نمایه

فناوری کریسپر و کاربرد آن در صنایع غذایی.

احسان یزدان‌پناه، شاهین اقبال سعیدی ابواسحاقی و مرتضی خمیری..... ۱

کاهش تدریجی مصرف آب کشاورزی گامی مؤثر در سازگاری با کمبود آب در ایران.

شاهرخ زندپارسا، شهره دیداری و علیرضا سپاس‌خواه..... ۱۹

چالش‌های محیط زیستی فراروی جنگل‌های زاگرس.

احمد حسینی..... ۳۵

مروری کوتاه بر فناوری‌های نوین در زمینه سنجش و مدیریت بیماری‌های ویروسی و شبه ویروسی گیاهان ۱ – سنجش.

کرامت‌اله ایزدپناه..... ۵۱

مروری بر فناوری‌های نوین بوم‌سازگار در کشاورزی هوشمند.

یوسف عباسپور گیلانده و سید سعید محتسبی..... ۶۵

اهمیت پروبیوتیک‌های گیاهی در کشاورزی پایدار: چالش‌ها و راهکارها.

ساره هاشمی و مسعود احمدزاده..... ۷۷

پیوست‌ها

اعتبارسنجی مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۹۱

بیانیه‌های همایش‌های برگزار شده در گروه علوم کشاورزی..... ۹۷

ناشر: فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

شاپای چاپی: ۲۴۲۳-۴۷۴۵ شاپای الکترونیکی: ۱۹۴۵-۲۹۸۱ شناسه دیجیتال (DOI) ۱۰.۲۲۰۴۷/srjasnr

راهنمای نویسندگان

مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی

مجله پژوهش‌های راهبردی علوم کشاورزی و منابع طبیعی مقاله‌های زیر را منتشر می‌کند: **(الف)** یافته‌های پژوهش‌های راهبردی کلان کشور در زمینه‌های علوم کشاورزی و منابع طبیعی، **(ب)** مقاله‌های واکاوی یا رهیافتی درباره یکی از چالش‌های کلی علوم کشاورزی و منابع طبیعی کشور، **(پ)** مقاله‌های دعوتی از صاحبنظران درباره چالش‌ها و دشواری‌های مهم کشور یا موضوعی ویژه، در زمینه‌های علوم کشاورزی و منابع طبیعی.

طرح کلی مقاله‌ها

لازم است نویسندگان مقاله‌ها استانداردهای زیر را رعایت کنند: هر مقاله باید به صورت اینترنتی با **نرم افزار Office 2007 یا بالاتر در Windows XP** یا **Windows 7** در فارسی با قلم BNazanin ۱۲ و در انگلیسی با قلم Times New Roman ۱۰ و با فاصله خطها ۱/۱۵ تهیه و به نشانی **http://srj.asnr.ias.ac.ir** ارسال شود.

در نگارش مقاله‌ها توصیه می‌شود که تا حد امکان از به کار بردن واژه‌های بیگانه پرهیز شده، نام‌ها و واژه‌های علمی، مواد و سایر اصطلاح‌های خارجی، همچنین معادل واژه‌های جدید فارسی، با گذاشتن شماره در بالا و سمت چپ این واژه‌ها، خواننده به زیرنویس همان صفحه که در آن‌جا واژه مورد نظر نوشته شده است، هدایت شود. به کارگیری واژه‌های مصوب **فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران** که در **فرهنگ‌های نوین کشاورزی و منابع طبیعی** برای هر رشته کشاورزی و منابع طبیعی آمده‌اند، ضروری است. بخش‌های مختلف مقاله‌های پژوهشی باید به صورت زیر، تهیه شوند و در مورد مقاله‌های مروری یا واکاوی، باید تا حد ممکن، به این تقسیم‌بندی توجه شود:

۱- شناسه مقاله

لازم است به همراه هر مقاله یک صفحه که در برگیرنده عنوان مقاله، نام و نام‌خانوادگی و مرتبه علمی نویسنده یا نویسندگان مقاله، نام و نشانی مؤسسه‌ای که نویسنده یا نویسندگان در آن‌جا اشتغال دارند و نام محلی که پژوهش مورد نظر در آن‌جا صورت گرفته است، همراه با شماره تلفن و پست الکترونیکی ارسال گردد.

۲- عنوان مقاله

عنوان مقاله باید نشانگر محتوای مقاله بوده، ساده و به راحتی قابل درک باشد. همچنین عنوان مقاله نباید بیش از ۲۰ واژه باشد.

۳- چکیده فارسی

چکیده فارسی مقاله باید در ۱۵۰ تا ۲۵۰ واژه و بیانگر مسئله، هدف، روش و نتایج پژوهش باشد. از آن‌جا که بیشتر خوانندگان تنها به چکیده مقاله دسترسی دارند، لازم است که این قسمت از مقاله با دقت کافی و روان نوشته شود. چکیده هر مقاله ممکن است توسط مرکزها و مؤسسه‌های خدمت رسانی اطلاعات و منابع علمی، منتشر شود.

۴- واژه‌های کلیدی

پس از چکیده، ۳ تا ۵ واژه کلیدی آورده شود. توصیه می‌شود که تا حد ممکن، از به کار بردن واژه‌هایی که در عنوان مقاله آورده شده، در واژه‌های کلیدی پرهیز شود.

۵- مقدمه

در این بخش باید مقاله‌های پژوهشی موضوع مورد بحث یا پژوهش معرفی شده، فرضیه مورد نظر تعریف، به اهم کارهای پژوهشی انجام شده پیشین اشاره، زمینه لزوم پژوهش مورد نظر تشریح و هدف بررسی مشخص شود. در مورد مقاله های مروری لازم است به پژوهش های مهم انجام شده، اشاره شود و در پایان واکاوی و نتیجه‌گیری شود. هدف اصلی این بخش این است که اطلاعات کافی قبلی درباره موضوع مورد بحث یا پژوهش داده شود که خواننده بتواند نتایج را درک کرده و آن‌ها را نسبت به کارهای قبلی انجام شده، بدون بررسی منابع اصلی، مقایسه و ارزیابی نماید. **لازم است در تمام مقاله‌ها، استناد به منابع علمی بر اساس شیوه‌نامه APA نوشته شوند که نسخه‌ای از آن در سایت مجله موجود است و چکیده‌ای از آن در پایان این راهنمای نویسندگان آمده است.**

۶- مواد و روش‌ها

در این قسمت در مقاله‌های پژوهشی باید شرح دقیق و کامل تیمارها، طرح آزمایشی و مواد و روش‌های مورد استفاده در اجرای پژوهش آورده شود. در صورتی‌که از روش‌های متداول منتشر شده استفاده می‌شود از شرح آن‌ها خودداری گردد و تنها به بیان منبع بسنده گردد، اما اگر از روش جدیدی استفاده شده است، شرح کامل آن روش ضرورت دارد. در مورد تغییرهای ایجاد شده در روش‌های متداول قبلی هم تنها به شرح تغییرها پرداخته شود. هدف از این بخش این است که اطلاعات کافی در اختیار پژوهشگران دیگری که علاقمند به تکرار چنین آزمایش‌هایی هستند قرار داده شود. درباره مواد استفاده شده باید نام‌های دقیق علمی و تجاری و منبع یا روش تهیه آن‌ها نوشته شود. در مورد مقاله‌های مروری نیز لازم است که پژوهش‌های مهم پیشین به گونه‌ای آورده شوند که موضوع موردنظر به خوبی بیان شود. نام‌های علمی همراه با خلاصه نام نامگذارنده انواع گیاهان، جانوران و مانند این‌ها، باید به طور دقیق آورده و زیرنویس شوند.

۷- نتایج

نتایج حاصل از پژوهش می‌تواند به صورت جدول و شکل ارائه گردد. برخی از نتایج ساده را می‌توان در داخل متن و بدون ارائه جدول یا شکل ارائه نمود. جدول‌ها و شکل‌ها در بخش نتایج باید به طور کامل روشن و به راحتی قابل درک و بیانگر واقعی داده‌های حاصل از پژوهش باشند. شماره‌های ارائه شده در جدول‌ها یا شکل‌ها نباید در این بخش، بحث و تفسیر شوند، بلکه تنها به بیان یافته‌های اساسی بسنده گردد. همچنین لازم است این شماره ها در جدول‌ها یا شکل‌ها به فارسی آورده شوند. نتایج ارائه شده نباید به صورت جدول، منحنی یا متن نوشتاری تکرار گردد. هر جدول یا شکل باید دارای عنوان مشخص به صورت وسط‌چین باشد. عنوان باید تا حد ممکن کوتاه، واضح و بیانگر محتوای جدول و شکل مربوطه باشد. برای نوشتن عنوان جدول (یا شکل) باید پس از واژه جدول (یا شکل)، شماره آن و سپس یک خط تیره و بعد از آن عنوان جدول (یا شکل)، نوشته شود. هر ستون جدول باید دارای عنوان و واحد مربوط به آن ستون باشد، مگر این که تمام ستون‌ها دارای واحد یکسان باشند که در این صورت باید واحد مربوط را در عنوان جدول آورد. برای بیان توضیح‌های اضافی درباره هر جدول می‌توان به ترتیب از نشانه‌های اختصاری †، ††، ††† در متن جدول استفاده کرد و با نشان دادن آن‌ها در زیر جدول و ارائه توضیح، اطلاعات لازم را در اختیار خواننده قرار داد. شکل‌های رایانه‌ای، ترسیمی و تصویرها باید به طورکامل واضح و در صورت لزوم دارای واحد باشند و عنوان هر یک در زیر آن‌ها نوشته شود.

۸- بحث

در این بخش، در مورد مقاله‌های پژوهشی نتایج ارائه شده مورد واکاوی و تفسیر قرار گرفته، توجه خواننده به موضوع اصلی پژوهش، فرضیه(های) مطرح شده در بخش مقدمه و نتایج به دست آمده از این پژوهش جلب می‌شود. در این قسمت می‌توان رابطه‌ها بین عامل‌های تاثیرگذار در پژوهش و یا کاستی‌های مشاهده شده در این رابطه‌ها و در نهایت زمینه‌هایی که نیاز به پژوهش بیشتری دارند را برشمرد. تا حد ممکن بایستی موارد اتفاق نظر و یا اختلاف نتایج این پژوهش با پژوهش‌های دیگر در این زمینه، بررسی شوند و سرانجام، کاربردهای عملی و تئوری نتایج پژوهش انجام شده و نتیجه‌گیری اساسی از آن ارائه شود. در مقاله های مروری لازم است قسمت بحث و نتیجه‌گیری همراه شوند و کاستی‌ها و برتری‌های پژوهش‌های انجام شده، واکاوی، بحث و نتیجه‌گیری شوند.

۹- نتیجه گیری

در مقاله‌های پژوهشی در صورت لزوم، بخشی به نام نتیجه‌گیری می‌تواند در پایان مقاله آورده شود که نتایج اصلی مقاله را به طور مختصر ارائه می‌کند.

۱۰- سپاسگزاری

نویسنده(گان) می‌توانند از اشخاص، سازمان‌ها، نهادها و یا هر فرد حقیقی یا حقوقی که امکان اجرای پژوهش مانند تامین بودجه، وسیله‌های آزمایشگاهی، صحرائی و مانند این‌ها را فراهم نموده‌اند و یا در اجرای آن کمک کرده‌اند، تشکر و قدردانی نمایند. توصیه می‌شود این قسمت تا حد ممکن کوتاه و بیشینه ۵۰ واژه باشد.

۱۱- منابع مورد استفاده

منابع مورد استفاده باید شامل جدیدترین اطلاعات در زمینه کار مورد نظر باشد. از آوردن منابع خیلی قدیمی پرهیز شود. منابع مورد استفاده در پایان مقاله، باید بر اساس شیوه‌نامه APA نوشته شوند که چکیده‌ای از آن در پایان این راهنمای نویسندگان آمده است.

۱-۱۱- چگونگی ارائه منابع در متن مقاله- منابعی مجاز به ارائه در این بخش هستند که به صورت کتاب چاپ شده، مقاله یا مقاله کوتاه، چاپ یا پذیرفته شده در مجله‌های مختلف باشند و از راه کتابخانه‌ها یا اینترنت، بتوانند در دسترس قرار گیرند.

۲-۱۱- چگونگی ارائه منابع- لازم است به کلیه منابع فارسی و لاتین در متن اشاره شده و در لیست منابع، ابتدا منابع فارسی و سپس منابع لاتین آورده شوند. در صورتی که از یک نویسنده بیش از یک مقاله استفاده شده باشد باید مقاله‌های آن نویسنده بر حسب دوره زمانی افزایشی شماره‌گذاری شود. در صورتی که یک نویسنده مقاله‌هایی مستقل و مشترک با سایر نویسندگان داشته باشد، ابتدا مقاله‌هایی مستقل وی و سپس مقاله‌های مشترک او به ترتیب حروف الفبای نام فامیل نفرهای بعدی و دوره انتشار، نوشته می‌شوند.

۱۲- چکیده انگلیسی

ترجمه صحیحی که بیانگر پژوهش یا موضوع موردنظر در مقاله‌های مروری باشد و تا حد ممکن با چکیده فارسی برابری کند، باید به انگلیسی ارائه شود.

۱۳- دیگر نکته‌ها

۱- هر مقاله بدون نام نویسنده، به دستکم ۳ داور ارسال می‌شود و در صورت نظر مثبت ۲ داور و همچنین تصویب شورای دبیران، پذیرفته خواهد شد.

۲- نویسنده یا نویسندگان موظفند پیش از ارسال مقاله اصول اخلاقی مجله را به دقت خوانده و فرم تعهدنامه را که در سایت مجله آمده است، تکمیل و امضا نمایند.

۳- مقاله‌ها به طور معمول نبایستی از ۱۵ صفحه چاپ شده، بیشتر شود.

۴- مسئولیت کامل نظرهای ابراز شده در مقاله‌ها و نیز رعایت حق مؤلفین و پژوهشگران به عهده نویسنده(گان) مقاله می‌باشد.

۵- کلیه واحدهای مقاله باید درسیستم متریک ارائه شوند.

۶- اتخاذ تصمیم نهایی درباره رد یا پذیرفتن و نیز هر گونه ویرایش لازم در مقاله‌ها برای شورای دبیران محفوظ است.

۷- به منظور بهبود کیفیت مقاله و رفع اشتباه‌های احتمالی توصیه می‌شود که نگارندگان پیش از ارسال مقاله به این مجله، از همکاران صلاحیتدار خود تقاضا نمایند که آن را مطالعه نموده و کاستی‌های احتمالی را گوشزد کنند.

۸- در مورد مقاله‌های پذیرفته نشده، نظر داور یا داوران برای نویسنده یا نویسندگان ارسال خواهد شد.

چکیده‌ای برگرفته از استناد شیوه‌نامه APA ویرایش ششم نسخه ۲

نمونه مقاله علمی فارسی

در متن: (جعفری، ۱۳۸۹)

در فهرست منابع: جعفری، علی. (۱۳۸۹). اندیشه‌های پیتر بوردیو. *مطالعات جامعه‌شناختی*، ۱۷ (۷)، ۲۵-۴۸.

نمونه مقاله علمی انگلیسی

در متن:

(Harrison & Westwood, 2009)

در فهرست منابع:

Harrison, R. L., & Westwood, M. J. (2009). Preventing vicarious traumatization of mental health therapists: Identifying protective practices. *Psychotherapy: Theory, Research, Practice, Training*, 46, 203-219.

نمونه مقاله اینترنتی فارسی

در متن: (خسروجردی، ۱۳۹۱)

در فهرست منابع: خسروجردی، محمود. (۱۳۹۱). ترسیم میان رشتگی در پژوهش های علم‌سنجی. پردازش و مدیریت اطلاعات، دوره ۲۸، شماره ۲، صص. ۳۹۳- ۴۰۹. بازیابی شده در ۱۰ آذر ۱۳۹۲، از

http://pubj.ricest.ac.ir/ojs/index.php/code13pp/article/view/100/108

نمونه مقاله اینترنتی انگلیسی

در متن:

(Capurro, 2013)

در فهرست منابع:

Capurro, R. (2013). Go Glocal: Intercultural Comparison of Leadership Ethics. *Infopreneurship Journal*, 1 (1), pp. 1-9. Retrieved 2013, Dec. 25, from http://infopreneurship.net/wp-content/uploads/2013/09/GoGlocal-Intercultural-Comparison-of-Leadership-Ethics-InfoJour-11pp.1-91.pdf

نمونه مقاله فارسی در همایش‌ها

در متن: (جمالی، ۱۳۹۰)

در فهرست منابع: جمالی، حمیدرضا. (آبان ۱۳۹۰). تولید علم در ایران. در محمدصادق حسینی (ویراستار)، مجموعه مقالات علم در ایران. مقاله منتشر شده در کنفرانس علوم اجتماعی ایران، تالار قدس (صص. ۲۵- ۲۸). تهران: انجمن جیحون.

نمونه مقاله انگلیسی در همایش‌ها

در متن:

(Rowling, 1993)

در فهرست منابع:

Rowling, L. (1993, September). Schools and grief: How does Australia compare to the United States. In *Wandarna coowar: Hidden grief.* Paper presented at the Proceedings of the 8th National Conference of the National Association for Loss and Grief (Australia), Yeppoon, Queensland) pp. 196-201). Turramurra, NSW: National Association for Loss and Grief.

نمونه کتاب فارسی

در متن: در بار اول (حسینی، جعفری، ایزدی، منانی، ماکانی، ۱۳۸۰)

در دفعه‌های بعد (حسینی و همکاران، ۱۳۸۰)

در فهرست منابع: حسینی، علی؛ جعفری، حسن؛ ایزدی، غلام؛ منانی، حنانه؛ و ماکانی، جعفری. (۱۳۸۰). جامعه شناسی نشر. تهران: قو.

نمونه کتاب انگلیسی

در متن:

(Chessick, 2007)

در فهرست منابع:

Chessick, R. D. (2007). *The future of psychoanalysis.* New York, NY: State University of New York Press.

نمونه پایان‌نامه فارسی

در متن: (خسروجردی، ۱۳۸۷)

در فهرست منابع: خسروجردی، محمود. (۱۳۸۷). نقش شخصیت و باورهای معرفت‌شناختی در رفتار اطلاع‌جویی دانشجویان کارشناسی ارشد دانشگاه تهران. پایان نامه منتشر نشده کارشناسی ارشد، دانشکده روان‌شناسی و علوم تربیتی، گروه کتابداری و اطلاع‌رسانی.

نمونه پایان‌نامه انگلیسی

در متن:

(Hall, 2007)

در فهرست منابع:

Hall, E. M. (2007*). Posttraumatic stress symptoms in parents of children with injuries.* (Unpublished doctoral dissertation). Boston University, Boston, MA.

مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۹ شماره ۱ صفحه‌های ۱ تا ۱۸ (۱۴۰۳)

فناوری کریسپر و کاربرد آن در صنایع غذایی[1]

احسان یزدان‌پناه[2]، شاهین اقبال سعیدی ابواسحاقی و مرتضی خمیری[3]

چکیده

افزایش جمعیت جهان و تامین غذا یکی از چالش‌هایی پیش‌روی بشر است. یکی از موردهای بسیار مهم و تاثیر گذار برای افزایش میزان تولید مواد غذایی استفاده از مهندسی ژنتیک است؛ و کریسپرCas9[4] یکی از روش‌های نوین شناخته‌شده و دقیق ویرایش ژنوم است. مهمترین ویژگی‌های این فناوری که آن را از دیگر روش‌های مشابه متفاوت می‌کند سادگی استفاده، ارزان‌تر بودن، دقت و کارایی مناسب و زیاد آن است. کریسپرCas9 به‌نوعی با سیستم ایمنی مربوط به توالی کوتاهی از DNA مرتبطاست. در واقع کریسپر سیستم ایمنی پروکاریوتی است که موجب مقاومت به تهدیدهای خارجی، مانند DNA فاژها، پلاسمیدها و ویروس‌ها می‌شود. این سیستم دارای سه بخش اصلی است. یک بخش آن CrRNA[5] است که دارای یک توالی تکراری است که با توالی موجود در Trac RNA مکمل می‌باشد. CrRNA از راه مکمل خود به جایگاه هدف متصل می‌شود و توالی Trac RNA نیز به مکمل خود که توالی‌های تکراری موجود در CrRNA است، می‌چسبد که این ساختار فضایی موجب فراخوانی پروتئین Cas9 به جایگاه هدف می‌شود. در صنعت غذا سیستم کریسپر می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت فرآورده‌های تخمیری برای استفاده از آن در افزایش مقاومت فاژی، واکسینه‌شدن پلاسمیدی، ویرایش ژنوم و فعالیت‌های ضدباکتریایی مورد استفاده قرارگیرد که در مقاله حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: ژنوم، صنعت غذا، فناوری کریسپر، Cas9.

مقدمه

با افزایش پیوسته جمعیت جهان، زنجیره تأمین غذا بزرگترین چالش موجود است و با توجه به رشد جمعیت، مقدار غلات تولیدی تا سال ۲۰۵۰ باید دو برابر مقدار آن در سال ۲۰۰۵ باشد. برای رسیدن به این هدف راه‌های مختلفی مورد توجه پژوهشگران است. یکی از این راه‌های پیشنهادی افزایش سطح کشت محصول‌های کشاورزی است که با توجه به نیاز به زمین بیشتر و تخریب منابع طبیعی گزینه چندان مناسبی به نظر نمی‌رسد. از این رو، به جای افزایش سطح کشت باید گیاهانی با مقدار عملکرد بیشتر و همچنین مقاوم به بیماری‌ها و تنش‌های محیطی بوجود آورد (Brandt & Barrangou, 2019).

در چند دهه گذشته پیشرفت در علوم و فناوری مقدمه‌ای شد تا چندین فناوری جدید در صنایع غذایی و کشاورزی

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۱

۲- نویسنده مسئول، پست الکترونیک: ehsany81@yahoo.com

۳- به ترتیب، دانشجوی دکتری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان و استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

4. Clustered regularly interspaced short palindromic repeats

5. Crispr RNA

استفاده شوند که این فناوری‌ها دانسته های ما را نسبت به طبیعت غذاها و فرآیندهای آن‌ها افزایش داده‌اند. امروزه مصرف‌کنندگان انتظار دارند که غذا افزون بر رفع گرسنگی دارای اثرهای مهمی بر سلامتی و جلوگیری از بیماری باشد (Eş, *et al*., 2019).

یکی از فناوری‌های نوینی که در بسیاری از شاخه‌های علم استفاده می‌شود ایجاد تغییرهای ژنتیکی می‌باشد که در مواد غذایی، کشاورزی، بوم‌شناسی، پزشکی، تولید دارو، دامپروری و مانند این ها کاربرد دارد و می‌تواند در بهبود شرایط انسان بسیار مؤثر باشد. امروزه از روش اصلاح ژنتیکی در موردهای مانند زیست‌ساخت ویتامین‌ها، آنزیم‌ها، ترکیب‌های دارویی، پادزیست‌ها (آنتی بیوتیک ها) و پپتیدهای زیست‌فعال استفاده می‌شود (Selle & Barrangou.,2015). معرفی فناوری DNA[1] نوترکیب در سال ۱۹۷۰ عصر جدیدی درزیست شناسی گشود که با ارائه این فن برای نخستین بار پژوهشگران توانستند مولکول‌های DNA را به منظور نوآوری در راهکارهای درمانی دستکاری کنند و امروزه روش‌های هدفمند تغییر ژنوم یاخته‌های زنده، ابزار قدرتمندی را برای درمان بیماری‌های ژنتیکی فراهم نموده است (ولیان بروجنی و محمدی فارسانی، ۱۳۹۶). توسعه روش‌های کارآمد و مطمئن برای ایجاد تغییرهای هدفمند و دقیق در ژنوم یاخته‌های زنده یکی از هدف‌های مهم پژوهشگران زیست‌فناوری است، بنابراین به ایجاد تغییر هدفمند و اختصاصی در ژنوم و اطلاعات زیستی موجود زنده، ویرایش ژنوم گفته می‌شود. در روش‌های مختلف ویرایش ژنوم تشخیص جایگاه هدف، دارای اهمیت ویژه‌ای است. در فناوری‌های جدید تغییر ژنتیکی به طور معمول ژن خارجی به موجود زنده وارد نمی‌شود. یکی از این روش‌های نوین و دقیق شناخته‌شده که برای ویرایش ژنوم وجود دارد، کریسپر Cas9 است. مهمترین ویژگی این فناوری که آن را از دیگر روش‌های مشابه متفاوت می‌سازد سادگی استفاده، ارزان بودن، دقت و کارایی مناسب و زیاد آن است (بیات و همکاران.، ۱۳۹۶) (Gallo *et al*., 2018). این سیستم ایمنی مربوط به یک توالی کوتاه DNA است و پژوهشگران سال‌ها بر این بودند که این توالی هیچ‌گونه کارایی در یاخته ندارد، اما در سال‌های اخیر مشخص شد که این توالی نه تنها بی‌ارزش نیست، بلکه به همراه پروتئین Cas9 می‌تواند هر قسمت از DNA را برش دهد یا قسمتی از ژن را خاموش کند (پروین و سیدین، ۱۳۹۶).

معرفی سیستم کریسپر

در واقع کریسپر نوعی سیستم ایمنی پروکاریوتی است که موجب مقاومت به عنصرهای خارجی، مانند: DNA فاژها، پلاسمیدها و ویروس‌ها می‌شود. میکروارگانیسم‌های دارای سیستم کریسپر پس از نخستین رویارویی با ژنوم خارجی پس از تخریب این ماده وراثتی (شامل DNA فاژها، پلاسمیدها و مانند این ها)، توالی‌های ۲۰ نوکلئوتیدی متعددی از ویروس هیدرولیز شده را وارد مکان ژنی کریسپر می‌کنند و این بخش مانند بایگانی از ژنوم‌های مهاجم برای یاخته به حساب می‌آید و در رویارویی با ژنوم‌های خارجی بعدی مانند الگو عمل می‌کند (جدیدی و عرب، ۱۳۹۵).

سیستم کریسپر دارای سه بخش اصلی می‌باشد. که شامل CrRNA[2]، Trac RNA[3] و پروتئین Cas9 می‌باشند. CrRNA در حقیقت بخشی از توالی ژنوم مهاجم است که در آن افزون بر نسخه برداری دقیق ژنوم مهاجم موجود در آرایه کریسپر، توالی‌های تکراری آن نیز در آن نسخه برداری می‌شود. زمانی که باکتری در برابر عنصر مهاجم قرار می‌گیرد این قطعه بیان می‌شود و با اتصال به رشته مکملش در ژنوم (که در حقیقت ژنوم خارجی ورودی است) موجب فراخوانی

1. Deoxyribonucleic acid 2. Crisper RNA 3. Trans-activating crispr RNA

پروتئین Cas9 به جایگاه موردنظر می‌شود (بیات و همکاران، ۱۳۹۶؛ Meiliana *et al*.,2017). همانگونه که بیان شد، CrRNA دارای یک بخش توالی تکراری می‌باشد که با توالی موجود در Trac RNA مکمل می‌باشد. CrRNA از راه مکمل خود به جایگاه هدف متصل می‌شود و توالی Trac RNA نیز به مکمل خود که توالی‌های تکراری موجود در CrRNA است، متصل می‌شود که این ساختار فضایی موجب فراخوانی پروتئین Cas9 به جایگاه هدف می‌شود (بیات و همکاران.، ۱۳۹۶؛ Yao *et al*., 2018).

تاریخچه کریسپر

در سال ۱۹۸۷ میلادی گروهی از پژوهشگران به سرپرستی یوشی زومی‌ایشی نو[1] در دانشگاه اوزاکا به بررسی باکتری *E. coli* پرداختند و با تکرار غیرعادی یک توالی در DNA این باکتری روبه‌رو شدند، اما تاریخچه کشف کریسپر به پژوهش روی آرکئی‌های[2] مقاوم به نمک در مرداب در سال ۱۹۸۹ در دانشگاه آلیکانته[3] اسپانیا برمی‌گردد (Lander., 2016). پژوهشگران دریافتند که غلظت نمک موجود در محیط کشت بر فعالیت برشی آنزیم‌های محدودکننده[4] (آنزیم‌های محدودکننده دسته‌ای از آنزیم‌ها هستند که DNA را بر اساس توالی خاصی از نوکلئوتیدها، به قطعه‌های مختلف تقسیم می‌کنند) در آرکئی ها اثر دارد. آن‌ها در ادامه به بررسی قطعه‌های تغییریافته پرداختند و در نخستین قطعه مورد بررسی، نسخه‌های کامل و متعددی از توالی‌های پالیندرومیک و نادر به طول ۳۰ جفت باز را کشف نمودند که در میان آن‌ها یک سری توالی فاصله‌انداز با طول ۳۶ جفت باز قرارداشت. پس از آن، توالی‌های همسان دیگری در باکتری *Haloferax volcanii* و دیگر آرکئی باکتری‌های نمک‌دوست توسط پژوهشگران کشف شد. در آن سال‌ها گمانه‌زنی‌های فراوانی در مورد نقش توالی کریسپر در تنظیم بیان ژن و تعمیر DNA مطرح شد که نادرست بودن همه ادعاها در زمان کوتاهی اثبات شد. پس از بررسی‌های تکمیلی، در پایان در سال ۲۰۰۷ میلادی کریسپر به عنوان سیستم ایمنی ذاتی باکتری‌ها و آرکئی‌ها معرفی شد (Lander, 2016).

انواع سیستم کریسپر

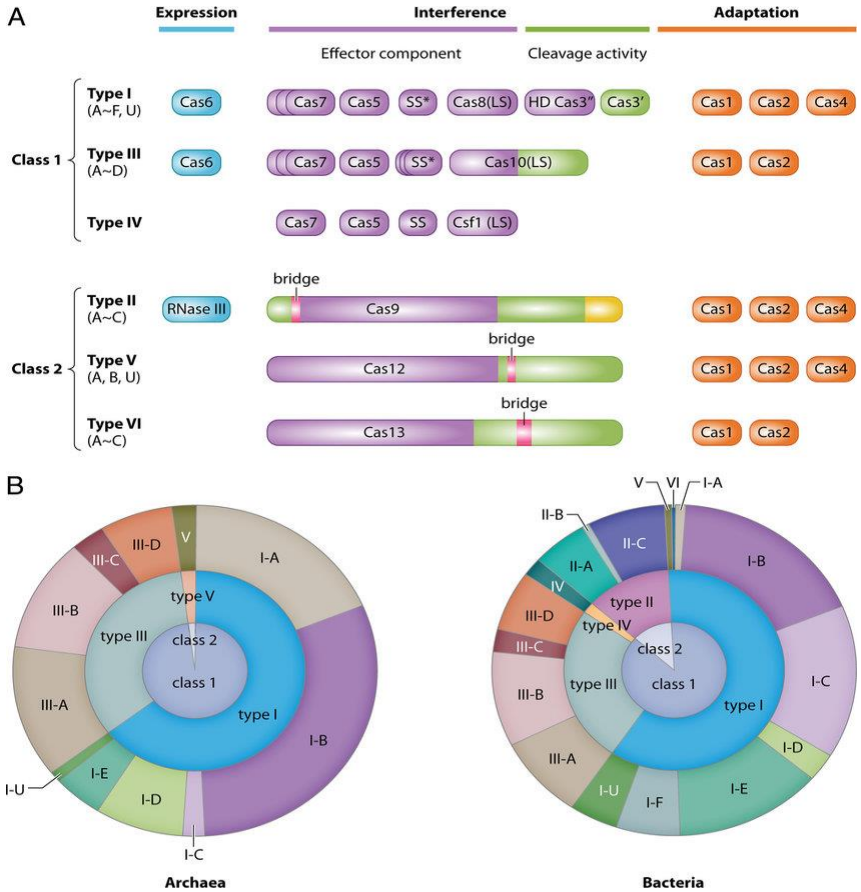
تقسیم‌بندی انواع مختلف سیستم کریسپر در میکروارگانیسم‌ها برپایه ژن رمزکننده و ساختار بخش مؤثر در مکان ژنی کریسپر است. سیستم کریسپر شامل سه نوع مهم I، II و III می‌باشد. انواع V، IV و VI نیز به ندرت مشاهده می‌شوند (شکل ۱) (Meiliana *et al*.,2017).

نوع I - همه زیرگروه‌های موجود در نوع I کریسپر دارای ژن *Cas3* می‌باشند که این ژن یک پروتئین بزرگ که فعالیت هلیکازی دارد را فعال می‌کند و این پروتئین با تحریک فعالیت ATPAse موجب بازشدن ساختار DAN-DNA یا RNA-DNA می‌شود. گاهی دامنه هلیکازی با دامنه HD[5] ترکیب شده که این مجموعه دارای فعالیت اندونوکلئازی است و وظیفه جداسازی و برش DNA را برعهده دارد.

برای دامنه HD فعالیت اگزونوکلئازی ssDNAase و RNAase در *Methanocaldococcus Janashi* گزارش شده است. دامنه HD در قسمت N انتهایی پروتئین Cas3 وجود دارد و یا به صورت جداگانه‌ای به عنوان هلیکاز Cas3 نامگذاری می‌شود. در نوع F افزون بر ژن *Cas3*، ژن *Cas2* نیز وجود دارد و در زیرمجموعه‌های نوع I ژن‌های *Cas1* و *Cas2* دارای اپران‌های جداگانه‌ای هستند. در نوع I ژن‌های مؤثر در تولید آنزیم‌های Cas، دارای دو زیربخش کوچک و بزرگ هستند. در این میان

1. Yoshizumi Ishino 2. Archaea 3. University of Alicante 4. Restriction enzymes
5. Histidine (H) and/or aspartate (D) amino acid

ژن‌های *Cas5*، *Cas6* و *Cas7* به صورت مستقیم مسئول فرآیند نسخه‌برداری در Pre-CrRNA هستند و در نوع I اپران‌ها بیشتر اختصاصی هستند (Mokarova *et al*., 2011 ، Mokarova *et al*., 2015). Cas1 و Cas2 به شکل ترکیب‌های حد میانه برای فاصله سازها عمل می‌کنند. در این نوع، Cas6 یک اندونوکلئاز فعال است که وظیفه آماده‌سازی CrRNA را برعهده دارد و Cas5 و Cas7 پروتئین‌های غیرکاتابولیکی متصل به RNA هستند. در سیستم I-C کارهای مربوط به CrRNA به وسیله Cas5 انجام می‌شود. در این نوع، مجموعه CrRNA به همراه مجموعه پروتئینی Cas Code (Cas5، Cas8b، Cas7 و Cas6) در قسمت پایین دست آرایه کریسپر قرار دارند (Mokarova *et al*., 2011; Mokarova *et al*., 2015; Mokarova *et al*., 2015).



شکل ۱-طبقه‌بندی انواع سیستم‌های کریسپر (Ishino *et al*., 2018).

نوع II – سیستم کریسپر نوع II نسبت به دیگر نوع‌ها کمیاب ترند و در حدود ۵٪ از ژنوم باکتری‌ها دیده می‌شود، اما در آرکئی‌ها وجود ندارد. به‌تازگی به عنوان ابزار قدرتمندی برای ویرایش ژن در مهندسی ژنتیک و زیست‌فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع کوتاه‌ترین ساختار ژنی در میان همه انواع کریسپر را دارند و تنها ۳ یا ۴ (به ندرت) ژن مؤثر برای انجام فعالیت دارد. هرچند، افزودن برخی از عامل‌ها مانند CrRNAهای فعال و یا پروتئین‌های مختلف بر عملکرد این نوع تأثیر می‌گذارد. مانند سیستم کریسپر نوع I و همچنین همه سیستم‌های کریسپر، در این نوع نیز توالی PAM[1] دارای اهمیت بسیار است و به وسیله پروتئین‌های مربوط در بخش پایین‌دستی Proto-Spacer روی رشته DNA غیرهدف شناسایی می‌شود. وجود توالی PAM برای شناسایی بخش هدف مورد نظر و شکست آن به وسیله پروتئین ضروری

1. Proto-spacer adjacent motif

می‌باشد. در این نوع، اتصال توالی خارجی به بخش کریسپر یاخته به وسیله مجموعه آنزیم‌های Cas1 و Cas2 صورت می‌گیرد. این مجموعه در بیشتر انواع شناخته‌شده کریسپر وجود دارد و برای پیوستن توالی خارجی به آرایه کریسپر ضروری است. فعالیت اندونوکلئازی Cas1 برای اتصال توالی خارجی مورد نیازاست؛ در حالی که Cas2 فعالیت آنزیمی نداشته و بیشتر نقش ساختاری دارد. برای نسخه‌برداری و ساخته‌شدن Pre-CrRNA در نوع II ساختاری وجود دارد که با انواع I و III متفاوت است. در انواع I و III از یک اندوریبونوکلئاز برای شکستن Pre-CrRNA و تبدیل آن به CrRNA بالغ استفاده می‌شود و این عمل با شناسایی بخش تکراری CrRNA اتفاق می‌افتد. در حالی‌که، در نوع II از RNAasII درون‌زاد استفاده می‌شود و یک RNA دوم که آن را Trace-RNA می‌گویند نیز وجود دارد که در بیشتر زیرگونه‌های نوع II مشاهده می‌شود و یک بخش جدانشدنی از نوع II است. در نوع II جفت بازهای موجود روی Trace-RNA که در حقیقت توالی‌های تکراری آرایه کریسپر هستند با مکمل آن‌ها روی Pre- CrRNA در حضور یک پروتئین نوکلئازی و یک هلیکاز به هم متصل می‌شوند. ویژگی اصلی کریسپر نوع II وجود پروتئین Cas9 است که در دیگر انواع دیده نمی‌شود. این پروتئین بزرگ دارای چندین دامنه است و مجموعه‌ای از کارها را در سیستم کریسپر انجام می‌دهد. وظیفه آن برش توالی هدف بعد از تشخیص آن به وسیله Cr-RAN و Trace-RAN است. عمل آن برای تشخیص DNA اصلی از مهاجم بسیار مهم است، زیرا این توالی تنها روی DNA مهاجم قرار دارد و سازوکار کریسپر با تشخیص توالی PAM، DNA مهاجم را حذف می‌کند و توالی موجود روی DNA اصلی که بدون توالی PAM است، سالم می‌ماند. پروتئین Cas9 که با نام csn1 هم شناخته می‌شود یک DNA نوکلئاز است که در نوع II کریسپر وجود داشته و می‌تواند هر دو رشته DNA را در فعالیت خود بشکند (Mokarova *et al*., 2015، Mokarova *et al*., 2011، Wei *et al*., 2015).

امروزه سه نوع پروتئین Cas1 از برخی میکروارگانیسم‌ها مانند اشرشیا[1]سودوموناس[2] و مانند این‌ها استخراج شده است. این پروتئین به شکل یک همودایمر[3] است و یک نوکلئاز حاوی عنصر فلزی می‌باشد که می‌تواند SDNA و dsDNA را برش بزند. این پروتئین دارای دو دامنه است. قسمت C انتهایی که دارای فعالیت هلیکازی است و قسمت N انتهایی که وظیفه دوتایی‌شدن و اتصال به سایر پروتئین‌ها را برعهده دارد. پژوهش‌های تازه‌تر نشان داده است که ژن Cas1 در فرآیند خودساختی[4] نیز شرکت می‌کند.

نوع III – در طبیعت به فراوانی دیده می‌شود و هرچند به عنوان یک ابزار ژنتیکی کاربرد زیادی ندارد، اما وظیفه محافظت از یاخته در برابر ژنوم‌های خارجی را برعهده دارد. در این حالت، چندین نوع پروتئین Cas به همراه CrRNA وجود دارند که سیستم کریسپر را هدایت می‌کنند. کارایی آن نسبت به نوع II کمتر است. در این نوع، افزون بر RNAase، RNA راهنما و DNAase، آنزیم (سیکلیک اولیگوآدینلات سنتاز[5]) وجود دارد و پژوهش‌ها نشان داده است که در این نوع، سه حالت فعالیت آنزیمی دیده می‌شود. **۱**- فعالیت اندوریبونوکئازی، **۲**- فعالیت‌های DNAase که به وسیله دامنه‌های Cas10 انجام می‌شود. **۳**- فعالیت‌های سیکلیک اولیگو آدنیلات سنتتاز که به وسیله دامنه Palm و Cas10 انجام می‌شود (Niewoehner *et al*., 2017).

اجزای مختلف سیستم کریسپر

۱- ژنگاه[6] کریسپر- ساختاری با توالی‌های مورد نیاز برای شناسایی ژن‌های خارجی ورودی به یاخته در ژنوم

1. Escherichia 2. Pseudomonas 3. Homodimer 4. Autogenous process
5. Cyclic oligoadenylate synthase 6. Locus

پروکاریوت‌ها می‌باشد که به عنوان ژنگاه کریسپر شناخته می‌شود.

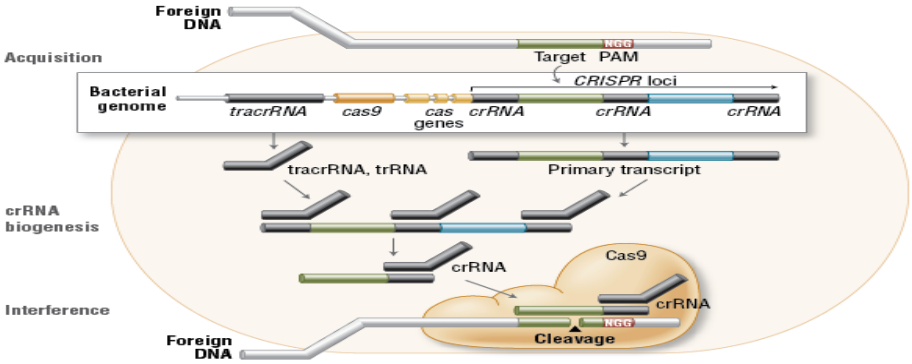
۲- پروتئین Cas- بخش‌های مختلف ژن‌های موجود در ژنگاه کریسپر، ساخت پروتئین‌ها را هدایت می‌کنند که به این پروتئین‌ها، پروتئین Cas گفته می‌شود که همه این مجموعه پروتئین‌ها مانند Cas1 تا Cas6 به وسیله توالی‌های موجود در بخش کریسپر ساخته می‌شوند. البته، بسته به نوع سیستم کریسپر مقداری از پروتئین‌ها ممکن است کم یا زیاد شوند.

۳- CrRNA- باکتری‌ها و آرکئی‌ها در سیستم کریسپر خود که نقش دفاعی دارند دارای یک RNA هستند که نسخه‌برداری دقیقی از ژنوم خارجی ورودی به یاخته است.

۴- Trace–RNA - یکی از RNAهای مورد نیاز در سیستم دفاعی کریسپر است که وظیفه آن به صورت ساختاری، اتصال به CrRNA و نگهداری آن است تا پروتئین Cas بتواند کار خود را درست انجام‌دهد.

۵- sgRNA[1]- در نوع II کریسپر دیده می‌شود و مجموعه‌ای از CrRNA و Trace–RNA است و برای فعالیت سیستم ایمنی کریسپر در یاخته ضروری است.

۶- PAM – یک توالی ویژه و کوتاه از DNA است که به طور معمول بین ۲ تا ۶ جفت باز طول دارد که در ادامه ناحیه هدفی که قرار است توسط آنزیم شکسته شود، وجود دارد. این توالی برای نوکلئازهای کریسپر ضروری است، زیرا وجود این توالی موجب شناخته‌شدن توالی هدف و شکسته‌شدن آن توسط آنزیم می‌شود و این توالی بیشتر در قسمت پایین‌دست محل برش قرار دارد. توالی PAM به صورت مستقیم توسط اندونوکلئاز تشخیص داده می‌شود که برای این کار وجود gRNA ضروری است و بخشی از ژنوم که باید به وسیله فناوری کریسپر ویرایش شود به وسیله توالی PAM محدود می‌گردد. بیشترین نوع پروتئین Cas9 که استفاده می‌شود از میکروارگانیسم *Streptococcus pyogenes* به دست می‌آید که در این میکروارگانیسم یک توالی '5'-NGG-3 تشخیص داده شده است (N می‌تواند هرباز نوکلئوتیدی باشد) (شکل ۲)



شکل ۲- اجزاء مختلف سیستم کریسپر.

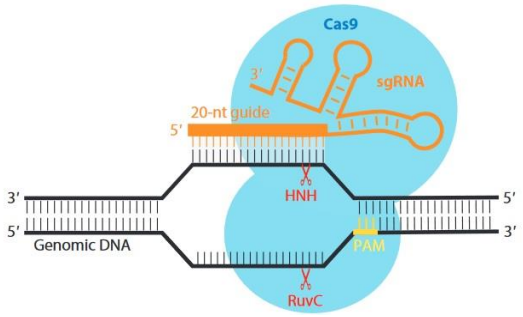
شیوه عمل سیستم ایمنی بر پایه کریسپر به وسیله پیوستن توالی کوچک ویروسی به ژنگاه کریسپر در یاخته شروع می‌شود و این امکان را به یاخته می‌دهد که با انجام یک سری فعالیت‌های آنزیمی از این قسمت به عنوان بایگانی ژنوم‌های خارجی برای تشخیص و نابودی آن‌ها بهره ببرد. نوکلئاز Cas، ژنوم ویروس را شکسته و سپس بخشی از آن را در ژنگاه کریسپر ذخیره می‌کند. توالی PAM جزئی از ژنوم ویروس مهاجم یا پلاسمید است و در ژنوم باکتری وجود

1. Single guide RNA

ندارد که در صورت وجود نداشتن توالی PAM یاخته نمی‌تواند ژنوم خارجی را برش بزند. توالی PAM برای انواع مختلف کریسپر متفاوت است که یکی از تفاوت‌های مهم، در جایگاه آن‌ها است. برای نمونه ، در نوع I و IV توالی PAM در قسمت Proto-Spacer 5' قرار دارد، در حالی‌که در نوع II در قسمت '۳ قرار دارد.

در مورد نوع III و IV اطلاعات محدودتر است و به نظر می‌رسد که روی RNA هدف قرار دارند. با همه این دشواری‌ها، هم محل قرارگیری توالی PAM و هم خود توالی می‌تواند در میکروارگانیسم‌های مختلف، متفاوت باشد (شکل ۳) (Zhang *et al*.,2015; Jiang *et al*.,2017; Anders *et al*., 2014).

۷- پروتئین آنتی‌کریسپر- ترکیب‌هایی که به وسیله برخی از فاژها و یا عامل‌های خارجی تولید شده و بر ترکیب‌های سیستم کریسپر اثر گذاشته و آن‌ها را غیرفعال می‌کند. افزون بر این مورد، برخی سیستم‌های دیگر نیز برای غیرفعال کردن سیستم کریسپر گزارش شده‌است. پروتئین‌ها در برخی از موردها در فناوری کریسپر برای غیرفعال سازی آنزیم Cas9 استفاده می‌شود. نکته‌ای که در مورد پروتئین Cas9 وجود دارد این است که این پروتئین دارای ۲ دامنه است. یک دامنه نوکلئازی با عنوان HNH که رشته DNA مکمل توالی RNA راهنما را می‌شکند و همچنین دارای یک دامنه RuV-C می‌باشد که مسئول شکستن رشته DNA مقابل رشته مکمل است (Zhang *et al*., 2015).



شکل ۳- محل قرار گرفتن توالی PAM روی ژنوم (Jiang *et al*.,2017).

عملکرد سیستم کریسپر

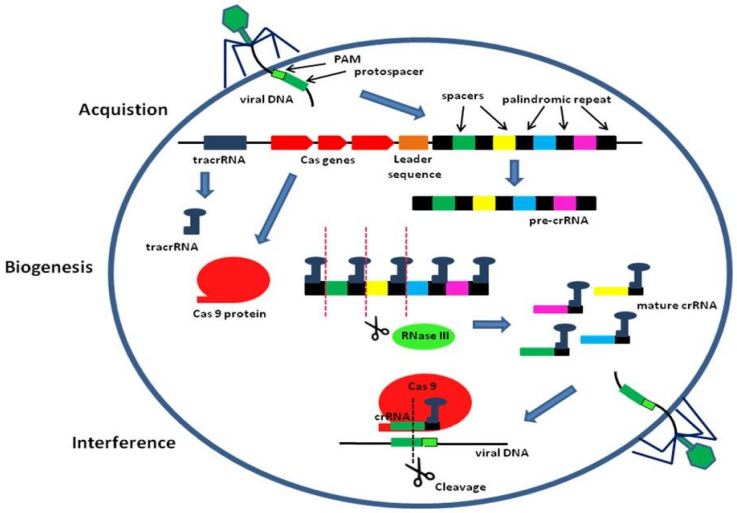
شروع عملکرد سیستم کریسپر شامل ۳ مرحله است: **۱**- هماهنگ‌شدن و یکپارچه‌شدن ژنوم خارجی در آرایه کریسپر. **۲**- انجام فرآیند رونویسی از بخش کریسپر و ایجاد Pre-Cr RNA و سپس بلوغ RNA. **۳**- ممانعت و حذف ژنوم خارجی با شناسایی آن (شکل ۴).

