

مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

شاپای چاپی: ۰۶۳۲ - ۲۷۱۷، شاپای الکترونیکی: ۹۸۰۴ - ۲۷۱۶

پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار محصولات تراریخته و مدیریت منابع آب

نوع مقاله: مروری

نادیا بابایی

دبیرخانه شورای ملی ایمنی زیستی، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران
nbabaei140404@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱

صفحه ۲۰-۱

چکیده

در این مقاله، در چارچوب تشدید تغییر اقلیم، افزایش تنش آبی و رشد تقاضای جهانی غذا، نقش فناوری‌های نوین کشاورزی با تمرکز بر محصولات تراریخته و پیامدهای آن‌ها بر امنیت غذایی، منابع آب و ایمنی زیستی بررسی شده است. هدف پژوهش، مرور و تحلیل انتقادی پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی و تبیین نقش حکمرانی در مدیریت فرصت‌ها و مخاطرات فناوری‌های زیستی در شرایط تغییر اقلیم است. روش تحقیق بر مرور مطالعات سه دهه اخیر و بررسی تحول رویکردها به سمت پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی است. نتایج نشان می‌دهد اثرات محصولات تراریخته بر امنیت غذایی و منابع آب، بیش از ماهیت فناوری، به کیفیت حکمرانی، چارچوب‌های ارزیابی ریسک، الگوی مصرف نهاده‌های شیمیایی و شرایط اقلیمی وابسته است. در این راستا، توسعه حکمرانی یکپارچه، تقویت پایش‌های زیست‌محیطی، ارزیابی ریسک در مقیاس حوضه آبریز و همگرایی سیاست‌های آب، کشاورزی و ایمنی زیستی ضروری است. این اقدامات پیش‌شرط بهره‌برداری پایدار از فناوری‌های زیستی و تحقق امنیت غذایی همراه با حفاظت از منابع آب محسوب می‌شوند. نوآوری مقاله، ارائه چارچوب مفهومی پیوند آب-غذا-ایمنی زیستی برای تصمیم‌گیری یکپارچه در مدیریت فناوری‌های زیستی تحت شرایط تغییر اقلیم است.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، ایمنی زیستی، حکمرانی محیط‌زیست، گلیفوزیت

مقدمه

تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر از یک چالش صرفاً زیست‌محیطی فراتر رفته و به یکی از مهم‌ترین تهدیدهای توسعه پایدار، امنیت غذایی، سلامت اکوسیستم‌ها و مدیریت منابع آب در سطح جهانی تبدیل شده است. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، افزایش دمای متوسط زمین، تغییر الگوی زمانی و مکانی بارش، تشدید رخدادهای حدی اقلیمی از جمله خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها، کاهش منابع آب تجدیدپذیر و افزایش فراوانی تنش‌های اقلیمی، عملکرد سامانه‌های طبیعی و انسانی را به‌طور همزمان تحت تأثیر قرار داده است (IPCC, 2023). گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم نشان می‌دهد که بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌ویژه خاورمیانه و شمال آفریقا، در دهه‌های آینده با کاهش دسترسی به منابع آب، افت تولیدات کشاورزی و افزایش آسیب‌پذیری اجتماعی-اقتصادی مواجه خواهند شد (IPCC, 2023).

در میان بخش‌های مختلف اقتصادی، کشاورزی بیشترین وابستگی را به منابع آب دارد و حدود ۷۰ درصد برداشت آب شیرین جهان را به خود اختصاص می‌دهد. از این‌رو، هرگونه تغییر در کمیت یا کیفیت منابع آب، به‌طور مستقیم بر تولید غذا، معیشت جوامع روستایی و امنیت غذایی اثرگذار است (FAO, 2022). علاوه بر کاهش کمی منابع آب، افت کیفیت آب ناشی از ورود آلاینده‌های کشاورزی، شوری، فرسایش خاک و آلودگی‌های شیمیایی نیز به یکی از چالش‌های اصلی مدیریت پایدار منابع آب تبدیل شده است. برآوردهای سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نشان می‌دهد که افزایش فشار بر منابع آب، همراه با رشد جمعیت و تغییر الگوی مصرف، می‌تواند تا میانه قرن حاضر شکاف میان عرضه و تقاضای غذا را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد، مگر آنکه

نظام‌های تولید کشاورزی به سمت بهره‌وری بیشتر و مصرف پایدار منابع حرکت کنند (FAO, 2022).

در پاسخ به این چالش‌ها، طی سه دهه گذشته فناوری‌های نوین زیستی، به‌ویژه محصولات حاصل از مهندسی ژنتیک، به‌عنوان یکی از راهبردهای افزایش بهره‌وری کشاورزی، کاهش خسارات ناشی از آفات و سازگاری با تنش‌های اقلیمی مورد توجه قرار گرفته‌اند. نخستین محصولات تراریخته تجاری در اواسط دهه ۱۹۹۰ وارد عرصه کشاورزی شدند و از آن زمان تاکنون سطح زیر کشت آن‌ها در بسیاری از کشورها، به‌ویژه ایالات متحده، برزیل، آرژانتین، کانادا و هند روندی افزایشی داشته است (Qaim, 2020). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که برخی محصولات تراریخته توانسته‌اند با افزایش عملکرد، کاهش خسارت آفات، بهبود کارایی مصرف نهاده‌ها و افزایش درآمد کشاورزان، نقش قابل توجهی در ارتقای امنیت غذایی ایفا کنند (Klümper and Qaim, 2014; Brookes and Barfoot, 2020). علاوه بر این، پژوهش‌های انجام‌شده درباره محصولات تراریخته دارای صفات مرتبط با تحمل تنش‌های غیرزیستی، به‌ویژه خشکی، نشان داده‌اند که این فناوری می‌تواند در برخی شرایط، ظرفیت بالقوه‌ای برای کمک به سازگاری کشاورزی با تغییر اقلیم داشته باشد. با این حال، میزان موفقیت این محصولات به نوع گیاه، صفت منتقل‌شده، شدت تنش و شرایط محیطی و مدیریتی وابسته است (Tester and Langridge, 2010; Qaim, 2020).

با وجود این، مسیر توسعه محصولات تراریخته همواره با مناقشات علمی، اجتماعی و سیاستی همراه بوده است. برخلاف مطالعاتی که بر مزایای اقتصادی و افزایش بهره‌وری این فناوری تأکید دارند، گروه دیگری از پژوهش‌ها بر پیامدهای احتمالی آن برای سلامت اکوسیستم‌ها، تنوع زیستی، کیفیت خاک و منابع آب تمرکز کرده‌اند. بخش قابل توجهی از این نگرانی‌ها به توسعه

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

بر اساس مفهوم «مرزهای سیاره‌ای»، فشار همزمان بر منابع آب، تنوع زیستی، کاربری اراضی و چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی می‌تواند ظرفیت تاب‌آوری سامانه زمین را کاهش داده و خطر عبور از آستانه‌های بحرانی محیط‌زیستی را افزایش دهد (Rockström *et al.*, 2023). از این منظر، ارزیابی فناوری‌های زیستی تنها بر مبنای شاخص‌های تولید یا عملکرد اقتصادی کافی نیست، بلکه باید آثار آن‌ها بر کیفیت منابع آب، خدمات اکوسیستمی، سلامت محیط‌زیست و ظرفیت سازگاری سامانه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی نیز مورد توجه قرار گیرد (Folke *et al.*, 2021). به همین دلیل، در سال‌های اخیر مفهوم حکمرانی تطبیقی و مدیریت یکپارچه منابع طبیعی به یکی از محورهای اصلی سیاست‌گذاری محیط‌زیست تبدیل شده است.

با وجود رشد قابل توجه مطالعات درباره محصولات تراریخته، ایمنی زیستی، تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب، بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها هر یک از این موضوعات را به صورت مستقل مطالعه کرده‌اند و مطالعاتی که بتوانند ارتباط متقابل این چهار حوزه را در قالب یک چارچوب تحلیلی منسجم تبیین کنند، همچنان محدود هستند. به‌ویژه در کشورهای دارای تنش آبی، از جمله ایران، هنوز چارچوبی که بتواند به‌طور همزمان اثرات تغییر اقلیم، کیفیت منابع آب، امنیت غذایی و حکمرانی فناوری‌های زیستی را مورد ارزیابی قرار دهد، به‌خوبی توسعه نیافته است. این خلأ دانشی، ضرورت انجام مرورهای تحلیلی و تلفیقی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

بر این اساس، هدف مقاله حاضر، مرور انتقادی ادبیات علمی و تحلیل سیر تحول پژوهش‌ها در زمینه ارتباط میان محصولات تراریخته، گلیفوزیت، مدیریت منابع آب، امنیت غذایی و ایمنی زیستی در بستر تغییر اقلیم است. نوآوری این پژوهش در

محصولات مقاوم به علف‌کش و افزایش مصرف گلیفوزیت مربوط می‌شود؛ علف‌کشی که امروزه به‌عنوان پرمصرف‌ترین علف‌کش جهان شناخته می‌شود (Mesnage *et al.*, 2019). پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که بقایای گلیفوزیت و متابولیت اصلی آن یعنی AMPA می‌توانند از طریق رواناب سطحی، نفوذ در خاک، زهکش‌های کشاورزی و حتی رسوبات، وارد منابع آب سطحی و زیرزمینی شوند و بر کیفیت آب، ساختار اجتماعات میکروبی، ارگانیسم‌های آبی و عملکرد اکوسیستم‌های آبی اثر بگذارند (Van Bruggen *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2020; Maggi *et al.*, 2020). از سوی دیگر، کاهش جریان‌های آبی ناشی از خشکسالی و افزایش دمای آب در شرایط تغییر اقلیم، می‌تواند ظرفیت خودپالایی رودخانه‌ها و تالاب‌ها را کاهش داده و ماندگاری آلاینده‌های کشاورزی را افزایش دهد (UNEP, 2021).

