانس) صورت پذیرد تا از صحت و دقت برآورد اثرات تیمار و تعاملات اطمینان حاصل گردد (رحیمی و محمدی، ۱۳۹۸).

• **ساختارهای ناهمگن^۳**، دسته دوم از الگوهای کوواریانس، ساختارهای ناهمگن هستند که به شرایطی اطلاق می‌شوند که در آن واریانس داده‌ها در سطوح زمانی مختلف یکسان نیست (برای مثال، واریانس اندازه‌گیری‌ها در سال‌های مختلف یک آزمایش بلندمدت تفاوت فاحش دارد). این ساختارها برای مدل‌سازی داده‌هایی که تغییرپذیری نامنظمی دارند، ضروری هستند و خود به دو زیرگروه اصلی تقسیم می‌شوند (Carey and Wang, 2001). نخستین و منعطف‌ترین نوع، ساختار نامنظم^۴ (UN) است. این مدل هیچ پیش‌فرضی درباره داده‌ها ندارد و اجازه می‌دهد هم واریانس‌ها در سال‌های مختلف متفاوت باشند و هم همبستگی بین سال‌ها متغیر و بدون الگوی خاصی باشد (Wolfinger, 1996). برای درک این وضعیت، یک آزمایش پنج‌ساله بررسی تأثیر تیمارهای کودی بر عملکرد کنگد را در نظر بگیرید. اگر واریانس عملکرد در سال‌های مختلف کاملاً متفاوت باشد (مثلاً سال اول کم، سال دوم بسیار زیاد و سال سوم متوسط) و همبستگی بین سال‌ها نیز از هیچ نظم مشخصی پیروی نکند (مثلاً همبستگی سال اول با دوم ۰/۳، اما با سال سوم ۰/۸ باشد)، استفاده از ساختارهای معمول منجر به خطای برآورد می‌شود. در این حالت، ساختار UN با برآورد پارامتر جداگانه برای هر واریانس و کوواریانس، به‌طور کامل و

-
1. Bayesian Information Criterion (BIC)
 2. Levene's test
 3. Heterogeneous
 4. Unstructured (UN)

انعطاف‌پذیر این ناهمگنی و بی‌نظمی را مدل‌سازی می‌کند. البته هزینه این انعطاف‌پذیری، نیاز به تعداد زیاد پارامتر و حجم نمونه بالاست (Verbyla et al., 1999).

دومین نوع، ساختار تقارن مرکب ناهمگن^۱ (CSH) است که حالتی بینابینی دارد. این مدل فرض می‌کند که اگرچه واریانس‌ها در هر سال متفاوت هستند، اما همبستگی بین هر دو جفت سال ثابت است (Yang, 2008). برای مثال، در یک آزمایش چهار ساله روی کلزا، ممکن است نوسانات اقلیمی باعث شود واریانس عملکرد در هر سال متفاوت باشد (سال اول با اقلیم پایدار دارای واریانس پایین، اما سال‌های دوم و سوم با خشکسالی یا بارندگی شدید دارای واریانس بالا باشند). با این حال، درجه وابستگی عملکرد بین سال‌ها (ضریب همبستگی) ممکن است ثابت و مثلاً همیشه برابر با ۰/۵ باشد. در چنین شرایطی، ساختار CSH با مدل‌سازی ناهمگنی واریانس‌ها ضمن حفظ ثبات همبستگی، تخمینی دقیق‌تر و با صرفه جویی در تعداد پارامترها (نسبت به UN) ارائه می‌دهد.

۴-۱-۲. مطالعه موردی محاسباتی: مقایسه رویکرد سنتی و مدرن در تحلیل داده‌های تکرارشونده

برای درک عمیق تفاوت میان روش‌های سنتی (مانند طرح کرت‌های خردشده در زمان) و رویکرد پیشرفته مدل‌سازی ساختار همبستگی، یک آزمایش فرضی بلندمدت را شبیه‌سازی و بررسی می‌کنیم. در این سناریو، اثر سه سامانه خاک‌ورزی (متداول (Conv)، کم‌خاک‌ورزی (Low) و بی‌خاک‌ورزی (NT)) بر درصد کربن آلی خاک (SOC) طی یک دوره ۶ ساله در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی ارزیابی شده است. به منظور اطمینان از کفایت آماری برای آزمون ساختارهای پیچیده همبستگی (مانند ساختار نامنظم)، داده‌ها برای ۱۰ بلوک آزمایشی (تکرار) شبیه‌سازی شده‌اند. در این آزمایش، اندازه‌گیری‌ها هر سال بر روی همان کرت‌های ثابت تکرار شده‌اند که منجر به ایجاد وابستگی زمانی (همبستگی سریالی) در داده‌ها می‌شود. هدف اصلی، مقایسه نتایج حاصل

1. Compound symmetry heterogeneous (CSH)

از تحلیل واریانس سنتی (که فرض استقلال خطاها را دارد) با تحلیل مدل‌های آمیخته (که ساختارهای همبستگی واقعی را مدل می‌کنند) و همچنین انتخاب بهترین ساختار کوواریانس از میان گزینه‌های رایج (CS, AR1, ARH1, CSH, UN) است. در ادامه، دستورات SAS جهت تحلیل این آزمایش فرضی ارائه شده است.

```
DATA tillage_soc;
  ARRAY M_Conv[6] _TEMPORARY_ (0.80 0.78 0.75 0.72 0.70
0.68);
  ARRAY M_Low[6] _TEMPORARY_ (0.85 0.88 0.92 0.95 0.98
1.02);
  ARRAY M_NT[6] _TEMPORARY_ (0.90 0.95 1.05 1.15 1.25 1.35);
  DO Block = 1 TO 10;
    Tillage = 'Conv';
    DO Year = 1 TO 6;
      SOC = M_Conv[Year] + RANNOR(123)*0.03 + (Block*0.005);
      OUTPUT;
    END;
    Tillage = 'Low ';
    DO Year = 1 TO 6;
      SOC = M_Low[Year] + RANNOR(123)*0.04 + (Block*0.005);
      OUTPUT;
    END;
    Tillage = 'NT ';
    DO Year = 1 TO 6;
      SOC = M_NT[Year] + RANNOR(123)*0.05 + (Block*0.005);
      OUTPUT;
    END;
  END;
RUN;
PROC SORT DATA=tillage_soc;
  BY Block Tillage Year;
RUN;
PROC GLM DATA=tillage_soc;
  CLASS Block Tillage Year;
  MODEL SOC = Block Tillage Block*Tillage Year Tillage*Year;
  TEST H=Tillage E=Block*Tillage;
  TITLE 'Phase 1: Traditional Split-Plot (GLM)';
RUN;
```

```

QUIT;
PROC MIXED DATA=tillage_soc METHOD=REML;
  CLASS Block Tillage Year;
  MODEL SOC = Tillage Year Tillage*Year / DDFM=KR;
  RANDOM Block;
  REPEATED Year / SUBJECT=Block*Tillage TYPE=CS R;
  TITLE 'Phase 2 - Model 1: Compound Symmetry (CS)';
RUN;
PROC MIXED DATA=tillage_soc METHOD=REML;
  CLASS Block Tillage Year;
  MODEL SOC = Tillage Year Tillage*Year / DDFM=KR;
  RANDOM Block;
  REPEATED Year / SUBJECT=Block*Tillage TYPE=AR(1) R;
  TITLE 'Phase 2 - Model 2: Autoregressive (AR1)';
RUN;
PROC MIXED DATA=tillage_soc METHOD=REML;
  CLASS Block Tillage Year;
  MODEL SOC = Tillage Year Tillage*Year / DDFM=KR;
  RANDOM Block;
  REPEATED Year / SUBJECT=Block*Tillage TYPE=ARH(1) R;
  TITLE 'Phase 2 - Model 3: Heterogeneous AR (ARH1)';
RUN;
PROC MIXED DATA=tillage_soc METHOD=REML;
  CLASS Block Tillage Year;
  MODEL SOC = Tillage Year Tillage*Year / DDFM=KR;
  RANDOM Block;
  REPEATED Year / SUBJECT=Block*Tillage TYPE=CSH R;
  TITLE 'Phase 2 - Model 4: Heterogeneous CS (CSH)';
RUN;
PROC MIXED DATA=tillage_soc METHOD=REML MAXITER=100
SCORING=5;
  CLASS Block Tillage Year;
  MODEL SOC = Tillage Year Tillage*Year / DDFM=KR;
  RANDOM Block;
  REPEATED Year / SUBJECT=Block*Tillage TYPE=UN R;
  TITLE 'Phase 2 - Model 5: Unstructured (UN)';
RUN;

```

در دستور فوق، به منظور مدیریت بهینه حجم داده‌ها در متن و تضمین همگرایی مدل‌های پیچیده آماری، از تکنیک تولید داده در محیط SAS استفاده شده است. در گام

نخست (DATA)، با استفاده از حلقه‌های تکرار (DO Loop) و توابع تصادفی (RANNOR)، داده‌های فرضی برای ۱۰ بلوک آزمایشی (مجموعاً ۱۸۰ مشاهده) شبیه‌سازی شده‌اند تا مدل دارای درجات آزادی کافی برای برآورد ماتریس‌های کوواریانس بزرگ باشد. پس از مرتب‌سازی ضروری داده‌ها با PROC SORT، تحلیل در دو فاز مجزا اجرا می‌شود: فاز اول شامل اجرای رویکرد سنتی با استفاده از رویه PROC GLM است که در آن اثرات زمان و مکان به صورت کلاسیک و با فرض همگنی همبستگی آزمون می‌شوند. فاز دوم، قلب تحلیل مدرن را تشکیل می‌دهد که در آن با فراخوانی مکرر رویه PROC MIXED و تغییر گزینه TYPE= در دستور REPEATED، پنج ساختار همبستگی متفاوت (شامل تقارن مرکب (CS)، خودهمبسته (AR1)، خودهمبسته ناهمگن (ARH(1))، تقارن مرکب ناهمگن (CSH) و نامنظم (UN)) بر روی داده‌ها برازش داده می‌شوند. استفاده از گزینه‌های METHOD=REML برای برآورد دقیق اجزای واریانس و DDFM=KR (روش کنوارد-راجر^۱) برای اصلاح درجات آزادی، تضمین‌کننده دقت آزمون‌ها در شرایط عدم تعادل احتمالی و حجم نمونه محدود است. این طراحی کدنویسی اجازه می‌دهد تا ضمن مقایسه نتایج روش سنتی و مدرن، با استفاده از معیارهای برازش نظیر AIC، مناسب‌ترین ساختار کوواریانس برای تفسیر داده‌های انتخاب شود.

نتایج حاصل از مقایسه پنج ساختار همبستگی در جدول ۴-۳۲، منطق و قدرت رویکرد مدل‌سازی ساختار همبستگی را به نمایش می‌گذارد. پس از اجرای کد، نرم‌افزار SAS در پنجره خروجی جدولی به نام Fit Statistics (آماره‌های برازش) را نمایش می‌دهد. برای انتخاب مدل بهینه، از دو معیار کلیدی AIC و BIC که در این جدول ارائه می‌شوند،

1. Kenward-Roger method (KR)

روشی برای تعدیل درجات آزادی و خطای استاندارد در مدل‌های آمیخته که به‌ویژه در آزمایش‌های با حجم نمونه کم، داده‌های نامتعادل یا ساختارهای همبستگی پیچیده، دقت آزمون‌ها را افزایش داده و از بروز خطای نوع اول (معنی‌داری کاذب) جلوگیری می‌کند (Kenward and Roger, 1997).

استفاده می‌گردد. قاعده انتخاب بر این اصل استوار است که مدلی که دارای کمترین مقدار AIC و BIC باشد، بهترین توازن را بین پیچیدگی مدل (تعداد پارامترها) و کیفیت برازش آن بر داده‌ها برقرار کرده و به عنوان مدل نهایی تحلیل انتخاب می‌شود. جدول ۴-۳۲ نشان می‌دهد که بر اساس معیار اطلاعات آکائیک (AIC)، مدل تقارن مرکب (CS) با مقدار $555/3$ - به عنوان بهترین مدل انتخاب شد و مدل خودهمبسته (AR1) با اختلاف اندکی ($553/9 = AIC$) در رتبه دوم قرار گرفت. در مقابل، مدل نامنظم (UN) با وجود انعطاف‌پذیری بالا، به دلیل تعداد زیاد پارامترهای برآوردی (۲۲ پارامتر) و جریمه سنگین آماری ناشی از آن، بدترین برازش را نشان داد ($539/8 = AIC$). به عبارت دیگر پیچیده‌تر بودن مدل لزوماً به معنای بهتر بودن آن نیست. در این مطالعه خاص، ساختار داده‌ها به گونه‌ای بود که الگوی همبستگی ساده برای تبیین آن کفایت می‌کرد. این اتفاق در داده‌های شبیه‌سازی شده (که با توزیع نرمال و تصادفی تولید می‌شوند) طبیعی است، زیرا داده‌ها ذاتاً ساختار ساده‌ای دارند.

تفاوت کلیدی رویکرد مدرن با روش سنتی در اینجاست که در روش سنتی (GLM)، فرض تقارن مرکب به صورت پیش‌فرض و بدون آزمون بر داده‌ها تحمیل می‌شود؛ اما در روش مدرن (MIXED)، پژوهشگر با آزمون ساختارهای متنوع، به صورت علمی و مستند به این نتیجه می‌رسد که کدام ساختار برای داده‌های او مناسب است. علاوه بر این، استفاده از درجات آزادی اصلاح‌شده (روش کنوارد-راجر) در این تحلیل، اطمینان از صحت این استنتاج‌ها را در مقایسه با روش‌های کلاسیک افزایش می‌دهد. نکته سوم و بسیار حیاتی، مدیریت داده‌های گمشده است. شایان ذکر است که تمام این تحلیل‌ها با وجود مشاهده گمشده در مجموعه داده‌ها نیز به درستی با رویه PROC MIXED انجام می‌شود. رویه PROC MIXED برخلاف PROC GLM به طور خودکار داده‌های گمشده را با استفاده از روش حداکثر درستنمایی محدودشده^۱ (REML) مدیریت کرده و از تمام اطلاعات

1. Restricted maximum likelihood (REML)

موجود در سایر مشاهدات آن پلات بهره می‌برد. اگر داده‌ها دارای همبستگی سریالی شدید بودند، که در داده‌های واقعی آزمایش‌های بلند مدت متداول است، قطعاً مدل‌هایی دیگر نظیر AR1، ARH(1) یا UN انتخاب می‌شدند. نهایتاً بر اساس مدل منتخب، نتایج جدول ۴-۳۳ نشان می‌دهد که اثرات اصلی خاک‌ورزی، زمان و به‌ویژه اثر متقابل زمان × خاک‌ورزی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند. معنی‌داری اثر متقابل بیانگر آن است که روند تغییرات کربن آلی در طول زمان در سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی (متداول، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی) یکسان نبوده و مدیریت‌های حفاظتی در سال‌های انتهایی تأثیر متفاوتی نسبت به سال‌های ابتدایی داشته‌اند.

جدول ۴-۳۲. مقایسه معیارهای برازش برای انتخاب بهترین ساختار همبستگی

در تحلیل داده‌های کربن آلی خاک

وضعیت انتخاب	AIC	تعداد پارامتر	مدل
بهترین برازش	-۵۵۵/۳	۳	CS
مناسب (رتبه دوم)	-۵۵۳/۹	۳	AR1
ضعیف	-۵۴۹/۲	۸	(CS
ضعیف	-۵۴۷/۹	۸	ARH(1)
ضعیف‌ترین	-۵۳۹/۸	۲۲	UN

در معیار AIC، مقادیر کوچک‌تر (منفی‌تر) نشان‌دهنده برازش بهتر مدل هستند. مدل‌های پیچیده (مانند UN) به دلیل جریمه شدن بابت تعداد زیاد پارامترها، در رتبه‌های پایین‌تر نکویی برازش قرار گرفته‌اند.

جدول ۴-۳۳. آزمون اثرات ثابت بر اساس مدل منتخب (CS) برای صفت کربن آلی خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی صورت	درجه آزادی مخرج	آماره F
خاک‌ورزی (Tillage)	۲	۱۸	۲۳۴۹**
زمان (Year)	۵	۱۳۵	۹۸/۶**
خاک‌ورزی × زمان	۱۰	۱۳۵	۸۴/۵**

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد.

پس از انتخاب مدل بهینه (CS) و بررسی نتایج آزمون اثرات ثابت (جدول ۴-۳۳)، مشاهده می‌شود که اثر متقابل خاک‌ورزی × زمان از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. این معنی‌داری نشان می‌دهد که واکنش کربن آلی خاک به سامانه‌های خاک‌ورزی در طول زمان تغییر کرده و برای تفسیر نتایج، باید به تفکیک سال‌ها مقایسه میانگین انجام پذیرد. برای انجام این تحلیل تکمیلی (برش‌دهی اثر متقابل)، دستور LSMEANS را تنها بر روی مدل منتخب (CS) اعمال می‌کنیم. این رویکرد تضمین می‌کند که مقایسه‌های میانگین با استفاده از دقیق‌ترین تخمین‌های واریانس و همبستگی موجود انجام شده‌اند. دستور SAS ارائه‌شده در ادامه، این تحلیل آماری را پیاده‌سازی می‌نماید.

```
PROC MIXED DATA=tillage_soc METHOD=REML;
  CLASS Block Tillage Year;
  MODEL SOC = Tillage Year Tillage*Year / DDFM=KR;
  RANDOM Block;
  REPEATED Year / SUBJECT=Block*Tillage TYPE=CS;
  LSMEANS Tillage*Year / SLICE=Year DIFF ADJUST=TUKEY;
  RUN;
```

نکته کلیدی در دستور فوق، افزودن خط فرمان LSMEANS با گزینه SLICE=Year است. این گزینه به نرم‌افزار فرمان می‌دهد که به جای مقایسه کلی، اثر تیمار خاک‌ورزی را به تفکیک در هر یک از ۶ سال آزمایش (برش‌دهی زمانی) آزمون کند. همچنین از گزینه DIFF برای انجام مقایسه‌های جفتی میانگین‌ها و گزینه ADJUST=TUKEY برای کنترل خطای نوع اول در مقایسه‌های چندگانه استفاده شده است تا از صحت آماری استنتاج‌ها در این تحلیل ریزینانه اطمینان حاصل شود. توجه شود که این دستور فرض می‌کند که مجموعه داده tillage_soc (شامل ۱۰ بلوک) قبلاً در حافظه نرم‌افزار بارگذاری شده است. بنابراین نیازی به وارد کردن مجدد داده‌ها نیست و صرفاً بخش تحلیل اجرا می‌شود.

نتایج این قسمت از تحلیل در جداول ۴-۳۴ و ۴-۳۵ ارائه شده است. آزمون برش‌دهی (جدول ۴-۳۴) تصویر شفاف‌تری از دینامیک زمانی سیستم ارائه می‌دهد. اگرچه اثر تیمار در تمام سال‌ها معنی‌دار گزارش شده است، اما نکته کلیدی در روند تغییرات آماره F نهفته است. مقدار این آماره از ۲۵/۴۳ در سال اول به عدد خیره‌کننده ۸۱۸/۵۶ در سال ششم جهش یافته است. این افزایش ۳۲ برابری نشان‌دهنده آن است که با گذشت زمان، صفات تیمارهای مختلف به شدت از هم فاصله گرفته و واگرا شده‌اند. بررسی دقیق‌تر در جدول مقایسه میانگین (۴-۳۵) نشان می‌دهد که حتی در سال نخست، تفاوت‌های جزئی اما معنی‌داری بین سامانه‌ها وجود داشته است (اختلاف ۰/۰۴ تا ۰/۱۱ واحد). اما در سال ششم، این شکاف‌ها عمیق‌تر شده‌اند؛ به طوری که اختلاف عملکرد کربن بین تیمار متداول و بی‌خاک‌ورزی از ۰/۱۱ واحد در سال اول به ۰/۶۴ واحد در سال آخر افزایش یافته است. این یافته اثبات می‌کند که پتانسیل واقعی سیستم‌های حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی) در ترسیب کربن، ماهیتی تجمعی و فزاینده دارد و تحلیل‌های بلندمدت با مدل‌سازی صحیح ساختار همبستگی، برای آشکارسازی این مزیت رقابتی ضروری است.

جدول ۴-۳۴. آزمون برش‌دهی اثر متقابل برای بررسی روند زمانی تفاوت بین سامانه‌های خاک‌ورزی

برش زمانی	درجه آزادی صورت	درجه آزادی مخرج	آماره F
سال ۱	۲	۱۵۳	۲۵/۴۳**
سال ۲	۲	۱۵۳	۵۶/۵۴**
سال ۳	۲	۱۵۳	۱۴۵/۹۱**
سال ۴	۲	۱۵۳	۳۲۶/۶۲**
سال ۵	۲	۱۵۳	۶۰۱/۷۴**
سال ۶	۲	۱۵۳	۸۱۸/۵۶**

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد.

جدول ۴-۳۵. مقایسه میانگین جفتی (تعدیل شده با روش توکی)

بین تیمارها در سال اول و سال آخر آزمایش

سال	مقایسه جفتی (تیمارها)	اختلاف میانگین	خطای استاندارد
سال ۱	متداول در مقابل کم خاک‌ورزی	$-۰/۰۴^{**}$	۰/۰۱۶
	متداول در مقابل بی خاک‌ورزی	$-۰/۱۱^{**}$	۰/۰۱۶
	کم خاک‌ورزی در مقابل بی خاک‌ورزی	$-۰/۰۷^{**}$	۰/۰۱۶
سال ۶	متداول در مقابل کم خاک‌ورزی	$-۰/۳۳^{**}$	۰/۰۱۶
	متداول در مقابل بی خاک‌ورزی	$-۰/۶۴^{**}$	۰/۰۱۶
	کم خاک‌ورزی در مقابل بی خاک‌ورزی	$-۰/۳۰^{**}$	۰/۰۱۶

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد.

۴-۱۰-۵. تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت با طراحی پلکانی

رویکرد تحلیلی که در مطالعه موردی پیشین (طراحی استاندارد) تشریح گردید، مختص شرایطی است که تمامی تیمارهای آزمایشی به صورت همزمان و در سال اول شروع می‌شوند. اگرچه این شیوه در پژوهش‌های زراعی بسیار متداول است، اما همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، دارای یک محدودیت ذاتی و ساختاری است. در این طرح‌ها، اثرات ثابت زمان (مدت سپری‌شده از شروع آزمایش یا سن سیستم) با اثرات تصادفی سال (شرایط محیطی و تقویمی خاص هر سال) به طور کامل در هم آمیخته می‌شوند. برای غلبه بر این چالش، طراحی پلکانی به عنوان راهکاری آماری برای تفکیک دقیق این دو اثر از یکدیگر پیشنهاد شده است (Loughin, 2006). با این وجود، تحلیل آماری این نوع طراحی به مراتب پیچیده‌تر از طرح‌های استاندارد است، چرا که با شروع تیمارها در سال‌های مختلف، ساختار اثرات تصادفی مدل کاملاً متفاوت، نامتعادل و چندلایه می‌گردد. در تحقیقات نظام‌های زراعی مبتنی بر این طراحی، شناسایی و تعریف صحیح این اثرات تصادفی برای دستیابی به برآوردهای نارایب و دقیق، از اهمیت حیاتی برخوردار است. دامنه اثرات تصادفی بالقوه در این مدل‌ها بسیار گسترده است و می‌تواند طیف وسیعی از منابع تغییرات شامل تکرار، سال تقویمی، تکرار در سال، تکرار در تیمار، سال

در تیمار، و حتی برهم‌کنش‌های پیچیده‌تر این عوامل با یکدیگر و با اثرات ثابت در طول زمان را در بر گیرد (Piepho et al., 2003).

در این مدل‌های پیشرفته آمیخته، مفهوم جمله خطا^۱ از حالت ساده کلاسیک خارج می‌شود. برای آزمون معنی‌داری هر اثر ثابت، باید یک جمله خطای اختصاصی از ترکیب اثرات تصادفی متعدد ساخته شود؛ فرآیندی که شباهت زیادی به ایجاد ساختار تحلیل واریانس در طرح‌های کرت‌های خردشده یا نواری دارد (Gomez and Gomez, 1984). برای نمونه، در یک طراحی پلکانی، اثر تصادفی تکرار در تیمار به عنوان تنها اثری که در همان واحد آزمایشی اثر ثابت تیمار اندازه‌گیری می‌شود، نقش جمله خطای صحیح را برای آزمون آن اثر ثابت ایفا می‌کند. در مقابل، خطای آزمایش برای آزمون اثر ثابت زمان (سن)، از ترکیب پیچیده‌تری شامل اثراتی نظیر تکرار در سال، تکرار در زمان و سال در زمان حاصل می‌شود (Roy et al., 2007). این رویکرد سیستماتیک در شناسایی و تفکیک ساختار خطاها، تضمین‌کننده صحت تحلیل‌های آماری در پژوهش‌های بلندمدت زراعی است و اجرای موفقیت‌آمیز آن، نیازمند درک عمیق پژوهشگر از مبانی نظری مدل‌های آمیخته می‌باشد.

برای درک عملیاتی ضرورت و کارکرد طراحی پلکانی در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، یک آزمایش فرضی در خصوص ارزیابی پایداری کشت یونجه را در نظر بگیرید. فرض می‌شود پژوهشگری قصد دارد روند زوال عملکرد و پایداری تولید یونجه را در دو سامانه مدیریتی کم‌نهاد و متداول در طول یک دوره بهره‌برداری پنج‌ساله مقایسه کند. چالش اصلی در طرح‌های استاندارد این است که اگر تمام کرت‌ها همزمان در سال اول کشت شوند، کاهش احتمالی عملکرد در سال سوم بهره‌برداری می‌تواند ناشی از پیری فیزیولوژیک بوته‌ها (اثر سن) و یا وقوع یک تنش خشکی در آن سال خاص (اثر سال تقویمی) باشد و تفکیک این دو عملاً غیرممکن است. برای حل این معضل، پژوهشگر از

یک طراحی با شروع پلکانی بهره می‌گیرد؛ بدین صورت که کاشت کرت‌های آزمایشی را در سه سال متوالی (به طور فرض سال‌های ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) آغاز می‌کند. این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار طراحی شده است و در هر سری کاشت، هر دو تیمار مدیریتی اعمال می‌گردند. در نهایت، داده‌های عملکرد علوفه خشک طی یک دوره زمانی ۷ ساله (از ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۱) جمع‌آوری می‌شوند. هدف نهایی این تحلیل پیچیده، استفاده از مدل‌های آمیخته برای تفکیک دقیق سهم مدیریت، سن گیاه و شرایط اقلیمی سال در تعیین عملکرد و پاسخ به این پرسش کلیدی است که آیا سامانه کم‌نهاد می‌تواند در سال‌های پایانی عمر یونجه‌زار، پایداری عملکرد بهتری نسبت به سامانه رایج داشته باشد یا خیر. در ادامه، دستور تجزیه و تحلیل این آزمایش در نرم‌افزار SAS با استفاده از داده‌های فرضی ارائه شده است.

```
DATA alfalfa_staggered;
  ARRAY Yield_Conv[5] _TEMPORARY_ (12.5 14.0 11.5 9.0 7.5);
  ARRAY Yield_Low[5] _TEMPORARY_ (11.0 12.5 11.0 9.8 9.2);
  DO Start_Year = 1 TO 3;
    DO Block = 1 TO 4;
      System = 'Conv';
      DO Age = 1 TO 5;
        Cal_Year = Start_Year + Age - 1;
        Year_Effect = 0;
        IF Cal_Year = 3 OR Cal_Year = 5 THEN Year_Effect = -2.0;
        Yield = Yield_Conv[Age] + Year_Effect +
RANNOR(123)*0.5;
        OUTPUT;
      END;
      System = 'Low';
      DO Age = 1 TO 5;
        Cal_Year = Start_Year + Age - 1;
        Year_Effect = 0;
        IF Cal_Year = 3 OR Cal_Year = 5 THEN Year_Effect = -1.5; /*
        Yield = Yield_Low[Age] + Year_Effect +
RANNOR(123)*0.4;
        OUTPUT;
```

*/ مقاومت بهتر

```

END;
END;
END;
RUN;
PROC MIXED DATA=alfalfa_staggered METHOD=REML;
  CLASS Start_Year Block System Age Cal_Year;
  MODEL Yield = System Age System*Age / DDFM=KR;
  RANDOM Start_Year Cal_Year Block(Start_Year);
  REPEATED Age / SUBJECT=Start_Year*Block*System
TYPE=AR(1) R;
  LSMEANS System*Age / SLICE=Age DIFF ADJUST=TUKEY;
  TITLE 'Staggered Design Analysis: Separating Age and Year
Effects';
RUN;

```

در دستور ارائه شده، ساختاردهی داده‌ها و مدل‌سازی آماری به گونه‌ای تنظیم شده است که چالش اصلی آزمایش‌های بلندمدت، یعنی تداخل اثرات تقویمی و فیزیولوژیک، مرتفع گردد. در گام نخست (DATA Step)، داده‌های آزمایش بر اساس سه مؤلفه زمانی کلیدی تعریف می‌شوند. ۱) سال شروع (Start_Year) که نشان‌دهنده سری‌های مختلف کاشت است، ۲) سن گیاه (Age) که بیانگر مدت زمان سپری‌شده از کشت و روند زوال فیزیولوژیک است و ۳) سال تقویمی (Cal_Year) که از رابطه جبری حاصل جمع سال شروع و سن منهای یک به دست می‌آید و نماینده شرایط محیطی خاص هر سال است. در رویه تحلیل مدل‌های آمیخته (PROC MIXED)، تفکیک این اثرات در دو بخش مدل صورت می‌پذیرد، بدین ترتیب که متغیر Age به همراه تیمار (System) و اثر متقابل آن‌ها در بخش مدل ثابت (MODEL) قرار می‌گیرند تا پژوهشگر بتواند روند تغییرات عملکرد ناشی از مدیریت و سن را آزمون کند. در مقابل، متغیرهای Start_Year (برای کنترل اثر سری‌ها) و Cal_Year (برای جذب نوسانات تصادفی اقلیمی مانند خشکسالی یا ترسالی) در بخش مدل تصادفی (RANDOM) وارد می‌شوند؛ این اقدام تکنیکی باعث می‌شود که واریانس ناشی از شرایط محیطی سالانه از خطای آزمایش حذف شده و برآورد خالص تری از اثر سن به دست آید. همچنین، ساختار آشیانه‌ای Block(Start_Year) به درستی سلسله‌مراتب نمونه‌برداری را تعریف می‌کند، زیرا هر بلوک مختص یک سال

شروع خاص است. در نهایت، دستور REPEATED با تعریف دقیق واحد آزمایشی (ترکیب سال شروع، بلوک و سیستم) و استفاده از ساختار همبستگی مناسب (مانند AR1)، وابستگی سریالی داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی یک کرت ثابت در طول زمان را مدل‌سازی می‌نماید تا اعتبار آزمون‌های آماری تضمین گردد.

خلاصه نتایج این آزمایش فرضی در جدول‌های ۴-۳۶، ۴-۳۷ و ۴-۳۸ ارایه شده است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس مدل آمیخته (جدول ۴-۳۶) قدرت طراحی پلکانی را در کالبدشکافی منابع خطا آشکار می‌سازد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سال تقویمی (Cal_Year) به تنهایی مسئول حدود ۷۹ درصد از واریانس تصادفی مدل بوده است. این عدد بزرگ نشان می‌دهد که نوسانات اقلیمی (مانند خشکسالی‌های رخ داده در سال‌های خاص) تأثیر شدیدی بر عملکرد داشته‌اند. در یک طرح استاندارد معمولی، این واریانس عظیم با اثر سن مخلوط می‌شد و پژوهشگر به اشتباه تصور می‌کرد که افت عملکرد ناشی از پیری گیاه است؛ اما در طراحی پلکانی، این اثر به عنوان یک مولفه تصادفی جداگانه شناسایی و از خطای آزمایش حذف شده است. نتیجه این تفکیک هوشمندانه در جدول اثرات ثابت (۴-۳۷) مشهود است، جایی که اثر خالص سن با آماره F بسیار بزرگ (۲۲۸/۶۹) معنی‌دار شده است. همچنین معنی‌داری بسیار قوی اثر متقابل سیستم $\times$ سن نشان می‌دهد که الگوی پیری در دو سامانه مدیریتی کاملاً متفاوت است. جزئیات این تفاوت در جدول مقایسه میانگین (۴-۳۸) ارایه شده است. سیستم متداول در سال‌های اول و دوم (دوره جوانی) با اختلاف معنی‌دار ۱/۵ تا ۱/۷ واحد عملکرد بالاتری داشته است. اما با عبور از سال سوم (نقطه چرخش)، شرایط تغییر می‌کند؛ به طوری که در سال پنجم، سیستم متداول دچار افت شدید شده و عملکرد آن ۲/۰۵ واحد کمتر از سیستم کم‌نهاده می‌شود. این یافته ارزشمند که نشان‌دهنده پایداری اکولوژیک سیستم‌های کم‌نهاده در درازمدت است، تنها به لطف حذف نویزهای محیطی توسط طراحی پلکانی و مدل‌سازی صحیح ساختار خطا قابل استناد و اثبات بوده است.

جدول ۴-۳۶. برآورد اجزای واریانس در مدل آمیخته طراحی پلکانی برای عملکرد یونجه

منبع تغییرات (اثر تصادفی)	پارامتر کوواریانس	مقدار برآورد شده	خطای استاندارد	سهم از کل واریانس
سال تقویمی (Cal_Year)	Var(Year)	۰/۷۴۹۳	۰/۵۰۱۲	۷۹ درصد
سال شروع (Start_Year)	Var(Start)	۰/۰	-	۰ درصد
باقیمانده (Residual)	Var(Res)	۰/۱۸۱۳	۰/۰۲۵۸	۱۹ درصد

سهم بالای واریانس سال تقویمی (۷۹ درصد) نشان می‌دهد که عمده نوسانات غیرمنتظره داده‌ها ناشی از شرایط محیطی سالانه بوده است که در این مدل به درستی جذب و کنترل شده است.

جدول ۴-۳۷. آزمون اثرات ثابت برای بررسی تأثیر سیستم و سن بر عملکرد

منبع تغییرات	درجه آزادی صورت	درجه آزادی مخرج	آماره F
سیستم (System)	۱	۵۱/۷	۱/۴۸ns
سن یونجه (Age)	۴	۷۶/۵	۲۲۸/۶۹**
سیستم × سن	۴	۷۳/۹	۱۱۸/۹۴**

ns بدون اثر معنی‌دار. ** معنی‌دار در سطح پنج درصد.

جدول ۴-۳۸. مقایسه میانگین عملکرد (تفاضل تیمار متداول از تیمار کم‌نهاده)

در سنین مختلف بهره‌برداری

سن یونجه‌زار	اختلاف عملکرد	خطای استاندارد	تفسیر
۱ سالگی	+۱/۵۵**	۰/۱۷	برتری سیستم متداول در استقرار
۲ سالگی	+۱/۷۱**	۰/۱۷	اوج تولید سیستم متداول
۳ سالگی	+۰/۳۴ns	۰/۱۷	نقطه توازن دو سیستم
۴ سالگی	-۱/۱۶**	۰/۱۷	افت شدید متداول، پایداری کم‌نهاده
۵ سالگی	-۲/۰۵**	۰/۱۷	برتری کامل سیستم کم‌نهاده

ns بدون اثر معنی‌دار. ** معنی‌دار در سطح پنج درصد.

۴-۱۰-۶. تفکیک اثرات ثابت و تصادفی در طراحی استاندارد با استفاده از فرضیات تکمیلی

اگرچه طراحی پلکانی راهکار ایده‌آلی برای تفکیک اثرات سن آزمایش (زمان) و سال تقویمی محسوب می‌شود، اما واقعیت اجرایی پژوهش‌های زراعی نشان می‌دهد که اکثر پژوهشگران به دلیل محدودیت‌های هزینه و زمین، امکان اجرای چنین طرح پیچیده‌ای را ندارند و ناگزیر از همان طراحی استاندارد (شروع همزمان تیمارها) استفاده می‌کنند. این بخش دقیقاً به این پرسش کلیدی پاسخ می‌دهد که در غیاب طراحی فیزیکی پلکانی، چگونه می‌توان با استفاده از ریاضیات و فرضیات تکمیلی آماری، اثرات ناشی از گذر زمان (سن) را از نوسانات سال تقویمی تفکیک کرد؟ در آزمایش‌های بلندمدت با اندازه‌گیری‌های مکرر، ایجاد فرضیات تکمیلی و هدفمند درباره ماهیت اثرات ثابت و تصادفی، راهکاری مؤثر برای غلبه بر این محدودیت ساختاری است. دو نمونه از کاربردی‌ترین این فرضیات که برای اصلاح تجزیه و تحلیل داده‌ها با رویکرد مدل‌سازی ساختار همبستگی به کار می‌روند، عبارتند از فرض ساختار قانون‌مند (ثابت) برای زمان و فرض اثرات تصادفی برای سال (Roy et al., 2007). اعمال این فرضیات منجر به تغییراتی بنیادین در روش تجزیه و تحلیل داده‌ها شده و امکان مدل‌سازی مناسب همبستگی سریالی را فراهم می‌آورد (Littell, 1989; McRae and Ryan, 1996; Loughin et al., 2007).

رویکرد نخست، مبتنی بر مدل‌سازی روند تغییرات زمانی است. اگر بر اساس دانش و تجربه قبلی پیش‌بینی شود که میانگین‌های مرتبط با اثرات ثابت زمان از الگوی ریاضی خاصی پیروی می‌کنند، می‌توان این اطلاعات را وارد تحلیل کرد. ساده‌ترین و پرکاربردترین الگو، روند خطی است؛ هرچند در سیستم‌های زراعی پیچیده، مدل‌های غیرخطی نظیر چندجمله‌ای یا افت‌نمایی ممکن است برازش بهتری داشته باشند (Loughin, 2006). با فرض اینکه میانگین‌های هر تیمار از یک الگوی مشخص در طول زمان تبعیت می‌کنند، هرگونه انحراف داده‌ها از این الگو را می‌توان به عوامل تصادفی

(نظیر نوسانات سالانه) نسبت داد. در این روش، زمان به جای یک متغیر طبقه‌بندی‌شده، به عنوان یک متغیر عددی و پیوسته در نظر گرفته می‌شود (Piepho et al., 2003). این تغییر نگرش باعث می‌شود که ساختار جدول تجزیه واریانس دگرگون شده و مؤلفه‌های واریانس جدیدی مانند سال و سال در تیمار به عنوان اثرات تصادفی به مدل اضافه گردند (جدول ۴-۳۹) (Roy et al., 2007). نقطه قوت کلیدی این روش اصلاح‌شده در این است که اگر روند فرضی (مثلاً خطی) با واقعیت بیولوژیک داده‌ها تطابق داشته باشد، قدرت مدل در تفکیک اثرات ثابت (تیمار و روند سن) از اثرات تصادفی (سال) بسیار بالا خواهد بود. با این حال، پاشنه آشیل این روش آن است که اگر مدل فرضی نادرست انتخاب شود (مثلاً واقعیت درجه دو باشد اما خطی فرض شود)، نتایج فاقد اعتبار خواهند بود. چالش اصلی در اینجاست که اغلب هیچ آزمون آماری قطعی برای ارزیابی صحت مدل انتخابی پیش از تحلیل وجود ندارد و پژوهشگر باید بر دانش پیشین یا حدس‌های تجربی تکیه کند (Piepho et al., 2003).

رویکرد دوم برای تفکیک اثرات در داده‌های درازمدت، استفاده از متغیرهای کمکی^۱ برای تبیین اثرات تصادفی است. در تحقیقات نظام‌های زراعی، تغییرات محیطی نظیر شرایط اقلیمی را می‌توان تا حد زیادی از طریق اندازه‌گیری دقیق متغیرهای محیطی مدل‌سازی کرد. برای مثال، میزان بارندگی، شدت نور یا نوسانات جمعیت آفات می‌توانند به عنوان متغیرهای تصادفی مؤثر بر پاسخ تیمارها عمل کنند. فرض کنید متغیرهای تصادفی X_1 و X_2 ... به عنوان متغیرهای کمکی برای هر کرت در هر سال اندازه‌گیری شده‌اند (نکته مهم این است که این متغیرها نباید خودشان تحت تأثیر تیمار باشند). با وارد کردن این متغیرها و برهم‌کنش آن‌ها با تیمارها به عنوان اثرات ثابت در مدل، می‌توان تغییرات ناشی از محیط را جذب کرد (جدول ۴-۳۹). از دیدگاه نظری، اگر داده‌های محیطی کامل باشند، می‌توان تمام واریانس ناشی از اثر سال را توضیح داد و اثرات ثابت مرتبط با زمان و تعامل زمان $\times$ تیمار را به صورت خالص استخراج نمود (Loughin, 2006; Piepho et al., 2003).

(al., 2003). اما در عمل، چالش‌های اجرایی وجود دارد؛ نخست اینکه متغیرهای کمکی باید ترجیحاً برای تک‌تک واحدهای آزمایشی (کرت‌ها) اندازه‌گیری شوند، زیرا متغیرهای کلی (مثل بارندگی کل منطقه) که برای تمام کرت‌ها یکسان هستند، با اثرات ثابت مدل اشتباه گرفته می‌شوند. دوم اینکه همبستگی بالا بین متغیر کمکی و اثرات زمان (هم‌خطی) می‌تواند منجر به ناپایداری برآوردها شود (Roy et al., 2007).

در نهایت، باید اذعان داشت که اگرچه استفاده از فرضیات تکمیلی (چه مدل‌سازی روند و چه متغیرهای کمکی) راهگشاست، اما محدودیت‌هایی دارد. نمی‌توان تمام پاسخ‌های بیولوژیک را با روندهای ساده خطی توضیح داد و جمع‌آوری متغیرهای کمکی دقیق نیز همیشه مقدور نیست. با این وجود، می‌توان این دو رویکرد را به صورت ترکیبی به کار برد؛ یعنی هم روند تغییرات میانگین‌ها و هم متغیرهای کمکی محیطی را همزمان در یک مدل لحاظ کرد. اگرچه انتخاب نادرست ساختار کوواریانس همچنان می‌تواند ریسک‌زا باشد (Stroup et al., 2024)، اما در طراحی‌های استاندارد طولانی‌مدت، استفاده از این روش‌های اصلاحی قطعاً بر نادیده گرفتن ماهیت همبسته داده‌ها ارجحیت دارد و از استنباط‌های گمراه‌کننده جلوگیری می‌کند.