دو پروتئین مهم به نام‌های Cas1 و Cas2 در شمار زیادی از سیستم‌های کریسپر شناخته‌شده وجود دارند که از اهمیت خیلی زیادی در این فرآیند برخوردارند. این دو پروتئین به همراه هم، مجموعه‌ای را تشکیل می‌دهند که بخشی از فرآیندهای سیستم کریسپر را انجام می‌دهند. وظیفه Cas1 ایجاد اتصال بین قطعه‌های خارجی می‌باشد و Cas2 نیز دارای نقش‌های ساختاری بوده و فعالیتی غیرآنزیمی دارد (Mokarova *et al*., 2015; Brandt & Barrangou, 2019; Barrangou., 2015). کریسپر Cas9 را می‌توان با بهینه کردن کدهای Cas9 براساس کدهای ژنتیکی پستانداران و نیز فراهم آوردن اجزاء RNA آن در پستانداران استفاده کرد و با تغییر توالی ۲۰ نوکلئوتیدی نیز می‌توان هر نوع ژنی را در یاخته هدف قرار داد.

مرحله‌های انجام فن کریسپر بدین گونه است که: **۱**- sgRNA مورد نیاز برای هدف‌گیری ژن مورد نظر و نیز آغازگر مورد نیاز توسط ابزارهای Insilco طراحی شوند. **۲**- sgRNA راهنما در یک پلاسمید بیانی که حاوی Trace RNA و توالی کدکننده پروتئین Cas9 است، همانندسازی می‌شود. سپس این پلاسمید که دارای تمام اجزای مورد نیاز برای

هدف‌گیری ژن مورد نظر است به یاخته هدف انتقال داده می‌شود و در مرحله بعد یاخته‌هایی که پلاسمید را دریافت کرده‌اند، تکثیر می‌شوند (ولیان بروجنی و محمدی فارسانی، ۱۳۹۶). **۳**- توالی هدفی که از یک ژنوم موجود زنده برای انجام ویرایش در نظر داریم باید دارای دو ویژگی باشد. یکی توالی هدف در میان همه توالی‌های ژنوم موجود زنده تا حد امکان یگانه باشد و دیگری توالی PAM بی‌درنگ پایین‌دست ژن هدف وجود داشته باشد.

همان‌طور که بیان شد حضور توالی PAM در پایین‌دست ژن هدف برای فعالیت نوکلئازی Cas9 ضروری است که می‌تواند با توجه به نوع Cas9 متفاوت باشد. پژوهشگران هنگام گزینش پلاسمید و طراحی سیستم کریسپر، باید وجود توالی PAM در پایین‌دست ژن هدف که متناسب با گونه Cas9 مورد استفاده است را توجه کنند.



شکل ۴- عملکرد سیستم کریسپر در میکروارگانیسم‌ها (Hryhorowicz (Boksa) *et al.* 2016).

مجموعه Cas9-gRNA به هر توالی از ژنوم که PAM داشته باشد متصل شده، اما Cas9 تنها در حالتی برش را انجام می‌دهد که توالی حدفاصل gRNA با توالی هدف به مقدار کافی دارای همسانی باشند. در این حالت مدت زمان اتصال بیشتر خواهد بود و دامنه های نوکلئازی می‌توانند وظیفه خود را به خوبی انجام دهند.

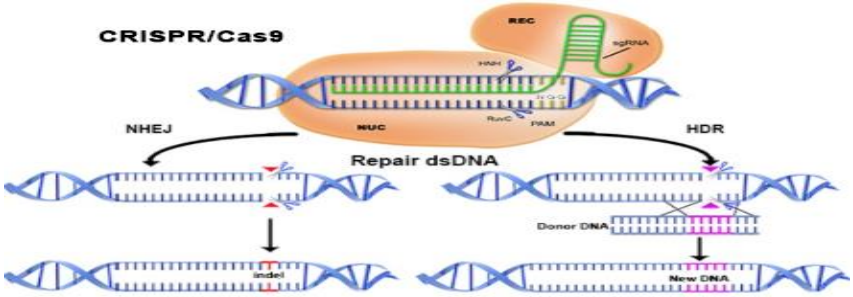
همان‌گونه که پیش‌تر گفته شده در پروتئین Cas9 دو دُومین نوکلئازی به نام‌های RUVC و HNH وجود دارد که هر کدام با برش یک رشته از DNA سبب ایجاد شکست‌های دو رشته‌ای با انتهای صاف در DNA می‌شوند. با ایجاد جهش در یکی از این دو دُومین می‌توان آنزیم‌هایی با توانایی شکست تک رشته ایجاد کرد. با استفاده از دو مولکول Cas9 جهش‌یافته می‌توان سیستمی طراحی کرد که شکاف در دو رشته با دو شکست یکسان در ژنوم ایجاد شود (ولیان بروجنی و محمدی فارسانی، ۱۳۹۶). پس از برش DNA توسط آنزیم، دو سیستم ترمیمی در یاخته وجود دارد (شکل ۵).

۱- مسیر ترمیمی اتصال در انتهای ناهمتا (NHES). این روش مرسوم‌ترین روش ترمیمی برای ترمیم DSB[1] می‌باشد، اما در این ترمیم مقدار زیادی جهش‌های حذف و اضافه در محل برش اتفاق می‌افتد و این تغییرها در توالی هدف موجب می‌شود که پس از ترمیم، DNA دستورزی شده دچار جهش‌های مختلفی از جمله جهش نقطه‌ای، اضافه یا تغییر چارچوب گردد. در بهترین حالت ممکن نتیجه این برش و ترمیم موجب از دست رفتن چند عملکرد در ژن هدف می‌شود.

1. DNA double-strand breaks

۲- مسیر ترمیم (ترمیم مستقیم همتا) HDR[1] از این روش برای تغییر در یک نوکلئوتید تا اضافه کردن چند نوکلئوتید به توالی هدف می‌توان استفاده نمود. آن چیزی که به عنوان تغییر ژنتیکی کنترل‌شده و برنامه‌ریزی شده شناخته می‌شود در حقیقت توسط مسیر HDR انجام می‌شود. درحالی‌که ترمیم برش دو رشته‌ای از راه NHES[2] که به صورت معمول رخ می‌دهد موجب تغییرهای ناقص و غیرقابل برنامه‌ریزی می‌شود (شکل۵).

به منظور استفاده از روش ترمیمی HDR برای دستورزی ژنتیکی یک قطعه DNA به عنوان الگوی ترمیمی با توالی از پیش‌تعیین‌شده باید به همراه Cas9 و gRNA به یاخته وارد شود که این الگو باید شامل توالی همسان بالادست و پایین‌دست در توالی هدف باشد. البته بازوی همسان چپ و راست و اندازه این دو بازو به توالی مورد نظر دستورزی وابسته است. افزون بر این، باید توجه نمود که توالی الگویی ترمیمی نباید توالی PAM داشته باشد؛ زیرا اگر این توالی را داشته باشد توسط Cas9 به عنوان رشته مهاجم شناخته شده و برش داده‌می‌شود. با وجود دقت زیاد HDR باید به این مسئله توجه داشت که بازده این روش به طور معمول کمتر از ۱۰٪ است که پژوهشگران امروزه برای بهبود روش HDR از روش‌های مختلفی از جمله استفاده از یاخته در مرحله‌هایی که HDR آن فعالیت بالاتری دارد، استفاده می‌نمایند (جدیدی و عرب، ۱۳۹۵). در دستورزی ژنتیکی از روش NHES برای غیرفعال‌سازی و ایجاد جهش استفاده می‌شود، اما از HDR برای دستورزی برنامه‌ریزی شده براساس الگو که شامل حذف و یا اضافه کردن بخش‌های هدف ژنوم و یا وارد کردن دقیق ژن خارجی به یک محل شناخته‌شده در ژنوم است، استفاده می‌شود (بیات و همکاران، ۱۳۹۶).



شکل ۵- مسیرهای ترمیمی در ژنوم سلول.

برای برش‌دادن DNA از نوکلئازهای قابل برنامه‌ریزی می‌توان استفاده کرد که خود در ۴ دسته طبقه‌بندی می‌شوند. **۱**- مگانوکلئازها (MN) **۲**- نوکلئازهای انگشت رویی (ZFN[3]). **۳**- نوکلئازهای (TALEN[4]). **۴**- کریسپرCas9. عملکرد همه این نوکلئازها شامل شناسایی و اتصال اختصاصی به DNA هدف و سپس ایجاد برش دو رشته‌ای (DSB) در آن‌ها می‌باشد. در سه دسته اول، بخش شناسایی‌کننده DNA از جنس پروتئین بوده در نتیجه به کارگیری این سیستم به دلیل نیاز به طراحی و مهندسی پروتئین در هر آزمایش بسیار سخت، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. درحالی‌که در سیستم کریسپرCas9 بخش شناسایی‌کننده DNA هدف، از جنس RNA می‌باشد. بنابراین، استفاده از این سیستم بسیار ساده، سریع‌تر و ارزان‌تر است (بیات و همکاران، ۱۳۹۶؛ Lander., 2016).

عملکرد سیستم کریسپر بعد از برش داده شدن

بعد از ایجاد برش، سیستم ترمیمی DNA فعال شده و محل باز شده را با سر به هم متصل می‌کند و در این بین تا

1. Homology-directed repair 2. Non-homologous end joining 3. Zinc finger nuclease
4. Transcription activator-like effector nucleases

این کار بخواهد اتفاق بیفتد یک سری آنزیم‌های اگزونوکلئازی وجود دارند که از بیرون مشغول هضم DNA می‌باشند و به همین دلیل بخشی از DNA آسیب دیده و از دست می‌رود. بنابراین، پیش از ترمیم، بخش‌هایی که هدف ویرایش نبوده حذف شده و بعد از متصل‌شدن دو سر برش‌خورده، این DNA به وجود آمده با DNA اصلی مقداری متفاوت است و از این رو، محل تغییر می‌نماید و کارکرد ژن دچار اختلال می‌شود. به بخش‌هایی که در این روش به DNA اضافه یا کم می‌شود، Indels گفته می‌شود که ترکیبی از دو واژه Insertion-Deletion است. پس از برش‌زدن چهار حالت ممکن است اتفاق افتد:

۱- پس، هدف از Indels، از دور خارج نمودن ژن است.

۲- اگر قرار باشد یک تکه بزرگ از ژن به طور دقیق حذف شود، در این هنگام برعکس شرایط بالا از دو gRNA استفاده می‌شود که این دو RNA هر کدام به همراه یک Cas9 به دو محل از DNA مورد نظر متصل شده و در دو محل ژن مورد نظر را برش می‌دهند. بنابراین، بخش میانی که برش داده شده از ژنوم خارج می‌شود و حذف می‌شود و پس از آن DNA به هم جوش می‌خورد که این روش را حذف قطعه‌ای می‌نامند و روش استاندارد حذف ژن است. افزون بر حذف، اگر لازم باشد تکه‌ای از DNA مدنظر به DNA هدف اضافه شود باید بوسیله دو gRNA که در قسمت پیش بیان‌شد، بخش مورد نظر را حذف کرد و یک DNA که از دو طرف مکمل بخش برش‌خورده باشد برای اتصال به داخل یاخته ارسال شود تا به جای ناحیه حذفی قرارگیرد که به آن DNA دهنده می‌گویند.

۳- DNA فرستاده شده پیش از اتصال باز می‌شود و هر رشته آن به یک رشته DNA هدف متصل می‌شود که این کار به وسیله سیستم ترمیم DNA انجام می‌شود. سپس هر کدام از این رشته‌ها به عنوان رشته الگو جهت انتقال ژن مورد نظر عمل می‌کند.

۴- ایجاد تعدیل تک نوکلئوتیدی: هدف از این روش تنها جابه‌جایی یک نوکلئوتید است. برای نمونه $C \leftarrow A$ که با دو روش انجام می‌شود: **الف**- در روش استاندارد با دو gRNA که گفته شده دو طرف ژن مورد نظر برش داده شده و ژن حذف شده. سپس یک DNA که کامل شبیه DNA اصلی بوده و تنها در همان نوکلئوتید مورد نظر تفاوت دارد را به محل اضافه می‌شود که این DNA به عنوان دهنده عمل می‌کند. در قسمت انتهایی، DNA دهنده نیز با DNA اصلی مکمل است. **ب**- در روش دیگری با تغییرهایی که روی پروتئین Cas9 انجام داده شده این پروتئین می‌تواند عمل تبدیل را انجام دهد، یعنی یک نوکلئوتید را به نوکلئوتید دیگر تبدیل می‌کند.

این سیستم به طور طبیعی در بیشتر باکتری‌ها وجود دارد و گفته می‌شود شاید در سایر موجودها نیز به شکل دیگری وجود داشته باشد. می‌توان توالی‌هایی که در داخل ویروس‌ها زیاد تکرار شده است را به داخل پلاسمید که دارای پروتئین Cas9 می‌باشد انتقال کرد و سپس این پلاسمید داخل یاخته فعالیت می‌کند و به مجرد ورود ویروس مورد نظر ساختار آن را به طور کامل منهدم و یا جزئی از آن را غیرفعال می‌کند؛ بدین صورت که به تکه‌ای از ژن اصلی ویروس متصل شده و آن را از دور خارج می‌کند و از این رو ویروس غیرفعال می‌شود. انتقال اطلاعات مرتبط با فاژها و مقاومت به فاژها را می‌توان با طراحی پلاسمیدی که دارای توالی مورد نظر است به وجود آورد (Joberty *et al*., Bennett, *et al*., 2020; 2020; Pineault, *et al*., 2019).

بهبود و کارامدترسازی Cas9 در سیستم کریسپر

بررسی‌های تازه نشان داده‌است که اگرچه هر ۲۰ نوکلئوتید در توالی gRNA برای عملکرد اختصاصی و اتصال به هدف ضروری است، اما وجود چند ناهمخوانی در این محل‌ها قابل تحمل بوده که البته این مورد موجب ایجاد برش‌های نابجا در

ژنوم می‌شود. برهمین اساس برای جلوگیری از ایجاد برش دو رشته‌ای در جایگاه غیراختصاصی نوعی از Cas9 به نام نیکاز[1] طراحی شده است. همانطور که گفته شد، Cas9 دارای دو دامنه برش‌دهنده است که هر کدام در یکی از رشته‌های DNA برش ایجاد می‌کنند. بنابراین، با غیرفعال کردن هر یک از این دامنه‌ها می‌توان یک آنزیم با قابلیت برش تک رشته‌ای ایجاد کرد که به این حالت از Cas9 که با جهش ایجاد می‌شود، نیکاز گویند. از این رو، در این حالت برای ایجاد برش دو رشته نیاز به دو gRNA و دو آنزیم Cas9 می‌باشد. نوعی دیگر از این سیستم، Double Nicking است که جهش D10A در RUV-C اتفاق می‌افتد و از زیرمجموعه‌های فرم نیکاز به حساب می‌آید. در فرم نیکاز اگر هر یک از gRNAها به صورت غیراختصاصی به محلی متصل شوند و در آن‌جا برش تک رشته‌ای ایجاد کنند سیستم تعمیری Base Excision Repair آن را بازسازی می‌کند و تنها برش‌های ایجادشده در نتیجه اتصال دو gRNA در فاصله نزدیک به هم به فعال‌شدن مسیرهای NHES و HDR می‌انجامد. در راستای بهبود نیکاز پژوهشگران نوعی دیگر از Cas9 را معرفی کرده‌اند که در آن هر دو دومین برش‌دهنده غیرفعال است که در اصطلاح به آن Cas9 مرده[2] گفته می‌شود. با اتصال دومین برش‌دهنده غیراختصاصی FOKI به انتهای آمینی Cas9 سیستمی‌موسوم به RFN[3] ایجاد می‌شود. اساس این سیستم مشابه Double Nicking است؛ با این تفاوت که فعالیت نوکلئازی FOKI مستلزم دوتایی‌شدن با همتای خود در رشته مقابل است. برای بهینه‌سازی RFN از یک سیستم جدید برای بیان همزمان دو یا چند gRNA استفاده شده‌است که در این سیستم از آنزیم اندوریبونوکلئاز cys-4 به همراه Cas9—FOKI استفاده می‌شود. محل برش این آنزیم در بالادست توالی کدکننده gRNA قرار دارد. در سیستم‌های معمول طراحی gRNA باید در ابتدای '۵ gRNA اسید امینه گوانین قرار داشته باشد، زیرا بیان‌شدن به وسیله آغازگر[4] U_6 ضروری است. حال آن‌که در مدل بر پایه cys-4 قسمت '۵ رونوشت شامل اولین توالی شناسایی cys4 است. بنابراین، اجباری به وجود گوانین در جایگاه '۵ وجود ندارد (بیات و همکاران، ۱۳۹۶؛ Javaid & Choi, 2021).

استفاده همزمان Trace-gRNA و سیستم RFN در یاخته‌های سرطانی و بنیادی، برش مناسب با مقدار بالا را ایجاد کرده است، اما مهمترین محدودیت این سیستم اندازه بزرگ آن است که مانع از انتقال آن با استفاده از ناقل‌های ویروسی می‌شود. پروتئین‌های دیگری نیز وجود دارند که دارای فعالیت اندونوکلئازی خوبی هستند، مانند CPF_1 که در دسته II کریسپر قرار دارد و از نظر ساختاری و عملکردی تفاوت‌هایی با Cas۹ دارد. این پروتئین‌ها به صورت زیرهستند: **الف**– فعالیت آن‌ها تنها به وجود یک CrRNA وابسته است و نیازی به Trace-RNA ندارد. **ب**– ایجاد روش‌هایی با انتهای اضافه که خود موجب افزایش ضریب ورود یک بخش ژنی به ژنوم می‌شود. **پ**– جایگاه PAM آن دارای فرمت '۵ -TTTN- '3 است که غنی از تیمین است. **ت**– تنها دارای یک دامنه برش‌دهنده مانند Ruv-C است. از دیگر ویژگی‌های CPF1-Cas9 توانایی آن در ایجاد شکست دو رشته‌ای و شکل‌گیری انتهای چسبنده است که به افزایش کارایی سیستم ترمیمی HDR کمک می‌کند و از دیگر سودمندی‌های CPF1-Cas9 کوچک‌تر بودن آن نسبت به Cas9 است. (شکل ۶)

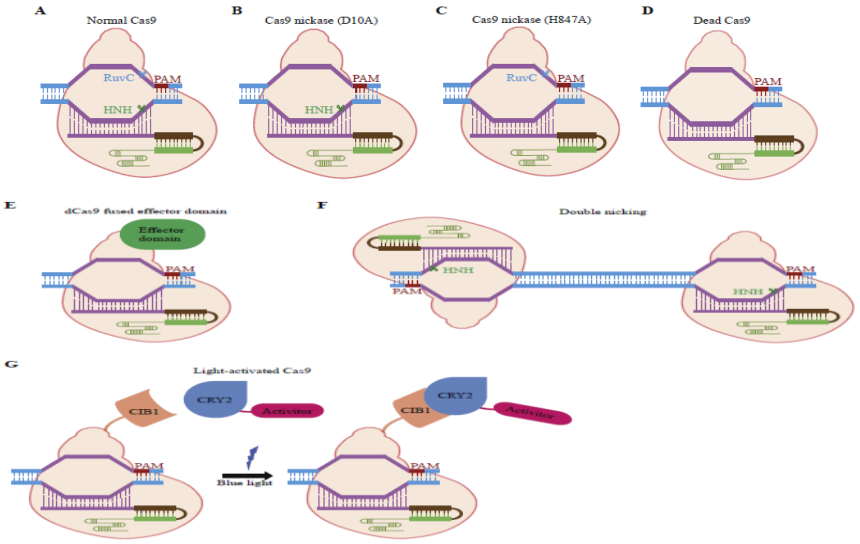
انتظار می‌رود در آینده‌ای نه چندان دور کیت‌های Crisper-Cas9 به عنوان ابزار مولکولی متشکل از شکل‌های متفاوت پروتئین Cas9 و ساختارهای متنوع gRNA و انواع مولکول‌ها برای اهداف ویژه گسترش یابند (بیات و همکاران، ۱۳۹۶؛ Mei *et al*.,2016).

کاربردهای فناوری کریسپر در صنعت غذا

غذاهای تخمیری در بین خوراکی‌های موجود بخش اساسی را تشکیل می‌دهند و در شیر، گوشت و خیار، دانه‌ها و

1. Nickase 2. Dead Cas9 3. RNA-guided FokI-nucleases 4. Promoter

بسیاری از دیگر فرآورده‌های تخمیری وجود دارد و در این میان محیط‌های کشت آغازگر[1] نقش بسیار مهمی در تولید این مواد غذایی به عهده دارند. کشت های آغازگر و پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های مفیدی هستند که چندین نقش در فرآوری ماده غذایی دارند. این ارگانیسم‌ها در انجام فرآیندهای تخمیری باید به صورت خالص باشند و فرآیند تخمیر را انجام دهند، اما زیر تاثیر باکتریوفاژها عملکرد آن‌ها دچار اختلال می‌شود. هر دو گروه باکتری‌هایی که به عنوان محیط‌های کشت آغازگر و پروبیوتیک استفاده می‌شوند دارای سیستم کریسپر می‌باشند. این سیستم در ۶۲٪ ژنوم *Lactobacillus* و ۷۷٪ ژنوم *Bifidobacteria* مشاهده شد. وجود سیستم کریسپر در این میکروارگانیسم‌ها و تنوع این سیستم، بایگانی تاریخی از انواع مختلف فاژها در بخش زیادی از محصول‌های تخمیری را به وجود آورده است و در این میان سیستم کریسپر می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت فرآورده‌های تخمیری برای استفاده از آن در افزایش مقاومت فاژی، واکسینه‌شدن پلاسمیدی، ویرایش ژنوم و فعالیت‌های ضدباکتریایی مورد استفاده قرارگیرد. فناوری کریسپر ابزاری است که می‌تواند در میکروارگانیسم های بیماری‌زا و عامل فساد مفید باشد (Rainha *et al.* 2020).



شکل۶- اصلاح کردن ها جهت کارامد تر کردن پروتئین Cas9.

نوع سویه[2]

صنعت تولید محیط‌های کشت آغازگر نیاز به روش‌هایی دارد تا بتوان به صورت دقیق نوع سویه باکتری را مشخص‌کرد. داشتن توانایی تشخیص دقیق تفاوت‌ها بین سویه‌های مختلف به ویژه در مورد محیط‌کشت‌های آغازگر برای بهینه‌کردن، جداسازی و تشخیص پتانسیل‌های آغازگرهای جدید برای استفاده در صنعت ضروری می‌باشد که شماری از این روش‌ها شامل استفاده از ژل‌های الکتروفورز، PCR و مانند این‌ها است. همه این روش‌ها با این هدف استفاده می‌شوند که بتوان با سرعت زیاد و هزینه کم و دقت زیاد سویه‌های مختلف را جداسازی کرد. آرایه کریسپر یک روش بسیار مناسبی است که می‌توان این کار را انجام دهد. وجود آرایه کریسپر در سویه باکتری می‌تواند یک عامل مهم برای استفاده از کارایی آن باشد. کریسپر به صورت موفق برای جداسازی و شناخت میکروارگانیسم‌ها در صنعت قابل استفاده است. آرایه کریسپر به صورت ترکیب با ژن‌های Cas برای جداسازی سویه های *Lactobacillus casei and*

1. Starter culture
2. Strain typing

paracasei استفاده شد که نشان داد کریسپر در سویه های مختلف بخش‌های متفاوتی از ژنوم را شامل می‌شود. نژادگان[1] پایه کریسپر در *Lactobacillus* و سایر میکروارگانیسم‌ها که در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند متفاوت باشد. کریسپر برای دیگر میکروارگانیسم‌های غیرآغازگر مانند *Enterococcus faecali* نیز استفاده می‌شود. اگرچه وجود تفاوت در توالی کریسپر را نمی‌توان مبنایی برای تفاوت در سطح نژاد قرار داد، اما می‌تواند تفاوت بین سویه‌های مختلف را به وسیله این روش تعیین کرد. درنتیجه، بصورت چکیده می‌توان گفت که نژادگان کریسپر می‌تواند یک روش مؤثر برای تشخیص میکروارگانیسم‌های مفید در صنعت غذا باشد. برای نمونه، در باکتری *Lactobacillus buchneri*که عامل فساد است نوع II کریسپر وجود دارد و به طور معمول در خیارشور تخمیری دیده می‌شود. از این رو، می‌توان به صورت معمول از گونه‌هایی که دارای سیستم کریسپر هستند برای تخمین شمار باکتری‌های عامل فساد استفاده‌کرد.

کریسپر برای تشخیص و تعیین باکتری‌های بیماری‌زای غذازاد[2] مانند *Salmonella* نیز استفاده می‌شود. افزون بر این، شماری از بیماری‌زاها مانند *Campylobacter jejuni*، *Clostridium difficile*، *Corynebacterium diphtheria*، *Staphylococcus aureus* و *Vibrio parahaemolyticus* نیز به صورت پایه‌ای دارای ساختار کریسپر هستند.

گونه‌های مختلف باکتریایی با هم به مقدار زیادی مشابه هستند و گاهی تا ۹۹٪ تشابه دارند و تفاوت بین آن‌ها بسیار اندک است. برای جداسازی این گونه‌ها روش‌های مختلف ژنتیکی وجود دارد که بسیار زمان‌بر بوده و از این رو، از روش کریسپر برای جداسازی آن‌ها استفاده می‌شود.

برای توالی ویژه که در یک گونه نسبت به گونه مورد نظر برای جداسازی متفاوت است و هدف این است که این گونه از بین برود یک gRNA طراحی می‌شود و با مجموعه کریسپر وارد مجموعه باکتریایی مورد نظر می‌شود. بنابراین، به تمام باکتری‌ها وارد شده و تنها در گونه‌ای که توالی مکمل دارد، متصل می‌شود و موجب از بین رفتن باکتری می‌شود. باکتری‌هایی که این توالی مکمل را ندارند از فعالیت کریسپر در امان می‌مانند و از این رو خالص‌سازی می‌شوند. این روش برای تفاوت در یک نوکلئوتید نیز انجام‌شدنی است (Parsaeimehr *et al*., 2022; Stout *et al*.2017; Bikard & Barrangou, 2017).

مقاومت فاژی

فاژها امروزه به عنوان چالشی در صنعت غذاها و صنایع تخمیری مطرح هستند و موجب ایجاد خسارت‌های اقتصادی می‌شوند. در صنعت غذا برای کاهش این خسارت‌ها برخی از کارها انجام می‌شود؛ از جمله تغییردادن عامل‌های طراحی، دستورکارهای فرآیند، تغییر محیط کشت و مانند این ها. وجود فاژها یکی از دلیل‌های آهسته یا انجام نشدن فرآیند تخمیر در صنعت غذا به حساب می‌آیند. فاژها توسط مواد اولیه وارد شده و در برابر دما، فشار بالا، پرتوهای رادیویی و پاستوریزه کردن مقاومند. سیستم کریسپر سازوکاری است که یاخته برای محافظت خود در مقابل DNA خارجی از آن استفاده می‌کند. برای بررسی این مسئله، باکتری *Streptococcus thermophilus* در ۴ مرحله در برابر ۴ فاژ متفاوت قرار گرفت و در هر مرحله، باکتری‌هایی که نسبت به فاژ مقاوم نبودند از بین رفته و باکتری‌های مقاوم باقی می‌مانند. پس از انجام ۴ مرحله، مشخص شد که باکتری‌های باقی مانده نسبت به هر ۴ فاژ مقاوم شده‌اند که دلیل آن قرار گرفتن بخشی از ژنوم فاژهای مربوطه در داخل ساختار کریسپر باکتری بوده است. سودمندی این مسئله این است که این یک ساختار طبیعی بوده و در

1. Genotype
2. Foodborne disease

شماری از میکروارگانیسم‌های عامل تخمیر وجود دارد که می‌توان از آن برای ایمن‌سازی در برابر فاژها استفاده نمود (Barrangou *et al.* 2013).

واکسینه‌کردن پلاسمید

پلاسمیدها توالی‌هایی هستند که گاهی برای باکتری‌ها مفید و گاهی نیز زیانبار هستند، چون باکتری برای تکثیر این پلاسمید نیاز به مصرف انرژی زیادی دارد. برای مهندسی کردن فرایند واکسینه شدن باکتری‌ها در مقابل پلاسمید، بخشی از ژنوم پلاسمید (Spacer) که مربوط به ناحیه‌ای خاص از پلاسمید است و بیشتر مربوط به مبدا همانندسازی[1] (ناحیه تکثیر) است را در نظر گرفته و آن را به باکتری منتقل می‌کنند و با این روش باکتری در مقابل پلاسمید مقاوم می‌شود. این بخش دارای اشتراک‌های زیادی در بیشتر پلاسمیدها است و انتقالش به داخل باکتری، آن را در مقابل دامنه وسیعی از پلاسمیدها مقاوم می‌سازد.

پلاسیمدها در حالت طبیعی دارای صفت Malthusian Fitness Burden هستند که آن‌ها را از یاخته میزبان عبور می‌دهد. از این رو، هنگامی‌که پلاسمید با یک یاخته که دارای سیستم کریسپر است برخورد می‌کند، وارد یاخته میزبان شده و یاخته یک توالی از ژنوم پلاسمید را دریافت نموده و آن را در آرایه کریسپر خود قرار می‌دهد و خود در مقابل دریافت این پلاسمید واکسینه می‌شود. سودمندی عمومی این کار این است که یاخته در مقابل خود پلاسمید واکسینه می‌شود.

یکی از دشواری‌های موجود در صنعت غذا مقاومت پادزیستی است و این امکان وجود دارد که سویه‌های دارای ژن‌های مقاومت به پادزیست به عنوان مخزنی برای انتقال به سایر میکروارگانیسم‌ها عمل کنند. از این رو، سودمندی دیگرش این است که یاخته در مقابل دریافت DNAهای نامطلوب مانند ژن‌های مقاومت به پادزیست که بیشتر با پلاسمیدها منتقل می‌شوند نیز واکسینه می‌شود. اگرچه این حالت به صورت طبیعی انجام می‌شود، اما در مهندسی ژنتیک نیز انجام‌پذیر است. با قرار دادن ژن مقاوم به پادزیست در آرایه[2] کریسپر باکتری، این یاخته در مقابل وجود این ژن و ورود پلاسمیدهای ناقلش مقاوم می‌شود که در *Streptococcus thermophilus* این کار با موفقیت انجام شده است. همچنین، ژن‌های مقاومت به پادزیست از یاخته‌هایی که حاوی سیستم کریسپر نبوده‌اند به یاخته‌های حاوی این سیستم منتقل گردید و مقاومت به پادزیست در این یاخته‌های گیرنده نیز تایید شد؛ مانند انتقال از *Staphylococcus* به باکتری *E. coli* و این کار نه تنها در مورد فاژها، بلکه در مورد تمام ژنوم‌های خارجی ورودی نامطلوب مانند ژن‌های مقاومت به پادزیست می‌تواند مؤثر باشد.

ویرایش ژنوم

ویرایش با سیستم کریسپر توسط عامل‌هایی که پیش از این شرح داده شد، انجام می‌شود. برای ایجاد ویرایش ژنی در باکتری، باید یک سری عامل‌ها مانند فیزیولوژی باکتری‌ها و سازوکار هم‌ایستایی[3] DNA توجه شود. برای نمونه، شکستن دو رشته DNA در یاخته به احتمال زیاد به مرگ یاخته می انجامد. البته، در صورتی که سازوکار تعمیر درون DNA در یاخته وجود نداشته باشد. به صورت تئوری می‌توان از وجود سیستم کریسپر برای گزینش نژادگان‌های مناسب برای انجام فرآیندهای صنعتی استفاده کرد.

با استفاده از ویرایش ژنوم می‌توان باکتری‌هایی با توانمندی‌های بیشتر و عملکرد بالاتر برای استفاده در صنعت تولید

1. Original replication 2. Array 3. Hemostasis

نمود که این موضوع در تولید آغازگرهایی با توانمندی‌های عملکردی بیشتر و مقاوم‌تر و همچنین افزایش توانمندی‌های باکتری‌های پروبیوتیک در تولید ترکیب‌های مفید و همچنین سایر موردها مطرح است. این روش بیشتر در یاخته‌های یوکاریوتی بوده و در پروکاریوت‌ها خیلی کاربردی ندارد، زیرا بعد از شکسته‌شدن DNA توسط کریسپر سیستم تعمیر DNA باید فعال شده و آن را به هم متصل کند که این سیستم در یاخته‌های پروکاریوتی وجود ندارد. از این رو، وارد کردن سیستم کریسپر به داخل پروکاریوت‌ها و شکسته شدن ژنوم با آن موجب از بین رفتن پروکاریوت‌ها می‌شود؛ در حالی‌که سیستم تعمیر در یوکاریوت‌ها فعال بوده و عمل تعمیر را انجام می‌دهد. این سیستم برای ژنوم‌های خارجی عملکرد مناسبی دارد، اما برای ژنوم خود باکتری موجب مرگ آن می‌شود (Stout *et al*., Bikard & Barrangou, 2017; Parsaeimehr *et al*., 2022; 2017).

فعالیت‌های ضدمیکروبی

باکتری‌ها اغلب بدون سیستم ترمیم DNA هستند و اگر این رشته‌ها با سیستم کریسپر شکسته شوند، باکتری از بین خواهد رفت؛ اگرچه این ویژگی ابزاری در سیستم باکتری‌ها محسوب می‌شود، اما می‌توان از آن به عنوان روشی ضدباکتریایی استفاده کرد که این تخریب با سیستم کریسپر و بازسازی نشدن آن توسط باکتری به کاهش شمار میکروارگانیسم‌ها در محیط می‌انجامد. امروزه استفاده از محیط کشت‌های مخلوط در صنعت بسیار رواج دارد که یکی از دلیل های این رواج کاهش خطر آسیب فاژها در صنعت است. اگرچه محیط کشت‌های مخلوط در صنعت دارای سودمندی‌های زیادی هستند، اما دارای ایرادهایی نیز می‌باشند. برای نمونه، جداسازی سویه‌ها بسیار سخت است، چون گونه‌ها دارای فیزیولوژی نزدیکی هستند و آلوده‌شدن محیط کشت مخلوط با یک موجود خارجی می‌تواند کنترل آن را با دشواری روبه‌رو کند.

در روش‌های تجاری برای جداسازی گونه‌ها و کنترل شرایط جمعیتی مخلوط به موردهایی مانند شرایط رشد پادزیست‌ها، پپتیدهای ضدمیکروبی و باکتریوفاژها باید توجه شود. اگرچه ویژگی ضدمیکروبی کریسپر هنوز در میکروارگانیسم‌های تخمیری صنعتی نشده است، اما کارایی آن در سایر گروه‌های میکروبی نویدبخش این مسئله است که می‌توان ازآن در صنایع نیز استفاده کرد. نشان داده شده است که با استفاده از ویژگی ضدمیکروبی کریسپر می‌توان دو زیرگونه *E. coli* که دارای ۹۹٪ اشتراک در توالی هستند را جداسازی کنند. علت آن است که قطعه‌های Spacer موجود در آرایه کریسپر بسیار اختصاصی هستند. همچنین، مشخص شد هنگامی که حذف کامل مطلوب نباشد از ویژگی ضدمیکروبی کریسپر می‌توان برای تغییر شرایط کشت مخلوط استفاده کرد (Bikard & Barrangou, 2017; Stout *et al*., 2017).

مشخص شده است که سیستم طبیعی کریسپر با توانایی که در حذف انتخابی گونه‌های مختلف در جمعیت میکروبی دارد می‌تواند به عنوان ابزار ضدمیکروبی قوی و قابل برنامه‌ریزی عمل کنند. در روش دیگری که ویژگی ضدمیکروبی کریسپر آزمایش شد به وسیله این سیستم توالی خاصی که مسئول تولید یک نوع ترکیب ویژه و یا پروتئین ویژه‌ای است را تخریب نمودند که این کار موجب کاهش تولید ترکیب و کاهش مقاومت میکروارگانیسم در مقابل داروها و پادزیست‌های مرسوم شد. با استفاده از سیستم کریسپر به عنوان یک پادزیست و ضدمیکروب، مقاومت به پادزیست‌ها نیز به احتمال زیاد حل خواهد شد. هرچند در متن حاضر بیشتر از کارایی کریسپر در موردباکتری‌های غذایی صحبت شد، این فناوری از مزرعه تا تولید نهایی در صنعت و کشاورزی نیز استفاده می‌شود (Stout *et al*., 2017; Bikard & Barrangou, 2017).

نتیجه گیری

همان طور که بیان شد، برش هدفمند و برنامه ریزی شده مولکول DNA با استفاده از سیستم CRISPR-Cas9) امکان مهندسی و ویرایش ژنوم را فراهم می آورد که از این فناوری می‌توان در اصلاح ژنتیکی گیاهان، جانوران ، باکتری‌ها و سایر موجودها استفاده نمود. این فناوری هر روزه در حال پیشرفت بوده و کاستی‌های آن برطرف می‌شود اگر چه این فناوری دارای سودمندی‌های زیادی است، اما انکار ناپذیر است که ممکن دارای تأثیرهای خارج از هدف و یا اثرهای جانبی باشد. دانشمندان هنوز در حال پژوهش برای تعیین بی‌خطر و موثر بودن این روش برای استفاده در انسان‌ها می‌باشند. این روش در پژوهش‌ها و آزمایش‌های بالینی برای دامنه گسترده‌ای از بیماری‌ها، از جمله اختلال‌های تک ژنی مانند فیبروز کیستیک، هموفیلی و کم خونی داسی شکل بررسی شده است. همچنین، این سیستم نویدبخش درمان و پیشگیری از بیماری‌های پیچیده‌تر مانند سرطان، بیماری‌های قلبی، بیماری‌های روانی و عفونت ویروس نقص ایمنی انسانی یا HIV[1] است. به هر حال، نگرانی‌های اخلاقی زمانی به وجود می‌آیند که ویرایش ژنوم با استفاده از فناوری‌هایی مانند CRISPR-Cas9 برای تغییر ژنوم انسان استفاده می‌شود.

منابع

بیات، هادی؛ نادری، فاطمه؛ محمدیان، امید؛ رحیم پور، اعظم. (۱۳۹۶). سیستم کریسپر و پیشرفت های اخیر در دقت عملکرد ان. مجله دانشگاه علوم پزشکی جیرفت.

پروین، محمدرضا؛ سیدین، علی. (۱۳۹۶). فناوری ویرایش ژن CRISPER CAS9 از منظر حقوق مالکیت فکری و ایمنی زیستی. فصلنامه حقوق پزشکی.

جدیدی، مطهره؛ عرب، ابوالفضل. (۱۳۹۵). سیستم ژن درمانی CRISPR/Cas ابزاری نوین برای درمان بیماری های ژنتیکی پیچیده. دو فصلنامه علمی دانشجویی زیست شناسی.

ولیان بروجنی، صادق؛ محمدی فارسانی، فرزانه. (۱۳۹۶). تکنولوژی CRISPR/Cas و کاربرد آن در درمان بیمار یهای ژنتیکی. فصلنامه آزمایشگاه و تشخیص . انجمن دکترای علوم آزمایشگاهی تشخیص طبی ایران. ۳۷

Anders, C., Niewoehner, O., Duerst, A., & Jinek, M. (2014). Structural basis of PAM-dependent target DNA recognition by the Cas9 endonuclease. *Nature*, *513*(7519), 569–573. https://doi.org/10.1038/nature13579

Barrangou R. (2015). The roles of CRISPR-Cas systems in adaptive immunity and beyond. *Current opinion in immunology*, *32*, 36–41. https://doi.org/10.1016/j.coi.2014.12.008

Barrangou, R., Coûté-Monvoisin, A. C., Stahl, B., Chavichvily, I., Damange, F., Romero, D. A., Boyaval, P., Fremaux, C., & Horvath, P. (2013). Genomic impact of CRISPR immunization against bacteriophages. *Biochemical Society transactions*, *41*(6), 1383–1391. https://doi.org/10.1042/BST20130160

Bikard, D., & Barrangou, R. (2017). Using CRISPR-Cas systems as antimicrobials. *Current opinion in microbiology*, *37*, 155–160. https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.08.005

Brandt, K., & Barrangou, R. (2019). Applications of CRISPR Technologies Across the Food Supply Chain. *Annual review of food science and technology*, *10*, 133–150. https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-121204

Bennett, E. P., Petersen, B. L., Johansen, I. E., Niu, Y., Yang, Z., Chamberlain, C. A., Met, Ö., Wandall, H. H., & Frödin, M. (2020). INDEL detection, the 'Achilles heel' of precise genome editing: a survey of methods for accurate profiling of gene editing induced indels. *Nucleic acids research*, *48*(21), 11958–11981. https://doi.org/10.1093/nar/gkaa975

Eş, I., Gavahian, M., Marti-Quijal, F. J., Lorenzo, J. M., Mousavi Khaneghah, A., Tsatsanis, C., Kampranis, S. C., & Barba, F. J. (2019). The application of the CRISPR-Cas9 genome editing machinery in food and

1. Human immunodeficiency virus

agricultural science: Current status, future perspectives, and associated challenges. *Biotechnology advances*, *37*(3), 410–421. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.02.006

Gallo, M E. Sarata, A K. Sargent, J F & Cowan, T. (2018). Advanced Gene Editing: CRISPR-Cas9. Congressional Research Service. https://crsreports.congress.govR44824

Hryhorowicz (Boksa), M. Lipiński, D. Zeyland, J & Slomski, R. (2016). CRISPR/Cas9 Immune System as a Tool for Genome Engineering. Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis. 65. 10.1007/s00005-016-0427-5.

Javaid, N., & Choi, S. (2021). CRISPR/Cas System and Factors Affecting Its Precision and Efficiency. *Frontiers in cell and developmental biology*, *9*, 761709. https://doi.org/10.3389/fcell.2021.761709

Jiang, F., & Doudna, J. A. (2017). CRISPR-Cas9 Structures and Mechanisms. *Annual review of biophysics*, *46*, 505–529. https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-062215-010822

Pineault, K. M., Novoa, A., Lozovska, A., Wellik, D. M., & Mallo, M. (2019). Two CRISPR/Cas9-mediated methods for targeting complex insertions, deletions, or replacements in mouse. *MethodsX*, *6*, 2088–2100. https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.09.003

Lander E. S. (2016). The Heroes of CRISPR. *Cell*, *164*(1-2), 18–28.https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.12.041

Mei, Y., Wang, Y., Chen, H., Sun, Z. S., & Ju, X. D. (2016). Recent Progress in CRISPR/Cas9 Technology. *Journal of genetics and genomics = Yi chuan xue bao*, *43*(2), 63–75. https://doi.org/10.1016/j.jgg.2016.01.001

Meiliana, A. Dewi, N & Wijaya, A. (2017). Genome Editing with Crispr-Cas9 Systems: Basic Research and Clinical Applications. *The Indonesian Biomedical Journal*. 9. 1. 10.18585/inabj.v9i1.272.

Mokarova, K. S., Wolf, Y. I., Alkhnbashi, O. S., Costa, F., Shah, S. A., Saunders, S. J., Barrangou, R., Brouns, S. J., Charpentier, E., Haft, D. H., Horvath, P., Moineau, S., Mojica, F. J., Terns, R. M., Terns, M. P., White, M. F., Yakunin, A. F., Garrett, R. A., van der Oost, J., Backofen, R., … Koonin, E. V. (2015). An updated evolutionary classification of CRISPR-Cas systems. *Nature reviews. Microbiology*, *13*(11), 722–736. https://doi.org/10.1038/nrmicro3569

Mokarova, K. S., Haft, D. H., Barrangou, R., Brouns, S. J., Charpentier, E., Horvath, P., Moineau, S., Mojica, F. J., Wolf, Y. I., Yakunin, A. F., van der Oost, J., & Koonin, E. V. (2011). Evolution and classification of the CRISPR-Cas systems. *Nature reviews. Microbiology*, *9*(6), 467–477. https://doi.org/10.1038/nrmicro2577

Mokarova, K. S., & Koonin, E. V. (2015). Annotation and Classification of CRISPR-Cas Systems. *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*, *1311*, 47–75. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2687-9_4

Niewoehner, O., Garcia-Doval, C., Rostøl, J. T., Berk, C., Schwede, F., Bigler, L., Hall, J., Marraffini, L. A., & Jinek, M. (2017). Type III CRISPR-Cas systems produce cyclic oligoadenylate second messengers. *Nature*, *548*(7669), 543–548. https://doi.org/10.1038/nature23467

Parsaeimehr, A., Ebirim, R. I., & Ozbay, G. (2022). CRISPR-Cas technology a new era in genomic engineering. *Biotechnology reports (Amsterdam, Netherlands)*, *34*, e00731. https: //doi.org/ 10.1016/j.btre. 2022.e00731

Selle, K., & Barrangou, R. (2015). CRISPR-Based Technologies and the Future of Food Science. *Journal of food science*, *80*(11), R2367–R2372. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13094

Rainha, J., Rodrigues, J. L., & Rodrigues, L. R. (2020). CRISPR-Cas9: A Powerful Tool to Efficiently Engineer *Saccharomyces cerevisiae*. *Life (Basel, Switzerland)*, *11*(1), 13. https://doi.org/ 10.3390/life11010013

Stout, E., Klaenhammer, T., & Barrangou, R. (2017). CRISPR-Cas Technologies and Applications in Food Bacteria. *Annual review of food science and technology*, *8*, 413–437. https://doi.org/10.1146/annurev-food-072816-024723

Wei, Y., Terns, R. M., & Terns, M. P. (2015). Cas9 function and host genome sampling in Type II-A CRISPR-Cas adaptation. *Genes & development*, *29*(4), 356–361. https://doi.org/10.1101/gad.257550.114

Yao, R., Liu, D., Jia, X., Zheng, Y., Liu, W., & Xiao, Y. (2018). CRISPR-Cas9/Cas12a biotechnology and application in bacteria. *Synthetic and systems biotechnology*, *3*(3), 135–149. https://doi.org/ 10.1016/j.synbio.2018.09.004

Zhang, X. H., Tee, L. Y., Wang, X. G., Huang, Q. S., & Yang, S. H. (2015). Off-target Effects in CRISPR/Cas9-mediated Genome Engineering. *Molecular therapy. Nucleic acids*, *4*(11), e264. https://doi.org/10.1038/mtna.2015.37

Joberty, G., Fälth-Savitski, M., Paulmann, M., Bösche, M., Doce, C., Cheng, A. T., Drewes, G., & Grandi, P. (2020). A Tandem Guide RNA-Based Strategy for Efficient CRISPR Gene Editing of Cell Populations with Low Heterogeneity of Edited Alleles. *The CRISPR journal*, *3*(2), 123–134. https://doi.org/10.1089/crispr.2019.0064

Ishino, Y., Krupovic, M., & Forterre, P. (2018). History of CRISPR-Cas from Encounter with a Mysterious Repeated Sequence to Genome Editing Technology. *Journal of bacteriology*, *200*(7), e00580-17. https: //doi.org/10.1128/JB.00580-17

Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9(1):1-18 (2024)

Crisper Technology and Its Application in Food Industries

Yazdanpanah, E.[1], Eghbalsaid Abueshaghi, S. and Khomeiri, M.[2]

Increasing world population and food supply is one of the challenges facing mankind. One of the most important and effective ways to increase food production is the use of genetic engineering; and CrisperCas9 is one of the new known and accurate genome editing methods. Simplicity of use, cheaper, accuracy and proper efficiency are among the most important features of this technology that make it different from other similar methods. CrisperCas9 is somehow related to the immune system related to a short sequence of DNA. In fact, CRISPR is the prokaryotic immune system that creates resistance to external threats, such as DNA phages, plasmids, and viruses. This system has three main parts. A part of it is CrRNA which has a repetitive sequence. which is complementary to the sequence in Trac RNA. CrRNA binds to the target site through its complement, and the Trac RNA sequence also binds to its complement, which is the repetitive sequences in CrRNA. This spatial structure causes the Cas9 protein to be called to the target site. In the food industry, the CRISPR system can be used as a powerful tool in the management of fermentation products for its use in increasing phage resistance, plasmid vaccination, genome editing, and antibacterial activities, which are reviewed in this article.

Key words: Cas9, CRISPR technology, Food industry, Genome.

1. Corresponding author, Email: ehsany81@yahoo.com
2. Ph.D. Student of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Professor of Islamic Azad University, Khorasan Branch and Professor of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, respectively.

مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۹ شماره ۱ صفحه‌های ۱۹ تا ۳۴ (۱۴۰۳)

کاهش تدریجی مصرف آب کشاورزی گامی مؤثر در سازگاری با کمبود آب در ایران[1]

شاهرخ زندپارسا[2]، شهره دیداری و علیرضا سپاس‌خواه[3]

چکیده

رشد جمعیت در سال‌های گذشته، توسعه اقتصادی مرتبط با کشاورزی فاریاب و تغییر رژیم غذایی موجب افزایش شدید مصرف آب در ایران در سه دهه اخیر شده‌است. مصرف آب در ایران نسبت به آب تجدیدپذیر از چندین دهه گذشته پیوسته بیشتر از ۴ برابر حد آستانه شروع تنش آبی رسیده است. برابر نتایج واکاوی ماهواره GRACE[4]، مقدار تخلیه سالانه منابع آب‌های زیرزمینی حدود ۱۵/۹ میلیارد مترمکعب برآورد شد که این عدد به اشتباه توسط دیگر متخصصان، ۴/۷ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده‌است. در پژوهش حاضر، با استفاده از نتایج ماهواره GRACE، کسری مخزن آب‌های زیرزمینی در سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ بر خلاف مقدار گزارش شده یعنی ۱۴۳ میلیارد مترمکعب، بیش از ۳۵۰ میلیارد مترمکعب برآورد شد. در ایران، برای متعادل کردن مصرف آب، در عمل از کاهش مصرف آب پرهیز شده است و در واقع، با ساخت سدهای زیاد و حفر فراوان چاه‌ها، آب بیشتری از سهمیه محیط‌زیست مصرف شده است. برای جلوگیری از رسیدن به شروع تنش آبی شدید یا مصرف ۶۰٪ آب تجدیدپذیر، توصیه می‌شود که ۴۴٪ از مصرف آب کشاورزی کاسته شود. این کاهش زیاد، دشواری‌های بسیار زیادی مانند جلب موافقت و همکاری کشاورزان برای مشارکت در کاهش مصرف آب، تحویل حجمی آب، تأمین ارز کافی برای واردات محصول‌های کشاورزی، ایجاد شغل‌هایی مستقل از آب و آبیاری برای کشاورزان و افزایش شدید قیمت محصول‌های کشاورزی را در پی دارد.

واژه‌های کلیدی: آب شرب، آب کشاورزی، آب زیرزمینی، آب صنعت، ماهواره GRACE.

مقدمه

برداشت آب شیرین برای کشاورزی، صنعت و مصرف‌های شهری در جهان از سال ۱۹۰۰ تا به حال به تقریب به ۶ برابر رسیده که از دهه ۱۹۵۰ به بعد، مصرف به‌شدت افزایش یافته است. در ایران نیز با رشد جمعیت در سال‌های گذشته، توسعه اقتصادی مرتبط با کشاورزی فاریاب و تغییرهای رژیم غذایی موجب شده است تا مصرف آب در سه دهه اخیر به شدت افزایش یابد. با کاهش بارش‌های جوی در سال‌های اخیر و وابستگی محصول‌های کشاورزی به

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۱

۲- نویسنده مسئول، پست الکترونیک: zandparsa@yahoo.com

۳- به‌ترتیب استاد دانشگاه شیراز (عضو مدعو فرهنگستان علوم)، استادیار دانشگاه شیراز و استاد دانشگاه شیراز (عضو پیوسته فرهنگستان علوم).

4. Gravity recovery and climate experiment

مصرف آب، آب‌های تجدیدپذیر کاهش یافته‌است و برداشت آب از سهمیه محیط زیست به شدت افزایش یافته است. مصرف آب در ایران از چندین دهه گذشته به‌طور مداوم از حد آستانه شروع تنش آبی یعنی یک چهارم آب تجدیدپذیر به تقریب به بیشتر از ۴ برابر آن رسیده است. شناخت و داشتن اطلاعات به نسبت دقیق از بخش‌های مختلف منابع آب شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی برای توسعه پایدار کشاورزی و حفاظت از محیط زیست لازم است.

در سال‌های پیش نیز افزایش مصرف آب در کشورهای دیگر اتفاق افتاده بود که برای کنترل و جلوگیری از خسارت‌های وارده به محیط‌زیست، کاهش مصرف آب در پیش گرفته‌شد. برای نمونه، کاهش تدریجی ۳۰٪ آب مصرفی در دوره زمانی ۱۰ ساله (۱۹۷۵ تا ۱۹۸۵) در منطقه یوما در آمریکا (Frisvold *et al*, 2018) و کاهش تدریجی ۱۵٪ آب مصرفی در دوره زمانی ۱۹ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۰۴) در اسپانیا (De Stefano *et al*., 2015) موجب شد تا به مقدار مصرف متعادل نزدیک شوند. در این کشورها پس از کاهش مصرف آب به روش‌های مختلف و متناسب با شرایط اقلیمی، خاک، آب و محیط‌زیست هر منطقه، راندمان آبیاری و بهره‌وری آب افزایش داده شد.

در ایران، میانگین حجمی بارندگی سالانه در دوره ۴۵ ساله از سال آبی ۱۳۴۵ تا ۱۳۴۶ و ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۰ برابر ۳۹۶ میلیارد مترمکعب بوده است، که از کل بارندگی بخش زیادی صرف تبخیر شده و باقیمانده حجم آب تجدیدپذیر کشور (تولیدشده در داخل کشور) را تشکیل می‌دهد. میانگین مقدار آب تجدیدپذیر در این دوره برابر ۱۱۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شد و در این دوره حجم کل برداشت آب برای مصرف‌های مختلف از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی کشور برابر ۹۸/۹ میلیارد مترمکعب و مصرف بخش کشاورزی برابر ۸۵/۸ میلیارد مترمکعب در سال گزارش شد (کشاورز و همکاران، ۱۴۰۰ به گفته شرکت مدیریت منابع آب کشور). بر اساس آخرین آماربرداری بیلان منابع و مصرف‌های آب در کشور، در دوره ۴۵ ساله پیش از ۱۳۹۵، مصرف آب به ترتیب در کل کشور و بخش کشاورزی برابر ۹۶/۳۷ و ۸۵/۶ میلیارد مترمکعب در سال گزارش شده است. به علت کاهش بارندگی در سال‌های اخیر در دوره ۱۰ ساله ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ مقدار آب تجدیدپذیر ۸۸ میلیارد مترمکعب در سال گزارش شده است. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت کمبود آب در ایران، برنامه‌ریزی گسترده‌ای را برای تعیین حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی انجام داده است. در این راستا، در آغاز مؤلفه‌های بیلان آب در چرخه هیدرولوژی کشور برآورد شد و بر اساس آن، حجم مصرف آب در بخش کشاورزی برآورد شده است (عباسی و عباسی، ۱۳۹۹). برای دو دوره ۵۱ ساله (بلندمدت) و هفت ساله (کوتاه‌مدت)، حجم مصرف آب در بخش کشاورزی به ترتیب معادل ۱۸ ±۶۷ و ۵ ± ۷۲ میلیارد مترمکعب برآورد شده است (به ترتیب برابر ۵۲ و ۷۱٪ از کل آب به دست آمده). همان‌طور که دیده می‌شود عددها و رقم‌های ارائه شده برای حجم آب به دست آمده از بارندگی، حجم آب تجدیدپذیر و آب اختصاص‌یافته به کشاورزی تفاوت زیادی دارند و در مورد درستی آن‌ها به ویژه برآورد حجم برداشت از آب‌های زیرزمینی بدون اندازه‌گیری، تردید جدی وجود دارد. آن‌چه مشخص است، دشواری‌های موجود در بسیاری از منطقه‌های ایران مانند خشک‌شدن دریاچه‌های ارومیه، طشک و بختگان، تالاب گاوخونی و دیگر دریاچه‌ها و فرونشست‌ها و فروچاله‌های ایجاد شده در بیشتر دشت‌های ایران، به دلیل رعایت نکردن سهمیه محیط زیست در مصرف آب و حتی مصرف آب بیشتر از مقدار آب تجدیدپذیر است. با مصرف بیش از حد آب‌های زیرزمینی، میانگین سالانه کسری آبخوان‌های کشور برابر ۴/۷ میلیارد مترمکعب با مقدار تجمعی ۱۴۳ میلیارد مترمکعب برآورد

شده است (اسدی و عبدالمنافی، ۱۴۰۱). برای برون‌رفت نسبی از این بحران باید با گزینش راهبرد ملی و اجرای دقیق آن در سطوح مدیریت آب، تا حد ممکن از پیامدهای این بحران کاست (سپاس خواه، ۱۴۰۰).

منابع آب زیرزمینی در کشور بعنوان یکی از منابع مهم برای تأمین آب مورد نیاز در کشاورزی، شرب و صنعت است. برآورد حجم برداشت مجاز و پایدار آب‌های زیرزمینی برای هر منطقه بستگی به عامل‌های محلی ویژگی‌های آبخوان، کیفیت آب، ویژگی‌های خاک زمین‌های کشاورزی، اقلیم و شرایط محیط‌زیست منطقه دارد که با توجه به اندازه‌گیری عامل‌های مختلف، قابل بررسی می‌باشد. برآورد بیلان به روش‌های مختلف شامل مدل‌های آب زیرزمینی و نوسان‌های سطح ایستابی صورت می‌گیرد. بررسی کاربرد این روش‌ها برای دشت‌های کشور نشان می‌دهد که روش‌های حاضر برای برآورد بیلان آب زیرزمینی، زیاد قطعیت نداشتن حتی تا چند برابر را به همراه دارد (کتابچی و محمودزاده، ۱۳۹۷). برای حفظ و استفاده پایدار از منابع آب، مدیریت علمی در مصرف آب و استفاده از فناوری‌های نوین، ضروری است. در منطقه‌های خشک یا منطقه‌های کوهستانی، به دست آوردن تغییرپذیری منابع آب‌های زیرزمینی از چاه‌ها دشوار است، زیرا چاه‌های مشاهده‌ای محدود هستند (Cao *et al*., 2015). در این راستا، استفاده از داده‌های ماهواره GRACE برای تعیین تغییر منابع آب زیرزمینی برای شناخت مقدار مصرف ذخیره‌های آب‌های زیرزمینی اهمیت زیادی دارد.

به تازگی با استفاده از ماهواره GRACE می‌توان تغییر جرم لایه سطحی زمین یا تغییر ذخیره آب سطحی، برف، رطوبت خاک و آب زیرزمینی را برآورد کرد. این ماهواره توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا[1] و مرکز هوا فضای آلمان[2] از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ و از سال ۲۰۱۸ تاکنون نیز ماهواره GRACE-FO با موفقیت واسنجی‌شده و تغییر جرم ماهانه لایه سطحی زمین را برآورد می‌کند. با بهره‌گیری از ارسال موج‌های ماکروویو بین دو ماهواره، فاصله بین آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود که بر پایه آن تغییرهای میدان گرانش زمین و در نتیجه تغییر جرم لایه سطحی زمین برآورد می‌شود. در واقع از تغییر جرم لایه سطحی زمین، تغییر ذخیره آب برآورد می‌شود. از سال ۲۰۰۲ تغییرهای ماهانه ذخیره یخ‌های قطبی و یخچال‌های طبیعی، ذخیره‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین تغییر ارتفاع سطح دریاها با استفاده از ماهواره GRACE پایش شده‌است و از زمان راه‌اندازی GRACE-FO نیز تغییرهای ذخیره آب در لایه سطحی زمین در واکنش به تأثیر گرمای شدید و خشکسالی در اروپا و استرالیا و همچنین رخدادهای بارندگی شدید در ایالات متحده آمریکا و خاورمیانه و شدت کاهش جرم یخچال‌های گرینلند، همگی با موفقیت برآورد شدند (Landerer *et al*., 2020). نتایج کاربرد ماهواره GRACE در منطقه‌های مختلف دنیا به ویژه در خاورمیانه نشانگر درستی بالای داده‌های ماهواره GRACE می‌باشد (Vishwakarma *et al*., 2018; Landerer *et al*., 2020; Hasan *et al*., 2021; Panday & Kumar, 2023;) در ایران نیز نتایج کاربرد داده‌های ماهواره GRACE توسط رحیمی‌زاده و بزرگ حداد (۱۳۹۷) نشان داد که طرح‌های انتقال آب بین استان‌ها، مشکل‌های تأمین آب را از استان‌های مرکزی و شرقی به سمت استان‌های غربی و شمالی تشدید می‌کنند. روند کاهش ذخیره آب زیرزمینی به‌دست آمده از داده‌های ماهواره GRACE و هماهنگی آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری‌شده کاهش سطح ایستابی برای دوره خشکسالی ۱۳۸۴ تا اسفند ۱۳۹۰ در شش حوضه اصلی ایران شامل خزر، خلیج فارس و دریای عمان، ارومیه، مرکزی، هامون و سرخس

1. National Aeronautics and Space Administration (NASA)
2. German Aerospace Center (DLR)

مشخص شده است (Forootan *et al*., 2014). همچنین، نشان داده شده است که مقدار اندازه‌گیری‌شده فرونشست زیاد در برخی از منطقه‌های کشور (بیش از چند دسی‌متر در سال) با مقدار کاهش شدید آب زیرزمینی برآوردشده با ماهواره GRACE هماهنگی دارد (Hinderer *et al.* (2020).

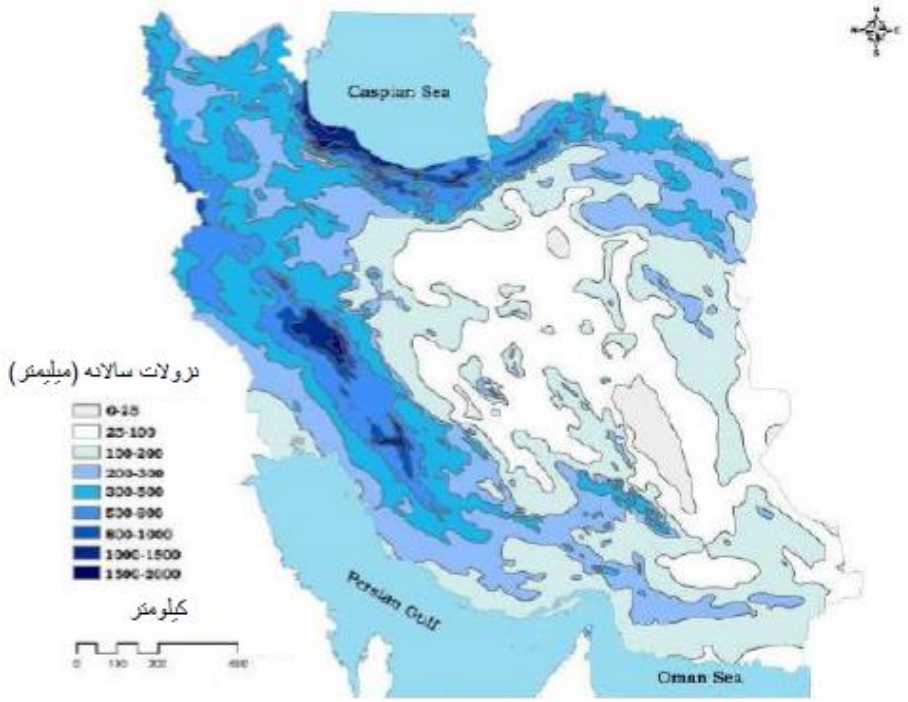
هدف‌های پژوهش حاضر شامل برآورد تغییر سالانه آب‌های زیرزمینی ایران، برآورد مقدار تجمعی آب زیرزمینی تخلیه‌شده از آبخوان‌های کشور با استفاده از نتایج ماهواره GRACE-FO/ GRACE، ارائه مقدار کاهش تدریجی مصرف آب کشاورزی برای ممانعت از مصرف ناپایدار آن و بررسی دشواری‌های ناشی از کاهش مصرف آب در ایران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

بررسی نتایج بیلان آب در ایران

حدود ۹۸٪ از مساحت ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد که مرداد ماه و دی ماه به‌ترتیب، به‌عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه‌های سال به شمار می‌روند (Mesgaran *et al*., 2017). برابر شکل ۱، مقدار سالانه میانگین بارش در ایران از ۱۳ میلی‌متر در مرکز کویر لوت تا ۲۰۰۳ میلی‌متر در جنوب غربی دریای خزر متغیر است (Khalili & Rahimi, 2018). مقدار منابع آب تجدیدپذیر کشور از ۱۳۰ میلیارد متر مکعب در سال ۱۳۷۳ به حدود کمتر از ۱۰۹ میلیارد متر مکعب در آخرین بیلان منابع آب کشور تا پایان سال آبی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۰ و در سال ۱۳۹۹ به ۹۲/۷ میلیارد متر مکعب رسیده است که به ترتیب ۶۲/۷ میلیارد متر مکعب و ۴۴/۲ میلیارد متر مکعب را برای آب تجدیدپذیر سطحی و زیرزمینی منظور نمودند (اسدی و همکاران، ۱۴۰۰).

در بررسی استفاده پایدار از منابع آب در ایران، می‌توان با اندازه‌گیری عامل‌های مختلف مانند ویژگی‌های هیدرولیک آبخوان شامل ضریب‌های ذخیره و هدایت هیدرولیکی اشباع، ضخامت سنگ کف، ارتفاع سطح ایستابی، بارندگی، تبخیر-تعرق واقعی از سطح حوضه، جریان‌های ورودی و خروجی آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین مقدار آب پمپاژشده از چاه‌ها، مقدار تغییر آب آبخوان را برآورد کرد. از آن‌جا که بیشتر این عامل‌های اندازه‌گیری نمی‌شوند و تغییرپذیری مکانی زیادی نیز دارند، در برآورد مقدار آب ذخیره‌شده با روش بیلان در حوضه‌های بزرگ، خطای زیادی به وجود می‌آید. در بررسی گزارش‌های بیلان در دشت‌های کشور مشخص شد که برآورد بیلان آب زیرزمینی با روش‌های موجود و بدون اندازه‌گیری مقدار تغذیه و تخلیه از آبخوان، ضریب آب برگشتی کشاورزی، ضریب ذخیره آبخوان و حتی آب‌های محاسبه‌نشده برداشت‌های غیرمجاز، موجب نبود قطعیت زیادی -تا چند برابر مقدار واقعی- می‌شود (کتابچی و همکاران، ۱۳۹۷). برآورد اشتباه مقدار آب موجود در آبخوان‌ها و تغییر آن نسبت به زمان، موجب مدیریت نادرست منابع آب‌های زیرزمینی می‌شود. در ایران در بیشتر آبخوان‌ها، مقدار آب پمپاژ شده اندازه‌گیری نمی‌شود، اما خوشبختانه ژرفای سطح ایستابی و کیفیت آب به صورت ماهانه گزارش می‌شود. با بررسی نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری ارتفاع سطح ایستابی می‌توان وجود شرایط ناپایدار کاهش سطح ایستابی و کم‌شدن منابع آب‌های زیرزمینی را نشان داد. به هر حال، با توجه به نداشتن مقدار آب پمپاژشده نمی‌توان مقدار بیش‌برداشت را به درستی برآورد کرد.

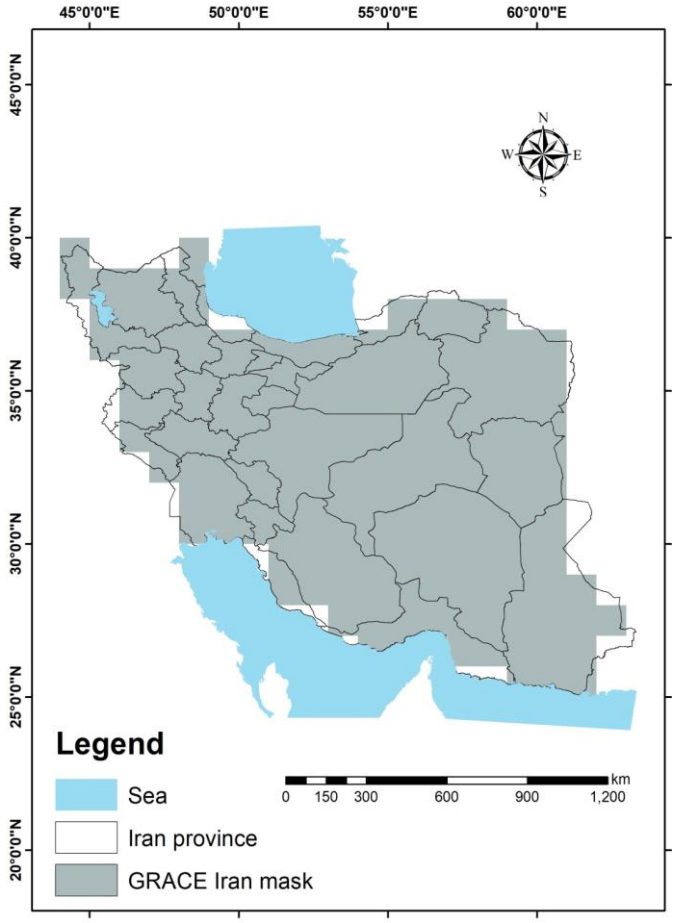


شکل ۱- نقشه هم‌بارش میانگین بارندگی‌های سالانه ایران (Khalili & Rahimi, 2018).

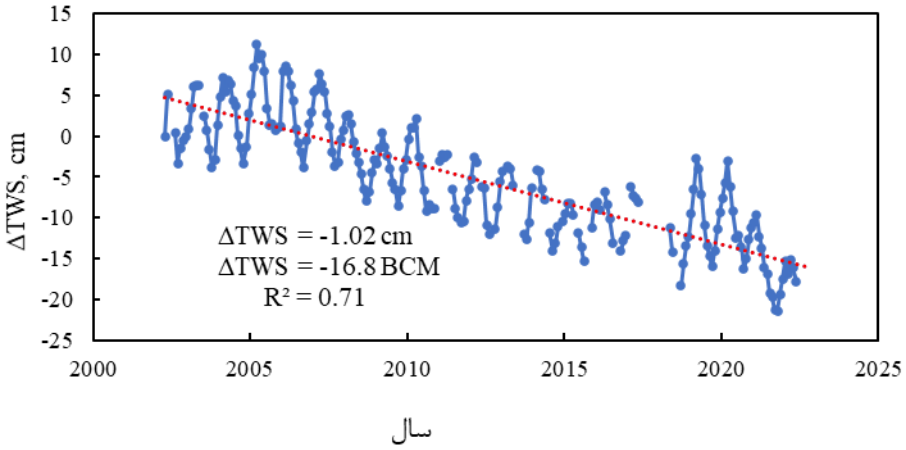
استفاده از داده‌های ماهواره GRACE برای برآورد برداشت آب زیرزمینی در ایران

داده‌های ماهواره GRACE تغییرهای ذخیره کل آب[1]را بصورت یک سیستم ذخیره‌سازی یکپارچه عمودی نشان می‌دهند که از آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی، رطوبت خاک، آب برف و آب زیستی تشکیل شده است. از این‌رو، داده‌های این ماهواره را می‌توان در تکمیل داده‌های اندازه‌گیری‌شده و برای پرکردن کمبودها در مقیاس مکانی و زمانی و یا جایگزینی آن‌ها در منطقه‌های بدون اطلاعات، استفاده کرد(Miro & Famiglietti, 2018). داده‌های ماهواره GRACE به‌صورت شبکه‌ای در مقیاس زمانی ماهانه با دقت مکانی $1°\times1°$ در طول و عرض جغرافیایی تولید می‌شوند. در پژوهش حاضر، داده‌های تولیدشده در مرکز پژوهش‌های فضایی[2] مورد استفاده قرار گرفت. داده GRACE/GRACE-FO از پایگاه https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE دریافت شد. به منظور استخراج داده‌ها در محدوده جغرافیایی ایران، تصویر ماسک کشور تهیه شد (شکل ۲). می‌توان مقدار تغییرهای ژرفای آب معادل موجود در سلول‌های با فاصله‌های یک درجه از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ و از سال ۲۰۱۷ تاکنون را بدست آورد. به علت تغییرهای زیاد در کاهش ارتفاع سطح دریای خزر در شمال و تغییرهای اندک در افزایش ارتفاع سطح آب دریای عمان و خلیج فارس تلاش شد تا این سطح‌های آبی تداخلی با سلول‌های گزینش شده نداشته باشند. در شکل ۳ میانگین تغییرهای ژرفای آب معادل از ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ نشان داده شده است. با شروع بارش‌ها در آغاز پاییز تا بهار به جرم آب موجود در ایران اضافه می‌شود و سپس با کاهش بارش‌های جوی تا ابتدای پاییز به علت تبخیر- تعرق حاصله، از جرم آب موجود کاسته می‌شود.

1. Total Water Storage (ΔTWS)
2. U. Texas / Center for Space Research (CSR)



شکل ۲- ویژگی‌های تصویر ماسک کشور ایران برای دریافت تغییرهای کل آب ذخیره‌شده.



۳- شکل تغییر ژرفای کل آب معادل (ΔTWS) در ایران.

نتایج

برآورد مقدار کاهش ذخیره آب زیرزمینی در ایران

همانطور که در شکل ۳ نشان داده می‌شود، به دلیل زیادبودن مقدار قابل توجه تبخیر-تعرق واقعی از مقدار بارش‌های جوی در ایران، میانگین روند منفی تغییر با مقدار۱/۰۲- سانتیمتر در سال (۱۶/۸- میلیارد متر مکعب در سال)، نشانگر کاهش شدید و نجومی کل منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد.

داده‌های GRACE منبع با ارزشی برای بررسی تغییر آب در لایه سطحی زمین (ΔTWS) می‌باشد و بصورت مجموع تغییره آب ذخیره‌شده در لایه سطحی زمین بصورت زیر بیان می‌شود:

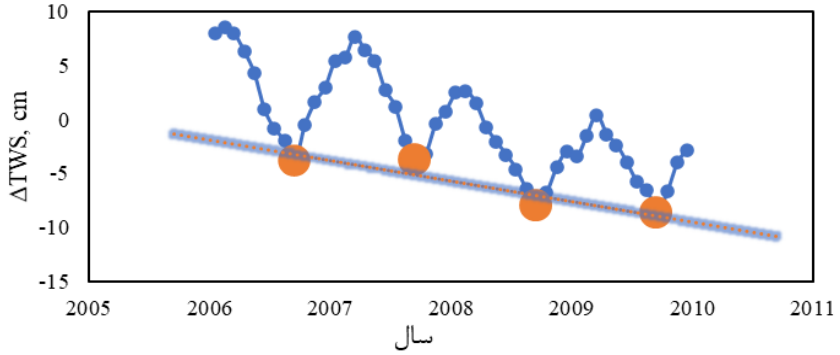
$$\Delta TWS = \Delta SWS + \Delta SMS + \Delta GWS + \Delta SNS$$ معادله ۱

که در آن ΔSWS :تغییر ماهانه آب سطحی، ΔSMS: تغییر ماهانه ذخیره رطوبت خاک، ΔGWS : تغییر ماهانه ذخیره آب زیرزمینی و ΔSNS نشانگر تغییرهای ماهانه پوشش برف است. با برآورد بارش‌های جوی و تبخیر-تعرق واقعی ماهانه، با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و اندازه‌گیری یا برآورد ماهانه مقدار تغییر آب سطحی ΔSWS و برف ΔSNS، مقدار تغییرها در ذخیره آب زیرزمینی (ΔGWS) را می‌توان از معادله ۱ برآورد کرد (Xanke & Liesch, 2022). از آن‌جا که داده‌های GRACE نشانگر شبکه‌های ۱×۱ درجه می باشد، در مساحت‌های کمتر از۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع ممکن است نتایج نادرست باشند. روند تغییر ΔGWS در کشورهای اروپا و خاورمیانه با برآورد ΔSWS، ΔSMS و ΔSNS در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ برآورد شده است (Xanke & Liesch, 2022).

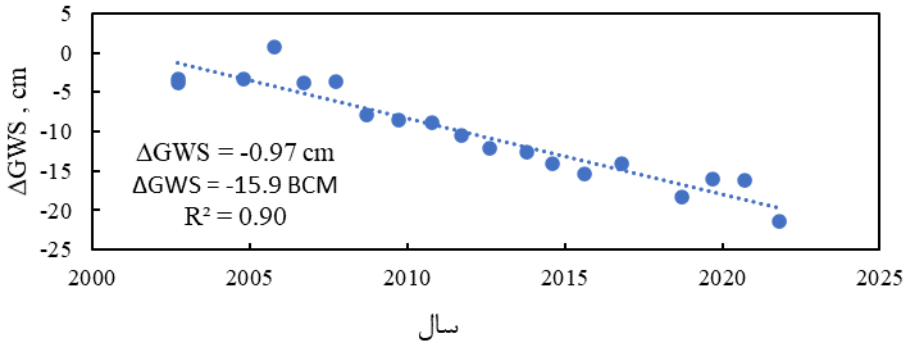
در منطقه‌های خشک و نیمه خشک به علت کم‌بودن بارش‌های ماهانه و تلف‌شدن بیشتر آن به صورت تبخیر-تعرق از سطوح حوضه‌ها و خطای زیاد در برآورد آن، ممکن است در برآورد تغذیه آب‌های زیرزمینی خطای زیادی به وجود آید. در پایان سال آبی، با تبخیر رطوبت خاک سطح زمین، از بین رفتن ذخیره‌های برف و کم‌شدن ذخیره‌های آب سطحی، جرم کل آب موجود به کمترین مقدار خود می‌رسد که تغییر این جرم آب با مقدار آن در سال پیش (ΔTWS_y) را برپایه معادله ۱ می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\Delta GWS_y = \Delta TWS_y - \Delta SWS_y - \Delta SMS_y - \Delta SNS_y$$ معادله ۲

که در آن ΔSWS_y : تغییرهای سالانه آب سطحی، SMS_y: تغییر سالانه ذخیره رطوبت خاک، ΔGWS_y :تغییر سالانه آب زیرزمینی و ΔSNS_y: تغییر سالانه پوشش برف است. در شرایط آب و هوایی ایران می‌توان با خطای کمی از تغییر سالانه ΔSNS_y، ΔSMS_y و ΔSMS_y در پایان سال آبی صرف نظر کرد و مقدار تغییرسالانه ذخیره آب زیرزمینی (ΔGWS_y) را برابر تغییر مقدارهای کمینه (دوسال مورد نظر) ΔTWS_y در نظرگرفت. برابر شکل ۴، در سال‌های کم بارش که بخش زیادی از مخزن‌های سطحی خالی می‌شوند این فرضیه دقت بیشتری دارد، اما برابر شکل ۵ برای سال‌های پربارش، خطا اندکی افزایش می‌یابد. برابر شکل ۵، مقدار روند تغییر آب‌های زیرزمینی برابر ۰/۹۷- سانتیمتر در سال (۱۵/۹- میلیارد متر مکعب در سال) می‌شود که قدر مطلق آن کمتر از کل تغییر آب برابر شکل ۳ (۱/۰۲- سانتیمتر یا-۱۶/۸- میلیارد متر مکعب در سال) می‌شود.



شکل ۴- تغییر ماهانه ژرفای معادل آب (ΔTWS) و نمایش روند تغییرکمینه آن برای تغییرهای سالانه (●) در سال‌های کم بارش (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰) در ایران.



شکل ۵- روند تغییرهای سالانه ژرفای معادل آب آب‌های زیرزمینی (ΔGWS) در ایران.

بحث

در مقایسه با مقدار میانگین تغییرهای زیاد ΔGWS در ایران (۰/۹۷- سانتیمتر در سال)، با استفاده از رابطه ۱ میانگین تغییرهای ΔGWS در دیگر کشورهای خاورمیانه برای عراق ۰/۸۸-، سوریه ۰/۶۰-، کویت ۰/۷۵-، اردن (۰/۴-، ترکیه ۰/۳- و عربستان سعودی ۰/۳۹- سانتیمتر در سال برآورد شده است (Xanke & Liesch, 2022). همچنین برای کشورهای اروپای غربی، مرکزی و شرقی بیشترین کاهش به ترتیب در سوئیس ۰/۵۷-، مجارستان ۰/۵۷- و اتریش ۰/۵۱- سانتیمتر در سال‌گزارش شد. کشورهای منطقه بالکان نیز روندهای منفی میانگین را از خود نشان می‌دهند که از اسلوونی ۰/۴۷ تا روندهایی با شدت کمتر در مقدونیه شمالی ۰/۱۹- سانتیمتر در سال است. در جنوب اروپا، وضعیت دوسویه است و روندهای منفی به نسبت شدید در ایتالیا ۰/۲-و روند منفی ضعیف در اسپانیا ۰/۰۳- و یونان ۰/۰۱ - سانتیمتر در سال را برآورد کردند.

به دلیل نبود تعادل بین آب تجدیدپذیر در منطقه‌های مختلف کشور و مصرف بسیار زیاد آن، لازم است برای رسیدن به شرایط پایدار، مصرف آب به‌صورت متناسب در هر منطقه کاهش یابد. با افزایش بهره‌وری و راندمان آبیاری نمی‌توان تأثیرهای مخرب مصرف زیاد آب‌های تجدیدپذیر کشور را کنترل کرد. اگرچه در سیستم‌های نوین آبیاری، به مقدار چشمگیری در مصرف آب در سطح کشتزار صرفه‌جویی می‌شود، اما اثربخشی کلی آن‌ها در کاهش مصرف آب در سطح حوضه و در کل کشور کم است و آب صرفه‌جویی‌شده به صورت‌های مختلف مصرف می‌شود.

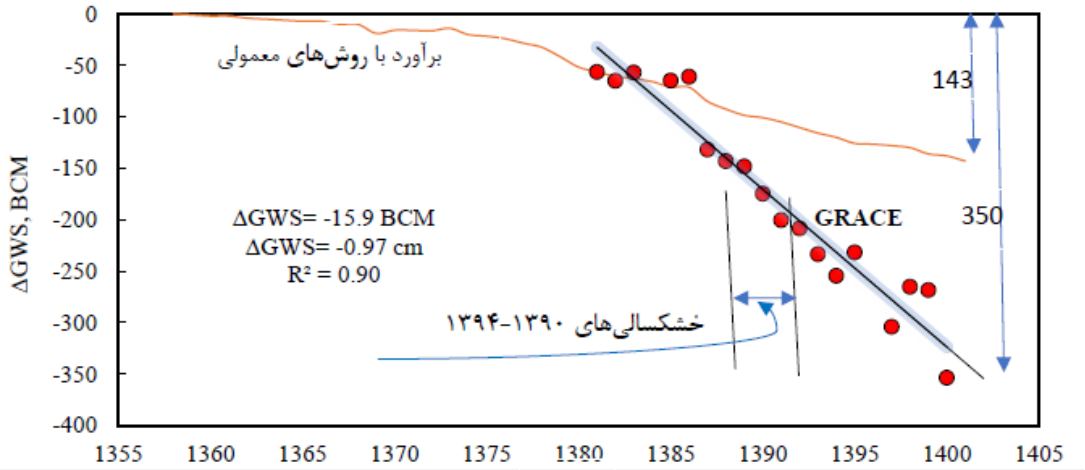
با وجود حمایت از کاشت محصول‌های زمستانه مانند گندم، افزایش تولید علوفه و محصول‌های تابستانه رشد بیشتری داشتند. میانگین تولید گندم در ایران در سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۱ حدود ۸ میلیون تن بوده است و در مقایسه با میانگین تولید ۱۱ میلیون تن در سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۷ حدود ۱۲٪ رشد داشته است و در همین مدت تولید ذرت سیلویی و محصول‌های تابستانه به ترتیب ۷۰۰٪ و ۲۰۰٪ رشد داشته‌اند (بی نام، ۱۳۹۲). حتی در مقایسه سطح زیر کشت گندم آبی با برنج، سطح زیر کشت گندم آبی نیز در فاصله سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۲ رشدی معادل ۲/۵٪ در سال داشته است، امادر مقایسه آن در این مدت سطح زیر کشت برنج به عنوان یک محصول پرمصرف، رشدی برابر ۳/۲۵٪ در سال داشته است (زارع فیض‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۵). روند افزایش سطح کشت این محصول‌های پرمصرف، به علت آب مصرفی زیاد، پیامدهای ناگواری بر منابع آبی ایران تحمیل کرده است. بنابراین، مقدار آبی که می‌توان از راه بهبود مدیریت و ارتقاء سیستم‌های آبیاری و ترویج کاشت گیاهان کم‌مصرف و زمستانه صرفه جویی کرد، در مقایسه با مقدار فراوان آبی که لازم است برای کاهش بحران صرفه‌جویی نمود، بسیار ناچیز می‌باشد. با توجه به این موارد، لازم است همزمان با بهبود مدیریت آب در مزرعه، برای ارتقای سیستم‌های آبیاری و افزایش بهره‌وری آب برای کاهش تدریجی استفاده از آب‌های سطحی و زیرزمینی، اقدام کرد.

مقدار کاهش مصرف آب در ایران

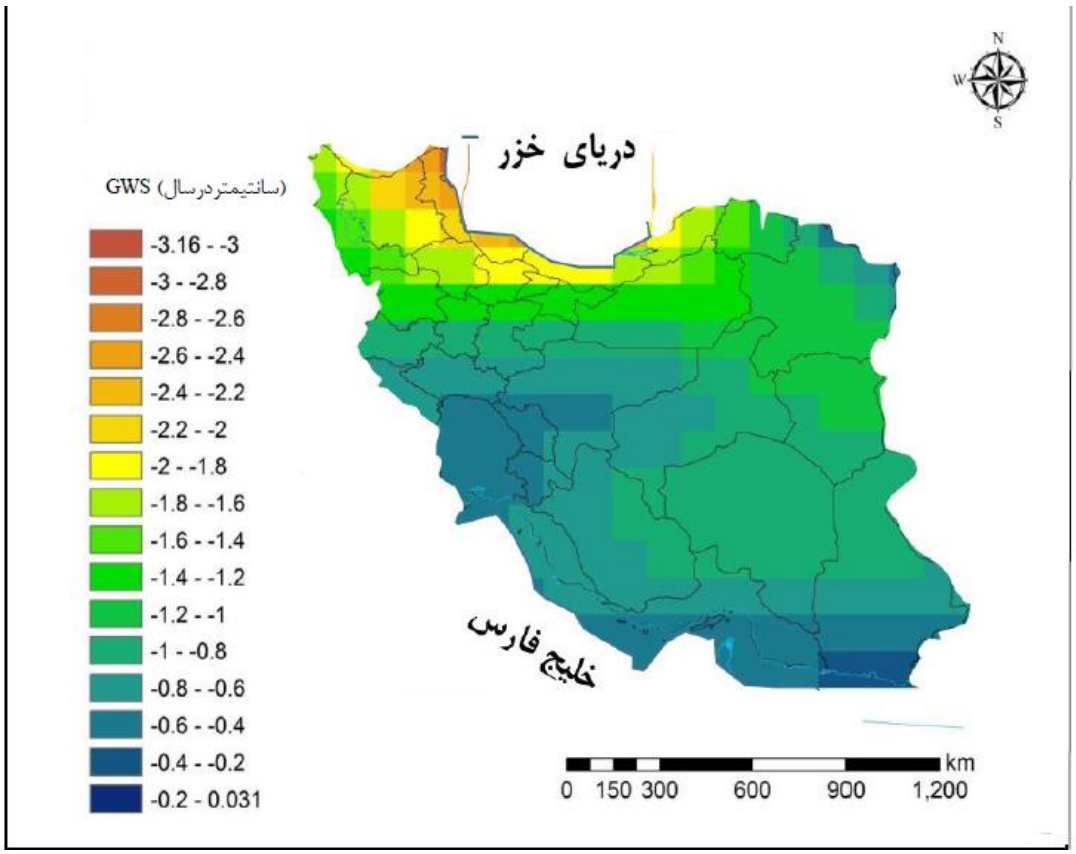
برابر نتایج واکاوی ماهواره GRACE مقدار تخلیه سالانه از ذخیره منابع آب‌های زیرزمینی در ایران حدود ۱۵/۹۳ میلیارد مترمکعب برآورد می‌شود که این عدد به اشتباه در گزارش‌های مختلف برابر ۴/۷ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است (اسدی و عبدالمنافی، ۱۴۰۱). با استفاده از نتایج ماهواره GRACE، کسری مخزن آب‌های زیرزمینی در سال ۱۴۰۱ برخلاف مقدار گزارش‌شده یعنی ۱۴۳ میلیارد مترمکعب، به بیش از ۳۵۰ میلیارد مترمکعب برآورد می‌شود (شکل ۶). برابر شکل ۷، روند کاهش سالانه کمینه ژرفای معادل آب‌های زیرزمینی (سانتی‌متر درسال) به دست آمده از داده‌های ماهواره GRACE در قسمت‌های مختلف ایران نشان داده شده‌است. برابر شکل ۷، روند منفی منابع آب‌های زیرزمینی در همه منطقه‌های کشور در دوره ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ مشخص می‌شود. در استان‌های شمالی و شمال غربی و حتی شمال شرقی، ذخیره آب‌های زیرزمینی با مقدار خیلی زیادی (بیشتر از ۱/۲ تا ۲/۵ سانتی‌متر در سال) نسبت به استان‌های جنوبی کشور کاهش می‌یابد. بیشتر بودن نرخ کاهش کل منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در استان‌های شمالی و غربی کشور نیز توسط رحیمی‌زاده و بزرگ‌حداد (۱۳۹۷) در دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ بیان شده بود. بیشترین روند میانگین منفی ذخیره آبهای زیرزمینی در کشورهای مجاور و خاورمیانه را Xanke, & Liesch (2022) با استفاده از معادله ۱ برای عراق (۰/۸۸- سانتیمتر در سال) برآورد شده است (Xanke, & Liesch, 2022). در منطقه Wadi As-Sirhan در شمال عربستان سعودی (ناحیه کشاورزی گسترده با آبیاری عقربه‌ای)، مقدار روند کاهش ΔTWS برابر ۱/۳۸- سانتیمتر در سال برآورد شد (Alshehri & Mohamed, 2023). در این منطقه، با حذف ذخیره‌های برف و آب سطحی به شرح زیر:

$$\Delta TWS = \Delta SMS + \Delta GWS$$ معادله ۳

با برآورد بارندگی و تبخیر-تعرق واقعی منطقه با استفاده از روش سنجش از دور، مقدار ΔSMS برابر ۰/۰۰۰۸+ سانتیمتر در سال و مقدار ΔGWS برابر سانتیمتر در سال ۱/۳۸- برآورد شد (Alshehri & Mohamed, 2023).



شکل ۶- برآورد تغییرهای ذخیره آب‌های زیرزمینی (ΔGWS) با استفاده از بیلان منابع آب و داده‌های GRACE.



شکل ۷- روند کاهش سالانه کمینه ژرفای معادل آب‌های زیرزمینی (GWS) به دست آمده از داده‌های ماهواره GRACE در قسمت‌های مختلف ایران.

با توجه به شرایط بحرانی کنونی مصرف آب‌های زیرزمینی، مشکل زیادی مانند فرونشست‌ها و فروچاله‌ها، کاهش شدید جریان‌های چشمه‌سارها و جریان‌های سطحی، از بین رفتن جنگل‌ها و مرتع ها، از بین رفتن گونه‌های کمیاب گیاهی و جانوری، از بین رفتن تالاب‌ها و دریاچه‌های داخلی، هجوم آب شور به آب‌های زیرزمینی در زمین‌های کنار

ساحل‌ها، افزایش شوری و کاهش حاصلخیزی خاک‌ها و دیگر موردها، لازم است که بخش چشمگیری از مصرف آب‌های سطحی و زیرزمینی را کاهش داد.

در گزارش مظاهری (۱۴۰۲) در بررسی بیلان آب زیرزمینی در حوزه‌های آبخیز درجه یک کشور، مقدار کل کاهش سالانه منابع آب‌های زیرزمینی ایران ۵/۸۶ میلیارد مترمکعب یا ۰/۳۶- سانتی متر گزارش شده‌است. مطابق شکل ۸، مقدار کاهش منابع آب‌های زیرزمینی در واحد سطح در همه حوضه‌های درجه یک تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند. در حوضه‌های دریاچه ارومیه و دریای مازندران، مقدارهای سالانه کاهش آب‌های زیرزمینی با کمترین مقدار، به ترتیب برابر ۰/۰۹ و ۰/۱۰ سانتی‌متر در سال برآورد شده‌اند که حتی کمتر از مقدار به دست‌آمده در بسیاری از کشورهای اروپایی مانند ایتالیا و فرانسه است. مطابق شکل ۸ این مقدار در حدود ۲۰ برابر کمتر از مقدار به دست آمده از واکاوی داده‌های GRACE برآورد شده‌اند.

حوضه درجه ۱	بیلان (MCM)	GWS cm
دریای مازندران	-180	-0.10
خلیج فارس و دریای عمان	-849	-0.20
دریاچه ارومیه	-46	-0.09
فلات مرکزی	-4251	-0.51
هامون	-176	-0.17
سرخس	-356	-0.81
کل ایران	-5858	-0.36

شکل ۸ – کاهش سالانه آب‌های زیرزمینی حوضه‌های آبریز درجه‌یک کشور (مظاهری،۱۴۰۲).

برداشت متعادل آب در ایران

بر اساس گزارش اسدی و همکاران (۱۴۰۰) مقدار سالانه آب‌های تجدیدپذیر زیرزمینی و سطحی به ترتیب برابر ۴۴/۲ و ۶۵/۷ میلیارد متر مکعب و کل آب‌های تجدیدپذیر در مجموع برابر ۱۰۹/۹ میلیارد متر مکعب برآورد شده است. در جدول ۱، با در نظر گرفتن بیش‌برداشت سالانه آب‌های زیرزمینی (۱۵/۹ میلیارد متر مکعب)، مقدار آب

تجدیدپذیر برابر ۹۳ میلیارد متر مکعب برآورد می‌شود که بدون منظور کردن هیچ کاهشی در مقدار آب شرب و صنعت، مقدار کاهش برداشت آب کشاورزی تا حد بحران شدید (۶۰٪ آب تجدیدپذیر) برابر ۳۶/۳ میلیارد متر مکعب یا ۴۴٪ مصرف آب کشاورزی پیشنهاد می‌شود.

در ایران، برای متعادل کردن مصرف آب، در عمل از کاهش مصرف آب پرهیز شده است و در واقع، با ساخت سدهای زیاد و حفر فراوان چاه‌ها، آب بیشتری از سهمیه محیط‌زیست مصرف شده است. با تشویق روش‌های آبیاری زیر فشار تا حدودی برای بهبود بهره‌وری آب تلاش شده است، اما بدون کنترل فیزیکی و جدی آب توسط سازمان‌های مسئول دولتی، استفاده از این سیستم‌ها در سطح حوضه به افزایش مصرف آب انجامیده است.

جدول ۱- مقدارهای برآورد و درصد برداشت آب مطابق گزارش (اسدی وهمکاران، ۱۴۰۰) با آب تجدیدپذیر ۱۰۹/۹ میلیارد مترمکعب در سال و مقدارهای بدست‌آمده با منظور کردن بیش‌برداشت سالانه آب‌های زیرزمینی (۱۵/۹ میلیارد مترمکعب) و آب تجدید پذیر ۹۴/۰ (میلیارد مترمکعب).

نوع مصرف	برداشت*	درصد*	مصرف مجاز+	کاهش مصرف	درصد کاهش
	(BCM)	(%)	(BCM)	(BCM)	(%)
کشاورزی	82.0	88.5	45.7	36.3	44
شرب و بهداشت	8.3	9.0	8.3	0.0	0
صنعت	2.4	2.6	2.4	0.0	0
مجموع	92.7	100	56.4	36.3	

BCM : میلیارد مترمکعب

* مطابق گزارش اسدی وهمکاران، (۱۴۰۰)

+ مقدارهای بدست‌آمده با منظور کردن بیش‌برداشت سالانه آب‌های زیرزمینی (۱۵/۹ میلیارد مترمکعب) و آب تجدیدپذیر ۹۴/۰ (میلیارد مترمکعب)

با توجه به اهمیت مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی در ایران، لازم است عامل‌های مختلف بیلان آب در آبخوان هر منطقه اندازه‌گیری و برای مدیریت نوسان سطح آب زیرزمینی، مقدار برداشت آب کنترل گردد. برای نمونه عزیزی و نجاتیان (۱۳۹۹)، با اندازه‌گیری ورودی‌ها و خروجی‌های آبخوان دشت ورامین، به وسعت ۸۴۹ کیلومتر مربع، مقدار کسری آبخوان را برابر ۳۹/۵۹- میلیون متر مکعب در سال گزارش کردند. مقدار کاهش ژرفای آب زیرزمینی دشت ورامین با وسعت حوضه آبریز برابر ۱۷۲۰ کیلومتر مربع، برابر ۲/۳- سانتی‌متر در سال محاسبه می‌شود که برابر شکل ۷ قدر مطلق آن بیشتر از مقدار به دست آمده از برآورد با ماهواره GRACE (۱/۴- سانتیمتر در سال) برای سطوح بیشتر از ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع می‌شود. بنابراین، بدون پژوهش در بیلان آب حوضه و اندازه‌گیری آب تحویلی به مصرف‌کنندگان نمی‌توان برای همه منطقه‌های ایران با شرایط مختلف اقلیمی مصرف آن را مدیریت کرد.