همزمان با گسترش این مباحث، ادبیات علمی نیز دستخوش تحول شده است. در دهه ۱۹۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰، اغلب مطالعات بر ارزیابی عملکرد محصولات تراریخته، افزایش تولید و منافع اقتصادی آن‌ها متمرکز بودند. از اواخر دهه ۲۰۰۰، توجه پژوهشگران به ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی، مقاومت علف‌های هرز، افزایش مصرف علف‌کش‌ها و پیامدهای اکولوژیک این فناوری معطوف شد. در دهه اخیر، رویکرد جدیدی در ادبیات علمی شکل گرفته است که به جای ارزیابی مجزای هر یک از مؤلفه‌ها، بر بررسی تعاملات میان منابع آب، امنیت غذایی، تنوع زیستی، تغییر اقلیم و حکمرانی فناوری‌های زیستی تأکید دارد. این تحول معرف‌گذار از رویکردهای تک‌بخشی به رویکردهای سیستمی و یکپارچه است؛ رویکردهایی که در قالب مفاهیمی همچون «نکسوس آب-غذا-انرژی» و به‌تازگی «پیوند آب-غذا-ایمنی زیستی» توسعه یافته‌اند (Hoff, 2011; Rockström *et al.*, 2023).

آن است که با تلفیق دیدگاه‌های مدیریت منابع آب، حکمرانی محیط زیست و ایمنی زیستی، چارچوب مفهومی «پیوند آب-غذا-ایمنی زیستی» را به عنوان رویکردی برای ارزیابی همزمان فرصت‌ها، مخاطرات و الزامات حکمرانی فناوری‌های زیستی ارائه می‌کند. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای طراحی سیاست‌های یکپارچه، ارتقای ارزیابی ریسک و حمایت از تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در حوزه مدیریت پایدار منابع آب و کشاورزی تحت شرایط تغییر اقلیم باشد.

تغییر اقلیم و بحران منابع آب

تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر چرخه هیدرولوژیک زمین تبدیل شده و از طریق افزایش دما، تغییر الگوهای زمانی و مکانی بارش، تغییر در میزان تبخیر و تعرق و تشدید رخدادهای حدی اقلیمی، کمیت و کیفیت منابع آب را در مقیاس جهانی تحت تأثیر قرار داده است. بر اساس گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم، این پیامدها در بسیاری از مناطق، به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک، با کاهش منابع آب تجدیدپذیر، افت رواناب‌های سطحی، کاهش تغذیه آبخوان‌ها و افزایش فراوانی خشکسالی‌های هیدرولوژیک همراه خواهد بود؛ روندی که به‌طور همزمان امنیت آب و امنیت غذایی را تهدید می‌کند (IPCC, 2023).

مطالعات نشان می‌دهد که تغییر اقلیم علاوه بر کاهش کمی منابع آب، می‌تواند کیفیت آن‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهد. افزایش دمای آب می‌تواند به کاهش اکسیژن محلول و تغییر در فرایندهای زیستی و شیمیایی آب منجر شود. همچنین، تغییر الگوی بارش و افزایش رواناب ناشی از رخدادهای بارشی شدید می‌تواند انتقال آلاینده‌های کشاورزی و سایر آلاینده‌ها به منابع

آب را افزایش دهد. افزایش دمای آب و تغییر شرایط هیدرولوژیک نیز می‌تواند احتمال بروز و گسترش شکوفایی جلبکی را افزایش دهد. مجموعه این تغییرات می‌تواند کیفیت آب و سلامت اکوسیستم‌های آبی را تحت تأثیر قرار دهد (UNEP, 2021). علاوه بر این، کاهش جریان پایه رودخانه‌ها و افت سطح آب‌های زیرزمینی، ظرفیت خودپالایی طبیعی اکوسیستم‌های آبی را کاهش داده و موجب افزایش ماندگاری آلاینده‌های شیمیایی، فلزات سنگین و ترکیبات آلی پایدار در محیط می‌شود (UNEP, 2021). این شرایط سبب می‌شود که حتی ورود مقادیر نسبتاً اندک آلاینده‌های کشاورزی نیز پیامدهای اکولوژیک گسترده‌تری نسبت به گذشته ایجاد کند.

بخش کشاورزی به‌شدت به منابع آب وابسته است و تغییرات اقلیمی از طریق کاهش یا تغییرپذیری بارش، افزایش تبخیر و تعرق و تغییر دسترسی به آب آبیاری می‌تواند عملکرد و پایداری نظام‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد (FAO, 2022). در چنین شرایطی، تغییر در شیوه‌های مدیریت مزرعه و استفاده از برخی نهادهای شیمیایی برای حفظ عملکرد می‌تواند فشار بیشتری بر منابع آب وارد کند. از این منظر، تغییر اقلیم و مدیریت نهادهای کشاورزی می‌توانند از طریق سازوکارهای متقابل، خطر آلودگی منابع آب را تحت تأثیر قرار دهند (Rockström et al., 2023).

یکی از مسیرهای مهم انتقال آلاینده‌های کشاورزی به محیط‌های آبی، رواناب سطحی و فرسایش خاک است. تغییر الگوهای بارش و افزایش فراوانی یا شدت برخی رخدادهای بارشی می‌تواند در بسیاری از مناطق موجب افزایش رواناب و تغییر در مسیر انتقال ترکیبات موجود در سطح خاک به منابع آب شود (IPCC, 2023). در این میان، شواهد تجربی نشان می‌دهد که بارش و شرایط رطوبتی خاک می‌توانند انتقال برخی علف‌کش‌ها، از جمله گلیفوزیت، از اراضی کشاورزی به آب‌های سطحی

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

فناوری‌های زیستی، باید علاوه بر ملاحظات تولید و امنیت غذایی، ظرفیت اکولوژیک حوضه‌های آبریز، وضعیت منابع آب و پیامدهای احتمالی آن‌ها بر کیفیت آب را نیز در نظر بگیرد.

همزمان با تشدید بحران آب، مفهوم «تاب‌آوری سامانه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی» نیز در ادبیات علمی جایگاه ویژه‌ای یافته است. بر اساس این دیدگاه، پایداری منابع آب تنها به میزان بارش یا ذخایر آب وابسته نیست، بلکه به توانایی نظام‌های مدیریتی در سازگاری با شرایط جدید، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش ظرفیت پاسخگویی نیز بستگی دارد (Folke *et al.*, 2021). از این منظر، مدیریت منابع آب دیگر صرفاً یک مسئله فنی نیست، بلکه به کیفیت حکمرانی، هماهنگی بین‌بخشی، مشارکت ذی‌نفعان و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد علمی وابسته است. چنین رویکردی با اهداف توسعه پایدار نیز همسو بوده و بر ضرورت ادغام سیاست‌های آب، کشاورزی، محیط‌زیست و امنیت غذایی تأکید می‌کند.

در مجموع، شواهد موجود نشان می‌دهد که تغییر اقلیم از طریق تغییر الگوهای بارش، افزایش دما، تشدید خشکسالی و تغییر شرایط هیدرولوژیک، هم بر میزان دسترسی به منابع آب و هم بر کیفیت و پایداری اکوسیستم‌های آبی اثر می‌گذارد (IPCC, 2023; UN-Water, 2023). این شرایط، به‌ویژه در مناطق دارای تنش آبی، می‌تواند آسیب‌پذیری نظام‌های کشاورزی و منابع طبیعی را افزایش دهد. بنابراین، ارزیابی فناوری‌های نوین کشاورزی، از جمله محصولات تراریخته، نباید مستقل از شرایط اقلیمی و وضعیت منابع آب انجام شود. در نتیجه، بررسی همزمان تغییر اقلیم، مدیریت منابع آب و فناوری‌های زیستی برای ارزیابی فرصت‌ها و مخاطرات این فناوری‌ها و طراحی سیاست‌های پایدار ضروری است. در بخش بعد، نقش محصولات تراریخته در سازگاری کشاورزی با تغییر اقلیم و

را تشدید کنند (Richards *et al.*, 2018; Van Bruggen *et al.*, 2018). همچنین، در دوره‌های خشکسالی و کاهش جریان آب، ظرفیت رقیق‌سازی آلاینده‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه، غلظت برخی ترکیبات در منابع آبی می‌تواند افزایش پیدا کند. بنابراین، تغییر اقلیم نه تنها شرایط تولید و مصرف نهاده‌های کشاورزی، بلکه مسیرهای انتقال، رقیق‌سازی و سرنوشت آلاینده‌ها در محیط‌های آبی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در سال‌های اخیر، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب از تمرکز صرف بر شاخص‌های کمی مانند میزان بارش و حجم رواناب فراتر رفته و توجه بیشتری به کیفیت آب و سلامت اکوسیستم‌های آبی معطوف شده است. تغییرات دما، الگوهای بارش، جریان رودخانه‌ها و شرایط هیدرولوژیک می‌تواند همزمان کمیت و کیفیت منابع آب را تحت تأثیر قرار دهد. از این منظر، «امنیت آب» مفهومی چندبعدی است که علاوه بر دسترسی پایدار به آب، حفاظت از کیفیت منابع آب، حفظ کارکرد اکوسیستم‌های آبی و ظرفیت جوامع برای مقابله با مخاطرات مرتبط با آب را نیز دربرمی‌گیرد (UN-Water, 2023).

این چالش‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله خاورمیانه و شمال آفریقا، به دلیل محدودیت منابع آب، افزایش تقاضای آب، توسعه کشاورزی آبی و افزایش دما، اهمیت بیشتری دارند. ارزیابی‌های بین‌المللی نشان می‌دهند که تغییر اقلیم می‌تواند با تشدید خشکسالی، افزایش تبخیر و تعرق و تغییر الگوهای بارش، فشار بر منابع آب این مناطق را افزایش دهد (IPCC, 2023). در ایران نیز فشارهای اقلیمی در کنار برداشت گسترده از منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، آسیب‌پذیری نظام‌های آبی و کشاورزی را افزایش داده است (Madani, 2014; Famiglietti, 2014). بنابراین، برنامه‌ریزی برای تغییر الگوی تولید کشاورزی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین، از جمله

چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با آن بررسی می‌شود.