جدول ۴-۳۹. مقایسه تغییرات منابع تغییر و درجات آزادی در جدول تجزیه واریانس اندازه‌گیری‌های مکرر (طرح بلوک‌های کامل تصادفی) تحت سناریوهای مختلف تحلیلی

حالت ۱: روش کلاسیک (بدون فرضیات تکمیلی)		حالت ۲: با فرض روند تغییرات خطی (زمان پیوسته)		حالت ۳: با متغیرهای کمکی (X_1, X_2)	
منابع تغییر	درجه آزادی	منابع تغییر	درجه آزادی	منابع تغییر	درجه آزادی
بلوک	n-1	بلوک	n-1	بلوک	n-1
تیمار	t-1	تیمار	t-1	تیمار	t-1
خطای اصلی (بلوک × تیمار)	(n-1) (t-1)	خطای اصلی	(n-1) (t-1)	خطای اصلی	(n-1) (t-1)
زمان (دسته‌بندی)	r-1	زمان (رگرسیون)	1	زمان	r-1
زمان در تیمار	(r-1) (t-1)	زمان در تیمار	t-1	زمان در تیمار	(r-1) (t-1)

ادامه جدول ۴-۳۹

حالت ۱: روش کلاسیک (بدون فرضیات تکمیلی)		حالت ۲: با فرض روند تغییرات خطی (زمان پیوسته)		حالت ۳: با متغیرهای کمکی (X_1, X_2)	
منابع تغییر	درجه آزادی	منابع تغییر	درجه آزادی	منابع تغییر	درجه آزادی
خطای فرعی (باقیمانده)	$t(r-1)(n-1)$	اثر تصادفی سال	$r-2$	متغیر کمکی X_1	1
کل	$ntr-1$	اثر تصادفی سال× تیمار	$(r-2)(t-1)$	متغیر کمکی X_2	1
		خطای فرعی	$t(r-1)(n-1)$	X_1 در تیمار	$t-1$
		کل	$ntr-1$	X_2 در تیمار	$t-1$
				خطا	$t(r-1)-(n-1)$
				کل	$ntr-1$

برای ارزیابی عملی کارایی روش‌های مبتنی بر فرضیات تکمیلی در تفکیک اثرات، یک آزمایش فرضی بلندمدت (۱۰ ساله) را در نظر بگیرید که در آن تأثیر سه سطح کود نیتروژن (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) بر عملکرد دانه گندم در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار بررسی شده است. این آزمایش از نوع طراحی استاندارد است (شروع همزمان تیمارها) و بنابراین با چالش تداخل اثرات زمان و سال مواجه است. ویژگی‌های داده‌های شبیه‌سازی شده این آزمایش بدین صورت است که اولاً، یک روند خطی ملایم کاهش عملکرد در طول زمان (به دلیل تخلیه تدریجی عناصر ریز مغذی خاک) وجود دارد؛ ثانیاً، نوسانات مقدار آب قابل دسترس خاک (SWC) در هر واحد آزمایشی به عنوان یک عامل محیطی تصادفی، واریانس زیادی را در عملکرد سال‌های مختلف ایجاد کرده است. هدف این تحلیل، مقایسه سه رویکرد آماری ارائه شده در جدول ۴-۳۹ است که شامل (۱) رویکرد کلاسیک (بدون فرضیات تکمیلی)، (۲) رویکرد مبتنی بر فرض روند خطی زمان برای جذب تغییرات تدریجی و (۳) رویکرد مبتنی بر متغیر کمکی (استفاده از داده‌های آب قابل دسترس خاک در هر واحد آزمایشی)

برای تبیین نوسانات تصادفی محیطی، می‌باشد. با اجرای این سه مدل بر روی یک مجموعه داده واحد، می‌توان مشاهده کرد که چگونه انتخاب صحیح فرضیات تکمیلی منجر به کاهش خطای آزمایش و افزایش دقت برآورد اثرات تیمار می‌شود. در ادامه، دستور SAS برای تحلیل این آزمایش فرضی ارائه می‌شود.

```
DATA wheat_longterm;
  ARRAY Base_Yield[3] _TEMPORARY_ (4.5 6.0 7.2);
  DO Block = 1 TO 4;
  DO Year = 1 TO 10;
    SWC = 300 + RANNOR(123)*80;
    DO N_Level = 1 TO 3;
      Yield = Base_Yield[N_Level]
        + (-0.15 * Year)
        + (0.008 * (SWC - 300))
        + (Block * 0.1)
        + RANNOR(123)*0.3;
    OUTPUT;
  END;
END;
END;
RUN;
PROC SORT DATA=wheat_longterm;
  BY Block N_Level Year;
RUN;
PROC GLM DATA=wheat_longterm;
  CLASS Block N_Level Year;
  MODEL Yield = Block N_Level Block*N_Level Year N_Level*Year;
  TEST H=N_Level E=Block*N_Level;
  LSMEANS N_Level / PDIF ADJUST=TUKEY E=Block*N_Level;
  TITLE 'Scenario 1: Classical Analysis (Year as Class Variable)';
RUN;
QUIT;
PROC MIXED DATA=wheat_longterm METHOD=REML;
  CLASS Block N_Level;
  MODEL Yield = N_Level Year N_Level*Year / DDFM=KR
SOLUTION;
  RANDOM Block Block*N_Level;
```

```

REPEATED / SUBJECT=Block*N_Level TYPE=AR(1) R;
LSMEANS N_Level / PDIF ADJUST=TUKEY;
TITLE 'Scenario 2: Analysis with Linear Trend Assumption';
RUN;
PROC MIXED DATA=wheat_longterm METHOD=REML;
CLASS Block N_Level Year;
MODEL Yield = N_Level Year N_Level*Year SWC / DDFM=KR
SOLUTION;
RANDOM Block Block*N_Level;
REPEATED Year / SUBJECT=Block*N_Level TYPE=AR(1);
LSMEANS N_Level / PDIF ADJUST=TUKEY;
TITLE 'Scenario 3: Analysis with SWC as Covariate';
RUN;

```

در دستور ارائه شده، فرآیند تحلیل در دو مرحله اصلی شامل تولید داده و اجرای سناریوهای تحلیلی سه گانه سازماندهی شده است. در بخش نخست، به منظور شبیه‌سازی دقیق شرایط یک آزمایش بلندمدت واقعی و اجتناب از وارد کردن حجم انبوهی از داده‌های خام، از گام دیتا (DATA Step) استفاده شده است. در این بخش، داده‌های یک آزمایش ۱۰ ساله گندم با سه سطح کود نیتروژن بر اساس یک مدل ریاضی مشخص تولید می‌شوند؛ به طوری که متغیر عملکرد (Yield) تابعی از میانگین تیمار، یک روند نزولی خطی ناشی از کاهش تدریجی کیفیت خاک (اثر سن) و نوسانات تصادفی ناشی از مقدار آب قابل دسترس خاک (SWC) در هر واحد آزمایشی (اثر محیطی) تعریف شده است. پس از آماده‌سازی داده‌ها، تحلیل آماری در سه سناریوی مجزا جهت مقایسه اثربخشی فرضیات تکمیلی اجرا می‌شود. سناریوی اول، نمایانگر رویکرد کلاسیک است که با استفاده از رویه PROC GLM انجام می‌پذیرد. در این رویکرد، متغیر زمان (Year) در فهرست متغیرهای طبقه‌بندی (CLASS) قرار گرفته و به عنوان یک عامل کیفی مدل‌سازی می‌شود؛ بدین معنا که هیچ فرض خاصی درباره روند تغییرات یا ماهیت نوسانات سالانه لحاظ نمی‌گردد و آزمون‌ها بر مبنای تحلیل واریانس مرسوم صورت می‌گیرند. سناریوی دوم، به آزمون فرضیه روند خطی اختصاص دارد که با رویه PROC MIXED اجرا

می‌شود. تفاوت بنیادین این سناریو، حذف متغیر زمان از دستور CLASS و ورود آن به مدل به عنوان یک متغیر پیوسته (رگرسیون) است. این تغییر ساختاری به همراه گزینه SOLUTION، به پژوهشگر امکان می‌دهد تا شیب خط تغییرات عملکرد در طول زمان را برآورد کرده و سهم روند پیری سیستم را از خطای آزمایش جدا کند. در سناریوی سوم، رویکرد تحلیل کوواریانس با استفاده از متغیر کمکی پیاده‌سازی شده است. در این مدل، اگرچه زمان مجدداً به صورت متغیر کلاس در نظر گرفته شده، اما متغیر مقدار آب قابل دسترس خاک در هر واحد آزمایشی (SWC) به عنوان یک متغیر کمکی پیوسته در مدل گنجانده شده است تا تغییرات عملکرد ناشی از نوسانات محیطی را جذب و تبیین نماید. نکته حائز اهمیت در هر سه سناریو، استفاده از دستور LSMEANS است؛ با این تفاوت که در سناریوی سوم، این دستور نقش حیاتی‌تری ایفا می‌کند و میانگین‌های تعدیل‌شده^۱ را ارائه می‌دهد. این میانگین‌ها، عملکرد تیمارها را پس از حذف اثر مخدوش‌کننده مقدار آب قابل دسترس خاک در هر واحد آزمایشی برآورد می‌کنند و مقایسه‌ای منصفانه و دقیق‌تر از اثر واقعی کود نیتروژن ارائه می‌دهند.

نتایج حاصل از مقایسه سه رویکرد تحلیلی بر روی داده‌های یکسان، نکات مهمی برای پژوهش‌های بلندمدت در بر دارد. در گام نخست، بررسی تحلیل واریانس خطا نشان داد که در رویکرد کلاسیک (سناریوی ۱) که زمان صرفاً به عنوان یک سال تقویمی در نظر گرفته شده بود، واریانس خطای آزمایش حدود ۰/۳۱ برآورد گردید که شامل تمام نوسانات ناشناخته محیطی بود (جدول ۴-۴۰). در مقابل، در سناریوی دوم با فرض روند خطی، مدل توانست بخشی از تغییرات منظم (کاهش تدریجی عملکرد ناشی از زمان) را شناسایی کند و خطا را حدود ۹ درصد کاهش دهد. اما بهترین نتیجه در سناریوی سوم رقم خورد؛ جایی که با ورود داده‌های SWC به عنوان متغیر کمکی، واریانس خطا با یک کاهش ۷۵ درصدی به عدد ۰/۰۷۶ رسید (جدول ۴-۴۰) که نشان می‌دهد بخش اعظم

خطای آزمایش در واقع خطا نبوده، بلکه اثر قابل توجیه مقدار آب متفاوت قابل دسترس خاک در هر واحد آزمایشی بوده است. پیامد مستقیم این کاهش خطا، در دقت برآورد میانگین‌ها مشهود است؛ به طوری که اگرچه مقادیر میانگین عملکرد در هر سه روش تقریباً یکسان است، اما تفاوت اصلی در خطای استاندارد نهفته است (جدول ۴-۴۱). در روش کلاسیک، خطای استاندارد برابر با ۰/۱۶ بود، اما در هر دو روش اصلاحی (روند خطی و کوواریانس)، این خطا به حدود ۰/۰۸ کاهش یافت (جدول ۴-۴۱). از نظر آماری، نصف شدن خطای استاندارد به معنای دو برابر شدن توان آزمون برای یافتن تفاوت‌های معنی‌دار است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر پژوهشگر به داده‌های محیطی دقیق دسترسی دارد، روش کوواریانس قدرتمندترین ابزار برای پالایش نتایج است، اما حتی در صورت نبود داده‌های محیطی، استفاده از فرض روند زمانی به جای روش کلاسیک، می‌تواند بدون هیچ هزینه اضافی، دقت آزمایش را به طرز چشمگیری ارتقا دهد.

جدول ۴-۴۰. مقایسه کارایی سه رویکرد آماری در تحلیل داده‌های آزمایش ۱۰ ساله گندم (بر اساس واریانس خطای باقیمانده)

رویکرد آماری	فرضیه تکمیلی	برآورد واریانس خطا (Residual Var)	درصد کاهش خطا (نسبت به روش کلاسیک)	تفسیر و نتیجه‌گیری
کلاسیک	بدون فرض	۰/۳۱۱	-	خطای پایه (شامل نوسانات سالانه)
روند خطی	زمان به عنوان متغیر پیوسته	۰/۲۸۳	۹ درصد	بهبود جزئی (حذف اثر پیری خاک)
متغیر کمکی	SWC به عنوان متغیر کمکی	۰/۰۷۶	۷۵ درصد	بهبود چشمگیر (حذف نویز محیطی)

کاهش شدید واریانس خطا در روش سوم نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از نوسانات داده‌ها ناشی از تغییرات مقدار آب قابل دسترس خاک در هر واحد آزمایشی بوده است که با مدل‌سازی صحیح (کوواریانس)، از خطای آزمایش حذف شده‌اند.

جدول ۴-۴۱. مقایسه میانگین‌های حداقل مربعات (LSMeans) عملکرد گندم

و دقت آزمون در سه سناریوی تحلیلی

سناریو ۳ متغیر کمکی (SWC)	سناریو ۲ فرض روند (زمان خطی)	سناریو ۱ روش کلاسیک	سطوح کود نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)
۳/۹۶ c	۳/۹۶ c	۳/۹۶ c	۵۰
۵/۴۰ b	۵/۴۰ b	۵/۴۰ b	۱۰۰
۶/۵۷ a	۶/۵۶ a	۶/۵۷ a	۱۵۰
۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۶	خطای استاندارد میانگین (SE)
عالی	عالی	ضعیف	دقت برآورد

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون توکی، $P < 0.05$). اگرچه میانگین‌ها در هر سه سناریو یکسان به نظر می‌رسند، اما خطای استاندارد (SE) در روش‌های دوم و سوم نصف شده است که نشان‌دهنده دو برابر شدن دقت و توان آزمون در شناسایی این تفاوت‌هاست.

۴-۱۰-۷. تحلیل پیشرفته روندهای زمانی: مدل‌های غیرخطی و تحلیل نقطه شکست

در بسیاری از فرآیندهای بیولوژیک حاکم بر نظام‌های زراعی، اکتفا به فرض روند خطی یا حتی درجه دوم، ممکن است منجر به ساده‌سازی بیش‌ازحد واقعیت و از دست رفتن اطلاعات حیاتی شود. سیستم‌های زراعی موجوداتی پویا هستند که رفتارهایی نظیر اشباع، رشد نمایی، یا تغییرات ناگهانی فاز (مانند سقوط عملکرد پس از یک آستانه بحرانی) از خود نشان می‌دهند؛ رفتارهایی که با خطوط صاف قابل تبیین نیستند. بنابراین، برای مدل‌سازی دقیق این پویایی‌ها و درک عمیق‌تر اثرات زمانی پیچیده، گذر از مدل‌های خطی و به کارگیری مدل‌های رگرسیونی غیرخطی^۱ و تحلیل نقطه شکست^۲ امری ضروری است (Archontoulis and Miguez, 2015). در ادامه، مبانی نظری و کاربردی هر یک از این رویکردها تشریح می‌گردد.

1. Non-linear regression models

2. Breakpoint analysis

۴-۱۰-۷-۱. مدل‌های غیرخطی

بسیاری از فرآیندهای کلیدی در اکوسیستم‌های زراعی، نظیر تجمع ماده آلی خاک، دینامیک جذب نیتروژن یا رشد جمعیت‌های میکروبی، ماهیتی غیرخطی دارند و اغلب به سمت یک نقطه اشباع یا حداکثر ظرفیت برد سیستم میل می‌کنند. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های خطی یا حتی چندجمله‌ای، اگرچه ممکن است برازش آماری خوبی ایجاد کنند، اما اغلب فاقد تفسیر بیولوژیک معنادار هستند. برای مثال، مدل‌های چندجمله‌ای ممکن است در خارج از دامنه داده‌ها، مقادیر غیرمنطقی یا منفی پیش‌بینی کنند. در مقابل، مدل‌های رگرسیونی غیرخطی نظیر مدل‌های لجستیک^۱، گومپرتز^۲ و نمایی^۳، ساختاری را ارائه می‌دهند که با واقعیت‌های فیزیولوژیک و اکولوژیک سیستم (مانند محدودیت منابع و کاهش نرخ رشد) سازگار است. مزیت بزرگ این مدل‌ها، تفسیرپذیری پارامترها است؛ به طوری که هر پارامتر مدل مستقیماً به یک ویژگی بیولوژیک مانند حداکثر عملکرد قابل‌دسترس یا نرخ رشد نسبی اشاره دارد (Schabenberge and Pierce, 2001). در نرم‌افزارهای پیشرفته آماری مانند SAS، رویه PROC NLMIXED این امکان را فراهم می‌آورد که پژوهشگران مدل‌های غیرخطی پیچیده را در چارچوب مدل‌های آمیخته برازش دهند و هم‌زمان اثرات تصادفی (مانند تکرار یا سال) را نیز در تحلیل لحاظ نمایند.

برای درک عملیاتی نحوه برازش مدل‌های غیرخطی در پژوهش‌های زراعی، یک آزمایش بلندمدت ۳۰ ساله را در نظر بگیرید که با هدف بررسی روند ذخیره کربن آلی خاک (SOC) در یک سامانه بی‌خاک‌ورزی اجرا شده است. فرضیه در این پژوهش آن است که با تغییر مدیریت از شخم متداول به بی‌خاک‌ورزی، میزان ماده آلی خاک ابتدا با سرعت زیاد افزایش می‌یابد، اما به تدریج با نزدیک شدن خاک به ظرفیت اشباع کربن،

-
1. Logistic
 2. Gompertz
 3. Exponential

سرعت ذخیره‌سازی کاهش یافته و در نهایت نمودار به یک خط صاف می‌رسد. در چنین شرایطی، استفاده از رگرسیون خطی گمراه‌کننده است زیرا افزایش کربن را تا بی‌نهایت پیش‌بینی می‌کند. بنابراین، پژوهشگر از مدل غیرخطی رشد مجانبی^۱ (که به مدل میچرلیخ نیز معروف است) استفاده می‌کند تا سه پارامتر کلیدی را برآورد نماید، (۱) مقدار اولیه کربن (A)، (۲) حداکثر کربن قابل دستیابی یا نقطه اشباع (M)، و (۳) نرخ سرعت رسیدن به این اشباع (k). داده‌های این آزمایش فرضی شامل اندازه‌گیری‌های سالانه درصد کربن آلی در ۴ بلوک آزمایشی طی ۳۰ سال متوالی است که دستور تجزیه و تحلیل آن‌ها در نرم‌افزار SAS به شرح زیر می‌باشد

```
DATA carbon_saturation;
  True_Start = 0.8;
  True_Max = 2.5;
  True_Rate = 0.15;
  DO Block = 1 TO 4;
    Block_Effect = RANNOR(123) * 0.1;
    DO Year = 1 TO 30;
      Expected_SOC = True_Start + ((True_Max + Block_Effect) -
True_Start) * (1 - EXP(-True_Rate * Year));
      SOC = Expected_SOC + RANNOR(123) * 0.05;
      OUTPUT;
    END;
  END;
RUN;
PROC NLMIXED DATA=carbon_saturation;
  PARMS b_Start=1 b_Max=3 b_Rate=0.1 s2u=0.01 s2e=0.01;
  M = b_Max + u;
  Pred_Value = b_Start + (M - b_Start) * (1 - EXP(-b_Rate * Year));
  MODEL SOC ~ NORMAL(Pred_Value, s2e);
  RANDOM u ~ NORMAL(0, s2u) SUBJECT=Block;
  PREDICT Pred_Value OUT=Preds;
  ID Year SOC;
  ESTIMATE 'Saturation Point (M)' b_Max;
  ESTIMATE 'Accumulation Rate (k)' b_Rate;
```

```

ESTIMATE 'Initial SOC (A)' b_Start;
TITLE 'Non-linear Modeling of SOC Saturation';
RUN;
PROC SORT DATA=Preds; BY Year; RUN;
PROC MEANS DATA=Preds NOPRINT;
  BY Year;
  VAR SOC Pred;
  OUTPUT OUT=PlotData MEAN=Mean_SOC Mean_Pred;
RUN;
ODS GRAPHICS ON;
PROC SGPLOT DATA=PlotData;
  SCATTER          X=Year          Y=Mean_SOC          /
  MARKERATTRS=(SYMBOL=CircleFilled COLOR=Blue SIZE=8)
  LEGENDLABEL="Observed Data";
  SERIES X=Year Y=Mean_Pred / LINEATTRS=(COLOR=Red
  THICKNESS=2)
  LEGENDLABEL="Non-linear Model (Logistic)";
  XAXIS LABEL="Years" VALUES=(0 TO 30 BY 5);
  YAXIS LABEL="Soil Organic Carbon (%)" GRID;
  TITLE "Saturation Trend of Soil Organic Carbon";
RUN;
ODS GRAPHICS OFF;

```

در دستور ارائه شده، فرآیند تحلیل داده‌های غیرخطی در سه فاز متوالی شامل تولید داده، برازش مدل آمیخته و تصویرسازی گرافیکی پیاده‌سازی شده است. در گام نخست، داده‌های یک آزمایش ۳۰ ساله شبیه‌سازی شده است که در آن متغیر پاسخ (کربن آلی خاک) از یک الگوی رشد مجانبی پیروی می‌کند؛ الگویی که با افزایش سریع اولیه آغاز شده و به تدریج به سمت یک سقف بیولوژیک میل می‌کند. هسته اصلی تحلیل، رویه PROC NL MIXED است که امکان تعریف مستقیم معادلات پیچیده ریاضی و توزیع‌های احتمالی را فراهم می‌آورد. در این رویه، برخلاف مدل‌های خطی، معرفی مقادیر اولیه برای پارامترها در دستور PARMS جهت آغاز فرآیند تکرار محاسباتی ضروری است. معادله ریاضی منحنی به گونه‌ای تعریف شده است که پارامتر نقطه اشباع (M) به صورت مجموع یک مقدار ثابت جامعه و یک اثر تصادفی ناشی از بلوک (u)

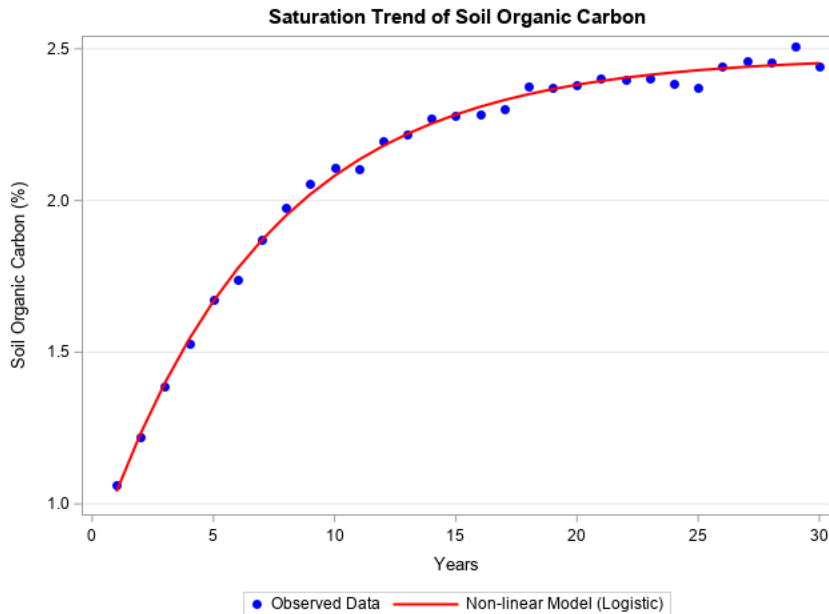
مدل‌سازی شود تا ناهمگنی‌های مکانی آزمایش لحاظ گردد. همچنین دستور PREDICT مقادیر برازش‌شده توسط مدل را در یک فایل خروجی ذخیره می‌کند تا مبنای رسم نمودار قرار گیرد. در نهایت، برای ارزیابی بصری کیفیت مدل، از رویه گرافیکی PROC SGPLOT استفاده شده است که با تلفیق نمودار پراکنش (برای نمایش میانگین نقاط واقعی مشاهده‌شده) و نمودار خطی (برای نمایش منحنی هموار پیش‌بینی‌شده)، تطابق روند اشباع‌شونده مدل با واقعیت داده‌ها را به تصویر می‌کشد و امکان تفسیر بصری پارامترهایی نظیر سرعت رشد و نقطه تسطیح منحنی را برای پژوهشگر فراهم می‌سازد.

نتایج حاصل از برازش مدل غیرخطی آمیخته (جدول ۴-۴۲) نشان می‌دهد که الگوی تغییرات کربن آلی خاک به خوبی توسط معادله رشد مجانبی تبیین شده است. پارامتر کلیدی این مدل، نقطه اشباع (M) است که برابر با ۲/۴۷ درصد برآورد شده است. این عدد بیانگر ظرفیت نهایی خاک برای ذخیره کربن در این سامانه مدیریتی است و به پژوهشگر هشدار می‌دهد که پس از رسیدن به این سطح، ادامه عملیات بی‌خاک‌ورزی منجر به افزایش بیشتر ذخیره کربن نخواهد شد. همچنین، پارامتر نرخ تجمع ($k=0/14$) نشان می‌دهد که سرعت ذخیره‌سازی کربن در سال‌های ابتدایی بالا بوده و با گذشت زمان به صورت نمایی کاهش یافته است. تطابق بصری مدل با داده‌ها در شکل ۴-۱۶ به وضوح قابل مشاهده است. همان‌طور که پیداست، نقاط پراکنده داده‌های مشاهده‌شده (دایره‌های آبی) دارای نوسانات سالانه هستند، اما منحنی قرمز رنگ مدل توانسته است روند اصلی را از دل این نوسانات استخراج کند. منحنی در سال‌های آغازین (۰ تا ۱۰) شیب تندی دارد، اما از سال بیستم به بعد وارد فاز مسطح می‌شود که نشان‌دهنده رسیدن به تعادل جدید اکولوژیک است. این نوع تحلیل غیرخطی، برخلاف رگرسیون خطی که رشدی بی‌پایان را پیش‌بینی می‌کند، تصویری واقع‌بینانه و محدود از پتانسیل ترسیب کربن ارائه می‌دهد که برای برنامه‌ریزی‌های عملی (برای مثال اصلاح یا تغییر یک نظام زراعی) بسیار ارزشمند است.

جدول ۴-۴۲. برآورد پارامترهای مدل غیرخطی تجمع کربن آلی خاک در یک دوره ۳۰ ساله

پارامتر مدل	نماد	مقدار برآورد شده (Estimate)	خطای استاندارد (SE)	مقدار واقعی	وضعیت برآورد
نقطه اشباع (حداکثر کربن)	M	۲/۴۷	۰/۰۱۹	۲/۵۰	عالی
نرخ سرعت تجمع	k	۰/۱۴	۰/۰۰۴	۰/۱۵	خوب
مقدار اولیه کربن	A	۰/۸۲	۰/۰۲۳	۰/۰۸	عالی

نزدیکی بسیار زیاد مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی جامعه، قدرت بالای مدل NLMIXED را در کشف پارامترهای پنهان سیستم نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶. روند دینامیک تجمع کربن آلی خاک طی ۳۰ سال. نقاط دایره‌ای نشان‌دهنده میانگین مشاهدات واقعی و خط ممتد نشان‌دهنده منحنی برازش شده توسط مدل غیرخطی (رشد مجانبی) است که به سمت نقطه اشباع (۲/۴۷ درصد) میل می‌کند.

۴-۱۰-۷-۲. تحلیل نقطه شکست

در بسیاری از آزمایش‌های بلندمدت، واکنش سیستم به تیمارهای مدیریتی همواره یکنواخت و تدریجی نیست. گاهی اوقات اثر یک تیمار (مانند گذار به کشاورزی ارگانیک) تا چندین سال پنهان می‌ماند (فاز تأخیر) و سپس به طور ناگهانی و با شیبی متفاوت آشکار می‌گردد. برای مثال، ممکن است اثرات مثبت کشاورزی حفاظتی بر ماده آلی خاک تا سال پنجم قابل تشخیص نباشد، اما پس از عبور از این آستانه زمانی، یک روند صعودی معنی‌دار آغاز شود. در چنین شرایطی که داده‌ها رفتاری دوفازی دارند، برازش یک خط راست ساده در طول کل دوره آزمایش، خطای فاحشی محسوب شده و منجر به نتیجه‌گیری‌های مخدوش می‌شود. راهکار آماری برای مواجهه با این پدیده، استفاده از رگرسیون چندتکه‌ای^۱ یا تحلیل نقطه شکست است (Miguez et al., 2018). این روش به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا به جای تحمیل یک مدل واحد به کل داده‌ها، دو یا چند خط رگرسیون مجزا را که در یک نقطه اتصال^۲ به هم می‌رسند، برازش دهد (Ray et al., 2012). هدف اصلی این تحلیل، شناسایی آماری دقیق این نقطه عطف است تا بتوان به این پرسش کلیدی پاسخ داد که تغییر معنی‌دار در سیستم دقیقاً از چه سالی آغاز شده است؟. در نرم‌افزار SAS، رویه‌های غیرخطی نظیر PROC NLIN و PROC NLMIXED ابزارهای قدرتمندی هستند که با تعریف توابع شرطی، قادرند مکان دقیق نقطه شکست و شیب‌های متفاوت قبل و بعد از آن را برآورد نمایند.

برای درک کاربردی این روش، یک آزمایش فرضی در دوره گذار را مدل‌سازی می‌کنیم. فرض کنید یک مزرعه گندم پس از چندین سال مدیریت متداول، از سال مشخصی به عنوان سال اول تحت مدیریت ارگانیک قرار گرفته است. طبق تئوری، در سال‌های اول (به دلیل حذف کود شیمیایی و عدم استقرار کامل بیولوژی خاک)، عملکرد

1. Segmented regression

2. Knot

یا ثابت می‌ماند و یا افت می‌کند (فاز رکود). اما پس از چند سال، با بهبود سلامت خاک، عملکرد شروع به افزایش می‌کند (فاز بازیابی). در این آزمایش پژوهشگر داده‌های ۱۵ ساله عملکرد را جمع‌آوری کرده و می‌خواهد بداند دقیقاً در سال چندم، دوره رکود تمام و رشد عملکرد شروع شده است؟ کد نرم‌افزار SAS جهت تحلیل داده‌های این آزمایش فرضی در ادامه ارائه شده است.

```
DATA organic_transition;
  True_Breakpoint = 6.5;
  Slope1 = -0.1;
  Slope2 = 0.4;
  Intercept = 4.5;
  DO Block = 1 TO 4;
  DO Year = 1 TO 15;
    IF Year < True_Breakpoint THEN
      Expected_Yield = Intercept + (Slope1 * Year);
    ELSE
      Expected_Yield = (Intercept + Slope1 * True_Breakpoint) +
        Slope2 * (Year - True_Breakpoint);
      Yield = Expected_Yield + RANNOR(123)*0.3;
    OUTPUT;
  END;
END;
RUN;
PROC NLIN DATA=organic_transition METHOD=MARQUARDT;
  PARMS a = 4.5
        b1 = -0.2
        b2 = 0.5
        x0 = 5;
  Model_1 = a + b1 * Year;
  Model_2 = (a + b1 * x0) + b2 * (Year - x0);
  IF Year < x0 THEN Model = Model_1;
  ELSE Model = Model_2;
  MODEL Yield = Model;
  OUTPUT OUT=Split_Pred P=Pred_Yield;
  TITLE 'Breakpoint Analysis: Identifying the Year of Yield
Recovery';
RUN;
ODS GRAPHICS ON;
```

```
PROC SGPLOT DATA=Split_Pred;
  SCATTER          X=Year          Y=Yield          /
  MARKERATTRS=(SYMBOL=CircleFilled  COLOR=Gray  SIZE=6)
  TRANSPARENCY=0.5 LEGENDLABEL="Observed Data";
  SERIES X=Year Y=Pred_Yield / LINEATTRS=(COLOR=Red
  THICKNESS=2) LEGENDLABEL="Segmented Model";
  REFLINE 6.5 / AXIS=X LINEATTRS=(PATTERN=Dash
  COLOR=Blue) LABEL="Estimated Breakpoint";
  XAXIS LABEL="Years since Transition" VALUES=(1 TO 15 BY 1);
  YAXIS LABEL="Wheat Yield (t/ha)" GRID;
RUN;
ODS GRAPHICS OFF;
```

در دستور ارائه شده، تکنیک رگرسیون چندتکه‌ای برای شناسایی زمان دقیق تغییر رفتار سیستم در سه بخش اصلی پیاده‌سازی شده است. در بخش نخست (تولید داده)، یک سناریوی دوفازی شبیه‌سازی شده است که در آن عملکرد محصول تا پیش از یک نقطه زمانی خاص (نقطه شکست فرضی) دارای روندی نزولی یا ثابت (شیب اول) بوده و پس از آن وارد فاز رشد سریع (شیب دوم) می‌شود؛ این ساختار داده‌ای، شبیه‌ساز واقعی دوران گذار در نظام‌های زراعی است. بخش دوم تحلیل، استفاده از رویه PROC NLIN است. از آنجا که زمان وقوع شکست (x_0) خود یک پارامتر مجهول است که باید برآورد شود، مدل ماهیتی غیرخطی پیدا می‌کند و نیازمند روش‌های تکرارمحور (مانند روش مارکوات^۱) است. در این رویه، ابتدا با دستور PARMS مقادیر اولیه‌ای به عنوان حدس آغازین به نرم‌افزار داده می‌شود. سپس با استفاده از ساختار IF ... THEN ... ELSE، به نرم‌افزار فرمان داده می‌شود که اگر زمان مشاهده کمتر از نقطه شکست برآوردی بود، از

1. Marquardt method

روش مارکوات الگوریتمی بهینه و پر کاربرد برای برازش مدل‌های رگرسیونی غیرخطی است. این روش با ترکیب الگوریتم گام تند کاهشی (Steepest Descent) و روش گوس-نیوتن (Gauss-Newton)، از هر دوی آن‌ها برای دستیابی به سریع‌ترین و مقاوم‌ترین همگرایی استفاده می‌کند. این ترکیب باعث می‌شود که روش مارکوات به طور موثری پارامترهای مدل‌های غیر خطی، را برآورد کند (Levenberg, 1994).

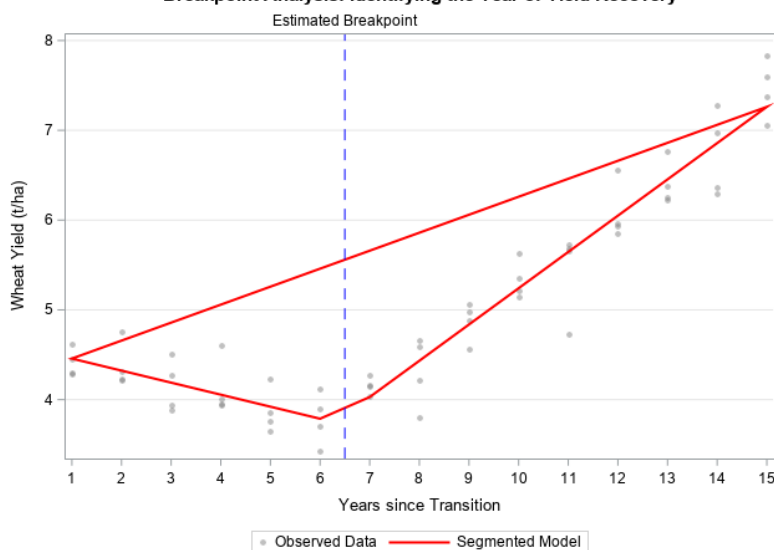
معادله خط اول (Model_1) و در غیر این صورت از معادله خط دوم (Model_2) استفاده کند. نکته مهم در تعریف ریاضی خط دوم نهفته است؛ فرمول این خط به گونه‌ای نوشته شده است که عرض از مبدأ آن دقیقاً برابر با مقدار پیش‌بینی شده خط اول در نقطه شکست باشد. این شرط پیوستگی^۱ تضمین می‌کند که دو خط دقیقاً در نقطه X_0 به هم متصل شوند و مدل دچار گسستگی نشود. در بخش سوم، با استفاده از رویه گرافیکی PROC SGPLOT، نتایج به صورت بصری نمایش داده می‌شوند تا انطباق مدل دو تکه‌ای (خط شکسته قرمز) بر داده‌های مشاهده شده (نقاط خاکستری) و مکان دقیق نقطه شکست (خط عمودی آبی) برای خواننده آشکار گردد.

نتایج حاصل از برازش مدل رگرسیون دو تکه‌ای در جدول ۴-۴۳، پاسخ دقیقی به پرسش کلیدی پژوهش درباره زمان پایان دوره گذار ارائه می‌دهد. بر اساس این تحلیل، نقطه شکست یا آستانه تغییر رفتار سیستم در سال ۶/۳۰ (تقریباً اواسط سال ششم) رخ داده است. این یافته بدین معناست که مزرعه مورد مطالعه تا حدود ۶ سال پس از تغییر مدیریت به ارگانیک، در فاز رکود به سر برده است؛ به طوری که عملکرد محصول در این دوره با شیب منفی ملایم (۰/۱۳- تن در سال) رو به کاهش بوده است. پس از عبور از سال ششم، سیستم وارد فاز بازیابی شده و عملکرد با شیب مثبت و قدرتمند (۰/۴۰+ تن در سال) شروع به افزایش کرده است. شکل ۴-۱۷ این رفتار دوفازی را به وضوح نمایش می‌دهد. تقاطع دو خط رگرسیون در سال ششم، نشان‌دهنده لحظه‌ای است که تعادل بیولوژیک خاک برقرار شده و اثرات مثبت مدیریت ارگانیک بر محدودیت‌های تغذیه‌ای غلبه کرده است. این نوع تحلیل دقیق زمانی، به پژوهشگران، کشاورزان و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا انتظارات واقع‌بینانه‌ای از دوره گذار داشته باشند و بدانند که برای مشاهده ثمرات مدیریت پایدار، نیاز به یک دوره صبر استراتژیک (در اینجا ۶ سال) است.

جدول ۴-۴۳. برآورد پارامترهای مدل رگرسیون دوتکه‌ای برای شناسایی زمان بازیابی عملکرد گندم در دوره گذار به مدیریت ارگانیک

پارامتر مدل	نماد	برآورد (Estimate)	خطای استاندارد (SE)	دامنه اطمینان ۹۵ درصد	تفسیر
سال وقوع شکست	x0	۶/۳۰	۰/۲۹	۵/۷۲ تا ۶/۸۸	پایان دوره گذار
شیب فاز اول	b1	-۰/۱۳	۰/۰۴	-۰/۰۶ تا ۰/۲۰	نرخ افت عملکرد در دوره گذار
شیب فاز دوم	b2	۰/۴۰	۰/۰۲	۰/۳۷ تا ۰/۴۴	نرخ بازیابی و رشد پس از گذار
عرض از مبدأ	a	۴/۵۹	۰/۱۴	۴/۳۱ تا ۴/۸۷	عملکرد اولیه (شروع آزمایش)

Breakpoint Analysis: Identifying the Year of Yield Recovery



شکل ۴-۱۷. تحلیل نقطه شکست برای شناسایی زمان بازیابی عملکرد گندم. نقاط دایره‌ای نشان‌دهنده عملکرد مشاهده‌شده در ۱۵ سال آزمایش و خط ممتد قرمز، مدل رگرسیون دوتکه‌ای برازش‌شده است. خط عمودی آبی‌رنگ، زمان دقیق نقطه شکست ($x_0=6.3$) را نشان می‌دهد که مرز بین فاز رکود و فاز بازیابی است.

۴-۱۰-۸. تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت با تیمارهای تناوبی

در تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت که تیمارهای تناوبی را مورد بررسی قرار می‌دهند، به طور کلی دو رویکرد اصلی قابل تفکیک است (Gomez & Gomez, 1984). رویکرد نخست که ریشه در روش‌های کلاسیک دارد، بر این فرض استوار است که تیمارهای تناوبی رفتاری مشابه با سایر تیمارهای زراعی متداول (مانند ارقام یا کود) دارند. شرط بنیادی برای صحت این فرض آن است که در هر سال زراعی از دوره آزمایش، تمامی فازهای هر تناوب به طور همزمان در کرت‌های آزمایشی حضور داشته باشند و تغییرپذیری داده‌ها (واریانس خطا) در طول سال‌های مختلف آزمایش یکنواخت و ثابت باقی بماند. در تحقیقات نظام‌های زراعی، اعتبار این فرضیه به شدت وابسته به پایداری نسبی شرایط محیطی و اقلیمی در طول سال‌های اجرای آزمایش است (Piepho et al., 2003). در صورت برقراری این پیش‌فرض‌ها، فرآیند تحلیل آماری در دو گام متوالی انجام می‌پذیرد. گام اول، محاسبه دقیق جدول تجزیه واریانس برای هر سال به صورت مستقل است که خروجی آن شامل برآورد میانگین تیمارها، واریانس خطای آزمایش و خطای استاندارد برای آن سال خاص می‌باشد. پس از تکمیل تحلیل‌های سالانه و اطمینان از همگنی واریانس خطای آزمایشی (با آزمون‌هایی نظیر بارتلت^۱)، مرحله دوم شامل محاسبه جدول تجزیه واریانس مرکب خواهد بود. این جدول جامع، منابع تغییر اصلی شامل تیمارهای آزمایشی، سال‌ها (به عنوان متغیر محیطی)، اثر متقابل سال $\times$ تیمار و جمله خطای مرکب را در بر می‌گیرد (Roy et al., 2007).

مطالعه موردی لوپز-بلیدو و همکاران (López-Bellido et al., 2000) نمونه‌ای کاربردی از اجرای موفق این رویکرد را به نمایش می‌گذارد. در این پژوهش چهارساله که با هدف واکاوی برهم‌کنش شخم، تناوب زراعی و سطوح مختلف کود نیتروژن بر عملکرد گندم طراحی شده بود، از طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش

1. Bartlett's test

کرت‌های دوبار خردشده بهره گرفته شد. انتخاب این طرح آماری، به‌ویژه در پژوهش‌های تناوبی که عوامل مدیریتی در سطوح مکانی متفاوت (کرت اصلی، فرعی و فرعی-فرعی) بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند، کاربرد گسترده و استاندارد دارد (Gomez & Gomez, 1984). در ساختار اجرایی این آزمایش، کرت‌های اصلی به دو روش مدیریت خاک (شخم متداول و بدون شخم) اختصاص یافتند؛ در حالی که کرت‌های فرعی شامل پنج سیستم تناوبی متنوع (چهار تناوب دو ساله و یک سیستم تک‌کشتی مداوم گندم) و کرت‌های فرعی-فرعی شامل سطوح مختلف کود نیتروژن (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) بودند (López-Bellido et al., 2000). الگوی تجزیه واریانس مرکب این آزمایش که جزئیات منابع تغییر و درجات آزادی آن در جدول ۴-۴۴ ارائه شده است، چارچوبی استاندارد برای تحلیل داده‌های حاصل از چنین طرح‌های چندعاملی و پیچیده‌ای محسوب می‌شود. در تفسیر نتایج چنین آزمایش‌هایی، تمرکز بر اثرات متقابل بین سال و تیمارهای مدیریتی از اهمیت راهبردی برخوردار است؛ زیرا معنی‌داری این اثرات صرفاً یک پدیده آماری نیست، بلکه نشان‌دهنده نوسانات بیولوژیک و تغییرات بلندمدت در پاسخ‌دهی گیاه به سیستم‌های مدیریتی تحت شرایط متغیر محیطی است (Piepho et al., 2003).

در رویکرد دوم که با واقعیت‌های اکولوژیک و محدودیت‌های اجرایی آزمایش‌های مزرعه‌ای انطباق بیشتری دارد، پژوهشگر با دو چالش بنیادین مواجه است که روش‌های کلاسیک قادر به مدیریت صحیح آن‌ها نیستند. چالش نخست، عدم امکان تکرار کامل فازها در هر سال است. در آزمایش‌های تناوبی، به‌ویژه زمانی که دوره‌های تناوب طولانی هستند (مثلاً تناوب ۶ ساله)، حضور همزمان تمامی فازهای تمام تناوب‌ها در هر سال، نیازمند تخصیص سطح وسیعی از زمین و منابع است که عملاً اجرای طرح را غیرممکن می‌سازد (Piepho et al., 2003). چالش دوم و پیچیده‌تر، ماهیت آماری داده‌هاست؛ در این آزمایش‌ها، تغییرپذیری (واریانس) داده‌ها در طول سال‌های متمادی معمولاً ثابت

جدول ۴-۴. ساختار آنالیز واریانس مرکب برای عملکرد دانه گندم در آزمایش چهارساله با تیمارهای شخم، تناوب و نیتروژن

منابع تغییر	درجه آزادی	منابع تغییر	درجه آزادی
سال (Y)	۳	نیتروژن (N)	۳
شخم (T)	۱	$N \times Y$	۹
$T \times Y$	۳	$N \times T$	۳
خطای a	۱۲	$N \times Y \times T$	۹
تناوب (R)	۴	$N \times R$	۱۲
$R \times Y$	۱۲	$N \times Y \times R$	۳۶
$R \times T$	۴	$N \times T \times R$	۱۲
$R \times Y \times T$	۱۲	$N \times Y \times T \times R$	۳۶
خطای b	۹۶	خطای c	۳۶۰

اقتباس از لوپز-بلیدو و همکاران (López-Bellido et al., 2000). درجات آزادی بر اساس ۴ سال، ۴ تکرار، ۲ روش شخم، ۵ سیستم تناوبی و ۴ سطح نیتروژن محاسبه شده‌اند.

نیست و ساختارهای همبستگی ناهمگونی بین واحدهای آزمایشی شکل می‌گیرد که پیش‌فرض‌های اصلی تجزیه واریانس مرسوم (مانند استقلال خطاها و همگنی واریانس) را نقض می‌کند. برای غلبه بر چالش اول در چارچوب‌های سنتی، گاهی از اثرات متقابل مرتبه بالا (مانند اثرات سه‌گانه) به عنوان برآوردی از خطای آزمایشی استفاده می‌شد؛ راهکاری که در طرح‌های پیچیده تناوبی (مانند طرح‌های کرت خردشده) کاربرد دارد (Gomez & Gomez, 1984). اما برای حل ریشه‌ای چالش دوم و مدیریت داده‌های نامتعادل، روش‌های نوین مبتنی بر برآورد گرهای حداکثر درستنمایی محدودشده (REML) در بستر مدل‌های آمیخته توسعه یافته‌اند (Payne, 2015). این روش‌ها با قابلیت مدل‌سازی ساختارهای پیچیده کوواریانس (نظیر ساختارهای خودهمبسته $AR(1)$ یا نامنظم UN)، قادرند همبستگی‌های زمانی بین اندازه‌گیری‌های مکرر را تبیین کرده و برآوردهای دقیق و ناریبی از اثرات تیمار ارائه دهند. اهمیت این رویکرد زمانی آشکار می‌شود که بخواهیم در یک آزمایش بلندمدت برای مثال اثرات ترکیبی مدیریت خاک، سیستم

تناوبی و کود دهی را بدون حذف داده‌های سال‌های خاص یا نادیده گرفتن همبستگی‌های سریالی تحلیل کنیم. مطالعه موردی که در ادامه معرفی می‌شود، دقیقاً بر پایه همین رویکرد مدرن و با استفاده از مدل‌های آمیخته طراحی و تحلیل شده است.

۴-۱۰-۸-۱. مطالعه موردی: تحلیل آماری و مدل‌سازی روند در آزمایش‌های بلندمدت تناوبی

در این مطالعه موردی، از داده‌های عملکرد دانه گندم زمستانه به عنوان گیاه آزمایشی در یک دوره ۲۰ ساله (از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۰) استفاده شده است.^۱ این مجموعه داده، بخشی از آزمایش بلندمدت مشهور تناوب زراعی-علوفه‌ای ووبورن^۲ با شناسه اختصاصی W/RN/3 است که در مزرعه آزمایشی ووبورن، واقع در ۴۰ کیلومتری شمال ایستگاه تحقیقاتی روتامستد^۳ در بریتانیا اجرا می‌شود (Glendining et al., 2022). هدف بنیادین این پژوهش درازمدت، ارزیابی و مقایسه اثرات کشت مستمر گیاهان زراعی در مقابل تناوب‌های شامل گیاهان علوفه‌ای-پوششی بر پایداری تولید محصول، دینامیک مواد آلی و حفظ حاصلخیزی خاک بوده است. در تحقیقات مدرن نظام‌های زراعی، دسترسی به چنین سری‌های زمانی طولانی‌مدتی برای درک عمیق برهم‌کنش‌های پیچیده بین مدیریت تناوب و تغییرات حاصلخیزی خاک، امری اجتناب‌ناپذیر و حیاتی محسوب می‌شود (Johnston et al., 2017).