با توجه به بررسی‌های ارائه‌شده به نظر می‌رسد که:

- افزایش روند منفی کاهش آب‌های زیرزمینی گزارش شده پیشین از ۴/۷- به ۱۵/۹- میلیارد متر مکعب در سال می‌رسد و مقدار کاهش مصرف آب برای تعادل‌بخشی از ۲۶/۷ به ۳۶/۳ میلیارد متر مکعب در سال افزایش می‌یابد. این کاهش

باید به طور تدریجی انجام شود و هم‌زمان با کاهش تدریجی آب مصرفی با اندازه‌گیری مقدار برداشتی، دقت اطلاعات ارائه‌شده برای روند کاهش آب‌های زیرزمینی به‌روزرسانی شود.

- پیشنهاد می‌شود در یک برنامه ۱۰ ساله، سالانه ۱۰٪ مقدار کل بیش‌برداشت (حدود۳/۶ میلیارد متر مکعب) از مصرف آب کاسته شود.
- کاهش مصرف آب، دشواری‌های فراوانی از جمله کاهش قابل توجه تولیدهای کشاورزی، تأمین منابع ارزی برای واردات آن‌ها و گرانی شدید تولیدهای کشاورزی از جمله علوفه و محصول‌های تابستانه و تولیدهای دامی را در پی خواهد داشت.
- برای تعیین دقیق و زمان واقعی تغییرها و روند کاهش منابع آب‌های زیرزمینی در سطح دشت‌های کشور، ضروری است برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری لازم برای استفاده از فناوری‌های هوشمند در اندازه‌گیری و پایش فراسنجه‌های چرخه‌های آبی فراهم شود.
- با توجه به این‌که التزام به قانون یکی از اصول مهم حکمرانی آب در سطح ملی به شمار می‌آید، لازم است از هر نوع قانون‌گریزی در مدیریت منابع آب، به ویژه در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و افزایش آلودگی آن به طور جدی جلوگیری به عمل آید.
- یکپارچه کردن کانون‌های تصمیم‌گیر و سیاستگذار منابع آب کشور از الزام‌های جدی است که در شرایط فعلی، می‌تواند با تغییر ساختار، اقتدار و ارتقاء جایگاه شورای عالی آب با حضور قوای سه گانه، کاربران منابع و مصرف‌های آب و تاکید بر مشارکت جدی بهره‌برداران موثر بر و متاثر از منابع آب عملی شود تا ضمن هماهنگی درآمد و هزینه منابع آب کشور، سیاستگذاری، اجرا و نظارت و پایش فرایندها، از موازی کاری‌ها جلوگیری شود.
- تهیه آمار هوشمند و به هنگام منابع و مصرف آب، آموزش (و گفتگوی شفاف با) کاربران و آب‌بران، اطلاع‌رسانی شفاف در سطوح منطقه‌ای و محلی در زمینه سیاست‌ها و برنامه‌های منابع آب، شناسایی و آموزش و توجیه بهره‌برداران ، توجه به ارزش واقعی آب در بخش‌های مصرف، الزام به رعایت حقابه محیط زیست و بوم سامانه‌های آبی کشور، ارزیابی راهبردی مدیریت یکپارچه منابع آب کشور باید از الزام‌های برنامه باشد.
- با توجه به شرایط حاکم بر منابع آب کشور و حفظ حقوق نسل آتی و تاب‌آوری منابع آب برای تضمین امنیت غذایی و اجتماعی جامعه، ضرورت دارد تا نسبت مصرف‌ها به منابع آب تجدیدپذیر در سطحی قابل قبول تنظیم و حفظ شود.
- برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی، لازم است تا سازوکارهای مناسب برای فعال شدن ظرفیت مشارکت‌های مردمی، به عنوان یکی از ضروری‌ترین پایه‌های موثر بر حکمرانی آب، پیش‌بینی و اجرایی شود.
- برای اعتلای سطح آگاهی و ارشاد کشاورزان برای رسیدن به سطح مطلوب بهره‌وری اقتصادی آب کشاورزی، تهیه و اجرای برنامه‌های ترویج و آموزش کشاورزی ضرورت زیادی دارد.
- همزمان با کاهش برداشت آب‌های زیر زمینی، سرمایه‌گذاری برای توسعه کشت‌های گلخانه‌ای و سامانه‌های آبیاری موضعی برای افزایش بهره‌وری اقتصادی آب در شرایط اقلیمی کشور مورد تاکید است.
- برای مقابله با دشواری‌های معیشتی کشاورزان بر اثر کاهش برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی، لازم است برنامه‌ریزی برای ایجاد شغل‌های جایگزین در روستاها صورت گیرد.

- با توجه به هدرروی چشمگیری تولیدهای کشاورزی به صورت ضایعات، لازم است تا برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری برای کاهش آن‌ها سازماندهی شود. لازم است تا تمرکز صنایع و جمعیت بر اساس آمایش سرزمین در ساحل‌های جنوبی کشور انجام شود.

نتیجه گیری

برآورد اشتباه مقدار آب موجود در آبخوان‌های کشور و تغییرهای آن نسبت به زمان، موجب مدیریت نادرست منابع آب‌های زیرزمینی می‌شود. با اندازه‌گیری تغییرهای ژرفای سطح ایستابی و روند کاهشی در کشور، مشخص می‌شود که از این منابع برداشت بیش از حد صورت می‌گیرد. با توجه به نبود اندازه‌گیری مقدار آب پمپاژ شده، مقدار بیش‌برداشت سالانه به اشتباه ۴/۷ میلیارد متر مکعب برآورد شد. با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE، با صرف نظر کردن از تغییرهای سالانه ΔSNS_y، ΔSMS_y و ΔSMS_y در پایان سال آبی، مقدار تغییرهای سالانه ذخیره آب زیرزمینی (ΔGWS_y) برابر تغییرهای سالانه ΔTWS_y برابر ۱۵/۹- میلیارد متر مکعب برآورد شد. با استفاده از نتایج ماهوار GRACE، کسری مخزن‌های آب‌های زیر زمینی در سال ۱۴۰۱ بر خلاف مقدار گزارش‌شده یعنی ۱۴۳ میلیارد متر مکعب، به بیش از ۳۵۰میلیارد متر مکعب برآورد شد.

برای متعادل کردن برداشت آب‌های زیرزمینی با مقدار تغذیه، لازم است سالانه به مقدار۳۶/۳ میلیارد متر مکعب در سال (۴۴٪ از آب کشاورزی) از سهمیه آب کشاورزی کم شود. برای موفقیت در این زمینه لازم است مصرف آب به صورت تدریجی در مدت ۱۰ سال، سالانه ۳/۶ میلیارد متر مکعب کاهش یابد و همزمان با کاهش تدریجی، با اندازه‌گیری مقدار برداشت آب، دقت اطلاعات ارایه‌شده برای روند کاهش مصرف به روز رسانی شود.

منابع

اسدی، مراد؛ مظاهری، مهدی؛ عبدالمنافی، نرجس. (۱۴۰۰). بررسی بحران آب و پیامدهای آن در کشور. دفتر مطالعات زیربنایی.

بی‌نام. (۱۳۹۲). بررسی آمار سطح برداشت و میزان تولید ۳۶ سال محصولات زراعی (سال ۱۳۵۷ لغایت ۱۳۹۲). مرکزفناوری اطلاعات و ارتباطات وزارت جهاد کشاورزی. تهران – تهران.

اسدی، مراد؛ عبدالمنافی، نرجس. (۱۴۰۱). تشدید بحران منابع آب زیرزمینی و لزوم مدیریت مصارف. مرکز پژوهشهای مجلس شورای اسلامی، گروه آب.

رحیمی‌زاده، محمد رضا؛ بزرگ‌حداد، امید. (۱۳۹۷). بررسی اثرهای انتقال آب بین حوضه‌ای بر منابع آب ایران. *مجله پژوهشهای راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی* . ۳(۱) ،۴۲-۲۷.

زارع‌فیض‌آبادی، احمد؛ کوچکی، علیرضا؛ نصیری محلاتی، مهدی. (۱۳۸۵). بررسی روند ۵۰ ساله تغییرات سطح زیر کشت، عملکرد و تولید غلات در کشور و پیش بینی وضعیت آینده. *مجله پژوهشهای زراعی ایران*،۴(۱): ۶۹-۴۹.

سپاس خواه، علیرضا. (۱۴۰۰). هشدار در مورد غیرقابل بازگشت بودن وضعیت منابع آب کشور. *مجله پژوهشهای راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی* ۶(۲) ،۲۰۵-۲۰۳.

عباسی، نادر؛ عباسی، فریبرز. (۱۳۹۹). سیمای منابع و مصارف آب ایران. وزارت جهادکشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی. کشاورزی.

عزیزی، حمیدرضا؛ نجاتیان، نیلوفر . (۱۳۹۹). محاسبه بیلان آب زیرزمینی دشت ورامین جغرافیا و روابط انسانی. ۳ (۳)۱۸۹-۲۰۴.

کتابچی، حامد؛ محمودزاده، داود. (۱۳۹۷). نقدی بر برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در کشور ایران: راهکارها و پیشنهادها. معاونت پژوهشهای زیر بنایی و تولیدی، دفتر مطالعات زیربنایی.

مظاهری، مهدی. (۱۴۰۲). بررسی بیلان آب زیر زمینی در حوضه های آبریز درجه یک کشور. گزارش ارائه شده به: مرکز پژوهشهای مجلس شورای اسلامی، گروه آب.

کشاورز، عباس؛ ملکیان، راحله؛ نژندعلی، عاطفه؛ بیگی، اعظم. (۱۴۰۰). تبیین وضعیت آب کشور، مجموعه اسناد مرتبط با سند ملی و راهبردی تحول امنیت غذایی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، معاونت آموزش و ترویج کشاورزی، نشر آموزش کشاورزی.

Alshehri, F., & Mohamed A. (2023) Analysis of groundwater storage fluctuations using GRACE and remote sensing data in Wadi As-Sirhan, northern Saudi Arabia. *Water*. 15, 282.

Cao, Y., . Nan, Z., & Cheng, G. (2015) GRACE gravity satellite observations of terrestrial water storage changes for drought characterization in the arid land of northwestern China, *Remote Sensing*.7(1), 1021–1047.

De Stefano, L., Fornés, J.M., López-Geta, J.A., & Villarroya. F. (2015) Groundwater use in Spain: an overview in light of the EU Water Framework Directive. 2015. *International Journal of Water Resources Development*. 31, (4), 640–656, http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2014.938260.

Forootan, E., Rietbroek, R., Kusche, J., . Sharifi, M.A ,. Awange, J.L , Schmidt, M., Omondi, P., & Famiglietti, J. (2014) Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data. *Remote Sensing of Environment*. 140, 580–595.

Frisvold, G., C. Sanchez, N. Gollehon, S.B. Megdal, & P. Brown. (2018) Evaluating gravity-flow irrigation with lessons romYuma, Arizona, USA. *Sustainability . 10*, 1548; doi:10.3390/su10051548 .

Hasan, E., Tarhule, A.M., & Kirstetter, P.E. (2021) Twentieth and twenty-first century water storage changes in the Nile river basin from GRACE/GRACE-FO and modeling. *Remote Sensing*. 13, 953. https://doi.org/10.3390/rs13050953.

Hinderer, J. Saadat, A., Cheraghi, H., Bernard, J.D., Djamour, Y., Amighpey, M., Arabi, S., Nankali, H., & Tavakoli, F. (2020). Water Depletion and Land Subsidence in Iran Using Gravity, GNSS, InSAR and Precise Levelling Data. *International Association of Geodesy Symposia*, https://doi.org/10.1007/1345_2020_125.

Khalili, A. & Rahimi, J. (2018). *Climate, In: The soils of Iran (M.H. Roozitalab, H. Siadat, & A. Farshad)*, the First Edition, Springer International Publishing.

Landerer, F.W.' Flechtner, F.M., Save, H., Webb, F.H., Bandikova, T., Bertiger, W.I.,Bettadpur, S.V.. Byun, S.H., Dahle, C., & Dobslaw, H., (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow- On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088306. https://doi.org/10.1029/2020GL088306.

Mesgaran, M. B., Madani, K., Hashemi, H., & Azadi, P. (2017). Iran's Land Suitability for Agriculture. *Scientific Reports* **7**, 7670.

Miro, M. E., & Famiglietti, J. S. (2018). Downscaling GRACE remote sensing datasets to high-resolution groundwater storage change maps of California's Central Valley. *Remote Sensing*, 10(1), 143.

Panday, D.P., & Kumar, M. (2023) Application of remote sensing techniques to deal with scale aspects of GRACE data to quantify groundwater levels. *MethodX*. 10, 102108.

Vishwakarma, B.D., Devaraju, B., & N. Sneeuw, (2018) What Is the Spatial Resolution of GRACE satellite products for hydrology?. *Remote Sensing*. 10, 852;doi:10.3390/rs10060852.

Xanke, J., & Liesch, T. (2022) Quantification and possible causes of declining groundwater resources in the Euro-Mediterranean region from 2003 to 2020. *Hydrogeology Journal*. 30:379–400.

Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9(1):19-34 (2024)

Gradual Reduction of Agricultural Water Withdrawal an Effective Step in Adapting to Water Scarcity in Iran

Zad-Parsa, S., Didari S. and Sepaskhah A.R.[1,2]

In recent decades, Iran has witnessed a noteworthy surge in agricultural water consumption due to population growth, economic development accompanied by irrigated agricultural lands, and changes in dietary habits. Unfortunately, the ratio of consumption to renewable water has consistently exceeded four times the threshold of water stress for several decades. A recent analysis of annual groundwater depletion using the GRACE satellite observations was estimated to be about 15.9 BCM/year, significantly higher than the previously estimated value of 4.7 BCM/year obtained using the conventional estimation methods. In fact, this research estimated that the accumulated depletion of groundwater supply in 2021 could be more than 350 BCM, contrary to the reported amount of 143 BCM. Despite the severity of the situation, water consumption in Iran has not been adequately reduced to balance the low recharge rate of its water resources. In fact, by building many dams and digging many wells, more water than the share of the environment has been consumed. To prevent environmental severe water stress or consumption of 60% of renewable water, a 44% reduction in agricultural water consumption is necessary. However, achieving this significant reduction in agricultural water consumption, it poses several social and economic challenges, such as gaining the consent and cooperation of farmers to participate in reducing water usage, ensuring accurate measurement of water delivery, securing sufficient foreign currency for importing agricultural products, creating alternative job opportunities for farmers, and leading to a significant increase in the price of agricultural products.

Keywords: Agricultural water, Drinking water, GRACE, Groundwater, Industrial water.

1. Corresponding author, Email: zandparsa@yahoo.com
2. Professor of Shiraz University (Invited Member of I.R. Academy of Sciences), Assistant Professor of Shiraz University and Professor of Shiraz University (Fellow of I.R. Academy of Sciences), respectively.

مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۹ شماره ۱ صفحه‌های ۳۵ تا ۵۰ (۱۴۰۳)

چالش‌های محیط زیستی فراروی جنگل‌های زاگرس[1]

احمد حسینی[۲،۳]

چکیده

بررسی چالش‌های محیط‌زیستی در جنگل‌های زاگرس از دیدگاه مدیریتی ارزشمند است و به دلیل روشن شدن وضعیت منابع طبیعی و مسیر آینده آن، از اهمیت زیادی دارد. منابع طبیعی از گذشته دور، به دلیل رابطه‌های اقتصادی-اجتماعی انسان با جنگل، با عامل‌های آسیب‌رسان بی‌شماری روبه‌رو بوده است که موجب تخریب جنگل‌ها و مراتع شده‌است. برخی از این عامل‌های آسیب‌رسان منشأ انسانی دارند، مانند زراعت زیراشکوب، چرای بیش از حد دام، قطع بی‌رویه درختان، برداشت محصول‌های فرعی و طرح‌های زغال‌گیری و برخی دیگر مانند تغییر اقلیم، خشکسالی، گرد و غبار، تخریب بوم‌سازگان، زوال درختان و آتش‌سوزی طبیعی ریشه در محیط طبیعی دارند. مقاله حاضر بر تخریب‌های محیط زیستی ناشی از بهره‌برداری‌های گذشته از منابع طبیعی و رخدادهای دهه اخیر تمرکز دارد و چالش‌های محیط‌زیستی ناشی از آن‌ها را بررسی کرده است. نتیجه این بررسی‌ها، به مشخص شدن چالش‌های محیط زیستی آینده منابع زیستی در ناحیه رویشی زاگرس کمک می‌کند. بر این اساس، اقدام‌های پایه‌ای برای مدیریت چالش‌ها و جلوگیری از کاهش کمی و کیفی جنگل‌ها و احیای آن‌ها مانند اجرای درست مدیریت چرای دام و آمایش سرزمین، تقویت زادآوری گونه‌های جنگلی با روش‌های مناسب و آموزش حفظ محیط‌زیست در سطح مدرسه‌ها و دانشگاه‌ها و رسانه‌ها پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، جنگل‌های بلوط، چرای دام، کاهش کمی و کیفی، زوال درختی.

مقدمه

جنگل‌های زاگرس دومین بوم‌نظام جنگلی و همچنین وسیع‌ترین بوم‌نظام جنگلی ایران است. این جنگل‌ها به صورت نواری پیوسته از شمال غرب ایران در استان آذربایجان‌غربی شروع شده و در امتداد کوه‌های زاگرس تا استان فارس ادامه یافته است. بخش رویشی زاگرس در ده استان آذربایجان غربی، کردستان، کرمانشاه، ایلام، لرستان، اصفهان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، خوزستان و فارس به صورت پیوسته و در دو استان همدان و مرکزی توده‌های جنگلی زاگرسی با چیرگی گونه بلوط به‌صورت گسسته رویش دارد (ابراهیمی رستاقی، ۱۳۹۷). مساحت جنگل‌های زاگرس در گذشته بیش از ۱۰ میلیون هکتار بوده است و به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه در سالیان دراز مساحت این جنگل‌ها روند کاهشی داشته است (مروی مهاجر، ۱۳۸۴). مساحت این جنگل‌ها بر پایه بررسی‌های سراسری پروژه تهیه نقشه منابع جنگلی کشور، ۵۴۳۴۶۸۰ هکتار اعلام برآورد شده است (ابراهیمی رستاقی، ۱۳۹۷).

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۷

۲- نویسنده مسئول، پست الکترونیک: ahmad.phd@gmail.com

۳- دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام.

در جنگل‌های زاگرس گونه درختی چیره، بلوط ایرانی[1] است. در این جنگل‌ها دو گونه درختی دیگر از جنس بلوط به نام‌های دارمازو[2] و ویول[3] وجود دارد که در واقع جنس درختی چیره این جنگل‌ها را تشکیل می‌دهند. در این جنگل‌ها گونه‌های درختی و درختچه‌ای بی‌شماری مانند بنه[4]، خنجک[5]، کیکم[6]، انواع گلابی[7]، آلبالو وحشی[8]، محلب[9]، انواع زالزالک[10]، شن[11]، انواع بادام[12]، داغداغان[13]، انواع زبان‌گنجشک[14]، ارغوان[15]، ارس[16] و زربین[17] وجود دارند که در جاهای مختلف آن، با فراوانی‌های مختلفی همراه با گونه‌های بلوط وجود دارند.

دو کارکرد مهم جنگل‌های بلوط زاگرس حفاظت از آب و خاک است که با توجه به چیره بودن آب و هوای خشک و نیمه‌خشک در کشور اهمیت زیادی دارد. حدود ۳۰ تا ۴۰٪ آب‌های سطحی کشور در این ناحیه جریان دارند و از ۹ رشته رودخانه درجه یک کشور ۷ رشته از بلندی‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و پس‌از عبور از میان جنگل‌های به دشت‌های حاصلخیز کشور جاری می‌شوند (ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۱). بیشتر سدهای بزرگ کشور روی رودخانه‌های این ناحیه ساخته شده‌اند. از این رو، نقش این ناحیه در اقتصاد ملی انکارناپذیر است و جنگل‌های زاگرس با حفاظت از آب و خاک این ناحیه نقش کلیدی و محوری را در بقای اقتصاد ملی دارند (ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۱).

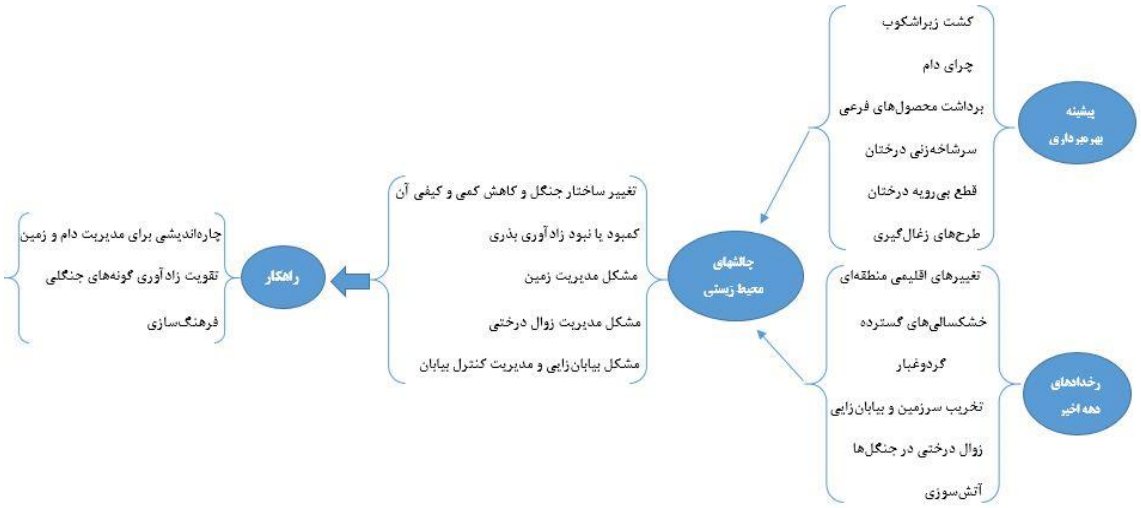
در واقع نقش حفاظتی جنگل‌های زاگرس بر عهده تاج‌پوشش[18] توده‌های جنگلی آن است. این جنگل‌ها در زمان‌های گذشته از انبوهی خوبی برخوردار بوده‌اند، به طوری که تاج درختان آن‌ها به هم رسیده و گیاهان کف جنگل، زادآوری و خاک کف جنگل را در برابر شدت بارندگی، تابش آفتاب و فرسایش به خوبی حفظ کرده است، اما به تدریج در اثر عامل‌های مختلف انسانی و طبیعی تاج‌پوشش این جنگل‌ها کمتر شده و درختان با فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند و عملکرد حفاظتی آن‌ها کاهش یافته‌است. البته، برخی بر این باورند که جنگل‌های بلوط غرب به دلیل سرشت نورپسندی گونه‌های آن‌ها دارای پوشش تنک هستند (فتاحی، ۱۳۷۳). انبوهی تاج‌پوشش این جنگل‌ها در منطقه‌های مختلف زاگرس از ۵ تا ۶۰٪ متغیر است، اما بیشتر این جنگل‌ها در حال حاضر از انبوهی تاج‌پوشش کمی برخوردارند و انبوهی‌های زیاد آن بیشتر در آرامستان‌ها و منطقه‌های با دسترسی کمتر وجود دارد (فتاحی، ۱۳۷۳؛ جزیره‌ای و ابراهیمی، ۱۳۸۲). در این جنگل‌ها بیش از ۸۰٪ درختان از گونه بلوط ایرانی هستند و این درختان با شکل‌های بذرزاد[19] و شاخه‌زاد[20] در جنگل ظاهر می‌شوند. درختان بذرزاد اغلب تاج بزرگ‌تر و وسیع‌تری نسبت به شاخه‌زادها دارند، از این‌رو توده‌های بذرزاد درصد تاج‌پوشش بیشتری نسبت به توده‌های شاخه‌زاد دارند. یکی دیگر از دلیل‌های کم بودن مقدار تاج‌پوشش جنگل‌های زاگرس می‌تواند مربوط به وجود شکل شاخه‌زاد در بیشتر توده‌های جنگلی آن باشد.

شوربختانه در اثر تخریب‌های پی در پی به خاطر عامل‌های طبیعی و انسانی وضعیت موجود جنگل‌های زاگرس مطلوب نیست و با حالت بهینه آن فاصله زیادی دارد. موجودی سرپای این جنگل‌ها که در گذشته‌ای نه چندان دور (اوایل دهه ۴۰ شمسی) به حدود ۱۲۰ مترمکعب در هکتار می‌رسیده است، اکنون به میانگین موجودی سرپای کمتر از ۲۰ سیلو[21] در هر هکتار کاهش یافته است (جزیره‌ای و ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۲). بنابراین، مدیریت این جنگل‌ها باید

1. *Quercus brantii* Lindl. 2. *Quercus infectoria* 3. *Quercus libani* 4. *Pistacia atlantica*
5. *Pistacia khinjuk* 6. *Acer monspessulanum* 7. *Pyrus* spp. 8. *Cerasus microcarpa*
9. *Cerasus mahaleb* 10. *Crataegus* spp. 11. *Lonicera nummularifolia* 12. *Amygdalus* spp.
13. *Celtis caucasica* 14. *Fraxinus* spp. 15. *Cercis griffithii* 16. *Juniperus polycarpos*
17. *Cupressus sempervirens* 18. Canopy 19. Standard 20. Coppice 21. Silve

به سمت اجرای پروژه‌های احیا و توسعه آن‌ها پیش برود و پیش از احیای جنگل‌ها، دشواری‌های اقتصادی - اجتماعی حل شود و چاره‌ای برای رابطه تنگاتنگ جنگل‌نشینان با جنگل و عرصه‌های جنگلی اندیشیده شود.

افزون بر نقش حفاظت خاک و آب، جنگل‌های زاگرس دارای ارزش محیط‌زیستی، زیست‌بومی، گردشگری و دیگر خدمات تنظیمی برخوردارند. برای نمونه، این جنگل‌ها زیستگاه گونه‌های گیاهی و جانوری زیادی بوده و نقش مهمی در حفظ آب و خاک، تعدیل آب و هوا و تامین آب رودخانه‌ها دارند (معیری و همکاران، ۱۳۸۷). جنگل‌های زاگرس محل چرای بیشتر دام‌های جمعیت روستایی و جمعیت عشایر و درون‌کوچ و محل زندگی جمعیت عشایر است. با توجه به اهمیت و جایگاه حیاتی این جنگل‌ها ضرورت حفظ و احیای آن‌ها بسیار اهمیت دارد. از این رو، مقاله حاضر سعی دارد وضعیت گذشته و حال این جنگل‌ها را که منجر به ایجاد چالش‌های محیط زیستی شده است، بررسی کرده و برای رفع چالش‌های بوجودآمده، راهکارهایی ارائه‌کند (شکل ۱). در این راستا، مقاله حاضر بر تخریب‌های محیط‌زیستی حاصل از بهره‌برداری‌های گذشته از منابع طبیعی و رخدادهای دهه اخیر تمرکز دارد. حاصل این بررسی‌ها پیشنهاد راهکارهایی برای برون‌رفت از چالش‌های فراروی منابع طبیعی در بخش جنگل‌های زاگرس خواهدبود.



شکل ۱- روند بررسی عامل های تخریبی جنگل‌های زاگرس، چالش‌های محیط زیستی ایجاد شده و راهکارهای ارائه شده.

پیشینه بهره‌برداری

الف- کشت زیراشکوب

از گذشته‌های دور، کشت زیراشکوب در راستای تامین نیازهای زندگی در بخش وسیعی از عرصه‌های جنگلی توسط روستائیان و مردم محلی انجام شده است. این تغییر کاربری در جنگل آسیب‌های زیادی به بوم‌نظام جنگلی وارد کرده است، زیرا در اثر ایجاد کاربری زراعت دیم در عرصه‌های جنگلی، درختان زیادی قطع و ریشه‌کن شدند و درختان زیادی نیز شاخه‌زنی شدند که در ایجاد زمینه فرسایش خاک و نابودی زادآوری طبیعی نقش داشته‌است.

ب- چرای دام

در سطح جنگل‌های زاگرس، حدود ۲۸ میلیون رأس دام با ترکیب گوسفند و بز حضور دارند (محمدنیا افروزی، ۱۳۹۹) که دستکم حدود نیمی از سال را در آن چرا می‌کنند و از علوفه سبز فصل بهار و تابستان و علوفه خشک فصل پاییز تغذیه می‌کنند. با توجه به این‌که پوشش علفی کف جنگل پاسخگوی نیاز غذایی گله‌های دام نیست، از این رو،

دام‌ها از برگ، شاخه‌های یک‌ساله و میوه درختان و درختچه‌ها نیز تغذیه می‌کنند. بیشتر میوه‌های درختان در زمانی که هنوز نارس هستند، در عرصه‌های جنگلی توسط دام مصرف می‌شوند و مقدار زیادی از میوه‌های درختان برای تغذیه دام‌ها در فصل زمستان، جمع‌آوری و انبار می‌شود. دام‌های اهلی در منطقه‌های جنگلی غرب ایران دو دسته هستند. دسته اول دام‌های روستایی هستند که در جنگل‌های نزدیک روستا چرا می‌کنند. دسته دوم دام‌های عشایر هستند که در مسیرهای طولانی در جنگل در حرکت هستند و سطح بیشتری از جنگل‌ها زیر چرای آن‌ها قرار دارند (جزیره‌ای و ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۲). آسیب‌های چرای ناشی از دام‌های اهلی بیشتر به خاطر حضور بز در ترکیب گله است. بزها می‌توانند از تنه درختان و درختچه‌ها بالا روند و به راحتی از برگ و سرشاخه آن‌ها تغذیه کنند و در واقع نقش تخریبی آن‌ها بیشتر از گوسفند است. بنابراین، دام‌ها با چرای گیاهان علفی کف جنگل، میوه درختان و درختچه‌ها و نهال‌های آن‌ها در عرصه‌های جنگلی فشار زیادی به این جنگل‌ها آورده و در کاهش زادآوری طبیعی آن‌ها نقش بسیار مهمی دارند (Hosseini, 2021).

مهمتر از چرای دام‌های اهلی، رفت و آمد پیوسته آن‌ها در عرصه‌های جنگلی است که به دنبال آن، چرای گسترده و شدید دام در جنگل‌های زاگرس اتفاق افتاده است و موجب سخت شدن خاک، کاهش نفوذپذیری آب، افزایش رواناب و فرسایش خاک شده است. در نتیجه، در خیلی از منطقه‌های این جنگل‌ها حاصلخیزی خاک کمتر شده و توان بستر جنگل برای پذیرش بذر و تبدیل آن به نهال کاهش یافته است وبه دنبال آن زادآوری طبیعی با بذر در خیلی از جاها کاهش یافته است.

پ- برداشت محصول‌های فرعی

محصول‌های فرعی که از جنگل‌های زاگرس برداشت می‌شوند، بسته به تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای آن از گوناگونی زیاد برخوردار هستند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

جمع‌آوری میوه درختان برای مصرف دام و انسان - گونه‌های بی‌شماری از درختان و درختچه‌های جنگلی زاگرس مانند بلوط ایرانی، بنه، خنجوک[1]، بادام و زالزالک میوه خوراکی برای انسان و حیوان تولید می‌کنند. اگرچه، این میوه‌های تولیدی ممکن است استفاده‌های دیگری نیز داشته باشند. این ویژگی میوه‌ها موجب شده است که آن‌ها همواره از گذشته‌ها مورد بهره‌برداری قرار گیرند. برای نمونه، از میوه بلوط از گذشته توسط روستائیان و عشایر برای تهیه نان استفاده شده است. همچنین، برای دام‌های اهلی مصرف خوراکی دارد و افزون بر مصرف میوه بلوط توسط دام در زمان چرا، مقدار زیادی از این میوه‌ها توسط چوپانان، روستائیان و عشایر برای تغذیه دام در زمستان جمع‌آوری می‌شود. میوه درختان بنه و خنجوک نیز از میوه‌های ارزشمند جنگلی هستند که هرساله توسط روستائیان و مردم محلی از درختان بنه جمع‌آوری می‌شوند و افزون بر مصرف روستائیان، در شهرها نیز به طور گسترده توسط مردم خریداری و مصرف می‌شوند. میوه درختچه‌های زالزالک و بادام نیز مصرف خوراکی دارند و به فراوانی توسط مردم از جنگل‌ها برداشت و به مصرف غذایی مختلف می‌رسند. جمع‌آوری بی‌رویه میوه‌های جنگلی موجب شده است که مقدار بذرهای ریخته شده درختان و درختچه‌ها در کف جنگل کاهش چشمگیری پیدا کرده و در نتیجه مقدار زادآوری به شدت کاهش یابد. جزیره‌ای و ابراهیمی رستاقی (۱۳۸۲) بیان می‌کنند که پیامدهای ناشی از جمع‌آوری بی‌رویه

1. *P. khinjuk*

میوه‌های جنگلی موجب شده است که تجدید حیات مصنوعی از راه بذرکاری نیز با مشکل اساسی روبه‌رو شود، زیرا بذرهای کاشته‌شده توسط حیوان‌های وحشی به ویژه گراز و تشی از خاک چاله‌های کاشت خارج و خورده می‌شوند.

برداشت میوه درختان بلوط برای تولید مان‌شوکه – مان‌شوکه یکی از مهمترین محصول‌های فرعی است که از درختان بلوط ایرانی[1] و بلوط دارمازو به دست می‌آید. مان شهدی است که بر اثر نیش حشره‌ای[2] روی برگ و شاخه جوان درخت بلوط تولید می‌شود (جزیره‌ای و ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۲). در سال‌های بذردهی فراوان گونه بلوط و نیز در سال‌هایی که شرایط اقلیمی مساعد باشد، این ماده به مقدار فراوان روی درختان بلوط تولید می‌شود. در این سال‌ها روستائیان سرشاخه‌های زیادی از درختان را قطع کرده و شاخه‌های جوان و برگ‌های آن‌ها را که شهد زیادی رویشان قرار گرفته است، جمع‌آوری می‌کنند و محصول خوشمزه‌ای به نام مان از آن استخراج می‌کنند. بهره‌برداری بی‌رویه و گسترده میوه و برگ توسط روستائیان و حتی برخی از مردم شهرها برای تهیه این محصول، آسیب‌زیادی به درختان بلوط و زادآوری آن‌ها در جنگل وارد می‌کنند.

برداشت شیره سقز از درختان بنه– شیره سقز در واقع به صمغی گفته می‌شود که از تنه و ساقه‌های بزرگ درختان بنه استخراج می‌شود (قهرمانی و همکاران، ۱۳۹۵). زمانی که روی تنه درختان بنه زخمی ایجاد شود، این ماده از محل زخم به آرامی خارج می‌شود. این ماده از گذشته توسط روستائیان و عشایر و جنگل‌نشینان به عنوان آدامس و مواد آرایشی به کار می‌رفته است و آن را همواره از جنگل‌های بلوط استان به شیوه سنتی تأمین می‌کرده‌اند. در شیوه بهره‌برداری سنتی، تعدادی زخم یا شیار در تنه و ساقه‌های بزرگ درخت بنه ایجاد می‌کنند و در زیر هر یک از زخم‌ها کاسه‌ای گلی به صورت چسپیده به تنه درخت قرار می‌دهند. شیرابه‌های تراوش‌شده پس از چند روز در کاسه‌های گلی زیر زخم‌ها یا شیارها جمع می‌شود (جزیره‌ای و ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۲). بهره‌برداری بی‌رویه صمغ بنه، آسیب‌های فیزیولوژیک شدیدی بر درخت وارد می‌سازد که در پایان بر مقدار و کیفیت میوه‌های تولیدشده این درختان تأثیر منفی می‌گذارد.

ت- سرشاخه‌زنی درختان

سرشاخه‌زنی درختان در جنگل‌های زاگرس بیشتر توسط چوپانان و برای تغذیه دام‌هایشان صورت می‌گیرد. این کار زمانی صورت می‌گیرد که علوفه کف جنگل نیاز غذایی دام‌ها را برآورده نکند. در این صورت چوپانان با قطع سرشاخه‌های درختان، برگ درختان را در اختیار دام‌ها قرار داده تا از آن تغذیه کنند. البته، در بخش شمالی زاگرس که به طور عمده دو استان آذربایجان‌غربی و کردستان را دربر می‌گیرد، سرشاخه‌زنی با عنوان گلازنی با شیوه متمایزی روی گونه‌های ویول و دارمازو صورت می‌گیرد. بدین شیوه که محدوده جنگلی در مالکیت عرفی هر خانوار به قسمت‌های مساوی تقسیم شده و هر سال در یکی از قطعه‌ها، همه شاخه‌ها و سرشاخه‌های درختان قطع می‌شود و در محلی انبار شده و یا جهت تغذیه زمستانی دام به روستا برده می‌شوند. بخش دیگری از سرشاخه‌زنی به منظور تامین سوخت و استفاده روستایی است که بیشتر توسط روستائیان انجام می‌شود. با توجه به این‌که این عمل پیوسته در عرصه‌های جنگلی انجام می‌شود، موجب کاهش تاج درختان جنگلی می‌شود. در شیوه بهره‌برداری گلازنی کاهش پوشش تاجی درختان و توده‌های مورد بهره‌برداری شدید است و به کمتر از ۵٪ تاج کاهش می‌یابد. در اثر کاهش شاخه‌ها و تاج درخت، خاک جنگل محافظ خود را از دست داده و در تماس مستقیم نور خورشید و باران قرار می‌گیرد. در نتیجه، در تابستان سریع‌تر گرم می‌شود و رطوبت خود را از دست می‌دهد که نهال‌های نورسته در اثر گرمای زیاد

1. *Q. brantii* 2. *Lachnus roboris*

ناشی از نور خورشید و خشکی هوا و خاک از بین می‌روند. در زمان بارندگی نیز خاک بستر آن‌ها در مقابل ضربه‌های باران، به ویژه در دامنه‌های شیب‌دار بی‌پناه خواهد بود و در برابر فرسایش قرار می‌گیرد.

ث- قطع بی‌رویه درختان

قطع درختان در جنگل‌های زاگرس از گذشته توسط روستائیان و عشایر با هدف‌های مختلفی انجام شده است. بیشترین استفاده روستائیان و عشایر از چوب جنگل‌های زاگرس، تهیه سوخت هیزمی است که در واقع برای گرم کردن منزل‌های مسکونی در فصل پاییز و زمستان و پخت غذا در طول سال است. از دیگر استفاده‌های روستائیان و عشایر، تهیه چوب از درختان جنگلی برای تامین مصالح ساختمانی و ساخت ابزار کشاورزی و حتی ایجاد پرچین در پیرامون کشتزارها و ایجاد آغل برای دام‌ها است (فتاحی، ۱۳۷۳؛ جزیره‌ای و ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۲). با توجه به این‌که قطع درختان جنگلی توسط روستائیان به صورت گزینشی انجام نمی‌شود و تمام درختان جنگل در معرض آسیب آن‌ها است، از این رو، درختان بذرزاد در کنار درختان شاخه‌زاد قطع می‌شوند و با این کار شمار درختان بذرده در جنگل کاهش می‌یابد و مقدار بذر تولیدی جنگل کاهش می‌یابد و در نتیجه بر زادآوری طبیعی جنگل تاثیر منفی می‌گذارد. افزون بر این، با قطع درختان جنگلی در واقع سطح تاج‌پوشش توده‌های جنگلی کاهش می‌یابد و در نتیجه پیامدهای منفی کاهش تاج‌پوشش اثر خود را بر کیفیت عرصه‌های جنگلی و زنده‌مانی نهال‌های حاصل از بذر می‌گذارد (Hosseini, 2021).

ج- طرح‌های زغال‌گیری

در بازه زمانی ۱۳۴۱ تا ۱۳۵۱ نخستین طرح‌های مدیریتی در بخش جنگل‌های زاگرس با نام طرح‌های زغال‌گیری با هدف ساماندهی و افزایش بازده تولید زغال از چوب اجرا شد. در برخی از جنگل‌هایی که از توان زیست‌بومی و انبوهی بیشتری نسبت به جنگل‌های پیرامون برخوردار بودند، همانند جنگل‌های هیانان در بخش شهرستان سیروان در استان ایلام، طرح‌های زغال‌گیری تهیه و اجرا شده است. درختان زیادی به خاطر اجرای این طرح‌ها از بین رفته‌اند و ترکیب و ساختار و فرم جنگل‌ها دچار تغییر شده‌اند (معیری و همکاران، ۱۳۸۷).

رخدادهای دهه اخیر

الف- تغییرهای اقلیمی منطقه‌ای

بروز تغییرهای اقلیمی پیش‌درآمد رخدادهای دهه اخیر در بخش جنگل‌های زاگرس بود. به عبارت دیگر، بیشتر دشواری‌های محیط‌زیستی به وجود آمده اخیر در جنگل‌ها و مراتع، به دنبال بروز تغییرهای اقلیمی است. هرچند که تاثیر بهره‌برداری‌های خارج از توان زیست‌بومی بوم‌نظام جنگلی بخش رویشی زاگرس از دهه‌های بسیار پیش‌تر، در به هم زدن فرایند طبیعی کارکرد[1] جنگل و نیز حساس شدن درختان و درختچه‌ها به عامل‌های نامساعد نقش بنیادی داشته‌اند. تغییر اقلیم بیشتر در مقیاس بزرگ یا منطقه‌ای رخ می‌دهند. از نشانه‌های بروز تغییرهای اقلیمی می‌توان به کاهش شدید بارندگی و افزایش شدید دما اشاره کرد. برای نمونه بر پایه آمار هواشناسی، از سال ۱۳۸۰ کاهش بارندگی و افزایش دمای سالانه به ترتیب ۲۰/۶ و ۷/۷٪ بوده است. این تغییرها در متغیرهای اقلیمی تأثیر تدریجی و گاهی ناگهانی و شدید در سطح رویشگاه‌ها و دامنه گسترش گونه‌های جنگلی خواهند گذاشت. در پژوهش‌های Hosseini *et al.* (2017)،

1. Function

اعظمی و همکاران (۱۳۹۷) و حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز نقش تغییرهای عامل‌های اقلیمی در کاهش شدید رطوبت خاک و بروز خشکیدگی‌های درختی اثبات شده است.

ب- خشکسالی‌های گسترده

خشکسالی یکی از پدیده‌هایی است که در دو دهه اخیر به دنبال تغییرهای اقلیمی گسترده در جنگل‌های زاگرس اتفاق افتاده است. در این شرایط رطوبت خاک به قدری کاهش می‌یابد که تنش خشکی شدیدی بر گونه‌های گیاهی در عرصه‌های جنگلی و مرتعی وارد آمده و بیشتر این گیاهان توان تحمل این شرایط و یا ادامه حیات را نخواهند داشت. در پژوهش‌های زیادی بروز خشکسالی در جنگل‌های بلوط زاگرس گزارش شده‌است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ اعظمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Hosseini *et al*., 2017; Hosseini *et al*., 2018).

پ- گردوغبار

به دنبال بروز خشکسالی‌های شدید، کانون‌های تولید گرد و غبار در بیابان‌های کشورهای عربی همسایه و نیز بیابان‌های جنوب غرب کشور در استان خوزستان فعال شدند و به سمت داخل کشور گسیل شدند. خسارت گرد و غبار از سال ۱۳۸۷ و همزمان با زوال جنگل‌های بلوط شدت گرفت و به عنوان یکی از عامل‌های نخستین در ضعف درختان، ایجاد شرایط برای فعالیت عامل‌های دومین و مرگ و زوال درختان در جنگل‌های زاگرس نقش داشته است.

ت- تخریب سرزمین و بیابان‌زایی

به دنبال بروز تغییرهای اقلیمی و خشکسالی‌های ناشی از آن، فرایند بیابان‌زایی در جنوب غرب کشور و کشورهای همسایه شدت گرفت. افزون بر این، عرصه‌های جنگلی که زیر کشت زیراشکوب دراز مدت قرار داشتند، به دلیل نبود رطوبت خاک، در عمل رها شدند و به تدریج در اثر خشکسالی و نروییدن گیاه در سطح آن‌ها می‌توان انتظار تخریب بوم‌نظام جنگلی را داشت.

ث- زوال درختی در جنگل‌ها

به دنبال پدید آمدن خشکسالی شدید، خشکیدگی‌های درختی و درختچه‌ای گسترده در سطح جنگل‌های زاگرس رخ داده است که هنوز آثار آن در این جنگل‌ها به روشنی مشهود است. این خشکیدگی‌ها پیامدهای منفی زیادی را در ساختار جنگل‌های بلوط استان همانند خیلی از منطقه‌های جنگلی در بخش زاگرس به همراه داشته است که در این جا به برخی از این‌ها اشاره می‌شود. در اثر خشکیدگی‌های تاجی فشار فیزیولوژیکی زیاد بر درختان و درختچه‌ها وارد شد. بسیاری از درختان، درختچه‌ها و بوته‌ها از بین رفتند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱). مقدار تاج‌پوشش جنگل‌ها به سرعت کاهش یافت. سطح زیادی از عرصه‌های جنگلی به فضاهای بدون پوشش و بدون پناه تبدیل شد. توان میوه‌دهی درختان کاهش یافت و میوه‌های تولید شده از نظر کمی و کیفی افت کردند (حسینی و جهانبازی گوجانی، ۱۴۰۱). بسیاری از درختان مادری و بذرده در جنگل از بین رفتند (Hosseini, 2021).

ج- آتش‌سوزی

آتش‌سوزی‌ها اثرهای منفی قابل‌توجهی بر جنگل چه در سطح رویشگاه‌های جنگلی و چه در زمین‌های کشاورزی دارند (Bluff, 2016; Crane *et al*., 2017). آتش‌سوزی یکی از پیشامدهایی است که در جنگل‌های بلوط در دهه اخیر نمود بیشتری پیدا کرده است. آتش‌سوزی در این جنگل‌ها اغلب به طور عمدی اتفاق می‌افتد و هر ساله بخش‌هایی از این جنگل‌ها را نابود می‌کند. با شروع فصل بهار گیاهان علفی زیادی در سطح جنگل‌های بلوط می‌رویند که با عبور از

فصل بهار و نزدیک شدن به فصل تابستان علف‌های کف جنگل خشک شده و با کوچک‌ترین جرقه‌ای آتش گرفته و به راحتی، به ویژه با وزش باد در جنگل، شعله‌ور شده و آتش در تمام سطح جنگل توسعه می‌یابد. این آتش‌سوزی‌ها بیشتر توسط چوپانان، دامداران، کشاورزان و صاحبان کشتزارهای نزدیک جنگل و برخی از کوهنوردان و گردشگران ایجاد می‌شوند. شوربختانه در دهه اخیر شمار و سطح این آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های بلوط زاگرس افزایش چشم‌گیری داشته است. این موضوع موجب کاهش سطح جنگل‌ها، کاهش تاج‌پوشش و فقر زادآوری طبیعی در این جاها و پیامدهای بعدی شده‌است (Hosseini, 2021).

چالش‌های محیط زیستی

شوربختانه در اثر تخریب‌های متمادی ناشی از عامل‌های طبیعی و انسانی وضعیت موجود جنگل‌های بلوط مطلوب نیست و با حالت اوج این جنگل‌ها فاصله زیادی دارد. بنابراین، مدیریت این جنگل‌ها باید به سمت کمک به تجدید حیات طبیعی و احیای آن‌ها پیش برود و پیش از احیای جنگل‌ها مسائل و دشواری‌های اقتصادی و اجتماعی حل شده و چاره‌ای برای رابطه تنگاتنگ جنگل‌نشینان با جنگل و عرصه‌های جنگلی اندیشیده شود. برخی از چالش‌های محیط زیستی که در نتیجه تخریب‌های ناشی از بهره‌برداری‌های درازمدت گذشته و رخدادهای دهه اخیر در منابع طبیعی زاگرس به وجود آمده‌اند، شامل تخریب جنگل‌ها و کاهش کمی و کیفی آن‌ها، کمبود یا نبود زادآوری بذری درختان و همچنین دشواری‌های مدیریت زمین، مدیریت کنترل دام، مدیریت زوال درختی و تخریب سرزمین است.

الف- تغییر ساختار جنگل‌ها و کاهش کمی و کیفی آن‌ها

در اثر فشارهای انسانی و طبیعی تخریب‌کننده بر جنگل‌های زاگرس، ساختار آن‌ها نامطلوب شده و فرم اغلب توده‌های جنگلی به صورت شاخه‌زاد یا شاخه‌زاد و بذرزاد بوده و توده‌های بذرزاد در این جنگل‌ها کمیاب بوده و یا یافت نمی‌شود. ترکیب و آمیختگی گونه‌ای به صورتی است که اغلب گونه‌های درختی تحمل این شرایط پیش‌آمده را نداشته و از بین رفته و یا فراوانی آن‌ها در توده‌های جنگلی بسیار کم شده است؛ به طوری که در بیشتر توده‌های جنگلی فراوانی درختان بلوط بیش از ۸۰٪ بوده و چیرگی دارند. در این توده‌ها نیز فراوانی درختان شاخه‌زاد بیشتر از درختان بذرزاد می‌باشد. در نتیجه، شمار درختان مادری بذرده که اغلب بذرزاد هستند، کم شده است. درختان شاخه‌زاد سطح تاج کمتری نسبت به بذرزادها دارند و در نتیجه مقدار تاج‌پوشش توده را کاهش می‌دهند. در نتیجه، مقدار حفاظت کف جنگل توسط تاج‌پوشش جنگل کم شده و اثر عامل‌های اقلیمی مانند نور و بارندگی بر کف جنگل و گیاهان و نهال‌های واقع در آن شدیدتر شده و استقرار زادآوری طبیعی درختان و درختچه‌ها که عنصرهای اصلی جنگل هستند، دچار خطر و چالش می‌شود.