محصولات تراریخته و سازگاری کشاورزی با تغییر اقلیم

رشد جمعیت جهان، افزایش تقاضا برای غذا، محدودیت منابع آب و تشدید پیامدهای تغییر اقلیم، ضرورت تحول در نظام‌های تولید کشاورزی را بیش از هر زمان دیگری آشکار ساخته است. برآوردهای سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نشان می‌دهد که برای تأمین نیاز غذایی جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰، افزایش تولید محصولات کشاورزی باید همزمان با کاهش فشار بر منابع طبیعی و ارتقای بهره‌وری آب و خاک محقق شود (FAO, 2022). در چنین شرایطی، فناوری‌های زیستی نوین، به‌ویژه محصولات حاصل از مهندسی ژنتیک، به‌عنوان یکی از گزینه‌های مهم برای افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر تنش‌های اقلیمی مطرح شده‌اند (Qaim, 2020).

نخستین محصولات تراریخته تجاری در سال ۱۹۹۶ وارد عرصه تولید شدند و طی کمتر از سه دهه، سطح زیر کشت آن‌ها از کمتر از دو میلیون هکتار به بیش از ۲۰۰ میلیون هکتار در جهان افزایش یافت. این روند، محصولات تراریخته را به یکی از سریع‌ترین فناوری‌های پذیرفته‌شده در تاریخ کشاورزی تبدیل کرده است (James, 2019). در حال حاضر، ایالات متحده، برزیل، آرژانتین، کانادا و هند از مهم‌ترین تولیدکنندگان محصولات تراریخته محسوب می‌شوند و بخش عمده‌ای از سطح زیر کشت جهانی به سویا، ذرت، پنبه و کلزای تراریخته اختصاص دارد (James, 2019). توسعه این محصولات عمدتاً با هدف افزایش عملکرد، کاهش خسارت آفات، بهبود مدیریت علف‌های هرز و کاهش هزینه‌های تولید صورت گرفته است.

مطالعات اولیه درباره محصولات تراریخته، عمدتاً بر مزایای اقتصادی و افزایش عملکرد تمرکز داشتند. بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در دهه ۱۹۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ نشان دادند که استفاده از گیاهان مقاوم به حشرات، به‌ویژه محصولات دارای ژن Bt، موجب کاهش مصرف حشره‌کش‌ها، افزایش عملکرد و بهبود درآمد کشاورزان شده است (Klümper and Qaim, 2014). همچنین، برخی مطالعات گزارش کردند که فناوری‌های زیستی از طریق کاهش خسارات ناشی از آفات و بیماری‌ها، می‌توانند نقش مؤثری در افزایش امنیت غذایی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، ایفا کنند (Qaim, 2020). این یافته‌ها سبب شد که محصولات تراریخته به‌عنوان یکی از ابزارهای بالقوه تحقق اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه در حوزه امنیت غذایی، مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گیرند.

با تشدید آثار تغییر اقلیم، توجه به نقش محصولات تراریخته در افزایش سازگاری کشاورزی با تنش‌های محیطی افزایش یافته است. تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش فراوانی و شدت خشکسالی، افزایش دما، تغییر الگوی بارش و در برخی مناطق تشدید شوری خاک، می‌تواند عملکرد و پایداری تولید محصولات زراعی را تحت تأثیر قرار دهد (IPCC, 2023). در پاسخ به این چالش‌ها، مهندسی ژنتیک به‌عنوان یکی از رویکردهای زیست‌فناورانه برای افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های غیرزیستی، به‌ویژه خشکی، مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، برخلاف صفات مقاومت به آفات و تحمل علف‌کش‌ها، تعداد محصولات تراریخته دارای تحمل به تنش‌های غیرزیستی که به مرحله تجاری‌سازی رسیده‌اند، همچنان محدود است. از مهم‌ترین نمونه‌های تجاری می‌توان به ذرت DroughtGard در ایالات متحده اشاره کرد که با هدف افزایش تحمل ذرت به تنش خشکی توسعه یافته است. نمونه دیگر، محصولات HB4 شامل سویا و گندم متحمل به

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

کنترل علف‌های هرز همراه شد (Cerdeira and Duke, 2006; Duke and Powles, 2008). این فناوری در بسیاری از نظام‌های کشاورزی، مدیریت علف‌های هرز را ساده‌تر کرد و در برخی شرایط نیز امکان استفاده از روش‌های کم‌خاک‌ورزی را افزایش داد؛ با این حال، تداوم استفاده از گلیفوزیت و اتکای زیاد به یک سازوکار کنترل علف‌های هرز، در برخی مناطق به انتخاب و گسترش جمعیت‌های علف هرز مقاوم به گلیفوزیت منجر شده است (Duke and Powles, 2008; Bonny, 2016). در نتیجه، پیامدهای زیست‌محیطی محصولات مقاوم به علف‌کش را نمی‌توان صرفاً به خود ویژگی تراپیکتی نسبت داد، بلکه باید تعامل میان صفت تراپیکتی، نوع علف‌کش مورد استفاده، میزان و تکرار مصرف آن و شیوه مدیریت مزرعه را نیز در نظر گرفت. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که پیامدهای این سامانه‌ها می‌تواند در شرایط مختلف متفاوت باشد؛ به گونه‌ای که در برخی کشورها و نظام‌های تولیدی، استفاده از محصولات مقاوم به علف‌کش با کاهش برخی شاخص‌های مصرف علف‌کش همراه بوده، در حالی که در برخی شرایط دیگر، تداوم استفاده از یک یا چند علف‌کش می‌تواند به افزایش فشار انتخابی و بروز مقاومت در علف‌های هرز منجر شود (Bonny, 2016; Brookes and Barfoot, 2020). از این رو، ارزیابی پایداری محصولات تراپیکتی، به‌ویژه محصولات مقاوم به علف‌کش، باید فراتر از بررسی عملکرد و میزان تولید محصول انجام شود و پیامدهای احتمالی الگوی مصرف نهاده‌ها بر خاک، آب، تنوع زیستی و اکوسیستم‌های کشاورزی را نیز دربرگیرد. در این زمینه، مطالعات مروری درباره محصولات تراپیکتی مقاوم به علف‌کش بر اهمیت بررسی همزمان مدیریت علف‌های هرز، مصرف علف‌کش، تکامل مقاومت و پیامدهای احتمالی آن برای تنوع زیستی تأکید کرده‌اند (Schütte et al., 2017; Wang et al., 2017).

خشکی است که بر پایه استفاده از ژن *HaHB4* حاصل از آفتابگردان توسعه یافته‌اند. سویا HB4 در آرژانتین و سپس در برخی کشورهای دیگر از جمله برزیل برای کشت تجاری مجوز دریافت کرده و گندم HB4 نیز ابتدا در آرژانتین و سپس در برزیل برای کشت تجاری تأیید شده است (González et al., 2019; Qaim, 2020; Ribichich et al., 2020).

شواهد حاصل از مطالعات مزرعه‌ای نشان می‌دهد که این محصولات در شرایط کم‌آبی می‌توانند بخشی از کاهش عملکرد ناشی از تنش خشکی را جبران کنند؛ با این حال، میزان این مزیت به عواملی همچون شدت و زمان وقوع تنش، ویژگی‌های محیطی، ژنوتیپ و شیوه مدیریت مزرعه وابسته است. بنابراین، نمی‌توان محصولات تراپیکتی را به تنهایی راهکاری برای مقابله با بحران آب و تغییر اقلیم دانست، بلکه این فناوری باید در کنار مدیریت بهینه آب، اصلاح الگوی کشت و سایر راهکارهای سازگاری کشاورزی مورد ارزیابی قرار گیرد (Qaim, 2020; FAO, 2022).

با وجود دستاوردهای حاصل از توسعه و کشت محصولات تراپیکتی، از دهه ۲۰۰۰ به بعد، دامنه پژوهش‌ها به تدریج از بررسی صرف عملکرد و بهره‌وری محصولات فراتر رفت و موضوعاتی مانند اثرات زیست‌محیطی، سلامت، تنوع زیستی، الگوی مصرف نهاده‌ها و پیامدهای اقتصادی و اجتماعی نیز در ارزیابی این فناوری مورد توجه بیشتری قرار گرفت (Nicolia et al., 2014; Klümper and Qaim, 2014). یکی از موضوعات مهم در مطالعات مربوط به پیامدهای زیست‌محیطی محصولات تراپیکتی، گسترش محصولات مقاوم به علف‌کش و تغییر الگوی مصرف علف‌کش‌ها بوده است. بخش قابل توجهی از محصولات تراپیکتی تجاری‌شده، به‌ویژه در سال‌های نخست توسعه این فناوری، دارای صفت مقاومت به گلیفوزیت بودند و استفاده از این محصولات معمولاً با کاربرد گلیفوزیت برای