در این پژوهش جامع که داده‌های آن مبنای تحلیل آماری قرار گرفته است، شش سیستم تناوبی به عنوان تیمارهای کرت اصلی مورد ارزیابی قرار گرفتند که با کدهای

۱. داده‌های خام این آزمایش در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۰ در مقاله پاینه (Payne, 2015) جدول ۳ صفحه ۷۷۶ ارایه شده است. همچنین داده‌های خام آزمایش با شناسه اختصاصی W/RN/3، از پایگاه داده‌های الکترونیکی آرشیو روتامستد (e-RA) به آدرس <https://www.era.rothamsted.ac.uk/dataset/wrn3/01-WH7618> قابل استخراج هستند.

2. Woburn ley-arable experiment

3. Rothamsted research

اختصاصی نام‌گذاری شده‌اند: ۱) تناوب تمام زراعی (AB)، ۲) تناوب زراعی دارای آیش (AF)، ۳) تناوب شامل سه سال گیاه پوششی گراس (Ln3)، ۴) تناوب شامل شش سال گیاه پوششی گراس (Ln6)، ۵) تناوب محصولات ردیفی (WCF) و ۶) کشت مستمر گندم (WW) که به عنوان شاهد برای سنجش پایداری در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی برهم‌کنش مدیریت حاصلخیزی با سیستم‌های تناوبی، چهار سطح کود نیتروژن (صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) به عنوان عامل کرت فرعی به تمام کرت‌های اصلی اعمال گردید (Poulton, 1996). ساختار اجرایی این آزمایش بر پایه یک طراحی با شروع پلکانی بنا شده است؛ بدین صورت که تیمارهای تناوبی در سال‌های متوالی و هر کدام در یک بلوک جداگانه آغاز شدند تا اثرات سال تقویمی با مرحله چرخش تناوب اشتباه گرفته نشود. در نهایت، این آرایش منجر به ایجاد یک طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ساختار کرت‌های خردشده گردید که در آن سال شروع نقش بلوک را ایفا می‌کند. این نوع طراحی پیشرفته، برای آزمایش‌های بلندمدت تناوبی که نیازمند تفکیک اثرات تجمعی تناوب از نوسانات سالانه محیطی هستند، بسیار حیاتی است و به محققان اجازه می‌دهد تا پیچیدگی‌های اکولوژیک سیستم‌های زراعی را با دقت آماری بالا مدل‌سازی کنند (Sieling and Christen, 2015; Gomez and Gomez, 1984).

همچنین در این پژوهش، به منظور تبیین دقیق پویایی عملکرد در طول دو دهه، مدل آماری در چارچوب مدل‌های خطی آمیخته طراحی گردید. در ساختار این مدل، سال‌ها به عنوان اثرات تصادفی (برای تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط اقلیمی آینده) و تیمارهای تناوب زراعی و سطوح نیتروژن به عنوان اثرات ثابت در نظر گرفته شدند. نوآوری اصلی در روش تحلیلی این مطالعه، مدل‌سازی روند تغییرات زمانی با استفاده از چندجمله‌ای‌های متعامد^۱ تا درجه چهارم است. این تکنیک به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا اثرات محیطی نوسانی (اثر سال) را از روندهای مدیریتی بلندمدت (مانند اثر تجمعی تناوب یا کود)

تفکیک نماید (Piepho et al., 2003). با توجه به ماهیت تکراری اندازه‌گیری‌ها بر روی کرت‌های ثابت در طول ۲۰ سال، داده‌ها دارای همبستگی سریالی هستند. بنابراین فرآیند تحلیل با بررسی ناهمگنی واریانس خطا در سال‌های مختلف آغاز می‌شود و در صورت معنی‌داری، از مدل‌های واریانس ناهمگن استفاده می‌گردد. در این مطالعه از ساختارهای کوواریانس پیشرفته نظیر خودهمبسته مرتبه اول (AR1) استفاده شده است. این ساختار فرض می‌کند که عملکرد هر سال، بیشترین همبستگی را با سال قبل دارد و این وابستگی با گذشت زمان کاهش می‌یابد؛ فرضی که با واقعیت بیولوژیک سیستم‌های زراعی و داده‌های پیوسته سالانه سازگاری کامل دارد (Payne, 2015; Gomez & Gomez, 1984). انتخاب صحیح این ساختار کوواریانس، ضمن کنترل خطای نوع اول، دقت آزمون‌های مقایسه میانگین (به‌ویژه در بررسی برهم‌کنش تناوب و زمان) را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد. کد نرم‌افزار SAS جهت تحلیل داده‌های این آزمایش (مستخرج از جدول ۳ مقاله پاینه (Payne, 2015)) در ادامه ارائه می‌گردد.

DATA payne_rotation;

INPUT Rotation \$ N_rate Year Yield @@;

DATALINES;

AB 0 1981 3.84 AB 70 1981 6.59 AB 140 1981 7.49 AB 210 1981 7.39
AF 0 1981 3.06 AF 70 1981 6.32 AF 140 1981 7.61 AF 210 1981 7.78
Ln3 0 1981 5.82 Ln3 70 1981 7.52 Ln3 140 1981 8.12 Ln3 210 1981 7.40
Ln6 0 1981 6.47 Ln6 70 1981 8.64 Ln6 140 1981 8.35 Ln6 210 1981 8.16
WCF 0 1981 4.39 WCF 70 1981 6.35 WCF 140 1981 7.15 WCF 210 1981 6.72
WW 0 1981 3.32 WW 70 1981 6.27 WW 140 1981 7.34 WW 210 1981 7.52

داده‌های سال اول آزمایش

·
·
·

AB 0 2000 1.45 AB 70 2000 4.54 AB 140 2000 4.52 AB 210 2000 5.53
AF 0 2000 0.96 AF 70 2000 4.87 AF 140 2000 6.28 AF 210 2000 7.39
Ln3 0 2000 3.40 Ln3 70 2000 5.76 Ln3 140 2000 6.32 Ln3 210 2000 6.64
Ln6 0 2000 3.72 Ln6 70 2000 5.97 Ln6 140 2000 6.50 Ln6 210 2000 6.84
WCF 0 2000 2.25 WCF 70 2000 5.04 WCF 140 2000 5.48 WCF 210 2000 5.92
WW 0 2000 1.79 WW 70 2000 4.76 WW 140 2000 5.28 WW 210 2000 5.95

داده‌های سال بیستم آزمایش

RUN;

PROC MEANS DATA=payne_rotation NOPRINT;

```

VAR Year;
OUTPUT OUT=means MEAN=MeanYear;
RUN;
DATA rotation_ready;
  SET payne_rotation;
  IF _N_ = 1 THEN SET means;
  Year_Lin = Year - MeanYear;
  Year_Quad = Year_Lin ** 2;
  Plot_ID = CATS(Rotation, "_", N_rate);
RUN;
PROC MIXED DATA=rotation_ready METHOD=REML;
  CLASS Year Rotation N_rate Plot_ID;
  MODEL Yield = Rotation N_rate
    Year_Lin Year_Quad
    Rotation*N_rate
    Rotation*Year_Lin N_rate*Year_Lin
    Rotation*Year_Quad N_rate*Year_Quad
    / DDFM=KR SOLUTION OUTP=Predicted_Data;
  RANDOM Intercept / SUBJECT=Year;
  REPEATED / SUBJECT=Plot_ID GROUP=Year;
  LSMEANS Rotation / DIFF ADJUST=TUKEY;
  LSMEANS Rotation*N_rate / SLICE=Rotation DIFF ADJUST=TUKEY;
  TITLE 'Replication of Payne (2015) Analysis with Panel Plot';
RUN;
PROC SORT DATA=Predicted_Data; BY Rotation N_rate Year; RUN;

PROC MEANS DATA=Predicted_Data NOPRINT;
  BY Rotation N_rate Year;
  VAR Pred;
  OUTPUT OUT=Plot_Ready MEAN=Mean_Pred;
RUN;
ODS GRAPHICS ON / WIDTH=10in HEIGHT=8in;
PROC SGPanel DATA=Plot_Ready;
  PANELBY Rotation / COLUMNS=3 ROWS=2 UNISCALE=ALL
  NOVARNAME;
  SERIES X=Year Y=Mean_Pred / GROUP=N_rate
  LINEATTRS=(THICKNESS=2);
  COLAXIS LABEL="Year" VALUES=(1981 TO 2000 BY 4);
  ROWAXIS LABEL="Grain Yield (t/ha)" GRID;

```

TITLE "Long-term Yield Trends by Rotation and Nitrogen Rate (1981-2000)";
 RUN;
 ODS GRAPHICS OFF;

در دستور جامع ارائه شده، فرآیند تحلیل داده‌های پیچیده تناوبی در چهار گام متوالی و پیوسته سازماندهی شده است. در گام نخست، به منظور مدیریت بهینه فضای نوشتاری و ورود کارآمد داده‌های حجیم ۲۰ ساله، از دستور INPUT همراه با علامت کنترل @@ استفاده شده است؛ این تکنیک به نرم‌افزار اجازه می‌دهد تا رکوردهای متعدد داده را به صورت پیوسته از روی یک سطر بخواند و ساختار طولی داده‌ها را با کمترین حجم کدنویسی ایجاد نماید. گام دوم، به آماده‌سازی آماری داده‌ها برای تحلیل روند اختصاص دارد. برای شروع تحلیل روند، ابتدا میانگین کل سال‌ها را از تک‌تک سال‌های آزمایش کم می‌کنیم تا متغیر زمان نرمال شده (Year_Lin) به دست آید؛ سپس این عدد جدید را به توان دو می‌رسانیم (Year_Quad). این تکنیک پیش‌پردازش، جایگزین ساده و کارآمدی برای ماتریس‌های متعامد پیچیده است که ضمن حفظ ماهیت روند، مشکل هم‌خطی بین اثرات خطی و درجه دوم زمان را مرتفع ساخته و پایداری محاسبات مدل رگرسیونی را تضمین می‌کند. همچنین، شناسه منحصر به فردی برای هر کرت آزمایشی (Plot_ID) تعریف شده است تا نرم‌افزار قادر به شناسایی واحد تکرار در طول زمان باشد. هسته اصلی تحلیل در گام سوم و با فراخوانی رویه PROC MIXED اجرا می‌شود. در مدل‌سازی اثرات ثابت (خط MODEL)، علاوه بر اثرات اصلی سیستم تناوبی و سطح کود، متغیرهای پیوسته روند زمان (خطی و درجه دو) و برهم‌کنش آن‌ها با تیمارها وارد مدل شده‌اند؛ این ساختار به پژوهشگر امکان می‌دهد تا نه تنها تفاوت میانگین عملکرد سیستم‌ها، بلکه تفاوت در شکل منحنی پایداری آن‌ها در طول زمان را نیز آزمون کند. در بخش اثرات تصادفی، دستور RANDOM Intercept / SUBJECT=Year سال‌ها را به عنوان نمونه‌ای تصادفی از شرایط اقلیمی در نظر می‌گیرد. ویژگی متمایز این دستور در خط REPEATED نهفته است؛ جایی که با استفاده از گزینه GROUP=Year، فرض

کلاسیک همگنی واریانس کنار گذاشته شده و به مدل اجازه داده می‌شود تا برای هر سال زراعی، واریانس خطای جداگانه‌ای برآورد کند. این رویکرد (استفاده از واریانس باقیمانده ناهمگن^۱) دقیقاً منطبق با متدولوژی پیشنهادی پاینه (Payne, 2015) است و ناهمگنی ناشی از نوسانات اقلیمی شدید در آزمایش‌های طولانی مدت را کنترل می‌کند.

در گام نهای، تمرکز بر مصورسازی نتایج جهت تفسیر بیولوژیک دقیق‌تر است. از آنجا که نمایش میانگین کلی سیستم‌ها ممکن است اثرات برهم‌کنش با کود نیتروژن را پنهان کند، از رویه گرافیکی پیشرفته PROC SGPPANEL بهره گرفته شده است. این رویه با دستور PANELBY Rotation، فضای ترسیم را به شش پانل مجزا (به تفکیک سیستم‌های تناوبی) تقسیم می‌کند و در هر پانل، چهار خط روند مجزا (بر اساس سطوح نیتروژن) را ترسیم می‌نماید. استفاده از محورهای اختصاصی پانل (COLAXIS و ROWAXIS) و میانگین‌گیری از مقادیر پیش‌بینی شده مدل (Pred)، منجر به تولید نمودارهایی هموار و گویا می‌شود که به وضوح نشان می‌دهند آیا افزایش کود نیتروژن در یک سیستم تناوبی خاص (مثلاً گندم دائم) توانسته است جلوی زوال عملکرد در طول زمان را بگیرد یا خیر.

نتایج حاصل از تحلیل پیشرفته مدل آمیخته بر روی داده‌های ۲۰ ساله این پژوهش، تصویر بسیار شفاف و دقیقی از دینامیک پایداری عملکرد در سیستم‌های مختلف تناوبی ارائه می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۴-۴۵ مشاهده می‌شود، علاوه بر اثرات اصلی مورد انتظار (سیستم تناوبی و کود نیتروژن) که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند، برهم‌کنش‌های پیچیده زمانی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تفسیر نتایج ایفا می‌کنند. به طور مشخص، معنی‌داری اثر متقابل تناوب $\times$ روند درجه دو زمان یافته‌ای کلیدی است که اثبات می‌کند شکل منحنی تغییرات عملکرد در طول زمان برای همه سیستم‌ها یکسان نبوده است؛ در حالی که برخی سیستم‌ها روندی پایدار یا صعودی را تجربه کرده‌اند، برخی دیگر در طول دو دهه دچار افت یا نوسانات شدید شده‌اند. همچنین معنی‌داری اثر

1. Heterogeneous residual variance

مقابل روندها $\times$ کود ($P < 0.05$) نیز نشان می‌دهد که پاسخ گیاه به کود نیتروژن نیز در طول زمان ثابت نمانده و دستخوش تغییر شده است. مقایسه میانگین‌های کلی سیستم‌ها در جدول ۴-۴۶، برتری مطلق تناوب‌های طولانی‌مدت را آشکار می‌سازد. سیستم گندم دائم (WW) با میانگین عملکرد ۵/۳۶ تن در هکتار، در پایین‌ترین رتبه قرار گرفته است که نشان‌دهنده ناپایداری کشت تک‌محصولی در بلندمدت است. در نقطه مقابل، سیستم‌های تناوبی که شامل فاز گیاهان علوفه‌ای و لگوم بوده‌اند (به‌ویژه Ln6 و Ln3)، به ترتیب با ۶/۸۴ و ۶/۵۴ تن در هکتار، بیشترین عملکرد را ثبت کرده‌اند. اختلاف معنی‌دار ۱/۴۸ تنی بین در تیمار تناوبی Ln6 و WW، بیانگر اثر خالص تناوب است که فراتر از تأمین صرف مواد غذایی بوده و احتمالاً ریشه در بهبود بیولوژی خاک، ساختار فیزیکی و کنترل بیولوژیک آفات و بیماری‌ها دارد. اما شاید ظریف‌ترین یافته این تحلیل در جدول ۴-۴۷ (آزمون برش‌دهی) و شکل ۴-۱۸ (نمودارهای پانلی) نهفته باشد. اگرچه مصرف کود نیتروژن در تمام سیستم‌ها باعث افزایش عملکرد شده است، اما شدت وابستگی سیستم‌ها کاملاً متفاوت است. سیستم‌های فقیر مانند آیش-گندم (AF) و گندم دائم (WW) با آماره‌های F بسیار بزرگ (به ترتیب ۲۵۵ و ۱۹۲) واکنش بسیار شدیدی به کود نشان داده‌اند؛ این بدان معناست که این سیستم‌ها بدون تزریق کود شیمیایی دچار سقوط عملکرد می‌شوند. در مقابل، سیستم پایدار Ln6 با کمترین آماره F (۱۴۹)، وابستگی کمتری به کود شیمیایی داشته است. نمودارهای پانلی نیز به وضوح نشان دادند که حتی در بالاترین سطح مصرف کود (۲۱۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار)، عملکرد سیستم گندم دائم (WW) نتوانسته است به عملکرد سیستم Ln6 برسد. این نتیجه‌گیری، پیام مهمی برای مدیریت پایداری دارد که کود شیمیایی نمی‌تواند جایگزین ضعف‌های ساختاری یک سیستم تناوبی ضعیف شود و مدیریت صحیح تناوب، پیش‌نیاز اصلی برای دستیابی به پایداری عملکرد و کارایی مصرف نهاده‌هاست.

در مجموع این مطالعه موردی با داده‌های واقعی به روشنی نشان داد که در تحلیل آزمایش‌های بلندمدت زراعی، اکتفا به روش‌های کلاسیک (مانند آنالیز واریانس ساده

برای هر سال) می‌تواند گمراه‌کننده باشد. استفاده از مدل‌های خطی آمیخته با ساختار کوواریانس ناهمگن و مدل‌سازی روند زمان با چندجمله‌ای‌ها، به ما اجازه داد تا ۱. نوسانات شدید محیطی سالانه را کنترل کنیم. ۲. تفاوت‌های ظریف در پایداری زمانی سیستم‌ها را شناسایی کنیم (که با مقایسه میانگین ساده دیده نمی‌شد). ۳. اثبات کنیم که پتانسیل تولید در سیستم‌های تناوبی متنوع، حتی با مصرف کود کمتر، بالاتر و پایدارتر از سیستم‌های تک‌کشتی متکی به نهاده‌های شیمیایی است. بنابراین، این روش تحلیلی ابزاری قدرتمند برای گذار از پژوهش‌های کوتاه‌مدت به سمت ارزیابی واقعی پایداری در نظام‌های زراعی محسوب می‌شود.

جدول ۴-۴۵. نتایج آزمون اثرات ثابت برای عملکرد دانه گندم در آزمایش ۲۰ ساله تناوبی

منابع تغییر (اثرات ثابت)	درجه آزادی صورت	درجه آزادی مخرج	آماره F
سیستم تناوبی	۵	۱۵۴	۲۲/۳۰ ^{**}
سطح کود نیتروژن	۳	۱۵۴	۴۹۱/۵۰ ^{**}
روند خطی سال	۱	۱۷	۳/۹۳ns
روند درجه دو سال	۱	۱۶/۸	۰/۰۷ns
تناوب × کود	۱۵	۹۱/۲	۲/۴۲ ^{**}
روند خطی × تناوب	۵	۳۶/۶	۲/۲۲ns
روند خطی × کود	۳	۳۶/۶	۴/۴۲ ^{**}
روند درجه دو × تناوب	۵	۶۶/۵	۵/۱۵ ^{**}
روند درجه دو × کود	۳	۶۶/۵	۳/۲۷ [*]

^{*} و ^{**} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد. ns بدون اثر معنی‌دار.

معنی‌داری اثرات متقابل روند زمان با هر دو عامل تناوب و کود (سه ردیف آخر) نشان می‌دهد که دینامیک پایداری عملکرد در طول زمان، هم تابع سیستم تناوبی و هم تابع سطح تغذیه بوده است.

جدول ۴-۶. مقایسه میانگین عملکرد تعدیل‌شده سیستم‌های تناوبی و تفاوت آن‌ها با شاهد (گندم دائم)

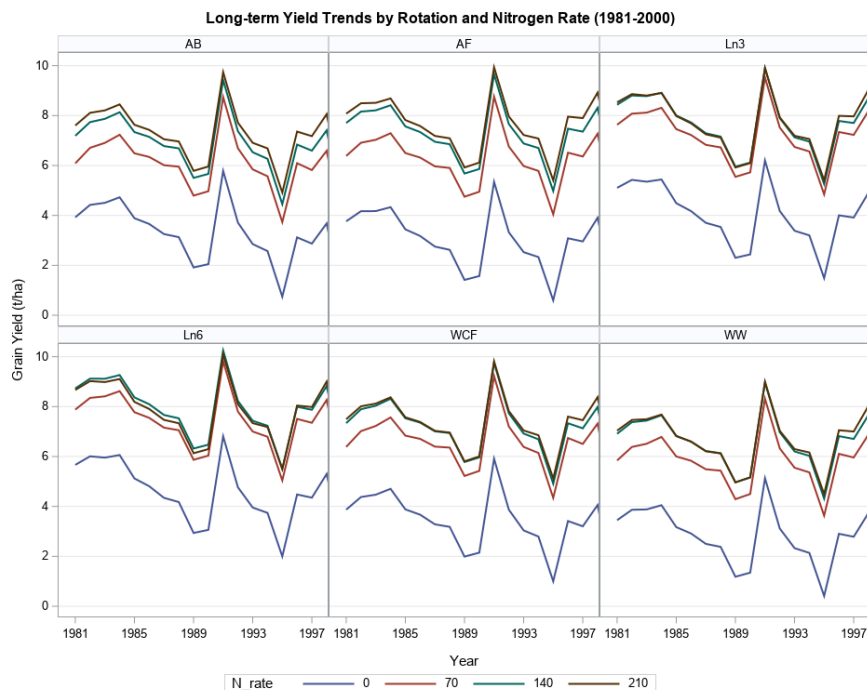
تفاوت با شاهد (t ha ⁻¹)	میانگین خطای استاندارد	میانگین عملکرد (t ha ⁻¹)	کد سیستم	شرح سیستم تناوبی
+۱/۴۸	۰/۲۶	۶/۸۴ a	Ln6	تناوب ۶ ساله (با ۳ سال علوفه)
+۱/۱۸	۰/۲۶	۶/۵۴ b	Ln3	تناوب ۳ ساله (با ۱ سال علوفه)
+۰/۶۳	۰/۲۶	۶/۰۰ c	WCF	تناوب محصولات ردیفی
+۰/۵۸	۰/۲۶	۵/۹۴ c	AF	تناوب آیش-گندم
+۰/۳۶	۰/۲۶	۵/۷۲ d	AB	تناوب جو-گندم
(شاهد)	۰/۲۶	۵/۳۶ e	WW	گندم دائم

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

جدول ۴-۷. آزمون برش‌دهی برای بررسی معنی‌داری و شدت اثر کود نیتروژن در هر سیستم تناوبی

تفسیر شدت واکنش به کود	آماره F	کد سیستم	شرح سیستم تناوبی
کمترین شدت واکنش	۱۴۹/۰۷**	Ln6	تناوب ۶ ساله (با ۳ سال علوفه)
واکنش متوسط	۱۸۱/۸۲**	Ln3	تناوب ۳ ساله (با ۱ سال علوفه)
واکنش شدید	۱۹۶/۰۵**	WCF	تناوب محصولات ردیفی
واکنش بسیار شدید	۲۵۵/۷۹**	AF	تناوب آیش-گندم
واکنش متوسط	۱۸۶/۷۹**	AB	تناوب جو-گندم
واکنش شدید	۱۹۲/۳۵**	WW	گندم دائم

کاهش آماره F در سیستم‌های علوفه‌ای نشان می‌دهد که این سیستم‌ها وابستگی کمتری به کود شیمیایی برای تولید محصول داشته‌اند.



شکل ۴-۱۸. نمودارهای پانلی روند تغییرات عملکرد گندم در شش سیستم تناوبی مختلف به تفکیک سطوح کود نیتروژن (۰ تا ۲۱۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار). خطوط نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل آمیخته در طول ۲۰ سال هستند. فاصله خطوط در هر پانل نشان‌دهنده واکنش به کود است.

۴-۱۰-۸-۲. نکات تکمیلی و راهنمای عملیاتی در تحلیل آزمایش‌های تناوبی

با توجه به توضیحات ارائه‌شده و ماهیت پویای آزمایش‌های بلندمدت تناوبی، پژوهشگران با چالش‌های آماری ویژه‌ای برای تجزیه و تحلیل این آزمایش‌ها روبرو هستند که فراتر از تحلیل‌های متداول است. بر اساس جمع‌بندی نظرات صاحب‌نظران، هفت چالش کلیدی در این آزمایش‌ها شناسایی شده است که غفلت از آن‌ها می‌تواند منجر به استنتاج‌های نادرست شود. جدول ۴-۴۸ به عنوان یک ماتریس تصمیم‌گیری، این چالش‌ها را به همراه راهکارهای آماری استاندارد و منابع معتبر خلاصه می‌کند.

جدول ۴-۴۸. ماتریس جامع چالش‌ها و راهکارهای آماری پیشرفته
در تحلیل آزمایش‌های بلندمدت با تیمارهای تناوبی

شرح چالش یا محدودیت در داده‌ها	راهکار آماری و روش‌شناسی پیشنهادی	مراجع کلیدی
۱. ناهمگنی واریانس خطا (تغییرپذیری متفاوت داده‌ها در سال‌های مختلف به دلیل نوسانات اقلیمی)	الف) اجرای آزمون همگنی (مانند بارتلت) پس از تحلیل سالانه. ب) استفاده از روش وزن‌دهی معکوس واریانس ^۱ برای ترکیب نتایج (وزن‌دهی بر اساس دقت هر سال). ج) استفاده از روش REML برای برآورد مستقیم واریانس‌های ناهمگن.	Payne (2015) Gilmour et al. (1995) Payne (2015)
۲. ساختار همبستگی غیریکنواخت (کاهش همبستگی بین داده‌های یک کرت با افزایش فاصله زمانی)	الف) اجتناب از آنالیز واریانس ساده (ANOVA) که فرض استقلال خطا دارد. ب) برازش ساختارهای کوواریانس پیشرفته نظیر AR(1) یا UN در مدل‌های آمیخته.	Roy et al. (2007) Galwey (2006)
۳. اثر موقعیت در تناوب (عملکرد یک محصول تابع گیاه پیشین است، نه فقط ذات تناوب)	الف) وارد کردن گیاه آزمایشی به عنوان یک فاکتور ثابت در تناوب‌ها ب) حصول اطمینان از حضور تمام فازهای تناوب در هر سال برای تفکیک اثر سال از اثر موقعیت.	Johnston et al. (2017) Piepho et al. (2003)
۴. فقدان تکرار مکانی (تکرارها فقط از طریق سال‌های مختلف تأمین می‌شوند)	استفاده از مدل‌های آمیخته که در آن سال و تعامل سال × مکان به عنوان اثرات تصادفی در نظر گرفته می‌شوند تا استنتاج به جامعه‌ای از سال‌ها تعمیم یابد.	Gomez & Gomez (1984)
۵. مقایسه محصولات متفاوت (چگونگی مقایسه عملکرد گندم با کلزا یا ذرت در یک سیستم)	تبدیل عملکرد فیزیکی (کیلوگرم در هکتار) به معیارهای استاندارد مشترک نظیر ارزش اقتصاد (درآمد خالص) یا محتوای انرژی-کالری جهت تحلیل یکپارچه سیستم.	Li et al. (2023)

1. Inverse variance weighting

ادامه جدول ۴-۴۸

شرح چالش یا محدودیت در داده‌ها	راهکار آماری و روش‌شناسی پیشنهادی	مراجع کلیدی
۶. افزودن تیمارهای جانبی جدید	الف) انتقال اثرات متقابل مرتبه بالا (مثلاً تناوب $\times$ درجه سوم کود) به بخش خطای باقیمانده.	Payne (2006)
(پیچیدگی ناشی از تغییر طرح در میانه آزمایش)	ب) استفاده از توابع اسپلاین ^۱ برای مدل‌سازی روندهای غیرخطی و ناگهانی ناشی از تیمار جدید.	Verbyla et al. (1999)
۷. تغییر در تیمارهای پایه (به عنوان مثال تغییر روش خاک‌ورزی یا سموم با پیشرفت تکنولوژی در طول زمان)	الف) افزودن متغیرهای کمکی برای کنترل شرایط خاص هر سال.	Poulton (1996)
	ب) انجام تحلیل‌های مجزا برای هر سیکل تناوبی در صورت تغییرات بنیادین پارادایم مدیریتی	Singh and Jones (2002)

در پایان این بخش باید تأکید کرد که حتی متخصصان آمار مجرب نیز ممکن است با پیچیدگی‌های خاص آزمایش‌های بلندمدت تیمارهای تناوبی کمتر آشنا باشند. برخلاف آزمایش‌های کوتاه‌مدت که اشتباهات طراحی در تکرار سال بعد قابل جبران است، در مطالعات بلندمدت، عواقب تصمیمات آماری نادرست می‌تواند فاجعه‌بار باشد؛ چرا که منابع ارزشمند زمانی و مالی محققان ممکن است صرف مطالعه‌ای شود که نتایج آن به دلیل ضعف در طراحی (مثلاً عدم حضور تمام فازها) یا تحلیل (مثلاً نادیده گرفتن همبستگی سریالی) فاقد اعتبار است. این واقعیت، ضرورت همکاری تنگاتنگ تیم پژوهشی با متخصصان آمار زیستی را آشکار می‌سازد. همان‌گونه که کوکران (Cochran, 1939) به درستی اشاره کرده است "متخصص آمار که در طراحی و تحلیل آزمایش‌های بلندمدت مشارکت می‌کند، مسئولیتی سنگین بر عهده دارد". بنابراین، پژوهشگران نه تنها موظف به استفاده از روش‌های صحیح هستند، بلکه باید کارآمدترین شیوه‌ها را برای

مدیریت تغییرات ناگزیر در طول زمان به کار گیرند تا ضمن حفظ یکپارچگی علمی، از داده‌های انباشته‌شده حداکثر دانش کاربردی را استخراج نمایند.

۴-۱۰-۹. ملاحظات عملیاتی آماری: مدیریت داده‌های گمشده و پایش کیفیت

اجرای موفقیت‌آمیز و استخراج دانش معتبر از آزمایش‌های بلندمدت، فراتر از انتخاب صحیح مدل آماری نهایی، در گرو توجه ویژه به چالش‌های عملیاتی است که در بستر زمان پدیدار می‌شوند. واقعیت تلخ اما انکارناپذیر در پژوهش‌های زراعی این است که حتی پیشرفته‌ترین مدل‌های آمیخته و ساختارهای کوواریانس پیچیده نیز در برابر داده‌های بی‌کیفیت یا ناقص، ناتوان هستند (اصل ورودی نامعتبر، خروجی نامعتبر). در یک دوره پژوهشی ۱۰ یا ۲۰ ساله، وقوع حوادثی نظیر خرابی تجهیزات، خطای انسانی در ثبت داده‌ها، تغییر پرسنل، یا از بین رفتن بخشی از کرت‌ها بر اثر تنش‌های محیطی غیرقابل اجتناب است. بنابراین، پژوهشگر آزمایش‌های بلندمدت نه تنها باید یک تحلیل‌گر آماری باشد، بلکه باید به عنوان یک مدیر داده نیز عمل کند. هدف از این بخش، ارتقای سواد داده‌ای^۱ در مواجهه با چالش‌های اطلاعاتی است تا فقدان داده یا وجود مقادیر پرت، نه به عنوان یک بن‌بست تحلیلی، بلکه به عنوان مسئله‌ای قابل مدیریت تلقی گردد. در این راستا، فرآیند تضمین کیفیت نتایج را می‌توان در سه مرحله متوالی شامل پیشگیری و پایش کیفیت، تشخیص ماهیت داده‌های گمشده و اتخاذ راهکار درمانی مناسب طبقه‌بندی نمود. در ادامه هر یک از این موارد به اختصار توضیح داده می‌شوند.

• **پیشگیری و پایش کیفیت، نخستین و مؤثرترین گام در مدیریت داده‌ها، استقرار یک نظام پایش مستمر جهت به حداقل رساندن خطاهاست.** در آزمایش‌های بلندمدت، تغییر روش‌های اندازه‌گیری یا کالیبراسیون تجهیزات در طول زمان می‌تواند منجر به ایجاد روندهای مصنوعی در داده‌ها شود. لذا، ثبت دقیق فراده‌ها^۲ (داده‌هایی برای داده‌ها) شامل

1. Data literacy

2. Metadata

تاریخ دقیق نمونه‌برداری، روش آنالیز آزمایشگاهی و شرایط محیطی حاکم در زمان ثبت داده‌ها ضروری است. همچنین، استفاده از نمودارهای کنترل کیفیت و تکنیک‌های گرافیکی اکتشافی (مانند باکس پلات^۱) پس از هر فصل زراعی، امکان شناسایی زود هنگام داده‌های پرت و اصلاح آن‌ها پیش از ورود به فاز نهایی تحلیل را فراهم می‌آورد.

• **تشخیص مکانیزم داده‌های گمشده، هنگامی که با فقدان داده در مجموعه‌ای از مشاهدات بلندمدت مواجه می‌شویم، پیش از هرگونه اقدام محاسباتی، شناخت دقیق مکانیزم وقوع نقص از منظر آماری ضروری است.** بر اساس طبقه‌بندی روبین (Rubin, 1976)، داده‌های گمشده به سه دسته متمایز تقسیم می‌شوند که هر یک نیازمند رویکردی متفاوت هستند. دسته نخست، گمشده کاملاً تصادفی^۲ است؛ در این حالت، احتمال فقدان داده هیچ ارتباطی با مقادیر متغیر وابسته یا تیمارهای آزمایشی ندارد (برای مثال، شکستن تصادفی ظرف نمونه در آزمایشگاه). اگر داده‌ها از این نوع باشند، حذف آن‌ها نتایج را اریب نمی‌کند. دسته دوم، گمشده تصادفی^۳ نامیده می‌شود که در آن احتمال گم شدن داده به متغیرهای مشاهده‌شده دیگر وابسته است (مثلاً در سال‌های خشکسالی، احتمال عدم جوانه زنی و فقدان داده عملکرد بیشتر است)، اما به مقدار خودصفت گمشده بستگی ندارد. دسته سوم و چالش‌برانگیزترین حالت، گمشده غیر تصادفی^۴ است؛ در این سناریو، فقدان داده مستقیماً ناشی از مقدار خود متغیر است (مانند زمانی که گیاهان حساس به یک تیمار خاص از بین می‌روند و داده‌ای ثبت نمی‌شود). در چنین شرایطی، نادیده گرفتن داده‌های گمشده می‌تواند منجر به نتایج گمراه‌کننده و برآوردهای اریب از میانگین تیمارها شود.

1. Box plot

ابزاری گرافیکی و استاندارد برای نمایش توزیع داده‌ها بر اساس خلاصه پنج عددی (شامل کمترین مقدار، چارک اول، میانه، چارک سوم و بیشترین مقدار).

2. Missing vompelately at random (MCAR)

3. Missing at random (MAR)

4. Missing not at random (MNAR)

• **استراتژی‌های برخورد با داده‌های گمشده**، پس از تشخیص ماهیت داده‌های گمشده، انتخاب روش مناسب برای مدیریت آن‌ها در تحلیل آماری اهمیت می‌یابد. استفاده از رویکردهای سنتی نظیر حذف لیستی که در آن کل ردیف‌های دارای نقص از تحلیل خارج می‌شوند، در آزمایش‌های بلندمدت به هیچ وجه توصیه نمی‌شود؛ زیرا این کار منجر به کاهش شدید حجم نمونه، کاهش توان آزمون و هدررفت اطلاعات ارزشمند سایر سال‌ها می‌گردد. همچنین، روش‌های ساده‌انگارانه‌ای مانند جایگزینی با میانگین نیز به دلیل کاهش مصنوعی واریانس خطا و دستکاری ساختار همبستگی داده‌ها، از اعتبار علمی ساقط هستند. در مقابل، بهره‌گیری از رویکردهای مدرن آماری راهکارهای معتبرتری را پیش روی پژوهشگران قرار می‌دهد. یکی از کارآمدترین این روش‌ها، استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر درستنمایی نظیر حداکثر درستنمایی محدودشده در بستر مدل‌های آمیخته (مانند رویه PROC MIXED در نرم‌افزار SAS) است. این الگوریتم‌ها قادرند داده‌های گمشده از نوع تصادفی (MAR) را به صورت درونی مدیریت کرده و بدون نیاز به حذف یا جایگزینی دستی، از تمام اطلاعات موجود در ماتریس داده‌ها برای برآورد پارامترهای مدل استفاده نمایند (Verbeke, 2000). علاوه بر این، در شرایط پیچیده‌تر، تکنیک انتساب چندگانه^۱ (مانند رویه PROC MI در نرم‌افزار SAS) به عنوان یک راهکار پیشرفته پیشنهاد می‌شود. در این روش، مقادیر گمشده چندین بار با مقادیر محتمل (بر اساس توزیع آماری سایر داده‌ها) جایگزین شده و نتایج حاصل از این مجموعه‌های داده کامل با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا عدم قطعیت ناشی از فقدان داده در محاسبه خطای استاندارد نهایی لحاظ گردد (Gelman et al., 1998). بنابراین، انتخاب استراتژی مناسب، مستلزم درک عمیق از علت یولوژیک فقدان داده و استفاده از ابزارهای آماری پیشرفته‌ای است که یکپارچگی ساختار واریانس-کوواریانس آزمایش را حفظ نمایند.

۴-۱۱. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل چهارم

فصل چهارم به عنوان تخصصی‌ترین و محوری‌ترین بخش این کتاب، به تشریح قلب تپنده روش‌شناسی در پژوهش‌های نظام‌های زراعی، یعنی طراحی و تحلیل آماری آزمایش‌های بلندمدت اختصاص یافت. این فصل با عبور از تعاریف مقدماتی، بر چالش‌برانگیزترین ویژگی این آزمایش‌ها، یعنی ماهیت طولی و همبسته داده‌ها تمرکز نمود و نشان داد که چرا ابزارهای کلاسیک آماری نظیر آنالیز واریانس ساده، در مواجهه با پیچیدگی‌های زمان و مکان کارایی خود را از دست می‌دهند. در بخش طراحی، دوگانگی طراحی استاندارد و طراحی پلکانی به عنوان پاسخی راهبردی به معضل همیشگی تداخل اثر سن و اثر سال تبیین گردید و راهکارهای عملیاتی برای تفکیک این اثرات، حتی در غیاب طرح‌های پیچیده، ارائه شد. نقطه ثقل مباحث این فصل، گذار از فرض استقلال خطاها به سمت مدل‌سازی ساختار همبستگی بود. با ارائه مطالعات موردی و محاسباتی دقیق، گام‌به‌گام نشان داده شد که چگونه پژوهشگران می‌توانند با بهره‌گیری از مدل‌های خطی آمیخته و رویه‌های پیشرفته‌ای نظیر PROC MIXED در نرم‌افزار SAS، بهترین ساختار کوواریانس را بر اساس شاخص‌های برازش (AIC/BIC) انتخاب کرده و واریانس‌های ناهمگن در سال‌های مختلف را کنترل نمایند. همچنین، اهمیت حیاتی تکنیک‌هایی نظیر برش‌دهی اثرات متقابل در کالبدشکافی پویایی واکنش تیمارها در بستر زمان مورد تأکید قرار گرفت. علاوه بر مدل‌های خطی، دریچه‌ای نوین به سوی تحلیل‌های پیشرفته‌تر نظیر مدل‌سازی غیرخطی برای تبیین پدیده‌های اشباع‌شونده و تحلیل نقطه شکست برای شناسایی دقیق زمان تغییر فاز سیستم گشوده شد. اوج پیچیدگی تحلیل‌ها در بررسی آزمایش‌های تناوبی (مطالعه موردی پاینه) نمود یافت، جایی که با استفاده از چندجمله‌ای‌های زمان و ساختارهای کوواریانس ناهمگن، اثبات شد که پایداری سیستم‌های زراعی تابعی پیچیده از مدیریت همزمان تناوب و نهاده‌ها است. در نهایت، با طرح ملاحظات عملیاتی نظیر مدیریت داده‌های گمشده و پایش کیفیت، بر این نکته تأکید شد که

تحلیل آماری نه در خلأ، بلکه در بستری از واقعیت‌های اجرایی رخ می‌دهد و سواد داده‌ای شرط لازم برای موفقیت در این مسیر است. اکنون که با تجهیز به این ابزارهای قدرتمند تحلیلی، امکان تفکیک سیگنال‌های واقعی مدیریتی از نویزهای محیطی فراهم شده است، در فصل پنجم به گام نهایی یعنی تفسیر این نتایج کمی در چارچوب مفاهیم کیفی و شاخص‌های پایداری پرداخته خواهد شد.

منابع

- آینه بند، ا. (۱۳۸۴). تناوب گیاهان زراعی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۴۶۰ صفحه.
- حبیب زاده، ف.، حضرتی، س.، اصغری، ب.، غلامحسینی، م. و نیکجویان، ج. (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد، اسانس و شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط افزایشی گیاه دارویی زوفا (*Hyssopus Officinalis*) و عدس (*Lens culinaris*). پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۵(۳)، ۸۳-۹۹.
- رحیمی، ع. و محمدی، ر. (۱۳۹۸). مقایسه معیارهای آکایک و بیزین در انتخاب مدل‌های آماری برای داده‌های کشاورزی. مجله آمار و کاربردها، ۱۶(۱)، ۸۹-۱۰۴.
- غلامحسینی، م.، بابایی، ح. ر.، منصوری، س. و شریعتی، ف. (۱۴۰۱). اثر آرایش کاشت و تراکم بوته بر عملکرد دانه ژنوتیپ متحمل به ریزش کنجد در کرج و مشهد. مجله نهال و بذر، ۳۸(۳)، ۲۸۳-۳۰۳.
- غلامحسینی، م.، پیغام‌زاده، ک.، منصوری، س. ا.، فرجی، ا. و شریعتی، ف. (۱۴۰۲). بررسی عملکرد کنجد مقاوم به ریزش دانه در تیمارهای مختلف آرایش کاشت و تراکم در گرگان. نشریه تولید گیاهان زراعی، ۱۶(۴)، ۱۳۳-۱۴۸.
- کوچ، ی. (۱۳۹۴). بکارگیری روش آماری تحلیل علیت جهت تفسیر شاخص‌های زیستی خاک. آب و خاک، ۲۹(۶)، ۱۵۴۲-۱۵۵۲.
- فروزش، پ.، ساعد موجشی، آ.، هاشمی نسب، ح. (۱۳۹۴). تحلیل آمار کاربردی و تجزیه طرح‌های آزمایشی با نرم افزار SAS (از مقدماتی تا پیش رفته). انتشارات پوران پژوهش. ۴۵۰ صفحه.
- منصوری، س. (۱۳۸۸). دستورالعمل کاشت، داشت و برداشت کنجد. نشر آموزش کشاورزی، ۱۹ صفحه.

- Akaike, H. (2003). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Amin, M. R., Zhang, J., & Yang, M. (2015). Effects of climate change on the yield and cropping area of major food crops: A Case of Bangladesh. *Sustainability*, 7(1), 898-915.
- Archontoulis, S. V., & Miguez, F. E. (2015). Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107(2), 786-798.
- Bhandari, P. (2025). Statistical Power and Why It Matters | A Simple Introduction. Scribbr. Retrieved March 10, 2025, from <https://www.scribbr.com/statistics/statistical-power>.
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J. S. S. (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(3), 127-135.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). Time series analysis: forecasting and control. John Wiley & Sons.
- Bursztyn, D., & Steinberg, D. M. (2001). Rotation designs for experiments in high-bias situations. *Journal of statistical planning and inference*, 97(2), 399-414.
- Cady, F. B., & Mason, D. D. (1964). Comparison of Fertility Treatments in a Corp Rotation Experiment 1. *Agronomy Journal*, 56(5), 476-479.
- Carey, V. J., & Wang, Y. G. (2001). Mixed-effects models in S and S-PLUS.
- Casler, M. D. (2015). Fundamentals of experimental design: Guidelines for designing successful experiments. *Agronomy Journal*, 107(2), 692-705.
- Cavigelli, M. A., Teasdale, J. R., & Conklin, A. E. (2008). Long-term agronomic performance of organic and conventional field crops in the mid-Atlantic region. *Agronomy journal*, 100(3), 785-794.
- Chen, S. Y., Feng, Z., & Yi, X. (2017). A general introduction to adjustment for multiple comparisons. *Journal of thoracic disease*, 9(6), 1725.
- Clark, E. A., Christie, B. R., & Weise, S. F. (1996). The structure and function of agricultural research. *Canadian journal of plant science*, 76(4), 603-610.
- Cochran, W. G. (1939). Long-term agricultural experiments. Supplement to the *Journal of the Royal Statistical Society*, 6(2), 104-148.