ب- کمبود یا نبود زادآوری بذری

زادآوری بذرزاد در جنگل‌های زاگرس به مقدار کم انجام شده و چندان مطلوب نیست. همین شمار کم نیز تا زمان استقرار کامل به تدریج کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که شمار کمی از آن‌ها می‌توانند استقرار موفق داشته باشند. این وضعیت، نشانگر تخریب جنگل و شکنندگی بوم نظام آن است؛ زیرا با وجود درصد پائین تاج‌پوشش و فقر خاک در اثر فرسایش‌های مکرر، این جنگل‌ها نتوانسته‌اند شرایط لازم و مساعد را برای تندش، زادآوری و استقرار نهال فراهم سازند. بر اساس نتایج برخی پژوهش‌ها، شمار نهال بذرزاد بلوط ایرانی ۲۰۰ اصله در هکتار (ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۹) تا ۳۸۰

اصله در هکتار (حسینی و همکاران، ۱۳۸۷) است که در کل رقم اندکی است و نشان‌دهنده شرایط نامساعد جنگل برای تجدیدحیات از راه بذر است. در پژوهشی در جنگل‌های غرب ایران حسینی (۱۳۸۹الف) با مقایسه سه مرحله آماربرداری نهال‌ها در ماه‌های فروردین (در جهت شمالی ۵۲۰ اصله در هکتار و در جهت جنوبی ۲۷۰ اصله در هکتار)، خرداد (در جهت شمالی ۴۰۷ اصله در هکتار و در جهت جنوبی ۱۵۰ اصله در هکتار) و شهریور (در جهت شمالی ۲۸۷ اصله در هکتار و در جهت جنوبی ۹۰ اصله در هکتار) نشان داد که میانگین شمار در هکتار نهال‌ها به تدریج کاهش یافته است. بررسی چگونگی کاهش کمی نهال‌ها نشان داد که در مرحله‌های آماربرداری دوم و سوم شماری از نهال‌ها در اثر نبود رطوبت در خاک خشکیدند و شماری نیز در اثر چرای دام یا حیوان‌های وحشی از بین رفتند. بنابراین، با توجه به آمار از بین رفتن نهال‌ها در دو مرحله اخیر آماربرداری، به نظر رسید که خشکی خاک در فصل رویش و چرای دام عامل‌های مؤثر در کاهش کمی نهال‌ها بوده‌اند. در پژوهشی دیگر، رطوبت و چرای دام به ترتیب مهمترین عامل‌های مؤثر در زنده‌مانی و استقرار نهال‌ها معرفی شدند (Joseph *et al*., 2002).

با توجه به وضعیتی که جنگل‌های زاگرس در حال حاضر پیدا کرده‌اند، زادآوری بذری در شرایط ویژه‌ای بروز می‌کند. دانهال‌ها اغلب در جهت‌های جغرافیایی شمالی و شرقی که ریزاقلیم خنک‌تر و مطلوب‌تری دارند، نمایان می‌شوند. افزون بر این، زنده‌مانی دانهال‌ها در جهت‌های یادشده بیشتر است. نتایج برخی از پژوهش‌ها در این جنگل‌ها نشان داده است که نه تنها میانگین شمار نهال‌ها در جهت جنوبی کمتر از جهت شمالی است، بلکه نرخ کاهش کمی آن‌ها در طول آماربرداری‌ها بیشتر از جهت شمالی بوده است (حسینی و همکاران، ۱۳۸۷). در جهت جنوبی شدت تابش و طول مدت تابش نور خورشید بیشتر از جهت شمالی است و در نتیجه مقدار خشکی هوا و خشکی لایه‌های سطحی خاک بیشتر بوده و شرایط را برای تندش بذر و رویش و استقرار نهال نامساعد می‌گرداند. برخی دیگر از پژوهشگران نیز در بررسی‌های خود در زمینه زادآوری طبیعی گونه‌های چوبی در منطقه‌های خشک و نیمه خشک، نتیجه گرفتند که رطوبت از مهمترین عامل‌ها در استقرار زادآوری این گونه‌ها بوده و ابراز داشتند در این منطقه‌ها موفقیت در استقرار زادآوری بستگی به توانایی ریشه نهال برای دستیابی به رطوبت خاک دارد (Mahoney & Rood, 1998; Taylor *et al*., 1999; Shafroth *et al*., 2000).

در حال حاضر در جنگل‌های زاگرس، زادآوری بذری اغلب در جاهایی از جنگل که تاج‌پوشش انبوه و نیمه انبوهی دارند، مشاهده می‌شود. افزون بر این، زنده‌مانی و استقرار دانهال‌ها در جاهای یادشده بیشتر از سایر جاهای جنگل است. در این راستا، نتایج بررسی‌های حسینی و همکاران (۱۳۸۷) و حسینی (۱۳۸۹ب) نشان داد که تراکم دانهال‌ها در زیر تاج و سایه درختان (۳۹۰ اصله در هکتار) بیشتر از فضاهای بدون پوشش (۵ اصله در هکتار) است. فضاهای باز در این جنگل‌ها زیاد و وسیع می‌باشد، چون شدت تخریب این جنگل‌ها زیاد است. کف جنگل در این جاها در برابر تابش مستقیم نور خورشید بوده و موجب خشکی هوا و خشکی لایه‌های سطحی خاک شده و شرایط را برای تندش بذر، رویش نهال و حتی استقرار آن نامساعد می‌سازد (Li & Ma, 2002) و Kollmann, & Andersen (2008) نیز در بررسی‌های خود ابراز داشته‌اند که تاج‌پوشش با تندش و رشد نهال همبستگی مثبت داشته و در زنده‌مانی و رویش آن تأثیر مثبت دارد. بنابراین، طبیعی است که فراوانی نهال‌ها در فضاهای باز و در برابر تابش مستقیم نور خورشید نسبت به جاهای دارای تاج‌پوشش که مرطوب‌تر و مساعد هستند، کمتر باشد. از نتایج این مقایسه‌ها مشخص شد که خشکی و نبود رطوبت در لایه‌های سطحی خاک در فصل رویش بر استقرار نهال‌ها و کاهش کمی آن‌ها تأثیر گذاشته است.

پ- مشکل مدیریت زمین

عرصه‌های جنگلی و مرتعی زاگرس از سویی زمین‌های ملی بوده و در حاکمیت دولت و مدیریت سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری هستند و از سوی دیگر در عمل و به‌طور کامل به‌منظور کشت زیراشکوب و چرای دام توسط روستاییان، مردم محلی و دامداران از آن‌ها استفاده می‌شود. برای برون‌رفت از چالش‌های منابع طبیعی زاگرس باید مشکل ناهماهنگی در مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی حل شود.

ث- مشکل مدیریت زوال درختی

با وجود این‌که بیش از یک دهه است که از شروع پدیده زوال درختی می‌گذرد و بررسی‌ها و پژوهش‌های فراوانی روی جنبه‌های مختلف این پدیده انجام شده (حسینی، ۱۳۹۰؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۱؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۲؛ حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸؛ نجفی‌فر و همکاران، ۱۳۹۷؛ اعظمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ صیدزاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ اشرفی و همکاران، ۱۳۹۷؛ جوزیان و همکاران، ۱۳۹۵؛ Hosseini *et al*., 2017; Hosseini *et al*., 2018; Soleimani & Hosseini, 2020) و راهکارهای مختلفی برای رفع این مشکل ارائه شده است، اما این مشکل هنوز در سطح جنگل‌های زاگرس خودنمایی می‌کند. در مدت زمان زوال، اعتبارهای مالی هنگفتی توسط دستگاه‌های اجرایی مربوط برای حل مشکل زوال تخصیص یافته و صرف شده است، اما در عمل نتایج سودمندی دیده نشده است. برای رفع مشکل زوال باید مدیریت این مشکل به شیوه بهتری صورت گیرد و تمام اقدام‌هایی که در رویشگاه‌های جنگلی انجام می‌گیرد، بر پایه اصول علمی و با شناخت کامل از پدیده زوال انجام گیرد و راهکارهای احیایی برخاسته از پژوهش‌های انجام شده به کار گرفته شود. برای نمونه حسینی (۱۳۹۶) در پژوهشی نتیجه گرفت که کاهش حجم تاج درختان بلوط دچار خشکیدگی تاجی در احیای درختان و افزایش توان بردباری آن‌ها مؤثر است. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی استفاده از روش‌های ذخیره بارش‌ها را برای افزایش رطوبت خاک و بهبود سلامت و شادابی درختان دچار خشکیدگی، پیشنهاد نمودند. اشرفی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی با اثبات بیماری‌زایی قارچ زغالی و اثرش بر ضعف و خشکیدگی درختان بلوط ایرانی، انجام عملیات آبخیزداری را برای کاهش تنش خشکی و تهاجم قارچ‌های زغالی و حذف درختان کامل آلوده و خشک را به منظور جلوگیری از گسترش عامل بیماری توصیه کردند. جهانبازی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی تقویت درختان دچار خشکیدگی از راه پاشیدن محلول‌های حاوی عناصر غذایی را در احیای درختان مؤثر دانسته و پیشنهاد کردند. اعظمی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی توصیه کردند که حفر چاله‌های هلالی برای ذخیره بارش‌ها در بالادست درخت انجام شود که عملکرد بهتری نسبت به موقعیت پایین‌دست آن دارد. جوزیان و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی یک گونه قارچ[1] و چهار گونه زنبور پارازیتویید را برای مبارزه زیستی با سوسک‌های چوب‌خوار بلوط پیشنهاد کردند.

ج- دشواری بیابان‌زایی و مدیریت کنترل بیابان

به دنبال بروز خشکسالی‌های شدید دهه اخیر در غرب کشور و کمبود شدید بارندگی و افزایش چشمگیر دما وضعیت بسیاری از منطقه‌های بیابانی جنوب و جنوب غرب کشور سخت و موجب ایجاد و افزایش فعالیت کانون‌های گرد و غبار شد که به دنبال آن توفان‌های گرد و غباری زیادی به سوی جنگل‌های زاگرس گسیل شدند و فشار زیادی به جنگل‌ها وارد آمد. همچنین به دلیل نزدیکی برخی از منطقه‌های بیابانی با جنگل‌های بلوط، شرایط بیابانی‌شدن بر

1. *Beauveria bassiana*

جنگل‌های کنار بیابان‌ها حاکم شده و موجب بیابان‌زایی در عرصه‌های جنگلی شده است. حتی این شرایط موجب شده است که منطقه‌های باز داخل جنگل‌های تنک تخریب و به بیابان تبدیل شوند. هرچند این مشکل به ظاهر ناشی از بروز خشکسالی‌های اخیر بوده است، اما تخریب درازمدت جنگل‌ها به خاطر عامل‌های انسانی و طبیعی در ضعف و حساسیت جنگل‌ها به بیابان‌زایی و کاهش سطح آن‌ها بی‌تأثیر نبوده است.

راهکارها

برای پیشگیری از بروز چالش‌های احتمالی در آینده و یا کاهش اثرهای آن‌ها بر منابع طبیعی باید چاره‌اندیشی نمود و اقدام‌هایی اساسی برای رفع این چالش‌ها انجام داد. در مقاله حاضر سه راهکار اساسی برای جلوگیری از توسعه چالش‌ها ارائه می‌گردد. این راهکارها شامل چاره‌اندیشی برای مدیریت چرای دام و زمین، تقویت زادآوری گونه‌های جنگلی با روش‌های مناسب و فرهنگ‌سازی از راه آموزش محیط زیست در سطح مدرسه‌ها، دانشگاه‌ها و رسانه‌ها می‌باشد.

الف- <u>چاره‌اندیشی برای مدیریت چرای دام و زمین</u>

از عرصه‌های جنگلی و مرتعی از دیرباز توسط مردم محلی، روستاییان و عشایر به‌منظور کشاورزی و دامداری و کسب درآمد استفاده شده و همچنان ادامه دارد. اگر به هر شیوه‌ای سازمان‌های اجرایی متولی منابع طبیعی مدیریت‌های لازم را اعمال نکنند، جنگل‌ها و مراتع با سرعت بیش از پیش به سمت نابودی می‌روند. پیش از هر گونه اقدام برای حفاظت و احیای جنگل‌ها و مراتع، باید وضعیت مدیریتی عرصه‌های منابع طبیعی را مشخص کرد و اعمال حاکمیت بر بخش منابع طبیعی را با تدوین و اجرای طرح‌های مدیریتی تثبیت کرد تا مردم محلی، روستاییان، کشاورزان و دامداران به طور غیرمجاز از این منابع بهره‌برداری نکنند. سپس می‌توان راهکارهای مدیریتی برای حفاظت و احیای جنگل‌ها و مراتع را عملیاتی کرد. با توجه به این‌که استفاده‌های مردم از عرصه‌های جنگلی و مرتعی بخش زاگرس در قالب کشاورزی (کشت زیراشکوب) و دامداری است، از این رو، به تناسب این دو قسمت راهکارهایی پیشنهاد می‌شود. در قسمت کشت زیراشکوب می‌توان **۱**- سطح عرصه‌های این نوع کشت را تا حد امکان کاهش داد و کشاورزی را به زمین‌های حریم روستاها محدود کرد؛ **۲**- از کشاورزی در زمین‌های جنگلی شیب‌دار که موجب فرسایش خاک می‌شود، جلوگیری کرد؛ **۳**- کیفیت کشاورزی اصلاح شود و در این راستا از محصول‌هایی چند ساله برای کشاورزی در جنگل استفاده شود که در کنار رفع نیاز کشاورزان محلی موجب تقویت خاک‌های جنگلی و شخم کمتر زیراشکوب شود.

در قسمت دامداری می‌توان راهکارهایی را برای کاهش فشار چرای دام بر عرصه‌های جنگلی و مرتعی پیشنهاد داد. **۱**- در هر منطقه نقطه تعادل دام و مرتع تعیین شود و سپس بر اساس آن پروانه چرا و بهره‌برداری از مراتع صادر شود؛ **۲**- بهبود بهره‌وری گوسفندان در منطقه از راه اصلاح نژاد آن‌ها انجام شود که در این صورت هر دامدار با وجود داشتن شمار کم دام، می‌تواند ضمن فشار کمتر به عرصه‌های جنگلی و مرتعی، بهره‌وری بیشتری از محصول‌های دامی داشته باشد؛ **۳**- می‌توان عرصه‌های مرتعی را از راه تقویت پوشش گیاهی احیا کرد و کیفیت آن‌ها را برای چرای دام بهبود بخشید؛ **۴**- شمار دام‌ها در جنگل بر اساس ظرفیت مراتع و گیاهان علفی کف جنگل باشد؛ **۵**- می‌توان با اعطای کمک‌های مالی کم‌بهره به دامداران، دامداری‌های متحرک را به دامداری‌های ساکن یا نیمه‌متحرک تبدیل کرد؛ **۶**- می‌توان گستره چرای دام را به محدوده رویشگاه‌های جنگلی مجاور روستاها محدود کرد.

ب- تقویت زادآوری گونه‌های جنگلی با روش‌های مناسب

در این‌جا باید اقدام‌های احیایی همسو با اصول جنگل‌شناسی و زیست‌بوم‌شناسی جنگل و بر اساس شناخت‌های دقیق از شرایط و وضعیت جنگل انجام شود تا امکان رسیدن به هدف که همان احیاء اصولی جنگل همراه با پایداری آن است، فراهم شود. در جنگل‌های زاگرس که دچار تخریب شده و توان تجدید نسل در آن ضعیف شده یا از بین رفته است، بسته به وضعیت جاهای مختلف آن باید اقدام‌های احیایی مختلفی را مانند کمک به استقرار زادآوری طبیعی، بذرکاری و نهال‌کاری با گونه‌های بومی انجام داد (Hosseini, 2021).

پ- فرهنگ‌سازی از راه اجرای برنامه‌های آموزشی و ترویجی حفاظت از محیط زیست در سطح مدرسه‌ها، دانشگاه‌ها و رسانه‌ها

شاید یکی از دلیل‌های اصلی تخریب‌های انسانی جنگل‌های زاگرس به خاطر نبود آگاهی مردم از ارزش‌های گوناگون مادی و معنوی آن‌ها باشد. به همین دلیل، مهمترین راهکار رفع چالش‌های منابع طبیعی و پیشگیری از ایجاد چالش‌های آتی می‌تواند فرهنگ‌سازی حمایت از جنگل‌ها و عنصرهای زیستی موجود در آن‌ها از راه رسانه‌های ملی باشد. همچنین، می‌توان فرهنگ‌سازی شناخت ارزش‌های جنگل‌ها و حمایت و حفاظت از آن‌ها را به‌طور ریشه‌ای از راه مدرسه‌ها و دانشگاه‌ها انجام داد و این فرهنگ را به کمک کودکان، نوجوانان و جوانان به خانواده‌های آن‌ها منتقل کرد (Moga *et al.*, 2016).

نتیجه‌گیری

در صورتی که چالش‌های محیط زیستی به وجود آمده در بخش منابع طبیعی مدیریت نشوند و چاره‌ای برای حل آن‌ها اندیشیده نشود، بی‌تردید در آینده‌ای نزدیک با دو چالش بزرگ روبه‌رو خواهیم بود. چالش اول در اثر نبود مدیریت‌های زمین، چرای دام، بیابان‌زایی و زوال درختی، ایجاد شده و توسعه می‌یابد. این چالش در واقع کاهش سطح جنگل‌ها و افزایش سطح بیابان است. به عبارت دیگر، همسو با تخریب جنگل‌ها و کاهش سطح آن‌ها، افزایش سطح بیابان‌ها و توسعه آن‌ها در حاشیه جنگل‌ها و حتی درون آن‌ها دیده خواهد شد. با از بین رفتن شرایط زیست‌بومی و رویشگاهی مساعد در عرصه‌های جنگلی در اثر تخریب آن‌ها و تغییر به سمت شرایط بیابانی شدن، چالش دوم رخ می‌دهد. در چالش دوم، گونه‌های جنگلی از زیستگاه‌های خود مهاجرت کرده و قلمرو خود را به سمت زیستگاه‌های مساعدتر و شرایط مطلوب‌تر تغییر می‌دهند. به عبارت دیگر، تغییرهایی در مرز رویش گونه‌های جنگلی دیده خواهد شد. در این‌صورت بسیاری از رویشگاه‌ها و زیستگاه‌هایی که خالی از قلمرو و رویش گونه‌های گیاهی جنگلی و مرتعی می‌شوند، به تدریج به بیابان تبدیل خواهند شد. برای پیشگیری از بروز چالش‌های احتمالی در آینده و یا کاهش اثرهای آن‌ها بر منابع طبیعی باید چاره‌اندیشی نمود و اقدام‌هایی اساسی برای رفع و دفع این چالش‌ها انجام داد. در مقاله حاضر سه راهکار اساسی برای جلوگیری از توسعه چالش‌ها ارائه شد. این راهکارها شامل چاره‌اندیشی برای مدیریت چرای دام و زمین، تقویت زادآوری گونه‌های جنگلی با روش‌های مناسب و فرهنگ‌سازی از راه آموزش محیط زیست در سطح مدرسه‌ها و دانشگاه‌ها و رسانه‌ها می‌باشند.

منابع

ابراهیمی رستاقی، مرتضی. (۱۳۸۱). جنگل‌های زاگرس و نقش آن در توسعه ملی. *مجموعه مقالات جنگلداری پایدار*، مقاله چاپ شده در همایش علمی پژوهشی مجتمع کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر و چالوس.

ابراهیمی رستاقی، مرتضی. (بهمن ۱۳۸۹). ابعاد کنونی تهدیدات تنوع زیستی در چشم انداز زاگرس مرکزی با تأکید بر پوشش جنگلی. مقاله چاپ شده در اولین همایش ملی بررسی تهدیدات و عوامل تخریب تنوع زیستی در منطقه زاگرس مرکزی، اصفهان: دانشگاه صنعتی.

ابراهیمی رستاقی، مرتضی. (۱۳۹۷). چالش‌ها و فرصت‌های کنونی و آینده جنگل‌های بلوط زاگرس، سخنرانی علمی، دانشگاه ایلام.

اعظمی، ایاد؛ حسینی، احمد؛ حسین زاده، جعفر. (۱۳۹۷). اثر عمق خاک و جهت جغرافیایی بر رطوبت خاک در جنگل‌های بلوط دچار خشکیدگی (تحقیق موردی: جنگل ملەسیاه، استان ایلام). *بوم‌شناسی جنگل‌های ایران*، ۶(۱۱)، ۵۰-۴۱.

اشرفی، جواد، حسینی، احمد، حسین زاده، جعفر، میرابوالفتحی، منصوره. (۱۳۹۷). بررسی بیماری زغالی بلوط در جنگلهای بلوط دچار خشکیدگی استان ایلام. *تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران*، ۱۶(۱)، ۱۲-۱.

محمدنیا افروزی، شهریار. (۱۳۹۹). *آمارنامه کشاورزی* (جلد دوم)، تهران: وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات.

جزیره‌ای، محمدحسین؛ و ابراهیمی رستاقی، مرتضی. (۱۳۸۲). *جنگل‌شناسی زاگرس*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

جوزیان، عسگر، وفایی شوشتری، رضا، عسکری، حسن. (۱۳۹۵). بررسی سوسک‌های چوب‌خوار بلوط و دشمنان طبیعی آنها در جنگل‌های استان ایلام. *تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران*، ۱۴(۲)، ۱۰۷-۱۲۱.

جهانبازی، حسن، ایران‌منش، یعقوب، طالبی، محمود، پورهاشمی، مهدی. (۱۴۰۱). اثر محلول‌پاشی مواد غذایی بر اندازه عناصر پرمصرف درختان بلوط (*Quercus brantii*) سالم و دارای خشکیدگی در منطقه منج استان چهارمحال و بختیاری. *بوم‌شناسی جنگل‌های ایران*، ۱۰(۱)، ۲۱-۹.

حسین‌زاده، جعفر؛ تنگو، افسانه؛ نجفی‌فر، علی؛ حسینی، احمد. (۱۳۹۷). بررسی رابطه تغییرات رطوبت خاک با شاخص‌های اقلیمی در رویشگاه جنگلی ملەسیاه در استان ایلام. *مجله آب و خاک*، ۳۲(۴)، ۸۳۰-۸۲۱.

حسین‌زاده، جعفر، محمدپور، ماشااله، اعظمی، ایاد. (۱۳۹۸). تأثیر ذخیره نزولات جوی بر بهبود وضعیت درختان بلوط ایرانی دچار خشکیدگی (مطالعه موردی: جنگل‌های چوار استان ایلام). *تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران*، ۱۷(۱)، ۲۵-۱۴.

معیری، محمدهادی؛ حسینی، احمد؛ حیدری، حشمت‌اله. (۱۳۸۷). ارزیابی روند تغییرات جنگل هیانان ایلام و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت بهینه آن. *مجله پژوهش و سازندگی*، ۲۱(۳)، ۱۱۵-۱۰۸.

حسینی، احمد.، معیری، محمدهادی. و حیدری، حشمت‌اله. (۱۳۸۷). اثر تغییرات ارتفاع از سطح دریا در زادآوری طبیعی و سایر خصوصیات کمی و کیفی بلوط غرب در جنگل‌های هیانان ایلام. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان*، ۱۵(۱)، ۱۰-۱.

حسینی، احمد. (۱۳۸۹الف). بررسی دینامیک زادآوری دانه‌زاد بلوط به‌منظور تعیین عوامل محدودکننده استقرار آن در جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی، جنگل‌های سیاه‌کوه ایلام). *فصلنامه علمی اکوسیستم‌های طبیعی ایران*، ۱(۱)، ۸-۱.

حسینی، احمد. (۱۳۸۹ب). اثر تاج پوشش بر زادآوری طبیعی در جنگل‌های بلوط ایرانی در منطقه مانشت ایلام. *مجله تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۱۸(۲)، ۲۲۹-۲۱۹.

حسینی، احمد. (۱۳۹۰). بررسی میزان آلودگی درختان به سوسک‌های چوبخوار و ارتباط آن با شرایط رویشگاهی در جنگل‌های بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) در استان ایلام. *تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران*، ۹(۱)، ۶۶-۵۳.

حسینی، احمد. (۱۳۹۶). تغییرات نیتروژن و فسفر در درختان بلوط ایرانی و خاک توده‌های دچار خشکیدگی در ایلام. *جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۰(۲)، ۲۴۰-۲۳۱.

حسینی، احمد؛ حسینی، سیدمحسن؛ رحمانی، احمد؛ آزادفر، داوود. (۱۳۹۱). تأثیر مرگ و میر درختی بر ساختار جنگل‌های بلوط ایرانی در استان ایلام. *مجله تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۲۰(۴)، ۵۷۷-۵۶۵.

حسینی، احمد؛ سیدمحسن؛ رحمانی، احمد؛ آزادفر، داوود. (۱۳۹۲). مقایسه خصوصیات محیط‌های رقابتی توده‌های سالم بلوط ایرانی و توده‌های متأثر از زوال بلوط در استان ایلام. *جنگل و صنوبر ایران*، ۲۱(۴)، ۶۱۶-۶۰۶.

حسینی، احمد؛ جهانبازی گوجانی، حسن. (۱۴۰۱). تعیین شاخص‌های مورفولوژیکی نشانگر تنوع میوهٔ درختان بلوط ایرانی در سطح درخت و رویشگاه. *جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۵(۲)، ۱۴۰-۱۳۱.

فتاحی، محمد. (۱۳۷۳). *بررسی جنگل‌های زاگرس و مهمترین عوامل تخریب آن*، تهران: انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور.

قهرمانی، لقمان؛ سعیدی زادی، فریده؛ غضنفری، هدایت. (۱۳۹۵). پاسخ درختان بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) به برداشت سقز. *پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۲۳(۴)، ۴۴-۲۵.

صیدزاده، حیدر، رضایی، جعفر، حسین زاده، جعفر، پورهاشمی، مهدی، سیداخلاقی، سیدجعفر. (۱۴۰۱). بررسی عوامل مؤثر بر تمایل به مشارکت مردم محلی در بازسازی جنگل‌های بلوط دچار خشکیدگی در استان ایلام. *بوم‌شناسی جنگل‌های ایران*، ۱۰(۲)، ۱۴۵-۱۳۶.

مروی مهاجر، محمدرضا. (۱۳۸۴). *جنگل‌شناسی*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

نجفی‌فر، علی، حسین‌زاده، جعفر، پورهاشمی، مهدی، حسینی، احمد. (۱۳۹۷). نقش برش‌های بهداشتی در زنده‌مانی و شادابی درختان بلوط ایرانی در معرض خشکیدگی حوضه رویشی زاگرس (مطالعه موردی، جنگل ملەسیاه، شهرستان ایلام). *پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۲۵(۳)، ۶۰-۴۹.

Bluff, L. (2016). Reducing the effect of planned burns on hollow-bearing trees. Fire and adaptive management. Department of Environment, Land and Water Planning, Melbourne: Victorian Government Library Service.

Crane, M., Lindenmayer, D. B., Cunningham, R. B., & Stein, J. A. R. (2017). The effect of wildfire on scattered trees ‘keystone structures’ in agricultural landscapes. *Austral Ecology*, 42(2): 145-153.

Hosseini, A., Hosseini, S. M., & Linares, J.C. (2017). Site factors and stand conditions associated with Persian oak decline in Zagros mountain forests. *Forest Systems*, 26 (3), e014.

Hosseini, A., Hosseini, S. M., & Linares, J.C. (2018). Linking morphological and ecophysiological leaf traits to canopy dieback in Persian oak trees from central Zagros. *Journal of forestry research*, https://doi.org/10.1007/s11676-018-0805-4.

Hosseini, A. (2021). *Natural regeneration in the western forests of Iran*. Chisinau: Lab Lambert Academic Publishing.

Joseph, M., Riley, J.r., & Robert, H.J. (2002). Factors limiting regeneration of *Quercus alba* and *Cornus florida* in formerly cultivated coastal plain sites, South Carolina. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 571-586.

Kollmann, J. P. C., & Andersen, M. R. (2008). Factors limiting regeneration of an endangered conifer in the highlands of Guatemala. *Journal of Nature Conservation*, 16 (3), 146-156.

Li. Q., & Ma, K. (2002). Factors affecting establishment of *Quercus liaotungensis* Koidz. under mature mixed oak forest overstory and in shrubland. *Forest Ecology and Management*, 176(1-3), 133-146.

Mahoney, J. M., & Rood, S. B. (1998). Streamflow requirement for cottonwood seedling recruitment: an interactive model. *Wetlands*, 18, 634-645.

Moga, C.I., Samoila, C., Ollerer, K., Bancila, R.I., Reti, K.O., Craiveanu, C., Poszet, S., Rakosy, L., & Hartel, T., (2016). Environmental determinants of the old oaks in wood-pastures from a changing traditional social-ecological system of Romania. *Ambio*, 45, 480–489.

Shafroth, P. B., Stromberg, J. C., & Patten, D. T. (2000). Woody riparian vegetation response to different alluvial water table regimes, West N. Am. *Naturalist*, 60, 66-76.

Soleimani, R., & Hosseini, A. (2020). The impact of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) on soil characteristics in a declining forest. *Journal of forestry research*, 31(6), 2359-2366.

Taylor, j. p., Wester, D. B., & Smith, L. M. (1999). soil disturbance, flood management and riparian woody plant establishment in the Rio Grande floodplain. *Wetlands*, 19, 372-382.

Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9(1):35-50 (2024)

Environmental Challenges Facing Zagros Forests

Hosseini, A.[1, 2]

Examining the environmental challenges of natural resources is valuable from a management point of view and is of great importance due to clarifying the state of natural resources and its future path. Since the distant past, natural resources have been faced with many destructive factors due to the socio-economic relations of people with the forest, which has caused the forests and pastures to undergo serious destruction. Some of these destructive factors include under forest layer agriculture, extensive livestock grazing, indiscriminate cutting of trees, harvesting of none wood-products and coal mining projects, which are of human origin. Some other destructive factors that are the result of the events of the last decade in the area of Zagros forests include regional climate changes, drought, dust, desertification and expansion of deserts, tree decline and fires. The current article focuses on the environmental destructions resulting from the past exploitation of natural resources and from the events of the last decade, and has examined the resulting environmental challenges. The result of these investigations was the determination of the future environmental challenges of natural resources in the Zagros vegetation area. Based on this, basic measures to manage the challenges and prevent the quantitative and qualitative reduction of forests and their restoration include the correct implementation of livestock grazing and land use management, strengthening the regeneration of forest species with appropriate methods and environmental education at the level of schools, universities and media were suggested.

Keywords: Climate change, Livestock grazing, Oak forests, Quantitative and qualitative reduction, Tree decline.

1. Corresponding author, Email: ahmad.phd@gmail.com
2. Associate Professor, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam.

مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۹ شماره ۱ صفحه‌های ۵۱ تا ۶۴ (۱۴۰۳)

مروری کوتاه بر فناوری‌های نوین در زمینه سنجش و مدیریت بیماری‌های ویروسی و شبه ویروسی گیاهان ۱ – سنجش[1]

کرامت‌اله ایزدپناه[2،3]

چکیده

برای مدیریت موفقیت‌آمیز بیماری‌های ویروسی و شبه‌ویروسی گیاهان، سنجش[4] موثر بیمارگرها ضروری است. سنجش ممکن است زیستی[5] (مبتنی بر عفونت‌زایی)، ریخت‌شناختی[6] (شکل و اندازه برای نمونه بر مبنای الکترون میکروسکوپی) یا براساس ویژگی‌های پروتئین و نوکلئیک اسید بیمارگر باشد. شیوه‌های مبتنی بر ویژگی‌های پروتئین دربرگیرنده روش‌های گوناگون سرولوژیک مانند ELISA[7]، میکروآری، الکتروفورز و حسگرهای زیستی است. شیوه‌های مبتنی بر ویژگی‌های ژنوم بیمارگر دربرگیرنده دورگه‌سازی نوکلئیک اسید، الکتروفورز، تراشه میکروآری، انواع واکنش زنجیره‌ای پلیمراز (PCR)[8] و توالی‌یابی‌های نسل جدید (NGS)[9] است. ترکیبی از روش‌های مختلف (مانند immuno-electron microscopy، immunoelectrophoresis و immunocapture PCR) نیز ممکن است بهره‌گیری شوند. در این مقاله به قابلیت اجرا، حساسیت، اختصاصیت و موردهای استفاده از این روش‌ها اشاره شده است. در حال حاضر، متداول‌ترین و کاراترین فناوری‌ها برای ردیابی هدفمند بیمارگرهای ویروسی و شبه ویروسی ELISA، PCR، LAMP[10] و انواع روش‌های مبتنی بر این‌ها و برای شناسایی و ردیابی غیرهدفمند انواع بیمارگرها در گیاه، فناوری‌های مبتنی بر توالی‌یابی نسل جدید است. بیوانفورماتیک در موفقیت و پیشرفت این فناوری‌ها نقش برجسته‌ای داشته است. همه این فناوری‌ها بوم‌سازگار و در داخل کشور قابل اجرا هستند.

واژه‌های کلیدی: پروژه پژوهشی، ردیابی ویروس، فرهنگستان علوم، فناوری‌های نوین ردیابی.

مقدمه

از زمان شناسایی ویروس‌ها به عنوان گروه جدیدی از بیمارگرهای گیاهی (Beijerinck, 1898)، سنجش ویروس همواره یکی از دغدغه‌های دانشمندان بوده است؛ زیرا بدون کاربرد یکی از شیوه‌های سنجش، انجام پژوهش‌های موثر در مورد ویروس‌ها، اگر نه غیر ممکن، ولی بسیار دشوار بود. از سوی دیگر، مدیریت بیماری‌های ویروسی گیاهان نیز بدون سنجش موثر ویروس

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۷

بخشی از طرح «بررسی فناوری‌های نوین بوم‌سازگار در کشاورزی و منابع طبیعی» گروه علوم کشاورزی فرهنگستان علوم ج. ا. ایران.

۲- نویسنده مسئول، پست الکترونیک: izadpana@shirazu.ac.ir

۳- استاد دانشگاه شیراز (عضو پیوسته فرهنگستان علوم ج. ا. ایران).

4. Assay 5. Biological 6. Morphological 7. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA)
8. Polymerase chain reaction (PCR) 9. Next generation sequencing (NGS)
10. Loop mediated isothermal amplification (LAMP)

امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این جا لازم است اشاره شود که سنجش ممکن است چونی[1] یا چندی[2] باشد. سنجش چونی یا کیفی دربرگیرنده تشخیص[3] و ردیابی[4] و سنجش چندی یا کمی عبارت از اندازه‌گیری مقدار یا غلظت ویروس است.

به دلیل غیرقابل کشت بودن در محیط مصنوعی، وابستگی کامل به یاخته‌های زنده و اندازه بسیار کوچک، روش‌های اولیه سنجش ویروس‌ها به طور عمده زیستی و بر پایه عفونت‌زایی بود. تعیین دامنه میزبانی، نوع واکنش و نشانه‌ها روی گیاهان محک نسبت به مایه‌زنی مکانیکی محیط دارای ویروس و به دنبال آن بررسی واکنش ایجاد شده و درصد گیاهان مبتلا شده، شیوه اولیه سنجش در بررسی ویروس موزائیک توتون (TMV)[5] بود. کشف این پدیده که TMV پس از مایه‌زنی مکانیکی در برخی از گیاهان به‌جای نشانه‌های سیستمیک، لکه‌های موضعی ایجاد می‌کند و این‌که تعداد این لکه‌ها متناسب با غلظت ویروس است و نیز لکه‌های موضعی در مقایسه با نشانه‌های سیستمیک در مدت بسیار کوتاه‌تری پدیدار می‌شوند، تحولی در روش سنجش چندی به وجود آورد (Holmes, 1929; Roberts, 1964)، اما برای بیشتر ویروس‌ها، میزبان با نشانه لکه موضعی قابل دید وجود نداشت و برای بخشی از آن‌ها که به طور مکانیکی قابل انتقال بودند، تشخیص با تعیین دامنه میزبانی و نوع نشانه‌های آن‌ها و سنجش کمی با تعیین درصد گیاهانی که پس از مایه‌زنی تولید نشانه می‌کردند، انجام می‌شد. تلاش‌های زیادی شده بود که برای هر ویروس فهرست گیاهان حساس و غیرحساس تهیه و در دسترس پژوهشگران قرار بگیرد (برای نمونه Horvath, 1993 و Brunt *et al*., 1996 را ببینید).

روش‌های سنجش زیستی با وجود برخورداری از حساسیت زیاد، بدون دقت لازم و بسیار وقت‌گیر بودند و نتایج حاصل از آن‌ها از شرایط محیط، نوع و رقم گیاه و بسیاری از عامل‌های کوچک و بزرگ دیگر تاثیرپذیر بودند. در نتیجه، دانشمندان همواره در پی یافتن و کاربرد روش‌های دیگر برای سنجش بودند. در دهه‌های سوم تا ششم سده بیستم، روش‌های بیشمار شیمیایی و فیزیکی برای سنجش ویروس‌ها ابداع شدند که شاخص‌ترین آن‌ها استفاده از الکترون میکروسکوپ بود. تحول دیگری که در این دوره رخ داد کشف ویروس‌های گیاهی دیگر و همچنین قابلیت ایمنی‌زایی TMV و سایر ویروس‌ها در بدن جانوران آزمایشگاهی بود که به ابداع و کاربرد انواع روش‌های سرولوژیک در سنجش چندی و چونی ویروس‌ها انجامید. این روش‌ها به مراتب آسان‌تر، سریع‌تر و اختصاصی‌تر بودند و یکی از آن‌ها که بر مبنای واکنش آنزیمی ELISA قرار داشت، نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر آسان‌تر، حساس‌تر و دقیق‌تر بود.

سنجش ویروس نه‌تنها از جهت بررسی‌های علمی بلکه از نظر مدیریت بیماری‌های ویروسی نیز پراهمیت است. به عبارت دیگر، رابطه تنگاتنگی میان سنجش ویروس و کنترل بیماری ناشی از آن وجود دارد. نمونه ملموس آن نقش آزمون‌های PCR در مدیریت همه‌گیری اخیر کرونا بود.

امروزه نیز به‌طور کم و بیش از بسیاری از شیوه‌های فیزیکی، شیمیایی و سرولوژیک و حتی زیستی سنجش ویروس استفاده می‌شود، اما در این‌جا تنها به برخی از آن‌ها به طور اختصار اشاره شده و تاکید بیشتر این مقاله بر فناوری‌های جدید و کاربرد شیوه‌های مولکولی خواهد بود. پیشرفت‌های جدید در این زمینه به طور عمده در جهت افزایش حساسیت، دقت، سرعت، اختصاصیت و آسانی اجرا بوده است (Cassedy *et al*., 2021).

روش‌های مبتنی بر ایمنی‌زایی

پس از این‌که معلوم شد TMV و بسیاری از ویروس‌های گیاهی دیگر می‌توانند در بدن جانور تولید پادتن[6] اختصاصی را تحریک کنند، شیوه‌های تشخیص و ردیابی سرولوژیک این ویروس‌ها رونق گرفت و در پژوهش‌های ویروس‌شناسی

1. Qualitative 2. Quantitative 3. Diagnosis 4. Detection 5. Tobacco mosaic virus (TMV) 6. Antibody

نقش بسیار مهمی دارد. برتری روش‌های سرولوژیک آسانی اجرا و اختصاصی بودن آن‌ها بود. روش‌هایی مانند آزمون نشت در آگار[1] سال‌ها برای شناسایی و تعیین رابطه ویروس‌ها به‌کار گرفته شدند و هنوز هم کاربرددارند. کاستی این روش‌ها کم بودن حساسیت و دشواری چندی (کمی)سازی آن‌ها بود. برای رفع برخی از این کاستی‌ها از شیوه‌هایی مانند رسوب در قطره‌های ریز[2] و تعیین آخرین حد رقیق شدن آنتی‌ژن برای انجام واکنش استفاده می‌شد. شیوه دیگر فایق آمدن بر مشکل سنجش، تلفیق سرولوژی با روش‌های دیگر بود که از آن میان می‌توان تلفیق با الکترون‌میکروسکوپی[3]، تلفیق با الکتروفورز و تلفیق با واکنش آنزیمی را نام برد.

در تلفیق با الکترون میکروسکوپی، به‌دام‌اندازی[4] پیکره‌های ویروس توسط مولکول‌های پادتن، حساسیت سنجش میکروسکوپی را افزایش می‌دهد و مشاهده هاله‌ای از پادتن در پیرامون پیکره ویروس[5] سنجش چونی (تشخیص) ویروس را تکمیل می‌کند. برای رفع کمبود تمایز رنگی[6] پیکره‌های ویروس در میکروسکوپ، افزون بر رنگ‌آمیزی منفی یا مثبت، از برچسب ذره‌های فلزی مانند طلا[7]، به ویژه برای تعیین جایگاه ویروس در یاخته استفاده می‌شود (Milne, 1993). یکی از روش‌های تلفیق سرولوژی با الکتروفورز که هنوز هم از آن استفاده می‌شود، آزمون لکه‌گذاری پروتئین[8] است که بیشتر برای تعیین هویت پروتئین‌ها و تشخیص ویروس‌ها به‌کار می‌رود.

پیشرفت دیگری که در دهه ۱۹۷۰ میلادی در زمینه سنجش ویروس به وجود آمد، ابداع شیوه‌های تلفیق سرولوژی با واکنش آنزیمی بود که ELISA نامیده شد و در آن از اختصاصیت پادتن و ایجاد حساسیت زیاد توسط آنزیم متصل به آن استفاده می‌شود. روش‌های ELISA افزون بر افزایش فراوان حساسیت، قابل کمی‌کردن هستند، با کاهش مقدار مصرف پادتن و دیگر مواد لازم، ارزان‌تر از دیگر روش‌ها تمام می‌شوند و توانایی آزمایش همزمان صدها نمونه را در یک روز دارند. در شیوه‌های گوناگون ELISA به طور معمول واکنش در داخل حفره‌های میکروپلیت از جنس پلی‌استایرین انجام می‌شود و نتیجه پایانی به‌طور چشمی سنجیده شده و یا به‌کمک دستگاه پلیت ریدر[9] که مقدار جذب نور در طول موج معینی را نشان می‌دهد، اندازه‌گیری می‌شود. با ماشینی کردن مرحله‌های مختلف آزمون ELISA این امکان بوجود آمده که نمونه مورد آزمایش از یک سو وارد یک سیستم زنجیره‌ای شده و از سوی دیگر نتایج ثبت‌شده خارج شود.

این توانمندی‌های ELISA موجب شده که با وجود رواج روش‌های مولکولی، هنوز یکی از شیوه‌های متداول سنجش ویروس‌ها و پروتئین‌ها در آزمایشگاه‌های پزشکی و بیماری‌شناسی گیاهی باشد. با وجود این، آزمون‌های ELISA هرچند در اصول یکسان هستند در شیوه اجرا از تنوع زیادی برخوردارند. در این جا تنها از دو روش DIBA[10] و TPIA[11] نام برده می‌شود که می‌توانند جنبه کاربردی بیشتری داشته باشند. در این دو روش، تهیه نمونه بسیار آسان است و به جای میکرو پلیت از صفحه کاغذ نیتروسلولز یا نایلون استفاده می‌شود و با گذاشتن قطره کوچکی از عصاره یا فشار دادن برشی از بافت روی کاغذ، نمونه برای مرحله‌های بعدی آماده می‌شود (Hibi & Saito, 1985; Huth, 1999). بدین ترتیب، می‌توان به آسانی و بدون نیاز به وسیله‌های ویژه نمونه را تهیه و آن را برای مرحله‌های بعدی آزمایش نگهداری و یا برای ادامه آزمایش به آزمایشگاه دوردستی ارسال کرد. این روش‌ها برای ردیابی ویروس‌ها در مزرعه‌ها و باغ‌ها به خوبی اجراشدنی است، همان‌طور که چند سال پیش برای ردیابی ویروس تریستزا در ناحیه‌های مرکبات‌خیز جنوب کشور مورد استفاده قرار گرفت.

1. Agar-gel diffusion test
2. Microprecipitin test
3. Serologically specific electron microscopy
4. Trapping
5. Decoration
6. Contrast
7. Gold labeling
8. Western blotting
9. Plate reader
10. Dot immunobinding assay
11. Tissue-print immune assay

یکی دیگر از کاربردهای ایمونولوژی در ردیابی و تشخیص، استفاده از آن در سنجش نشت جانبی[1] است. در این آزمون ماده‌ای که قرار است سنجش شود (پروتئین، نوکلئیک اسید، ویروس، سم، هورمون یا یک ترکیب شیمیایی) در انتهای یک نوار باریک کاغذی (به طور معمول از جنس سلولز) بارگذاری می‌شود و به روش موئینگی (کاپیلاری) درون نوار حرکت می‌کند و وقتی به ماده ردیاب[2] که روی نوار جاسازی شده برسد، با آن ترکیب و تشکیل باندی می‌دهد که با چشم دیده می‌شود و می‌توان با دستگاه آن را خوانش‌کرد. برای ویروس‌ها و پروتئین‌ها یکی از مواد ردیاب پادتن ماده‌ای است که قرار است شناسایی شود و روش کاربرد آن LIFA[3] نام دارد. این آزمون بسیار سریع است و می‌تواند در مدت ۳۰ دقیقه به نتیجه برسد (Bahadir & Sezginturk, 2016; Koczula & Gallotta, 2016).

سنجش نشت جانبی روشی آسان، ارزان، اجراشدنی در شرایط مختلف و بدون نیاز به دستگاه‌های گران‌قیمت است. از این روش در پزشکی برای آزمایش ترشح‌های مختلف بدن (بزاق، خون، ادرار و عرق) و در صنایع غذایی برای آزمایش ترکیب‌های مختلف و آلاینده‌های محیط و آب استفاده می‌شود. در گیاهان می‌توان از عصاره خام گیاه برای ردیابی ویروس یا پروتئین‌های ویژه و هورمون‌ها استفاده کرد. اجرای آن نیاز به تخصص ندارد چنان‌که آزمایش بارداری به آسانی توسط خانم‌های خانه‌دار انجام می‌گیرد. با وجود این ویژگی‌های سودمند، هنوز آن‌طور که باید و شاید این روش برای سنجش ویروس‌های گیاهی مورد استفاده قرار نگرفته است.

هرچند واکنش‌های سرولوژیک اختصاصی هستند، گاه لازم است (به ویژه در بررسی همه‌گیری) واریانت معین یا گروه معینی از واریانت‌های ویروس یا پروتئین ردیابی شوند. در این صورت می‌توان از پادتن یک‌همسانه‌ای[4] استفاده کرد. از آن‌جا که یاخته‌های نوع B که مولد پادتن هستند، هر یک ممکن است پادتن متفاوتی از یک ویروس یا پروتئین تولید کنند، در این روش به منظور خالص‌سازی، تنها از یک یاخته تولیدکننده پادتن استفاده می‌شود که آن را در محیط کشت خارج از بدن تکثیر و یک همسانه[5] تولیدکننده پادتن از آن تهیه می‌کنند. البته، برای این‌که بتوان این یاخته را در محیط کشت به طور نامحدود تکثیر کرد، آن را با یک یاخته سرطانی ترکیب و به اصطلاح یک هیبریدوما[6] تهیه و از آن استفاده می‌کنند.