در کنار توسعه و کاربرد محصولات تراریخته، ایمنی زیستی به یکی از محورهای اساسی در ارزیابی و مدیریت پیامدهای احتمالی فناوری‌های زیستی تبدیل شده است. بر اساس قانون ایمنی زیستی جمهوری اسلامی ایران مصوب ۱۳۸۸، نظام ایمنی زیستی با هدف بهره‌برداری از فناوری‌های زیستی نوین و پیشگیری و مدیریت پیامدهای احتمالی آن‌ها بر محیط زیست، تنوع زیستی و سلامت انسان، دام و گیاه شکل گرفته است. در این چارچوب، ارزیابی مخاطرات زیست محیطی و حفاظت از تنوع زیستی، بخشی از فرایند ایمنی زیستی محسوب می‌شود و نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان موضوعاتی مستقل و جدا از ایمنی زیستی در نظر گرفت. قانون نیز مسئولیت بررسی و ارزیابی مخاطرات زیست محیطی موجودات زنده تغییر یافته ژنتیکی را در حوزه صلاحیت سازمان حفاظت محیط زیست قرار داده است. از این رو، ارزیابی ایمنی زیستی محصولات تراریخته صرفاً به بررسی سلامت انسان یا ویژگی‌های ژنتیکی محصول محدود نمی‌شود، بلکه پیامدهای احتمالی آن‌ها بر محیط زیست و تنوع زیستی را نیز دربرمی‌گیرد. این ارزیابی می‌تواند موضوعاتی مانند احتمال انتشار و استقرار موجود زنده تغییر یافته در محیط، انتقال ژن، اثر بر موجودات غیرهدف و تغییر در فرایندهای اکولوژیک و کشاورزی را شامل شود. بنابراین، ملاحظاتمانند تنوع زیستی، سلامت خاک، پایداری اکوسیستم‌ها و در موارد مرتبط، کیفیت منابع آب، باید در چارچوب ارزیابی مخاطرات و مدیریت ایمنی زیستی مورد توجه قرار گیرند. بر این اساس، ایمنی زیستی را می‌توان چارچوبی برای شناسایی، ارزیابی و مدیریت مخاطرات احتمالی ناشی از فناوری‌های زیستی دانست که حفاظت از محیط زیست و تنوع زیستی یکی از اجزای اصلی آن است. چنین رویکردی امکان می‌دهد پیامدهای محصولات تراریخته در ارتباط با شرایط محیطی و نظام‌های کشاورزی

بررسی شود و تصمیم‌گیری درباره تولید، رهاسازی، واردات و مصرف این محصولات بر پایه ارزیابی علمی مخاطرات و شرایط هر مورد انجام گیرد. قانون ایمنی زیستی نیز بر انجام ارزیابی مخاطرات احتمالی و اخذ مجوزهای لازم برای فعالیت‌های مرتبط با موجودات زنده تغییر یافته ژنتیکی تأکید دارد.

در سال‌های اخیر، بسیاری از کشورها نظام‌های ارزیابی ریسک، پایش پس از رهاسازی و چارچوب‌های قانونی ویژه‌ای را برای مدیریت محصولات تراریخته تدوین کرده‌اند، هرچند میزان سخت‌گیری این مقررات در کشورهای مختلف متفاوت است. رویکردهای تنظیم‌گری محصولات تراریخته در کشورها یکسان نیست و در مبانی و سازوکارهای ارزیابی و مدیریت ریسک تفاوت‌هایی دارند. در اتحادیه اروپا، اصل احتیاط در چارچوب مقررات مربوط به موجودات زنده تغییر یافته ژنتیکی مورد توجه قرار گرفته و تصمیم‌گیری بر پایه ارزیابی علمی مخاطرات، با در نظر گرفتن احتمال پیامدهای نامطلوب برای سلامت انسان و محیط زیست انجام می‌شود. در این چارچوب، متقاضی باید ایمنی محصول را نشان دهد و ارزیابی مخاطرات نیز به‌صورت موردی و بر اساس ویژگی‌های موجود زنده تغییر یافته، کاربرد آن و محیط پذیرنده انجام می‌شود (European Parliament and Council, 2001). در ایالات متحده نیز ارزیابی علمی و نظارت پیش از عرضه محصولات تراریخته انجام می‌شود، اما ساختار تنظیم‌گری آن بیشتر بر ویژگی‌ها و مخاطرات محصول و کاربرد موردنظر آن استوار است و مسئولیت ارزیابی میان نهادهای تخصصی مختلف تقسیم شده است. از این نظر، تفاوت اصلی میان دو نظام را می‌توان در چارچوب حقوقی، نحوه سازمان‌دهی فرایند ارزیابی و مدیریت ریسک و نقش اصل احتیاط در تصمیم‌گیری دانست، نه در وجود یا نبود ارزیابی علمی ایمنی.

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

با توجه به تفاوت محصولات تراریخته از نظر ژنتیکی، صفت توارثی موردنظر، شرایط محیطی و نظام مدیریتی، ارزیابی مزایا و مخاطرات آنها باید به صورت موردی و بر پایه شواهد اختصاصی هر محصول و صفت انجام شود. از این رو، در این مقاله از تعمیم نتایج میان محصولات و صفات مختلف اجتناب شده و پیامدهای احتمالی این فناوری در ارتباط با تغییر اقلیم، منابع آب و الزامات ایمنی زیستی بررسی می شود.

در مجموع، شواهد موجود نشان می دهد که برخی محصولات تراریخته، بسته به نوع محصول، صفت تغییر یافته در آنها، شرایط محیطی و نظام مدیریتی، می توانند در افزایش بهره وری، کاهش خسارات ناشی از برخی تنش های محیطی و تقویت امنیت غذایی نقش داشته باشند؛ با این حال، تحقق این مزایا به عواملی مانند کیفیت حکمرانی، مدیریت پایدار نهاده های کشاورزی، ارزیابی موردی مخاطرات و پایش مستمر پیامدهای احتمالی زیست محیطی وابسته است. از این رو، ارزیابی این فناوری، همانند سایر فناوری ها و نهاده های مورد استفاده در کشاورزی، نباید صرفاً بر افزایش تولید متمرکز باشد؛ بلکه لازم است پیامدهای احتمالی هر محصول و صفت موردنظر، با توجه به شرایط محیطی و نظام تولید، از جمله آثار آن بر منابع آب، تنوع زیستی و پایداری اکوسیستم ها، بر اساس شواهد علمی مورد بررسی قرار گیرد.

گلیفوزیت و مخاطرات زیست محیطی

در دهه های اخیر، گلیفوزیت به عنوان پرمصرف ترین علف کش جهان به یکی از عناصر کلیدی در نظام های کشاورزی مدرن، به ویژه در الگوهای کشت محصولات تراریخته مقاوم به علف کش، تبدیل شده است. توسعه این سامانه ها اگرچه با هدف ساده سازی مدیریت علف های هرز، کاهش هزینه های تولید و افزایش بهره وری

از منظر زیست محیطی، یکی از موضوعات مورد توجه پژوهش های اخیر، اثرات غیرمستقیم محصولات تراریخته بر منابع آب است. هرچند خود فناوری مهندسی ژنتیک به تنهایی عامل آلودگی منابع آب محسوب نمی شود، اما الگوی مصرف نهاده های شیمیایی، نوع مدیریت مزرعه و ساختار حکمرانی می توانند بر میزان ورود آلاینده ها به محیط های آبی تأثیر قابل توجهی داشته باشند. در سامانه های کشاورزی متکی بر محصولات مقاوم به علف کش، افزایش مصرف گلیفوزیت و انتقال آن از طریق رواناب و زه آب های کشاورزی به منابع آب، به یکی از مهم ترین دغدغه های پژوهشگران تبدیل شده است (Van Bruggen *et al.*, 2018; Mesnage *et al.*, 2019). این موضوع در شرایط تغییر اقلیم و کاهش جریان های آبی اهمیت بیشتری می یابد، زیرا کاهش ظرفیت خودپالایی اکوسیستم های آبی می تواند ماندگاری آلاینده ها و اثرات اکولوژیک آنها را افزایش دهد (UNEP, 2021).

در سال های اخیر، ادبیات علمی از دوگانه «موافق یا مخالف محصولات تراریخته» فاصله گرفته و به سمت رویکردهای مبتنی بر ارزیابی موردی، مدیریت ریسک و حکمرانی تطبیقی حرکت کرده است. در این رویکرد، محصولات تراریخته نه به عنوان فناوری هایی ذاتاً ایمن یا ذاتاً پرخطر، بلکه به عنوان فناوری هایی در نظر گرفته می شوند که پیامدهای آنها به ویژگی های ژنتیکی محصول، شرایط اقلیمی و محیطی، شیوه مدیریت کشاورزی، چارچوب های قانونی و ظرفیت های نهادی وابسته است (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016). بر این اساس، ارزیابی پایداری این فناوری باید در چارچوب سامانه های اجتماعی-بوم شناختی و با توجه به ارتباط متقابل میان امنیت غذایی، منابع آب، تنوع زیستی و تاب آوری اکوسیستم ها انجام شود.

غیرمستقیم بر زنجیره‌های غذایی آبی است (Myers *et al.*, 2016; Van Bruggen *et al.*, 2018). همچنین برخی مطالعات به اثرات بالقوه این ترکیبات بر گونه‌های غیرهدف و ارگانیسم‌های آبی اشاره کرده‌اند، هرچند شدت این اثرات به غلظت، مدت زمان مواجهه و شرایط محیطی وابسته است.

یکی از ابعاد مهم اما کمتر مورد توجه در مطالعات اولیه، نقش گلیفوزیت در تعامل با سایر عوامل تنش‌زا در محیط‌های طبیعی است. در واقع، اثرات این علف‌کش نباید به صورت مستقل از سایر فشارهای محیطی مانند تغییر اقلیم، کمبود آب، شوری خاک و آلودگی‌های ترکیبی ارزیابی شود. پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که در شرایط تنش چندگانه، پاسخ اکوسیستم‌ها به آلاینده‌های شیمیایی می‌تواند غیرخطی و تقویت‌شونده باشد (UNEP, 2021). این موضوع اهمیت رویکردهای سیستم‌محور را در ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی دوچندان می‌کند.

از منظر حکمرانی محیط‌زیست، گسترش مصرف گلیفوزیت نشان‌دهنده چالش‌های جدی در مدیریت ریسک مواد شیمیایی در کشاورزی مدرن است. در بسیاری از کشورها، سیاست‌گذاری در این حوزه به صورت بخشی و غیر یکپارچه انجام شده و ارتباط میان سیاست‌های کشاورزی، مدیریت آب و حفاظت محیط‌زیست به طور کامل برقرار نشده است. این شکاف نهادی موجب شده است که ارزیابی اثرات بلندمدت گلیفوزیت بر منابع آب و اکوسیستم‌ها با عدم قطعیت‌های قابل توجهی همراه باشد.