-
- Cochran, W.G. & Cox, G.M. (1957). *Experimental Design*. 2nd Edition, John Wiley and Sons, 615.
- Crossa, J., Vargas, M., Cossani, C. M., Alvarado, G., Burgueño, J., Mathews, K. L., & Reynolds, M. P. (2015). Evaluation and interpretation of interactions. *Agronomy Journal*, 107(2), 736-747.
- Cruz-Castillo, J. G., Ganeshanandam, S., MacKay, B. R., Lawes, G. S., Lawoko, C. R. O., & Woolley, D. J. (1994). Applications of canonical discriminant analysis in horticultural research.
- Deng, L., & Yuan, K. H. (2023). Which method is more powerful in testing the relationship of theoretical constructs? A meta comparison of structural equation modeling and path analysis with weighted composites. *Behavior Research Methods*, 55(3), 1460-1479.
- Di Felice, V., Mancinelli, R., Proulx, R., & Campiglia, E. (2012). A multivariate analysis for evaluating the environmental and economical aspects of agroecosystem sustainability in central Italy. *Journal of environmental management*, 98, 119-126.
- Drinkwater, L. E., Letourneau, D. K., Workneh, F. A. H. C., Van Bruggen, A. H. C., & Shennan, C. (1995). Fundamental differences between conventional and organic tomato agroecosystems in California. *Ecological applications*, 5(4), 1098-1112.
- Edmondson, R. N. (2005). Past developments and future opportunities in the design and analysis of crop experiments. *The Journal of Agricultural Science*, 143(1), 27-33.
- Finlay, K. W., & Wilkinson, G. N. (1963). The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian journal of agricultural research*, 14(6), 742-754.
- Galwey, N.W. (2006). *Introduction to mixed modelling: Beyond regression and analysis of variance*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Gelman, A., King, G., & Liu, C. (1998). Not asked and not answered: Multiple imputation for multiple surveys. *Journal of the American Statistical Association*, 93(443), 846-857.
- Gilmour, A. R., Thompson, R., & Cullis, B. R. (1995). Average information REML: an efficient algorithm for variance parameter estimation in linear mixed models. *Biometrics*, 1440-1450.
- Glendining, M., Poulton, P., Macdonald, A., MacLaren C., & Clark, S. (2022). Dataset: Woburn Ley-arable experiment: yields of wheat as first test crop, 1976-2018 Electronic Rothamsted Archive, Rothamsted Research, Harpenden, UK.

- Gholamhoseini, M., AghaAlikhani, M., Sanavy, S. M., & Mirlatifi, S. M. (2013). Interactions of irrigation, weed and nitrogen on corn yield, nitrogen use efficiency and nitrate leaching. *Agricultural Water Management*, 126, 9-18.
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). Statistical procedures for agricultural research. John Wiley & sons.
- Grace, J.B. (2006). Structural equation modeling and natural systems. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Greenacre, M., Groenen, P. J., Hastie, T., d'Enza, A. I., Markos, A., & Tuzhilina, E. (2022). Principal component analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 100.
- Greveniotis, V., Bouloumpasi, E., Zotis, S., Korkovelos, A., Kantas, D., & Ipsilandis, C. G. (2023). Stability dynamics of main qualitative traits in maize cultivations across diverse environments regarding soil characteristics and climate. *Agriculture*, 13(5), 1033.
- Hatheway, W. H. (1961). Convenient plot size. *Agronomy Journal*, 53, 279-280.
- Hair Jr, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., & Ray, S. (2021). Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) using R: A workbook (p. 197). Springer Nature.
- Hu, L. T., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural equation modeling: a multidisciplinary journal*, 6(1), 1-55.
- Janzen, H. H. (1995). The role of long-term sites in agroecological research: a case study. *Canadian journal of soil science*, 75(1), 123-133.
- Jain, A. K., & Dubes, R. C. (1988). Algorithms for clustering data. Prentice-Hall, Inc..
- Johnson, M.K. (2021). Cumulative measurement errors in long-term agronomic studies: Patterns and solutions. *Field Crops Research*, 271, 108254.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Coleman, K., Macdonald, A.J. and White, R.P., 2017. Changes in soil organic matter over 70 years in continuous arable and ley–arable rotations on a sandy loam soil in England. *European Journal of Soil Science*, 69(2), pp.226-238.
- Johnston, A. E., & Poulton, P. R. (2018). The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop

- production and soil fertility; the Rothamsted experience. *European journal of soil science*, 69(1), 113-125.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (6th ed.). Pearson Prentice Hall
- Jones, M. J., & Singh, M. (2000). Time trends in crop yields in long-term trials. *Experimental Agriculture*, 36(2), 165-179.
- Kenward, M. G., & Roger, J. H. (1997). Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics*, 983-997.
- Kline, R. B. (2023). *Principles and practice of structural equation modeling*. Guilford publications.
- Hu, L. T., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural equation modeling: a multidisciplinary journal*, 6(1), 1-55.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2), 164-168.
- Li, W., & Zhang, Y. (2022). Temporal autocorrelation in agricultural experiments: Implications for data analysis. *European Journal of Agronomy*, 134, 126451.
- Li, X., Storkey, J., Mead, A., Shield, I., Clark, I., Ostler, R., ... & Dobermann, A. (2023). A new Rothamsted long-term field experiment for the twenty-first century: principles and practice. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5), 60.
- Liebig, M. A., Abendroth, L. J., Robertson, G. P., Augustine, D., Boughton, E. H., Bagley, G., Busch, D. L., Clark, P., Coffin, A. W., Dalzell, B. J., Dell, C. J., Fortuna, A.-M., Freidenreich, A., Heilman, P., Helseth, C., Huggins, D. R., Johnson, J. M. F., Khorchani, M., King, K., ... Yost, J. (2024). The LTAR Common Experiment: Facilitating improved agricultural sustainability through coordinated cross-site research. *Journal of Environmental Quality*, 53, 787-801.
- Lindenmayer, D. B., & Likens, G. E. (2009). Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in ecology & evolution*, 24(9), 482-486.
- Lipsey, M. W. (1990). *Design Sensitivity: Statistical Power for Experimental Research*. Sage Publications. NewburyPark. CA.
- Littell, R. C. (1989). Statistical analysis of experiments with repeated measurements. *HortScience*, 24(1), 37-40.

- Lleras, C. (2005). Path analysis. *Encyclopedia of Social Measurement*, 3, 25–30.
- López-Bellido, L., López-Bellido, R. J., Castillo, J. E., & López-Bellido, F. J. (2000). Effects of tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 92(6), 1054-1063.
- Loughin, T. M. (2006). Improved experimental design and analysis for long-term experiments. *Crop Science*, 46(6), 2492-2502.
- Loughin, T. M., Roediger, M. P., Milliken, G. A., & Schmidt, J. P. (2007). On the analysis of long-term experiments. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, 170(1), 29-42.
- MacCallum, R. C., Browne, M. W., & Sugawara, H. M. (1996). Power analysis and determination of sample size for covariance structure modeling. *Psychological methods*, 1(2), 130.
- Martin, B., Bennett, J., Cullis, C., Godwin, D., & Mason W. (1998). Assessment of long-term experiments in Australia, Kingston, ACT, Australia. Grains Research and Development Corporation, Barton, ACT, Australia.
- Matthew, C., Lawoko, C. R. O., Korte, C. J., & Smith, D. (1994). Application of canonical discriminant analysis, principal component analysis, and canonical correlation analysis as tools for evaluating differences in pasture botanical composition. *New Zealand journal of agricultural research*, 37(4), 509-520.
- McIntosh, D.L., & Smith, E.B. (2020). Climate change challenges in agricultural experimental designs: A 30-year review. *Agricultural Systems*, 182, 102857.
- McRae, K. B., & Ryan, D. A. J. (1996). Design and planning of long-term experiments. *Canadian journal of plant science*, 76(4), 595-602.
- Mead, R., Gilmour, S. G., & Mead, A. (2012). *Statistical principles for the design of experiments: applications to real experiments* (Vol. 36). Cambridge University Press.
- Miguez, F., Archontoulis, S., & Dokoohaki, H. (2018). Nonlinear regression models and applications. *Applied statistics in agricultural, biological, and environmental sciences*, 401-447.
- Musafiri, C. M., Macharia, J. M., Ng'etich, O. K., Kiboi, M. N., Okeyo, J., Shisanya, C. A., ... & Ngetich, F. K. (2020). Farming systems' typologies analysis to inform agricultural greenhouse gas emissions potential from smallholder rain-fed farms in Kenya. *Scientific African*, 8, e00458.

- Nerurkar, P., Shirke, A., Chandane, M., & Bhirud, S. (2018). Empirical analysis of data clustering algorithms. *Procedia Computer Science*, 125, 770-779.
- Olesen, J. E., Askegaard, M., & Rasmussen, I. A. (2000). Design of an organic farming crop-rotation experiment. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 50(1), 13-21.
- Orchard, B. A., Cullis, B. R., Coombes, N. E., Virgona, J. M., & Klein, T. (2000). Grazing management studies within the Temperate Pasture Sustainability Key Program: experimental design and statistical analysis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(2), 143-154.
- Osborne, J. W., & Costello, A. B. (2004). Sample size and subject to item ratio in principal components analysis. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 9(1).
- Ott, R. L., & Longnecker, M. (2010). *An introduction to statistical methods and data analysis*. Cengage Learning Inc..
- Patterson, H. D. (1964). Theory of cyclic rotation experiments. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26(1), 1-36.
- Payne, R.W. 2006. New and traditional methods for the analysis of unreplicated experiments. *Crop Sci.* 46:2476–2481.
- Payne, R.W. (2015). The design and analysis of long-term rotation experiments. *Agronomy Journal*, 107, 772-785.
- Pearson, R.A., Thompson, J.A., & Wilson, G.W. (2019). Long-term variability in soil properties and its impact on agricultural field experiments. *Agronomy Journal*, 111(3), 456-470.
- Petratis, P. S., Dunham, A. E., & Niewiarowski, P. H. (1996). Inferring multiple causality: the limitations of path analysis. *Functional ecology*, 421-431.
- Piepho, H.P., Büchse, A., & Emrich, K. (2003). A Hitchhiker's Guide to Mixed Models for Randomized Experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190(5), 310–322.
- Poulton, P. R. (1996). The Rothamsted long-term experiments: are they still relevant?. *Canadian journal of plant science*, 76(4), 559-571.
- Poulton, P. R., Powlson, D. S., Glendining, M. J., & Gregory, A. S. (2024). Why do we make changes to the long-term experiments at Rothamsted?. *European Journal of Agronomy*, 154, 127062.
- Preece, D. A. (1986). Some general principles of crop rotation experiments. *Experimental Agriculture*, 22(2), 187-198.

- Pugesek, B. H., Tomer, A., & Von Eye, A. (Eds.). (2003). Structural equation modeling: applications in ecological and evolutionary biology. Cambridge University Press.
- Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002). Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge university press.
- Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global navigation satellite systems as state-of-the-art solutions in precision agriculture: A review of studies indexed in the web of science. *Agriculture*, 13(7), 1417.
- Raun, W. R., Barreto, H. J., & Westerman, R. L. (1993). Use of stability analysis for long-term soil fertility experiments. *Agronomy Journal*, 85(1), 159-167.
- Ray, D. K., Ramankutty, N., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2012). Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat Commun* 3: 1293.
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 34.
- Richter, C., & Kroschewski, B. (2006). Analysis of a long-term experiment with repeated-measurement models. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(1), 55-71.
- Rotaru, A. S., Pop, I. D., Vatca, A., & Cioban, A. (2012). Usefulness of principal components analysis in agriculture. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*, 69(2).
- Roy, J. (2007). SAS for Mixed Models, RC Littell, GA Milliken, WW Stroup, RD Wolfinger, and O. Schabenberger: A Review of: "SAS Institute Inc., Cary, NC, 2006, xii+ 814 pp., \$89.95, ISBN 1-59047-500-3".
- Roy, J., Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D., & Schabenberger, O. (2007). SAS for Mixed Models,: A Review of: SAS Institute Inc., Cary, NC,
- Rubin, D. B. (1976). Inference and missing data. *Biometrika*, 63(3), 581-592.
- Saed-Moucheshi, A., Fasihfar, E., Hasheminasab, H., Rahmani, A., & Ahmadi, A. (2013). A review on applied multivariate statistical techniques in agriculture and plant science. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4, 127-141.

- Sarkar, A., Azim, J. A., Al Asif, A., Qian, L., & Peau, A. K. (2021). Structural equation modeling for indicators of sustainable agriculture: Prospective of a developing country's agriculture. *Land use policy*, 109, 105638.
- Sarstedt, M. (2019). Revisiting hair et al.'s multivariate data analysis: 40 years later. In *The great facilitator: Reflections on the contributions of Joseph F. Hair, Jr. to marketing and business research* (pp. 113-119). Cham: Springer International Publishing.
- Sartori, F., Piccoli, I., Polese, R., & Berti, A. (2021). A multivariate approach to evaluate reduced tillage systems and cover crop sustainability. *Land*, 11(1), 55.
- Saulic, M., Oveisi, M., Djalovic, I., Bozic, D., Pishyar, A., Savić, A., Prasad, P. V., & Vrbničanin, S. (2022). How do long term crop rotations influence weed populations: Exploring the impacts of more than 50 years of crop management in Serbia. *Agronomy*, 12(8), 1772.
- Schabenberger, O., & Pierce, F. J. (2001). *Contemporary statistical models for the plant and soil sciences*. CRC press.
- Schneider, G., Krauss, J., Riedinger, V., Holzschuh, A., & Steffan-Dewenter, I. (2015). Biological pest control and yields depend on spatial and temporal crop cover dynamics. *Journal of Applied Ecology*, 52(5), 1283-1292.
- Scheiner, S.M., Mitchell, R.J., & Callahan, H.S. (2000). Using path analysis to measure natural selection. *Journal of Evolutionary Biology*, 13, 423-433.
- Shumway, R. H., Stoffer, D. S., & Stoffer, D. S. (2000). *Time series analysis and its applications* (Vol. 3, p. 4). New York: springer.
- Shipley, B. (2016). *Cause and correlation in biology: A user's guide to path analysis, structural equations and causal inference with R*. Cambridge university press.
- Sieling, K., & Christen, O. (2015). Crop rotation effects on yield of oilseed rape, wheat and barley and residual effects on the subsequent wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(11), 1531-1549.
- Singh, M., & Jones, M. J. (2002). Modeling yield sustainability for different rotations in long-term barley trials. *Journal of agricultural, biological, and environmental statistics*, 7, 525-535.
- Skinulienė, L., Marcinkevičienė, A., Dorelis, M., & Bogužas, V. (2024). The Effect of Long-Term Crop Rotations for the Soil Carbon Sequestration Rate Potential and Cereal Yield. *Agriculture*, 14(3), 483.

- Smith, R. G., Davis, A. S., Jordan, N. R., Atwood, L. W., Daly, A. B., Grandy, A. S., ... & Yannarell, A. C. (2014). Structural equation modeling facilitates transdisciplinary research on agriculture and climate change. *Crop Science*, 54(2), 475-483.
- Storey, J. D. (2002). A Direct Approach to False Discovery Rates. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 64(3), 479-498.
- Stronge, K. M., Lennox, S. D., & Smith, R. V. (1997). Predicting nitrate concentrations in Northern Ireland rivers using time series analysis (Vol. 26, No. 6, pp. 1599-1604). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Stroup, W. W., Ptukhina, M., & Garai, J. (2024). Generalized linear mixed models: modern concepts, methods and applications. Chapman and Hall/CRC.
- Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., & Ullman, J. B. (2007). Using multivariate statistics (Vol. 5, No. 7). Boston, MA: pearson.
- Tabri, N., & Elliott, C. M. (2012). Principles and practice of structural equation modeling. *Canadian Graduate Journal of Sociology and Criminology*, 1(1), 59-60.
- Taylor, M. E., & Morecroft, M. D. (2009). Effects of agri-environment schemes in a long-term ecological time series. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 130(1-2), 9-15.
- Teasdale, J. R., & Cavigelli, M. A. (2010). Subplots facilitate assessment of corn yield losses from weed competition in a long-term systems experiment. *Agronomy for sustainable development*, 30, 445-453.
- Tiwari, M., & Misra, B. (2011). Application of Cluster Analysis In Agriculture- A Review Article. *International Journal of Computer Applications*, 36(4), 43-7.
- Todorov, H., Searle-White, E., & Gerber, S. (2020). Applying univariate vs. multivariate statistics to investigate therapeutic efficacy in (pre)clinical trials: A Monte Carlo simulation study on the example of a controlled preclinical neurotrauma trial. *PloS one*, 15(3), e0230798.
- Vargas, M., Glaz, B., Alvarado, G., Pietragalla, J., Morgounov, A., Zelenskiy, Y., & Crossa, J. (2015). Analysis and interpretation of interactions in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107(2), 748-762.
- Verbeke, G. (2000). Linear mixed models for longitudinal data. In *Linear mixed models in practice: A SAS-oriented approach* (pp. 63-153). New York, NY: Springer New York.

-
- Verbyla, A. P., Cullis, B. R., Kenward, M. G., & Welham, S. J. (1999). The analysis of designed experiments and longitudinal data by using smoothing splines. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 48(3), 269-311.
- Walters, C. J., Collie, J. S., & Webb, T. (1988). Experimental designs for estimating transient responses to management disturbances. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45(3), 530-538.
- Watson, C. A., Topp, C. F. E., Mead, A., Fraser, F., Fernandez-Huarte, M., Horne, J., ... & Walker, R. L. (2024). Future proofing a long-term agricultural experiment for decades to come: relocation and redesign. *European Journal of Agronomy*, 158, 127214.
- Wolfinger, R. D. (1996). Heterogeneous variance: covariance structures for repeated measures. *Journal of agricultural, biological, and environmental statistics*, 205-230.
- Yang, R. C. (2008). Why is MIXED analysis underutilized. *Canadian Journal of Plant Science*, 88(3), 563-567.
- Yeater, K. M., & Villamil, M. B. (2018). Multivariate methods for agricultural research. *Applied statistics in agricultural, biological, and environmental sciences*, 371-399.
- Yates, F. (1954). The Analysis of Experiments Containing Different Crop Rotations. *Biometrics*, 10(3), 324-346.
- Zhang, Q., Wang, S., Sun, Y., Zhang, Y., Li, H., Liu, P., ... & Li, J. (2022). Conservation tillage improves soil water storage, spring maize (*Zea mays* L.) yield and WUE in two types of seasonal rainfall distributions. *Soil and Tillage Research*, 215, 105237.

فصل پنجم

ارزیابی پایداری در نظام‌های زراعی: روش‌ها و شاخص‌ها

خدا رحمت کند کسی را که چون کاری انجام دهد، آن را محکم و دقیق انجام دهد.
پیامبر اکرم (ص)

در سپهر پژوهش‌های نوین کشاورزی، به‌ویژه در دو دهه اخیر که جهان با بحران‌های هم‌افزای تغییر اقلیم، کمبود منابع آب و ناامنی غذایی مواجه شده است، مفهوم پایداری^۱ از یک واژه تزئینی به یک ضرورت بقا تغییر ماهیت داده است. این گذار پارادایمی موجب شده تا کانون تمرکز تحقیقات نظام‌های زراعی، از رویکرد تک‌بعدی حداکثرسازی عملکرد در کوتاه‌مدت به سمت رویکرد جامع‌نگر حفظ تاب‌آوری و کارکرد سیستم در بلندمدت معطوف گردد. در این راستا، توسعه چارچوب‌های روش‌شناختی دقیق و کمی‌سازی‌پذیر برای سنجش پایداری، به یکی از چالش‌برانگیزترین و در عین حال پویاترین حوزه‌های علوم زراعی بدل شده است. اگرچه تعاریف کلاسیک پایداری (نظیر تعریف کمیسیون بروندلند^۲) عمدتاً بر سه رکن بنیادین اکولوژیک (محیط‌زیستی)، اقتصادی و اجتماعی استوار بوده‌اند (Brundtland and Mansour, 1987)، اما پیچیدگی

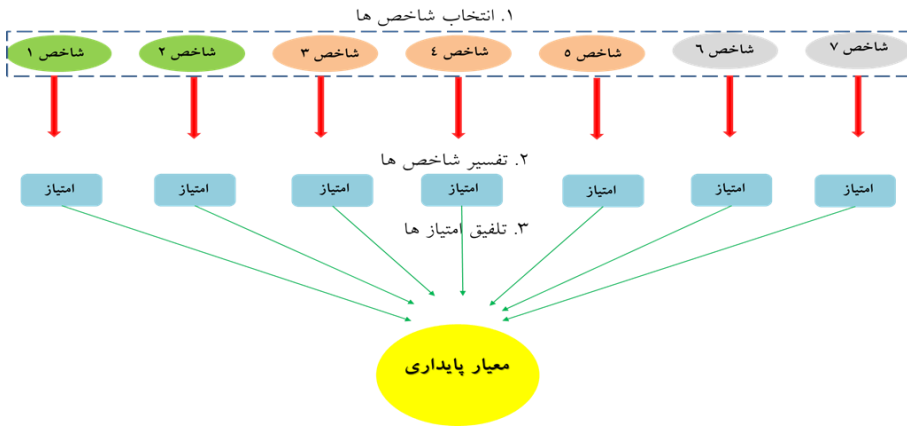
1. Sustainability

2. Brundtland commission

نظام‌های تولید غذا در قرن بیست و یکم، بازنگری در این ارکان را اجتناب‌ناپذیر کرده است. در رویکردهای مدرن، پایداری نه به عنوان جمع جبری این ابعاد، بلکه به عنوان برابری تعاملات پیچیده، هم‌افزایی‌ها و بده‌بستان‌های^۱ میان آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (López-Ridaura et al., 2002). برای مثال، افزایش سودآوری (بعد اقتصادی) نباید به قیمت تخریب خاک (بعد اکولوژیک) یا تهدید سلامت جوامع روستایی (بعد اجتماعی) تمام شود. علاوه بر این، مطالعات متأخر نظیر پژوهش باتهای و اشتريميكينه (Bathaei and Štreimikienė, 2023)، با درک نقش حیاتی نهادها در مدیریت منابع مشترک، بعد چهارمی تحت عنوان حکمرانی^۲ را به این منظومه افزوده‌اند که بر اهمیت سیاست‌گذاری صحیح، مشارکت ذینفعان و عدالت در دسترسی به منابع تأکید دارد.

سنجش عملیاتی این مفهوم انتزاعی، نیازمند ترجمه هر یک از ابعاد به شاخص‌های^۳ عینی، قابل اندازه‌گیری و حساس به تغییرات مدیریتی است. به عنوان نمونه، در بعد اکولوژیک، شاخص‌هایی نظیر کارایی مصرف آب، سلامت خاک و ردپای کربن؛ در بعد اقتصادی، معیارهایی چون سود ناخالص، ثبات درآمد و بهره‌وری انرژی؛ و در ابعاد اجتماعی-حکمرانی، شاخص‌هایی مانند امنیت غذایی خانوار و پذیرش فناوری توسط کشاورزان مورد پایش قرار می‌گیرند. ادغام این شاخص‌های متنوع در قالب مدل‌های ارزیابی یکپارچه، به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا تصویری تمام‌نما و چندوجهی از وضعیت سلامت سیستم زراعی ترسیم کنند. همان‌گونه که در شکل ۵-۱ ترسیم شده است، این چارچوب ساختاریافته، نقشه راهی برای درک پویایی سیستم و شناسایی نقاط بحرانی پایداری فراهم می‌آورد.

-
1. Trade-offs
 2. Governance
 3. Indicators



شکل ۵-۱. طرح کلی ارزیابی پایداری در نظام‌های زراعی. هر گروه از شاخص‌ها با رنگی متمایز تفکیک شده‌اند که بیانگر ارزیابی بعد خاصی از پایداری است. شکل از نویسنده.

هدف نهایی این فصل، ارائه مروری نظام‌مند و انتقادی بر روش‌های اصلی ارزیابی پایداری در نظام‌های زراعی و واکاوی شاخص‌های کلیدی مؤثر در این ارزیابی‌هاست. در ادامه، ضمن طبقه‌بندی رویکردهای موجود، بر روش‌شناسی‌های کمی‌سازی پایداری تمرکز خواهیم کرد و در بخش پایانی، به عنوان یک مطالعه کاربردی و جامع، روش ارزیابی چرخه حیات^۱ (LCA) را با تشریح دقیق گام‌های اجرایی مورد بررسی قرار خواهیم داد تا خواننده با نحوه سنجش اثرات محیط‌زیستی زنجیره تولید غذا از مزرعه تا سفره آشنا شود.

۵-۱. روش‌های ارزیابی پایداری در نظام‌های زراعی

بررسی نظام‌مند متون علمی نشان می‌دهد که سنجش پایداری در نظام‌های زراعی، نه یک فرمول واحد، بلکه طیف وسیعی از رویکردها و مدل‌های روش‌شناختی را در بر می‌گیرد. این تنوع گسترده، پاسخی به ماهیت چندبعدی پایداری و نیاز به ارزیابی در مقیاس‌های مختلف (از سطح تک‌مزرعه تا مقیاس‌های منطقه‌ای و ملی) است. بنابراین،

1. Life-cycle assessment

پژوهشگران برای انتخاب ابزار مناسب، نیازمند شناختی دقیق از قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر روش هستند. در این راستا، جدول ۵-۱ به عنوان یک راهنمای تطبیقی، مهم‌ترین چارچوب‌های ارزیابی شناخته شده جهانی را گردآوری و مقایسه کرده است. در این جدول، روش‌ها بر اساس ویژگی‌های کلیدی نظیر هدف اصلی ارزیابی، پوشش ابعاد چهارگانه پایداری (اکولوژیک، اقتصادی، اجتماعی و حکمرانی) و رویکرد کمی‌سازی (آیا مبتنی بر امتیازدهی هستند یا شبیه‌سازی؟) تفکیک شده‌اند تا پژوهشگران بتوانند بسته به ماهیت مطالعه خود، مناسب‌ترین ابزار را انتخاب نمایند.

جدول ۵-۱. مهم‌ترین مدل‌ها و روش‌های ارزیابی پایداری در نظام‌های زراعی

روش	هدف	بعد پایداری مورد ارزیابی	رویه ارزیابی پایداری	مرجع
ISAP: Indicator of Sustainable Agriculture Practice	ایجاد و به کارگیری شاخص‌هایی برای مطالعه تأثیر شیوه‌های کشاورزی بر پایداری مزرعه.	محیط زیستی	وزن‌دهی و امتیازدهی به شاخص‌ها	Rahman et al. (2007)
AFI: Agri- environmental Footprint Index	روشی برای شناسایی وضعیت فعلی زیست محیطی و ردیابی تغییرات و دستاوردهای مزارع.	محیط زیستی	وزن‌دهی و امتیازدهی به شاخص‌ها	Dabkiene et al. (2021)
RISE: Response- Inducing Sustainability Evaluation	روش ارزیابی پایداری در سطح مزرعه در کشورهای در حال توسعه.	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی	رتبه‌بندی شاخص‌ها	Häni et al. (2003)
SAFE: Sustainability Assessment of Farming and the Environment	چارچوبی برای ارزیابی پایداری سیستم‌های کشاورزی.	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی	رتبه‌بندی شاخص‌ها	Van Cauwenbergh et al. (2007)

ادامه جدول ۵-۱

روش	هدف	بعد پایداری مورد ارزیابی	رویه ارزیابی پایداری	مرجع
	چارچوبی برای ارزیابی پایداری زنجیره ارزش در تولید محصولات کشاورزی که می‌تواند به عنوان یک ابزار خودارزیابی برای تولیدکنندگان مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد.	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی، حکمرانی	مقایسه نتایج شاخص‌ها با مقادیر مرجع	Butti Al Shamsi et al. (2019)
SOSTARE: Analysis of Farm Technical Efficiency and Impacts on Environmental and Economic Sustainability	ابزار تشخیصی برای کشاورزان و مروجین برای ارزیابی عملکرد پایداری عمومی در سطح مزرعه	محیط زیستی، اقتصادی	وزندهی و امتیازدهی به شاخص‌ها	Paracchini et al. (2015)
MOTIFS: Monitoring Tool for Integrated Farm Sustainability	ابزار نظارت مبتنی بر شاخص‌ها برای پایداری مزارع یکپارچه	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی	وزندهی و امتیازدهی به شاخص‌ها	Meul et al. (2008)
SIRIUS: Sustainable Irrigation Water Management and River-basin Governance: Implementing User-driven Services	چارچوب و شاخص‌های ارزیابی پایداری سیستم‌های کشاورزی آبی.	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی، حکمرانی	مقایسه نتایج شاخص‌ها با مقادیر مرجع	Antunes et al. (2017)

ادامه جدول ۵-۱

روش	هدف	بعد پایداری مورد ارزیابی	رویه ارزیابی پایداری	مرجع
PSDCIFASA: Problem-oriented Status-Driver Composite Indicator-base Framework of Agricultural Sustainability Assessment SEAMLESS: System for Environmental and Agricultural Modelling, Linking European Science and Society	ابزاری برای ارزیابی پایداری کشاورزی در مزرعه و سطوح بزرگ.	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی، حکمرانی	وزن دهی و امتیازدهی به شاخص‌ها	Fallah- Alipour et al. (2018)
MESMIS: Evaluating the Sustainability of Complex Socio- Environmental Systems LCA: Life Cycle Assessment Approach	چارچوبی برای ارزیابی تعاملات در توسعه زیست محیطی، اقتصادی و روستایی.	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی	وزن دهی و امتیازدهی به شاخص‌ها	Van Ittersum et al. (2008)
SRP: Sustainable Rice Platform	چارچوب عملیاتی برای ارزیابی پایداری کشاورزی، همچنین ارائه دستورالعمل‌هایی برای انتخاب شاخص‌ها.	محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی	مقایسه نتایج شاخص‌ها با مقادیر مرجع	López- Ridaura et al. (2002)
	ارزیابی پایداری زیست محیطی تولید محصولات کشاورزی در سطح مزرعه. سیستم به طور خاص برای ارزیابی پایداری تولید برنج در مقیاس مزرعه ایجاد شده است. همچنین می‌تواند به عنوان یک ابزار خودارزیابی برای تولیدکنندگان برنج استفاده شود.	محیط زیستی محیط زیستی	وزن دهی و امتیاز دهی به شاخص‌ها	Brenttrup et al. (2004)
		محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی	مقایسه نتایج شاخص‌ها با مقادیر مرجع	Demont and Rutsaert. (2017)

۵-۱-۱. اهمیت تعیین مقیاس‌های زمانی و مکانی در ارزیابی پایداری

یکی از بنیادی‌ترین و در عین حال چالش‌برانگیزترین مباحث در روش‌شناسی ارزیابی پایداری، مسئله مقیاس^۱ است. پایداری در ذات خود مفهومی مطلق نیست، بلکه ماهیتی وابسته به زمینه دارد که معنا، ابعاد و شاخص‌های آن با تغییر در مرزهای زمانی و مکانی دگرگون می‌شود (López-Ridaura et al., 2002). درک صحیح این سلسله‌مراتب و تعیین دقیق مرزهای سیستم، پیش‌نیاز حیاتی برای انتخاب روش ارزیابی مناسب از میان گزینه‌های معرفی شده در جدول ۱-۵ است؛ چرا که شاخصی که در سطح یک مزرعه دیم معنادار است، لزوماً برای ارزیابی پایداری در سطح یک مزرعه آبی کارایی نخواهد داشت.

از منظر مقیاس مکانی، ارزیابی‌ها معمولاً در سه سطح متمایز قابل تفکیک هستند که هر یک اهداف و الزامات خاص خود را دارند. در پایین‌ترین سطح، یعنی مقیاس مزرعه، تمرکز اصلی بر مدیریت زراعی، کارایی مصرف نهاده‌ها و سودآوری مستقیم تولیدکننده است. در این سطح، روش‌هایی نظیر RISE یا شاخص‌های مبتنی بر LCA کاربرد فراوانی دارند تا نقاط ضعف مدیریتی کشاورز شناسایی شود (Häni et al., 2003; Brentrup et al., 2004). با این حال، محدودیت اصلی ارزیابی‌های تک‌مزرعه‌ای، ناتوانی در سنجش اثرات بیرونی است (Van der Werf and Petit, 2002)؛ برای مثال، آلودگی نیتراتی آب‌های زیرزمینی یا کاهش تنوع زیستی، پدیده‌هایی هستند که اثرات آن‌ها نه در داخل مزرعه، بلکه در پایین دست حوضه آبریز و در تعامل با سایر مزارع آشکار می‌شود. به همین دلیل، حرکت به سمت مقیاس منطقه‌ای یا حوضه آبریز ضروری می‌نماید. در این سطح میانی، تعاملات بین واحدهای مختلف تولیدی و منابع مشترک (مانند سفره‌های آب زیرزمینی یا زیستگاه‌های حیات وحش) برجسته می‌شود و شاخص‌هایی نظیر پیوستگی اکولوژیک منظر یا تراز منطقه‌ای آب اهمیت می‌یابند (Therond et al., 2017).

1. Scale

نهایت، در مقیاس ملی و جهانی، مسائلی کلان نظیر امنیت غذایی، سیاست‌گذاری‌های تجاری و سهم بخش کشاورزی در تغییر اقلیم جهانی مورد توجه قرار می‌گیرند که نیازمند شاخص‌های تجمیعی و کلان‌نگر هستند (Foley et al., 2011).

علاوه بر بعد مکان، مقیاس زمانی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در قضاوت نهایی پیرامون پایداری ایفا می‌کند. پایداری فرآیندی پویاست و قضاوت در مورد آن نیازمند گذر زمان است. ارزیابی‌های کوتاه‌مدت (یک تا سه سال) که در بسیاری از طرح‌های پژوهشی رایج هستند، عمدتاً بر مفاهیمی نظیر کارایی^۱ تمرکز دارند، مانند نسبت سود به هزینه یا بهره‌وری مصرف کود در یک فصل زراعی. اگرچه این اطلاعات ارزشمند هستند، اما برای سنجش پایداری واقعی کفایت نمی‌کنند، زیرا قادر به آشکارسازی روندهای تدریجی و اثرات تجمعی نیستند. در مقابل، ارزیابی‌های بلندمدت (بیش از یک دهه) به پژوهشگر اجازه می‌دهند تا مفاهیم عمیق‌تری نظیر ثبات^۲ و تاب‌آوری^۳ سیستم در برابر شوک‌های محیطی و اقتصادی را رصد کنند. پدیده‌هایی مانند فرسایش خاک، کاهش ذخایر کربن آلی یا مقاومت آفات به سموم، تنها در افق‌های زمانی بلندمدت رخ می‌نمایند و نادیده گرفتن آن‌ها در ارزیابی‌های کوتاه‌مدت، می‌تواند منجر به نتیجه‌گیری‌های خوش‌بینانه کاذب شود. بنابراین، پژوهشگر پیش از هرگونه اقدام برای سنجش پایداری، باید ابتدا مرزهای سیستم (بعد مکانی) و افق زمانی (بعد زمانی) مطالعه خود را به دقت تعریف نموده و شاخص‌هایی متناسب با آن مقیاس را برگزیند.

۵-۲. انتخاب شاخص‌ها و داده‌های مورد نیاز

انتخاب شاخص‌ها، سنگ‌بنا و حیاتی‌ترین گام در فرآیند ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی محسوب می‌شود، به این دلیل که اعتبار نهایی ارزیابی، مستقیماً تابع کیفیت و

1. Efficiency

2. Stability

3. Resilience

تناسب شاخص‌های گزینش شده است. اهمیت این موضوع سبب شده تا تدوین معیارهای استاندارد برای غربال‌گری و انتخاب شاخص‌ها، به یکی از مباحث مهم در ادبیات علمی تبدیل شود. پژوهشگرانی نظیر فلاح-علی‌پور و همکاران (Fallah-Alipour et al., 2018) و ون کاوَنبرگ و همکاران (Van Cauwenbergh et al., 2007) تأکید دارند که تعریف مجموعه‌ای جامع و در عین حال ساده، چالشی پیچیده و چندوجهی است. این پیچیدگی ریشه در لزوم برقراری تعادل میان جامعیت و قابلیت اجرا دارد؛ پدیده‌ای که در علوم کشاورزی به انفجار شاخص‌ها^۱ معروف است (Riley, 2001). از یک سو، تقلیل بیش از حد تعداد شاخص‌ها ممکن است منجر به نادیده گرفتن ویژگی‌های کلیدی اکوسیستم و ارائه تصویری ناقص از پایداری شود. از سوی دیگر، تورم شاخص‌ها، فرآیند جمع‌آوری داده‌ها را پرهزینه و زمان‌بر کرده و با ایجاد سربار اطلاعاتی، تحلیل نتایج را دشوار و مستعد استنتاج‌های نادرست می‌سازد. راهکار علمی برای حل این تعارض، حرکت به سمت تشکیل یک مجموعه حداقل داده‌ها^۲ (MDS) است که با کمترین تعداد متغیر، بیشترین اطلاعات را فراهم آورد (Andrews et al., 2002).

برای نظام‌مند کردن فرآیند انتخاب شاخص‌ها در MDS، دابکین و همکاران (Dabkiene et al., 2021) چهار اصل بنیادین را پیشنهاد می‌کنند: (۱) ارتباط^۳ (پیوند منطقی با اهداف پایداری)، (۲) مقبولیت^۴ (پذیرش توسط جامعه علمی و ذینفعان)، (۳) اعتبار^۵ (توانایی سنجش دقیق آنچه مدنظر است)، و (۴) استحکام^۶ (عدم حساسیت به خطاهای جزئی و تغییرات نامربوط). علاوه بر این معیارهای فنی، رید و همکاران (Reed et al., 2006) بر دو ویژگی کاربردی دیگر تأکید دارند: نخست آنکه شاخص‌ها باید

-
1. Indicator explosion
 2. Minimum data set (MDS)
 3. Relevance
 4. Acceptability
 5. Validity
 6. Robustness

قابلیت سنجش عینی پیشرفت در جهت اهداف توسعه پایدار را داشته باشند، و دوم اینکه از ویژگی‌هایی نظیر کاربری آسان، تکرارپذیری و قابلیت اجرا در شرایط بومی و محلی برخوردار باشند. ترکیب این معیارهای علمی و اجرایی، چارچوبی جامع برای غربال‌گری و انتخاب اثربخش‌ترین شاخص‌ها فراهم می‌آورد.

از منظر ماهیت داده‌ها، شاخص‌های منتخب را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود. دسته نخست، شاخص‌های مبتنی بر داده‌های سخت^۱ یا کمی هستند. این شاخص‌ها ماهیتی عینی داشته و مقادیر آن‌ها یا از طریق اندازه‌گیری مستقیم میدانی و آزمایشگاهی به دست می‌آید و یا با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و مطالعات پیشین استخراج می‌گردد (Bockstaller et al., 2008). این ویژگی عمده‌تر شاخص‌های بعد اقتصادی (مانند سودآوری خالص، نسبت فایده به هزینه) و بسیاری از شاخص‌های زیست‌محیطی (نظیر عملکرد دانه، ردپای کربن و کیفیت آب) نمود می‌یابد. به‌طور مثال، در ارزیابی‌های دقیق اکولوژیک، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از اتاقک‌های تبادل گاز در سطح مزرعه مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود (Fuentes-Ponce et al., 2022). همچنین، برای سنجش آلودگی منابع آب، پژوهشگران با نصب لایسمتر و جمع‌آوری نمونه‌های زه‌آب از عمق پایین‌تر از منطقه ریشه، غلظت نترات را سنجیده (Gholamhoseini et al., 2012) و میزان آب‌شویی عناصر را به دقت محاسبه می‌کنند. در مقابل، دسته دوم شامل شاخص‌های مبتنی بر داده‌های نرم^۲ یا کیفی است که ماهیتی ذهنی^۳ داشته و سنجش آن‌ها به قضاوت انسانی (پژوهشگر یا کشاورز) وابسته است (Bockstaller et al., 2008). این دسته عمده‌تر شاخص‌های ابعاد اجتماعی و حاکمیتی، نظیر رضایت شغلی، عدالت در توزیع منابع، امنیت اجتماعی و پذیرش نوآوری متمرکز است. در این موارد، ابزار جمع‌آوری داده‌ها نه تجهیزات آزمایشگاهی، بلکه تعامل با ذی‌نفعان از طریق

1. Hard data

2. Soft data

3. Subjective

پرسشنامه‌های استاندارد، مصاحبه‌های ساختاریافته یا تکنیک‌های مشارکتی است. در طراحی این ابزارها، استفاده از سؤالات بسته^۱ اولویت دارد تا ضمن استانداردسازی پاسخ‌ها، امکان کدگذاری و تحلیل آماری فراهم گردد (Dillman et al., 2014). برای کمی‌سازی این داده‌های کیفی، معمولاً از مقیاس‌های رتبه‌ای استاندارد مانند طیف لیکرت^۲ استفاده می‌شود (Likert, 1932) تا نتایج در قالب مقوله‌های کیفی (مانند: ناراضی، نسبتاً راضی، راضی) یا بازه‌های امتیازی نرمال‌شده (مثلاً: ۰-۳۰ برای وضعیت نامطلوب، ۳۱-۶۰ متوسط و ۶۱-۱۰۰ مطلوب) گزارش شوند.

۵-۲-۱. ابعاد چهارگانه شاخص‌های پایداری: یک چارچوب کل‌نگر

پس از تبیین معیارهای غربال‌گری و انتخاب شاخص‌ها، گام بعدی دسته‌بندی آن‌ها در قالب ابعاد اصلی پایداری است. اگرچه در ادبیات کلاسیک، مدل سه ستونی (محیط‌زیست، اقتصاد، اجتماع) حاکم بود، اما پیچیدگی‌های کشاورزی مدرن نیازمند رویکردی جامع‌تر است که بعد نهادی یا حکمرانی را نیز در بر گیرد (Spangenberg, 2002). در ادامه، ماهیت و کارکرد شاخص‌های هر یک از این چهار بعد تشریح می‌گردد.

الف) شاخص‌های اکولوژیک (محیط‌زیستی): این دسته از شاخص‌ها، زیربنای فیزیکی و بیولوژیک تولید را هدف قرار می‌دهند. هدف اصلی در اینجا، سنجش تمامیت اکوسیستم و توانایی آن برای بازتولید منابع است. شاخص‌های اکولوژیک فراتر از اندازه‌گیری‌های ساده‌ای نظیر عملکرد در هکتار هستند؛ آن‌ها باید بتوانند وضعیت خدمات اکوسیستمی^۳ را نیز کمی‌سازی کنند. این شاخص‌ها معمولاً به دو گروه تقسیم می‌شوند: (۱)

1. Close-ended questions

سؤالات بسته، پاسخ‌های از پیش تعیین‌شده دارند؛ بدین معنی که پاسخ‌دهندگان ملزم به انتخاب گزینه از میان محدوده‌ای مشخص هستند که فرآیند تحلیل آماری را تسهیل می‌کند.

2. Likert scale

3. Ecosystem services

شاخص‌های مبتنی بر جریان^۱ که نرخ مصرف منابع یا تولید آلودگی را در یک دوره زمانی می‌سنجند (مانند کارایی مصرف آب، بیلان نیتروژن، و انتشار گازهای گلخانه‌ای)، و ۲) شاخص‌های مبتنی بر وضعیت^۲ که سلامت ذخایر سیستم را در یک مقطع زمانی نشان می‌دهند (مانند درصد ماده آلی خاک، تنوع زیستی حشرات مفید، و شوری خاک) (Van der Werf and Petit, 2002). انتخاب صحیح این شاخص‌ها به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا دریابد آیا تولید فعلی به قیمت استهلاک منابع پایه (خاک و آب) به دست آمده است یا خیر.

ب) شاخص‌های اقتصادی: در ارزیابی پایداری، مفهوم شاخص‌های اقتصادی با حسابداری سنتی مزرعه متفاوت است. در حالی که حسابداری سنتی بر حداکثرسازی سود سالانه تمرکز دارد، شاخص‌های پایداری اقتصادی بر مفاهیمی نظیر تاب‌آوری مالی و ثبات درآمد در برابر شوک‌های بازار و اقلیم تأکید دارند. بنابراین، علاوه بر شاخص‌های رایجی مانند حاشیه سود ناخالص و نسبت فایده به هزینه، معیارهای پیچیده‌تری نظیر تنوع درآمدی (سهم فعالیت‌های غیرزراعی در درآمد خانوار)، بهره‌وری انرژی (میزان انرژی مصرفی برای تولید یک واحد انرژی غذایی) و ریسک سرمایه‌گذاری اهمیت می‌یابند. این شاخص‌ها به دنبال پاسخ به این پرسش کلیدی هستند: آیا نظام زراعی قادر است در بلندمدت معاش کشاورز را تأمین کرده و انگیزه اقتصادی برای ادامه تولید را حفظ نماید؟

ج) شاخص‌های اجتماعی: این بعد، اغلب چالش برانگیزترین بخش ارزیابی است، زیرا با متغیرهای کیفی و انسانی سروکار دارد. پایداری یک نظام زراعی تنها زمانی محقق می‌شود که جوامع محلی و تولیدکنندگان از کیفیت زندگی مطلوبی برخوردار باشند. شاخص‌های اجتماعی بر دو محور اصلی استوارند. اول، رفاه فردی و خانوادگی (شامل سطح تحصیلات، دسترسی به خدمات بهداشتی، و رضایت شغلی کشاورز) و دوم، عدالت

1. Flow-based

2. State-based

اجتماعی (شامل توزیع عادلانه منافع، برابری جنسیتی، و حقوق کارگران مزرعه). نادیده گرفتن این شاخص‌ها می‌تواند منجر به پدیده‌هایی نظیر مهاجرت کشاورزان و فروپاشی نظام‌های سنتی شود که حتی در صورت پایداری اکولوژیک و اقتصادی، منجر به شکست سیستم خواهد شد.

د) شاخص‌های حکمرانی (نهادی): بعد چهارم که در مطالعات نوین نظیر چارچوب SAFA فائو برجسته شده است، به ساختارهای مدیریتی و نهادی می‌پردازد که بستر لازم برای تحقق سه بعد دیگر را فراهم می‌کنند. شاخص‌های حکمرانی نه عملکرد مزرعه، بلکه قواعد بازی را می‌سنجند (Soldi et al., 2019). این شاخص‌ها مواردی نظیر دسترسی به اعتبارات و تسهیلات بانکی، اثربخشی خدمات ترویجی و آموزشی، مشارکت کشاورزان در تشکل‌ها و تعاونی‌ها و شفافیت در زنجیره ارزش را پوشش می‌دهند. وجود ضعف در شاخص‌های حکمرانی (مثلاً عدم حمایت بیمه‌ای در سال‌های خشکسالی) می‌تواند تلاش‌های کشاورز در سایر ابعاد را خنثی کند.