قابلیت اجرا و کاستی‌های سرولوژی

روش‌های سرولوژیک برای سنجش ویروس‌ها و بیمارگرهای دیگر بسیار مفید و همگی در ایران اجراشدنی هستند. پادتن لازم برای این آزمایش‌ها را می‌توان در داخل کشور تولید یا با قیمت گزاف از خارج تهیه کرد. یکی از دشواری‌های تهیه پادتن در داخل کشور، لزوم خالص‌سازی ایمیونوژن (ویروس یا پروتئین) پیش از تزریق به جانور آزمایشگاهی است که امکان انجام آن در بسیاری از آزمایشگاه‌ها وجود ندارد. با کاربرد فناوری پروتئین نوترکیب[7] که هم اکنون در بسیاری از آزمایشگاه‌های کشور اجراشدنی است، تولید پروتئین پوششی یا هر پروتئین دیگر ویروس برای تزریق به جانور آزمایشگاهی امکان‌پذیر شده است. بدیهی است برای تولید پروتئین نوترکیب دانستن ترادف نوکلئوتیدی ژن آن پروتئین و تکثیر و همسانه‌سازی آن ضروری است. همچنین، روش‌های سرولوژیک برای ویروئیدها که پوشش پروتئینی (آنتی‌ژن) ندارند و فیتوپلاسماها که کشت یا جداسازی آن‌ها از گیاه امکان‌پذیر نشده اجراشدنی نیست، هرچند تولید پادتن یک‌همسانه‌ای و استفاده از آن در ردیابی و تشخیص فیتوپلاسما[8] گزارش شده است (Loi *et al*., 2002) و تولید پادتن بر ضد پروتئین‌های نوترکیب فیتوپلاسمایی (به ویژه پروتئین‌های غشایی) امکان‌پذیر است. همچنین، در موردهایی سعی شده که با تزریق عصاره

1. Lateral flow assay (LFA) 2. Detector 3. Lateral immunoflow assay
4. Monoclonal antibody 5. Clone 6. Hybridoma 7. Recombinant protein 8. Phytoplasma

گیاه مبتلا به جانور آزمایشگاهی برای مجموعه پروتئین‌های موجود در گیاه (از جمله فیتوپلاسما) آنتی‌سرم تهیه شود و سپس با جذب پادتن‌های گیاه سالم از این مجموعه (به کمک عصاره گیاه سالم)، برای فیتوپلاسما آنتی‌سرم ضعیفی به دست آید (Salehi *et al*., 2011; Salehi *et al*., 2016). به همین دلیل، سیستم تشخیص سرولوژیک مناسب و کارا برای باکتری سخت‌کشت عامل هوانگ‌لانگ‌بینگ[1] مرکبات نیز تهیه نشده است. این در حالی است که برای اسپیروپلاسمای عامل استابورن مرکبات[2] که قابل کشت در محیط مصنوعی است دشواریی برای تهیه پادتن وجود نداشته است. خوشبختانه در مواردی که برای ردیابی اختصاصی استفاده از واکنش سرولوژیک امکان‌پذیر نیست، واکنش زنجیره‌ای پلیمراز توانسته است این کاستی را جبران کند.

واکنش زنجیره‌ای پلیمراز (PCR)

یکی از موثرترین تحول‌های زیست‌فناوری ابداع و رواج شیوه‌های PCR در سال‌های آخر قرن بیستم بود که در آن تولید میلیون‌ها نسخه از روی یک مولکول DNA در عرض چند دقیقه تا چند ساعت امکان‌پذیر شده است (Mullis *et al*., 1986). شیوه‌های PCR به طور فزاینده‌ای در ردیابی، تشخیص و بررسی ویروس‌ها و سایر بیمارگرها مورد استفاده قرار گرفته‌اند و کمتر آزمایشگاهی می‌توان یافت که امکان استفاده از این شیوه‌ها را نداشته باشد. از آن‌جا که بیشتر ویروس‌های گیاهی دارای ژنوم RNA هستند، لازم است ابتدا ژنوم یا قطعه مورد آزمایش با فرایندی به نام ترانویسی برعکس[3] به کمک یک آنزیم ترانسکریپتاز برعکس[4] به DNA تبدیل شده و سپس تکثیر یابد. این آنزیم می‌تواند همزمان با دیگر اجزای واکنش به محیط PCR اضافه شود. به تازگی نیز آنزیمی ساخته شده که می‌تواند هم کار ترانویسی برعکس و هم کار پلیمراز DNA را انجام دهد (Hoffmeistereva *et al*., 2022).

با استفاده از آغازگرهای اختصاصی در PCR تشخیص مقدماتی ویروس با الکتروفورز محصول PCR امکان‌پذیر و اغلب در همین حد کافی است. برای اطمینان بیشتر و جستجوی گوناگونی و تغییرهای احتمالی، محصول PCR تعیین ترادف می‌شود و مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرد. در رابطه با روش‌های بر پایه PCR توجه به چند نکته زیر ضروری است:

۱- برای تشخیص همزمان چند ویروس می‌توان از PCR چندگانه[5] استفاده کرد که در آن آمیخته‌ای از آغازگرهای چند ویروس مورد نظر به کار می‌رود. در طراحی آغازگرها دقت می‌شود که دمای اتصال آن‌ها نزدیک به هم و طول قطعه حاصل از آن‌ها متفاوت باشد تا بتوان در الکتروفورز، آن‌ها را شناسایی و از هم جدا نمود.

۲- برای تعیین گروه احتمالی بیمارگرها می‌توان از آغازگرهای عمومی یا آغازگرهای دژنره[6] استفاده کرد. این نوع آغازگرها برای چندین گروه از بیمارگرها از جمله پوتی‌ویروس‌ها، جمینی‌ویروس‌ها، فیتوپلاسماها و ویروئیدها وجود دارد.

۳- امکان دارد در موردهایی که غلظت ویروس در گیاه کم است نتیجه مناسبی از PCR معمولی (یک مرحله‌ای) حاصل نشود. چنین وضعیتی در ردیابی ویروس‌ها و بیمارگرهای شبه ویروسی درختان زیاد مشاهده شده است. یکی از راه‌های متداول برای رفع این دشواری استفاده از PCR دومرحله‌ای[7] است که در آن محصول دور اول PCR به کمک آغازگرهای جدیدی برای دور دوم PCR می‌شود. راه دوم تلفیق PCR با ایمونولوژی[8] است که در آن عامل مورد نظر ابتدا به کمک پادتن اختصاصی (در صورت وجود) در لوله آزمایش به دام انداخته می‌شود و سپس آزمون PCR انجام می‌گیرد. راه دیگر کاربرد PCR کمی Real time است که حساسیت آن بیشتر از PCR معمولی است.

1. Huanglongbing (HLB) 2. Citrus stubborn 3. Reverse transcription 4. Reverse transcriptase
5. Multiplex PCR 6. Degenerate primers 7. Nested PCR 8. Immunocapture PCR

۴- روش‌های پایه‌ای PCR به طور کلی کیفی (غیرکمی) هستند. برای تعیین غلظت بیمارگر در محیط، لازم است از روش‌های کمی مانند Real time PCR استفاده شود. در این روش، تکثیر DNA و سنجش آن همزمان انجام و از این رو زمان لازم برای انجام آزمون کاهش می‌یابد، غلظت بیمارگر در نمونه اولیه قابل اندازه‌گیری است و در ضمن حساسیت ردیابی نیز افزایش می‌یابد (Shabani *et a*l., 2021).

در بررسی‌های همه‌گیرشناسی که مستلزم بررسی شمار زیادی نمونه از باغ‌ها یا مزرعه‌ها است، می‌توان با فشار دادن برش تازه‌ای از ساقه یا برگ روی کاغذ نیتروسلولوز یا نایلون (همان طور که در مورد TPIA گفته شد) نمونه اولیه را برداشت کرد (Nagata *et al*., 2004). پس از خشک‌شدن و در زمان و مکان مناسب برش کوچکی از کاغذ (۰/۵ تا ۱ میلی‌متر مربع) به جای نمونه گیاه در PCR مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از برتری‌های روش‌های PCR نسبت به روش‌های سرولوژیک یکی سرعت عمل و حساسیت بیشتر PCR و دیگری آسان‌تر بودن تهیه آغازگرهای اختصاصی نسبت به تهیه پادتن‌های اختصاصی و کیت‌های سرولوژیک است. لزوم خالص‌سازی ایمیونوژن، فرایند تولید و استخراج پادتن از بدن جانور آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از جانورهای آزمایشگاهی برای تهیه پادتن در برخی از کشورها نیز از دیگر دشواری‌های کاربرد آزمون‌های سرولوژیک است. پادتن برای آزمون سرولوژیک همیشه در اختیار نیست، در حالی که آغازگرهای لازم برای PCR را در هر زمان می‌توان ساخت. شوربختانه، در حال حاضر موسسه قابل اطمینانی برای ساخت آغازگر و سایر مواد لازم برای آزمون‌های PCR و تعیین ترادف محصول PCR در داخل کشور وجود ندارد و پژوهشگران داخلی برای تهیه مواد لازم به چند شرکت خارجی وابسته بوده و مجبور به پرداخت هزینه‌های گزاف ارزی هستند که اغلب از عهده آن برنمی‌آیند.

LAMP[1]

افزون بر PCR، چندین روش دیگر نیز برای فراوان‌سازی DNA و ردیابی ویروس‌ها یافت شده که بیشتر آن‌ها در پژوهش‌های ویژه پزشکی مورد استفاده‌اند (Cassedy *et al*., 2021; Gill *et al*., 2008; Shabani *et al*., 2021). از میان آن‌ها، از روش‌های بر پایه LAMP در بیماری‌شناسی گیاهی بیشتر استفاده می‌شود (Panno *et al*., 2020). در روش‌های LAMP-پایه که در سال ۲۰۰۰ میلادی توسط Notomi *et al*. (2000) ابداع شد، به جای پلیمراز Taq (که از آن در PCR استفاده شده است) از پلیمراز Bst (که از *Geobacillus stearothermophilus* به دست آمده)، بهره‌گیری می‌شود. این پلیمراز در دمای یکنواخت ۶۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس فعال است و DNA را از راه جایگزینی رشته[2] تکثیر می‌کند. ساخت رشته‌های DNA همراه با تشکیل حلقه[3] در انتهای رشته‌ها انجام می‌گیرد. اختصاصی بودن واکنش‌ها با استفاده از ۴ تا ۶ آغازگر تامین می‌شود. انجام واکنش را می‌توان به کمک نشانگرهای مختلف سنجید. با این روش می‌توان در مدت کمتر از یک ساعت یک میلیارد نسخه از روی DNA تولید کرد (Panno *et al*., 2020).

یک برتری LAMP بر PCR نبود نیاز آن به دستگاه گران‌قیمت و حساس (ترموسایکلر) است که از آن در PCR استفاده می‌شود. سرد و گرم کردن پی‌درپی محیط واکنش در PCR گاهی باعث کاهش یا از بین رفتن اختصاصیت می‌شود. پلیمراز Taq نسبت به بازدارنده‌ها که اغلب در عصاره گیاه وجود دارند، حساس است. در حالی که پلیمراز Bst کمتر زیر تاثیر بازدارنده‌ها قرار می‌گیرد. به دلیل سرعت عمل زیاد و اختصاصیت بیشتر، روش LAMP برای ردیابی بیمارگرها در پست‌های قرنطینه مناسب‌تر از PCR خواهد بود.

1. Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) 2. Strand displacement 3. Loop

فراوان‌سازی دایره غلتان[1]

یکی دیگر از راه‌های تکثیر DNA استفاده از سازوکار فراوان‌سازی دایره غلتان است که در مورد مولکول‌های حلقه‌ای اجراشدنی است. ساخت رشته‌های جدید DNA به کمک پلیمراز از محل اتصال آغازگرهای کوتاه تصادفی شروع و روی حلقه DNA با سازوکار جایگزینی رشته ادامه می‌یابد و در نتیجه رشته‌های بلندی متشکل از شمار زیادی مولکول تکراری[2] تولید می‌شود. برخلاف PCR که به تغییر دما در هر چرخه وابسته است، در این‌جا فراوان‌سازی در دمای ثابت انجام می‌شود. پلیمراز مورد استفاده phi29 است که از باکتریوفاژ گرفته شده و اغلب برای بهتر شدن، تغییرهایی در آن داده شده است. آغازگرهای کوتاه تصادفی[3] به هرجای مولکول حلقه‌ای که اتصال یابند، ساخت رشته جدید را آغاز می‌کنند (Kieser & Budowle, 2019). افزون بر امکان فراوان‌سازی DNA، با استفاده از پلیمراز RNA[4] فرایند ترانویسی نیز امکان‌پذیر است (Mohsen & Kool, 2016).

کشف شیوه سنجش فراوان‌سازی دایره غلتان، ردیابی جمینی‌ویروس‌ها و نانوویروس‌ها و ستلایت‌های آن‌ها را متحول کرده است. در واقع با این شیوه می‌توان هرگونه حلقه DNA موجود در عصاره گیاه را تکثیر کرد و سپس به کمک شیوه‌های دیگر، ویژگی‌های آن‌ها را تعیین نمود (Haible *et al*., 2006). فراوان‌سازی دایره غلتان روشی است آسان و ارزان که برای اجرا نیاز به دستگاه‌های گران‌قیمت ندارد.

حسگرهای زیستی[5]

یکی از زمینه‌های در حال توسعه و پیشرفت برای ردیابی ویروس‌ها و آلودگی‌های ویروسی، استفاده از حسگرهای زیستی است. حسگر زیستی وسیله‌ای است که برای تعیین وجود و مقدار ماده زیستی طراحی و ساخته شده و در آن، تغییرهای فیزیکوشیمیایی که مرتبط با وجود ماده زیستی هدف است به کمک یک گیرنده به صورت فیزیکی و تولید پیام قابل مشاهده نمایش داده می‌شود (Hong & Lee, 2018). حسگرهای زیستی از نظر نوع ماده استفاده شده، گیرنده‌ها و پیام‌ها گوناگونند. Malik *et al*., (2023) آن‌ها را از نظر نوع مبدل‌ها[6]، زیست-گیرنده‌ها (پادتن، آنزیم، اپتامر، ذره‌های نانو، یاخته)، سیستم ردیابی (نوری، مغناطیسی، دمایی، الکتریکی، الکترونیکی، مکانیکی) و فناوری (نانو، الکتریکی، تراشه‌ای، SPR[7] طبقه‌بندی کرده اند. برای آگاهی از شیوه تهیه حسگرهای زیستی به مقاله‌های چندی که در این زمینه وجود دارد از جمله Bhalla *et al*. (2016) و Jablonski *et al*. (2021) را ببینید.

از حسگرهای زیستی از سال‌ها پیش به‌طور گسترده‌ای در پزشکی و صنعت (صنایع غذایی و دارویی) استفاده شده است (مقاله‌های Hong & Lee, 2018 و Mehrorta, 2016 را ببینید). در رابطه با ویروس‌های گیاهی یکی از نخستین بررسی‌ها در سال ۲۰۱۰ توسط لاتنر و همکاران (Lautner *et al*., 2010) انجام گرفت که در آن از یک DNA-اپتامر[8] برای تشخیص گزینشی پروتئین پوششی ویروس ساقه‌آبله‌ای سیب[9] و روش تصویرسازی SPR بهره‌گیری شد. همچنین، Perdikaris *et al*. (2011) وسیله قابل حملی متشکل از یاخته‌های زنده پستانداران طراحی کردند که غشاء آن‌ها با پادتن چند ویروس به طور تکی یا آمیخته اشباع شده بود. ترکیب هر یک از ویروس‌ها با پادتن اختصاصی باعث تغییر پتانسیل الکتریکی غشای یاخته شد. پژوهشگران بر این اساس امکان ساختن وسیله‌ای که بتوان در مدتی حدود یک ساعت ویروس را تشخیص داد، مطرح کردند. به تازگی Neguyen *et al*. (2021) از تصویرسازی هایپرسپکترال[10] برای ردیابی ,ویروس

1. Rolling circle amplification
2. Tandem repeats
3. Short random primers
4. RNA polymerase
5. Biosensors
6. Transducers
7. Surface plasmon resonance
8. DNA aptamer
9. Apple stem pitting
10. Hyperspectral

تازه شناسایی شده رگ روشنی مو[1] (از جنس *Badnavirus*) استفاده کردند. تصویربرداری هایپرسپکترال بر پایه طیف گسترده ای از نور (به جای استفاده از سه نور متداول قرمز، سبز و آبی) است. نوری که به هر پیکسل می‌تابد به شمار زیادی باند طیفی شکسته می‌شود و در نتیجه اطلاعات بیشتری به دست می‌آید. این نوع تصویرسازی توانمندی‌های خوبی برای ردیابی زودهنگام عفونت‌های اولیه و پیش از بروز نشانه‌ها دارد. پیش از بروز نشانه‌ها ممکن است تغییرهای غیرقابل مشاهده‌ای مانند بسته‌شدن روزنه‌ها، کاهش تعریق، کاهش میزان فتوسنتز، افزایش فلوئورسنس و دفع گرما در گیاه به وجود آید. حسگرهای هایپرسپکترال در تصویربرداری پهبادی نیز می‌توانند موثر واقع شوند. ابداع و استفاده از حسگرهای زیستی برای سنجش ویروس همچنان در حال پیشرفت است. ازجمله می‌توان به کار اخیر Ghorbani *et al.*, (2023) اشاره کرد که با ترکیبی از ایمونولوژی، کروماتوگرافی و نانوذره‌های طلا شیوه‌ای ساده برای تشخیص ویروس‌های گیاهی گزارش کردند که سریع‌تر از ELISA و PCR پاسخ می‌دهد.

در این‌جا لازم است به چند پژوهش که در مورد ویروس‌ها با کاربرد حسگرهای زیستی در داخل کشور انجام شده نیز اشاره شود. Safarnejad *et al.* (2017) در موسسه گیاهپزشکی موفق شدند که با کاربرد کوانتوم-دات‌های کادمیوم تلورایدِ[2] و استفاده از پادتن‌های اختصاصی، حسگرهای زیستی را برای شناسایی و ردیابی چند ویروس از جمله ویروس تریستزای مرکبات طراحی کنند (Shojaei *et al.*, 2016; Safarnejad *et al.*, 2017). برخی از این سیستم‌ها حساس‌تر از ELISA گزارش شدند. حسگر زیستی دیگری نیز برای ردیابی فیتوپلاسمای عامل جاروک لیمو ترش تهیه کردند که در آن از پادتن پروتئین غالب غشایی[3] فیتوپلاسما استفاده شده بود (Rads *et al.*, 2012). همچنین، آن‌ها سیستم مشابهی برای ردیابی شبه‌قارچ *Polymyxa betae* طراحی کردند (Safapour *et al.*, 2012). این شبه‌قارچ ناقل خاکزی ویروس رگبرگ زرد نکروتیک (ریشه گنائی) چغندر است. در زمینه پزشکی نیز کارهایی در داخل کشور انجام شده که از آن میان می‌توان به کار Shamsipur *et al.* (2017) برای ردیابی حساس و سریع ویروس پاپیلومای انسانی با استفاده از نانوحسگرهای DNA و کار Shokorlou & Heidarzade, (2023) در دانشگاه محقق اردبیلی برای ردیابی و تشخیص سرطان پروستات با استفاده از نانو حسگر پلاسمونی اشاره کرد.

ریزآرایه[4] و درشت‌آرایه[5]

ریزآرایه عبارت از شبکه‌ای دو بعدی از شمار بسیار زیادی خانه یا نقطه میکروسکوپی روی یک صفحه ۱ تا ۴ سانتیمتر مربعی از جنس شیشه یا سیلیکون است که در هر خانه یا نقطه آن یک شناسگر مولکولی از جنس نوکلئیک اسید یا پروتئین معین جاسازی و تثبیت شده است. نوکلئیک اسید جاسازی شده شناسگر[6] cDNA یا cRNA است. نمونه‌ای که قرار است بررسی شود (هدف)[7] برای انجام واکنش احتمالی با برخی از شناسگرها به این صفحه یا تراشه[8] اضافه می‌شود. واکنش میان شناسگر و هدف بر پایه بازجفتی[9] و دورگه‌سازی[10] است. به طور معمول یک رنگ فلوئورسنت به نمونه هدف متصل می‌شود تا بتوان انجام واکنش را پس از شستشوی تراشه (صفحه ریزآرایه) به آسانی تشخیص داد. درشت آرایه مانند ریزآرایه است، منتها اندازه (۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر مربع) و وسعت خانه‌های آن بیشتر و شمار آن‌ها کمتر است. ظرفیت درشت‌آرایه ۱۰ تا ۱۰۰ قطعه DNA در سانتی‌متر مربع است، در حالی که این رقم در مورد ریزآرایه ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ژن و گاهی بیشتر است. در مورد پروتئین‌ها آزمایش بر اساس واکنش پروتئین-پروتئین خواهد بود و برای شناسگر می‌توان از پادتن یا اپتامر استفاده کرد.

1. Grapevine vein clearing virus 2. CdTe 3. Immunodominant membrane protein antibody 4. Microarray
5. Macroarray 6. Probe 7. Target 8. Chip 9. Base pairing, complementation 10. Hybridization

از ریزآرایه نوکلئیک اسیدی در زیست‌شناسی و به ویژه ژنتیک برای بررسی گوناگونی ژنتیکی، تعیین همزمان میزان بیان ژن‌ها و در پزشکی برای تشخیص بیماری‌ها و تعیین تغییرهای متابولیکی آن‌ها، اثر داروها و بررسی گوناگونی ژنتیکی بیمارگرها استفاده شده است. در مورد ویروس‌های گیاهی، ویروئیدها و فیتوپلاسماها نیز افزون بر تشخیص و ردیابی، برای بررسی‌های همه‌گیرشناسی و گوناگونی بیمارگرها و نیز در قرنطینه و گواهی کردن محصول‌ها و تشخیص تراریختی (GMO)[1] در محصول‌ها از ریزآرایه و درشت‌آرایه استفاده شده است (Bhat & Rao, 2020; Hadidi *et al*., 2004). برتری استفاده از ریزآرایه نسبت به برخی دیگر از روش‌های تشخیص که به‌طور معمول در هر آزمایش یک یا شمار اندکی هدف یا واکنش را بررسی می‌کنند، این است که هم‌زمان برای شمار زیادی هدف یا هزاران واکنش نتیجه مورد نظر را به‌دست می‌دهد. برای نمونه، Nicolaisen, (2011) ریزآرایه‌ای برای ردیابی ۵۲ ویروس گیاهی معرفی نمود. Sip *et al*. (2010) یک ریزآرایه DNA برای ویروس‌های سیب‌زمینی تهیه کردند که توانست افزون بر ویروس‌هایی که با این سیستم شناسایی شده بودند، ویروس‌های دیگری نیز ردیابی کند. با وجود این ابداع روش‌های تعیین ترادف نسل جدید (NGS)[2] توانسته است رقیب موثری برای بسیاری از امکانات ریزآرایه باشد.

دورگه‌سازی مولکولی[3]

اساس این روش ردیابی، بازجفتی میان نوکلئیک اسید هدف با مکمل آن در مولکول شناسگر است. شناسگر ترادف کوتاهی از نوع DNA (DNA probe) یا RNA (riboprobe) است که یک ماده رنگی یا رادیوایزوتوپ به آن متصل شده است (برخلاف ریزآرایه که در آن برچسب تشخیص به هدف متصل می‌شود). بطور معمول ارتباط RNA-RNA با ثبات‌تر از ارتباط DNA-DNA یا RNA-DNA است. برای اجرای این روش، ابتدا نمونه‌های هدف روی غشاء ویژه قطره‌گذاری (نقطه‌گذاری) می‌شوند و سپس شناسگر به غشاء اضافه و زیادی آن از روی غشاء شسته می‌شود. ماده رنگی یا پیام رادیوایزوتوپ آشکار می‌سازد که واکنش (بازجفتی) در کدامیک از نقطه‌ها (نمونه‌ها) انجام گرفته است. برای تشخیص یا ردیابی همزمان چند هدف (برای نمونه چند ویروس) در یک آزمایش، می‌توان چند شناسگر را با هم آمیخت و یا از شناسگری استفاده کرد که در طول آن بخش‌های مکمل برای چند ویروس قرار داده شده باشد (شناسگرهای چندگانه[4]). در این قبیل شناسگرها برای هر ویروس هدف قطعه نوکلئیک اسید مکملی (بیشتر به اندازه ۲۰۰ تا ۴۰۰ نوکلئوتید) وجود دارد. برای نمونه، (2012) Peiro *et al*., از یک شناسگر چندگانه برای ردیابی ۱۰ بیمارگر درختان میوه هسته‌دار استفاده کردند و یا در پژوهشی (Sanchez-Navarro *et al*., 2018a) ۱۳ ویروس و ۵ ویروئید مو با یک شناسگر چندگانه به صورت همزمان ردیابی شدند. از سوی دیگر، شناسگر ممکن است چنان طراحی شود که بتواند گروهی از ویروس‌ها (برای نمونه پوتی‌ویروس‌ها) را شناسایی کنند (Sanchez-Navarro *et al*., 2018b). از این شناسگرهای چندگانه برای گواهی محصول‌ها و نیز بافت‌هایی که برای تکثیر گیاه به‌کار می‌روند (مانند پیوندک و قلمه) بهره‌گیری شده است (Pallas *et al*., 2018).

توالی‌یابی نسل جدید (NGS)[5]

یکی از تحول‌های مهم قرن کنونی در عرصه بررسی‌های زیستی، دستیابی به فناوری‌های توالی‌یابی نسل جدید است. این فناوری‌ها همراه با شیوه‌هایبیوانفورماتیک برای واکاوی انبوه داده‌ها، پیشرفت‌های شگرفی در زمینه‌های گوناگون علوم

1. Genetically modified organism 2. Next generation sequencing 3. Molecular hybridization 4. Polyprobe
5. Next generation sequencing

زیستی به وجود آورده‌اند. در ویروس‌شناسی از این فناوری‌ها نه تنها برای ردیابی و تشخیص، بلکه برای تعیین نقش ژن‌ها و مولکول‌های مختلف در بیماری‌زایی و تغییرهای مولکولی در یاخته و بسیاری از پدیده‌های دیگر نیز استفاده شده است.

درتوالی‌یابی نسل دوم[1]، هر آزمون دربرگیرنده چند صد هزار تا بیش از ۴۰ میلیارد خوانش کوتاه است. هر خوانش بسته به نوع فناوری (پلتفرم) از ۳۵ تا حدود ۴۰۰ و گاهی تا ۸۰۰ نوکلئوتید طول دارد. به‌کمک نرم‌افزارهای بیوانفورماتیک، داده‌های مورد نظر جدا و مورد واکاوی قرار می‌گیرند. درباره پلتفرم‌ها و قابلیت‌های دستگاه‌های مختلف توالی‌یابی نسل جدید، مقاله‌های توصیفی بسیاری منتشر شده است. برای مقایسه پلتفرم‌های مختلف و کاربردهای هر یک، خوانندگان می‌توانند مقاله‌های Pervez *et al.* (2022) و Reuter *et al.* (2015) را ببینند.

بیشتر روش‌های سنجش که پیش از این به آن‌ها اشاره شد، اختصاصی و برای یک یا چند بیمارگر شناخته شده هستند. بر عکس، در فناوری‌های نسل جدید، ردیابی و تشخیص با هدف ویروس یا عامل معینی نیست و بدون اطلاع پیشین از درون گیاه انجام می‌شود. با وجود این، در این روش، با یک آزمون تمام ویروس‌ها و دیگر میکروارگانیسم های موجود در گیاه، حتی آن‌ها که نشانه‌هایی ایجاد نکرده‌اند، شناسایی می‌شوند. در مواردی نیز ویروس‌ها یا بیمارگرهای جدید برای نخستین بار شناسایی شده‌اند (Pecman *et al*., 2017; Verdin *et al*. 2017; Villamor *et al*., 2016).

توالی‌یابی نسل سوم[2] که هم‌اکنون در حال پیشرفت است، فناوری خوانش قطعه‌های بلند DNA است و به همین مناسبت «توالی‌یابی خوانش بلند» نیز نامیده می‌شود. آماده‌سازی نمونه در این روش بسیار آسان‌تر است و توالی‌یابی نیز در دستگاه‌های ساده‌تر (حتی قابل حمل) امکان‌پذیر است. از آن‌جا که این روش در مقایسه با توالی‌یابی نسل دوم دشواری کمتری برای سرهم کردن (مونتاژ) قطعه‌های کوچک دارد، می‌تواند در بررسی‌های زیستی از جمله تعیین ژنوم کامل سودمندتر واقع شود. با وجود این، میزان اشتباه در این نوع توالی‌یابی بیشتر از توالی‌یابی نسل دوم است (Schadt *et al*., 2010).

نتیجه‌گیری

در چند دهه گذشته تحول‌های شگرفی در زمینه سنجش ویروس‌ها و بیمارگرهای شبه ویروسی گیاهان به عمل آمده است. سنجش این بیمارگرها ابتدا به شیوه‌های زیستی آغاز شد. این شیوه‌ها دربرگیرنده انتقال مکانیکی و انتقال با پیوند، ناقل، دانه گرده، بذر و بافت‌کاری[3] بودند و گرچه، هنوز هم برای برخی از پژوهش‌ها الزامی هستند، اما امروزه برای سنجش جای خود را به شیوه‌های مطمئن‌تر، آسان‌تر و موثرتر داده‌اند. روش‌های بر پایه ایمونولوژی به دلیل اختصاصی بودن، دقت و آسانی اجرا، خواه به طور مستقیم و خواه در ترکیب با سایر روش‌ها در شناسایی و ردیابی ویروس‌ها نقش مهمی داشته اند و از آن میان در ترکیب با واکنش آنزیمی و روش‌های گوناگون ELISA از حساسیت فراوانی برخوردارند. در بررسی‌های همه‌گیری‌شناسی که نیازمند آزمایش نمونه‌های زیاد است، آماده‌سازی نمونه‌ها را می‌توان به روش‌های TPIA[4] و DIBA[5] در مزرعه یا باغ انجام داد. در زمینه استفاده از حسگرها، با وجود پیشرفت‌های خوبی که به عمل آمده، سازوکار بیشتر بر پایه ایمونولوژی بوده است و ضرورت دارد بر مبنای دیگر تغییرها در گیاه بیمار نیز بتوان تشخیص را انجام داد.

یکی از دشواری‌های استفاده از شیوه‌های بر پایه ایمونولوژی، کمبود یا نبود پادتن برای برخی از بیمارگرها است. در مقایسه، تهیه آغازگرهای اختصاصی یا گروهی برای آزمون‌های PCR همیشه امکان‌پذیر است، اما دلیل مهمتر برای رایج شدن PCR، افزون بر ردیابی، تهیه مقدار کافی DNA برای توالی‌یابی و دست‌یابی به ژنوم است.

1. Second generation sequencing
2. Third generation sequencing
3. Tissue implantation
4. Tissue-print immunoassay
5. Dot immunobinding assay

در بیشتر روش‌های ردیابی از جمله PCR و ELISA، بیمارگرهای هدف، خواه به طور انفرادی یا گروهی، مشخص هستند. از این رو، استفاده از آن‌ها در تشخیص بیماری‌های ناشناخته و یا در قرنطینه گیاهی دارای محدودیت است. برای رفع این محدودیت و سالم‌گزینی و در مواردی که بیمارگر هدف معین نیست می‌توان از ریزآرایه استفاده کرد که صدها و هزارها نقطه موجود در آن هر یک پادتن، نوکلئیک اسید یا اپتامر بیمارگر یا مولکول معینی است و بنابراین می‌تواند برای تشخیص طیفی گسترده از بیمارگرها مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این، در این گونه موردها بهترین روش، کاربرد توالی‌یابی پر بازده[1] یا نسل جدید است که می‌تواند بسته به عمق خوانش در میان انبوه داده‌ها همه ویروس‌های موجود در گیاه را شناسایی کند و حتی در موردهایی به کشف ویروس جدید بیانجامد. داده‌های توالی‌یابی پر بازده نشان داده است که در درختان و گیاهان چندساله شمار زیادی ویروس وجود دارند که نشانه‌های آن‌ها روشن نیست، اما ممکن است طغیان کنند. همچنین، در منطقه‌های کشت جدید، اغلب در گیاهان بومی ویروس‌هایی وجود دارند که امکان سرایت آن‌ها به گیاهان انتقال‌یافته وجود دارد. بنابراین، توالی‌یابی پربازده می‌تواند کمک موثری به تعیین ویروم[2] منطقه یا گیاه وارداتی بنماید. لازم است اشاره شود که شناسایی برخی ویروس‌ها به این شیوه نیاز به تایید به روش‌های دیگر مانند PCR دارد.

همه فناوری‌های مربوط به سنجش در داخل کشور اجراشدنی و به عبارت دیگر بوم‌سازگار هستند. آنچه که لازم است، سرمایه‌گذاری برای تشکیل آزمایشگاه‌ها و تهیه دستگاه‌ها و از سوی دیگر پژوهش‌های کاربردی و توسعه‌ای برای راه‌اندازی آن‌ها است. پیشرفت‌های بیشتر در زمینه سنجش ویروس‌ها و بیمارگرهای شبه‌ویروسی مانند حسگری از راه دور[3]، استفاده از پهپاد برای رصد کردن آلودگی‌های اولیه و کاربرد هوش مصنوعی دور از انتظار نیست.

منابع

Bahadir, E. B. & Sezgintur, K. (2016). Lateral flow assays: Principles, designs and labels. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 82: 286-306.

Beijerinck, M. W. (1898). Over een contagium vivum fluidum als oorzaak van de vlekziekte der tabaks bladen. *Versl. Gewone Vergad. Wis. Natuurkd.Afd. K. Akad.Wet. Amsterdam* 7, 229-235.

Bhalla, N., Jolly, P., Formisano, N. & Estrela, P. (2016). Introductions to Biosensors. *Essays in Biochemistry*, 60: 1-8. Doi: 10.1042/EBC20150001.

Bhat, A. J. & Rao, G. P. (2020). DNA microarray for detection of plant viruses. Pp. 357-367 in: *Characterization of Plant Viruses*. Springer. Doi: 10.1007/978-1-0716-0334-5-37.

Brunt, A., Crabtree, K., Dallwitz, M. & Watson, L. (1996). *Viruses of Plants. Descriptions and Lists from the VIDE Database*. CAB International. 1484 p.

Cassedy A., Parle-McDermott A. & Kennedy, R. O. (2021). Virus detection: A review of the current and emerging molecular and immunological methods. *Frontiers in Molecular Biosciences*, Doi: 10.3389/fmolb.2021.637559.

Ghorbani, A. Astaraki, S., Rostami, M. & Pakdel A. (2023). Unleashing the power of colloidal gold immunochromatographic assay for plant virus diagnostics. *MethodsX*, Doi: 10.1016/j.mex.2023.102498.

Gill, P. & Ghaemi, A. (2008). Nucleic acid isothermal amplification technologies- A review. *Nucleosides, Nucleotides and Nucleic Acids*, 24: 224-243. Doi: 10.1080/1525 7770701845204.

Hadidi, A., Czosnek, H. & Barba, M. (2004). DNA microarrays and their potential applications for the detection of plant viruses, viroids and phytoplasmas. *Plant Pathology*, 86: 97-104.

Haible, D., Kober, S., & Jeske, H. (2006). Rolling circle amplification revolutionizes diagnosis and genomics of geminiviruses. *Journal of Virological Methods*, 135: 9-16.

1. High throughput sequencing (HTS) 2. Virome 3. Remote sensing

Hibi, T. & Saito, Y. (1985). A dot immunobinding assay for detection of tobacco mosaic virus in infected tissues. *Journal of General Virology*, 66: 1191-1194. Doi: 10.1099/0022-1317-66-5-1191.

Hoffmeisterva, H., Kratochvilova, K., Cerovska, N., Slavikova, L., Dusek, J., Muller, K., Fousek, J., Plchova, H., Navratil, O., Kundu, J.K. & Moravec, T. (2022). One-enzyme RTX-PCR for the detection of RNA viruses from multiple virus genera and crop plants. *Viruses*, 14:298. Doi: 10.3390/v14020298.

Holmes, F.O. (1929). Local lesions in tobacco mosaic. *Botanical Gazette*, 87: 39.

Hong, S. & Lee, C. (2018).The current status and future outlook of quantum dot-based biosensors for plant virus detection. *Journal of Plant Pathology*, 34: 85-92. Doi: 10. 5423/ PPJ.RW.08.2017.0184.

Horvath, J. (1993). Host plants in diagnosis. Pp 16-48 in: REF Matthews (Ed), *Diagnosis of Plant Virus Diseases.* CRC Press. 374 p.

Huth, W. (1999). Tissue print immune assay, a rapid and reliable method for routinely detecting graminae viruses. *Plant Research and Development*, 49: 7-18.

Jablonski, M., Poghossian, A., Keusgen, M., Wege, C. & Schoning, M. J. (2021). Detection of plant virus particles with a capacitive field-effect sensor. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 413, 5669-5678.

Kieser,. R & Budowle, B. (2019). Rolling circle amplification: A (random) primer on the enrichment of an infinite linear DNA template. *WIREs Forensic Science*. Doi: 10.1002/wfs2.1359.

Koczula, K.M. & Gallotta, A. (2016). Lateral flow assays. *Essays in Biochemistry* 60: 111-120.

Loi, N., Ermacora, P., Carraro, L., Osler, R. & Chen, T.A. (2002). Production of monoclonal antibodies against apple proliferation phytoplasma and their use in serological detection. *European Journal of Plant Patholog*, 108: 81-86.

Malik, S., Singh, J., Goyat, R., Saharan, V., Chaudhry, V., Umar, A., Ibrahim, A., Akbar, S., Ameen, S. & Baskoutas, S. (2023). Nanomaterials based biosensors and their applications: A review. *Heliyon*, 7 (9). Doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19929.

Milne, R.G. (1993). Electron microscopy of *in vitro* preparations. Pp. 215-251 in: REF Matthews (Ed), *Diagnosis of Plant Virus Diseases.* CRC Press. 374 p.

Mohsen, M.G. & Kool, E.T. (2016). The discovery of rolling circle amplification and rolling circle transcription. *Accounts of Chemical Research*, 11: 2540-2550. Doi.: 10.1021/acs.accounts.6b00417.

Mullis, K., Faloona, F.A., Scarf, S., Saiki, R., Horn, G. & Erlich, H. (1986). Specific enzymatic amplification of DNA *in vitro*: The polymerase chain reaction. *Cold Spring Harbor Symposia on quantitative Biology* 51, Pt1, 263-273.

Nagata, T., Inoue-Nagata, A.K., de Avila, A.C. & Giordano, L.B. (2004). Print –capture PCR for detection of tomato begomoviruses from plants and whiteflies. *Fitopatologia Brasileira*, Doi: 10.1590/s0100-41582004000100014.

Nicolaisen, M. (2011). An oligonucleotide-based microarray for detection of plant RNA viruses. *Journal of Virological Methods*,173: 137-143.

Neguyen, C., Sagan,V., Maimaitiyiming, M., Maimaitijiang, M., Bhadra, S. & Kwasniewski, M. (2021). Early detection of plant viral disease using hyperspectral imaging and deep learning. *Sensors*, Doi: 10. 3390/s21030742.

Notomi, T., Okayama, H., Masubuchi, H., Yonekava, T., Watanabi, K., Amino, N. & Hase, T. (2000). Loop-mediated isothermal amplification of DNA. *Nucleic Acids Research*, 28. Doi:10.1093/nar/28.12.e63.

Pallas, V., Sanchez-Navarro, J.A. & James, D. (2018). Recent advances on the multiplex molecular detection of plant viruses and viroids. *Frontiers in Microbiology.* 9. Doi: 10.3389/fmicb.2018.02087.

Panno, S., Matic, S., Tiberini, A., Caruso, A.G., Bella, P., Torta, L., Stassi, R. & Davino, S. (2020). Loop-mediated isothermal amplification: Principles and applications in plant virology. *Plants (Basel*). Doi: 103390plants9040461

Pecman, A., Kutnjak, D., Gutierrez-Aguirre, I., Adams, I., Fox, A., Boonham, N. & Ravnikar, M. (2017). Next generation sequencing for detection and discovery of plant viruses and viroids: comparison of two approaches. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2017. Doi:10.3369/fmicb.2017.01998.

Peiro,A. Pallas,V. & Sanchez-Navarro, J.A. (2012). Simultaneous detection of eight viruses and two viroids affecting stone fruit trees by using a unique polyprobe. *European Journal of Plant Pathology*, 132: 469-475.

Perdikaris, A., Vassilakos, N., Yiakoumettis, I., Kektsidou, O. & Kintzios,S. (2011). Development of a portable, high throughput biosensor system for rapid plant virus detection. *Journal of Virological Methods*, 177: 94-99.

Pervez, M.T., ul Hasnain, M.J., Abbas, S.H., Moustafa, M.F., Aslam, N. & Shah, S.S.M. (2022). A comprehensive review of performance of next-generation sequencing platforms. *BioMed Research*, Doi: 10.1155/2022/3457806.

Rads, F., Mohsenifar, A., Tabatabaei, M., Safarnejad, M. R., Shahryari, F., Safarpour, H., Foroutan, A., Mardi, M., Davoudi, D. & Fotokian, M. (2012). Detection of *Candidatus* Phytoplasma aurantifolia with a quantum dot fret-based biosensor. *Journal of Plant Pathology*, 94: 525-534.

Reuter, J. A., Spacek, D. & Snyder, M. P. (2015). High- throughput sequencing technologies. *Molecular Cell*, 58: 586-597. Doi: 10.1016/j.molcel.2015.05.004.

Roberts, D. A. (1964). Local-lesion assay of plant viruses. Pp 194-210 in: M. K. Corbett and H. D. Sisler (Eds.), *Plant Virology*, Univ. Florida Press, 527p.

Safarnejad, M. R., Samiee, F., Tabatabaei, M. & Mohsenifar, A. (2017). Development of quantum dot-based nanobiosensors against Citrus tristeza virus (CTV). *The Sensors & Transducers journal*, 213: 54-60.

Safarpour, H., Safarnejad, M. R., Tabatabaei, M., Mohsenifar, A., Rad, F., Basirat, M., Shahryari, F. & Hasanzadeh, F. (2012). Developmentof a quantum dots FRET-based biosensor for efficient detection of *Polymyxa betae* . *The Canadian Journal of Plant Pathology*, 34: 507-515.

Salehi, M., Izadpanah, K., Siampour, M & Esmailzadeh-Hosseini, S. A.(2011). Polyclonal antibodies for the detection and identification of Fars alfalfa witches'broom phytoplasma. *Bulletin of Insectology*, 64: S59-S60.

Salehi, M., Rasoulpour, R. & Izadpanah, K. (2016). Molecular characterization, vector identification and partial host range determination of phytoplasmas associated with faba bean phyllody in Iran. *Crop Protection*, 89: 12-20.

Sanchez-Navarro, J.A., Fiore, N., Fajardo, T.V.M., & Pallas, V. (2018a). Simultaneous detection of the 13 viruses and 5 viroids affecting grapevine by molecular hybridization using a unique probe or 'polyprobe'. Pp. 41-42 in*:Proc. 19th Conf. ICVG, Santiago.*

Sanchez-Navarro, J.A., Cooper, C.N. & Pallas, V. (2018b). Polyvalent detection of members of the Potyvirus genus by molecular hybridization using a 'genus probe'. *Phytopathology*, 108: 1522-1529. Doi: 10.1094/PHYTO-04-18-0146-R.

Schadt, E.E., Turner, S. & Kasarskis, A. (2010). A window into third generation sequencing. *Human Molecular Genetics*, 19: R227-R240. Doi.org/10.1093/hmg/ddq416.

Shabani, E., Dowlatshahi, S. & Abdekhodaie, M.J. (2021). Laboratory detection methods for the human coronaviruses. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 40(2): 225-246.

Shamsipur, M., Nasirian, V., Mansouri, K., Barati, A., Veisi-Raygani, A. & Kashanian, S. (2017). A highly sensitive quantum dots DNA nanobiosensor based on fluorescence resonance energy transfer for rapid detection of nanomolar amounts of human papilloma virus 18. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 136:140-147.

Shojaei, T. R., Salleh, M. A. M., Sijam, K., Rahim, R. A., Mohsenifar, A., Safarnejad, R. & Tabatabaei, M. (2016). Fluorometric immunoassay for detecting the plant virus citrus tristeza using carbon nanoparticles acting as quencher and antibodies labeled with CdTe quantum dots. *Microchim. Acta*, 183:2277-2287.

Shokorlou, Y. M. & Heidarzadeh, H. (2023). Mirrored nano-structured plasmonic biosensor using two-dimentional materials for detection of PSA. *Optics and Lasers in Engineering*, 170, Doi: 10.1016/j.optlaseng.2023.107762.

Verdin, E., Wipf-Scheibel, C., Gognalons, P., Aller, F., Jacquemond, M. & Tepfer, M. (2017). Sequencing viral siRNA to identify previously undescribed viruses and viroids in a panel of ornamental plant samples structured as matrix of pools. *Virus Research*, 241: 19-28. Doi: 10.1016/j.virusres.2017.05.019.

Villamor, D.E.V., Mekuria, T.A., Pillai, S.S. & Eastwell, K.C. (2016). High-throughput sequencing identifies novel viruses in nectarine: Insight to the etiology of stem pitting disease. *Phytopathology*, 106: 519-52.

Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9(1):51-64 (2024)

New Technologies for Assay and Management of Plant Viruses and Virus-Like Agents: 1- Assay

Izadpanah K.[1, 2]

Effective assay of the disease agents is a prerequisite for successful management of plant diseases caused by viruses and virus-like pathogens. The assays may be biological (i.e., based on infectivity), morphological (shape and size, e.g., based on electron microscopy), or based on the properties of the pathogen proteins and nucleic acids. Methods based on the properties of the pathogen proteins include various serological techniques such as enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), microarray, electrophoresis and certain types of biosensing. Methods based on the properties of the pathogen genome include hybridization tests, microarray chips, polymerase chain reaction (PCR) and next generation sequencing (NGS) technologies. Combinations of these methods such as immuno-electron microscopy, immuno-electrophoresis and immunocapture PCR may also be used. In this article feasibility, sensitivity, specificity and uses of these techniques are pointed out. At the present the most commonly used methods for targeted detection of plant pathogens are various modifications of ELISA, LAMP and PCR. Types of NGS technologies are the methods of choice for non-target assay of plants for these pathogens. Bioinformatics tools have played an unparalleled role in the advancement of new technologies. All technologies are eco-compatible and can be used or adapted in the country.

Key words: Academy of Sciences, New detection technologies, Research projects, Virus detection methods.

1. Corresponding author, Email: izadpana@shirazu.ac.ir
2. Professor of Shiraz University (Fellow of Academy of Sciences of I.R. Iran).

مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۹ شماره ۱ صفحه‌های ۶۵ تا ۷۶ (۱۴۰۳)

مروری بر فناوری‌های نوین بوم‌سازگار در کشاورزی هوشمند [۱]

یوسف عباسپور گیلانده و سید سعید محتسبی[۲و۳]

چکیده

در دهه‌های اخیر، به کارگیری فناوری‌هایی مانند روباتیک، پهباد و داده‌های ماهواره‌ای، در همه فعالیت‌های زراعی مشاهده شده است. کشاورزی هوشمند با افزایش بهره‌وری نهادهای تولیدی محصول‌های زراعی به کشاورزان این امکان را می‌دهد تا به محصول بیشتری دست پیدا کنند و در عین حال از مصرف زیاد کود و دیگر مواد شیمیایی جلوگیری شود و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرهای اقلیمی کمک شود. در این مقاله بررسی و آسیب‌شناسی و محدودیت‌های فناوری‌های نوین در کشاورزی هوشمند در جهان و ایران و ارائه راهکارهای استفاده از فناوری‌های نوین بوم‌سازگار در داخل کشور مورد توجه قرارگرفته است. به نظر می‌رسد مدیریت موضعی مواد غذایی در مزرعه‌های داخل کشور، با وجود کوچک بودن آن‌ها، پاسخ به نسبت خوبی را ارائه خواهد کرد. در واقع کشاورزی فرصتی عالی برای معرفی انواع روبات‌ها ارائه می‌کند. چین، ژاپن و استرالیا در زمینه تولید تراکتورهای خودکار با توانایی انجام کارهای مختلف در مزرعه کارهای مناسبی را انجام داده‌اند. استفاده از پهبادها در مزرعه‌های داخل کشور نشان داده است که این دستگاه‌ها می‌توانند بازده مصرف سم را حدود ۳۰٪ افزایش دهند. نوع دیگری از پهباد ملی که در داخل کشور طراحی و ساخته شده است، از نظر نوع موتورهای الکترونیک، نوع عملیات و خدمات، دوربین و حسگرها، نوع پرواز و نوع پایشی که انجام می‌دهد، برتری‌های فراوانی نسبت به مشابه خارجی خود دارد. انتظار می‌رود این فناوری‌ها در قالب کشاورزی هوشمند، سختی کار انسان در مزرعه را تا سطحی بسیار پایین‌تر از پیش، کاهش دهند.

کلمات کلیدی: بوم‌سازگار، پهباد، توزیع نهاده، روبات‌های کشاورزی، کشاورزی دقیق.

مقدمه

برداشت کلی در بین دانشمندان علوم کشاورزی، مزرعه‌داران و تا حدی سیاست‌گذاران کشاورزی این است که فناوری‌هایی مانند روباتیک، پهباد و داده‌های ماهواره‌ای در همه فعالیت‌های مزرعه با آماده‌سازی زمین، بذرپاشی، کوددهی، آبیاری و برداشت شروع می‌شوند و تا فراوری پس از برداشت محصول ادامه خواهند داشت. به عبارت دیگر، کشاورزی هوشمند به تقریب در هر گوشه از منطقه‌های زراعی گسترش خواهد یافت. کشاورزی هوشمند را می‌توان انقلابی در فعالیت‌های مزرعه‌ای دانست که از شروع به کار آن نوید کمک به انسان‌ها در راستای کاهش سختی کار و ساده کردن وظیفه‌های دشوار داده شد. این فناوری‌ها که در بهره‌وری محصول‌های زراعی به کار می‌روند، به کشاورزان

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۷

بخشی از مرحله دوم طرح «بررسی فناوری های نوین بوم سازگار در کشاورزی و منابع طبیعی » گروه علوم کشاورزی فرهنگستان علوم ج. ا. ایران.