در ادبیات جدید، گلیفوزیت نه صرفاً به عنوان یک ماده شیمیایی، بلکه به عنوان نمادی از چالش‌های حکمرانی در نظام‌های کشاورزی صنعتی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این چارچوب، مسئله اصلی تنها «وجود یا عدم وجود خطر» نیست، بلکه

کشاورزی صورت گرفته است، اما به تدریج پیامدهای زیست‌محیطی و هیدرولوژیک آن در کانون توجه پژوهش‌های علمی قرار گرفته است (Duke and Powles, 2008; Mesnage *et al.*, 2019).

از منظر چرخه‌های محیط‌زیستی، گلیفوزیت برخلاف تصور اولیه مبنی بر تجزیه پذیری سریع، می‌تواند در شرایط مختلف خاک و اقلیم رفتار پایداری از خود نشان دهد و از طریق مسیرهای مختلف شامل رواناب سطحی، نفوذ عمقی، هکس‌های کشاورزی و فرسایش خاک وارد منابع آب سطحی و زیرزمینی شود (Van Bruggen *et al.*, 2018). این فرایند در مناطق دارای بارش‌های شدید یا مدیریت ناکارآمد اراضی کشاورزی، تشدید می‌شود و احتمال انتقال سریع‌تر این ترکیبات به رودخانه‌ها، تالاب‌ها و مخازن آب را افزایش می‌دهد.

در سال‌های اخیر، تغییر اقلیم به عنوان یک عامل تشدیدکننده در سرنوشت محیط‌زیستی گلیفوزیت مورد توجه قرار گرفته است. کاهش جریان‌های پایه رودخانه‌ها، افزایش دمای آب و کاهش ظرفیت رقیق‌سازی اکوسیستم‌های آبی موجب شده است که حتی غلظت‌های پایین‌تر از آلاینده‌ها نیز بتوانند اثرات اکولوژیک قابل توجهی ایجاد کنند (UNEP, 2021). در چنین شرایطی، پایداری نسبی آلاینده‌ها افزایش یافته و زمان ماند آن‌ها در محیط‌های آبی طولانی‌تر می‌شود، که این امر ریسک مواجهه زیستی را افزایش می‌دهد.

از منظر اکوتوکسیکولوژی، مطالعات نشان داده‌اند که گلیفوزیت و متابولیت اصلی آن، AMPA، می‌توانند اثرات قابل توجهی بر ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های آبی و خاکی داشته باشند. این اثرات شامل تغییر در ترکیب جوامع میکروبی خاک، اختلال در فرآیندهای نیتریفیکاسیون، کاهش تنوع زیستی میکروارگانیسم‌ها و اثرات

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

قرار دهد. در این چارچوب، رویکردهای جدید حکمرانی زیست محیطی بر هماهنگی میان نهادهای تخصصی، تصمیم گیری مبتنی بر شواهد، ارزیابی مستمر ریسک و امکان بازرنگری در تصمیم ها بر اساس اطلاعات جدید تأکید دارند.

این رویکرد به ویژه در مورد محصولات تراریخته اهمیت دارد؛ زیرا ارزیابی ایمنی آن ها تنها به ویژگی ژنتیکی محصول محدود نمی شود و در صورت ورود به محیط، می تواند موضوعاتی مانند اثر بر موجودات غیرهدف، انتقال ژن، تغییر در تعاملات اکولوژیک و پیامدهای احتمالی ناشی از الگوی مصرف نهادهای کشاورزی را نیز دربرگیرد. بنابراین، حکمرانی ایمنی زیستی باید میان نوآوری فناوریانه، مدیریت ریسک، حفاظت از محیط زیست و منافع اقتصادی و اجتماعی توازن برقرار کند و تصمیم گیری درباره هر محصول را بر اساس ویژگی های همان محصول، محیط دریافت کننده و شواهد علمی موجود انجام دهد.

در سطح جهانی، رویکرد کشورها به محصولات تراریخته و علف کش های مرتبط با آن، به طور قابل توجهی ناهمگن است. این ناهمگونی بیش از آنکه ناشی از اختلاف صرفاً علمی باشد، بازتابی از تفاوت در اولویت های توسعه ای، ظرفیت های نهادی، ساختار نظام های کشاورزی و حساسیت های اجتماعی-زیست محیطی است. برای مثال، ایالات متحده و برزیل با اتخاذ رویکردی مبتنی بر ارزیابی «ویژگی محصول» (product-based regulation)، توسعه گسترده محصولات تراریخته را با تمرکز بر ارزیابی ریسک موردی دنبال کرده اند، در حالی که اتحادیه اروپا رویکرد «فرایندمحور» و مبتنی بر اصل احتیاط را اتخاذ کرده است که منجر به محدودیت های شدیدتر در کشت و واردات این محصولات شده است (EEA, 2023).

در کشورهای در حال توسعه، سیاست گذاری در حوزه محصولات تراریخته اغلب در نقطه تعادل

نحوه مدیریت مصرف، پایش زیست محیطی، طراحی سیاست های کاهش ریسک و ادغام آن در چارچوب های نکسوس آب-غذا-ایمنی زیستی است (Folke et al., 2021; Rockström et al., 2023).

در مجموع، شواهد علمی نشان می دهد که مخاطرات زیست محیطی گلیفوزیت حاصل تعامل پیچیده میان ویژگی های شیمیایی این ترکیب، الگوهای مصرف کشاورزی، شرایط اقلیمی و ساختارهای حکمرانی است. بنابراین، ارزیابی اثرات آن بر منابع آب و اکوسیستم های طبیعی نیازمند رویکردی یکپارچه و چندسطحی است که بتواند همزمان ابعاد زیست محیطی، هیدرولوژیک و نهادی را در نظر بگیرد. این موضوع، اهمیت ادغام سیاست های مدیریت منابع آب و نظام های ایمنی زیستی را در چارچوب توسعه پایدار برجسته می سازد.

حکمرانی ایمنی زیستی و سیاست گذاری محصولات تراریخته

حکمرانی ایمنی زیستی در حوزه محصولات تراریخته و پیامدهای احتمالی مرتبط با استفاده از آن ها، از موضوعات پیچیده در سیاست گذاری محیط زیست و کشاورزی است. این پیچیدگی از آنجا ناشی می شود که تصمیم گیری درباره تولید، رهاسازی، مصرف و پایش محصولات تراریخته، همزمان نیازمند توجه به شواهد علمی، ایمنی غذایی، حفاظت از تنوع زیستی، آثار احتمالی بر اکوسیستم ها، منافع اقتصادی و الزامات امنیت غذایی است. از این رو، ارزیابی و مدیریت این محصولات نمی تواند صرفاً بر بررسی یک پیامد یا یک مرحله از چرخه تولید و مصرف متمرکز باشد، بلکه باید مجموعه ای از مخاطرات و پیامدهای احتمالی را در مراحل مختلف، از ارزیابی پیش از رهاسازی تا پایش پس از تجاری سازی، مورد توجه

منابع آب تجدیدپذیر) تحت فشار جدی قرار داده است (UN-Water, 2023).

در چنین شرایطی، سیاست‌گذاری درباره فناوری‌های نوین کشاورزی، از جمله محصولات تراریخته، باید علاوه بر ارزیابی ایمنی زیستی، در ارتباط با شرایط اقلیمی و وضعیت منابع آب کشور نیز مورد توجه قرار گیرد. اهمیت این موضوع در ایران، با توجه به محدودیت منابع آب، وابستگی بخش کشاورزی به منابع آب و تشدید فشارهای ناشی از تغییر اقلیم، بیشتر است. از این منظر، ارزیابی محصولات تراریخته نباید صرفاً به بررسی ایمنی غذایی و پیامدهای احتمالی زیست‌محیطی محدود شود، بلکه در صورت وجود ارتباط مستقیم با الگوی مصرف نهاده‌ها و منابع، پیامدهای احتمالی آن‌ها برای مصرف آب، کیفیت منابع آب و پایداری نظام‌های کشاورزی نیز باید در چارچوب ارزیابی‌های محیط‌زیستی و سیاست‌گذاری منابع آب مورد توجه قرار گیرد.

از منظر نهادی، قانون ایمنی زیستی جمهوری اسلامی ایران (مصوب ۱۳۸۸) چارچوب حقوقی اولیه برای مدیریت موجودات زنده تغییر یافته ژنتیکی را فراهم کرده است. با این حال، مطالعات سیاست‌گذاری نشان می‌دهند که اجرای مؤثر این قانون با چالش‌هایی از جمله ضعف در نظام پایش پس از رهاسازی، کمبود داده‌های بلندمدت محیطی، نبود هماهنگی میان نهادهای بخشی و محدودیت ظرفیت آزمایشگاهی و پژوهشی مواجه است. این محدودیت‌ها موجب شده است که ارزیابی ریسک در بسیاری از موارد به صورت موردی و غیرسیستماتیک انجام شود.

علاوه بر این، روندهای نگران‌کننده‌ای مانند افت مستمر آبخوان‌ها، فرونشست زمین در دشت‌های مهم کشاورزی و کاهش جریان رودخانه‌های دائمی، نشان‌دهنده فشار شدید بر منابع آب کشور است. این شرایط، ضرورت بازنگری در سیاست‌های

میان ضرورت افزایش تولید غذا و محدودیت‌های نهادی در ارزیابی ریسک قرار دارد. در این کشورها، فشار ناشی از رشد جمعیت، تغییر اقلیم و محدودیت منابع آب موجب شده است که فناوری‌های زیستی به عنوان ابزارهای بالقوه افزایش بهره‌وری مورد توجه قرار گیرند، هرچند زیرساخت‌های پایش زیست‌محیطی و ظرفیت‌های نظارتی معمولاً به اندازه کافی توسعه یافته نیستند (FAO, 2022). این شکاف نهادی، یکی از عوامل اصلی ایجاد عدم قطعیت در ارزیابی پیامدهای بلندمدت محصولات تراریخته و مصرف گسترده علف‌کش‌ها محسوب می‌شود.