بنابراین، یک ارزیابی جامع پایداری مستلزم گزینش هوشمندانه و متوازن شاخص‌هایی از هر چهار بعد فوق است. جداول ۵-۲ تا ۵-۵ که در ادامه ارائه می‌شوند، فهرستی عملیاتی از این شاخص‌ها را به همراه روش محاسبه آن‌ها در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند.

جدول ۵-۲. شاخص‌های بعد اکولوژیک (محیط زیستی) در ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
تنوع زیستی	ارزیابی تنوع و فراوانی گونه‌ها	با استفاده از شاخص‌ها یا معیارهای مختلف (برای مثال شاخص تنوع سیمپسون ^۱) و با در نظر گرفتن غنای گونه‌ها و یکنواختی در اکوسیستم	نسبت یا درصد	Roy and Chan, (2012)
عملکرد محصول	عملکرد یک محصول خاص در واحد سطح زمین	عملکرد در واحد سطح زمین	تن یا کیلوگرم در هکتار	قاسمی‌پناه و همکاران (۱۳۹۹)
شاخص برداشت	نسبت توزیع مواد فتوسنتزی بین عملکرد اقتصادی و عملکرد کل	(عملکرد اقتصادی تقسیم بر عملکرد ماده خشک) $100 \times$	درصد	غلامحسینی و همکاران (۱۳۹۶)
شدت کشت	شدت کشت نسبت به زمان موجود	(مساحت کشت تقسیم بر مساحت زمین قابل کشت) $100 \times$	نسبت یا درصد	Jayasinghe et al. (2023)
کیفیت علوفه	ارزش غذایی و مناسب بودن علوفه برای مصرف دام	محتوای مواد مغذی، قابلیت هضم، خوش خوراکی و ...	متنوع	Baghdadi et al. (2017)
انتشارات به جو	انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های کشاورزی	اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از روش‌های استاندارد مانند NDIR^2	متنوع (برای مثال $\text{CO}_2\text{eq. Kg}$)	Li et al. (2024)

1. Simpson diversity index

2. Non-dispersive infrared absorption

ادامه جدول ۵-۲

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
بهره‌وری زمین	ارزیابی عملکرد از یک مساحت مشخص زمین	نسبت عملکرد محصول به مساحت زمین	تن یا کیلوگرم در هکتار	Gholamhoseini et al. (2013 a)
بهره‌وری انرژی	انرژی به ازای درآمد حاصل از تولید محصول	نسبت مقدار مصرف انرژی مصرفی به ارزش افزوده خالص	ژول بر واحد پول	Ma et al. (2022)
جذب عناصر غذایی	مقدار جذب عناصر توسط محصول	غلظت عناصر غذایی در بافت گیاه $\times$ عملکرد ماده خشک	کیلوگرم عنصر غذایی در هکتار	Gholamhoseini et al. (2013 b)
عناصر شسته شده از محیط ریشه	هدرفت عناصر غذایی از محیط ریشه	غلظت عناصر غذایی در زه آب $\times$ مقدار نفوذ عمقی آب	کیلوگرم در هکتار	Gholamhoseini et al. (2013 c)
کارایی مصرف کود	عملکرد حاصله نسبت به مقدار کود مصرفی	نسبت عملکرد اقتصادی به مقدار کود مصرفی	کیلوگرم در کیلوگرم	غلامحسینی و همکاران (۱۴۰۱) (الف)
مدیریت تلفیقی آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز	رویکرد یکپارچه برای مدیریت تنشهای زیستی	تعیین روش‌ها و راهکارها برای مدیریت تلفیقی	امتیازدهی بر اساس تعداد و کارایی روش‌ها	Nambiar et al. (2001)
تعادل عناصر غذایی	تعادل بین ورودی و خروجی عناصر مغذی	ورود عناصر غذایی منهای جذب عناصر غذایی تلفات عناصر غذایی	متنوع (به عنوان مثال کیلوگرم در هکتار)	Khodaei Joghani et al. (2010)

ادامه جدول ۵-۲

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
تثبیت بیولوژیک نیتروژن	گیاهانی که می-توانند نیتروژن اتمسفر را تثبیت کرده و برای محصولات بعدی در دسترس قرار دهند	مقدار نیتروژن اتمسفر تثبیت شده به شکل‌های موجود در گیاه و نیتروژن باقیمانده برای محصول بعدی	نسبت یا درصد	Zakikhani et al. (2012)
ماده آلی خاک	مواد آلی موجود در خاک	اندازه‌گیری از طریق تجزیه آزمایشگاهی خاک، تعیین وزن کربن آلی به عنوان درصدی از وزن کل خاک	درصد	Khodaei Joghani et al. (2012)
فراهمی عناصر غذایی در خاک	مقدار عناصر غذایی به شکل قابل دسترس برای گیاه در خاک	نمونه برداری از خاک و تعیین سطح فراهمی عناصر غذایی	متنوع (به عنوان مثال پی پی ام برای پتاسیم و فسفر)	Salehi et al. (2016)
شوری خاک	میزان نمک فراتر از حد تحمل گیاه	نمونه برداری از خاک و تعیین سطح شوری از طریق تعیین مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع	متنوع (به عنوان مثال دسی زیمنس بر متر)	رنجبر و پیراسته انوشه (۱۳۹۴)
فرسایش خاک	حذف یا جابجایی خاک سطحی	اندازه‌گیری با استفاده از نمودارهای فرسایش یا روش‌های مدل سازی (به عنوان مثال، مدل RUSLE)	متنوع	Roy and Chan, (2012)

1. Revised universal soil loss equation

ادامه جدول ۵-۲

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
نفوذپذیری خاک	ظرفیت عبور سیالات (آب) از درون محیط‌های خاکی	آزمایش نفوذپذیری (بار ثابت یا افتان)	دارسی، متربر ثانیه	پوزن و همکاران (۱۳۹۸)
تخریب خاک	تغییر در وضعیت سلامت خاک، که منجر به کاهش ظرفیت اکوسیستم برای ارائه خدمات می‌شود.	مساحت زمین متاثر از هر یک از انواع اصلی تخریب خاک (فرسایش، کاهش فراهمی عناصر غذایی، شوری و کاهش نفوذپذیری خاک) تقسیم بر کل مساحت زمین کشاورزی	درصد	Krasilnikov et al. (2016)
شدت مصرف نهاده‌های شیمیایی	مقدار مصرف نهاده‌های شیمیایی در یک دوره زمانی مشخص	نسبت مقدار مصرف نهاده‌های شیمیایی به مساحت تحت کشت	کیلوگرم در هکتار	Zhan et al. (2021)
شدت تولید ضایعات	شدت ضایعات تولید شده در مزرعه در مدت زمان مشخص	نسبت مقدار کل ضایعات تولید شده به ارزش افزوده خالص	کیلوگرم بر واحد پول	Alexander et al. (2017)
بازیافت و استفاده مجدد از آب	پردازش و استفاده از آب مصرف شده و فاضلاب در یک چرخه دیگر قبل از تخلیه	نسبت حجم کل آب بازیافتی به حجم کل برداشت آب شیرین از تمام منابع	درصد	Cisneros (2014)
بهره‌وری آب	مقدار عملکرد حاصله در مقایسه با مقدار آب مصرفی	نسبت عملکرد اقتصادی به مقدار آب مصرفی	کیلوگرم بر مترمکعب	Ghasemi Hamedani et al. (2022)

ادامه جدول ۵-۲

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
کیفیت آب	ارزیابی کیفیت منابع آب	از طریق نمونه برداری و تعیین پارامترهایی مانند pH، اکسیژن محلول، سطوح مواد مغذی و غلظت آلاینده‌ها	امتیازدهی	Tyagi et al. (2013)
شاخص سطح برگ	اطلاعات در مورد تراکم پوشش گیاهی	نسبت سطح برگ به سطح زمین	بدون واحد	غلامحسینی و همکاران (۱۴۰۱ ب)
تراکم و وفور علف-های هرز، آفات و بیماری‌ها	اطلاع از شدت آلودگی به علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها	پایش، نمونه برداری، شناسایی و شمارش علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها در یک مساحت مشخص	متنوع (به عنوان مثال تعداد بوته یا آفت در مترمربع یا درصد آلودگی به بیماری)	Gedifew and Earecho, (2024)
شدت خسارت تنش‌های زیستی و غیر زیستی	تعیین کاهش عملکرد ناشی از تنش‌ها	$100 \times \frac{\text{عملکرد بدون تنش}}{\text{عملکرد در شرایط تنش}} - 100$	درصد	Jevtić et al. (2018)

جدول ۵-۳. شاخص‌های بعد اقتصادی در ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
پذیرش روش‌ها	ارزیابی سطح پذیرش شیوه‌ها یا فناوری‌های خاص در کشاورزی	نسبت تعداد کشاورزانی که رویه یا فناوری‌های نوین را اتخاذ می‌کنند به تعداد کل کشاورزان مورد بررسی	نسبت یا درصد	Gómez-Limón and Sanchez - Fernandez. (2010)
ارزش در معرض ریسک شرطی ^۱	میانگین میزان زیان مورد انتظار در یک سناریوی خاص	متوسط زیان مورد انتظار طی یک دوره زمانی مشخص و در سطح اطمینان معین	واحد پول	Sydoorovych and Wossink (2008)
بهره‌وری سرمایه	درآمد مزرعه به ازای واحد سرمایه مزرعه (به استثناء زمین)	نسبت تولید مزرعه به مقدار سرمایه گذاری	نسبت یا درصد	Sydoorovych and Wossink (2008)
هزینه نهاده‌ها (به عنوان مثال، کود، سموم، بذر، سوخت و غیره)	هزینه‌های انجام شده برای خرید نهاده‌ها	هزینه کل خرید نهاده‌ها در یک دوره خاص	واحد پول	Zhen et al. (2006)
نسبت هزینه فایده	نسبت هزینه‌های تولید به منافع حاصله	نسبت مجموع هزینه‌های تولید به کل منافع حاصل از فعالیت‌های تولیدی	نسبت یا درصد	López-Ridaura et al. (2002)
ثبات اقتصادی	توانایی یک مزرعه برای مقاومت در برابر شوک‌های مالی	ارزیابی ثبات درآمد در طول زمان یا از طریق نسبت‌های مالی	نسبت یا درصد	Häni et al. (2003)

1. Conditional value at risk

ادامه جدول ۳-۵

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
تداوم مزرعه	توانایی یک مزرعه برای ادامه کار	ارزیابی توانایی مزرعه برای حفظ عملیات در طول زمان	امتیازدهی	López-Ridaura et al. (2002)
تاب‌آوری مزرعه	ظرفیت مزرعه برای انطباق و بازیابی از اختلالات کوتاه مدت و تغییرات بلند مدت	ارزیابی با استفاده از امتیاز ثبات مالی، نسبت نقدینگی، حاشیه سودآوری و تاب‌آوری محیطی (به عنوان مثال، نمره سلامت خاک)	امتیازدهی	Vecchione (2010)
گسترش مزرعه	رشد یا افزایش در مقیاس یا اندازه عملیات مزرعه	افزایش سطح زمین، تعداد دام یا ظرفیت تولید مزرعه	اندازه‌گیری گسترش و امتیازدهی	Rasul and Thapa (2004)
ریسک‌های کشاورز	خطرات و عدم قطعیت‌هایی که کشاورزان در عملیات خود با آن مواجه هستند از جمله نوسانات قیمت محصول	شناسایی و ارزیابی خطرات و عدم قطعیت‌های بالقوه در فعالیت‌های کشاورزی	اندازه‌گیری ریسک	Stylianou et al. (2020)
حاشیه سود ناخالص	تفاوت بین درآمد کل و هزینه‌های متغیر	درآمد کل منهای هزینه‌های متغیر	واحد پول	Vecchione (2010)
هزینه نیروی کار	هزینه مرتبط با نیروی کار در عملیات مزرعه	دستمزد، حقوق و مزایا	واحد پول	Rasul and Thapa (2004)

ادامه جدول ۳-۵

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
بهره‌وری نیروی کار	درآمد مزرعه به ازای هر واحد کار سالانه	نسبت درآمد مزرعه به هزینه های نیروی کار	واحد پول بر واحد کار سالانه	Rasul and Thapa (2004)
عملکرد ماشین آلات	توانایی ماشین آلات در انجام عملیات خاص	متنوع	هکتار در ساعت	Dantsis et al. (2010)
درآمد خالص مزرعه	درآمد حاصله پس از کسر هزینه‌ها	کل درآمد حاصل از عملیات مزرعه منهای کل هزینه‌های تولید	واحد پول	Häni et al. (2003)
هزینه‌های عملیاتی	کل هزینه‌های مرتبط با عملیات مزرعه	مجموع هزینه‌های مربوط به نیروی کار، تجهیزات، نهاده‌ها، نگهداری و سایر فعالیت‌های عملیاتی	واحد پول	Roy and Chan (2012)
قیمت محصولات	قیمتی که یک محصول در بازار به فروش می‌رسد	قیمت گذاری مبتنی بر بازار یا قیمت گذاری دولتی (مانند خرید تضمینی گندم)	واحد پول	Roy and Chan (2012)
هزینه تولید	کل هزینه‌های انجام شده در تولید محصول	مجموع تمام هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم مرتبط با فعالیت‌های تولیدی	واحد پول	Smith and McDonald (1998)
سودآوری	توانایی مزرعه برای کسب سود	نسبت درآمد خالص به کل درآمد	نسبت یا درصد	Vecchione (2010)
مجموع محصولات کشاورزی	ارزش کلیه محصولات کشاورزی تولید شده	مجموع ارزش تمام محصولات زراعی، دامی و سایر محصولات کشاورزی	واحد پول	Chen YouQi and Tao Tao (2000)
بازگشت دارایی مزرعه	بازگشت سرمایه یا دارایی نسبت به عملیات مزرعه	نسبت درآمد خالص مزرعه به کل دارایی‌های مزرعه	نسبت یا درصد	Chen YouQi and Tao Tao (2000)

جدول ۵-۴. شاخص‌های بعد اجتماعی در ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
دسترسی به منابع	در دسترس بودن و توزیع عادلانه منابع داخلی و خارجی مزرعه	ارزیابی دسترسی کشاورزان به زمین، آب، اعتبار، نهاده‌ها، فناوری و سایر منابع	امتیازدهی	Smith and McDonald (1998)
سن	توزیع سنی کشاورزان	تجزیه و تحلیل جمعیت‌شناسی سنی در بین کشاورزان	محدوده سنی	Dantsis et al. (2010)
اقدامات کشاورزی و زیست محیطی	اتخاذ و اجرای شیوه‌های کشاورزی هم راستا با مسایل زیست محیطی	ارزیابی فعالیت‌های مزرعه بر اساس معیارهای زیست محیطی	امتیازدهی	Stylianou et al. (2020)
رفاه و سلامت حیوانات	رفاه و سلامت حیوانات در نظام-های کشاورزی	ارزیابی بهداشت، مراقبت و اقدامات رفاهی حیوانات	امتیازدهی	van Calker et al. (2006)
سطح تحصیلات	میزان تحصیلات در بین کشاورزان	ارزیابی سطح تحصیلات کشاورزان	محدوده تحصیلات	Dantsis et al. (2010)
اثربخشی خدمات ترویجی	عملکرد و تاثیر برنامه‌های ترویج کشاورزی	ارزیابی خدمات ترویجی بر اساس دسترسی، پذیرش و تأثیر اطلاعات	امتیازدهی	Vecchione (2010)
توجه به محیط زیست	توجه به پایداری و حفظ محیط زیست	ارزیابی دانش و عملکرد کشاورزان مربوط به حفاظت از محیط زیست و پایداری	امتیازدهی	Stylianou et al. (2020)

ادامه جدول ۵-۴

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
رضایت‌مندی کشاورز	میزان رضایت کشاورزان	نظرسنجی، مصاحبه یا ارزیابی برای سنجش رضایت کشاورزان از فعالیت های کشاورزی خود	امتیازدهی	Rasul and Thapa (2004)
خودکفایی در تولید نهاده‌ها	توانایی یک مزرعه برای برآوردن نیازهای ورودی خود	نسبت تعداد یا مقدار ورودی خارجی به اندازه مزرعه	نسبت	Rasul and Thapa (2004)
سرمایه اجتماعی	ارتباطات اجتماعی	ارزیابی ارتباطات اجتماعی، اعتماد، همکاری و شبکه های حمایتی بین کشاورزان و ذینفعان	امتیازدهی	Binder et al. (2010)
کارآفرینی	تعداد کل افرادی که در مزرعه کار می‌کنند	تعداد همه افراد درگیر در فعالیت های مربوط به مزرعه	تعداد نفر در سال	Vecchione (2010)
شرایط کاری	کیفیت و ایمنی شرایط کار برای کارگران مزرعه	ارزیابی عواملی مانند حقوق کار، ایمنی و امنیت شغلی و شرایط محیط کار	امتیازدهی	Binder et al. (2010)

جدول ۵-۵. شاخص‌های بعد حکمرانی (نهادی) در ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
مدیریت کل‌نگر	وجود یک برنامه مدون و بلندمدت که اهداف پایداری را در مأموریت مزرعه ادغام کرده باشد	بررسی وجود، مستندسازی و کیفیت اجرای طرح تجاری و پایداری	امتیازدهی	FAO (2012)
شفافیت سازمانی	میزان آشکارسازی سیاست‌ها، تصمیمات و فعالیت‌های مزرعه برای ذینفعان و عموم	بررسی گزارش‌های مالی و عملکردی و میزان در دسترس بودن آن‌ها برای ذینفعان	امتیازدهی	Giovannucci (2014)
مشارکت ذینفعان	میزان دخالت دادن کارکنان، زنان و جوامع محلی در فرآیندهای تصمیم‌گیری مزرعه	(تعداد جلسات با حضور نمایندگان / کل جلسات) $100 \times$	درصد	Fallah-Alipour et al. (2018)
پاسخگویی	تعهد مدیریت مزرعه به پذیرش مسئولیت پیامدهای فعالیت‌های خود	ارزیابی مکانیزم‌های داخلی برای پذیرش مسئولیت اثرات و جبران خسارات	امتیازدهی	FAO (2014)
امنیت تصدی‌گری زمین	وضعیت حقوقی مالکیت زمین و اطمینان از عدم سلب مالکیت اجباری	بررسی اسناد قانونی مالکیت یا قراردادهای اجاره بلندمدت	امتیازدهی یا رتبه‌بندی کیفی	Deininger and Byerlee (2011)
حاکمیت قانون	میزان پابندی عملیات مزرعه به قوانین و مقررات محلی و ملی	بررسی انطباق فعالیت‌ها با قوانین ملی کار، محیط‌زیست و ایمنی	امتیازدهی	FAO (2014)

ادامه جدول ۵-۵

شاخص	توضیح	روش محاسبه	واحد	مرجع
سازوکار رسیدگی به شکایات	وجود فرآیندی شفاف و عادلانه برای رسیدگی به شکایات کارکنان و همسایگان	ارزیابی وجود کانال‌های امن و بی‌نام برای ثبت شکایات و پیگیری آن‌ها	امتیازدهی	FAO (2014)
ظرفیت‌سازی و یادگیری	میزان سرمایه‌گذاری مزرعه در تحقیق، توسعه و آموزش کارکنان	(هزینه تحقیق و آموزش / کل هزینه‌های عملیاتی) × ۱۰۰	درصد از بودجه	FAO (2012)
اخلاق تجاری و عدالت	رعایت انصاف و اخلاق در تعامل با تأمین‌کنندگان و خریداران	بررسی قراردادها از نظر انصاف در قیمت و توزیع ریسک	امتیازدهی	Blowfield and Dolan (2008)

۵-۳. سنجش جامع پایداری: نرمال‌سازی و تلفیق شاخص‌ها

پس از اندازه‌گیری و گردآوری داده‌های خام مربوط به شاخص‌های منتخب (اکولوژیک، اقتصادی، اجتماعی و حکمرانی)، پژوهشگر با مجموعه‌ای از اعداد ناهمگن مواجه می‌شود که واحدهای سنجش متفاوتی دارند (مانند تن در هکتار، ریال، درصد، یا امتیاز کیفی). چالش اصلی در این مرحله، تبدیل این داده‌های پراکنده به یک قضاوت واحد در مورد وضعیت پایداری سیستم است. برای دستیابی به این هدف، معمولاً از چهار رویکرد اصلی شامل مقایسه تطبیقی با مقادیر مرجع، سیستم وزن‌دهی و امتیازبندی، رتبه‌بندی مقیاسی و تحلیل‌های آماری مقایسه‌ای استفاده می‌شود (European Union and Joint Research Centre, 2008) که در ادامه ضمن تشریح مبانی نظری، گام‌های اجرایی هر یک تبیین می‌گردد.

۵-۳-۱. روش‌های استانداردسازی و وزن‌دهی به شاخص‌ها

نخستین و متداول‌ترین گام در سنجش جامع، استانداردسازی^۱ داده‌هاست تا امکان مقایسه و ترکیب شاخص‌های دارای واحدهای مختلف فراهم شود. این فرآیند معمولاً در قالب یکی از الگوهای زیر اجرا می‌شود:

الف) مقایسه با مقادیر مرجع: در مدل‌های معتبری نظیر MESMIS، SAFA، SIRIUS و SRP (جدول ۵-۱)، وضعیت پایداری از طریق مقایسه نتایج هر شاخص با یک مقدار هدف یا آستانه مطلوب تعیین می‌شود. این مقادیر مرجع عمدتاً از مطالعات پیشین، استانداردهای بین‌المللی یا مقررات نهادی استخراج می‌گردند. برای نمونه، ژن و همکاران (Zhen et al., 2006) در مطالعه ارزیابی مدیریت خاک در شمال چین با مدل SAFA، مقادیر مرجع ۷۵ میلی گرم نیتروژن، ۱۰ میلی گرم فسفر و ۱۰۰ میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک و دامنه pH بین ۶ تا ۷ را به عنوان استاندارد حاصلخیزی تعریف کردند. همچنین برای کیفیت آب زیرزمینی، حد مجاز ۵۰ میلی گرم نترات بر لیتر (مطابق استاندارد سازمان بهداشت جهانی^۲) ملاک عمل قرار گرفت. این رویکرد به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا فاصله تا هدف را برای هر شاخص محاسبه کند.

ب) وزن‌دهی و امتیازبندی: این رویکرد که در روش‌هایی نظیر ISAP، SOSTARE، MOTIF و LCA رایج است، شامل چهار مرحله متوالی است:

- **محاسبه مقادیر خام:** استخراج اعداد واقعی هر شاخص از داده‌های میدانی.
 - **نرمال‌سازی ریاضی:** تبدیل داده‌ها به متغیرهای بدون بعد (معمولاً در بازه ۰ تا ۱).
- یکی از پرکاربردترین روش‌ها، تکنیک Min-Max است که در آن مقدار هر شاخص با فرمول
$$\frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$
 نرمال می‌شود. در مدل SAFE، این کار از طریق توابع تبدیل

1. Normalization

2. World Health Organization (WHO)

غیرخطی انجام می‌شود تا حساسیت سیستم در نزدیکی نقاط بحرانی بهتر نمایان شود (FAO, 2014).

• **وزن‌دهی:** از آنجا که تمام شاخص‌ها اهمیت یکسانی ندارند، به هر شاخص وزنی اختصاص می‌یابد. این وزن‌ها معمولاً از طریق نظرسنجی از خبرگان (مانند روش دلفی^۱) یا تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ تعیین می‌گردند (Saaty, 1987; Linstone, 1979).

• **تلفیق:** در نهایت، شاخص‌های نرمال‌شده و وزن‌دار با استفاده از میانگین حسابی یا هندسی ترکیب می‌شوند تا نمره نهایی پایداری حاصل شود. هر چه این نمره به ۱ (یا ۱۰۰) نزدیک‌تر باشد، پایداری سیستم بالاتر است.

(ج) **رتبه‌بندی مقیاسی:** این رویکرد که حد فاصلی میان روش‌های کمی و کیفی است، در مدل‌های شناخته‌شده‌ای نظیر RISE و SAFE کاربرد دارد. در این روش، نتایج شاخص‌ها نه صرفاً به عنوان یک عدد، بلکه در قالب طبقات کیفی (مانند ضعیف، متوسط، خوب) یا مقیاس‌های رنگی (مانند چراغ راهنمایی) تفسیر می‌شوند (Hani et al., 2003). فرآیند اجرایی در این مدل‌ها، نظیر آنچه در مدل SAFE (FAO, 2014) پیاده‌سازی می‌شود، شامل سه گام کلیدی است:

• **نرمال‌سازی غیرخطی:** برخلاف روش‌های خطی (Min-Max)، در اینجا از توابع ریاضی خاصی استفاده می‌شود تا مقادیر شاخص‌ها به یک بازه استاندارد (مثلاً ۰ تا ۱) تبدیل شوند؛ به‌طوری‌که عدد ۰ بیانگر پایداری غیرقابل قبول و عدد ۱ بیانگر وضعیت مطلوب است.

• **وزن‌دهی:** شاخص‌های نرمال‌سازی شده بر اساس اهمیت نسبی خود در سلامت اکوسیستم وزن‌دهی می‌شوند.

1. Delphi method

2. Analytic hierarchy process (AHP)

• **تلفیق:** در نهایت، شاخص‌ها ترکیب شده تا شاخص نهایی پایداری حاصل شود. ویژگی بارز این روش (به‌ویژه در مدل RISE)، نمایش نتایج به صورت چندضلعی‌های پایداری است که امکان تشخیص سریع نقاط ضعف و قوت مزرعه را فراهم می‌سازد.

د) رویکردهای آماری مقایسه‌ای: در شرایطی که مقادیر مرجع استاندارد وجود ندارد، روش‌های آماری راهگشا هستند. این روش‌ها با مقایسه عملکرد نسبی نظام‌های زراعی نسبت به یکدیگر (نه نسبت به یک استاندارد ثابت)، تفاوت‌ها را آشکار می‌سازند. به عنوان مثال، رسول و تاپا (Rasul and Thapa, 2004) با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) نشان دادند که اگرچه عملکرد محصول در نظام‌های ارگانیک و متداول تفاوت معنی‌داری ندارد، اما شاخص‌های تنوع زیستی و حاصلخیزی خاک در نظام ارگانیک برتری آماری دارند. همچنین دیو‌کوتا و همکاران (Devkota et al., 2019) در غیاب استاندارد مشخص، از میانگین جمعیت به عنوان خط مبنا و از دهک بالا به عنوان هدف پایداری استفاده کردند.

۵-۳-۲. تحلیل هم‌افزایی‌ها و بده‌بستان‌ها

سنجش پایداری نظام‌های زراعی فراتر از یک محاسبه ریاضی ساده برای جمع‌بندی شاخص‌هاست؛ چرا که ابعاد مختلف پایداری لزوماً هم‌جهت نیستند و بهبود در یک شاخص، گاه به قیمت افول شاخصی دیگر تمام می‌شود. این پدیده که در ادبیات علمی به عنوان بده‌بستان^۱ شناخته می‌شود (Kanter et al., 2018; López-Ridaura et al., 2002)، زمانی رخ می‌دهد که پیشبرد یک هدف مدیریتی، نظیر افزایش عملکرد اقتصادی از طریق مصرف بالای کودهای نیتروژنه، منجر به تخریب هم‌زمان شاخص‌های اکولوژیک مانند کیفیت آب زیرزمینی یا تنوع زیستی خاک گردد. در مقابل، وضعیت مطلوب‌تر

1. Trade-off

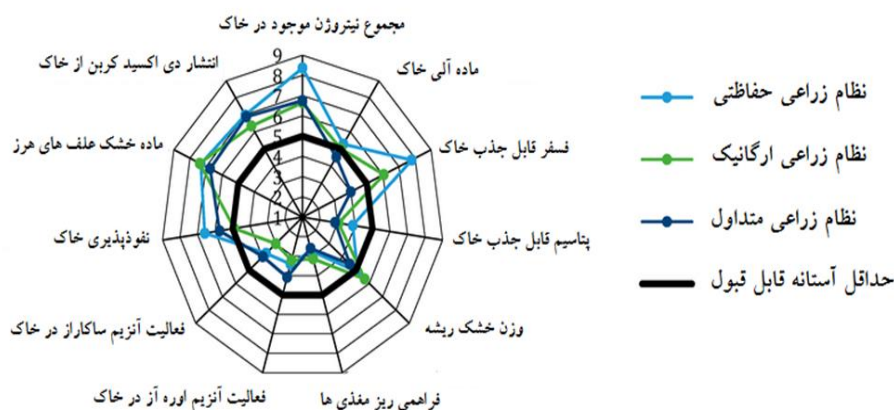
هم‌افزایی^۱ است که در آن، یک مداخله مدیریتی واحد، بهبود هم‌زمان در چندین بعد را به همراه دارد؛ مانند افزودن ماده آلی به خاک که هم‌زمان ظرفیت نگهداری آب، تنوع میکروبی و عملکرد محصول را ارتقا می‌بخشد. بنابراین، هنر مدیریت پایداری نه در حداکثرسازی یک شاخص منفرد، بلکه در ایجاد تعادل بهینه میان این نیروهای متضاد و تقویت نقاط هم‌افزایی است.

برای بصری‌سازی و تحلیل دقیق این روابط پیچیده، استانداردترین ابزار در پژوهش‌های جهانی استفاده از نمودارهای عنکبوتی^۲ یا نمودارهای رادار^۳ است (Bell and Morse, 2012). در این روش ترسیمی، هر یک از شاخص‌های نرمال‌سازی شده بر روی یکی از محورهای شعاعی نمودار قرار می‌گیرند که از یک نقطه مرکزی مشترک (نماینگر کمترین پایداری) آغاز و به سمت محیط دایره (نماینگر بیشترین پایداری) امتداد می‌یابند. با اتصال نقاط مربوط به شاخص‌های مختلف، یک چندضلعی هندسی شکل می‌گیرد که شکل و مساحت آن حاوی اطلاعات ارزشمندی است (شکل ۵-۱). در این تفسیر گرافیکی، مساحت کلی چندضلعی بیانگر ظرفیت کلی پایداری سیستم است، اما شکل هندسی آن توازن سیستم را نشان می‌دهد؛ هرچه این چندضلعی به شکل دایره‌ای منتظم نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تعادل پایدار میان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی است، در حالی که چندضلعی‌های نامنتظم و دندانه‌دار، بیانگر وجود عدم تعادل شدید و قربانی شدن برخی ابعاد به نفع ابعاد دیگر هستند.

نکته مهم در تفسیر این تحلیل‌ها، توجه به مفهوم آستانه‌های بحرانی است. در بسیاری از موارد، میانگین حسابی شاخص‌ها می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا عملکرد بسیار عالی در یک بعد (مثلاً سودآوری بالا) می‌تواند ضعف شدید و خطرناک در بعد دیگر (مثلاً فرسایش خاک فراتر از حد بازگشت‌ناپذیر) را بپوشاند. تحلیل‌های مبتنی بر هم‌افزایی و

-
1. Synergy
 2. Spider charts
 3. Radar charts

بده‌بستان به پژوهشگران و سیاست‌گذاران هشدار می‌دهند که پایداری واقعی زمانی محقق می‌شود که هیچ‌یک از بازوهای نمودار عنکبوتی از آستانه بحرانی عبور نکرده باشند، حتی اگر مساحت کلی نمودار بزرگ باشد. بدین ترتیب، هدف نهایی مدیریت نظام‌های زراعی، یافتن آن نقطه تعادلی است که در آن ضمن رعایت حداقل‌های زیست‌محیطی و اجتماعی، بهره‌وری اقتصادی نیز در سطحی قابل قبول حفظ شود و سیستم از تله بهینه‌سازی تک‌بعدی که پایداری بلندمدت را تهدید می‌کند، رهایی یابد.



شکل ۵-۱. نمایش شماتیک تحلیل چندبعدی پایداری در نظام‌های زراعی با استفاده از نمودار عنکبوتی (رادار). در این نمودار، هر یک از محورهای شعاعی بیانگر مقدار نرمال‌سازی شده یکی از شاخص‌های منتخب پایداری است. نقاط روی محورها نشان‌دهنده عملکرد سیستم زراعی در آن شاخص خاص بوده و اتصال این نقاط به یکدیگر، چندضلعی پایداری را تشکیل می‌دهد. مساحت کلی چندضلعی، نمایانگر ظرفیت کلی پایداری سیستم است، در حالی که شکل هندسی آن توازن میان ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. فرورفتنی‌های نمودار به سمت مرکز، بیانگر نقاط ضعف یا بحرانی و پیشروی‌ها به سمت محیط دایره، نشان‌دهنده نقاط قوت سیستم هستند. مقایسه چندضلعی‌های مختلف (با رنگ‌های متفاوت)، امکان ارزیابی بصری هم‌افزایی‌ها و بده‌بستان‌ها میان نظام‌های زراعی مختلف را فراهم می‌سازد.

۵-۴. اعتبارسنجی شاخص‌ها^۱ و تحلیل حساسیت^۲ نتایج

در فرآیند ارزیابی پایداری، باید به این نکته بنیادین توجه داشت که دستیابی به یک امتیاز نهایی یا ترسیم نمودارهای گرافیکی جذاب (مانند خروجی مدل‌های SAFE یا نمودارهای عنکبوتی)، اگرچه برای مدیریت سیستم مفید است، اما نقطه پایان پژوهش علمی نیست. این اعداد و نمودارها، تنها مدل‌هایی انتزاعی از واقعیتی پیچیده هستند و پیش از آنکه مبنای تصمیم‌گیری یا سیاست‌گذاری قرار گیرند، اعتبار خود ابزارهای ارزیابی باید از طریق دو پرسش کلیدی آزموده شود. نخست آنکه آیا شاخص‌های منتخب واقعاً همان پدیده اکولوژیک یا اقتصادی مدنظر را می‌سنجند؟ و دوم، نتایج نهایی تا چه میزان تحت تأثیر قضاوت‌های سلیقه‌ای در فرآیند وزن‌دهی قرار دارند؟ پاسخ به این پرسش‌ها نیازمند اجرای دو مرحله تکمیلی شامل اعتبارسنجی شاخص‌ها و تحلیل حساسیت است.

گام نخست یا اعتبارسنجی شاخص‌ها، فرآیندی تجربی است که در آن امتیاز محاسباتی یک شاخص با واقعیت‌های میدانی راستی‌آزمایی می‌شود تا اعتبار پیش‌بین^۳ آن اثبات گردد (Bockstaller and Girardin, 2003). بوکستالر و همکاران (Bockstaller et al., 2008) استدلال می‌کنند که یک شاخص پایداری تنها زمانی قابل اعتماد است که همبستگی آماری معنی‌داری با پیامدهای واقعی و قابل اندازه‌گیری در مزرعه داشته باشد. برای مثال، فرض کنید در یک مدل ارزیابی، به مزرعه‌ای به دلیل رعایت تناوب زراعی پیچیده، امتیاز پایداری بالایی اختصاص داده‌ایم. اعتبارسنجی بدین معناست که بررسی کنیم آیا در عمل، این امتیاز بالا با پیامدهای عینی نظیر کاهش جمعیت بانک بذر علف‌های هرز، افزایش کربن آلی خاک یا کاهش نوسانات عملکرد در طول زمان همراه بوده است یا خیر؟ چنانچه داده‌های میدانی نشان دهند که با وجود امتیاز بالا، بهبود

-
1. Indicator validation
 2. Sensitivity analysis
 3. Predictive validity

ملموسی در وضعیت اکوسیستم رخ نداده است، آن شاخص فاقد اعتبار لازم برای آن اقلیم یا نظام زراعی خاص بوده و نیازمند بازنگری است.

پس از اطمینان از صحت شاخص‌ها، گام ضروری بعدی سنجش استحکام مدل نهایی از طریق تحلیل حساسیت است. ضرورت این تحلیل از آنجا ناشی می‌شود که در اکثر روش‌های ارزیابی جامع، تعیین وزن و اهمیت نسبی شاخص‌ها مبتنی بر نظرات کارشناسی است و همواره رگه‌هایی از ذهنیت‌گرایی و عدم قطعیت در آن وجود دارد. تحلیل حساسیت ابزاری آماری است که به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا تأثیر این عدم قطعیت‌ها را بر خروجی نهایی بسنجد (Razavi et al., 2021). در این روش، فرآیند ارزیابی چندین بار شبیه‌سازی شده و در هر تکرار، وزن شاخص‌های کلیدی به صورت سیستماتیک تغییر داده می‌شود (مثلاً اعمال نوسانات $\pm 10\%$ درصدی در وزن‌ها). اگر با وجود این تغییرات، رتبه‌بندی نهایی نظام‌های زراعی ثابت بماند (مثلاً نظام خاک‌ورزی حفاظتی همچنان در رتبه برتر پایداری نسبت به نظام متداول قرار گیرد)، می‌توان ادعا کرد که نتیجه‌گیری مطالعه مستحکم و قابل اتکا است. اما اگر با یک تغییر جزئی در وزن یک شاخص، جایگاه نظام‌ها دگرگون شود، مدل دارای حساسیت بالا بوده و نتایج آن شکننده است.

در مجموع، تفکیک این دو مفهوم برای درک عمیق پایداری ضروری است؛ اعتبارسنجی متضمن صحت علمی^۱ ابزار است و به ما می‌گوید که آیا ابزار درستی ساخته‌ایم، در حالی که تحلیل حساسیت بیانگر قابلیت اتکا^۲ و ثبات نتایج است و نشان می‌دهد که آیا ابزار ما در شرایط مختلف محاسباتی عملکرد یکسانی دارد یا خیر. انجام هم‌زمان این دو تحلیل، شرط لازم برای ارتقای یک مطالعه پایداری از سطح یک گزارش توصیفی به یک پژوهش علمی دقیق و قابل دفاع محسوب می‌شود.

1. Validity

2. Reliability

۵-۵. چالش‌های عملیاتی و بومی‌سازی شاخص‌های پایداری در ایران

در فرآیند انتخاب و بومی‌سازی روش‌های ارزیابی پایداری، پژوهشگر باید به این واقعیت بنیادین توجه داشته باشد که اکثر چارچوب‌های استاندارد جهانی (نظیر RISE، SAFA یا مدل‌های توسعه یافته در اتحادیه اروپا)، بر مبنای ساختارهای کشاورزی پیشرفته، اقلیم‌های معتدل و نظام‌های داده‌برداری دقیق طراحی شده‌اند. پیاده‌سازی این مدل‌ها در بستر نظام‌های زراعی ایران، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های ساختاری و اکولوژیک، می‌تواند منجر به نتایجی گمراه‌کننده و غیرقابل اجرا شود. در ادامه، مهم‌ترین گره‌های کور عملیاتی و راهکارهای برون‌رفت از آن‌ها با تمرکز بر واقعیت‌های میدانی کشاورزی ایران تشریح می‌گردد.

• **چالش فقدان داده‌های ثبت‌شده و اریب حافظه:** بزرگترین مانع در اجرای مدل‌های دقیق (برای مثال روش ارزیابی چرخه حیات)، خلأ داده‌های مزرعه‌ای است. برخلاف کشاورزان در کشورهای پیشرفته که اغلب ملزم به نگهداری دفاتر ثبت دقیق برای دریافت یارانه‌ها هستند، در ایران فرهنگ ثبت داده‌های زراعی نهادینه نشده است. کشاورز ایرانی معمولاً سوابق مکتوبی از اینکه دقیقاً در چه تاریخی، چه میزان سم با چه غلظتی مصرف کرده، یا موتور پمپ آب چند ساعت با چه رانندگانی کار کرده است، ندارد. این محدودیت باعث می‌شود که پژوهشگر ناچار به استفاده از پرسشنامه‌های مبتنی بر حافظه شود. در اینجا، پدیده‌ای آماری به نام اریب یادآوری^۱ رخ می‌دهد؛ جایی که کشاورز مقادیر مصرف نهاده‌ها را (سهواً یا برای انطباق با عرف) کمتر یا بیشتر از واقعیت بیان می‌کند. این خطا در محاسبه شاخص‌های حساسی مانند کارایی مصرف انرژی یا ردپای کربن، می‌تواند اعتبار کل پژوهش را زیر سوال ببرد. بنابراین، در شرایط ایران، استفاده از

1. Recall bias

اریب یادآوری نوعی خطای سیستماتیک در پژوهش‌های گذشته‌نگر است که ناشی از ناتوانی یا بی‌دقتی حافظه پاسخ‌دهنده در بازیابی جزئیات وقایع پیشین (مانند میزان دقیق نهاده مصرفی سال‌های قبل) می‌باشد (Coughlin, 1990).

روش‌های تخمینی (مثلاً محاسبه مصرف سوخت بر اساس توان اسمی تراکتور و ساعت کارکرد تخمینی) به عنوان مکمل داده‌های پرسشنامه‌ای اجتناب‌ناپذیر است.

• **عدم تطابق مقیاس و پراکندگی اراضی:** چالش دوم، تضاد میان فرض یکپارچگی در مدل‌های جهانی و واقعیت خرده‌مالکی و پراکندگی در ایران است. بسیاری از شاخص‌های اکولوژیک (مانند تنوع زیستی حاشیه مزارع یا مدیریت تلفیقی آفات) برای مزارع بزرگ و یکپارچه تعریف شده‌اند. در ایران، نظام بهره‌برداری اغلب شامل قطعات کوچک، پراکنده و نامنظم است که مدیریت واحدی ندارند. ارزیابی شاخصی مانند کارایی مصرف آب در شرایطی که آب از یک چاه مشترک بین ده کشاورز با قطعات پراکنده توزیع می‌شود، بسیار پیچیده‌تر از یک مزرعه تجاری مستقل است. در این شرایط، تعریف واحد ارزیابی باید از سطح مزرعه به سطح بهره‌بردار یا حتی واحد مدیریت آب تغییر یابد تا نتایج معنادار شوند.

• **ناهمخوانی شاخص‌های محیط‌زیستی با اقلیم خشک:** بسیاری از مدل‌های اروپایی بر شاخص‌هایی نظیر آب‌شویی نترات یا اسیدی شدن خاک تمرکز دارند که چالش مناطق مرطوب است. در ایران، بحران اصلی پایداری حول محور کمبود آب و شور شدن اراضی می‌چرخد. بنابراین، بومی‌سازی شاخص‌های اکولوژیک در ایران به معنای تغییر وزن‌دهی شاخص‌هاست؛ به طوری که شاخص‌هایی نظیر شوری خاک، افت سطح ایستابی و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب، باید جایگزین یا در اولویت بالاتر نسبت به شاخص‌های استاندارد جهانی قرار گیرند. نادیده گرفتن این تفاوت اقلیمی، منجر به امتیازدهی بالا به مزارعی می‌شود که شاید آبشویی نترات را کنترل کرده‌اند، اما در حال تخلیه جبران‌ناپذیر سفره‌های آب زیرزمینی هستند.

• **پیچیدگی‌های اجتماعی-اقتصادی خاص:** در بعد اجتماعی، ساختار خانواده‌محور کشاورزی ایران، تعاریف استاندارد مفاهیمی چون نیروی کار، دستمزد و ایمنی شغلی را به چالش می‌کشد. در بسیاری از مزارع ایران، نیروی کار شامل اعضای خانواده است که

دستمزد رسمی دریافت نمی‌کنند و تحت پوشش بیمه‌های کارگری نیستند. اعمال سخت‌گیرانه شاخص‌های جهانی (نظیر قراردادهای رسمی کار) منجر به امتیاز منفی ناعادلانه برای این نظام‌ها می‌شود. همچنین در بعد اقتصادی، وجود تورم مزمن و نوسانات شدید قیمت نهاده‌ها، محاسبه شاخص‌هایی نظیر ثبات درآمدی را دشوار می‌سازد. در این بستر، پایداری اقتصادی نه صرفاً با سودآوری، بلکه با شاخص‌هایی نظیر تنوع منابع درآمدی خانوار (معیشت چندگانه) و تاب‌آوری در برابر شوک‌های قیمتی بهتر سنجیده می‌شود.

برای غلبه بر این چالش‌های چندوجهی، پژوهشگران ایرانی باید از رویکرد کمال‌گرایانه (اندازه‌گیری همه‌چیز) فاصله گرفته و به سمت استراتژی مجموعه حداقل داده‌ها^۱ حرکت کنند. این رویکرد به معنای شناسایی و انتخاب هوشمندانه تعداد محدودی از شاخص‌های کلیدی است که واجد سه ویژگی باشند: ۱) حساسیت بالا به مدیریت زراعی، ۲) سهولت و ارزانی اندازه‌گیری در شرایط مزرعه، و ۳) همبستگی بالا با سایر ویژگی‌های سیستم. تحقق این امر مستلزم مشارکت فعال ذی‌نفعان به‌ویژه کشاورزان است. تشکیل پلتفرم‌های مشترک میان دانشگاهیان، مروجان و کشاورزان پیشرو برای غربال‌گری شاخص‌ها، نه تنها باعث افزایش مقبولیت نتایج می‌شود، بلکه تضمین می‌کند که شاخص‌های انتخابی (مانند شوری آب یا هزینه واقعی تولید)، دغدغه‌های واقعی مدیریت مزرعه در ایران را منعکس می‌کنند. تنها در این صورت است که ارزیابی پایداری از یک تمرین آکادمیک انتزاعی، به ابزاری کاربردی برای نجات نظام‌های زراعی کشور تبدیل خواهد شد.