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

۳- به ترتیب، استاد دانشگاه محقق اردبیلی (عضو مدعو فرهنگستان علوم ج.ا. ایران) و استاد دانشگاه تهران (عضو وابسته فرهنگستان علوم ج.ا. ایران).

این امکان را می‌دهند تا به محصول بیشتری دست پیدا کنند و همچنین از مصرف زیاد کود و سایر مواد شیمیایی جلوگیری شود و بدین ترتیب به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرهای اقلیمی کمک شود.

انسان به دلیل محدودیت‌های فیزیولوژیک، پیش از شروع کار، به پژوهش‌های مهندسی و طراحی و تولید روبات‌ها، پهباد و نرم افزارهای رایانه‌ای نیاز دارد که بتواند آن‌ها را برای انجام انواع کارهای مزرعه‌ای مناسب سازد. شاید لازم باشد این فرایند تا رسیدن به نتیجه نهایی خود و تا هنگامی ادامه یابد که نیرو و وقت انسان درمزرعه کمترین مقدار باشد. اکنون، این فناوری‌ها در قالب کشاورزی هوشمند، گزینه‌ای مناسب به نظر می‌رسند و انتظار می‌رود که سختی کار انسان در مزرعه را تا سطحی بسیار پایین‌تر از پیش، کاهش دهند و با وجود این، دقت بیشتری را در عملیات داشته باشند، در نهاده‌ها صرفه جویی کنندو به کشاورز امکان دستیابی به بهره‌وری بیشتر را بدهند.

نیاز به بهبود بهره‌وری محصول‌های زراعی همچنان دست نخورده باقی مانده و در آینده نیز به توجه بیشتر نیاز دارد. پیش بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ جمعیت کره زمین به ۹ میلیارد نفر برسد و تولید غلات باید به همین نسبت افزایش داشته باشد. پیش‌بینی‌ها نشانگر افزایش بیش از ۲۵ درصدی این نیاز در محصول به نسبت سطح فعلی است. با توجه به روش‌های کشاورزی پیش‌بینی‌شده، در حال حاضر، فناوری کشاورزی دقیق که شامل بررسی تغییرهای حاصلخیزی خاک و کاربرد متغیر کود و آب که با رشد محصول مطابقت دارد، به سرعت در بین کشاورزان سراسر جهان در حال رواج است (Stafford, 2005; Lowenberg-DeBoer, 2004; Van Henten *et al.*, 2009; Khosla, 2010; Krishna, 2012). روباتیک، پهباد و ماهواره‌ها از مهمترین موردهایی هستند که می‌توانند به پذیرش بهتر فنون دقیق کمک نمایند. به عبارت دیگر، فنون هوشمند می‌توانند به منظور گسترش سریع روش‌های کشاورزی دقیق و افزایش بهره‌وری و سود اقتصادی گزینه‌ای مناسب باشند. هدف از پژوهش حاضر بررسی و آسیب‌شناسی و محدودیت‌های فناوری‌های نوین بوم‌سازگار در کشاورزی هوشمند در جهان و ایران و ارائه راهکارهای بومی‌سازی فناوری‌های نوین بوم سازگار در داخل کشور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

۱- ابزارها، روش‌ها و فناوری‌های نوین بوم‌سازگار در کشاورزی هوشمند

۱-۱- کشاورزی ماهواره‌ای (دقیق)- کاربرد داده‌های ماهواره‌ای در ۴۰ تا ۵۰ سال گذشته در موضع‌هلی مختلف و به ویژه منابع طبیعی و کشاورزی در سطح جهانی رواج گسترده‌ای یافته‌اند. کشاورزی بر پایه هدایت توسط ماهواره‌ها، بویژه پایش‌های دوره‌ای و کنترل حرکت‌ها و عملکرد ماشین‌های زراعی با استفاده از مختصات سامانه موقعیت‌یاب ماهواره‌ای به سرعت در سطح جهان گسترش یافته است. کشاورزی ماهواره‌ای زمانی شکل گرفت که استفاده از مقیاس گسترده تصویرهای ماهواره‌ای، نقشه‌های رقومی رشد گیاه و الگوی مقدار محصول در دسترس قرار گرفتند. داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌های مقدار محصول به وسیله کمباین‌های مجهز به موقعیت‌یاب GPS [1] اطلاعات اولیه مورد نیاز در مورد حاصلخیزی خاک و تغییر بهره‌وری محصول را به کشاورزان ارائه می‌دهند. پیشرفت حسگرهای خاک و توانایی نقشه برداری از تغییرهای pH خاک، درجه شوری، نیترات ، رطوبت و مواد آلی خاک در حال حاضر انگیزه‌ای عالی برای کسانی است که در حال استفاده از کشاورزی دقیق ماهواره‌ای هستند. توسعه ابزارهای مزرعه‌ای بدون سرنشین و مجهز به موقعیت‌یاب GPS برای انجام کارهای مختلف از جمله خاک‌ورزی، وجین، مصرف مواد غذایی و برداشت محصول،

1. Global positioning system

اندیشه‌ای امیدوارکننده برای آینده ایجاد می‌کند. کشاورزی ماهواره‌ای با بهره‌گیری از پهبادپهباد و روبات‌ها می‌توانند بسیاری از فعالیت‌های مزرعه را تسریع کنند، دقت بیشتری به کشاورزان ارائه دهند، نهاده‌ها را ارزان کنند، حاصلخیزی خاک را تثبیت کرده و موجب یکنواختی بهره‌وری شوند.

۲-۱- روبات‌های کشاورزی- براساس تعریف، روبات‌های کشاورزی می‌توانند وسیله‌های خودکار یا نیمه خودکاری باشند که برای مرحله‌های مختلف تولید محصول‌های زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روبات‌های زراعی بیشتر در آماده‌سازی زمین، شیاربندی، کانال‌سازی، توزیع کودهای مایع، سم‌پاشی، آبیاری و از همه مهمتر در برداشت بذرها یا چیدن میوه‌هابه کار می‌روند. به این منظور، از روبات‌ها زمانی به صورت پی‌درپی استفاده می‌شود که کار سخت و یا سختی کار ضروری باشد (Vangioukas, 2013). روبات‌های زراعی به عنوان تلفیقی از دستگاه‌های مکانیکی با سامانه‌های الکتریکی و محاسبه‌گر تعریف می‌شوند. افزون بر این، یک روبات کشاورزی شامل سه مؤلفه اساسی است؛ **الف**- سامانه سنجش ویژگی‌های فیزیکی و زیستی مزرعه، **ب**- مجموعه‌ای از ابزارهای تصمیم‌گیری مانند رایانه که داده‌های حسگرها را بر اساس برنامه‌ها پردازش می‌کنند و **پ**- بازوها، عملگرها یا ابزارک‌هایی[1] که در واقع دستورها را با دریافت پیام‌های الکترونیکی انجام می‌دهند (Harrel *et al*., 1988). برخی از سودمندی‌های استفاده از روبات‌های زراعی به شرح زیرند:

- ❖ در هر زمانی از سال زراعی بطور مؤثر وظیفه‌های مختلفی را با سرعت و دقت بیشتری انجام می‌دهند.
- ❖ برای محیط زیست کمتر زیان‌بار هستند.
- ❖ روبات‌ها می‌توانند شب و روز کار کنند. برای نمونه، روبات‌هایی که با پویشگر لیزری سه بعدی[2] هدایت می‌شوند، می‌توانند حتی در طول شب نیز کار کنند. روبات‌ها می‌توانند برای سم‌پاشی در اولین هشدارهای رشد حشره‌ها، تأمین آب در شروع کمبود رطوبت خاک و برداشت محصول در زمان مناسب به کار روند (Simonite, 2009).
- ❖ روبات‌ها در مکان‌هایی که برای انسان خطرناک است به کار می‌روند. در حال حاضر، روبات‌های نیمه‌خودکاری در موقعیت‌های حساس کشاورزی دارای مواد شیمیایی خطرناک و موارد مشابه دیگر مشغول به کارند (McIntosh, 2012).

۳-۱- هواپیماهای بدون سرنشین کشاورزی (پهبادها)- پهباد تا سال ۲۰۰۰ میلادی با بال‌های ثابت ساخته می‌شدند. پهباد با بال‌های چرخنده، به عبارت دیگر بالگردهای بدون خلبان برای بررسی وضعیت منطقه و پرتاب موشک یا بمب ساخته شده‌اند. بالگردهای بدون سرنشین به طور مؤثر برای ردیابی، انتخاب تصویرهای نگاره‌ها از خاک و محصول و تهیه نقشه‌های رقومی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بالگرد بدون سرنشین RMAX یاماها در مزرعه‌های برنج ژاپن به صورت پیوسته به کار می‌روند. در حال حاضر، بیش از ۵۰ کشور دارای فناوری پهباد تکامل‌یافته هستند و از آن‌ها برای ارزیابی‌های نظامی، سنجش از راه دور، هواشناسی، بررسی منابع طبیعی، دیدبانی تجاری، دیدبانی داخلی پلیس، ترابری، اکتشاف نفت و گاز طبیعی، پژوهش‌های علمی و از همه مهمتر در تولید محصول‌های زراعی استفاده می‌کنند. پهباد در منطقه‌های اصلی کشاورزی آمریکای شمالی، اروپا و استرالیا و ماشین‌های مرتبط با فناوری به عنوان برجسته‌ترین پیشرفت در کشاورزی در دهه دوم سال میلادی ۲۰۰۰ در نظر گرفته می‌شوند (Wilson, 2014). استفاده از پهباد از جدیدترین روش‌های دیدبانی و مدیریت است و به نظر می‌رسد با سرعت بسیار زیادی گسترش می‌یابد و می‌توانند در کشاورزی جهانی بسیار سودمند باشند. براساس نظر برخی از کارشناسان کشاورزی، گسترش پهباد در مزرعه‌ها را می‌توان با فناوری‌های انقلابی سال‌های اخیر مانند: رایانه‌های شخصی و اینترنت مقایسه کرد (ASME, 2012; DeAngelis, 2014; Dronlife, 2014).

1. Gadgets
2. Scanner

۲- آسیب‌شناسی و محدودیت‌های روش‌ها و فناوری‌های نوین بوم‌سازگار در جهان

۲-۱- کشاورزی ماهواره‌ای- کشاورزی ماهواره‌ای یکی از راهبردهایی است که برای رویارویی با چالش‌های تأمین امنیت غذایی و پایداری توسعه کشاورزی ارایه شده است. بدیهی است هرگونه برنامه‌ریزی برای اجرای کشاورزی ماهواره‌ای نیازمند ایجاد زمینه‌های فکری و افزایش آگاهی و دانش در کارشناسان و مسئولان می‌باشد. کشاورزی ماهواره‌ای با مدیریت نهاده‌های تولید، به کاهش هزینه‌های تولید، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، افزایش عملکرد، افزایش بهره‌وری، مدیریت و تصمیم‌سازی قوی‌تر بر پایه اطلاعات و توسعه پایدار کشاورزی می‌انجامد. بررسی‌های گذشته نشان داد با توجه به سودمندی‌های گفته شده، گسترش کشاورزی ماهواره‌ای یکی از پیش‌نیازهای اساسی برای جامعه‌ای است که خواهان دستیابی به توسعه پایدار است، اما نباید فراموش کرد که این سودمندی‌ها در صورتی حاصل می‌شوند که در راستای رفع چالش‌های پیش‌روی کشاورزی ماهواره‌ای گام برداشته شود.

Swinton & Lowenberg-DeBoer (2004) در پژوهش خود در ارتباط با پذیرش جهانی فناوری کشاورزی ماهواره‌ای بیان کردند که نمونه‌برداری خاک و تغییرپذیری در خاک بیشترین مقدار پذیرش کشاورزی ماهواره‌ای را دارد. همچنین این پژوهشگران ۸ بررسی در ۴۶ منطقه برای ارزیابی سودمندی پخش کودها انجام دادند و نتایج مثبتی را گزارش دادند. ایشان در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که سرمایه‌گذاری بهینه در نهاده‌ها، استفاده بهینه از منابع طبیعی، کاهش آلودگی محیطی و کیفیت زیاد تولیدها از نتایج کشاورزی ماهواره‌ای می باشند.

Mishra *et al.* (2013) پیش‌نیازهای کاربرد کشاورزی ماهواره‌ای در هندوستان را شامل ایجاد دوره‌های تحصیل چند رشته‌ای، تأسیس تعاونی‌های کشاورزی، تصویب قانون‌هایی از سوی دولت برای جلوگیری از استفاده بیش از حد از نهاده‌های کشاورزی، انتخاب منطقه‌های آزمایشی برای اجرای کشاورزی دقیق و اطلاع‌رسانی به کشاورزان در زمینه پیامدهای استفاده بیش ازحد نهاده‌های کشاورزی دانسته‌اند.

بررسی چالش‌ها و فرصت‌ها پذیرش کشاورزی ماهواره‌ای در سطح وسیع در کشور استرالیا نشان داد که وسیله‌های کشاورزی ماهواره‌ای دارای توانایی ذخیره پول و سودآوری برای کشاورزان از راه افزایش بهره‌وری سامانه‌های کاشت مزرعه‌های پهناور هستند، اما عاملی که می‌تواند پذیرش این نظام را محدود سازد هزینه اولیه است که این موضوع به علت وجود فصل‌های خشک یا غیرقابل پیش‌بینی در دهه‌های گذشته در منطقه در حال بررسی است (Mondal & Tewari 2007).

به طور خلاصه برخی از محدودیت‌ها و چالش‌های پیش روی کشاورزی دقیق در جهان را می‌توان به صورت زیر بیان نمود: **۱**- اندک بودن سطح آگاهی، اطلاعات و مهارت‌های فنی کشاورزان، نبود اطلاعات کافی در زمینه‌های اقتصادی و زراعی مربوط به کشاورزی دقیق و نبود اعتماد به فناوری‌های کشاورزی دقیق. **۲**- نامناسب بودن برنامه‌های آموزشی- مشاوره‌ای و عدم وجود آموزش‌های صحیح و مناسب به آموزشگران و سایر عامل‌های انسانی دست‌اندرکار. **۳**- خطرپذیری کم کشاورزان و شرایط بد اقتصادی- اجتماعی. **۴**- اندازه کوچک مزرعه‌ها. **۵**- کمبود ماشین‌های برداشت محصول‌ها. **۶**- هزینه زیاد نمونه‌برداری شبکه‌ای خاک. **۷**- نبود درک سودمندی‌های حاصل از حسگرها. **۸**- شمار کم شرکت‌های مشاوره.

۲-۲- روبات‌های کشاورزی- روبات‌ها نقش‌های برنامه‌ریزی‌شده توسط کشاورزان را انجام می‌دهند و کاربرد روبات‌ها، موجب انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیم می‌شود. کشاورزان با استفاده از سودمندی های روبات‌های مزرعه‌ای باید فنون دقیق را به کار گیرند، تصویربرداری کنند و داده‌های دیجیتالی را با نشان دادن تغییرهای حاصلخیزی خاک نشان دهند. روبات‌هایی با توانایی کاربرد نهاده‌های متغیر، مقدارهای دقیقی از مواد غذایی را وارد خاک می‌کنند. روبات‌هایی

که عملکردشان از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری رایانه‌ای دستور می‌گیرد، انباشت غیرضروری مواد غذایی، آفت‌کش‌های کشاورزی و علف‌کش‌ها را کاهش می‌دهند. روبات‌ها به طور کلی می‌توانند کودها و دیگر مواد شیمیایی را بصورت دقیق بکار ببرند. بنابراین، احتمال زوال خاک، آبشویی و آلودگی آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهند. با این حال، گزارش‌ها نشانگر این است که کشاورزان ممکن است تراکتورهای کوچک و روبات‌هایی را ترجیح دهند که سطح خاک را سست می‌کنند. روبات‌ها بطور کلی می‌توانند در سامانه‌های بدون خاک‌ورزی کشت را انجام دهند. چنین روبات‌هایی به طور خودکار میزان انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهند. تخریب خاک و از بین رفتن کربن آلی خاک کاهش می‌یابد. به طور کلی، روباتیک تنها درصورت اتخاذ فنون دقیق مانند نمونه‌برداری از خاک، آزمایش مواد غذایی، نقشه‌برداری و تأمین مقدار متغیر نهاده بر اساس برنامه‌های دقیق رایانه‌ای، کارایی خواهدداشت. برخی از این جنبه‌های روباتیک مزرعه موجب کاهش تخریب خاک نیز می‌شوند. برخی از دشواری‌های پذیرش سریع روبات‌ها عبارتند از:

- ❖ حرکت آهسته در مزرعه یا گلخانه به دلیل کنترل دید کمتر.
- ❖ شناسایی و چیدن میوه و بذرهای رسیده به چندین الگوریتم نیاز دارد.
- ❖ روبات‌های زراعی در حال حاضر پرهزینه هستند. البته، تولید انبوه و یارانه‌ها به پذیرش آن‌ها کمک می‌کنند.
- ❖ روبات‌های زراعی ممکن است گاهی به تغییرهای جزئی یا شدید در شیوه کاشت محصول، تراکم آن، نژادگان[1] ترجیحی و رویه‌های اتخاذشده نیاز داشته باشند.
- ❖ حسگرها و سامانه‌های کنترل دید زیر تأثیر نور خورشید و الگوی روشنایی عملکرد متفاوتی خواهند داشت.
- ❖ محصول‌های کشاورزی با گوناگونی بیشتر در ریشه‌زایی، ارتفاع، تشکیل شاخه‌ها و سایبان، الگوی رسیدن خوشه‌ها و میوه‌ها یا دیگر محصول‌ها به راحتی توسط روبات‌ها چیده نمی‌شوند. اگر محصول در زمان‌های مختلف یک فصل برسند، روبات‌ها به طور پیوسته باید در مزرعه فعال باشند.
- ❖ در حال حاضر، از روبات‌ها برای برداشت شماری از بذرهای خوراکی و میوه‌ها استفاده می‌شود. روبات‌های مناسب برای دامنه گسترده‌ای از محصول‌های زراعی هنوز در دست تولید هستند.

روباتیک در کشاورزی به عنوان یک مفهوم، در سال‌های ۱۹۳۲ تا ۲۰۰۰ پیشرفت محسوسی نداشته است (Szabo, 2013). با این حال، در سال‌های اخیر وضعیت تغییر کرده است. روباتیک در کشاورزی هم از نظر تولید آن توسط شرکت‌های مختلف و هم از نظر پذیرش در مزرعه‌های جهان به سرعت در حال توسعه است (Janmaat, 2014). شماری از این روبات‌های بسیار کوچک و کاربردی در مزرعه‌ها عملکرد بسیار مفیدی دارند. چند مورد دیگر پیچیده هستند. آن‌ها به آماده‌سازی دقیق تجهیزات، لوازم جانبی و برنامه‌های رایانه‌ای نیاز دارند. در گزارشی، سرعت تقاضا برای کاربرد روبات‌ها در کشاورزی بحث شده است (Wehrspann, 2014). این گزارش در مورد ورود پنج نوع مختلف روبات به مزرعه‌های آمریکای شمالی توسط شرکت‌های مختلفی از جمله جان دیر[2]، نیوهلند[3] و مانند این‌ها است. با این حال، گزارش‌هایی وجود دارند که دلیل‌های تأخیر در پذیرش روباتیک در کشاورزی جهانی را، در مقایسه با جنبه‌های دیگری مانند صنعت، به صورت کامل بیان می‌کنند. در حال حاضر، تنها در بخش کوچکی از تولیدهای زراعی از روبات‌ها استفاده می‌شود. بسیاری از تلاش‌ها هنوز در مرحله طراحی اولیه یا در نمونه‌های اولیه هستند. آن‌ها هنوز تجاری‌سازی نشده‌اند. کشاورزان باید به دنبال روبات‌ها باشند و سود حاصل از به کارگیری آن‌ها در مزرعه را دریافت کنند.

1. Genotype
2 . John Deere Inc.
3. New Holland

۳-۲- هواپیماهای بدون سرنشین کشاورزی (پهبادها)- تا چندی پیش، از پهبادها تنها در زمینه‌های نظامی استفاده می‌کردند، اما امروزه کاربردهای فراوانی برای پهباد وجود دارد و از آن‌ها در کشاورزی نیز استفاده می‌کنند. جالب توجه است که شمار کشاورزانی که برای مزرعه‌های خود از پهباد کشاورزی استفاده می‌کنند در حال رشد سریعی است. در واقع استفاده از پهباد کشاورزی به کشاورزان اجازه می‌دهد تا با کمینه هزینه محصول‌های کشاورزی خود را زیر نظر بگیرند. باتوجه به شرایط اقلیمی و رشد جمعیت ساکن در کره زمین، استفاده از محصول‌های کشاورزی افزایش پیدا می‌کند. با توجه به این شرایط انتظار می‌رود در آینده کشاورزان بیشتری از فناوری پهباد کشاورزی استفاده کنند و از این راه بازدهی کار خود را افزایش دهند. با توجه به این که استفاده از پهبادهایی مانند کوادکوپتر، هگزاکوپتر و اوکتاکوپتر در کشاورزی سودمندی‌های بسیاری دارند، اما دارای کاستی‌هایی نیز می‌باشند که از آن جمله می‌توان به مدت زمان و محدوده عملیاتی پرواز، وابستگی به شرایط جوی، هزینه برای خرید و مهارت برای استفاده اشاره نمود.

۳- راهکارهای بومی‌سازی فناوری‌های نوین در زمینه‌های کشاورزی و منابع طبیعی در ایران

۳-۱- کشاورزی ماهواره‌ای- یکی از دلایل رشد کشاورزی دقیق، پیشرفت فناوری‌های مختلف از جمله سیستم تعیین مختصات جغرافیایی یا موقعیت یاب GPS، حسگرها، سنجش از دور و تسهیلات مدیریت اطلاعات جغرافیایی[1](GIS) است. با توجه به راه‌اندازی شبکه مدیریت یکپارچه مالکیت‌ها (شمیم) توسط سازمان ثبت اسناد و املاک کشور، این سامانه می‌تواند در بسیاری از عملیات مهندسی و مطالعاتی و به ویژه کشاورزی ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرد. معماری سامانه شمیم شامل سه بخش شبکه ایستگاه‌های مرجع GNSS[2]، مرکز ارائه سرویس و پشتیبانی و بخش کاربران است. دقت تعیین موقعیت در (RTK)[3] زیر شبکه وابسته به فاصله گیرنده متحرک[4] از نزدیک‌ترین ایستگاه مرجع است. بر این اساس، دقت دست‌یافتنی با استفاده از سامانه شمیم در شرایط محیطی آسمان باز برابر با ۱cm± است. تراکم مناسب ایستگاه‌های یک شبکه GNSS از شرایط مهم در ارائه دقت مناسب برای تعیین موقعیت است. فاصله بین ایستگاه‌های مرجع یک شبکه GNSS بهینه، بیشتر در حدود ۷۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. وجود این سامانه در کشور پتانسیل بسیار مناسبی را برای توسعه کشاورزی ماهواره‌ای در داخل کشور فراهم می‌کند.

با توجه به این‌که کشاورزی ماهواره‌ای تلاش می‌کند نوع و میزان نهاده‌ها را بر اساس نیازهای واقعی محصول‌هایی که در بخش‌های کوچک‌تر زمین قرار دارند، همساز نماید، اولین گامی که در توسعه و بومی‌سازی کشاورزی ماهواره‌ای در داخل کشور باید برداشته شود. بررسی تغییرپذیری متغیرهای مهم و موثر در عملکرد کمی و کیفی محصول درون زمین‌های زراعی می‌باشد.

هیچ مدیریتی بدون شناخت کافی از مسأله، ممکن نیست. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد تغییر پذیری‌ها می‌توانند مکانی[5] یا زمانی[6] باشند که کاوش هر دو تغییرپذیری در کشاورزی ماهواره‌ای ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، بررسی‌های گسترده در زمینه تغییرپذیری درون زمین‌های زراعی در سراسر کشور ضروری است.

زمانی که تغییرهای مکانی پارامترهای موردسنجش بررسی شدند، تولیدکننده باید براساس دانش زراعی خود مدیریت دقیقی متناسب با آن اتخاذ کند. این مدیریت به اصطلاح مدیریت موضعی محصول[7] نام دارد. البته، هرچه بُعد زمانی

1. Geographic information systems 2. Global navigation satellite system 3. Real-time kinematic
4. Rover 5. Spatial variability 6. Temporal variability 7. Site-specific crop management

تغییرپذیری در این شیوه مدیریتی غالب‌تر باشد، مشکل‌ها بیشتر است. برای نمونه، در مورد پتاسیم و فسفر، بعد زمانی تأثیر چندانی بر تغییرپذیری آن در مزرعه ندارد، در حالی که این مطلب در مورد کودهای نیتروژنی درست نیست.

برخی از ماشین‌هایی که در کشاورزی ماهواره‌ای به کار می‌روند، می‌توانند توسعه‌یافته و/یا تغییریافته همان ماشین‌هایی باشند که در کشاورزی سنتی از آن‌ها استفاده می‌شد. از آن جمله می‌توان به ماشین‌های کاشت، ماشین‌های پخش کود و مانند این ها اشاره نمود که با جایگذاری یک موتور الکتریکی دورمتغیر و یک ریزکنترل‌گر در ماشین می‌توان ماشین‌های سنتی را خودکارکرد. استفاده از ماشین‌های جدید مبتنی بر اعمال مقدار متغیر نهاده‌ها در قسمت‌های مختلف مزرعه می‌باشد؛ بنابراین باید از نظر اقتصادی و فناوری در منطقه‌های مختلف کشور ارزیابی عملی شوند.

سه مؤلفه اقتصاد، محیط زیست و انتقال فناوری در این مرحله بیشترین اهمیت را دارند. مهم‌ترین واقعیتی را که باید در کشاورزی ماهواره‌ای قبول کرد این است که اطلاعات و داده‌ها در این نوع کشاورزی ارزش محسوب می‌شوند و نه فناوری. بنابراین، این داده‌ها به هر شیوه‌ای که به دست می آیند، در صورت داشتن دقت زیاد و خطای پذیرفتنی، با ارزش هستند و ورودی قابل اتکا برای مدیریت موضعی‌اند. نکته دیگر این است که حفظ محیط‌زیست همواره به عنوان عامل تأثیرگذار در به وجود آمدن کشاورزی دقیق مطرح بوده است. کاهش استفاده از مواد شیمیایی، سم‌ها، آفت‌کش‌ها، افزایش کارایی کودها و در نتیجه افزایش بازدهی نهاده‌ها و جلوگیری از فرسایش خاک از سودمندی‌های زیست‌محیطی این نوع کشاورزی به شمار می‌آیند.

به طورخلاصه برای بومی‌سازی و امکان‌سنجی اجرای کشاورزی ماهواره‌ای در کشور که هدف عمده آن تعیین خط مشی‌هایی جهت افزایش کارایی نهاده‌ها و کاهش آسیب‌های زیست محیطی می باشد، باید در عمل در سه مرحله انجام شود:

۱- کاوش و بررسی سطح تغییرپذیری در مزرعه‌های کشور.

۲- توسع فنونی جهت اندازه‌گیری تغییرها در فصل رشد (مدیریت تغییرها).

۳- ترویج و انتقال اطلاعات به کشاورز و تولیدکننده.

یکی از دشواری‌هایی که در مزرعه‌های داخل کشور نسبت به مزرعه‌های کشورهای توسعه‌یافته‌ای مانند ایالت متحده آمریکا وجود دارد، اندازه و وسعت مزرعه‌ها می‌باشد که سودمندی‌های اقتصادی حاصل از این نوع سیستم کشاورزی را زیر تاثیر قرار می‌دهد. در آسیا به ویژه کشور ژاپن، مزرعه‌ها دارای ابعاد کوچکی هستند و بنابراین، تنها می‌توان از دستگاه‌های کوچک استفاده نمود. در راستای توسعه کشاورزی ماهواره‌ای در داخل کشور و بومی‌سازی فناوری‌های لازم، باید از تجربه این کشور و کشورهای دیگری مانند چین، هندوستان و فیلیپین استفاده کرد. به نظر می‌رسد مدیریت موضعی مواد مغذی[1] در مزرعه‌های داخل کشور، با وجود کوچک بودن آن‌ها (که مشکل مزرعه‌های ایران می‌باشد)، پاسخ به نسبت خوبی را ارائه خواهد کرد (باقرپور و فروزانی، ۱۳۹۵).

۲-۳- <u>روبات‌های کشاورزی</u>- براساس گزارش‌هایی در مورد وضعیت روبات‌ها در کشاورزی قاره‌های مختلف، ابراز شده است که شاید در آینده نزدیک، روبات‌ها مزرعه‌ها را به ویژه در کشاورزی ایران زیر پوشش قرار خواهند داد (Pullinger, 2013). آن‌ها ممکن است وظیفه های متوالی داشته باشند و وظیفه‌هایی همچون بذرپاشی، آبیاری، کوددهی، سمپاشی، برداشت و مانند این‌ها را انجام دهند. به نظر می‌رسد تراکتورهای بدون سرنشین و روبات‌هایی که میوه را چیده و درجه‌بندی می‌کنند می‌توانند ظرف چند سال بسیار رواج یابند. گندم می‌تواند زیر پوشش روبات‌هایی باشد که می‌توانند کوددهی،

1. Site- specific nutrient management

استفاده از کودهای زیستی و آبیاری را انجام دهند. در استرالیا، مزرعه‌های بزرگ را می‌توان با روبات‌هایی مدیریت کرد که می‌توانند پیوسته کار کنند. از آن‌جا که مزرعه‌های گندم استرالیا محصول‌های غذایی را هم برای مصرف خانگی و هم برای پاسخگویی به تقاضای صادرات تولید می‌کنند، سودمندی زیادی دارند(Packham, 2013; Roodt, 2013).

شاید روبات‌ها در انجام به‌هنگام کارها در مقیاس وسیع مناسب باشند، ولی در اندازه‌های کوچک تنها مایه زحمت هستند. در ژاپن، بهترین مفاهیم تولید محصول‌های زراعی به‌بهترین صورت توسط روبات‌ها انجام می‌شوند. کار روبات‌ها در مقایسه با کار انسان، دقیق‌تر است. با این حال، برنامه‌های رایانه‌ای که روبات‌ها را در مورد کوددهی، آبیاری و سمپاشی هدایت می‌کنند باید به دقت تنظیم شوند. در کشورهای اروپای شمالی مانند دانمارک و سوئد، افزون بر تولید محصول‌های زراعی، نگهداری گاوهای شیرده نیز با استفاده از روبات‌های خودکار انجام می‌شود (Hagele, 2014; Szabo, 2013). کاربران بیشتر بر این باورند که پذیرش روبات‌های زراعی به رفع سختی کار و سودمندی انسانی بستگی دارد. بیان شده است که کشاورزان، به ویژه در کشورهای توسعه یافته، نیاز به خودکارسازی بیشتر و به کارگیری وسیله‌های ترابری و ابزارهای خودکار مجهز به GPS در مزرعه‌ها را بسیار خوب تشخیص می‌دهند (Billingsley *et al.*, 2008). در مورد محصول‌های زراعی، ابزارهایی با بینایی[1]ماشینی و هدایت بر پایه GPS روی تراکتورها و سایر روبات‌ها نصب می‌شوند. جستجوی محصول با استفاده از نقشه‌های ماهواره‌ای و پهبادها متداول‌تر شده‌اند (Sani, 2012).

آخرین گزارش‌ها در مورد روباتیک زراعی نشانگر پذیرش روبات‌های خدمت‌رسان[2] است. روبات خدمت‌رسان وسیله ترابری خودکار همه‌کاره است. این روبات‌ها سکوی و جایگاه مشترک دارند که وسیله‌های جانبی مختلفی را می‌توان روی آن نصب کرد. آن‌ها می‌توانند بذر پاشی، وجین کردن، کودپاشی زمین و همچنین می‌توانند زمین‌ها را آبیاری یا سم‌پاشی کنند. به نظر می‌رسد که این روبات‌ها ۳۳٪ از کل روبات‌های زراعی فروخته شده در کشورهای اروپایی را به خود اختصاص داده‌اند. به نظر می‌رسد روبات خدمت‌رسان بدون سرنشین، شغل کارگران را از آن‌ها می‌گیرد. پیدایش روبات‌های کوچک می‌توانند به ما امکان انجام طیف گسترده‌ای از فعالیت‌ها را با استفاده از آن‌ها دهد. روبات‌های هوشمند کوچک در واقع می‌توانند در زمان‌های مختلف و در مکان‌های مختلف کار کنند (Blackmore *et al.*, 2005). این روبات‌های کوچک همچنین می‌توانند انرژی لازم برای اصلاح آسیب‌ها یا خطاهای ناشی از وسایل نقلیه بزرگ را کاهش دهند (Blackmore *et al.*, 2005). در واقع کشاورزی فرصتی عالی برای معرفی انواع روبات‌ها ارائه می‌کند. گزارش‌ها نشان می‌دهند چین، ژاپن و استرالیا بر توسعه تراکتورهای خودکار که به راحتی بتوانند به دستگاه‌هایی با توانایی انجام کارهای مختلف متصل شوند پافشاری دارند (Bayer Crop Science, 2014; Makim, 2014).

۳-۳- <u>هواپیماهای بدون سرنشین کشاورزی (پهبادها)</u>- پهباد در سنجش از راه دور هوایی و تولید تصویرهای دیجیتالی مزرعه‌هامفید هستند. آن‌ها یک سری سودمندی‌ها به کشاورزان ارائه می‌دهند و از این رو پذیرش زیادی دارند (Yan *et al.*, 2009). پهباد در ایران ممکن است به دلیل تصویرهای تولید، به ویژه عکس‌های نزدیک از بالای محصول برای مزرعه‌ها و نمونه هایی که عملیات کشاورزی را توصیف می‌کنند بسیار مفید باشند. وضوح زیاد و ریزه‌کاری‌های مربوط به مرحله‌های رشد محصول، مقدار کلروفیل، NDVI [3] و وضعیت آب (تصویرهای حرارتی IR) از جذابیت‌های خوبی برای کشاورزان در خرید دستگاه‌ها برخوردارند. از آن‌جا که پهباد به تدریج جایگزین دیده‌بانی محصول توسط نیروی انسانی می‌شوند، کشاورزان آن‌ها را ترجیح می‌دهند. نظارت بر محصول‌های زراعی از جمله مفیدترین وظیفه‌هایی

1. Machine vision 2. Service robots 3. Normalized difference vegetation index

است که پهبادها در بسیاری از منطقه‌های زراعی انجام می‌دهند. پهباد در مزرعه‌های تخصصی غلات از جمله گندم، ذرت یا دیگر محصول‌های زراعی قابل استفاده هستند. آن‌ها برای ارزیابی محصول از نظر رشد سایه‌سار، سطح برگ، کلروفیل و وضعیت نیتروژن برگ ترجیح داده می‌شوند (Lumpkin, 2012; Raymond Hunt *et al*., 2010; Torres-Sanchez *et al*., 2014). پهباد همچنین می‌توانند برای توزیع کودها بر اساس داده‌های دیجیتالی که به رایانه‌های آن عرضه می‌شوند، به کار روند.

در حال حاضر، چندین شرکت استارت آپ در داخل کشور وجود دارند که پهباد برای تصویر برداری با توانمندی‌های مختلف را برای همخوانی با ارزیابی محصول و افشانه‌هایی برای کاربرد متغیرنهاده تولید می‌کنند. در گزارش این شرکت‌ها آمده است که پهباد در منطقه‌های کشاورزی، سرمایه‌گذاری‌های فردی و فعالیت‌های مربوط به کشاورزی جهشی بزرگ داشته‌اند. استفاده از پهبادها در مزرعه‌های داخل کشور نشان داده است که این دستگاه‌ها می‌توانند بازده مصرف سم را حدود ۳۰٪ افزایش دهند. نوع دیگری از پهباد ملی که در داخل کشورطراحی و ساخته شدهاست، سودمندی‌های فراوانی از نظر نوع موتورهای الکترونیک، نوع عملیات و خدمات، دوربین و حسگرها، نوع پرواز و نوع پایشی که انجام می‌دهند نسبت به مشابه خارجی خود دارند. پهبادهای ساخت داخل از نظر هزینه ۵۰٪ کمتر از قیمت مشابه خارجی می‌باشد و شرکت‌های تولیدکننده ابتدا در زمینه خدمات کشاورزی با پهباد از جمله سم‌پاشی، محلول‌پاشی فعالیت داشته و در چند سال گذشته به تولید پهبادهای سم‌پاش و واکاو که به طور کامل بومی است اقدام نموده و کارخانه تولید پهباد را تأسیس نموده اند.

نتیجه‌گیری

۱- کشاورزی ماهواره‌ای به همراه استفاده از پهباد و روبات‌ها می‌توانند بسیاری از فعالیت‌های مزرعه‌ای را سرعت بخشند، دقت بیشتری به کشاورزان ارائه دهند، کاربرد نهاده‌ها را اقتصادی سازند، حاصلخیزی خاک را تثبیت کرده و موجب یکنواختی بهره‌وری شوند.

۲- با توجه به این‌که کشاورزی ماهواره‌ای تلاش می‌کند نوع و مقدار نهاده‌ها را بر اساس نیازهای واقعی محصول‌ها که در بخش‌های کوچک‌تر زمین قرار دارند، همخوان سازد، اولین گامی که در توسعه و بومی‌سازی کشاورزی ماهواره‌ای باید برداشته شود بررسی تغییرپذیری متغیرهای مهم و موثر در میزان کمی و کیفی محصول درون زمین‌های زراعی می‌باشد.

۳- گسترش کشاورزی ماهواره‌ای یکی از پیش‌نیازهای اساسی برای جامعه‌ای است که خواهان دستیابی به توسعه پایدار است، اما نباید فراموش کرد که این سودمندی‌ها در صورتی حاصل می‌شوند که در راستای رفع چالش‌های پیش روی کشاورزی ماهواره‌ای گام برداشته شود.

۴- در راستای توسعه کشاورزی ماهواره‌ای در داخل کشور و بومی‌سازی فناوری‌های لازم، باید از تجربه کشورهایی مانند چین، هندوستان و فیلیپین استفاده کرد. به نظر می‌رسد مدیریت موضعی تغذیه در مزرعه‌های داخل کشور، با وجود کوچک بودن مزرعه‌ها که مشکل مزرعه‌های ایران می‌باشند، پاسخ به نسبت خوبی را ارائه خواهد کرد.

۵- به دلیل مصرف بیشتر آب در کشاورزی و کمبودهای زیاد در این بخش و همچنین کاهش منابع آبی کشور، لازم است استفاده از روش‌هایی مانند فناوری آبیاری متغیر و با بهره‌گیری از شبکه‌های حسگر بیسیم در مدیریت بهتر آب آبیاری توجه شود.

۶ - روبات‌ها بطور کلی می‌توانند در سامانه‌های بدون خاک‌ورزی عملیات کاشت را انجام دهند. چنین روبات‌هایی به طور خودکار میزان انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهند. تخریب خاک و از بین رفتن کربن آلی خاک کاهش می‌یابد. به طور کلی، روباتیک تنها در صورت اتخاذ فنون دقیق مانند نمونه‌برداری از خاک، آزمایش مواد غذایی، نقشه‌برداری و تأمین مقدار متغیر بر اساس برنامه‌های دقیق رایانه‌ای، کارایی خواهد داشت.

۷- در حال حاضر، تنها در بخش کوچکی از تولیدهای زراعی از روبات‌ها استفاده می‌شود. بسیاری از تلاش‌ها هنوز در مرحله طراحی اولیه یا در حد نمونه‌های اولیه هستند. آن‌ها هنوز تجاری‌سازی نشده‌اند. کشاورزان باید به دنبال روبات‌ها باشند و سود حاصل از به کارگیری آن‌ها را دریافت دارند.

۸- در واقع کشاورزی فرصتی عالی برای معرفی انواع روبات‌ها ارائه می‌کند. گزارش‌ها نشان می‌دهند چین، ژاپن و استرالیا بر توسعه تراکتورهای خودکار با ارائه تسهیلاتی برای اتصال دستگاه‌هایی با توانایی انجام کارهای مختلف پافشاری دارند (Bayer Crop Science, 2014; Makim, 2014).

۹- استفاده از پهباد از جدیدترین روش‌های نظارت و مدیریت است و به نظر می‌رسد با سرعت بسیار زیادی گسترش می‌یابد. پهباد همواره می‌توانند در کشاورزی جهانی بسیار مفید باشند.

۱۰- استفاده از پهبادها در مزرعه‌های داخل کشور نشان داده است که این دستگاه‌ها می‌توانند بازده مصرف سم را حدود ۳۰٪ افزایش دهند. نوع دیگری از پهباد ملی که در داخل کشور طراحی شده‌است، سودمندی‌های فراوانی به خاطر نوع موتورهای الکترونیک، نوع عملیات و خدمات، دوربین و حسگرها، نوع پرواز و نوع پایشی که انجام می‌دهند نسبت به مشابه خارجی خود دارند. پهبادهای ساخت داخل از نظر هزینه، ۵۰٪ کمتر از مشابه خارجی می‌باشند.

۱۱- ورود نکردن کشاورز به زمین‌های زراعی و باغی، عدم لهیدگی و از بین رفتن محصول‌ها بر اثر ورود تراکتور، پوشش یکنواخت سم به تمام بخش‌های مزرعه، کاهش مصرف آب و سم و ورود نکردن نیروی انسانی در مرحله‌های سم‌پاشی از سودمندی‌های بهره‌مندی از پهبادها در عرصه کشاورزی می‌باشند.

منابع

باقرپور، حسین و فروزانی، بهنام، ۱۳۹۵، چالش ها و چشم اندازهای کشاورزی دقیق در ایران، دهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران، مشهد، https://civilica.com/doc/563669.

Anonymous (2014). Bayer Crop Science. Ripe for Robots: Automated Agricultural Helpers. http://www.cropscienc e.bayer.com/en/magazine/Rip e-for-Robots. aspx., pp. 1-3 (July 4th, 2014).

ASME. 2012. Unmanned Aerial Vehicles Soar High. American Society of Mechanical Engineers. https://asme.org/engineering-topics/articles/robotics/unmanned-aerialvehicles- soar-high.htm, pp. 1–3 (March 20th, 2014).

Billingsley, J, Visala, J., Arto, M., Dunn, M. (2008). Robotics in Agriculture and Forestry. Springer Verlag Inc., Heidelberg, Germany, pp. 1065-1077.

Blackmore, B. S., Stout, W., Wang, M., Runov, B. (2005). Robotic Agriculture-the future of agricultural mechanization? In: Proceedings of 5th European Conference on precision Agriculture. Stafford, J. (Ed.). The Netherlands, Wageningen Academic Publishers., pp. 621-628.

DeAngelis, S. (2014). High Tech Agriculture. http://www.enterresolutions.com/author/bradd.htm, pp. 1–12 (August 3rd, 2014).

Hagele, M. (2014). Robot milking Systems for Cattle. In: Service Robots in Agriculttwe-Automatica 2014. Sensors. http: //www.sensorsmag.comielectronics-computer/news/ automatic-2014-service-robots-agriculture-13136.hhn, pp. 1-4 (March 214, 2014).

Harrel, R. C., Slaughter, D. C., Adsit, P. D. (1988). Robotics in Agriculture In: Inter-national Encyclopedia of Robotics Applications and Automation. Dorf (Ed.). John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 1378-1387.

Janmaat, B. (2014). Agribiotics: Robotics if forever changing traditional food production. http://www.datafox.co/blog/agribotics-robotics-is-forever-changing-traditional-food-production/, pp. 1–4 (July 14th, 2014).

Khosla. R. (2010). Precision Agriculture: Challenges and Opportunities in Flat World. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, pp. 1–4.

Krishna, K R. (2012). Precision Farming: Soil Fertility and Productivity Aspects. Apple Academic Press Inc., Waretown, New Jersey, USA, pp. 189.

Lowenberg De-Boer, J. (2004). Precision Farming in Europe. http: //www.agriculture. purdue.edu/rsmc/news/june03_ precisionAgEurope.htm, pp. 1–3 (April 3rd, 2014).

Lumpkin, T. (2012). CGIAR Research Programs on Wheat and Maize: Addressing global Hunger. International Centre for Maize and Wheat (CIMMYT), Mexico. DG's Report, pp. 1–8.

Makim, R. (2014). Tractor the future with Robotics. Precision Farming Dealer http://www.precisionfarmingdealer.com/content/tractor-future-robotics, pp. 1-3 (January 196,2015).

McIntosh, P. (2012). Agricultural Robotics: Here come the robots. Maximum Yield. com. http: //www.mazimumyield.com/index.php/features/articles/item/13-agricul-tural-robotics-here-comes-the-agribots, pp. 1-4 (July 66,2014).

Mishra, A., Sundaramoorthi, K., Chidambara, R. P., & Balaji, D. (2003). Operationalization of precision farming in India. In *6th Annual International Conference and Exhibition*.

Mondal, P. & Tewari, VK. (2007). Present status of precision agriculture. *A Review in Agricultural Resource*, 2 (1): 1-10.

Packham, C. (2013). Robots to drones, Australia eyes high-tech fann help to grow food. DIY Drones: The Leading Community for personal UAVS. http: //www.reuters. com/article/2013/05/26/us-australia-fann-rob ots-idUSBRE94P0M20130526, pp. 1-3 (May 23rd, 2014).

Pullinger S. (2013). In the Future, robots will tend the crops on Norfolk farms. EDP24 http: //www.edp24.co.uk/business/farmingnews/in the future robots will tend the crops on norfolk s farms 1 3155194, pp. 1–3 (June 4th, 2014).

Roodt, D. (2013). Oz farmers study robot workers. Praag.org/?p=4642., pp. 1–4 (June 20th, 2014).

Sani, B. (2012). The Role of Robotics at the future of Modern Farming. Proceedings of International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (ICCRC2012) 43: 244–248.

Simonite, T. (2009). Robot farmhands prepare to invade the countryside. New Scientist http: //www.newscientist.com/article/dn17224-robot-farmhands-prepare-toinvade-the-countryside.html#.U5AecvmSxyU, pp. 1–3 (June 5th, 2014).

Stafford, J. V. (2005). Precision Agriculture '05 PRECISION AGRICULTURE '05. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. pp. 1005.

Swinton, S. M., & Lowenberg-Deboer, J. (2001, June). Global adoption of precision agriculture technologies: Who, when and why. *In Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture* (Vol. 2, pp. 557-562).

Szabo, J. (2013). Autonomy in Agriculture. A Nuffield (UK) Farming Scholarship Trust Report. Nufflield Trust, United Kingdom, pp. 1–32.

Torres-Sanchez, J., Pefia, J. M., De Castro, A. I., Lopez-Granados, F. (2014). Multispectral mapping of the vegetation fraction in Early-season wheat fields using images from UAV. Computers and Electronics and Agriculture 103: 104–113.

Van Henten, E. J., Grense, D. and Lockhorst, C. (2009). Precision Agriculture 2009. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Netherlands, pp. 992.

Vangioukas, S. G. (2013). Robotics for Specialty crops: Past, Present and Prospects. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, California, USA, pp. 1–5.

Wehrspann, J. (2014). Five robots coming to a field near you this year. Farm Industry News http://www.farmindustrynews.com/farm-equipment/5-robots-coming-fieldnear-you-year.Htm, pp. 1–3 (March 15th, 2014).

Wilson, K. (2014). Farmers gear towards robots. Farm Weekly. http: //farmweekly. com.au/news/agriculture/machinery/general-news/farmers-gear-towardsrobots/ 2683809.aspx., pp. 1–5 (March 11th, 2014).

Yan, L., Gou, Z. and Duan, Y. (2009). A UAV remote sensing system: Design and tests. Geospatial Technology for Earth Observation. DOI 10.1007/978–1- 4419–0050–0_2, pp. 27–33 (January 12th, 2015).

Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9(1):65-76 (2024)

Review of New Adaptive Ecosystem Technologies in Smart Agriculture

Abbaspour-Gilandeh, Y. and Mohtasebi, S. S.[1, 2]

In recent decades, the deployment of technologies such as robotics, unmanned aerial vehicles, and satellite operations has become increasingly evident in all farming activities. The revolution known as smart agriculture, employed to enhance the efficiency of agricultural products, allows farmers to achieve higher yields while minimizing the use of fertilizers and other chemicals, thereby contributing to a reduction in greenhouse gas emissions and mitigating climate change. This paper investigates and analyzes the challenges and constraints of eco-friendly innovative technologies in the field of smart agriculture globally and in Iran. It also proposes indigenous solutions for the localization of eco-friendly innovative technologies within the country. The localized management of nutrients in domestic farms, despite their small size, is expected to provide relatively positive outcomes. Agriculture presents an excellent opportunity for the introduction of various types of robots. Countries such as China, Japan, and Australia have made significant strides in the development of automated tractors capable of performing various tasks on the farm. The use of drones in domestic farms has demonstrated an increase of approximately 30% in pesticide consumption efficiency. A national type of drone developed within the country has significant advantages over its foreign counterparts in terms of electronic engines, operational types and services, cameras and sensors, flight types, and monitoring functions. It is anticipated that the mentioned technologies, as part of smart agriculture, will significantly reduce the human labor intensity in farms to a much lower level than before.