در این میان، گلیفوزیت به عنوان یکی از عناصر کلیدی در نظام‌های کشاورزی مبتنی بر محصولات مقاوم به علف‌کش، به نقطه اتصال میان سیاست‌های کشاورزی، مدیریت منابع آب و حکمرانی ایمنی زیستی تبدیل شده است. افزایش مصرف این علف‌کش در برخی کشورها، در کنار ضعف نظام‌های پایش محیطی، نگرانی‌هایی در خصوص آلودگی منابع آب و اثرات تجمعی آن در اکوسیستم‌های آبی ایجاد کرده است (Van Bruggen *et al.*, 2018). از این منظر، سیاست‌گذاری در حوزه محصولات تراریخته را نمی‌توان مستقل از سیاست‌های مدیریت مواد شیمیایی و حکمرانی منابع آب تحلیل کرد.

وضعیت ایران و چالش‌های حکمرانی ایمنی زیستی

در ایران، مسئله حکمرانی ایمنی زیستی در بستر بحران شدید منابع آب و فشارهای اقلیمی اهمیت دوچندانی یافته است. کشور با روندی پایدار از کاهش بارندگی، افزایش تبخیر، افت سطح آب‌های زیرزمینی و تشدید خشکسالی‌های متوالی مواجه است که این وضعیت، بخش کشاورزی را به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب (بیش از ۸۰ درصد

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

توسعه فناوری‌های کشاورزی را برجسته می‌سازد، به گونه‌ای که ملاحظات آبی به عنوان یک مؤلفه کلیدی در ارزیابی ایمنی زیستی ادغام شوند.

در سطح تطبیقی، مقایسه سیاست‌های کشورها نشان می‌دهد که مسیر حکمرانی ایمنی زیستی به طور فزاینده‌ای به سمت ادغام ملاحظات اقلیمی و منابع آب در حال حرکت است. در حالی که کشورهای توسعه یافته تمرکز بیشتری بر نظام‌های پایش پیشرفته و ارزیابی‌های زیست محیطی چندلایه دارند، بسیاری از کشورهای در حال توسعه همچنان در مرحله تقویت زیرساخت‌های نظارتی قرار دارند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که حکمرانی ایمنی زیستی یک فرآیند ایستا نیست،

بلکه تحت تأثیر مستقیم ظرفیت نهادی و فشارهای محیطی در حال تحول است (FAO, 2022).

در مجموع، تحلیل سیاست‌های جهانی نشان می‌دهد که مدیریت پایدار محصولات تراریخته و علف‌کش‌های مرتبط با آن، نیازمند گذار از رویکردهای بخشی به سمت چارچوب‌های یکپارچه حکمرانی است که بتواند همزمان امنیت غذایی، حفاظت از منابع آب و کاهش ریسک‌های زیست محیطی را تضمین کند. این موضوع، ضرورت توسعه رویکردهای نکسوسی و تقویت هماهنگی بین سیاست‌های آب، کشاورزی و ایمنی زیستی را بیش از پیش برجسته می‌سازد. در جدول شماره ۱ رویکرد تعدادی از کشورها در زمینه محصولات تراریخته و گلیفوزیت، با هم مقایسه شده است.

جدول ۱. مقایسه رویکرد کشورهای منتخب در زمینه محصولات تراریخته و گلیفوزیت

کشور	وضعیت محصولات تراریخته	سیاست گلیفوزیت	ملاحظات منابع آب
آمریکا	گسترده	مجاز	پایش منطقه‌ای
برزیل	گسترده	مجاز	کنترل آلودگی کشاورزی
هند	محدود	مجاز با محدودیت	نگرانی منابع آب
اتحادیه اروپا	محدود	محدودیت‌های متعدد	حفاظت شدید آب
ایران	محدود	تحت نظارت	نیازمند تقویت پایش

این جدول به صورت تطبیقی، رویکرد برخی کشورها را در زمینه سیاست‌های مرتبط با محصولات تراریخته، استفاده از گلیفوزیت و ملاحظات مدیریت منابع آب نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که کشورهای مختلف بر اساس شرایط اقتصادی، زیست محیطی، ظرفیت‌های نهادی و چارچوب‌های قانونی خود، سیاست‌های متفاوتی در قبال فناوری‌های زیستی و مصرف علف‌کش‌های مبتنی بر گلیفوزیت اتخاذ کرده‌اند. در حالی که برخی کشورها مانند ایالات متحده و برزیل رویکردی نسبتاً بازتر نسبت به توسعه محصولات تراریخته دارند، اتحادیه اروپا

سیاست‌های احتیاطی سخت‌گیرانه تری را دنبال می‌کند. همچنین، با تشدید بحران آب و تغییر اقلیم، توجه به آثار احتمالی این فناوری‌ها بر کیفیت و کمیت منابع آب به یکی از محورهای مهم سیاست‌گذاری زیست محیطی در بسیاری از کشورها تبدیل شده است (Van Bruggen *et al.*, 2018; FAO, 2022; EEA, 2023; UN-Water, 2023).

پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی

در دهه‌های اخیر، پیچیدگی مسائل مربوط به منابع طبیعی و توسعه پایدار موجب شده است که

که هر بخش بدون توجه به پیامدهای تصمیم‌های خود بر سایر بخش‌ها سیاست‌گذاری کند، احتمال ایجاد تعارض میان اهداف و افزایش هزینه‌های محیط‌زیستی بیشتر می‌شود. از این رو، هماهنگی نهادی و استفاده از اطلاعات مشترک می‌تواند به تصمیم‌گیری مؤثرتر درباره فناوری‌های کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی کمک کند.

در مورد محصولات تراریخته نیز بررسی آثار احتمالی فناوری نباید صرفاً به یک ویژگی مانند عملکرد محصول یا مقاومت به یک آفت محدود شود. برای مثال، اگر یک محصول تراریخته موجب تغییر در میزان مصرف علف‌کش یا سایر نهاده‌ها شود، این تغییر می‌تواند پیامدهایی برای خاک و منابع آب داشته باشد. بنابراین، ارزیابی محصول، شیوه مدیریت مزرعه و شرایط محیطی باید در کنار یکدیگر مورد توجه قرار گیرند. البته این ارتباط به ویژگی هر محصول و نحوه استفاده از آن وابسته است و نمی‌توان درباره همه محصولات تراریخته یک حکم واحد صادر کرد.

در مجموع، رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی-محیط‌زیست می‌تواند چارچوب مناسبی برای بررسی ارتباط میان مدیریت منابع آب، تولید کشاورزی و حفاظت از محیط‌زیست فراهم کند. در این چارچوب، محصولات تراریخته نیز به‌عنوان یکی از فناوری‌های مورد استفاده در کشاورزی، باید بر اساس ویژگی‌های مشخص هر محصول، شرایط اقلیمی و شیوه مدیریت آن ارزیابی شوند. چنین نگاهی می‌تواند از تصمیم‌گیری‌های صرفاً بخشی‌جلوگیری کرده و زمینه را برای سیاست‌گذاری هماهنگ‌تر در حوزه کشاورزی، منابع آب و محیط‌زیست فراهم سازد.

چارچوب پیشنهادی پیوند آب-غذا-ایمنی زیستی

در پاسخ به پیچیدگی‌های فزاینده ناشی از تغییر اقلیم، بحران منابع آب و گسترش فناوری‌های

رویکردهای بخشی به‌تدریج جای خود را به رویکردهای یکپارچه‌تر بدهند. یکی از چارچوب‌های مهم در این زمینه، رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی-محیط‌زیست (Nexus Approach) است که بر تعامل میان منابع طبیعی و فعالیت‌های انسانی تأکید دارد (Hoff, 2011; Un-Water, 2023). بر اساس این رویکرد، تصمیم‌گیری در یک بخش می‌تواند پیامدهایی برای بخش‌های دیگر داشته باشد؛ برای مثال، تغییر در الگوی تولید کشاورزی می‌تواند بر میزان مصرف آب، استفاده از نهاده‌ها و وضعیت محیط‌زیست اثر بگذارد.

در بخش کشاورزی، ارتباط میان آب و غذا اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا افزایش تولید محصولات کشاورزی به منابع آب، خاک و نهاده‌های تولید وابسته است. از سوی دیگر، محدودیت منابع آب و تغییرات اقلیمی می‌تواند انتخاب محصولات، شیوه‌های مدیریت مزرعه و میزان استفاده از نهاده‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، ارزیابی فناوری‌های جدید کشاورزی، از جمله محصولات تراریخته، بهتر است در ارتباط با شرایط منابع آب، الگوی تولید و پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها انجام شود (FAO, 2022).