۵-۶. ارزیابی پایداری نظام‌های زراعی با رویکرد چرخه حیات

در سپهر نوین ارزیابی پایداری، حسابداری منابع طبیعی^۱ به عنوان رویکردی پیشرو، با تمرکز بر ردیابی و پایش دقیق ذخایر و جریان‌های منابع، افق جدیدی را پیش روی پژوهشگران گشوده است. این رویکرد که هم‌زمان به دو جنبه کمی و کیفی منابع توجه دارد، طیف وسیعی از ورودی‌ها، از منابع زیستی نظیر محصولات کشاورزی و دامی تا منابع کانی و انرژی مانند عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها و سوخت‌های فسیلی را پوشش می‌دهد. در این میان، روش ارزیابی چرخه حیات^۲ (LCA) به عنوان کاربردی‌ترین و جامع‌ترین ابزار پایش پایداری شناخته می‌شود (Soule et al., 2023). این متدولوژی با تحلیل سیستماتیک جریان‌های مواد و انرژی در سرتاسر زنجیره تولید، از لحظه استخراج مواد اولیه و تهیه نهاده‌ها تا مراحل کاشت، داشت، برداشت، فرآوری و توزیع، تصویری تمام‌نما از اثرات تجمعی زیست‌محیطی ارائه می‌دهد. مزیت راهبردی LCA در توانایی آن برای شناسایی نقاط بحرانی^۳ در زنجیره تولید، محاسبه دقیق ردپای اکولوژیک، ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف منابع و ایجاد بستری علمی برای مقایسه نظام‌های تولیدی مختلف نهفته است (Barthel et al., 2015). به طور مشخص در نظام‌های زراعی، این روش قادر است شاخص‌های پیچیده‌ای نظیر مصرف آب مجازی، پتانسیل گرمایش جهانی، اسیدی‌شدن خاک‌ها و تخریب تنوع زیستی را کمی‌سازی کند؛ قابلیت‌هایی که آن را به ابزاری بی‌بدیل برای تدوین سیاست‌های کشاورزی پایدار تبدیل کرده است.

ریشه‌های تاریخی این روش به دهه ۱۹۶۰ میلادی و ظهور مباحث اکولوژی صنعتی با رویکرد از گهواره تا گور^۴ بازمی‌گردد که به تدریج به عنوان استاندارد طلایی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی وارد بخش کشاورزی شد (Guinée et al., 2011). این

-
1. Natural resource accounting
 2. Life cycle assessment (LCA)
 3. Hotspots
 4. Cradle-to-grave

فرآیند جامع که چرخه حیات محصول را از تولد (تولید نهاده) تا مرگ (بازگشت بقایا به خاک) رصد می‌کند، در ایران نیز مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات متعددی کاربردپذیری این روش را در اقلیم‌های مختلف کشور اثبات کرده‌اند؛ از جمله پژوهش‌های سلطانی و همکاران (۱۳۸۹) و فلاح‌پور و همکاران (Fallahpour et al., 2012) بر روی گندم، خرم‌دل و همکاران (۱۳۹۸) بر روی ذرت، زارعی و همکاران (Zarei et al., 2019) در محصولات صیفی و فتحی و همکاران (۱۳۹۸) در دانه‌های روغنی. تمرکز عمده این پژوهش‌ها بر سنجش پیامدهای کلیدی نظیر تغییر اقلیم، انباشت مواد غذایی در منابع آبی^۱، سمیت بوم‌شناختی و تخلیه منابع انرژی تجدیدناپذیر بوده است. با این وجود، فقدان مطالعات تطبیقی گسترده برای مقایسه نظام‌های زراعی مختلف در بستر بومی ایران، خلأ پژوهشی قابل تأملی است که پر کردن آن می‌تواند به درک عمیق‌تر از پایداری تولید و تدوین استراتژی‌های ملی کاهش اثرات محیط‌زیستی منجر شود.

قدرت تحلیل LCA ناشی از ویژگی‌های روش‌شناختی منحصر به فرد آن است. نخستین ویژگی، ماهیت چندبعدی آن است که برخلاف روش‌های تک‌بعدی، امکان واکاوی هم‌زمان اثرات محلی و فوری (مانند آلودگی نیتراتی آب‌های زیرزمینی) و پیامدهای جهانی و بلندمدت (مانند تغییر اقلیم) را فراهم می‌آورد (Rebitzer et al., 2004; Bare, 2011). ویژگی دوم LCA، انعطاف‌پذیری در تعریف واحد مقایسه یا هم‌ارزی خدمات^۲ است. این اصل بیان می‌کند که مقایسه نظام‌های زراعی باید بر مبنای ارائه عملکرد یا خدمت یکسان صورت گیرد (Yang, 2019). برای مثال، در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی آفت‌کش‌ها، مقایسه نباید صرفاً بر اساس حجم لیتر یا کیلوگرم مصرفی باشد، بلکه باید بر مبنای کارایی آن‌ها در حفظ عملکرد (مثلاً کنترل ۹۰ درصد آفات در سطح یک هکتار) انجام پذیرد. این رویکرد تضمین می‌کند که نتایج، منعکس‌کننده کارایی واقعی سیستم در

1. Eutrophication

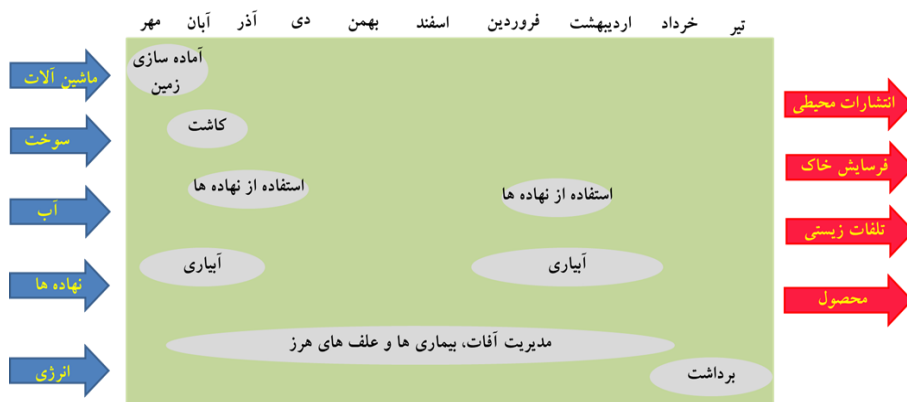
2. Functional equivalence

ارائه خدمات مورد نیاز باشند. در نهایت، قابلیت مقایسه‌ای قدرتمند این روش، امکان تحلیل نظام‌مند رابطه میان نهاده‌های ورودی و پیامدهای خروجی را مهیا می‌سازد (Finnveden et al., 2009). البته باید توجه داشت که این روش از قضاوت‌های پژوهشگر، به‌ویژه در مراحل امتیازدهی و تفسیر، تأثیر می‌پذیرد که این امر لزوم شفافیت و مستندسازی دقیق فرآیند تصمیم‌گیری را دوجندان می‌کند (Hellweg and Milà i Canals, 2014).

۵-۶-۱. مبانی، مراحل اجرا و کاربردهای LCA در تحلیل پایداری

فرآیند اجرایی ارزیابی چرخه حیات، یک ساختار خطی ساده نیست، بلکه چرخه‌ای پویا و تکرارپذیر است که مطابق استانداردهای بین‌المللی (ISO, 14040)، از چهار مرحله اصلی و بهم‌پیوسته تشکیل شده است. سنگ بنا و نخستین گام در این فرآیند، تعیین هدف و محدوده مطالعه است. در این مرحله حیاتی، پژوهشگر باید اهداف دقیق مطالعه، دامنه بررسی و مرزهای سیستم را ترسیم نماید. مهم‌ترین تصمیم در این گام، انتخاب واحد کارکردی^۱ است که به عنوان مبنای استاندارد مقایسه عمل می‌کند (Guinée, 2002). در مطالعات کشاورزی، این واحد می‌تواند بر اساس معیار وزنی (کیلوگرم محصول)، معیار سطح (هکتار زمین) و یا حتی ارزش غذایی تعریف شود. اهمیت این انتخاب در مطالعه برنتروپ و همکاران (Brenttrup et al., 2004) مشهود است که با انتخاب واحد کیلوگرم کود در هکتار، اثرات زیست‌محیطی روش‌های تغذیه‌ای گندم را بررسی کردند. در مقابل، میسترلینگ و همکاران (Meisterling et al., 2009) با رویکردی متفاوت، واحد ۰/۶۷ کیلوگرم آرد گندم را برگزیدند و با گسترش مرز سیستم تا مرحله فرآوری، به مقایسه نظام‌های ارگانیک و متداول پرداختند. این تفاوت در انتخاب واحد کارکردی و مرز سیستم، نشان می‌دهد که نتایج LCA تا چه حد به تعاریف اولیه وابسته است و هرگونه مقایسه میان مطالعات مختلف، نیازمند یکسان‌سازی این پارامترهاست.

پس از تثبیت اهداف، مطالعه وارد فاز دوم یا تجزیه و تحلیل فهرست یا سیاهه^۱ می‌شود که اغلب زمان‌برترین بخش کار است. در این مرحله، تمامی جریان‌های ورودی (شامل انرژی، آب، مواد اولیه) و خروجی (محصولات، گازهای گلخانه‌ای، پسماندها) به صورت کمی محاسبه می‌شوند (شکل ۵-۲). داده‌های مورد نیاز این بخش ترکیبی از اندازه‌گیری‌های میدانی مستقیم و اطلاعات استخراج شده از پایگاه‌های داده معتبر جهانی (مانند Ecoinvent^۲) است که معمولاً با کمک نرم‌افزارهای تخصصی نظیر سیماپرو^۳، گابی^۴ و اوپن‌ال‌سی‌ای^۵ پردازش می‌شوند (Herrmann and Moltesen, 2015). دقت در مرحله تحلیل سیاهه از اهمیت بنیادین برخوردار است؛ چراکه هرگونه خطا در کمی‌سازی نهاده‌ها (نظیر میزان سوخت یا کود مصرفی)، مستقیماً در نتایج ارزیابی اثرات بازتاب یافته و موجب انحراف خروجی‌های مدل می‌گردد.



شکل ۵-۲. نمایشی از ورودی‌ها و خروجی‌ها در کشت پاییزه گندم. شکل از نویسنده

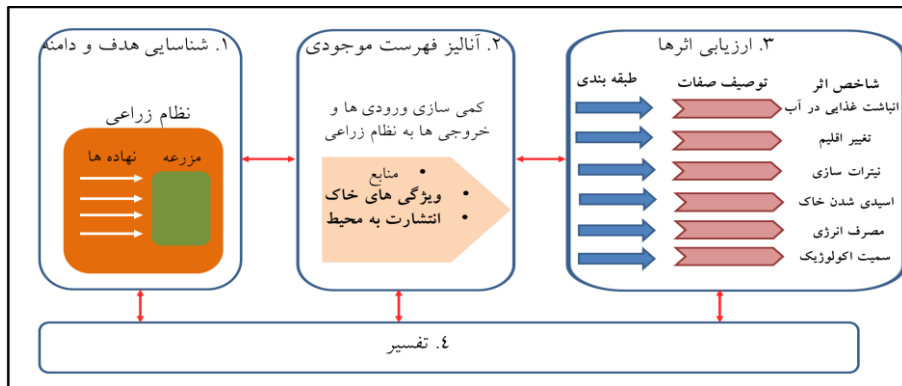
1. Inventory analysis
2. Ecoinvent.org
3. Sima Pro
4. GaBi
5. Open LCA

سومین گام، مرحله ارزیابی تأثیر^۱ است که داده‌های خام مرحله قبل را به شاخص‌های زیست‌محیطی قابل فهم ترجمه می‌کند. هدف این مرحله، درک پیامدهای مصرف منابع بر سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و ذخایر منابع طبیعی است (i Canals et al., 2006). ویژگی بارز این مرحله، نگاه جامع‌نگر آن است. به‌طور مثال در سیستم‌های آبیاری، اگرچه روش‌های تحت فشار نظیر قطره‌ای به‌طور چشمگیری از هدررفت آب جلوگیری می‌کنند، اما رویکرد چرخه حیات تصویر کامل‌تری ارائه می‌دهد. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که بار زیست‌محیطی ناشی از تولید پلیمرها (مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار کربن) و همچنین معضل مدیریت ضایعات پلاستیکی پس از استهلاک سیستم، می‌تواند بخشی از مزایای صرفه‌جویی در آب را خنثی کند. از این‌رو، قضاوت در مورد کارایی سیستم نباید تنها محدود به حجم آب مصرفی باشد، بلکه باید ردپای کربن و انرژی نهفته در تجهیزات نیز در تراز نهایی لحاظ گردد.

در نهایت، چرخه ارزیابی با مرحله تفسیر نتایج^۲ تکمیل می‌شود. در این گام، یافته‌های مراحل قبل با در نظر گرفتن محدودیت‌ها، عدم قطعیت‌ها و مفروضات مطالعه تحلیل می‌شوند (ابراهیمی و ابراهیمی، ۱۴۰۱). تفسیر نتایج LCA فعالیتی مکانیکی نیست، بلکه نیازمند درک عمیق از بستر منطقه‌ای و اولویت‌های اکولوژیک است. به عنوان نمونه، در تفسیر همان مثال آبیاری، برای یک منطقه خشک و بحرانی، ممکن است وزن صرفه‌جویی در آب بسیار بیشتر از هزینه تولید پلاستیک باشد و سیستم قطره‌ای توصیه شود؛ اما در منطقه‌ای با آب کافی و خاک شور، اولویت‌ها تغییر کرده و سیستم‌های سطحی به دلیل نیاز به آبیاری نمک، گزینه پایدارتری محسوب شوند. بنابراین، شفافیت در گزارش‌دهی روش‌شناسی و مبانی تفسیر، کلید اصلی برای افزایش قابلیت اعتماد و کاربردپذیری نتایج ارزیابی چرخه حیات در سیاست‌گذاری‌های کلان است. برای جمع‌بندی و درک بهتر توالی این اقدامات، شکل ۳-۵ ساختار کلی و ارتباطات متقابل این چهار مرحله را به صورت شماتیک به تصویر کشیده است.

1. Impact assessment

2. Interpretation



شکل ۵-۳. نمایش شماتیک و خلاصه مراحل چهارگانه ارزیابی چرخه حیات (LCA) بر اساس استاندارد ISO, 14040. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه فرآیند ارزیابی از تعیین هدف آغاز شده و با عبور از تحلیل موجودی و ارزیابی اثرات، به تفسیر نتایج می‌رسد. ماهیت چرخشی و تعاملی فلش‌ها بیانگر پویا بودن این فرآیند است. شکل از نویسنده

۵-۲-۲. مطالعه موردی محاسباتی: تحلیل تطبیقی ردپای کربن در نظام‌های خاک‌ورزی متداول و حفاظتی گندم

برای درک عملیاتی فرآیند ارزیابی چرخه حیات و گذر از مفاهیم انتزاعی به کاربرد عینی، در این بخش یک مطالعه موردی تطبیقی ارائه می‌شود. هدف این مطالعه، مقایسه پتانسیل ردپای کربن در دو سناریوی مدیریتی متفاوت شامل نظام خاک‌ورزی متداول (با شخم عمیق و تردد زیاد ماشین‌آلات) و نظام خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی با حفظ بقایا) در تولید گندم آبی است. این رویکرد مقایسه‌ای به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا تأثیر تغییر روش‌های مدیریتی را بر تراز انتشار گازهای گلخانه‌ای به صورت کمی بسنجد. داده‌های این مثال اگرچه بر اساس مقادیر معمول در نظام‌های زراعی ایران شبیه‌سازی شده‌اند، اما ماهیت آموزشی دارند. فرآیند محاسبات مطابق استاندارد ISO در سه گام اصلی زیر انجام می‌پذیرد:

الف) گام اول: تعریف هدف و تحلیل فهرست موجودی، در نقطه آغاز، واحد کارکردی به عنوان مبنای مقایسه، تولید یک تن دانه گندم تعریف می‌شود. در مرحله

تحلیل فهرست، تفاوت‌های بنیادین دو سیستم در مصرف نهاده‌ها شناسایی می‌گردد. در نظام متداول، به دلیل عملیات شخم و دیسک، مصرف سوخت گازوئیل بالاست (۱۵۰ لیتر در هکتار)، اما در نظام حفاظتی به دلیل حذف عملیات خاک‌ورزی، مصرف سوخت به شدت کاهش می‌یابد (۵۰ لیتر در هکتار). در مقابل، نظام حفاظتی برای کنترل علف‌های هرز (که در سیستم رایج با شخم کنترل می‌شدند) نیازمند مصرف بیشتر علف‌کش‌هاست. سایر نهاده‌ها نظیر کود و الکتریسیته در هر دو سیستم با فرض مدیریت مشابه، ثابت در نظر گرفته شده‌اند تا اثر خالص نوع خاک‌ورزی نمایان شود (جدول ۵-۶).

ب) گام دوم: به‌کارگیری ضرایب انتشار و اعتبار کربن، برای تبدیل داده‌های خام به شاخص زیست‌محیطی، از ضرایب انتشار استاندارد استفاده می‌شود. این ضرایب معمولاً از پایگاه‌های داده‌ای استاندارد بین‌المللی مانند Ecoinvent یا دستورالعمل‌های IPCC^۱ استخراج می‌شوند. نکته کلیدی در این مرحله، لحاظ کردن مفهوم ترسیب کربن^۲ است. نظام‌های حفاظتی به دلیل حفظ بقایا و عدم دست‌خوردگی خاک، قادرند کربن آلی را در خاک ذخیره کنند. در ادبیات LCA، این فرآیند به عنوان یک انتشار منفی یا اعتبار کربن^۳ در نظر گرفته می‌شود که از مجموع انتشارات سیستم کسر می‌گردد (Adewale et al., 2018). در این مطالعه فرضی، اعتبار ترسیب کربن برای نظام حفاظتی معادل ۴۰۰ کیلوگرم CO₂ در هکتار در سال لحاظ شده است، در حالی که در نظام متداول به دلیل اکسیداسیون کربن طی شخم، این مقدار صفر فرض می‌شود (جدول ۵-۶).

ج) گام سوم: محاسبه نهایی و تفسیر نقاط داغ، با اعمال ضرایب در مقادیر مصرفی (مطابق جدول ۵-۶)، مجموع انتشار خالص در نظام متداول معادل ۲۶۶۰ کیلوگرم CO₂ eq در هکتار محاسبه می‌شود. این در حالی است که در نظام حفاظتی، علیرغم افزایش مصرف علف‌کش، مجموع انتشار ناخالص کاهش یافته و با احتساب اعتبار ترسیب کربن،

1. Intergovernmental panel on climate change

2. Carbon sequestration

3. Carbon credit

انتشار خالص به ۱۹۷۰ کیلوگرم $\text{CO}_2 \text{ eq}$ تقلیل می‌یابد. با فرض عملکرد یکسان ۵ تن در هکتار برای هر دو سیستم، ردپای کربن نهایی برای تولید هر تن گندم در نظام متداول ۵۳۲ کیلوگرم و در نظام حفاظتی ۳۹۴ کیلوگرم خواهد بود. تحلیل نقاط داغ در این مقایسه حاوی نکات مهمی است. نخست آنکه در هر دو سیستم، کود اوره با سهمی بیش از ۵۰ درصد، همچنان بزرگترین کانون بحران است. ضریب انتشار بالای اوره (۴/۵) ناشی از مصرف انرژی زیاد در فرآیند تولید صنعتی و همچنین انتشار مستقیم گاز قدرتمند نیتروز اکساید (N_2O) از خاک مزرعه است (Brenttrup et al., 2004). دومین یافته مهم، تحلیل بده‌بستان است؛ اگرچه نظام حفاظتی باعث انتشار بیشتر ناشی از سموم می‌شود (افزایش از ۱۰ به ۴۰ کیلوگرم انتشار)، اما این اثر منفی با کاهش چشمگیر مصرف سوخت و پاداش ترسیب کربن کاملاً جبران شده و در نهایت پایداری اقلیمی سیستم را حدود ۲۶ درصد بهبود بخشیده است.

جدول ۵-۶. مقایسه محاسباتی ردپای کربن در دو نظام تولید گندم (داده‌های فرضی)

کل انتشار در نظام حفاظتی ($\text{kg CO}_2\text{eq}$) ($E = A \times D$)	مقدار مصرف نهاده در نظام حفاظتی (D)	کل انتشار در نظام متداول ($\text{kg CO}_2\text{eq}$) ($C = A \times B$)	مقدار مصرف نهاده در نظام متداول (B)	ضریب انتشار (kg CO_2 eq / unit) (A)	نهاده / ورودی
۱۶۰	۵۰	۴۸۰	۱۵۰	۳/۲	گازوئیل (لیتر)
۱۳۵۰	۳۰۰	۱۳۵۰	۳۰۰	۴/۵	کود اوره (کیلوگرم)
۱۲۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۰۰	۱/۲	کود فسفات (کیلوگرم)
۷۰۰	۱۰۰۰	۷۰۰	۱۰۰۰	۰/۷	الکتریسیته (کیلووات ساعت)
۴۰	۴	۱۰	۱	۱۰	علف کش (لیتر)
۲۳۷۰	–	۲۶۶۰	–	–	مجموع انتشار ناخالص

ادامه جدول ۵-۶

کل انتشار در نظام حفاظتی (kg CO ₂ eq) (E = A × D)	مقدار مصرف نهاده در نظام حفاظتی (D)	کل انتشار در نظام متداول (kg CO ₂ eq) (C = A × B)	مقدار مصرف نهاده در نظام متداول (B)	ضریب انتشار (kg CO ₂ eq / unit) (A)	نهاده / ورودی
-۴۰۰	-	۰	-	-	ترسیب کربن (خاک)
۱۹۷۰	-	۲۶۶۰	-	-	انتشار خالص (در هکتار)
-	۵	-	۵	-	عملکرد دانه (تن در هکتار)
۳۹۴	-	۵۳۲	-	-	رد پای کربن (به ازای تن محصول)

۳-۶-۵. کاربردهای ارزیابی چرخه حیات در تحلیل پایداری

اگرچه به کارگیری روش ارزیابی چرخه حیات در مطالعات زراعی پدیده‌ای نسبتاً نوین محسوب می‌شود، اما ظرفیت‌های تحلیلی این روش فراتر از یک محاسبه ساده زیست محیطی است. در ادبیات علمی، این ابزار عمدتاً در سه محور راهبردی شامل مقایسه تطبیقی نظام‌ها، بهینه‌سازی درونی فرآیندها و تحلیل محصولات جایگزین مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر یک پاسخی به سوالات متفاوت مدیریتی هستند (Notarnicola et al., 2015).

رایج‌ترین و شاید شناخته‌شده‌ترین کاربرد این روش در تحقیقات کشاورزی، مقایسه چرخه حیات محصولات در نظام‌های زراعی متفاوت است. در این رویکرد، فرآیندهای تولید یک محصول واحد (مثلاً گندم) در دو یا چند شیوه مدیریتی (مثلاً ارگانیک در برابر متداول، یا دیم در برابر آبی) به صورت سیستماتیک واکاوی می‌شوند تا برتری زیست محیطی یکی بر دیگری اثبات گردد. شرط حیاتی برای اعتبار علمی چنین مطالعاتی،

یکسان بودن دقیق واحد کارکردی و مرزهای سیستم در طرفین مقایسه است. نمونه‌های کلاسیک این رویکرد را می‌توان در مطالعه برنتروپ و همکاران (Brentrup et al., 2004) مشاهده کرد که با تعریف واحد یک تن گندم، به قضاوت میان نظام‌های ارگانیک و متداول پرداختند؛ و یا پژوهش میسترلینگ و همکاران (Meisterling et al., 2009) که با بسط دادن مرز سیستم تا مرحله فرآوری، تولید یک کیلوگرم نان را در این دو نظام مقایسه نمودند. این دست از مطالعات با ارائه تحلیل‌های کمی جامع، از کلی‌گویی‌های کیفی فراتر رفته و نشان می‌دهند که هر نظام در کدام شاخص‌ها (مثلاً تنوع زیستی یا مصرف انرژی) برتری دارد.

فراتر از مقایسه بین سیستم‌ها، دومین کاربرد کلیدی LCA، نگاه به درون و بهینه‌سازی چرخه حیات است. در این رویکرد، هدف پژوهشگر اثبات برتری یک نظام بر نظام دیگر نیست، بلکه تمرکز بر شناسایی نقاط ضعف یا نقاط داغ در زنجیره تولید یک محصول خاص است. این روش با کالبدشکافی دقیق مراحل تولید، گلوگاه‌هایی را که بیشترین بار زیست‌محیطی را ایجاد می‌کنند، آشکار می‌سازد. مطالعه لندیس و همکاران (Landis et al., 2007) بر روی تناوب زراعی ذرت-سویا، مصداق بارز این رویکرد است. آن‌ها با ارزیابی شاخص‌هایی نظیر مصرف انرژی، چرخه نیتروژن و فسفر و سمیت آفت‌کش‌ها، دریافته‌اند که برخلاف تصور اولیه، مرحله آبیاری کمترین تأثیر را داشته و در مقابل، مرحله کوددهی ذرت بزرگترین سهم را در تخریب محیط‌زیست ایفا می‌کند. چنین یافته‌هایی، مسیر اصلاح را برای مدیران مزرعه روشن می‌کند؛ چنانکه محققان نتیجه گرفتند جایگزینی بخشی از ذرت با محصولات کم‌نیازتر یا بهینه‌سازی تکنولوژی مصرف کود، مؤثرترین راهکار برای ارتقای پایداری آن سیستم خاص است.

سومین و پیچیده‌ترین سطح کاربرد این روش، مقایسه محصولات و فرآیندهای جایگزین است. در این رویکرد تحلیلی، پژوهشگر به جای مقایسه شیوه‌های تولید یک محصول، به ارزیابی محصولات کاملاً متفاوتی می‌پردازد که کارکردی مشابه دارند (مثلاً

مقایسه پروتئین حیوانی با پروتئین گیاهی). چالش اصلی و وجه تمایز این روش، لزوم تعریف واحدهای کارکردی مبتنی بر ارزش مصرفی (مانند محتوای کالری یا پروتئین) به جای واحدهای وزنی است. مطالعات پیشگامانه اشل و مارتین (Eshel and Martin, 2006) و اشل و همکاران (Eshel et al., 2010) که به مقایسه رژیم‌های غذایی گوشت‌محور و گیاه‌محور پرداختند، قدرت این روش را به نمایش گذاشتند. نتایج این پژوهش‌ها با آشکارسازی شکاف عظیم در مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها بین این دو الگوی تغذیه‌ای، دریچه‌ای نو به سوی شناسایی رژیم‌های غذایی پایدار گشود. اگرچه کاربرد این روش در مطالعات زراعی به دلیل دشواری‌های تعریف واحد کارکردی مشترک کمتر از دو روش قبلی است، اما بینش‌های حاصل از آن برای سیاست‌گذاری‌های کلان امنیت غذایی و تغییر الگوی کشت بسیار حیاتی است.

۵-۶-۴. نقاط قوت و محدودیت‌های روش ارزیابی چرخه حیات

رویکرد ارزیابی چرخه حیات به عنوان یک متدولوژی پیشرو در علوم محیط‌زیست، دارای قابلیت‌های منحصر به فردی است که آن را به ابزاری بی‌بدیل برای پایش پایداری نظام‌های زراعی تبدیل کرده است. برجسته‌ترین ویژگی متمایز این روش، توانایی آن در انجام تحلیل‌های یکپارچه و چندمقیاسی است؛ به‌طوری‌که پژوهشگران می‌توانند با یک چارچوب واحد، پیامدهای زیست‌محیطی را در طیف وسیعی از سطوح، از سیستم‌های کشت آزمایشگاهی کوچک تا مزارع تجاری و حتی مقایسه‌های کلان منطقه‌ای و بین‌المللی مورد سنجش قرار دهند (Westaway et al., 2024). این جامعیت با پشتوانه‌ای غنی از داده‌های تاریخی تقویت می‌شود؛ چرا که سابقه طولانی کاربرد LCA در بخش صنعت، منجر به شکل‌گیری پایگاه‌های اطلاعاتی گسترده‌ای نظیر Ecoinvent شده است که دسترسی به داده‌های اولیه استاندارد و محاسبه شاخص‌ها را در نرم‌افزارهای تخصصی تسهیل می‌کند (Guo and Murphy, 2012). فراتر از دسترسی به داده‌ها، ماهیت کل‌نگر این روش است که با رصد تمام ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، از نگرش تک‌بعدی

رایج فراتر رفته و امکان تحلیل کمی و هم‌زمان دامنه وسیعی از اثرات، از سمیت آب تا گرمایش جهانی را فراهم می‌آورد (Zeug et al., 2023).

با این وجود، به کارگیری این روش قدرتمند بدون چالش‌های روش‌شناختی نیست و نیازمند درک دقیق محدودیت‌های ذاتی آن است. یکی از چالش‌های اصلی، تناقض موجود میان انعطاف‌پذیری و تعمیم‌پذیری است؛ اگرچه انعطاف‌پذیری LCA در تعریف مرزهای سیستم، آن را برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی خاص مناسب ساخته، اما همین ویژگی سبب می‌شود که نتایج مطالعات مختلف به سادگی قابل مقایسه و تعمیم نباشند (Finnveden, 2000). علاوه بر این، علی‌رغم دقت ریاضی بالا در محاسبات، مراحل تفسیر نتایج و وزن‌دهی همچنان متأثر از قضاوت‌های ذهنی و ارزش‌گذاری‌های تیم تحقیق است که می‌تواند بی‌طرفی نتایج را تحت‌الشعاع قرار دهد (Nathan and Coles, 2020). از منظر اکولوژیک نیز، نقدهایی بر این روش وارد است که مهم‌ترین آن‌ها تمرکز بر پیامدهای بالقوه به جای اثرات واقعی است (Schaubroeck, 2023). در واقع، مدل‌های LCA تأثیرات یک آلاینده را فارغ از زمان و مکان خاص انتشار آن محاسبه می‌کنند، در حالی که واقعیت اثرات زیست‌محیطی در کشاورزی به شدت وابسته به شرایط محل است. نهایتاً، فرض خطی بودن فرآیندها به‌عنوان یکی از محدودیت‌های بنیادین مدل‌سازی در LCA مطرح است (Finnveden, 2000). این مدل با فرض ساده‌سازانه خود بیان می‌کند که هرگونه افزایش در تولید، مستقیماً و به همان نسبت منجر به افزایش آلاینده‌ها می‌شود؛ فرضی که همواره با دینامیک‌های غیرخطی، پیچیده و آستانه‌دار سیستم‌های بیولوژیک سازگاری ندارد و نیازمند احتیاط در تفسیر نتایج برای مقیاس‌های بزرگ است.

۵-۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل پنجم

فصل پنجم با هدف گذار از رویکردهای تک‌بعدی و محصول‌محور به سمت نگرش‌های سیستمی و کل‌نگر در پژوهش‌های زراعی تدوین گردید. در این فصل بحث شد که پایداری نه یک وضعیت ثابت، بلکه ویژگی پویای یک سیستم است که سنجش

آن نیازمند ابزارهایی فراتر از شاخص‌های سنتی عملکرد است. در گام نخست، پایداری به عنوان مفهومی چهاربعدی بازتعریف شد که در آن علاوه بر ارکان کلاسیک (اکولوژیک، اقتصادی و اجتماعی)، بعد حیاتی حکمرانی و نهادی نیز به عنوان بستر توانمندساز سیستم معرفی گردید. مرور چارچوب‌های استاندارد جهانی نظیر SAFA، LCA، RISE و MESMIS نشان داد که انتخاب مدل مناسب، تابعی از مقیاس زمانی و مکانی پژوهش و اهداف مدیریتی است. در بخش عملیاتی، مجموعه‌ای جامع از شاخص‌های کمی و کیفی در قالب جداول تفصیلی ارائه شد و بر ضرورت حرکت به سمت مجموعه حداقل داده‌ها تأکید گردید. همچنین تشریح شد که فرآیند ارزیابی پایداری، تنها در محاسبه شاخص‌ها نیست، بلکه در تحلیل هم‌افزایی‌ها و مدیریت بده‌بستان‌ها نهفته است. معرفی ابزارهای بصری نظیر نمودارهای عنکبوتی، نشان داد که چگونه می‌توان توازن میان ابعاد متضاد (مانند سودآوری در برابر حفظ کیفیت آب) را به تصویر کشید. علاوه بر این، بحث مهم اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت به پژوهشگران یادآور شد که مدل‌های ریاضی هرگز نباید بدون راستی‌آزمایی میدانی (اعتبارسنجی) و آزمون استحکام (تحلیل حساسیت) مبنای تصمیم‌گیری قرار گیرند. با توجه به بستر اجرایی کشور، بخشی مجزا به چالش‌های بومی‌سازی شاخص‌ها در ایران اختصاص یافت. در این بخش، معضلاتی نظیر فقدان داده‌های ثبت‌شده، نظام خرده‌مالکی و تفاوت‌های اقلیمی (مانند شوری و بحران آب) واکاوی شد و راهکارهایی برای انطباق مدل‌های جهانی با واقعیت‌های مزارع ایران ارائه گردید. در نهایت، روش ارزیابی چرخه حیات به عنوان استاندارد طلایی حسابداری زیست‌محیطی تشریح شد. ارائه یک مطالعه موردی تطبیقی (مقایسه نظام خاک و ریزی متداول و حفاظتی در گندم)، به صورت عینی نشان داد که چگونه تغییر در استراتژی مدیریت می‌تواند تراز کربن و انرژی را دگرگون سازد. این مثال محاسباتی، مفهوم انتزاعی اعتبار کربن و نقاط داغ انتشار را به ابزاری ملموس برای تصمیم‌گیری تبدیل کرد.

اکنون با شناخت ابزارهای تحلیل آماری (فصل چهارم) و سنجش پایداری (فصل پنجم)، خواننده بینش لازم برای تفسیر دقیق داده‌ها و ارزیابی وضعیت نظام‌های زراعی را

کسب کرده است. اما موفقیت در پژوهش‌های بلندمدت، تنها در گرو تحلیل داده‌ها نیست؛ بلکه نیازمند مهارت‌های ویژه‌ای برای مدیریت چالش‌های میدان عمل است. از این رو، فصل ششم و پایانی کتاب به جنبه‌های اجرایی و مدیریتی اختصاص خواهد یافت تا با واکاوی فرآیندهای برنامه‌ریزی، مدیریت منابع (مالی و انسانی) و گزارش‌دهی، راهنمای عملی پژوهشگران برای عبور سلامت از مسیر پرفرازونشیب تحقیقات نظام‌های زراعی باشد.

منابع

- ابراهیمی، ا. و ابراهیمی، ل. (۱۴۰۱). ارزیابی چرخه حیات (LCA) در تولید محصول‌های کشاورزی، مطالعه موردی: سیب و انگور. فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۱): ۲۵۱-۲۶۶
- پوزن، م. ط.، چاری، م. م.، افراسیاب، پ. و کهخامقدم، پ. (۱۳۹۸). کاربرد مقیاس سازی در برآورد مشخصات نفوذ خاک. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۵۰(۷)، ۱۶۷۷-۱۶۸۷.
- خرم دل، س.، کوچکی، ع.، نصیری محلاتی، م. و ملافیلابی، ع. (۱۳۹۸). بررسی چرخه حیات (LCA) نظام تولید ذرت در شرایط آب و هوایی مشهد. بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۱(۳)، ۹۲۵-۹۳۹.
- رنجبر، غ. و پیراسته انوشه، ه. (۱۳۹۴). نگاهی به تحقیقات شوری در ایران با تاکید بر بهبود تولید گیاهان زراعی. مجله علوم زراعی ایران، ۱۷، ۱۶۵-۱۷۸.
- سلطانی، ا.، رجبی، م. ح.، زینلی، ا. و سلطانی، ا. (۱۳۸۹). ارزیابی اثرات زیست محیطی تولید گیاهان زراعی با روش LCA: گندم در گرگان. تولید گیاهان زراعی (مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی)، ۳(۳)، ۲۰۱-۲۱۸.
- غلامحسینی، م.، خدایی جوقان، آ.، حبیب زاده، ف. و قلاوند، ا. (۱۳۹۶). تاثیر مصرف زئولیت در تلفیق با کودهای شیمیایی و آلی بر عملکرد کمی و کیفی آفتابگردان. حفاظت منابع آب و خاک، ۷(۱)، ۱-۱۳.
- غلامحسینی، م.، اسدی، ه. و داوودی، م. ح. (۱۴۰۱ الف). تعیین بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب و نیتروژن در تولید کنگد. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۴)، ۸۴۱-۸۵۱.

غلامحسینی، م.، منصوری، س.، مسعودی، ب.، شریعتی، ف. (۱۴۰۱ ب). ارزیابی عملکرد دانه و صفات زراعی ژنوتیپ‌های خارجی کنجد (*Sesamum indicum* L) در شرایط تنش خشکی. نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۲(۲)، ۱۹-۳۳.

فتحی، ر.، خیرعلی پور، ک. و عزیزپناه، ا. (۱۳۹۸). ارزیابی الگوی مصرف انرژی و اثرات زیست محیطی تولید کلزا در شرایط دیم استان ایلام. مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۵(۶۲)، ۱۵۵-۱۸۰.

قاسمی پناه، م.، امینیان، ر.، غلامحسینی، م. و حبیب زاده، ف. (۱۳۹۹). ارزیابی پاسخ ارقام مختلف کنجد (*Sesamum indicum* L) به رژیم‌های آبیاری کامل و کم آبیاری. مجله علوم گیاهان زراعی ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۵۱(۳)، ۱۵۱-۱۶۳.

Adewale, C., Reganold, J. P., Higgins, S., Evans, R. D., & Carpenter-Boggs, L. (2018). Improving carbon footprinting of agricultural systems: Boundaries, tiers, and organic farming. *Environmental Impact Assessment Review*, 71, 41-48.

Alexander, P., Brown, C., Arneth, A., Finnigan, J., Moran, D., & Rounsevell, M. D. (2017). Losses, inefficiencies and waste in the global food system. *Agricultural systems*, 153, 190-200.

Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, 90(1), 25-45.

Antunes, P., Santos, R., Cosme, I., Osann, A., Calera, A., De Ketelaere, D., ... & Nagarajan, S. (2017). A holistic framework to assess the sustainability of irrigated agricultural systems. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1323542.

Baghdadi, A., Balazadeh, M., Kashani, A., Golzardi, F., Gholamhoseini, M., & Mehrnia, M. (2017). Effect of pre-sowing and nitrogen application on forage quality of silage corn. *Agronomy Research*, 15(1).

Bare, J. (2011). TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13, 687-696.

Barthel, M., Fava, J. A., Harnanan, C. A., Strothmann, P., Khan, S., & Miller, S. (2015). Hotspots analysis: providing the focus for action. In *Life cycle management* (pp. 149-167). Dordrecht: Springer Netherlands.

Bathaei, A., & Štreimikienė, D. (2023). A Systematic Review of Agricultural Sustainability Indicators. *Agriculture*, 13(2), 241.

Bell, S., & Morse, S. (2012). *Sustainability indicators: measuring the immeasurable?*. Routledge.

- Binder, C. R., Feola, G., & Steinberger, J. K. (2010). Considering the normative, systemic and procedural dimensions in indicator-based sustainability assessments in agriculture. *Environmental impact assessment review*, 30(2), 71-81.
- Blowfield, M. E., & Dolan, C. S. (2008). Stewards of virtue? The ethical dilemma of CSR in African agriculture. *Development and Change*, 39(1), 1-23.
- Bockstaller, C., & Girardin, P. (2003). How to validate environmental indicators. *Agricultural systems*, 76(2), 639-653.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., & Plantureux, S. (2008). Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for sustainable development*, 28(1), 139-149.
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Barraclough, P., & Kuhlmann, H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *European Journal of Agronomy*, 20(3), 265-279.
- Brundtland, G. H., & Mansour, K. World Commission on Environment and Development (WCED) (1987) Our common future: report of the World Commission on Environment and Development.
- Butti Al Shamsi, K., Guarnaccia, P., Cosentino, S. L., Leonardi, C., Caruso, P., Stella, G., & Timpanaro, G. (2019). Analysis of relationships and sustainability performance in organic agriculture in the United Arab Emirates and Sicily (Italy). *Resources*, 8(1), 39.
- Chen YouQi, C. Y., & Tao Tao, T. T. (2000). On evaluation indices of sustainable agriculture. *Research of Agricultural Modernization*, 21, 271-275.
- Cisneros, B. J. (2014). Water recycling and reuse: An overview. *Water reclamation and sustainability*, 431-454.
- Coughlin, S. S. (1990). Recall bias in epidemiologic studies. *Journal of clinical epidemiology*, 43(1), 87-91.
- Dabkiene, V., Balezentis, T., & Streimikiene, D. (2021). Development of agri-environmental footprint indicator using the FADN data: Tracking development of sustainable agricultural development in Eastern Europe. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 2121-2133.
- Dantsis, T., Douma, C., Giourga, C., Loumou, A., & Polychronaki, E. A. (2010). A methodological approach to assess and compare the sustainability level of agricultural plant production systems. *Ecological indicators*, 10(2), 256-263.

-
- Deininger, K., & Byerlee, D. (2011). *Rising global interest in farmland: Can it yield sustainable and equitable benefits?*. World Bank Publications.
- Demont, M., & Rutsaert, P. (2017). Restructuring the Vietnamese rice sector: towards increasing sustainability. *Sustainability*, 9(2), 325.
- Devkota, K. P., Pasuquin, E., Elmido-Mabilangan, A., Dikitanan, R., Singleton, G. R., Stuart, A. M., ... & Beebout, S. E. (2019). Economic and environmental indicators of sustainable rice cultivation: A comparison across intensive irrigated rice cropping systems in six Asian countries. *Ecological Indicators*, 105, 199-214.
- Dillman, D. A., Smyth, J. D., & Christian, L. M. (2014). *Internet, phone, mail, and mixed-mode surveys: The tailored design method*. John Wiley & sons.
- Eshel, G., & Martin, P. A. (2006). Diet, energy, and global warming. *Earth interactions*, 10(9), 1-17.
- Eshel, G., Martin, P. A., & Bowen, E. E. (2010). Land use and reactive nitrogen discharge: Effects of dietary choices. *Earth Interactions*, 14(21), 1-15.
- European Union, & Joint Research Centre. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. OECD publishing.
- Fallah-Alipour, S., Mehrabi Boshrahadi, H., Zare Mehrjerdi, M. R., & Hayati, D. (2018). A framework for empirical assessment of agricultural sustainability: The case of Iran. *Sustainability*, 10(12), 4823.
- Fallahpour, F., Aminghafouri, A., Ghalegolab Behbahani, A., & Bannayan, M. (2012). The environmental impact assessment of wheat and barley production by using life cycle assessment (LCA) methodology. *Environment, development and sustainability*, 14, 979-992.
- FAO. (2012). Voluntary guidelines on the responsible governance of tenure of land, fisheries and forests in the context of national food security. *FAO Viale delle Terme di Caracalla*, 153, 74.
- FAO. (2014). *Sustainability Assessment of Food and Agriculture Systems: SAFA, Guidelines, Version 3.0*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Finnveden, G. (2000). On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5, 229-238.

- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of environmental management*, 91(1), 1-21.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., ... & Zaks, D. P. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342.
- Fuentes-Ponce, M. H., Gutiérrez-Díaz, J., Flores-Macías, A., González-Ortega, E., Mendoza, A. P., Sánchez, L. M. R., ... & Espíndola, I. P. M. (2022). Direct and indirect greenhouse gas emissions under conventional, organic, and conservation agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 340, 108148.
- Ghasemi Hamedani, N., Gholamhoseini, M., Bazrafshan, F., Habibzadeh, F., & Amiri, B. (2022). Yield, irrigation water productivity and nutrient uptake of arbuscular mycorrhiza inoculated sesame under drought stress conditions. *Agricultural Water Management*, 266, 107569.
- Gedifew, S., & Earecho, M. (2024). Disease incidence insect pest prevalence, weed abundance, and diversity in sesame fields of Kamashi and Assosa zones of Benishangul Gumuz region, Ethiopia. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 17(3), 242-254.
- Gholamhoseini, M., AghaAlikhani, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A., & Zakikhani, H. (2012). Decreasing nitrogen leaching and increasing canola forage yield in a sandy soil by application of natural zeolite. *Agronomy Journal*, 104(5), 1467-1475.
- Gholamhoseini, M., AghaAlikhani, M., Mirlatifi, S.M., & Sanavy, S.A. (2013 a). Weeds – Friend or foe? Increasing forage yield and decreasing nitrate leaching on a corn forage farm infested by redroot pigweed. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 179, 151-162.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Dolatabadian, A., Jamshidi, E., & Khodaei-Joghan, A. (2013 b). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress. *Agricultural Water Management*, 117(117), 106–114.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H., & Farmanbar, E. (2013 c). Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil and Tillage Research*, 126, 193-202.
- Giovannucci, D. (2014). The COSA measuring sustainability report: coffee and cocoa in 12 countries. *Philadelphia, PA: The Committee on Sustainability Assessment*.

- Gómez-Limón, J. A., & Sanchez-Fernandez, G. (2010). Empirical evaluation of agricultural sustainability using composite indicators. *Ecological economics*, 69(5), 1062-1075.
- Guinée, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: past, present, and future.
- Guo, M., & Murphy, R. J. (2012). LCA data quality: sensitivity and uncertainty analysis. *Science of the total environment*, 435, 230-243.
- Hani, F., Braga, F. S., Stampfli, A., Keller, T., Fischer, M., & Porsche, H. (2003). RISE, a tool for holistic sustainability assessment at the farm level. *International food and agribusiness management review*, 6(4), 78-90.
- Hellweg, S., & Milà i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), 1109-1113.
- Herrmann, I. T., & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose?—a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163-169.
- i Canals, L. M., Burnip, G. M., & Cowell, S. J. (2006). Evaluation of the environmental impacts of apple production using Life Cycle Assessment (LCA): case study in New Zealand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 226-238.
- Jayasinghe, S. L., Thomas, D. T., Anderson, J. P., Chen, C., & Macdonald, B. C. T. (2023). Global Application of Regenerative Agriculture: A Review of Definitions and Assessment Approaches. *Sustainability*, 15(22), 15941.
- Jevtić, R., Župunski, V., Lalošević, M., Mladenov, N., & Jocković, B. (2018). Effect of abiotic and biotic stress and crop management on health condition and yield of cereals. *Journal of Agriculture and Plant Sciences*, 16(2), 25-31.
- Khodaei Joghani, A., Ghalavand, A., Aghaalkhani, M., Gholamhoseini, M., & Dolatabadian, A. (2010). Comparison among different integrated nutrition management for soil micro and macro elements after winter wheat harvesting and yield. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(2), 107-111.
- Kanter, D. R., Musumba, M., Wood, S. L., Palm, C., Antle, J., Balvanera, P., ... & Andelman, S. (2018). Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. *Agricultural Systems*, 163, 73-88.

- Khodaei Joghnan, A., Ghalavand, A., Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M., & Dolatabadian, A. (2012). How organic and chemical nitrogen fertilizers, zeolite, and combinations influence wheat yield and grain mineral content. *Journal of Crop Improvement*, 26(1), 116–129.
- Krasilnikov, P., Makarov, O., Alyabina, I., & Nachtergaele, F. (2016). Assessing soil degradation in northern Eurasia. *Geoderma regional*, 7(1), 1-10.
- Landis, A. E., Miller, S. A., & Theis, T. L. (2007). Life cycle of the corn–soybean agroecosystem for biobased production. *Environmental science & technology*, 41(4), 1457-1464.
- Li, Q., He, Y., Zhao, K., Ji, J., Li, H., & Bewley, J. M. (2024). Development and testing of NDIR-based rapid greenhouse gas detection device for dairy farms. *Sustainability*, 16(5), 2131.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*.
- Linstone, H. A. (Ed.). (1979). *The Delphi method: Techniques and applications. reading*. Adison Wesley.
- López-Ridaura, S., Masera, O., & Astier, M. (2002). Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework. *Ecological indicators*, 2(1-2), 135-148.
- Ma, Y., Zhang, L., Song, S., & Yu, S. (2022). Impacts of Energy Price on Agricultural Production, Energy Consumption, and Carbon Emission in China: A Price Endogenous Partial Equilibrium Model Analysis. *Sustainability*, 14(5), 3002.
- Meisterling, K., Samaras, C., & Schweizer, V. (2009). Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat. *Journal of cleaner production*, 17(2), 222-230.
- Meul, M., Van Passel, S., Nevens, F., Dessein, J., Rogge, E., Mulier, A., & Van Hauwermeiren, A. (2008). MOTIFS: a monitoring tool for integrated farm sustainability. *Agronomy for sustainable development*, 28, 321-332.
- Nambiar, K. K. M., Gupta, A. P., Fu, Q., & Li, S. (2001). Biophysical, chemical and socio-economic indicators for assessing agricultural sustainability in the Chinese coastal zone. *Agriculture, ecosystems & environment*, 87(2), 209-214.
- Nathan, C., & Coles, S. (2020). Life cycle assessment and judgement. *NanoEthics*, 14(3), 271-283.

- Notarnicola, B., Salomone, R., Petti, L., Renzulli, P. A., Roma, R., & Cerutti, A. K. (Eds.). (2015). *Life cycle assessment in the agri-food sector: case studies, methodological issues and best practices*. Springer.
- Paracchini, M. L., Bulgheroni, C., Borreani, G., Tabacco, E., Banterle, A., Bertoni, D., ... & De Paola, C. (2015). A diagnostic system to assess sustainability at a farm level: The SOSTARE model. *Agricultural Systems*, 133, 35-53.
- Rahman, A. A., Alam, M., Alam, S. S., Uzzaman, M. R., Rashid, M., & Rabbani, G. (2007). Risks, vulnerability and adaptation in Bangladesh. *Human Development Report*, 8.
- Rasul, G., & Thapa, G. B. (2004). Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: an assessment based on environmental, economic and social perspectives. *Agricultural systems*, 79(3), 327-351.
- Razavi, S., Jakeman, A., Saltelli, A., Prieur, C., Iooss, B., Borgonovo, E., ... & Maier, H. R. (2021). The future of sensitivity analysis: an essential discipline for systems modeling and policy support. *Environmental Modelling & Software*, 137, 104954.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international*, 30(5), 701-720.
- Reed, M. S., Fraser, E. D., & Dougill, A. J. (2006). An adaptive learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities. *Ecological economics*, 59(4), 406-418.
- Riley, J. (2001). The indicator explosion: local needs and international challenges. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87(2), 119-120.
- Roy, R., & Chan, N. W. (2012). An assessment of agricultural sustainability indicators in Bangladesh: review and synthesis. *The Environmentalist*, 32, 99-110.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Salehi, A., Tasdighi, H., & Gholamhoseini, M. (2016). Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(10), 886-891.
- Schaubroeck, T. (2023). Relevance of attributional and consequential life cycle assessment for society and decision support. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1063583.

- Smith, C. S., & McDonald, G. T. (1998). Assessing the sustainability of agriculture at the planning stage. *Journal of environmental management*, 52(1), 15-37.
- Soldi, A., Aparicio Meza, M. J., Guareschi, M., Donati, M., & Insfrán Ortiz, A. (2019). Sustainability assessment of agricultural systems in Paraguay: A comparative study using FAO's SAFA framework. *Sustainability*, 11(13), 3745.
- Soulé, E., Charbonnier, R., Schlosser, L., Michonneau, P., Michel, N., & Bockstaller, C. (2023). A new method to assess sustainability of agricultural systems by integrating ecosystem services and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137784.
- Spangenberg, J. H. (2002). Institutional sustainability indicators: an analysis of the institutions in Agenda 21 and a draft set of indicators for monitoring their effectivity. *Sustainable development*, 10(2), 103-115.
- Stylianou, A., Sdrali, D., & Apostolopoulos, C. D. (2020). Integrated sustainability assessment of divergent mediterranean farming systems: Cyprus as a case study. *Sustainability*, 12(15), 6105.
- Sydorovych, O., & Wossink, A. (2008). The meaning of agricultural sustainability: Evidence from a conjoint choice survey. *Agricultural Systems*, 98(1), 10-20.
- Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., & Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agronomy for sustainable development*, 37(3), 21.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of water resources*, 1(3), 34-38.
- Van Calker, K. J., Berentsen, P. B. M., Romero, C., Giesen, G. W. J., & Huirne, R. B. M. (2006). Development and application of a multi-attribute sustainability function for Dutch dairy farming systems. *Ecological Economics*, 57(4), 640-658.
- Van Cauwenbergh, N., Biala, K., Bielders, C., Brouckaert, V., Franchois, L., Ciudad, V. G., ... & Peeters, A. (2007). SAFE—A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 120(2-4), 229-242.
- Van der Werf, H. M., & Petit, J. (2002). Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1-3), 131-145.
- Van Ittersum, M. K., Ewert, F., Heckeley, T., Wery, J., Olsson, J. A., Andersen, E., ... & Wolf, J. (2008). Integrated assessment of agricultural

- systems—A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural systems*, 96(1-3), 150-165.
- Vecchione, G. (2010). EU rural policy: proposal and application of an agricultural sustainability index. Available online: <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/id/eprint/27032>
- Westaway, S., Żyłowski, T., Hardiman, S., & Smith, L. G. (2024). Integrating sustainability assessment tools with life cycle analysis for agroecological systems: A UK case study. *Agricultural Systems*, 219, 104045.
- Yang, Y. (2019). A unified framework of life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(4), 620-626.
- Zakikhani, H., Ardakani, M. R., Rejali, F., Gholamhoseini, M., Joghian, A. K., & Dolatabadian, A. (2012). Influence of diazotrophic bacteria on antioxidant enzymes and some biochemical characteristics of soybean subjected to water stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(11), 1828-1835.
- Zarei, M. J., Kazemi, N., & Marzban, A. (2019). Life cycle environmental impacts of cucumber and tomato production in open-field and greenhouse. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(3), 249-255.
- Zeug, W., Yupanqui, K. R. G., Bezama, A., & Thrän, D. (2023). Holistic and integrated life cycle sustainability assessment of prospective biomass to liquid production in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 418, 138046.
- Zhan, X., Shao, C., He, R., & Shi, R. (2021). Evolution and efficiency assessment of pesticide and fertiliser inputs to cultivated land in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 3771.
- Zhen, L., Zoebisch, M. A., Chen, G., & Feng, Z. (2006). Sustainability of farmers' soil fertility management practices: A case study in the North China Plain. *Journal of environmental Management*, 79(4), 409-419.

فصل ششم

مدیریت اجرایی و راهبردی در پژوهش‌های نظام‌های زراعی

هر دستاورد بزرگ مجموعه‌ای از دستاوردهای کوچک است
(دیوید جوزف شوارتز)

مطالب ارائه شده در پنج فصل پیشین، شالوده نظری و روش‌شناسی تحقیقات نظام‌های زراعی را بنا نهادند. خواننده اکنون با اصول طراحی آزمایش، روش‌های تحلیل آماری و ابزارهای سنجش پایداری آشناست؛ اما دانش نظری، تنها نیمی از مسیر موفقیت است. نیمه پنهان و اغلب چالش برانگیزتر ماجرا، توانایی اجرا در دنیای واقعی است. گذار موفقیت آمیز از یک طرح پیشنهادی (پروپوزال) که روی کاغذ بی نقص به نظر می‌رسد، به یک پروژه میدانی که باید سال‌ها در برابر نوسانات اقلیمی، محدودیت‌های بودجه و تعاملات پیچیده تیمی دوام بیاورد، نیازمند مهارت‌هایی فراتر از دانش زراعی است. این فصل با عبور از مباحث فنی صرف، به بررسی فشرده اما عمیق مدیریت راهبردی پژوهش می‌پردازد. تجربه نشان داده است که بسیاری از پروژه‌های نظام‌های زراعی نه به دلیل ضعف علمی، بلکه به واسطه ضعف در برنامه‌ریزی اجرایی، سوءمدیریت منابع مالی یا فقدان ساختار سازمانی کارآمد با شکست مواجه می‌شوند. از این رو، در این فصل به تشریح جنبه‌های کلیدی مدیریت پروژه شامل فرآیند حساس راه‌اندازی و استقرار،

استراتژی‌های مدیریت مالی (به‌ویژه در شرایط کسری بودجه)، مکانیزم‌های پاسخگویی تیمی و اخلاق انتشار یافته‌ها خواهیم پرداخت. در پایان نیز، با مرور یک مطالعه موردی کلاسیک جهانی، درس‌هایی عملی برای تداوم‌بخشی به پژوهش‌های بلندمدت ارائه خواهد شد تا پژوهشگران با جعبه‌ابزاری کامل، آماده ورود به عرصه اجرا شوند.

۶-۱. راهنمای عملی راه‌اندازی پروژه: از تصویب تا استقرار در مزرعه

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، امضای قرارداد و تصویب پروپوزال، پایان کار نیست؛ بلکه آغاز مسیری پرچالش است. گذار از یک پروژه بالقوه (کاغذی) به پروژه‌ای که با موفقیت در بستر پیچیده مزرعه اجرا می‌شود (میدانی)، فرآیندی خودکار نیست و مستلزم به‌کارگیری دقیق اصول مشارکتی و مدیریت است. در مرحله حیاتی راه‌اندازی، تیم تحقیق باید طی یک فرآیند ساختاریافته - که معمولاً در قالب جلسات آغازین انجام می‌شود - با بازبینی سخت‌گیرانه طرح پیشنهادی و اعمال اصلاحات انطباقی، زمینه را برای ورود کم‌خطر به فاز اجرایی فراهم کند. پژوهشگرانی که پیشینه کار با پروژه‌های تک‌رشته‌ای و کوتاه‌مدت را دارند، باید دریابند که تحقیقات نظام‌های زراعی به دلیل ماهیت سیستمی و میان‌رشته‌ای، نیازمند برنامه‌ریزی جامع‌تر، توسعه ظرفیت تیمی و مهم‌تر از همه، تعهد به همکاری فعال است. پس از تأیید پروپوزال و تخصیص بودجه اولیه، اعضای تیم در واقع پای در مسیری می‌گذارند که بخش قابل توجهی از زندگی حرفه‌ای و شخصی آنان را در سال‌های آتی تحت الشعاع قرار می‌دهد. تجربه میدانی نشان می‌دهد تیم‌هایی که در مراحل آغازین از بحث‌های چالشی پرهیز می‌کنند و با توافق‌های سطحی و رودربایستی کار را شروع می‌کنند، در میانه راه با بن‌بست‌های اجرایی و اختلافات درونی مواجه می‌شوند. در مقابل، گروه‌هایی که زمان کافی را صرف واکاوی جزئیات کرده و اختلاف‌نظرها را پیش از ورود به مزرعه حل و فصل می‌کنند، با کمترین اصطکاک در عمل روبه‌رو خواهند شد. توجه به نظرات داوران در این مرحله نیز بسیار راهگشاست، چرا که نگاه بیرونی آن‌ها می‌تواند نقاط کوری را که از دید تیم پنهان مانده، آشکار سازد. برای تضمین موفقیت در

فاز استقرار، تیم اجرایی موظف است پیش از هرگونه اقدام عملیاتی، هفت محور کلیدی زیر را مورد بازبینی و تصویب نهایی قرار دهد:

۱. **آزمون امکان‌پذیری مدل مفهومی**، آیا مدل طراحی شده روی کاغذ، با توانایی‌های فنی تیم و امکانات لجستیکی مزرعه همخوانی دارد؟ در این مرحله باید از جاه‌طلبی علمی کاست و به واقع‌گرایی اجرایی افزود. هر عضو تیم باید بتواند جایگاه دقیق خود را در مدل مشخص کند. اگر مدلی نیازمند پایش روزانه رطوبت خاک است اما ایستگاه تحقیقاتی ۱۰۰ کیلومتر دورتر قرار دارد، مدل باید تعدیل شود. تایید نهایی مدل به معنای پذیرش مسئولیت اجرای آن توسط تک‌تک اعضاست.

۲. **غربال‌گری و عملیاتی‌سازی سوالات پژوهشی**، علم و محیط در گذر زمان تغییر می‌کنند. تیم باید بررسی کند که آیا سوالات مطرح شده در زمان نگارش پروپوزال، همچنان مرتبط و به‌روز هستند؟ بروز خشکسالی‌های ناگهانی یا تغییر سیاست‌های ملی ممکن است بازنگری در فرضیات را ضروری سازد. علاوه بر این، سوالات کلی باید به تعاریف عملیاتی تبدیل شوند؛ برای مثال، اگر سوال پژوهش بررسی کیفیت خاک است، باید دقیقاً مشخص شود که منظور اندازه‌گیری کدام پارامترهای خاک (کربن آلی، EC، pH و ...)، با چه روشی و در چه عمقی است.

۳. **تثبیت ساختار تصمیم‌گیری و حل اختلاف**، دموکراسی علمی در اجرا نیازمند چارچوب است. در پروپوزال‌ها معمولاً ساختار سلسله‌مراتبی ذکر می‌شود (مثلاً مجری مسئول، مجریان، همکاران، کارشناسان و غیره)، اما در اجرا نیاز به پروتکل حل اختلاف داریم. اگر بین گیاه‌پزشک و متخصص زراعت تیم بر سر زمان سم‌پاشی اختلاف پیش آمد، چه کسی حرف آخر را می‌زند؟ آیا مکانیسم‌های تصمیم‌گیری برای شرایط بحرانی (مانند طغیان ناگهانی آفات) طراحی شده است؟ شفاف‌سازی این ساختار پیش از وقوع بحران، ضامن بقای تیم است.

۴. **بازبینی واقع‌بینانه منابع مالی (بودجه در برابر نقدینگی)**، آیا تخصیص بودجه با قیمت‌های روز (با لحاظ تورم ماهانه و سالانه) همخوانی دارد؟ نکته‌ای که اغلب مغفول

می‌ماند، تفاوت بین بودجه مصوب و نقدینگی در دسترس است. تیم باید برنامه جریان نقدینگی را تدوین کند تا مطمئن شود در زمان‌های حساس (مثل فصل کاشت یا برداشت) پول نقد یا اعتبار لازم برای پرداخت دستمزد کارگران و خرید نهاده وجود دارد. همچنین بررسی همپوشانی‌های مالی با سایر پروژه‌ها برای جلوگیری از دوباره کاری مالی ضروری است.

۵. تجدید بیعت و مدیریت جایگزینی، پروژه‌های بلندمدت فرساینده‌اند. آیا همه اعضا با وجود تغییرات احتمالی در زندگی شخصی، همچنان قادر به انجام تعهدات خود هستند؟ تیم باید برای ریسک خروج اعضا برنامه داشته باشد. اگر مسئول بخش آمار در سال دوم مهاجرت کرد، چه کسی جایگزین می‌شود؟ تأیید مجدد تعهدات و تعیین جانشین برای نقش‌های کلیدی، از فلج شدن پروژه در میانه راه جلوگیری می‌کند.

۶. اعتبارسنجی زمان‌بندی با واقعیت میدانی، تقویم زراعی با تقویم اداری متفاوت است. پژوهشگر نمی‌تواند به گیاه دستور دهد که رشدش را متوقف کند تا بودجه برسد. برنامه زمانی پیش‌بینی شده^۱ باید با واقعیت‌های فنولوژیک گیاه و فصل کاری منطقه تطبیق داده شود. لحاظ کردن زمان‌های احتیاطی برای تأخیرهای ناشی از بارندگی یا خرابی ماشین‌آلات در این مرحله الزامی است.

۷. برنامه‌ریزی لجستیک و هماهنگی اجتماعی، آخرین حلقه، آمادگی میدانی است. سازماندهی نیروی کارگری ماهر، کالبراسیون تجهیزات و خرید نهاده‌ها نباید به دقیقه نود موکول شود. نکته مهم‌تر در نظام‌های زراعی، هماهنگی اجتماعی است؛ اگر آزمایش در مزارع کشاورزان انجام می‌شود، باید پیش از شروع، توافق‌نامه‌ها با مالکان زمین نهایی شده و اعتماد جامعه محلی جلب گردد تا از تعارضات اجتماعی در حین نمونه‌برداری جلوگیری شود.

1. Gantt chart

۶-۲. مدیریت مالی پروژه‌های تحقیقاتی

اهمیت مدیریت مالی در پروژه‌های تحقیقات نظام‌های زراعی، به مراتب فراتر از پژوهش‌های تک‌رشته‌ای یا کوتاه‌مدت است. دلیل این امر در دو ویژگی ذاتی این پروژه‌ها نهفته است. نخست طولانی مدت بودن که آن‌ها را در معرض نوسانات تورمی سالانه قرار می‌دهد و دوم تعدد ذی‌نفعان و مشارکت‌کنندگان که مدیریت تعهدات مالی را پیچیده می‌سازد. اگرچه رویه‌های استاندارد حسابداری و بودجه‌بندی دانشگاهی قادرند چارچوب اولیه را فراهم کنند و حتی در مواردی که شامل قراردادهای فرعی متعدد هستند، کارآمد باشند (مذاکرات شخصی با هرمز اسدی، ۱۴۰۳/۱۱/۵)، اما ماهیت میان‌رشته‌ای و ضرورت تصمیم‌گیری‌های جمعی، چالش‌های منحصر به فردی را ایجاد می‌کند.

بزرگترین چالش که تقریباً در اکثر درخواست‌های تأمین مالی پژوهش‌ها مشاهده می‌شود، مسأله شکاف بین بودجه پیشنهادی و بودجه مصوب است. واقعیت تلخ این است که بودجه تخصیص‌یافته غالباً کمتر از مبلغ پیش‌بینی شده در پروپوزال است. این واقعیت ایجاب می‌کند که تیم تحقیقاتی پیش از شروع، به جای خوش‌بینی افراطی، راهکارهای مناسبی برای مواجهه با سناریوهای مختلف مالی تدارک دیده باشد. داشتن استراتژی‌های تعدیلی از پیش تعیین شده، نه تنها از بروز دلسردی و تنش میان اعضا در لحظه اعلام بودجه جلوگیری می‌کند، بلکه تضمین‌کننده تداوم کارآمدی پروژه در شرایط ریاضت مالی خواهد بود. برای مدیریت این چالش، رهبران پروژه باید بسته به شدت کسری بودجه، استراتژی‌های متفاوتی اتخاذ کنند. در شرایطی که کاهش بودجه خفیف و در محدوده ۲۰ درصد باشد، رویکرد کاهش یکنواخت هزینه‌ها کارآمد است (Betz & Betz, 2011). در این سناریو، هر زیرتیم پژوهشی موظف می‌شود بودجه خود را با درصدی مساوی کاهش دهد. مطالعات نشان می‌دهد که اکثر تیم‌ها با حذف هزینه‌های غیرضروری و استفاده از حاشیه اطمینان بودجه، می‌توانند خود را با این شرایط وفق دهند (Raudla et al., 2015).

اما زمانی که کاهش بودجه از آستانه ۲۰ درصد فراتر رود، روش کاهش یکنواخت ناکارآمد و خطرناک می‌شود، زیرا فشار مضاعفی بر همکاران فرعی (مانند دانشجویان یا آزمایشگاه‌های همکار) وارد می‌کند که ممکن است منجر به خروج آن‌ها از پروژه شود. در این شرایط، رویکرد مناسب و پیشنهاد شده کاهش متغیر و نامتناسب است (Lotfi et al., 2024). در این استراتژی، اعضای اصلی پروژه که سهم بودجه بیشتری دارند، داوطلبانه درصد کاهش بیشتری را متحمل می‌شوند تا سهم بودجه همکاران فرعی حفظ شده و انگیزه آنان برای ادامه کار باقی بماند. موفقیت این روش منوط به شفافیت کامل، مشارکت همگانی در تصمیم‌گیری و رعایت عدالت در بازتوزیع منابع است (Lootsma et al., 1990). در نهایت، اگر کاهش بودجه به سطح بحرانی (بیش از ۵۰ درصد) برسد، دیگر راهکارهای تعدیلی پاسخگو نیستند و پروژه نیازمند بازتعریف اساسی، اولویت‌بندی فعالیت‌های حیاتی و مذاکره مجدد با حامی مالی برای تعدیل خروجی‌هاست (Heidenberger et al., 2003).

۶-۲-۱. الگوی نمونه برای ساختار بودجه‌بندی پروژه

برای پیشگیری از ابهامات مالی و تسهیل مدیریت در شرایط بحرانی، تدوین یک ساختار بودجه‌بندی دقیق و شفاف در مرحله پروپوزال ضروری است. ارائه یک بودجه کلی و مبهم، هم شانس پروژه را برای تأیید کاهش می‌دهد و هم در زمان بروز کسری بودجه، فرآیند اولویت‌بندی هزینه‌ها را دشوار می‌سازد. جدول ۶-۱ نمونه‌ای از یک ساختار بودجه‌بندی معیارمحور و تفکیکی را برای یک پروژه ۵ ساله فرضی در حوزه نظام‌های زراعی نشان می‌دهد. در این الگو، هزینه‌ها بر اساس ماهیت عملیاتی تفکیک شده‌اند تا در صورت نیاز به کاهش بودجه، بتوان به سرعت ردیف‌های غیرحیاتی (مانند تجهیزات سرمایه‌ای یا سفرهای مازاد) را شناسایی و مدیریت کرد.

جدول ۶-۱. ساختار پیشنهادی تفکیکی بودجه برای یک پروژه تحقیقاتی ۵ ساله

ردیف	سرفصل هزینه	توضیحات و جزئیات	هزینه سال اول (ریال)	...	هزینه سال پنجم (ریال)	هزینه کل (ریال)
۱ پرسنلی (حق الزحمه)						
۱-۱	همکاران (اعضای هیئت علمی)	(بر اساس درصد مشارکت و آیین‌نامه طرح‌های پژوهشی)				
۲-۱	دانشجویان (ارشد و دکتری)	(حق الزحمه/گرنٲ پژوهشی بر اساس قرارداد)				
۳-۱	کارشناس آزمایشگاه / آمار	(حق الزحمه کارشناس تحلیل داده یا آزمایشگاه)				
۲ اجرا و عملیات مزرعه‌ای						
۱-۲	آماده‌سازی زمین و کاشت	(هزینه اجاره تراکتور، کارنده، سوخت)				
۲-۲	نهادها	(خرید بذر، کودهای شیمیایی، کودهای آلی، سموم)				
۳-۲	داشت و آبیاری	(هزینه آب‌بها، نگهداری سیستم آبیاری، کارگری)				
۴-۲	برداشت	(هزینه اجاره کمباین آزمایشی، کارگری)				

ادامه جدول ۶-۱

ردیف	سرفصل هزینه	توضیحات و جزئیات	هزینه سال اول (ریال)	...	هزینه سال پنجم (ریال)	هزینه کل (ریال)
۳	تحلیل و آزمایشگاه					
۱-۳	نمونه‌برداری و خشک کردن	(پاکت نمونه، آون، ...)				
۲-۳	آنالیز خاک و گیاه	هزینه آنالیز عناصر معدنی، ماده آلی، ... در آزمایشگاه				
۴	لجستیک و تجهیزات					
۱-۴	حمل و نقل (مأموریت)	(هزینه ایاب و ذهاب به مزرعه یا ایستگاه)				
۲-۴	تجهیزات مصرفی	(خرید سنسورهای رطوبت، تشک تبخیر، ...)				
۵	انتشارات و نتایج					
۱-۵	هزینه انتشار مقاله	(هزینه داوری و چاپ در مجلات)				
۲-۵	برگزاری روز مزرعه	(هزینه پذیرایی، پوستر برای انتقال نتایج به کشاورزان)				
۶	هزینه‌های پیش‌بینی نشده	(۱۰ تا ۱۵ درصد مجموع ردیف‌های ۱ تا ۵)				
۷	بالاسری دانشگاه/مؤسسه	(مطابق با قوانین مؤسسه، مثلاً ۱۰ درصد کل)				
۸	جمع کل بودجه					

۳-۶. مدیریت تعهدات و پایش پیشرفت

پژوهش‌های نظام‌های زراعی به دلیل ماهیت بلندمدت و چندوجهی خود، همواره با چالش‌های مدیریتی منحصربه‌فردی روبرو هستند. این تحقیقات که گاه چندین سال زراعی به طول می‌انجامد، مراحل مختلف توسعه را طی کرده و پژوهشگرانی با روش‌های کاری و تخصص‌های متنوع را گرد هم می‌آورد. طبیعی است که در بستر چنین پروژه‌های پیچیده‌ای، مسائل مربوط به پاسخگویی و پایداری اعضا به تعهدات محوله پدیدار شود. برای حفظ تداوم و کیفیت اجرای پروژه، برگزاری جلسات منظم ارزیابی پیشرفت و تعیین مهلت‌های مشخص برای دستیابی به اهداف، امری ضروری است. تعاملات حضوری در این جلسات نه تنها امکان رصد دقیق پیشرفت کار را فراهم می‌آورد، بلکه به عنوان محرکی روانی برای انگیزه‌بخشی و تشویق اعضا به انجام به‌موقع مسئولیت‌ها عمل می‌کند. برای ایجاد محیطی که مسئولیت‌پذیری را میان همکاران نهادینه کند و جلسات را از حالت گزارش‌دهی توصیفی به پایش اجرایی تبدیل نماید، لازم است تعهدات در قالب ابزارهای مدیریتی شفاف و معیارمحور تعریف شوند. دو ابزار کلیدی برای تحقق این هدف، جدول زمان‌بندی پروژه (معروف به نمودار گانت) و شاخص‌های کلیدی عملکرد^۱ هستند (Kerzner, 2025) که در ادامه تشریح می‌شوند.

۳-۶-۱. زمان‌بندی عملیاتی و مدیریت فازهای اجرا

جدول زمان‌بندی پروژه، ابزاری حیاتی است که به رهبر تیم و اعضا کمک می‌کند تا وظایف، وابستگی‌های متقابل و مهلت‌های هر فاز را به صورت بصری مدیریت کنند. در پژوهش‌های زراعی، این جدول باید منطبق بر تقویم زراعی منطقه تنظیم شود. جدول ۶-۲ نمونه‌ای از یک چارچوب زمان‌بندی تفصیلی برای سال اول یک پروژه نظام زراعی را نشان می‌دهد که در آن فعالیت‌ها در قالب فازهای اجرایی تفکیک شده‌اند.

جدول ۶-۲. نمونه جدول زمان‌بندی (گانت چارت) برای سال اول یک پروژه نظام زراعی

فاز	فعالیت کلیدی	مسئول	سه‌ماهه اول	سه‌ماهه دوم	سه‌ماهه سوم	سه‌ماهه چهارم
۱. راه‌اندازی	نهایی‌سازی تیم و تفاهم‌نامه‌ها	رهبر تیم	*			
	نهایی‌سازی مکان و پروتکل‌ها	تیم فنی	*			
۲. آماده‌سازی	خرید نهاده‌ها (بذر، کود)	مدیر اجرایی	*	*		
	آماده‌سازی زمین (شخم/حفاظتی)	مدیر اجرایی			*	
۳. اجرا	اجرای تیمارهای کاشت	تیم فنی			*	
	مدیریت داشت (آبیاری، آفات)	تیم فنی			*	*
۴. برداشت	برداشت (اندازه‌گیری عملکرد)	تیم فنی	*			
	نمونه‌برداری خاک (پس از برداشت)	تیم خاک‌شناسی	*			
۵. تحلیل	آنالیز آزمایشگاهی داده‌ها	تیم آزمایشگاه		*		
	تحلیل آماری اولیه	تیم آمار		*	*	
۶. گزارش‌دهی	برگزاری روز مزرعه (نتایج اولیه)	تیم ترویج		*		
	تدوین گزارش پیشرفت سالانه	رهبر تیم				*

۶-۳-۲. شاخص‌های کلیدی عملکرد برای ارزیابی تیم

باید توجه داشت که صرفاً داشتن جدول زمان‌بندی و تیک زدن فعالیت‌ها کافی نیست، تیم باید بداند که آیا در مسیر درستی حرکت می‌کند یا خیر (کیفیت اجرا). شاخص‌های کلیدی عملکرد ابزارهایی معیارمحور هستند که پیشرفت پروژه را نه به صورت کیفی و سلیقه‌ای، بلکه به صورت کمی و سنجش‌پذیر ارزیابی می‌کنند (Parmenter, 2015). این شاخص‌ها باید در ابتدای پروژه و با توافق تیم تعریف شوند. جدول ۶-۳ نمونه‌ای از این شاخص‌ها را در ابعاد پنج‌گانه ارائه می‌دهد.

جدول ۶-۳. نمونه شاخص‌های کلیدی عملکرد برای ارزیابی پیشرفت پروژه (ارزیابی سالانه)

بعد ارزیابی	شاخص کلیدی	هدف	نحوه اندازه‌گیری
۱. پیشرفت علمی	اجرای دقیق پروتکل‌ها	۱۰۰ درصد تیمارهای آزمایشی مطابق با پروتکل مصوب اجرا شوند.	گزارش بازرسی فصلی رهبر تیم فنی
۲. پیشرفت زمانی	پایبندی به زمان‌بندی	۹۰ درصد فعالیت‌های کلیدی (طبق جدول ۶-۲) در مهلت مقرر انجام شوند.	گزارش پیشرفت سه‌ماهه پروژه
۳. پیشرفت مالی	پایبندی به بودجه	هزینه واقعی در محدوده ± 10 درصد بودجه مصوب (جدول ۶-۱) باشد.	گزارش حسابداری و تطبیق با جدول بودجه
۴. مشارکت ذینفعان	رضایت و مشارکت کشاورز همکار	برگزاری موفق حداقل ۱ روز مزرعه در سال با حضور کشاورزان منطقه.	صورتجلسات و بازخورد کتبی کشاورزان
۵. خروجی (۵۵۵)	مدیریت یکپارچه داده‌ها	۱۰۰ درصد داده‌های برداشت‌شده در همان فصل در پایگاه داده (طبق پروتکل فصل ۳) ثبت شوند.	ممیزی پایگاه داده در انتهای فصل

با وجود کارآمدی ابزارهای فوق، باید اذعان داشت که هیچ ابزار مدیریتی مانند جداول گانت و شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) نمی‌تواند جایگزین دو عامل اساسی شامل حمایت مالی پایدار و مدیریت هوشمندانه انسانی در موفقیت پروژه شود. تأمین

نیازهای تحقیقاتی و مالی پژوهشگران، متناسب با سهم هر یک در بودجه پروژه، شرط لازم برای توقع پاسخگویی است. با این حال، تجربه زیسته در زیست‌بوم تحقیقاتی ایران نشان می‌دهد که بحران پاسخگویی و فرسایش انگیزه، لزوماً تک‌عاملی و صرفاً ناشی از کمبود منابع مالی نیست؛ بلکه این چالش‌ها زمانی به اوج می‌رسند که مشارکت اعضا ماهیت تکلیفی و دستوری به خود می‌گیرد. در چنین شرایطی، فقدان توأمان حمایت‌های مالی و مشوق‌های معنوی (نظیر ارتقای شغلی یا هویت‌بخشی حرفه‌ای)، پروژه را از یک همکاری مشتاقانه به یک رفع تکلیف اداری تنزل می‌دهد. در نقطه مقابل، حتی با وجود بودجه کافی، رهبر تیم باید آمادگی مدیریت چالش‌های انسانی را داشته باشد. اگر همکاری علیرغم برخورداری از تمام شرایط مناسب و دریافت اعتبارات، همچنان در انجام تعهدات خود (بر اساس شاخص‌های جدول ۶-۳) کوتاهی کنند، رویکرد صحیح این است که رهبر پروژه ابتدا از طریق گفتگوهای حضوری و جلسات اختصاصی، به ریشه‌یابی دقیق مشکل بپردازد. اما اگر پس از پیگیری‌های لازم و ارائه بازخورد، بهبودی در عملکرد فرد مشاهده نشود، جایگزینی به‌موقع آن همکار با فردی جدید - در صورت وجود زمان و منابع کافی - تصمیمی دشوار اما برای حفظ سلامت تیم و پیشرفت کلی پژوهش، اجتناب‌ناپذیر و ضروری است.

۶-۴. مدیریت انتشارات علمی و اخلاق پژوهش

در اکوسیستم پژوهشی امروز، پارادایم انتشار در علوم کشاورزی دستخوش تحولی بنیادین شده است. اگر در گذشته مجلات تخصصی نسبت به پژوهش‌های کلی‌نگر و بین‌رشته‌ای تردید داشتند و تمرکز صرفاً بر مطالعات تک‌عاملی بود، امروزه با درک پیچیدگی‌های نظام‌های زراعی، معتبرترین مجلات ملی و بین‌المللی استقبال چشمگیری از مقالاتی نشان می‌دهند که رویکردی سیستمی و جامع به مسائل مزرعه دارند. با این حال، تبدیل داده‌های خام به مقالات علمی، اغلب به پاشنه آشیل تیم‌های تحقیقاتی تبدیل می‌شود؛ جایی که چالش اصلی نه در پذیرش علمی مقاله، بلکه در مدیریت پیچیده حقوق معنوی و تعیین ترتیب نویسندگان نهفته است. در پروژه‌هایی که ده‌ها محقق از رشته‌های

متنوع (از خاک شناسی تا اقتصاد) و با درجات علمی متفاوت در آن مشارکت دارند، فقدان یک استراتژی شفاف برای انتشار یافته‌ها می‌تواند به سادگی به منشأ اختلافات عمیق و حتی فروپاشی تیم منجر شود. اگرچه فرآیند نگارش نهایی و ارسال مقالات معمولاً در پایان دوره‌های زراعی انجام می‌شود، اما سیاست‌گذاری انتشارات باید از همان روزهای نخستین تشکیل تیم و حتی در مرحله تدوین پروپوزال آغاز گردد. تجربه زیسته در نظام تحقیقاتی نشان داده است که موکول کردن تصمیم‌گیری درباره ترکیب نویسندگان به زمان نهایی شدن مقاله، بستری لغزنده برای سوء تفاهم و احساس تبعیض ایجاد می‌کند (مذاکرات شخصی با حسن امیری اوغان، ۱۴۰۳/۲/۲۰). یک برنامه انتشاراتی اخلاق‌مدار باید تضمین کند که تمامی اعضای کلیدی - به‌ویژه دانشجویان و محققان جوانی که برای ارتقای رزومه علمی خود نیاز مبرم به جایگاه نویسنده اول یا مسئول دارند - در طول عمر پروژه فرصت‌های عادلانه‌ای برای دیده‌شدن دریافت کنند. بدین منظور، ضروری است که بحث درباره انتشارات از حالت تابو خارج شده و به موضوعی برای گفتگوی صریح در جلسات مدیریتی تبدیل شود.

برای عبور سلامت از این چالش‌ها، تدوین یک پروتکل توافق نویسندگی در ابتدای پروژه راهگشاست. در این توافق‌نامه، باید معیارهای نویسنده بودن فراتر از تعارفات معمول و سلسله‌مراتب اداری تعریف شود. در اخلاق پژوهش‌نوین، صرفاً تأمین بودجه یا جمع‌آوری داده‌های روتین لزوماً به معنای نویسندگی نیست، بلکه مشارکت فکری در تحلیل داده‌ها و نگارش متن ملاک اصلی است (Gasparyan et al., 2018). بر همین اساس، در پروژه‌های نظام زراعی، رهبر پروژه نباید به صورت پیش‌فرض و سنتی، نویسنده اول یا مسئول تمام مقالات باشد. رویکرد صحیح و عادلانه، توزیع چرخشی و تخصص‌محور این جایگاه‌هاست؛ بدین معنا که در مقاله‌ای با محوریت تحلیل اقتصادی، اقتصاددان تیم باید در جایگاه نویسنده اول قرار گیرد، حتی اگر رهبر کل پروژه متخصص زراعت باشد. همچنین در مقالات مستخرج از پایان‌نامه‌ها، حفظ حقوق دانشجو به عنوان نویسنده اول، اصلی غیرقابل مذاکره است.

علاوه بر تعیین جایگاه‌ها، شفافیت در زمان‌بندی انتشارات نیز حیاتی است. تیم تحقیق باید نقشه‌ی راهی از مقالات مورد انتظار ترسیم کند تا هر زیرگروه تخصصی بداند که در کدام سال و در کدام مقاله، فرصت ارائه دستاوردهای خود را خواهد داشت. با این وجود، این توافقات اولیه نباید خشک و غیرقابل‌تغییر باشند. پویایی تحقیقات ایجاب می‌کند که با پیشرفت کار و تغییر در میزان مشارکت افراد (مثلاً زمانی که همکاری فراتر از انتظار ظاهر می‌شود و بار اصلی تحلیل را به دوش می‌کشد)، ترکیب نویسندگان بازمینی و به‌روزرسانی شود تا همواره بازتاب‌دهنده مشارکت واقعی افراد باشد، نه جایگاه اسمی آن‌ها. در نهایت، باید پذیرفت که شفافیت و عدالت در فرآیند نویسندگی، تنها یک مسئله اخلاقی نیست، بلکه یک استراتژی مدیریتی هوشمندانه است؛ چرا که وقتی اعضا اطمینان یابند حقوق معنوی‌شان در سایه نام مدیران ارشد گم نمی‌شود، انگیزه و تعهد آن‌ها برای همکاری دلسوزانه تا آخرین روز پروژه حفظ خواهد شد.

۶-۵. درس‌هایی از یک قرن تجربه: بازخوانی مدیریتی مطالعه موردی روتامستد

ایستگاه تحقیقاتی روتامستد بریتانیا، اگرچه به آزمایش‌های کلاسیک قرن نوزدهم خود شناخته می‌شود، اما در سال ۲۰۱۵ با راه‌اندازی آزمایش تناوبی در مقیاس بزرگ^۱ (Li et al., 2023)، الگوی نوینی از مدیریت پژوهش‌های کل‌نگر را ارائه کرد که در مقایسه با آزمایش‌های قدیمی این مرکز تحقیقاتی تغییرات قابل توجهی را دارا بود (جدول ۴-۶). واکاوی فرآیند طراحی و استقرار این پروژه، نه صرفاً به خاطر جنبه‌های فنی، بلکه به عنوان یک مدل استاندارد مدیریتی برای پژوهشگران ایرانی حائز اهمیت است. این پروژه نشان می‌دهد که چگونه می‌توان اصول نظری مطرح شده در فصول پیشین این کتاب را در مقیاس بزرگ عملیاتی کرد. برای درک عمیق‌تر ابعاد مدیریتی این کلان‌پروژه، باید فراتر از جزئیات فنی عبور کرده و به تصمیمات راهبردی اتخاذ شده در نقطه صفر طراحی نگریست. در ادامه، معماری اجرایی این آزمایش در قالب چند درس آموخته کلیدی واکاوی می‌شود تا الگویی عملی برای گذار از ایده به اجرا فراهم گردد.

1. Large-scale rotation experiment (LSRE)

جدول ۶-۴. اصول طراحی به‌روز شده برای آزمایش تناوبی در مقیاس بزرگ در ایستگاه روتامستد

اصول به‌روز شده	اصول قدیمی
- طراحی شده برای ایجاد تبادلات و هم‌افزایی بین پیامدهای متعدد زراعی، زیست‌محیطی و اقتصادی - طراحی آماری کارآمد با قدرت کافی برای مقایسه نظام‌های زراعی و سنجش سهم هر عامل مدیریتی - تأثیر همزمان عوامل مدیریتی مختلف بر عملکرد نظام زراعی را بررسی می‌کند - آزمایش در چندین مکان با شرایط گوناگون و گاه متضاد اجرا می‌شود - واحدهای آزمایشی به صورت کرت‌های مربعی بزرگ (با اثرات حاشیه‌ای کوچکتر و اثرات تیماری بارزتر) در نظر گرفته می‌شوند که انعطاف‌پذیری بیشتری را برای ترکیب تیمارهای اضافی در آینده فراهم می‌کنند. - آزمایش قابلیت تطبیق با تیمارها و عوامل مدیریتی به‌روز را داراست	- طراحی شده عمدتاً برای دستیابی به هدفی زراعی مشخص (مانند عملکرد محصول) - طراحی آماری بسیار ساده، عمدتاً فاقد تصادفی‌سازی تیمارها و بدون تکرار واقعی - عمدتاً یک عامل مدیریتی در طراحی آزمایش مورد توجه قرار می‌گیرد - اجرا عمدتاً در یک منطقه انجام می‌شود - کرت‌ها عمدتاً دراز و باریک هستند که منجر به اثرات حاشیه‌ای شدید می‌شود. این واحدهای آزمایشی در مراحل بعدی، برای ترکیب با تیمارهای اضافی که امکان تصادفی‌سازی صحیح آنها وجود ندارد، تقسیم می‌شوند. - تغییر در ساختار آزمایش به منظور پاسخ به سوالات جدید میسر نمی‌باشد

از Li et al. (2023)

گذار از طراحی فردی به خرد جمعی، برخلاف رویکردهای سنتی که در آن طرح آزمایش پشت درهای بسته توسط یک محقق ارشد تدوین می‌شد، مدیریت روتامستد فرآیند طراحی را با تشکیل یک کارگروه چندرشته‌ای آغاز کرد. همان‌طور که در فصل دوم بر اهمیت تیم‌سازی تأکید شد، این گروه عملیاتی شامل متخصصان زراعت، خاک‌شناسی، آمار و بوم‌شناسی بود. نکته مدیریتی برجسته در اینجا، دعوت از کشاورزان پیشرو به اتاق فکر طراحی بود. هدف از این استراتژی، تضمین واقع‌گرایی اجرایی بود؛ تا

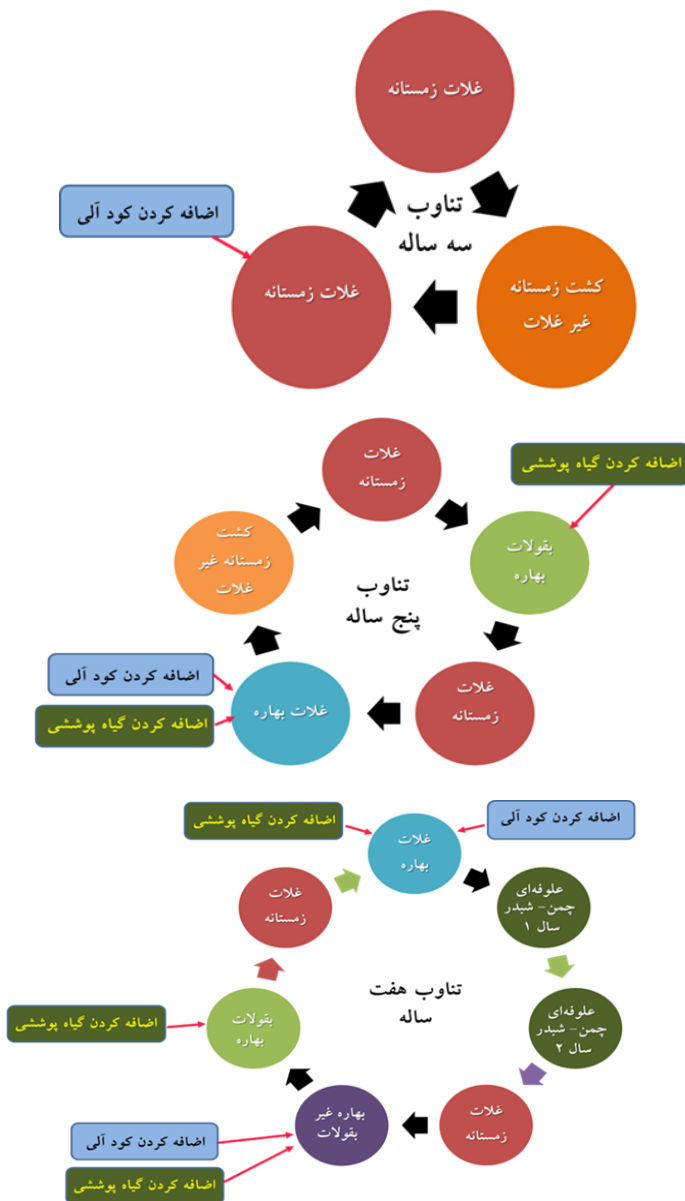
اطمینان حاصل شود سیستم‌هایی که طراحی می‌شوند، در مقیاس تجاری قابل پیاده‌سازی هستند و خروجی پروژه صرفاً یک مقاله علمی نیست، بلکه توصیه‌ای کاربردی برای صنعت کشاورزی است.