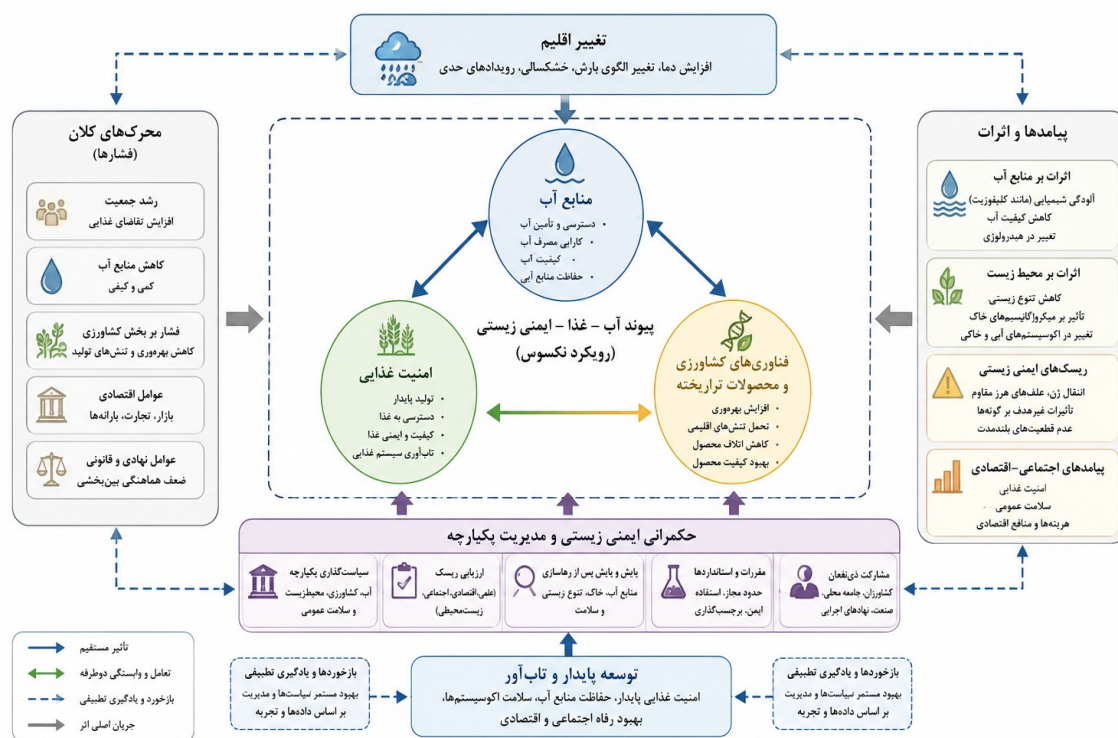
رویکرد سامانه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی (Social-Ecological Systems) نیز مکمل این دیدگاه است. این رویکرد، جامعه و محیط‌زیست را اجزای مرتبط یک سامانه می‌داند و بر اهمیت تاب‌آوری آن‌ها در برابر تغییرات و فشارهای محیطی تأکید می‌کند (Folke *et al.*, 2021). از این منظر، تغییر اقلیم می‌تواند همزمان بر منابع آب، تولید کشاورزی و وضعیت اکوسیستم‌ها اثر بگذارد و ضرورت هماهنگی میان سیاست‌های مرتبط با این حوزه‌ها را افزایش دهد.

یکی از چالش‌های مهم در اجرای چنین رویکردی، عدم هماهنگی میان نهادهای مسئول آب، کشاورزی، محیط‌زیست و سلامت است. هنگامی

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

در شرایط فشارهای محیط زیستی فزاینده است. در شکل ۱ چارچوب پیشنهادی برای پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی ارائه شده است.

زیستی در کشاورزی، این پژوهش یک چارچوب مفهومی یکپارچه با عنوان «پیوند آب-غذا-ایمنی زیستی» ارائه می‌کند. هدف این چارچوب، تبیین روابط چندسطحی و دوسویه میان منابع آب، امنیت غذایی و نظام‌های حکمرانی ایمنی زیستی



شکل ۱. چارچوب پیشنهادی پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی (طراحی و ترسیم توسط نویسندگان بر اساس ادبیات نکسوس آب-غذا-انرژی و ایمنی (Hoff, 2011; Folke et al., 2021; FAO, 2022; UN-Water, 2023; Rockström et al., 2023)).

تولید و ارتقای امنیت غذایی است (Qaim, 2020; FAO, 2022).

با این حال، در این چارچوب مفهومی تأکید می‌شود که فناوری‌های زیستی نه تنها پیامدهای مثبت بالقوه دارند، بلکه می‌توانند از طریق تغییر الگوهای مصرف نهاده‌ها، به‌ویژه علف‌کش‌ها، و تغییر ساختار مدیریت مزرعه، اثرات غیرمستقیم قابل توجهی بر کیفیت منابع آب و پایداری اکوسیستم‌ها داشته باشند. به‌ویژه در سامانه‌های کشاورزی مبتنی بر محصولات مقاوم به علف‌کش،

در این چارچوب، تغییر اقلیم به‌عنوان نیروی محرک اصلی عمل می‌کند که از طریق افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، تشدید خشکسالی‌ها و افزایش رویدادهای حدی، موجب کاهش دسترسی به منابع آب تجدیدپذیر و افزایش ناپایداری در تولیدات کشاورزی می‌شود (IPCC, 2023; UN-Water, 2023). فشارها، نظام‌های کشاورزی را به سمت پذیرش فناوری‌های نوین از جمله محصولات تراریخته و سایر نوآوری‌های زیستی سوق می‌دهد که هدف آن‌ها افزایش بهره‌وری، کاهش ریسک

روابط میان این سه مؤلفه، ماهیتی خطی و ساده ندارند، بلکه در قالب حلقه‌های بازخوردی پیچیده عمل می‌کنند. برای مثال، کاهش منابع آب می‌تواند موجب افزایش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی برای حفظ عملکرد شود، که این امر خود می‌تواند فشار بیشتری بر منابع آب و کیفیت محیط زیست وارد کند. چنین روابطی نشان می‌دهد که سیستم مورد مطالعه یک سامانه پیچیده تطبیقی (Complex Adaptive System) است که در آن پیامدها غیرخطی و وابسته به زمینه هستند (Folke et al., 2021; Rockström et al., 2023).

در سطح سیاست‌گذاری، این چارچوب بر ضرورت گذار از مدیریت بخشی به حکمرانی یکپارچه تأکید دارد. در چنین رویکردی، سیاست‌های کشاورزی، مدیریت منابع آب و ایمنی زیستی نباید به صورت مستقل طراحی شوند، بلکه باید در قالب یک نظام هماهنگ و چندسطحی مورد ارزیابی قرار گیرند. این امر مستلزم تقویت هماهنگی نهادی میان بخش‌های آب، کشاورزی، محیط زیست و سلامت عمومی و همچنین توسعه نظام‌های داده‌محور برای پایش همزمان پیامدهای زیست‌محیطی و کشاورزی است (UNEP, 2021; FAO, 2022).

در مجموع، چارچوب پیشنهادی این پژوهش تلاش می‌کند تا با ترکیب رویکرد نکسوس و نظریه سامانه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی، یک مدل مفهومی یکپارچه برای تحلیل تعامل میان امنیت غذایی، منابع آب و ایمنی زیستی ارائه دهد. این چارچوب نه تنها به تبیین روابط علی میان متغیرها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی سیاست‌های پایدار در حوزه کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی در عصر تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد.

احتمال افزایش ورود آلاینده‌هایی مانند گلیفوزیت به چرخه‌های هیدرولوژیک وجود دارد که این امر در شرایط کاهش جریان‌های آبی ناشی از تغییر اقلیم، می‌تواند شدت اثرات زیست‌محیطی را افزایش دهد (Van Bruggen et al., 2018; Mesnage et al., 2019).

در این چارچوب، حکمرانی ایمنی زیستی از طریق قواعد، ارزیابی خطر، صدور مجوز و نظارت بر کاربرد فناوری‌های زیستی، نقش مهمی در هماهنگ کردن توسعه این فناوری‌ها با الزامات حفاظت از محیط زیست و سلامت عمومی دارد. از این منظر، تصمیم‌گیری درباره محصولات تراریخته باید بر پایه شواهد علمی و با توجه به شرایط محیطی و پیامدهای احتمالی هر محصول انجام شود. این لایه شامل مجموعه‌ای از ابزارها از جمله ارزیابی ریسک، پایش پس از رهاسازی، سیاست‌های احتیاطی، استانداردهای زیست‌محیطی و سازوکارهای هماهنگی نهادی است. ضعف یا ناکارآمدی این لایه می‌تواند منجر به تشدید اثرات منفی بر منابع آب و افزایش فشار بر اکوسیستم‌ها شود.

از منظر ساختاری، این چارچوب مبتنی بر تعامل سه مؤلفه اصلی است:

۱. محرک‌های کلان (Macro Drivers): تغییر اقلیم، رشد جمعیت، فشار بر منابع آب و افزایش تقاضای غذایی

۲. پاسخ‌های فناورانه (Technological Responses): توسعه و گسترش محصولات تراریخته، اصلاح نباتات پیشرفته و کاربرد نهاده‌های شیمیایی

۳. پیامدهای سیستمی (Systemic Impacts): تغییر در کیفیت و کمیت منابع آب، اثرات بر تنوع زیستی، و تغییر در تاب‌آوری اکوسیستم‌ها.

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

نتیجه‌گیری

این مطالعه با رویکرد مروری-تحلیلی تلاش کرد تعامل میان تغییر اقلیم، بحران منابع آب، امنیت غذایی و حکمرانی ایمنی زیستی در بستر توسعه محصولات تراریخته را در قالب یک چارچوب مفهومی یکپارچه بررسی کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که فشارهای ناشی از تغییر اقلیم، از جمله افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و تشدید خشکسالی‌ها، به‌طور مستقیم بر کاهش دسترسی به منابع آب و ناپایداری تولیدات کشاورزی اثرگذار است (IPCC, 2023; UN-Water, 2023). در چنین شرایطی، فناوری‌های زیستی به‌ویژه محصولات تراریخته به‌عنوان یکی از گزینه‌های مهم برای افزایش بهره‌وری و ارتقای تاب‌آوری نظام‌های کشاورزی مطرح شده‌اند (Qaim, 2020; FAO, 2022).

با این حال، شواهد علمی نشان می‌دهد که اثرات این فناوری‌ها صرفاً به افزایش تولید محدود نمی‌شود، بلکه پیامدهای غیرمستقیم آن‌ها بر منابع آب، کیفیت خاک و تنوع زیستی باید در چارچوبی گسترده‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد. به‌ویژه در سامانه‌های کشاورزی وابسته به علف‌کش‌هایی مانند گلیفوزیت، احتمال تشدید آلودگی‌های غیرنقطه‌ای منابع آب و تغییر در ساختار اکوسیستم‌های آبی وجود دارد (Van Bruggen et al., 2018; Mesnage et al., 2019). از این منظر، مسئله اصلی نه صرفاً «کارایی فناوری»، بلکه «نحوه حکمرانی و مدیریت ریسک» آن در بستر شرایط اقلیمی و نهادی است.