مهندسی معکوس (از پیامد به تیمار)، تیم مدیریت پروژه به جای شروع از تیمارها (ورودی‌ها)، از پیامدها (خروجی‌ها) آغاز کرد. ایشان ابتدا با نیم‌نگاهی به شاخص‌های پایداری (که تفصیل آن در فصل پنجم گذشت)، اهداف راهبردی نظیر سودآوری و حفظ تنوع زیستی را تعریف کردند و سپس با مهندسی معکوس، عوامل مدیریتی را انتخاب نمودند که قادر به تحقق این اهداف باشند. این فرآیند چهار مرحله‌ای که در جدول ۵-۶ خلاصه شده است، الگوی عملیاتی دقیقی از نحوه تبدیل اهداف انتزاعی به پروتکل اجرایی ارائه می‌دهد.

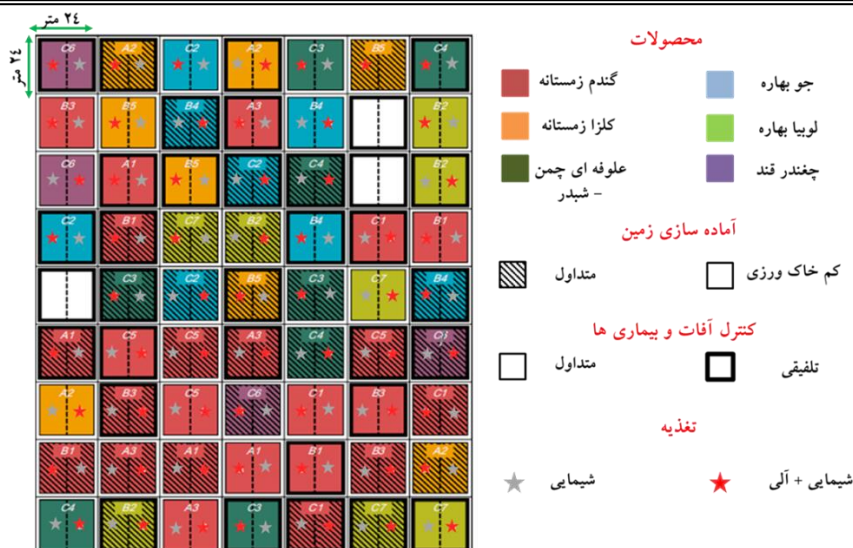
جدول ۵-۶. اصول چهارگانه طراحی مدیریتی در آزمایش‌های سیستمیک (اقتباس از تجربه روتامستد)

مرحله طراحی	سوال کلیدی مدیریتی	اقدام عملیاتی و ارتباط با فصول قبل
۱. شناسایی پیامدها	دقیقاً به دنبال حل چه مشکلی هستیم؟	تعریف اهداف: افزایش سودآوری، کاهش نیترات آب، حفظ تنوع زیستی (مرتبط با فصل ۵: انتخاب شاخص‌ها)
۲. تعیین عوامل	کدام ابزارهای مدیریتی ما را به هدف می‌رسانند؟	انتخاب ۴ رکن: تناوب، خاک‌ورزی، تغذیه و حفاظت گیاه
۳. طراحی آماری	چگونه با کمترین هزینه، بیشترین اطلاعات را بگیریم؟	انتخاب طرح فاکتوریل برای سنجش هم‌زمان اثرات اصلی و متقابل (مرتبط با فصول ۲ و ۳: اصول طراحی آزمایش)
۴. انتخاب متغیرها	چه داده‌هایی باید برای اثبات ادعاها ثبت شود؟	لیست‌برداری از صفات: عملکرد دانه، کربن خاک، جمعیت حشرات مفید (مرتبط با فصل ۴: مدیریت داده)

مدیریت ریسک زمانی و مکانی، یکی از چالش‌های بنیادین در اجرای پروژه‌های بلندمدت، مدیریت هم‌زمان تناوب‌های زراعی با طول دوره‌های متفاوت (۳، ۵ و ۷ ساله) بود. مدیریت پروژه روتامستد برای حل این چالش، از سیستم طراحی کاملاً فازی استفاده کرد؛ بدین معنا که در هر سال زراعی، تمام مراحل هر تناوب در مزرعه حضور دارند. این استراتژی که نمونه‌ای پیشرفته از مباحث فصل چهارم (طراحی آزمایش‌های بلندمدت تناوبی) است، در شکل ۶-۱ نمایش داده شده و به مدیر پروژه اجازه می‌دهد تا اثر نوسانات اقلیمی سالانه را کنترل کند. علاوه بر مدیریت زمان، چالش چیدمان مکانی نیز نیازمند دقت مهندسی بود. برای پیاده‌سازی ۲۴ نظام زراعی مختلف در یک مزرعه واحد، از نقشه‌های اجرایی دقیق استفاده شد (شکل ۶-۲). این نقشه، زبان مشترک میان محقق و دست‌اندرکاران مزرعه است و از بروز خطاهای انسانی در اعمال تیمارها (مثلاً شخم اشتباهی در کرت حفاظتی) جلوگیری می‌کند.



شکل ۶-۱. دیاگرام مدیریت فازهای تناوبی و تلفیق آن با استراتژی‌های تغذیه‌ای. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه تناوب‌های ۳، ۵ و ۷ ساله در کنار هم مدیریت می‌شوند تا در هر سال زراعی، تمام محصولات در مزرعه حضور داشته باشند (مدیریت ریسک زمانی).



شکل ۶-۲. نقشه اجرایی و جانمایی تیمارها در سایت آزمایش. استفاده از این نقشه‌ها برای مدیریت لجستیک مزرعه ضروری است. نواحی هاشورخورده نشان‌دهنده عملیات خاک‌ورزی متداول و نواحی ساده نشان‌دهنده کم‌خاک‌ورزی هستند. A1: فاز اول تناوب سه ساله، A2: فاز دوم تناوب سه ساله، A3: فاز سوم تناوب سه ساله. B1: فاز اول تناوب پنج ساله، B2: فاز دوم تناوب پنج ساله، B3: فاز سوم تناوب پنج ساله، B4: فاز چهارم تناوب پنج ساله، B5: فاز پنجم تناوب پنج ساله. C1: فاز اول تناوب هفت ساله، C2: فاز دوم تناوب هفت ساله، C3: فاز سوم تناوب هفت ساله، C4: فاز چهارم تناوب هفت ساله، C5: فاز پنجم تناوب هفت ساله، C6: فاز ششم تناوب هفت ساله، C7: فاز هفتم تناوب هفت ساله.

کنترل کیفیت و مستندسازی وضعیت صفر، تیم اجرایی روتامستد پیش از آغاز تیمارها، یک سال کامل زراعی را به آزمایش یکنواختی با کشت یولاف اختصاص داد. این اقدام دقیقاً در راستای اصول انتخاب سایت است که در فصل سوم بر آن تأکید شد. هدف از این کار، اطمینان از همگنی خاک و عدم وجود لایه‌های سخت پنهان بود. علاوه بر این، یک پروتکل دقیق برای مستندسازی وضعیت صفر اجرا شد که شامل نمونه‌برداری لایه‌بندی شده خاک تا عمق ۹۰ سانتی‌متری بود. این داده‌های اولیه، حکم سنگ محک را دارند تا نسل‌های آینده پژوهشگران بتوانند تغییرات ایجاد شده را با دقت نسبت به نقطه شروع بسنجند.

پیاده‌سازی ساختار آماری (تعادل میان دقت و هزینه)، پس از تایید یکنواختی زمین، فاز اجرایی با پیاده‌سازی یک ساختار آماری پیچیده آغاز شد. تیم مدیریت برای اینکه بتواند اثرات چهار عامل مدیریتی (تناوب، خاک‌ورزی، تغذیه و حفاظت) را هم به صورت مجزا و هم در تعامل با یکدیگر بسنجد، از طرح فاکتوریل-اسپلیت پلات استفاده کرد. در این چیدمان اجرایی، سه عامل کلان (تناوب، خاک‌ورزی و حفاظت گیاه) در کرت‌های اصلی مستقر شدند و عامل تغذیه که نیازمند دقت مکانی بیشتری بود، در کرت‌های فرعی اعمال گردید. این تصمیم مدیریتی که ریشه در مباحث فصل چهارم دارد، باعث شد تا با کمترین هزینه عملیاتی، ۶۰ کرت اصلی و ۱۲۰ کرت فرعی در هر سایت ایجاد شود؛ ساختاری که قدرت آماری لازم برای آشکارسازی حتی کوچکترین تغییرات اکولوژیک را فراهم می‌آورد.

استراتژی‌های سه‌گانه تحلیل (نگاه چندبعدی به نتایج)، مدیریت پروژه روتامستد برای استخراج دانش از دل انبوه داده‌های تولید شده، به جای اکتفا به یک روش آنالیز خطی، استراتژی تحلیلی سه‌لایه و هم‌زمانی را اتخاذ کرد تا بتواند به طیف متنوع سوالات ذی-نفعان پاسخ دهد. در لایه نخست، با اتخاذ رویکرد سیستمی، ۲۴ ترکیب تیماری به عنوان نظام‌های زراعی مستقل و رقیب مورد قضاوت قرار گرفتند تا با زبانی قابل فهم برای کشاورزان، سودآورترین و پایدارترین بسته مدیریتی شناسایی شود؛ اما به موازات آن، در لایه دوم با استفاده از تحلیل فاکتوریل، سهم دقیق هر عامل مدیریتی و برهم‌کنش‌های پیچیده آن‌ها تفکیک شد تا مکانیزم‌های علمی اثرگذاری برای محققان آشکار گردد. در نهایت، برای غلبه بر چالش ناهمگونی زمانی ناشی از تفاوت طول دوره تناوب‌ها، از رویکرد پیشرفته سری زمانی و تکنیک جایگزینی فضا با زمان بهره گرفته شد تا پایداری سیستم در افق‌های بلندمدت مدل‌سازی شود؛ تلفیقی هوشمندانه که خروجی‌های پروژه را از یک گزارش عملکرد ساده به یک مدل جامع تصمیم‌گیری ارتقا داد.

مدیریت داده‌های نامتوازن و چرخه یادگیری، یکی از چالش‌های اجرایی که در سال‌های نخست پدیدار شد، مدیریت داده‌های محصولاتی بود که در همه تناوب‌ها مشترک نبودند (مثلاً چغندر قند که فقط در یک تناوب بود). تیم مدیریت داده با ایجاد یک پایگاه داده یکپارچه (مطرح شده در فصل چهارم)، پروتکلی تدوین کرد که در آن متغیرهای عملکردی به واحدهای استاندارد (مانند کالری تولیدی یا حاشیه سود ناخالص) تبدیل می‌شدند. این استانداردسازی به مدیران اجازه داد تا خروجی‌های نااهمگن را در یک ترازوی واحد بسنجند. بدین ترتیب، با تکمیل اولین دوره‌های تناوب، پروژه از فاز استقرار وارد فاز تولید دانش شد و نشان داد که چگونه یک طراحی مستحکم اولیه، مسیر را برای تحلیل‌های پیچیده نهایی هموار می‌سازد.

مرور تجربه روتامستد به روشنی نشان می‌دهد که پایداری و موفقیت یک آزمایش بلندمدت، بیش از آنکه مرهون بودجه‌های کلان یا تکنولوژی‌های پیچیده باشد، حاصل انضباط سازمانی، دوراندیشی در طراحی و انعطاف‌پذیری در اجرا است. این مطالعه موردی ثابت می‌کند که سرمایه‌گذاری زمانی بر روی فاز صفر (طراحی و کنترل کیفیت)، هزینه‌های سربار را در سال‌های آتی به شدت کاهش می‌دهد. با این حال، پرسش کلیدی و چالش برانگیز برای پژوهشگر ایرانی این است که آیا این الگوی پیشرفته و یکپارچه، در بستر کشاورزی ایران که با چالش‌های ساختاری نظیر خرده‌مالکی، پراکندگی اراضی و ناپایداری منابع مالی تحقیقاتی روبروست، عیناً قابل اجراست؟ پاسخ به این پرسش، نیازمند گذار از تحسین به تطبیق است که در بخش بعدی به تحلیل آن خواهیم پرداخت.

۶-۵-۱. تحلیل تطبیقی و بومی‌سازی تجربیات جهانی برای شرایط ایران

ارائه مطالعه موردی ایستگاه روتامستد از آن جهت حائز اهمیت راهبردی است که فرآیند تفکر و روش‌شناسی طراحی یک آزمایش کل نگر مدرن را به تصویر می‌کشد، نه اینکه لزوماً الگویی برای کپی‌برداری باشد. واقعیت آن است که پیاده‌سازی مستقیم این الگو بدون سازگارسازی با اکوسیستم زراعی ایران، به احتمال زیاد عقیم خواهد ماند. هنر

پژوهشگر ایرانی در این است که اصول طراحی (مانند تفکر سیستمی و مهندسی معکوس) را استخراج کرده و آن را در قالبی متناسب با محدودیت‌ها و پتانسیل‌های بومی بازآرایی کند. نخستین و بنیادی‌ترین تفاوت در این بومی‌سازی، تغییر در اولویت‌بندی عوامل محدودکننده است. آزمایش روتامستد در اقلیم معتدل و دیم پرباران بریتانیا طراحی شده است؛ لذا انتخاب چهار عامل مدیریتی آن (تناوب، خاک‌ورزی، تغذیه و آفات) بازتاب‌دهنده چالش‌های آن اقلیم و منطقه است. در مقابل، تقریباً تمامی نظام‌های زراعی ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، وابسته به آبیاری هستند و آب نقش حاکم را بازی می‌کند. بنابراین، در طراحی یک آزمایش جامع در ایران، عامل مدیریت آبیاری (نظیر مقایسه روش‌های نوین با سنتی یا رژیم‌های کم‌آبیاری) باید از یک متغیر حاشیه‌ای به عامل اصلی در طرح آماری ارتقا یابد. در حالی که در الگوی انگلیسی، خاک‌ورزی عامل اصلی بود، در الگوی ایرانی پیشنهاد می‌شود مدیریت آب به عنوان عامل اصلی و روش‌های خاک‌ورزی (حفاظتی در برابر متداول) به عنوان عامل فرعی لحاظ شوند تا برهم‌کنش حیاتی آب-خاک به درستی مدل‌سازی گردد.

چالش دوم در بومی‌سازی، مسئله مقیاس اجرا و تضاد میان کشاورزی تجاری و خرده‌مالکی است. الگوی روتامستد با کرت‌های تقریباً ۶۰۰ مترمربعی، برای کشاورزی یکپارچه طراحی شده است. اجرای چنین الگویی در ایستگاه‌های تحقیقاتی مادر در ایران (نظیر مراکز تحقیقاتی کرج، دزفول یا مشهد) که دارای اراضی وسیع و ادوات مکانیزه هستند، نه تنها کاملاً امکان‌پذیر، بلکه برای تولید دانش پایه ضروری است. اما زمانی که هدف، پژوهش در مزارع زارعین باشد، ساختار خرده‌مالکی و پراکنده اراضی ایران اجازه اجرای یک طرح فاکتوریل پیچیده با ۲۴ تیمار را نمی‌دهد. راهکار خروج از این بن‌بست، بهره‌گیری از الگوی طرح مادر-بچه است که در فصل سوم به تفصیل معرفی شد. در این سناریوی بومی‌سازی شده، آزمایش مادر (با تمام پیچیدگی‌های آماری مشابه روتامستد)

در ایستگاه تحقیقاتی متمرکز می‌شود و آزمایش‌های بچه (ساده‌سازی شده با دو یا سه تیمار کلیدی) در شبکه وسیعی از مزارع کشاورزان تکثیر می‌گردند.

سومین رکن بومی سازی، بازنگری در ترکیب تیم تحقیقاتی است. تیم روتامستد الگوی موفق از متخصصان فنی (زراعت و اکولوژی) بود، اما در بستر ایران، شکست بسیاری از پروژه‌های فنی ریشه در نادیده گرفتن ابعاد اقتصادی-اجتماعی دارد (همان‌طور که در فصل دوم بحث شد). کشاورز خرده‌مالک ایرانی به دلیل ریسک‌پذیری پایین و محدودیت نقدینگی، رفتار متفاوتی نسبت به کشاورز صنعتی بریتانیا دارد. از این‌رو، حضور متخصصان اقتصاد کشاورزی (برای تحلیل دقیق تاب‌آوری مالی) و جامعه‌شناسی روستایی (برای درک موانع پذیرش فناوری) در هسته مرکزی تیم طراحی، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. با وجود تمام این تفاوت‌ها، یک اصل مشترک وجود دارد که باید عیناً از تجربه روتامستد اقتباس شود و آن اصل مهم صحت آماری آزمایش است. تیم روتامستد با تضمین حضور تمام فازهای تناوب در هر سال، راه را بر خطای اثر سال بست. این استاندارد آماری که متأسفانه در بسیاری از پژوهش‌های داخلی نادیده گرفته می‌شود، باید به عنوان خط قرمز طراحی در ایران رعایت گردد تا بتوان اثر واقعی تناوب را از نوسانات اقلیمی تفکیک کرد (مبحث فصل چهارم). در نهایت، مطالعه روتامستد نقشه‌ای برای چگونه اندیشیدن است، اما مختصات این نقشه باید با واقعیت‌های آب، خاک و جامعه کشاورزی ایران ترسیم شود.

۶-۶. چالش‌ها و ضرورت‌های پایداری در آزمایش‌های بلندمدت نظام‌های زراعی

اگرچه در جامعه علمی کشور درباره ضرورت حیاتی گذار از آزمایش‌های کلاسیک و کوتاه‌مدت به آزمایش‌های جامع سیستمی اتفاق نظر وجود دارد، اما واقعیت میدانی نشان می‌دهد که بقای این پژوهش‌ها در بستر اجرایی ایران با تهدیدات نهادی عمیقی روبروست. برخلاف چالش‌های فنی که با دانش مهندسی و آمار قابل حل هستند، چالش‌های نهادی ریشه در ساختارهای مدیریتی، فرهنگی و قانونی دارند و عبور از آن‌ها

نیازمند تغییر پارادایم در حکمرانی پژوهشی کشور است. در ادامه، پنج چالش کلیدی که مانع از شکل‌گیری روتامستدهای ایرانی شده‌اند، تشریح می‌گردد.

• **تضاد چرخه بیولوژیک با چرخه مدیریتی**، بزرگترین دشمن آزمایش‌های بلندمدت در ایران، پدیده ناهمخوانی مقیاس زمانی است. فرآیندهای اکولوژیک نظیر تغییرات کربن آلی خاک یا پویایی بانک بذر علف‌های هرز، چرخه‌هایی کند و دهه‌ای دارند؛ در حالی که چرخه‌های مدیریتی و بودجه‌ریزی در نظام اداری ایران، بسیار کوتاه‌مدت (اغلب ۱ تا ۴ ساله) است. این تضاد باعث می‌شود که با تغییر مدیریت‌ها در موسسات تحقیقاتی یا معاونت‌های وزارتخانه، اولویت‌ها به ناگهان تغییر کند. مدیری که به دنبال دستاورد سریع و ملموس برای دوره تصدی خود است، انگیزه کمی برای حمایت از پروژه‌ای دارد که نتایج آن ۱۰ سال دیگر (احتمالاً در دوره مدیر بعدی) آشکار می‌شود. این تمرکز بر نتایج زودبازده و محدودیت افق برنامه‌ریزی باعث شده است که بسیاری از آزمایش‌های ارزشمند، دقیقاً در زمانی که به مرحله بلوغ و ثمردهی داده‌ها می‌رسند، به بهانه کمبود بودجه یا تغییر سیاست‌ها متوقف شوند.

• **فشار نظام ارزشیابی و معضل مقاله‌محوری**، چالش نهادی دوم که مانع بزرگی برای ورود محققان جوان و باانگیزه به این عرصه است، سیستم فعلی ارزشیابی و ارتقای اعضای هیئت علمی است. این سیستم که عمدتاً بر پایه تعداد مقالات سالانه بنا شده، پژوهشگران را به سمت پروژه‌های زودبازده و تک‌عاملی سوق می‌دهد. یک آزمایش نظام زراعی جامع ممکن است در ۳ تا ۵ سال اول (دوره استقرار)، داده‌های قابل انتشار اندکی تولید کند، اما پس از آن به گنجینه‌ای از داده‌های ناب تبدیل شود. با این حال، پژوهشگری که دغدغه ترفیع سالانه یا تبدیل وضعیت استخدامی دارد، نمی‌تواند ریسک این دوره سکوت انتشاراتی را بپذیرد. تا زمانی که نظام ارزشیابی کشور امتیاز ویژه‌ای برای پژوهش‌های زیرساختی و بلندمدت قائل نشود، انگیزه نیروی انسانی برای آغاز چنین پروژه‌های دشواری پایین خواهد ماند.

• **بحران حافظه سازمانی و قائم‌به‌فرد بودن پژوهش**، سومین چالش بومی، ماهیت قائم‌به‌فرد پژوهش‌ها در ایران است. در ایستگاه‌هایی مانند روتامستد، آزمایش‌ها متعلق به هویت موسسه هستند و با بازنشستگی یک محقق، پروتکل‌ها توسط جانشین او ادامه می‌یابد. اما در ایران، بسیاری از طرح‌ها با هویت شخصی یک محقق گره خورده‌اند. فقدان سیستم‌های مستندسازی استاندارد و ضعف مفرط در جانشین‌پروری، باعث می‌شود که با بازنشستگی، انتقال یا فوت محقق اصلی، حافظه سازمانی پروژه پاک شود. تجربه تلخ بسیاری از ایستگاه‌های تحقیقاتی نشان می‌دهد که محققان جدید به دلیل عدم دسترسی به نقشه‌های دقیق، سوابق تیمارها و داده‌های خام سال‌های قبل، ترجیح می‌دهند آزمایش قدیمی را رها کرده و طرح جدیدی را از صفر شروع کنند.

• **فرهنگ جزیره‌ای و حبس داده‌ها**، یکی از موانع توسعه تحقیقات سیستمی در ایران، فقدان فرهنگ اشتراک‌گذاری داده و همکاری بین‌سازمانی است. آزمایش‌های نظام‌های زراعی حجم عظیمی از داده تولید می‌کنند که تحلیل آن‌ها نیازمند همکاری متخصصان هواشناسی، خاک‌شناسی، اقتصاد و زراعت از موسسات مختلف است. با این حال، ساختار اداری ایران به گونه‌ای است که داده‌ها اغلب در درایوهای کامپیوترهای شخصی حبس می‌شوند. دانشگاه‌ها، موسسات تحقیقاتی تابعه وزارت جهاد کشاورزی و بخش‌های اجرایی، به ندرت پروتکل مشترکی برای تبادل داده‌های خام دارند. این فرهنگ جزیره‌ای باعث می‌شود که حتی اگر آزمایشی اجرا شود، پتانسیل تحلیلی آن هرگز به طور کامل شکوفا نشود و خروجی‌ها محدود به گزارش‌های درون‌سازمانی باقی بماند.

• **ناامنی کاربری اراضی و تغییر ماهیت ایستگاه‌ها**، در نهایت، چالشی که شاید مختص کشورهای در حال توسعه باشد، تهدید فیزیکی اراضی تحقیقاتی است. با گسترش شهرنشینی و فشار بر اراضی حاشیه شهرها (که اغلب ایستگاه‌های تحقیقاتی قدیمی در آنجا واقع شده‌اند)، بسیاری از سایت‌های آزمایشی با خطر تغییر کاربری مواجه هستند. فشار برای فروش اراضی تحقیقاتی به منظور درآمدزایی یا تبدیل آن‌ها به مناطق مسکونی،

تهدیدی جدی برای آزمایش‌هایی است که قرار است ۲۰ سال تداوم داشته باشند. عدم وجود قوانین حفاظتی ویژه برای سایت‌های تحقیقاتی ملی، باعث می‌شود که سرمایه‌گذاری دهه‌ای روی خاک یک ایستگاه، با یک تصمیم اداری برای واگذاری زمین، یک شبه نابود شود.

۶-۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل ششم

فصل ششم به عنوان ایستگاه پایانی این اثر، تلاشی بود برای پیوند زدن آرمان‌های علمی به واقعیت‌های اجرایی. در این فصل تبیین شد که موفقیت پژوهش‌های نظام‌های زراعی، تنها در گرو تسلط بر طرح‌های آماری (فصل سوم و چهارم) یا شاخص‌های پایداری (فصل پنجم) نیست؛ بلکه نیازمند مهارتی فراتر به نام مدیریت زیست‌بوم پژوهشی است. در این فصل، فرآیند گذار از مرحله پروپوزال به عملیات مزرعه‌ای با ارائه چک‌لیست‌های دقیق راه‌اندازی تشریح گردید و راهبردهای مالی برای تاب‌آوری در برابر کسری بودجه تبیین شد. همچنین با معرفی ابزارهای کنترلی نظیر جداول زمان‌بندی و شاخص‌های کلیدی عملکرد، بر ضرورت پایش کمی تعهدات تیمی تأکید گردید. مبحث اخلاق انتشار نیز یادآور شد که حفظ سرمایه اجتماعی و انسجام تیم، اولویتی بالاتر از امتیازات کمی مقالات دارد. در نهایت، با بازخوانی تحلیلی تجربه جهانی روتامستد و بومی‌سازی آن با واقعیت‌های ایران، این حقیقت آشکار شد که پژوهشگر ایرانی برای اثرگذاری پایدار، نیازمند رویکردی است که ضمن بهره‌گیری از استانداردهای جهانی، با مقتضیات بومی و محدودیت‌های اجرایی سازگار باشد.

سخن پایانی

اثر حاضر، تلاشی بود برای ترسیم نقشه‌ی راه در سرزمینی کمتر شناخته‌شده؛ سفری علمی که از بازاندیشی در مبانی نظری و چیستی یک سیستم (فصل اول) آغاز گردید و به واقعیت‌های عملیاتی و چالش‌های مدیریتی در کف مزرعه (فصل ششم) ختم شد. هدف این نوشتار، ارائه چارچوبی جامع برای گذار از پژوهش‌های جزئ‌نگر، تک‌رشته‌ای و

کوتاه‌مدت به سوی تحقیقات کل‌نگر، پیچیده و میان‌رشته‌ای بود؛ گذاری که نه یک انتخاب لوکس، بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای درک واقعیت‌های درهم‌تنیده اکوسیستم‌های زراعی است.

در این مسیر، تلاش شد تا نشان داده شود که موفقیت در این تحول پارادایمی، مستلزم هم‌راستایی و تکامل هم‌زمان در سه ساحت بنیادین است: ۱) ساحت تئوری، درک عمیق مفاهیم سیستمی و پذیرش پیچیدگی (فصول اول تا سوم). ۲) ساحت عمل، توانایی طراحی آزمایش‌های بلندمدت، تسلط بر تحلیل‌های آماری پیشرفته (فصل چهارم) و سنجش پایداری (فصل پنجم). ۳) ساحت انسانی، مهارت شکل‌دهی به تیم‌های مشارکتی و مدیریت زیست‌بوم پژوهش (فصل ششم). باید اذعان نمود که پژوهش در نظام‌های زراعی، پدیده‌ای پویا و در حال‌تطور است. اگرچه این کتاب کوشید با ارائه الگوهای عملی، جداول استاندارد و کدهای نرم‌افزاری، چراغ راهی برای مسیرهای تاریک باشد، اما هیچ راهنمای مکتوبی نمی‌تواند جایگزین هوشمندی موقعیتی پژوهشگر شود. در این عرصه، ارزش کار علمی صرفاً در تولید داده خلاصه نمی‌شود، بلکه روش‌های نوآورانه‌ای که در فرآیند پژوهش برای حل چالش‌های بی‌سابقه ابداع می‌شوند، از ارزش و اعتباری هم‌سنگ برخوردارند. پژوهشگر این حوزه باید بداند که در مواجهه با بن‌بست‌ها، یا باید راهی بیابد و یا راهی بسازد.

موفقیت در این مسیر پرفرازونشیب، در گرو دو عامل تعیین‌کننده است. نخست، ارزیابی مستمر قابلیت اجرا از طریق مشارکت فعال کشاورزان و سیاست‌گذاران در تمام مراحل طراحی و تفسیر؛ و دوم، تأمین مالی و حمایت نهادی پایدار که ضامن بقای آزمایش‌های بلندمدت است. در نهایت، امید می‌رود که اعضای جامعه علمی کشور، از مدیران ارشد تا کارشناسان اجرایی، حضور در چنین پژوهش‌هایی را نه یک وظیفه اداری، بلکه فرصتی استثنایی برای رشد حرفه‌ای و بلوغ علمی بدانند. این کتاب، دعوتی است به تغییر نگرش؛ تغییری که هدف نهایی آن، دستیابی به نظام‌های زراعی تاب‌آورتر و بهره‌ورتر برای تضمین امنیت غذایی نسل‌های آینده ایران است.

منابع

- Betz, F., & Betz, F. (2011). Multidisciplinary Research. *Managing Science: Methodology and Organization of Research*, 313-333.
- Gasparyan, A. Y., Yessirkepov, M., Voronov, A. A., Koroleva, A. M., & Kitas, G. D. (2018). Updated editorial guidance for quality and reliability of research output. *Journal of Korean Medical Science*, 33(35).
- Heidenberger, K., Schillinger, A., & Stummer, C. (2003). Budgeting for research and development: a dynamic financial simulation approach. *Socio-economic planning sciences*, 37(1), 15-27.
- Kerzner, H. (2025). *Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling*. John Wiley & Sons.
- Li, X., Storkey, J., Mead, A., Shield, I., Clark, I., Ostler, R., ... & Dobermann, A. (2023). A new Rothamsted long-term field experiment for the twenty-first century: principles and practice. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5), 60.
- Lootsma, F. A., Mensch, T. C. A., & Vos, F. A. (1990). Multi-criteria analysis and budget reallocation in long-term research planning. *European journal of operational research*, 47(3), 293-305.
- Lotfi, R., Vaseei, M., Ali, S. S., Davoodi, S. M. R., Bazregar, M., & Sadeghi, S. (2024). Budget allocation problem for projects with considering risks, robustness, resiliency, and sustainability requirements. *Results in Engineering*, 24, 102828.
- Parmenter, D. (2015). *Key performance indicators: developing, implementing, and using winning KPIs*. John Wiley & Sons.
- Raudla, R., Savi, R., & Randma-Liiv, T. (2015). Cutback management literature in the 1970s and 1980s: taking stock. *International Review of Administrative Sciences*, 81(3), 433-456.

فهرست واژه‌ها

واژه فارسی	معادل انگلیسی
آستانه (در تحلیل آماری)	Threshold
آمار چندمتغیره	Multivariate Statistics
آماره‌های برازش	Fit Statistics
آزمایش تناوبی	Rotational Experiment
آزمایش بلندمدت	Long-Term Experiment (LTE)
آزمایش‌های مادر-بچه	Mother-Baby Trials
اثرات تصادفی	Random Effects
اثرات ثابت	Fixed Effects
اثرات موروثی	Legacy Effects
اثر متقابل (در آمار)	Interaction Effect
ارزیابی چرخه حیات	Life Cycle Assessment (LCA)
ارزیابی پایداری	Sustainability Assessment
اعتبار (در آمار)	Validity
اعتبارسنجی شاخص	Indicator Validation
الگوی پایان‌باز (در طراحی)	Open-ended Design
انحراف (در پایش داده)	Drift
انحراف معیار	Standard Deviation (STD)
بازآرایی (تیم)	Reorganizing
بازاندیشی (مفهومی)	Rethinking

Redesigning	بازطراحی (روش‌شناسی)
Archiving (Data)	بایگانی (داده‌ها)
Adaptation / Domestication	بومی‌سازی (راهکارها)
Dynamic Steady State	پایدار پویا
Database	پایگاه داده
Global Warming Potential (GWP)	پتانسیل گرمایش جهانی
Ethical Protocol	پروتکل اخلاقی
Data Management Protocol	پروتکل مدیریت داده
On-Station Research	پژوهش ایستگاهی
On-Farm Research	پژوهش در مزرعه
Participatory Research	پژوهش مشارکتی
Data Quality Monitoring	پایش کیفیت داده
Hidden Replication	تکرار پنهان
Canonical Discriminant Analysis (CDA)	تحلیل تشخیصی متعارف
Comparative Analysis	تحلیل تطبیقی
Sensitivity Analysis	تحلیل حساسیت
Cluster Analysis	تحلیل خوشه‌ای
Stability Analysis	تحلیل ثبات (پایداری)
Time Series Analysis	تحلیل سری زمانی
Path Analysis	تحلیل مسیر
Principal Component Analysis (PCA)	تحلیل مؤلفه‌های اصلی
Breakpoint Analysis	تحلیل نقطه شکست
Interdisciplinary Priority Conflicts	تضاد اولویت‌های رشته‌ای
Heterogeneous Compound Symmetry (CSH)	تقارن مرکب ناهمگن
Spline Functions	توابع اسپلاین

Interdisciplinary Team	تیم میان رشته‌ای
Multiple Imputation (MI)	جایگزینی چند گانه (داده گمشده)
Reductionist Approach	جزء نگر (رویکرد)
Scale Mismatch	چالش مقیاس
Planning Checklist	چک لیست برنامه ریزی
Minimum Data Set (MDS)	حداقل مجموعه داده
Restricted Maximum Likelihood (REML)	حداکثر درست نمایی محدود شده
Autoregressive (AR(1))	خود همبسته
Heterogeneous Autoregressive (ARH(1))	خود همبسته ناهمگن
Missing Data	داده گمشده
Repeated Measures	داده های تکرار شونده
Carbon Footprint	رد پای کربن
Informed Consent	رضایت آگاهانه
Segmented Regression	رگرسیون چند تکه ای
Non-linear Trends	روندهای غیر خطی
Budget Breakdown Structure (BBS)	ساختار شکست بودجه
Covariance Structure	ساختار همبستگی (کوواریانس)
Unstructured (UN)	ساختار نامنظم
Team Effectiveness Assessment	سنجش اثربخشی تیمی
Key Performance Indicator (KPI)	شاخص کلیدی عملکرد
Staggered-Start Design	طراحی پلکانی
Standard Design	طراحی استاندارد (آزمایش)
Phased Design	طراحی فازی (در تناوب)
Emission Factor	ضریب انتشار
Metadata	فرا داده (متادیتا)

Reliability	قابلیت اتکا (در ارزیابی)
Holistic Approach	کل‌نگر (رویکرد)
Organic Farming	کشاورزی ارگانیک
Conservation Agriculture	کشاورزی حفاظتی
Precision Farming	کشاورزی دقیق
Conventional Agriculture	کشاورزی متداول
Smallholder Agriculture	کشاورزی خرده‌مالکی
Test Crop	گیاه آزمایشی (در تناوب)
Risk Assessment Matrix	ماتریس ارزیابی ریسک
Conceptual Model	مدل مفهومی
Mixed Models	مدل‌های آمیخته
Structural Equation Modeling (SEM)	مدل‌سازی معادله ساختاری
Conflict Management	مدیریت تعارض
Akaike Information Criterion (AIC)	معیار آکائیک
Bayesian Information Criterion (BIC)	معیار بیزی
Heterogeneity of Variance	ناهمگنی واریانس
Spider (Radar) Diagram	نمودار تار عنکبوتی
Gantt Chart	نمودار گانت (زمان‌بندی)
Hotspots	نقاط داغ
Functional Unit	واحد کارکردی
Weighting	وزن‌دهی

نمایه

اعتبارسنجی شاخص, ۳۴۹	۱	اثر متقابل (در آمار), ۳۴۹
الگوی پایان باز (در طراحی), ۳۴۹		اثرات تصادفی, ۱۰۸, ۱۰۹, ۱۱۲, ۱۹۶,
انحراف (در پایش داده), ۳۴۹		۲۰۸, ۲۰۹, ۲۱۴, ۲۱۵, ۲۲۳, ۲۳۷, ۲۴۰,
انحراف معیار, ۱۸۳, ۳۴۹		۲۴۶, ۳۴۹
آ		اثرات ثابت, ل, ۱۰۵, ۱۱۲, ۱۹۷, ۲۰۵,
آزمایش بلندمدت, ۵۶, ۶۵, ۹۱, ۹۴,		۲۰۶, ۲۰۸, ۲۱۲, ۲۱۳, ۲۱۴, ۲۱۵, ۲۳۷,
۱۹۹, ۲۱۹, ۲۲۳, ۲۳۵, ۲۳۶, ۳۴۱, ۳۴۹		۲۴۰, ۲۴۳, ۳۴۹
آزمایش تناوبی, ۹۴, ۱۱۷, ۱۱۸, ۱۱۹,		اثرات موروثی, ۱۶, ۷۹, ۹۷, ۳۴۹
۳۳۴, ۳۳۵, ۳۴۹		ارزیابی پایداری, ح, م, ۸, ۶۹, ۱۵۱,
آزمایش های مادر-بچه, ۳۴۹		۲۰۹, ۲۶۳, ۲۶۵, ۲۶۶, ۲۶۷, ۲۶۸, ۲۶۹,
آستانه (در تحلیل آماری), ۳۴۹		۲۷۰, ۲۷۴, ۲۷۶, ۲۸۱, ۲۸۴, ۲۸۶, ۲۹۳,
آمار چندمتغیره, ۱۶۲, ۱۶۷, ۱۷۳, ۳۴۹		۲۹۵, ۲۹۷, ۲۹۸, ۳۱۰, ۳۴۹
آماره های برازش, ۲۰۳, ۳۴۹		ارزیابی چرخه حیات, ح, م, ۲۶۵, ۲۹۵,
ب		۲۹۸, ۳۰۰, ۳۰۲, ۳۰۳, ۳۰۶, ۳۰۸, ۳۱۰,
بازاندیشی (مفهومی), ۳۴۹		۳۱۱, ۳۴۹
بازآرایی (تیم), ۳۴۹		اعتبار (در آمار), ۳۴۹
بازطراحی (روش شناسی), ۳۴۹		

- بایگانی (داده‌ها), ۳۴۹
تحلیل حساسیت, م, ۲۹۳, ۲۹۴, ۳۱۰, ۳۵۰
بومی‌سازی (راهکارها), ۳۴۹
- پ**
پایدار پویا, ۱۶, ۳۴۹
پایش کیفیت داده, ۳۵۰
پایگاه داده, ۷۲, ۷۳, ۷۴, ۸۷, ۱۱۳, ۳۵۰, ۳۴۱, ۳۳۱
پتانسیل گرمایش جهانی, ۲۹۸, ۳۵۰
پروتکل اخلاقی, ۳۵۰
پروتکل مدیریت داده, ۷۳, ۳۵۰
پژوهش ایستگاهی, ۵۴, ۳۵۰
پژوهش در مزرعه, ۵۶, ۷۵, ۷۷, ۷۸, ۳۵۰
پژوهش مشارکتی, ۳۵۰
- ت**
تحلیل تشخیصی متعارف, ل, ۱۶۷, ۱۶۹, ۱۷۱, ۱۷۳, ۱۷۸, ۳۵۰
تحلیل تطبیقی, ح, م, ن, ۳۰۳, ۳۴۱, ۳۵۰
تحلیل ثبات (پایداری), ۳۵۰
- تضاد اولویت‌های رشته‌ای, ۳۳, ۴۷, ۳۵۰
تقارن مرکب ناهمگن, ۲۰۰, ۲۰۳, ۳۵۰
تکرار پنهان, ۳۵۰
توابع اسپلاین, ۲۴۷, ۳۵۰
تیم میان‌رشته‌ای, ۲۳, ۳۵۰
- ج**
جایگزینی چندگانه (داده گمشده), ۳۵۰
جزء‌نگر (رویکرد), ۳۵۰

روندهای غیرخطی, ۹۲, ۱۹۰, ۲۴۷,

۳۵۱

س

ساختار شکست بودجه, ۳۵۱

ساختار نامنظم, ۱۹۹, ۲۰۰, ۳۵۱

ساختار همبستگی (کوواریانس), ۳۵۱

سنجش اثربخشی تیمی, ۴۶, ۴۸, ۳۵۱

ش

شاخص کلیدی عملکرد, ۳۵۱

ض

ضریب انتشار, ۳۰۵, ۳۰۶, ۳۵۱

ط

طراحی استاندارد (آزمایش), ۳۵۱

طراحی پلکانی, ل, ۱۱۰, ۱۱۱, ۱۱۲,

۲۰۸, ۲۰۹, ۲۱۲, ۲۱۳, ۲۱۴, ۲۵۱, ۳۵۱

طراحی فازی (در تناوب), ۳۵۱

ف

فراداده (متادیتا), ۳۵۱

چ

چالش مقیاس, ۳۵۰

چک‌لیست برنامه‌ریزی, ۵۵, ۸۷, ۳۵۱

ح

حداقل مجموعه داده, ۳۵۱

حداکثر درست‌نمایی محدودشده, ۲۰۴,

۲۳۵, ۲۵۰, ۳۵۱

خ

خودهمبسته, ۱۹۷, ۱۹۸, ۲۰۳, ۲۰۴,

۲۳۵, ۲۳۸, ۳۵۱

خودهمبسته ناهمگن, ۲۰۳

د

داده گمشده, ۳۵۰, ۳۵۱

داده‌های تکرارشونده, ل, ۲۰۰, ۳۵۱

ر

ردپای کرین, م, ۲۶۴, ۲۷۲, ۲۹۵, ۳۰۲,

۳۰۳, ۳۰۵, ۳۰۶, ۳۵۱

رضایت آگاهانه, ۳۸, ۴۷, ۳۵۱

رگرسیون چندتکه‌ای, ۲۲۸, ۲۳۰, ۳۵۱

مدل‌های آمیخته, ۹۲, ۱۰۹, ۱۳۹, ۱۹۷,	ق
۲۰۱, ۲۰۳, ۲۰۹, ۲۱۰, ۲۱۱, ۲۲۳, ۲۳۵,	قابلیت اتکا (در ارزیابی), ۳۵۱
۲۳۶, ۲۴۶, ۲۴۸, ۲۵۰, ۳۵۲	
مدیریت تعارض, ۴۶, ۴۷, ۳۵۲	ک
معیار آکائیک, ۳۵۲	کشاورزی ارگانیک, ۷, ۱۲, ۶۴, ۲۲۸,
معیار پیزی, ۳۵۲	۳۵۱
	کشاورزی حفاظتی, ۵, ۱۰, ۵۶, ۷۰,
ن	۸۵, ۲۲۸, ۳۵۱
ناهمگنی واریانس, ۲۳۸, ۲۴۶, ۳۵۲	کشاورزی خرده‌مالکی, ۳۵۲
نقاط داغ, ۳۰۴, ۳۰۷, ۳۱۰, ۳۵۲	کشاورزی دقیق, ۱۳, ۳۵۲
نمودار تار عنکبوتی, ۳۵۲	کشاورزی متداول, ۱, ۱۰, ۱۳, ۳۵۲
نمودار گانت (زمان‌بندی), ۳۵۲	کل نگر (رویکرد), ۳۵۱
و	گ
واحد کارکردی, ۳۰۰, ۳۰۳, ۳۰۷,	گیاه آزمایشی (در تناوب), ۳۵۲
۳۰۸, ۳۵۲	
وزن‌دهی, م, ۱۸۷, ۲۴۶, ۲۶۶, ۲۶۷,	م
۲۶۸, ۲۸۷, ۲۸۸, ۲۸۹, ۲۹۳, ۲۹۶, ۳۰۹,	ماتریس ارزیابی ریسک, ۵۵, ۸۷, ۳۵۲
۳۵۲	مدل مفهومی, ۲۱, ۲۲, ۲۴, ۳۳, ۵۴, ۵۸,
	۶۰, ۱۷۸, ۱۸۶, ۳۲۳, ۳۵۲
	مدل‌سازی معادله ساختاری, ل, ۱۷۹,
	۳۵۲

**Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Seed and Plant Improvement Institute**

Research Methodology in Agricultural Systems: From Theory to Implementation

By:

Dr. Majid Gholamhoseini

Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research,
Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2026