یافته‌های این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که رویکردهای بخشی و غیر یکپارچه در مدیریت آب، کشاورزی و ایمنی زیستی، توانایی کافی برای پاسخ به چالش‌های پیچیده و درهم‌تنیده کنونی را ندارند. در مقابل، چارچوب‌های مبتنی بر نکسوس و سامانه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی می‌توانند با ایجاد پیوند میان سیاست‌های بخشی، زمینه‌ساز

مدیریت پایدارتر منابع طبیعی شوند (Folke et al., 2021; Rockström et al., 2023).

در این چارچوب‌ها، تاب‌آوری سیستم به‌عنوان یک هدف کلیدی مطرح بوده و تصمیم‌گیری‌ها بر اساس تعامل میان منابع آب، تولید غذا و پیامدهای زیست‌محیطی انجام می‌شود.

در مجموع، این مطالعه تأکید می‌کند که دستیابی به توسعه پایدار در بخش کشاورزی مستلزم گذار از فناوری‌محوری صرف به سمت حکمرانی یکپارچه و مبتنی بر ریسک است. چنین گذری نیازمند تقویت ظرفیت‌های نهادی، توسعه نظام‌های پایش محیطی و ارتقای هماهنگی بین‌بخشی در سطح ملی و فراملی است.

پیشنهاد‌های سیاستی

در راستای یافته‌های این مطالعه، مجموعه‌ای از پیشنهاد‌های سیاستی به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. استقرار نظام ملی پایش آلاینده‌های مرتبط با علف‌کش‌ها (به‌ویژه گلیفوزیت) در منابع آب سطحی و زیرزمینی با رویکرد پایش بلندمدت و داده‌محور

۲. توسعه چارچوب‌های ارزیابی ریسک یکپارچه مبتنی بر رویکرد «آب‌محور» برای فناوری‌های زیستی و محصولات تراریخته

۳. تقویت حکمرانی چندسطحی از طریق افزایش هماهنگی نهادی میان وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی، وزارت بهداشت و سازمان حفاظت محیط‌زیست

۴. ایجاد و توسعه بانک‌های اطلاعاتی ملی و سامانه‌های پایش یکپارچه برای رصد اثرات زیست‌محیطی محصولات تراریخته و نهاده‌های شیمیایی مرتبط

۵. ارتقای ظرفیت‌های علمی، آزمایشگاهی و انسانی در حوزه ایمنی زیستی و ارزیابی اثرات اکولوژیک بلندمدت فناوری‌های نوین کشاورزی
۶. ادغام اصول نکسوس آب-غذا-ایمنی زیستی در سیاست‌گذاری ملی توسعه کشاورزی و مدیریت منابع آب برای افزایش تاب‌آوری در برابر تغییر اقلیم

منابع

- Bonny S. (2016) Genetically modified herbicide-tolerant crops, weeds, and herbicides: Overview and impact. *Environmental Management*. 57(1): 31–48. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0589-7>.
- Brookes G, Barfoot P. (2020) Environmental impacts of genetically modified crop use 1996–2018: Impacts on pesticide use and carbon emissions. *GM Crops & Food*. 11(4): 215–241. <https://doi.org/10.1080/21645698.2020.1773198>.
- Cerdeira AL, Duke SO. (2006) The current status and environmental impacts of glyphosate-resistant crops: A review. *Journal of Environmental Quality*. 35(5): 1633–1658. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0378>.
- Duke SO, Powles SB. (2008) Glyphosate-resistant weeds and crops. *Pest Management Science*. 64(4): 317–318. <https://doi.org/10.1002/ps.1561>.
- EEA (European Environment Agency). (2023) Water and agriculture: Towards sustainable solutions. EEA Report 17/2020. Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/water-and-agriculture-towards-sustainable-solutions>.
- European Parliament and Council. (2001) Directive 2001/18/EC on the deliberate release into the environment of genetically modified organisms.
- Famiglietti JS. (2014) The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*. 4: 945–948. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2022) The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>.
- Folke C, Polasky S, Rockström J, Galaz V, Westley F, Lamont M, Österblom H. (2021) Our future in the Anthropocene biosphere. *Ambio*. 50: 834–869. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01544-8>.
- González FG, Capella M, Ribichich KF, Curín F, Giacomelli JI, Ayala F, Chan RL. (2019) Field-grown transgenic wheat expressing the sunflower gene *HaHB4* significantly outyields the wild type. *Journal of Experimental Botany*. 70(5): 1669–1681. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz037>.
- Hoff H. (2011) Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. *Stockholm Environment Institute*. <https://www.sei.org/publications/understanding-the-nexus/>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023) Climate change 2023: Synthesis report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- James C. (2019) Global status of commercialized biotech/GM crops: 2019. ISAAA Brief No. 55. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA).
- Klümper W, Qaim M. (2014) A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *PLoS ONE*. 9(11): e111629. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>.
- Madani K. (2014) Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*. 4: 315–328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>.
- Maggi F, la Cecilia D, Tang FHM, McBratney A. (2020) The global environmental hazard of glyphosate use. *Science of the Total Environment*. 717: 137167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137167>.

"نادیا بابایی، پیوند آب، غذا و ایمنی زیستی در عصر تغییر اقلیم: چارچوبی برای حکمرانی پایدار ..."

- Mesnage R, Benbrook C, Antoniou MN. (2019) Insight into the confusion over surfactant co-formulants in glyphosate-based herbicides. *Food and Chemical Toxicology*. 128: 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.03.053>.
- Myers JP, Antoniou MN, Blumberg B, Carroll L, Colborn T, Everett LG, Vandenberg LN. (2016) Concerns over use of glyphosate-based herbicides and risks associated with exposures: A consensus statement. *Environmental Health*. 15(1): 19. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0117-0>.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016) Genetically engineered crops: Experiences and prospects. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23395>.
- Nicolia A, Manzo A, Veronesi F, Rosellini D. (2014) An overview of the last 10 years of genetically engineered crop safety research. *Critical Reviews in Biotechnology*. 34(1): 77–88. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.823595>.
- Qaim M. (2020) Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. *Applied Economic Perspectives and Policy*. 42(2): 129–150. <https://doi.org/10.1002/aep.13044>.
- Ribichich KF, Chiozza M, Ávalos-Britez S, Cabello JV, Arce AL, Watson G, Arias C, Portapila M, Trucco F, Otegui ME, Chan RL. (2020) Successful field performance in warm and dry environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HB4. *Journal of Experimental Botany*. 71(10): 3142–3156. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa064>.
- Richards BK, Pacenka S, Meyer MT, Dietze JE, Steenhuis TS. (2018) Antecedent and post-application rain events trigger glyphosate transport from runoff-prone soils. *Environmental Science & Technology Letters*. 5(5): 249–254. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00085>.
- Rockström J, Gupta J, Qin D, Lade SJ, Abrams JF, Andersen LS, Winkelmann R. (2023) Safe and just Earth system boundaries. *Nature*. 619(7968): 102–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>.
- Schütte G, Eckerstorfer M, Rastelli V, Reichenbecher W, Restrepo-Vassalli S, Ruohonen-Lehto M, Wuest Saucy AG, Mertens M. (2017) Herbicide resistance and biodiversity: Agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environmental Sciences Europe*. 29: 5. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0100-y>.
- Singh S, Kumar V, Datta S, Wani AB, Dhanjal DS, Romero R, Singh J. (2020) Glyphosate uptake, translocation, resistance emergence in crops, analytical monitoring, toxicity and degradation: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 18(3): 663–702. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00969-z>.
- Tester M, Langridge P. (2010) Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*. 327(5967): 818–822. <https://doi.org/10.1126/science.1183700>.
- UNEP (United Nations Environment Programme). (2021) Making peace with nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.
- UN-Water (United Nations World Water Development Report). (2023) Partnerships and cooperation for water. UNESCO/UN-Water. <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2023>.
- Van Bruggen AHC, He MM, Shin K, Mai V, Jeong KC, Finckh MR, Morris JG. (2018) Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Science of the Total Environment*. 616–617: 255–268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.309>.
- Wang WZ, Yang BP, Feng XY, Cao ZY, Feng CL, Wang JG, Xiong GR, Shen LB, Zeng J, Zhao TT, Zhang SZ. (2017) Development and characterization of transgenic sugarcane with insect resistance and herbicide tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1535. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01535>.

Water–Food–Biosafety Nexus in the Era of Climate Change: A Framework for Sustainable Governance of Genetically Modified Crops and Water Resources Management

Nadia Babaei

Secretariat of National Biosafety Council of Iran, Department of Environment, Tehran, Iran

nbabaei140404@gmail.com

Abstract

In the context of intensifying climate change, increasing water stress, and growing global food demand, this article examines the role of emerging agricultural technologies, with a particular focus on genetically modified (GM) crops, and their implications for food security, water resources, and biosafety. The study aims to critically review and analyze the interconnections among water, food, and biosafety and to clarify the role of governance in managing the opportunities and potential risks associated with biotechnology under changing climatic conditions. The research method is based on reviewing studies from the past three decades and examining the evolution of approaches toward the interconnectedness of water, food, and biosafety. The findings indicate that the effects of GM crops on food security and water resources depend on the specific crop and trait, as well as on governance quality, risk assessment frameworks, patterns of agricultural chemical use, management practices, and climatic conditions. Accordingly, integrated governance, strengthened environmental monitoring, watershed-scale risk assessment, and greater policy coherence among the water, agriculture, and biosafety sectors are essential. These measures are important for the sustainable use of biotechnology and for achieving food security while safeguarding water resources and ecological integrity. The novelty of this article lies in proposing a conceptual Water–Food–Biosafety Nexus framework to support integrated decision-making for the governance of agricultural biotechnology under climate change.

Keywords: Food security, Biosafety, Environmental governance, Glyphosate