Key words: Precision agriculture, Agricultural robots, Drones, Input distribution, Adaptive ecosystem.

1. Corresponding author, Email: mohtaseb@ut.ac.ir
2. Professor of University of Mohaghegh Ardabili (Invited Member of I.R. Academy of Sciences) and Professor of University of Tehran (Associate Member of I.R. Academy of Sciences), respectively.

مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۹ شماره ۱ صفحه‌های ۷۷ تا ۹۰ (۱۴۰۳)

اهمیت پروبیوتیک‌های گیاهی در کشاورزی پایدار: چالش‌ها و راهکارها[1]

ساره هاشمی[2] و مسعود احمدزاده[3]

چکیده

برای حرکت بسوی کشاورزی مولد و سالم باید افزون بر تولید خوراک سالم، همزمان از یکپارچگی محیط‌زیست برای نسل‌های آینده محافظت شود. برخی از میکروارگانیسم‌ها در خاک با سازوکارهایی مانند جذب و افزایش حلالیت مواد معدنی، کنترل زیستی بیمارگرهای گیاهی و حفاظت از تنش‌های نازیوا، موجب افزایش رشد گیاه می‌شوند. آن‌ها همچنین موجب بهبود کیفیت مواد گیاهی می‌شوند. این میکروارگانیسم‌ها که به نام پروبیوتیک گیاهی شناخته می‌شوند، می‌توانند به عنوان حاصلخیزکنندهای زیستی در تولید محصول‌های گیاهی به کار روند. پروبیوتیک‌های گیاهی با هر سیستم کشاورزی از جمله سیستم ارگانیک سازگار هستند و در حفاظت از محیط‌زیست، کاهش نیاز به مصرف سم‌های شیمیایی، حفظ و اصلاح ساختار خاک و تولید غذای مورد نیاز برای جمعیت رو به افزایش جهان نقش ویژه‌ای دارند. آگاهی و درک بهتر از عملکردهای پروبیوتیک‌های گیاهی به پذیرش سریع سودمندی‌ها و کاربرد این میکروارگانیسم‌ها انجامیده و قابلیتی برای چیرگی بر دشواری‌های پذیرش این فرآیند مدیریتی ایجاد می‌دهند. برخی از راهکارها برای سرعت بخشیدن به پذیرش این موضوع عبارتند از افزایش آموزش و آگاهی کشاورزان و بهره‌وران کشاورزی در زمینه نمونه‌های کاربردی موفق؛ نشان‌دادن سودمندی‌های مادی و محیط‌زیستی کنترل زیستی نسبت به کنترل شیمیایی و همچنین، سیاست‌ها و تشویق کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی از راه حمایت‌های دولتی و خصوصی. در مقاله حاضر، افزون بر پرداختن به اهمیت پروبیوتیک‌های گیاهی و کاربرد آن‌ها برای رسیدن به سیستم کشاورزی سازگار با محیط‌زیست و پایدار، به چالش‌های پیش رو در زمینه کاربرد این شیوه مدیریتی و راهکارهای رفع این چالش‌ها نیز پرداخته شده است.

کلیدواژه: باکتری‌های پروبیوتیک، خوراک سالم، محیط‌زیست، کنترل زیستی.

مقدمه

کشاورزی بخش اقتصادی مهم در بسیاری از کشورها است. با توجه به گزارش سازمان خواربار و کشاورزی جهانی، ۳۷٪ از مساحت سطح زمین به کشاورزی اختصاص دارد (FAO, 2020). در سیستم‌های کشاورزی سنتی از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها برای افزایش محصول و تولید استفاده می‌شود که این استفاده بر تعادل بوم‌شناختی و ایمن مواد غذایی تأثیر می‌گذارد و اصلی‌ترین عامل ایجاد آلودگی خاک و آب است. در سال‌های اخیر کشاورزی ارگانیک، توجه جامعه جهانی را به خود جلب کرده است. سلامت خاک، محیط زیست و تعامل بین گیاهان و میکروب‌ها بخشی جدایی‌ناپذیر از کشاورزی

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰

۲- نویسنده مسئول، پست الکترونیک: hashemi.sa@ut.ac.ir

۳- به ترتیب، دانشجوی دکتری و استاد دانشگاه تهران، تهران.

ارگانیک هستند. بنابراین، اقدام‌ها و پیشرفت‌های کشاورزی بر پایه استفاده از میکروارگانیسم‌های سازگار با محیط زیست و گیاهان، می‌تواند سلامت گیاه و حاصلخیزی خاک را ارتقا دهد. در واقع، این رویکرد می‌تواند تولید غذا را تضمین نماید و سود و سلامت جهانی را تضمین کند. کشاورزی همراه با میکروب‌های مرتبط با گیاه (پروبیوتیک‌های گیاهی) و کاربرد آن‌ها برای به کمینه رساندن بیماری‌ها و آفت‌ها با افزایش حاصلخیزی خاک، فراهم کردن مواد غذایی کافی برای گیاهان و افزایش تولید و کیفیت مواد غذایی مرتبط است. در این مقاله به کاربرد، سودمندی‌ها و دشواری‌ها استفاده از پروبیوتیک‌های گیاهی در سیستم کشاورزی پرداخته شده و راهکارهایی جهت رفع این دشواری‌ها پیشنهاد می‌شود.

پروبیوتیک‌های گیاهی چه هستند؟

مفهوم پروبیوتیک برای اولین بار توسط Elie Metchnikoff در نخستین سال‌های قرن بیستم، برای برخی از باکتری‌های مفیدی که می‌توانند روده انسان را اشغال نمایند، به کار برده شد. امروزه واژه پروبیوتیک هنوز برای جمعیت میکروبی[1] روده به کار برده می‌شود، با این وجود در گزارش سازمان خواربار جهانی و سازمان بهداشت جهانی[2] آمده است که پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که وقتی به مقدار مناسب تجویز شوند، برای سلامتی میزبان مفید هستند. بنابراین، این تعریف برای میکروارگانیسم‌هایی که عامل بهبود رشد گیاه یا محافظت در برابر عامل‌های بیمارگر هستند نیز قابل استفاده است (Hill *et al*., 2014). این میکروارگانیسم‌ها شامل تأمین‌کنندگان موادمغذی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، قارچ‌ها یا باکتری‌های القاکننده مقاومت سیستمیک و آن‌هایی که به طور مستقیم از گیاهان در برابر عامل‌های بیمارگر محافظت می‌کنند، می‌باشند.

کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی در سیستم‌های کشاورزی

الف) نقش پروبیوتیک‌های گیاهی در افزایش رشد گیاهان

چهل سال پیش، اصطلاح ریزوباکتری‌های فرازنده رشد گیاه[3]، برای طبقه‌بندی میکروارگانیسم‌هایی که موجب بهبود رشد گیاه می‌شوند، پیشنهاد شد (Kloepper & Schroth, 1980). این میکروارگانیسم‌ها با سازوکارهای مختلف، وضعیت تغذیه و سلامت خاک و گیاه را بهبود می‌بخشند میکروارگانیسم‌های ریشه‌گاه[4] و درون رستی[5] هر دو می‌توانند به عنوان محرک رشد گیاه عمل نمایند. میکروارگانیسم‌های خارج یاخته‌ای[6] در ریشه‌گاه، محیط اطراف ریشه[7] و در فضاهای بین یاخته‌های ریشه مستقر هستند و میکروارگانیسم‌های درون یاخته‌ای[8]، درون یاخته‌های ریشه و در ساختارهای گره مانند تخصصی، وجود دارند (Walker *et al*., 2020). در ادامه به تفصیل به برخی از سازوکارهای پایه‌ای اعمال شده توسط پروبیوتیک‌های گیاهی به منظور کمک به افزایش رشد گیاهان اشاره شده است.

کمک به افزایش جذب عناصر موردنیاز توسط گیاه

برخی از پروکاریوت‌ها توانایی تبدیل نیتروژن جو به شکل‌های آلی را دارند که می‌توانند توسط گیاهان جذب شوند. ۶۵٪ از نیتروژن مورد نیاز در کشاورزی توسط آنزیم نیتروژناز باکتری‌های هم‌زیست با گیاه از تثبیت نیتروژن جو تأمین می‌شود (Tejera *et al*., 2005). مایه‌زنی حبوبات با باکتری‌های ریزوبیوم[9]، اولین نمونه از فراورده‌های میکروبی تجاری‌شده در کشاورزی برای تثبیت نیتروژن بودند. از ابتدای قرن بیست و یکم، استفاده از باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن به صورت

1. Microbiota 2. World Health Organization (WHO) 3. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR)
4. Rhizosphere 5. Endophyte 6. Extracellular plant growth promoting microorganisms (ePGPM)
7. Rhizoplane 8. Intracellular plant growth promoting microorganisms (iPGPM) 9. Rhizobium

تجاری افزایش یافت (Vessey, 2003). برخی باکتری‌ها با افزایش رشد ریشه گیاهان، می‌توانند کارایی مصرف نیتروژن را افزایش دهند بدین صورتکه به گیاهان اجازه می‌دهند به قسمت‌های بیشتری از خاک دسترسی داشته باشند (Beattie, 2015) و نیتروژن را به راحتی جذب نمایند. فسفر محدودترین ماده غذایی برای گیاهان زراعی پس از نیتروژن است. با وجود این واقعیت که مقدار فسفر در خاک به طور کلی بسیار زیاد (بین ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) است، بیشتر این فسفر نامحلول است و برای رشد در دسترس گیاه نیست. فسفر نامحلول به صورت معدنی مانند آپاتیت یا بصورت یکی از شکل‌های آلی از جمله اینوزیتول فسفات[1] (فیتات[2] خاک)، فسفومونواسترها[3] و فسفوتری استرها[4] وجود دارد (Khan *et al*., 2022). افزون بر این، بسیاری از کودهای شیمیایی دارای ترکیب‌های فسفر معدنی محلول مدت کوتاهی پس از استفاده، بی‌حرکت شده و برای گیاهان غیرقابل دسترس می‌شوند. بنابراین، میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر[5] می‌توانند به گیاهان کمک کنند تا فسفر را از شکل‌های غیرقابل جذب، به فسفر قابل دسترس گیاه تبدیل نمایند. فسفر معدنی پیوندشده با کلسیم، آهن یا آلومینیوم می‌تواند توسط اسیدهای آلی یا یون‌های هیدروژن (H^+) تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر، حل شود. همچنین، فیتاز[6] تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر می‌تواند فسفر فعال را از ترکیب‌های آلی آزاد کند. *Bacillus megaterium* با نام تجاری بایوفس[7] توسط شرکت بایوپاورلانکا[8] واقع در کشور سری‌لانکا تجاری شده است و می‌تواند نیاز به کود فسفاته در محصول‌های زراعی را تا ۷۵٪ کاهش دهد (Mehnaz, 2016). بنابراین با کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی به طور موثری می‌توان نیازغذایی گیاهان به فسفر را تامین نمود. پتاسیم از دیگر عناصر غذایی بسیار مهم برای رشد گیاهان است. جنس‌های متنوعی از باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم[9] وجود دارند. در میان *Firmicutes*، نمونه‌های زیادی از باکتری‌های حل کننده پتاسیم وجود دارند. برخی از گونه‌های جنس‌های *Bacillus* و *Pseudomonas* نیز از KSB هستند (Sheng & He, 2006). افزون بر عناصر یاد شده، کمبود عناصر ریزمغذی مانند آهن و روی نیز از عامل‌های محدودکننده رشد گیاه هستند. هم میکروارگانیسم‌ها و هم گیاهان به مقدار زیادی از آهن نیاز دارند و به دست آوردن آهن کافی از محیط اطراف ریشه که گیاه، باکتری و قارچ برای آهن با هم رقابت می‌کنند، مشکل سازتر است. بسیاری از سویه‌های باکتریایی، آهن را از راه تولید اسیدهای آلی یا سیدروفورها[10] در دسترس گیاه قرار می‌دهند (Ahmed & Holmstrom, 2014). سیدروفورها ترکیباتی با جرم مولکولی کم (به تقریب ۱۵۰۰- ۴۰۰ دالتون) هستند که میل ترکیبی بسیار زیادی با یون آهن (Fe^{+3}) دارند. ترکیب حاصل از اتصال آهن به سیدروفور توسط گیرنده‌های غشایی یاخته دریافت و آهن جذب می‌شود (Hider & Kong, 2010). اثر سودمند و مستقیم سیدروفورهای باکتریایی بر رشد گیاهان در مطالعه‌های مختلف به خوبی اثبات شده‌است. علاوه بر این سیدروفورها می‌توانند با محروم کردن میکروب‌های بیمارگر از آهن آن‌ها را کنترل نمایند (Mehnaz, 2016). بررسی‌ها همچنین نشان دادند که سازوکارهایی که به حلالیت عنصر روی انجامیده و جذب آن را توسط گیاه بالا می‌برند، شبیه به سازوکارهای میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر و جذب آهن بوده و با تولید عامل‌های کلاته‌کننده، سیدروفورها و اسیدهای آلی ایجاد می‌شود (Shakeel *et al*., 2015). در جدول ۱ اسامی و نحوه اثر برخی از پروبیوتیک‌های گیاهی در افزایش رشد گیاهان آورده شده است.

حفظ تعادل هورمونی در گیاه

یکی دیگر از سازوکارهای تحریک مستقیم رشد گیاه توسط میکروارگانیسم‌ها، اثر این عامل‌های بر تعادل هورمون‌های گیاهی است (Dobbelaere *et al*., 2003). فعال‌ترین اکسین از نظر فیزیولوژیک در گیاهان ایندول- ۳- استیک اسید[11]

1. Inositol phosphate 2. Phytate 3. Phosphomonoesters 4. Phosphotriesters
5. Phosphorus solubilizing microorganisms (PSMs) 6. Phytase 7. BioPhos 8. BioPower Lanka
9. Potassium solubilizing bacteria (KSB) 10. Siderophore 11. Indole -3 -Acetic Acid (IAA)

است که موجب تحریک پاسخ‌های سریع (مانند افزایش طول یاخته) و پاسخ‌های بلندمدت (مانند تقسیم و تمایز یاخته‌ای) در گیاهان می‌شود. به صورت تخمینی، ۸۰٪ باکتری‌های ریشه‌گاه می‌توانند IAA تولید کنند (Spaepen *et al*., 2007). افزون بر IAA، باکتری‌هایی مانند *Paenibacillus polymyxa* و *Azospirillum* ترکیب‌های دیگری مانند ایندول- ۳- بوتیریک اسید[1]و تریپتوفول[2] (ایندول- ۳- اتانول[3]) را تولید می‌کنند که می‌توانند به طور غیرمستقیم رشد گیاه را بهبود بخشند (El-Khawas & Adachi, 1999). پروبیوتیک‌های گیاهی می‌توانند بر بیان ژن‌های گیاهی که مسئول ساخت، انتقال یا پیام‌رسانی اکسین هستند، نیز تأثیر بگذارند، همچنین غلظت اکسین گیاهان میزبان را نه تنها با ساخت آن، بلکه با تجزیه آن تغییر دهند. برای نمونه، *Pseudomonas putida* 1290 می‌تواند از IAA به عنوان یک بستر غذایی استفاده کند و یا باکتری *B. phytofirmans* PsJN می‌تواند IAA را تخریب کند (Zuniga *et al*., 2013). تعادل اکسین و سایتوکینین عملکرد مریستم‌ها، معماری سیستم ریشه، تشکیل اندام‌های جانبی ساقه و رشد اندام‌های زاینده را تعیین می‌کند. سایتوکینین‌ها همچنین زیست‌ساخت کلروفیل و کلروپلاست را تنظیم می‌کنند و در ایجاد مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و نازیوا نیز موثرند (Cortleven & Schmulling, 2015). گیاهان و میکروارگانیسم‌های مرتبط با گیاهان دارای بیش از ۳۰ ترکیب محرک رشد از گروه سایتوکینین هستند. مشخص شده است که ۹۰٪ از میکروارگانیسم‌های موجود در ریشه‌گاه، سایتوکینین‌ها را در شرایط کشت آزمایشگاهی تولید می‌کنند. بر پایه بررسی‌های انجام شده بسیاری از پروبیوتیک‌های گیاهی می‌توانند سایتوکینین را تولید کنند و سازوکارهای مختلفی را برای تغییر غلظت سایتوکینین در گیاهان به کار می‌گیرند (Tahir *et al*., 2017). پروبیوتیک‌های گیاهی با تولید این هورمون می‌توانند رشد شاخه‌های گیاه میزبان و تشکیل میوه را تحریک کنند (Ortiz-Castro *et al*., 2008). اتیلن به عنوان هورمونی موثر در رسیدن میوه شناخته می‌شود و در تحریک و تشکیل ریشه‌های مویین، تحریک جوانه‌زنی و شکستن خفتگی بذر موثر است. با این حال، اگر غلظت اتیلن زیاد باشد، تندش، افزایش طول ریشه و همچنین تثبیت نیتروژن توسط باکتری‌های هم‌زیست در گیاهان مهار می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بسیاری از باکتری‌های محرک رشد می‌توانند رشد گیاه را با کاهش مقدار اتیلن افزایش دهند، این ویژگی به فعالیت آنزیم ۱- آمینو سیکلوپروپان -۱- کربوکسیلیک اسید (ACC) دآمیناز[4] نسبت داده می‌شود که ۱ - آمینو سیکلوپروپان -۱- کربوکسیلیک اسید که پیش‌ساز اتیلن در گیاهان است را به آمونیاک و آلفا- کتوبوتیرات[5] تبدیل می‌کند و این ترکیبات توسط باکتری به عنوان منبع نیتروژن و کربن برای رشد مصرف می‌شوند. به این ترتیب، باکتری مقدار اتیلن را در گیاهان کاهش می‌دهد و از برخی از پیامدهای منفی حاصل از غلظت زیاد اتیلن جلوگیری می‌کند (Saleem *et al.* 2007). به طور خلاصه، برای کاربرد موثر پروبیوتیک‌های گیاهی در کشاورزی، درک سازوکارهای مولکولی که از راه آن سویه بر مقدار هورمون‌های گیاهی در شرایط مختلف تأثیر می‌گذارد، ضروری است.

افزایش مقاومت گیاه به بیمارگرها

کارهای تحریک غیر مستقیم رشد گیاه توسط پروبیوتیک‌های گیاهی، با تأثیر بر مقامت گیاه به بیمارگرها مرتبط است. پروبیوتیک‌های گیاهی از راه افزایش بیان ژن‌های مرتبط با بیمارگری[6]، تحریک تولید مواد دفاعی مانند فنیل آلانین آمونیالیاز، پلی فنول اکسیداز، پراکسیداز، ۱و۳- گلوکاناز و کیتیناز و همچنین انباشت گونه‌های اکسیژن فعال[7] موجب ایجاد مقاومت زودهنگام در گیاه می‌شوند (Guo *et al*., 2015). اثبات شده است که پروبیوتیک‌های گیاهی توانایی ایجاد مقاومت انگیزشی سیستمیک[8] را در گیاهان دارند (Yu *et al*., 2022). بسیاری از مواد شیمیایی ضد میکروبی ساخته شده توسط پروبیوتیک‌های

1. Indole-3-Butyric Acid 2. Tryptophol 3. Indole-3-ethanol
4. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase 5. α-ketobutyrate
6. Pathogenesis-related genes 7. Reactive Oxygen Species (ROS) 8. Induced systemic resistance (ISR)

گیاهی از جمله فنازین‌ها، سیدروفورهای شبه پایووردین[1]، ۲ و۴- دی استیل فلوروگلوسینول[2]، پیرولنیترین[3]، آسیل هموسرین لاکتون‌ها[4]، کونینجیک اسید[5] و ترکیب‌های فرار مانند ۱- اوکتن-۳-ال[6] و ۶- پنتیل- آلفا- پرون[7] نیز می‌توانند موجب ایجاد مقاومت سیستمیک در گیاهان شوند(Djonovic *et al*., 2007). اینکه حضور و استقرار پروبیوتیک‌های گیاهی در ریشه چگونه منجر به ایجاد مقاومت به بیمارگرها در بافت‌های هوایی می‌گردد، به طور کامل شناخته نشده است. نوسان‌های موادی مانند بوتاندیول، با حرکت مؤثر در گیاه، همانطور که برای آسیل هموسرین لاکتون نشان داده شده است، می‌تواند در ماهیت پاسخ‌های سیستمیک موثر باشد (Harman *et al*., 2019). برخی از پروبیوتیک‌های گیاهی مواد آنتی‌بیوتیکی را می‌سازند که از رشد برخی از بیمارگرهای گیاهی جلوگیری می‌کند (Botelho & Mendonça-Hagler, 2006). آنتی‌بیوتیک‌ها به روشنی با سرکوب بیماری مرتبط هستند. با این حال، در بیشتر موردها سازوکارهای دیگری نیز ممکن است موثر باشند. آنزیم‌های تخریب کننده دیواره یاخته‌های میکروبی (سلولازها، کیتینازها و بتا-گلوکانازها) از جمله دیگر سازوکارهایی هستند که در کنترل زیستی بیمارگرها، به ویژه قارچها نقش دارند، زیرا سلولز، کیتین و بتا- گلوکان از اجزای اصلی دیواره یاخته‌ای قارچها هستند. باکتری‌های تولید کننده آنزیم‌های تخریب کننده دیواره یاخته‌ای، در صورت تولید آنتی‌بیوتیک‌های مختلف، قدرت و سرعت بیشتری در مهار بیمارگرها خواهند داشت. شمار زیادی از ژن‌ها، آنزیم‌ها و متابولیت‌ها در این برهمکنش دخالت دارند (Harman *et al*., 2021).

چالش‌ها و راهبردها

کنترل زیستی، نخستین بار در سال ۱۸۸۴، جهت کنترل بندپایان مورد استفاده قرار گرفت. با این وجود، شکل جدید کاربرد کنترل زیستی در پایان قرن نوزدهم معرفی شد (Lenteren & Cock, 2020). کنترل زیستی از چهار نوع مختلف حفاظتی، طبیعی، سنتی و کنترل‌های تقویتی تشکیل شده است. این روش به طور گسترده‌ای مطلوب و دوستدار محیط زیست است و جایگزین امیدوارکننده‌ای برای کاهش استفاده از آفت‌کش‌های مصنوعی برای مدیریت آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، این راهکار با چالش‌های زیادی روبه‌رو است که در ادامه به شماری از این چالش‌ها اشاره می‌گردد.

تأثیر محیط بر فعالیت کنترل زیستی

با وجود چندین دهه پژوهش، کاربرد کنترل زیستی در مدیریت سلامت گیاه با وجود تقاضا برای جایگزین‌های کنترل شیمیایی، رشد زیادی نداشته است. در شرایط آزمایشگاهی اثر کاربرد عامل‌های زیستی به طور چشمگیری بهتر از آزمایش‌های میدانی است. در مقایسه با مواد شیمیایی، حرکت از شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی به شرایط طبیعی، برای آفت‌کش‌های زیستی دشوارتر است. در حالی که کارایی میدانی عامل‌های کنترل زیستی می‌تواند با آفت‌کش‌های شیمیایی همخوانی داشته باشد یا از آن فراتر رود، این می‌تواند در طول زمان و از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت باشد. نوع عامل میکروبی، بیمارگر، میزبان، محیط و برهم‌کنش‌های پیچیده مانند جهش، تغییر ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی همگی بر اثربخشی پروبیوتیک‌های گیاهی موثر هستند. تغییر آنتاگونیست می‌تواند در پاسخ به تغییرهای شرایط محیطی، جمعیت و حضور بیمارگرها در سیستم زیستی اتفاق بیوفتد (Alfiky & Weisskopf, 2021). برای نمونه، بسیاری از *Pseudomonas*های پروبیوتیک گیاهی در آزمایش‌ها عملکرد خوبی از خود نشان دادند، اما کاربرد آن‌ها، کنترل کارآمد بیماری در شرایط کشتزار را به دنبال نداشته است.

1. Pyoverdine 2. 2,4- Diacetylphloroglucinol 3. Pyrrolnitrin 4. Acyl homoserine lactone (AHSLs)
5. Koningic acid 6. 1-Octen-3-ol 7. 6-pentyl-alpha-pyrone

جدول ۱- نحوه اثر برخی از پروبیوتیک‌های گیاهی در افزایش رشد گیاهان.

سازوکار پایه‌ای	نام عامل پروبیوتیک گیاهی	نوع محصول	نتیجه اثرگذاری عامل پروبیوتیک	منبع
تثبیت نیتروژن	*Azospirillum*	غلات، برخی از حبوبات، نیشکر	افزایش عملکرد محصول	Tejera *et al*., 2005
	Azotobacter	غلات، دانه‌های روغنی، چغندر، توتون، چای، قهوه		Elbeltagy *et al*., 2001
	Bacillus, Pseudomonas	برنج		Habibi *et al*., 2014
	Paenibacillus	برنج، کلزا		Puri *et al*., 2016
حلالیت فسفات	*Flavobacterium*	توت فرنگی	بهبود و افزایش عملکرد محصول	Garcia-Fraile *et al*., 2012
	Burkholderia	نخل هندی[1]، برنج		Liu *et al*., 2014; Estrada *et al*., 2013
	Streptomyces	گندم		Jog *et al*., 2014
	Bacillus	محصولات زراعی		Mehnaz, 2016
حلالیت پتاسیم	*Bacillus edaphicus*	گندم	بهبود و افزایش عملکرد	Sheng & He, 2006
	Paenibacillus	فلفل سیاه	افزایش وزن خشک	Sangeeth *et al*., 2012
	Bacillus mucilaginosus	سورگوم[2]، گندم، ذرت	افزایش زیست‌توده و محتوای کلروفیل	Meena et al., 2014
	Bacillus mucilaginosus, Bacillus megaterium	بادمجان، فلفل، خیار	افزایش رشد	Bargaz *et al*., 2021
	Pseudomonas, Microbacterium	توتون، چای	افزایش رشد	Zhang & Kong, 2014
جذب ریزمغذی‌های ضروری (آهن، روی) با تولید سیدروفور	*Pseudomonas*	ماش	افزایش رشد	Sharma & Johri 2003
	Bacillus	ذرت، فلفل، برنج	افزایش سطح کلروفیل	Beneduzi *et al*., 2012
	Phyllobacterium	توت فرنگی	افزایش عملکرد و کیفیت میوه	Flores-Felix *et al*., 2015
	Streptomyces	کاکائو	افزایش رشد و مقاومت گیاه	Boudjeko *et al*., 2017
زیست‌ساخت و حفظ تعادل فیتوهورمون (اکسین، جیبرلین، سیتوکینین، اتیلن و زیست ساخت آمیناز)- د ACC	*Paenibacillus*	برنج، جو، گندم	تولید اکسین، بهبود رشد	Menendez & Garcia-Fraile, 2017
	Rhizobium	فلفل، گوجه‌فرنگی، توت‌فرنگی	تولید اکسین و جیبرلین، بهبود رشد	Menendez & Garcia-Fraile, 2017
	Bacillus	آرابیدوبسیس	تولید سایتوکینین، بهبود رشد	Ortiz-Castro *et al*. 2008
	Azotobacter chroococcum	خیار	تولید سایتوکینین، افزایش رشد	Joo *et al*., 2005
	Variovorax paradoxus	آرابیدوبسیس	- دآمیناز، افزایش رشد، ACC فعالیت کاهش تولید اتیـلن گیـاهی در برگ‌ها	Chen *et al*., 2013
	Pseudomonas fluorescens	کلزا	تولید اکسین و سایتوکینین، افزایش زاتین ریبوزید[3] و ایزوپنتنیل آدنوزین[4] در ریشه‌گاه و افزایش طول ریشه	Pallai *et al*., 2012
افزایش مقاومت گیاه به بیمارگرها	*Stenotrophomonas maltophilia*	گندم	افزایش رشد، ایجاد مقاومت اکتسابی سیستمیک در مقابل قارچ عامل پوسیدگی فوزاریومی ریشه (*Fusarium pseudograminearum*)	Liu *et al*., 2021
	Klebsiella, Bacillus, Acinetobacter, Paenibacillus	گندم	تولید آنتی‌بیوتیک و ایجاد مقاومت به قارچ عامل پاخوره گندم (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*)	Botelho & Mendonça-Hagler, 2006
	Bacillus	یونجه، سویا	تولید آنتی‌بیوتیک و ایجاد مقاومت به بیمارگرهای بذری	Silo-Suh *et al*., 2023
	Trichoderma virens	نخود فرنگی	ایجاد تولید آنتی‌بیوتیک گلیوتوکسین[5] سمیت برای زئوسپور بیمارگرهای *Phytophthora* و *Aphanomyces*	Harman *et al*., 2021
	Actinobacte	خیار	تولید آنزیم سلولاز، کنترل زیستی قارچ عامل بیماری میرایی خیار (*Pythium aphanidermatum*)	Sadeghi *et al*., 2017

1. *Areca catechu* 2. *Sorghum vulgare sudanense* 3. Zeatin riboside 4 . Isopentenyl adenosine 5. Gliotoxin

ادامه جدول ۱:

	Micromonospora, Actinobacter	گوجه‌فرنگی	تحریک مقاومت سیستمیک در مقابل قارچ *Botrytis cinerea*، تولید آنزیم‌های هیدرولیتیک	Sadeghi *et al*., 2017
	pseudomonads	توتون	تحریک مقاومت گیاه به باکتری عامل بافت مردگی (*Pseudomonas syringae* pv. *tabaci*) با ترشح ۴- آمینو کربنیل فنیل استات[1]	Kim & J. Anderson, 2018
کمک به رشد گیاه در شرایط نامساعد	*Pseudomonas, Bacillus*	خردل هندی[2]	تولید سیدروفور، ACC- دآمیناز و هورمون‌های گیاهی، بهبود رشد گیاه در خاک‌های آلوده به نیکل	Rajkumar & Freitas, 2008
	Streptomyces acidiscabies	لوبیا چشم بلبلی	تولید سیدروفور و جذب نیکل، کمک به رشد گیاه در خاک‌های آلوده به نیکل	Dimkpa *et al*., 2008
	Pseudomonas, Azospirillum, Rhizobium	یونجه	حفاظت بذرهای یونجه در خاک‌های آلوده به مس	Carrillo- Castaneda *et al*., 2002

سویه‌های آنتاگونیست *Candida oleophila*، تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیمی بین کاربردهای آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان می‌دهند (Mark *et al*., 2006). با وجود این واقعیت که عامل‌های کنترل زیستی از نظر ژنتیکی بایستی پایدار باشند، استفاده از آن‌ها به دلیل تغییرهای اقلیمی مداوم چندان موفقیت‌آمیز نبوده است. در نتیجه، گزینش عامل‌های زیستی برای تأثیرگذاری موثر در موقعیت‌های مختلف محیطی (بافت خاک، دما، رطوبت، تابش و مانند این‌ها) و درک شیوه برهمکنش عامل پروبیوتیک با گیاهان، سایر میکروارگانیسم‌ها، الگوی فضایی توزیع عامل‌های کنترل زیستی در ریشه‌گاه و محیط کاربردی مورد نظر، برای توسعه و پیاده‌سازی راهکارهای حفاظتی بر پایه کنترل زیستی ضروری است (Alfiky & Weisskopf, 2021). پژوهش‌های زیست‌شناسی خاک باید ویژگی‌های مهم موجودهای مختلف را به ویژه در ریشه‌گاه گیاهی با شناخت سهم نسبی آن‌ها در فرآیند کنترل زیستی شناسایی نماید. افزون بر این، بررسی‌های زیست محیطی باید تمام عنصرهای زیوا و نازیوا را که بر عامل‌های پروبیوتیک تأثیر می‌گذارند، در نظر بگیرد. در نتیجه، برای کنترل زیستی موثر، سویه‌های بومی از میکروارگانیسم‌های مفید باید جمع‌آوری شوند و برای دستیابی به نتایج کنترل زیستی مربوطه غربالگری شوند (Nicot *et al*., 2012). زمانی که یک رابطه بهینه حاکم باشد، عامل کنترل زیستی موثرتر خواهد بود.

اثر گیاه بر فعالیت کنترل زیستی

کنترل زیستی می‌تواند به شدت زیر تأثیر گونه‌ها و نژادگان‌های[3] گیاهی قرار گیرد. Umer *et al*. (2021)، به طور گسترده‌ای اثر گیاه را بر فعالیت کنترل زیستی بررسی کردند. گیاه یک تاثیر دوگانه در کنترل زیستی دارد. به این صورت که گیاهان می‌توانند بر مقدار استعمار ریشه‌گاه و تولید آنتی‌بیوتیک توسط پروبیوتیک‌های گیاهی تاثیر بگذارند. همچنین، حساسیت یا مقاومت گیاه به بیمارگر می‌تواند در اثربخشی کنترل زیستی تأثیر بگذارد. میزبان‌های حساس نسبت به میزبان‌های مقاوم به عامل کنترل زیستی قوی‌تر و سرکوب بیشتر بیمارگر نیاز دارند. گیاه به عنوان محل عمل برای بیمارگرها و آنتاگونیست‌ها عمل می‌کند، جایی که آن‌ها برهم‌کنش دارند و این برهم‌کنش‌ها زیر تأثیر ترشح‌های خارجی میزبان، یون و جذب آب، تبادل گازی و دمای سطح قرار دارند. هنگامی‌که ژن‌های گیاهی بیان می‌شوند، بر جامعه میکروبی روی سطح گیاه و فضای پیرامون آن تأثیر می‌گذارند (Timper, 2014).

1. 4- Aminocarbonyl phenyl acetate
2. *Brassica juncea*
3. Genotypes

مدت ماندگاری

از آن‌جایی که عامل‌های کنترل زیستی ماندگاری محدودی دارند، بقای آن‌ها باید مدیریت شود. برای نمونه، *Trichoderma viride* برای ۴ ماه زنده است، در حالی که *Pseudomonas fluorescens* تنها می‌تواند به مدت ۳ ماه زنده بماند. از سویی، تکامل بیمارگرهای هدف با پایداری عامل‌های کنترل زیستی همبستگی منفی دارد. بیمارگرهای هدف عامل‌های کنترل زیستی با گوناگونی ژنتیکی بالاتر، اندازه جمعیت موثر بزرگ و توانایی پراکندگی طولانی انتظار می‌رود با سرعت بیشتری در برابر این عامل‌ها مقاوم گردند (Zhan & Mcdonald, 2013). افزون بر این، تخمین ویژگی سن و مرحله رشدی بیمارگرهای هدف، زمان کاربرد عامل‌های کنترل زیستی را دشوار می‌کند. برای کنترل زیستی موفق، استفاده از آنتاگونیست در زمان مناسب بسیار مهم است. وقتی که آنتاگونیست پیش از استقرار بیمارگر اعمال می‌شود، هدف‌های کنترل زیستی عملی می‌گردد. افزون بر این، برای دستیابی به کنترل بهینه بیماری، شناسایی پتانسیل خطرها برای انسان یا محیط زیست و همچنین خطرهای افزایش مقاومت در برابر عامل‌های کنترل زیستی و درک شیوه عمل عامل‌های پروبیوتیک ضروری است. استفاده تجاری پیوسته از یک عامل میکروبی ممکن است بروز جمعیت‌های بیمارگر جدید و گاهی ایجاد آلودگی قوی‌تر شود که این موضوع به کاهش یا از بین رفتن کنترل زیستی بیانجامد (Prajapati *et al.*, 2020). از سوی دیگر، وجود روش‌های مناسب برای تولید در مقیاس بزرگ، فناوری مناسب برای افزایش ماندگاری محصول، حفظ چگالی اسپور و دستیابی به راندمان بهینه اسپورزایی، از جمله عوامل موثر در کاربرد گسترده پروبیوتیک‌های گیاهی هستند به طوریکه عدم توجه به یک فرمولاسیون مناسب برای تولید محصول سبب می‌شود که جمعیت یاخته‌های زنده و فعال پروبیوتیک‌های گیاهی آن قدر کاهش یابند که با وارد شدن به خاک، بی‌اثر شوند و هدف مورد نظر برآورده نگردد. برای حفظ جمعیت عامل پروبیوتیک، استفاده از مواد حامل مناسب ضروری است که ویژگی‌های کلیدی آن‌ها داشتن ظرفیت نگهداری آب، هوادهی خوب و نگهداری شایسته از رشد میکروبی و ماندگاری است. افزون بر این، حامل باید ارزان، راحت و همچنین قابل آمیختن و بسته‌بندی بوده و به صورت پودر یا گرانول در دسترس باشد (O'Callaghan *et al.*, 2022).

اثر بیمارگر بر فعالیت کنترل زیستی

رفتار بیمارگر یکی از مهم‌ترین عامل‌هایی است که در هنگام گزینش پروبیوتیک‌های گیاهی باید در نظر گرفته شود. هر بیمارگر یک ویژگی منحصر به فرد دارد. بنابراین، به دلیل گوناگونی ژنتیکی و بوم‌شناختی عامل‌های کنترل زیستی باید کنش رفتاری آن‌ها با میزبان موردتوجه قرار گیرد. تداوم اثربخشی کنترل زیستی به دو عامل بستگی دارد: **۱**- فشار گزینشی که روی جمعیت‌های بیمارگر گیاهی اعمال می‌شود و **۲**- توانایی بیمارگر برای سازگاری با شرایط نامطلوب، به طوری که برخی از بیمارگرها می‌توانند خود را با فشار انتخابی اعمال‌شده توسط عامل‌های کنترلی در شمار نسل‌های کمتری سازگار سازند و بنابراین از بین رفتن و یا کاهش اثربخشی کنترل زیستی می‌انجامد. از این رو فرض دوام بیشتر کنترل زیستی نسبت به کنترل شیمیایی ممکن است همیشه قابل توجیه نباشد. مقاومت چندین آفت به باکتری *Basillus thuringiensis* و همچنین بروز مقاومت کرم سیب[1] به ویروس گرانولوزیس کرم سیب[2] گزارش شده است. در مقابل مبارزه با آفت‌ها، تداوم مبارزه زیستی بیماری‌های گیاهی کمتر مورد توجه قرار گرفت و هیچ مقاله علمی که در عمل نشان‌دهنده از دست دادن اثربخشی عامل‌های کنترل زیستی علیه بیمارگرهای گیاهی باشد، هنوز ارائه نشده است.

1. *Cydia pomonella*
2. Cydia pomonella granulovirus

(Bardin *et al*., 2015). بنابراین برای موفقیت عامل کنترل زیستی بایستی رفتار و فیزیولوژی بیمارگر و نقطه ضعف در چرخه زندگی بیمارگر را بخوبی شناخت و از این نقطه ضعف به عنوان پنجره فرصت جهت کنترل و اختلال در چرخه بیماری استفاده کرد (Umer *et al*., 2021).

دیدگاه کشاورزان و شیوه‌های قانونی

جنبه دیگری که استفاده از کنترل زیستی را محدود می‌کند، شک و تردید در مورد اثر بخشی آن است. پذیرش کنترل زیستی توسط کشاورزان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، زیر تأثیر شرایط اقتصادی، فناوری و ملاحظه‌های عملی شامل اثربخشی، سود، در دسترس بودن و راحتی استفاده قرار دارد. تناوب زراعی، دوره‌های آیش، خاک‌ورزی، سم‌پاشی و مانند اینها همگی نمونه‌هایی از شیوه‌های مدیریتی مزرعه هستند که می‌توانند به طور مستقیم جمعیت موجودهای مفید را زیر تأثیر قرار دهند و منجر به عدم کارایی موثر عامل‌های زیستی، نارضایتی و دیدگاه منفی کشاورزان شوند. بنابراین، درک جامع از عامل‌های کنترل زیستی، بوم‌شناختی خاک و آگاهی از فنون و نحوه کاربرد تجاری پروبیوتیک‌ها می‌تواند کارایی و موفقیت این شیوه کنترلی را بهبود بخشد (Timper, 2014). بسیاری از کشاورزان به دلیل عدم آگاهی از روش‌های کنترل زیستی و ویژگی‌های فنی این روش از کاربرد این فناوری منصرف می‌شوند. در این مورد، آموزش و انجام تیمارهای میدانی برای تبادل اطلاعات بین کارشناسان و کاربران بسیار مهم است. از سوی دیگر، قانون‌های موجود و روش‌های ثبت فراورده‌های کنترل زیستی مناسب نیستند و موجب توسعه آهسته این فناوری شده‌است. به طور خلاصه مهم‌ترین دلیلی‌که برآورده نشدن قابلیت کامل بهره‌گیری از عامل‌های کنترل زیستی انجامیده است مربوط به، تمرکز بیشتر بر پژوهش‌های آزمایشگاهی و توسعه نیافتن فرمولاسیون‌های تجاری مناسب آن‌ها است. افزون بر این، به دلیل کمبود اطلاعات در مورد شیوه استفاده از آن‌چه به صورت تجاری تولید شده است، کشاورزان بطور موثر از این روش کنترلی استفاده نمی‌کنند. در نتیجه، آموزش فنون کنترل زیستی برای رایج کردن این نوع مدیریت ضروری است (Sundh & Goettel, 2013).

نتیجه‌گیری و چشم اندازهای آتی کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی

امروزه کشاورزی در سراسر جهان با چندین چالش مواجه است: **۱**- تولید غذای پایدار و کافی برای جمعیت انسانی در حال رشد؛ **۲**- محدودیت منابع (خاک حاصلخیز، آب و مانند این‌ها)؛ **۳**- مشکل‌های محیط‌زیستی ناشی از شیوه‌های سنتی کشاورزی فشرده و **۴**- برآورده ساختن تقاضای مصرف کنندگان برای تولید مواد غذایی با کیفیت و سالم.

باکتری‌های پروبیوتیک گیاهی سودمندی‌های فراوانی را برای گیاهان از راه‌های مختلف دارند. این سودمندی‌ها شامل تحریک رشد گیاه، فراهمی مواد غذایی و کنترل زیستی بیمارگرهای گیاهی است. افزون بر این، این گروه از باکتری‌های مفید ممکن است به کاهش تنش‌های ناشی از چندین عامل، مانند شوری یا انباشت فلزهای سنگین کمک کنند. بهبود و تقویت کیفیت تولیدات گیاهی از دیگر برتری‌های این عامل‌های زیستی است (Pretty *et al*., 2010). بنابراین، به نظر می‌رسد، باکتری‌های پروبیوتیک گیاهی بعنوان حاصلخیزکننده‌های زیستی فرموله‌شده با سویه‌های منفرد یا با گروهی از جدایه‌هایی که اثرهای مفید متفاوتی را نشان می‌دهند، می‌توانند راه‌حلی برای تامین غذای جهانی باشند و در عین‌حال محافظت از بوم‌نظام‌ها و بهبود کیفیت غذا را تضمین نمایند. در نتیجه، برقراری ارتباط بین دانشمندان، سیاستمداران و کشاورزان و همچنین وجود برنامه‌ها و سیاست‌های پژوهشی پی‌درپی برای توسعه فراورده‌های موثر و ایمن مبتنی بر پروبیوتیک‌های گیاهی که سودمندی‌هایی را نه تنها برای تولیدکنندگان، بلکه برای تمام جامعه‌های بشری دارند ضروری است. ارزیابی شده است که جایگزینی کودهای شیمیایی با مایه‌زنی‌های ریزوبیومی، هزینه سالانه استفاده از کودهای

نیتروژن را از ۳۰ میلیون دلار در سال به حدود ۱ میلیون دلار کاهش می‌دهد (Malusá & Vassilev, 2014). این موضوع می‌تواند گواه این باشد که شناخت و ورود بیشتر پروبیوتیک‌های گیاهی در سیستم‌های کشاورزی، به کاهش هزینه‌های تولید، قیمت مناسب‌تر محصول‌ها و گسترش بازارهای تولید محصول سالم و ارگانیک می‌انجامد و سلامت مصرف‌کنندگان و حفظ محیط زیست را به همراه خواهد داشت. این خود چشم‌اندازی از افزایش ظرفیت و آینده قابل توجه در رشد کودهای زیستی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، توسعه و بهبود کیفیت کودهای زیستی به طور قابل توجهی الزامی است. موفقیت تجاری‌سازی موثر پروبیوتیک‌های گیاهی تا حد زیادی به گزینش سویه‌های قوی فیزیولوژیکی، شیوه فرمولاسیون محصول مورد نظر، شرایط کاربرد، ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی، زنجیره تولید و حمایت، مقدار محصول در کشتزار و رضایت کشاورزان بستگی دارد. از سوی دیگر گسترش برنامه‌های آموزشی از عامل‌های موثر در افزایش تمایل کشاورزان به خرید و استفاده از کودهای زیستی به عنوان جایگزینی برای کودهای شیمیایی گران قیمت است (Bharti *et al*., 2017). دولت نیز می‌تواند بازار نوظهور کودهای زیستی را از راه برنامه‌های توسعه‌ای و بهبود سطح مدیریت کشتزار، کمک مالی به بهره‌برداران در برنامه‌ریزی و توسعه واحدهای عملکردی، یارانه در فروش و همچنین ارتباط مستقیم بخش دولتی با سازمان‌های تعاونی، دانشگاه‌ها و موسسه‌های پژوهشی جهت آموزش کشاورزان و بهبود فراورده‌های زیستی، حمایت نماید. امید است که در آینده‌ای نزدیک با رفع چالش‌های موجود در تولید و استفاده از پروبیوتیک‌های گیاهی، بتوان به یک سیستم کشاورزی پایدار مبتنی بر کنترل زیستی دست یافت.

منابع

Ahmed, E. & Holmstrom, S. J. (2014). Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microbial Biotechnology*,7: 196–208.

Alfiky, A. & Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*–Plant–Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *Journal of Fungi*, 7(1): 61.

Available online: http://www.fao.org/faostat/en/#country (accessed on 20 June 2023).

Bardin, M., Ajouz, S., Comby, M., Lopez-Ferber, M., Graillot, B., Siegwart, M. & Nicot, P.C. (2015). Is the efficacy of biological control against plant diseases likely to be more durable than that of chemical pesticides? *Frontiers in Plant Science*, 6: 566.

Bargaz, A., Elhaissoufi, W., Khourchi, S., Benmrid, B., Borden, K.A. & Rchiad, Z.(2021). Benefits of phosphate solubilizing bacteria on belowground crop performance for improved crop acquisition of phosphorus. *Microbiological Research*, 252.

Beattie, G. A. (2015). Microbiomes: curating communities from plants. *Nature* 528: 340–341.

Beneduzi, A., Ambrosini, A. & Passaglia, LM. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*,35: 1044–1051.

Bharti, N., K. Sharma, S., Saini, S., Verma, A. & S. Nimonkar, Y. (2017). Microbial Plant Probiotics: Problems in Application and Formulation. *Probiotics and Plant Health*, 317-335.

Boudjeko, T., Tchinda, RAM., Zitouni, M., Nana, JA., Lerat, S. & Beaulieu, C. (2017). *Streptomyces cameroonensis* sp. nov., a Geldanamycin producer that promotes *Theobroma cacao* growth. *Microbes and Environments*, 32 (1): 24–31

Botelho R., G. & Mendonça-Hagler, L.C. (2006). *Pseudomonads fluorescent* associated with the Rhizosphere of crops- an over view. Brazilian Journal of Microbiology, 37: 401- 416.

Chen, L., Dodd, I.C., Theobald, J.C., Belimov, A.A. & Davies, W.J. (2013). The rhizobacterium *Variovorax paradoxus* 5C-2, containing ACC deaminase, promotes growth and development of *A. thaliana* via an ethylene-dependent pathway. *Journal of Experimental Botany*, 64: 1565– 1573.

Carrillo-Castaneda, G., Juarez, MJ., Peralta-Videa, J., Gomez, E. & Gardea-Torresdey, J.L. (2002). Plant growth-promoting bacteria promote copper and iron translocation from root to shoot in alfalfa seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 26: 1801–1814.

Cortleven, A. & Schmulling, T. (2015). Regulation of chloroplast development and function by cytokinin. *Journal of Experimental Botany*, 66: 4999–5013.

Dobbelaere, S., Vanderleyden, J. & Okon, Y. (2003). Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22: 107–149.

Djonovic, S., Vargas, W. A., Kolomiets, M. V., Horndeski, M., Weist, A. & Kenerley, C. M. (2007). A proteinaceous elicitor Sm1 from the beneficial fungus *Trichoderma virens* is required for systemic resistance in maize. *Plant Physiology*, 145: 875– 889.

Dimkpa, C., Svatoš, A., Merten, D., Büchel, G. & Kothe, E. (2008). Hydroxamate siderophores produced by *Streptomyces acidiscabies* E13 bind nickel and promote growth in cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under nickel stress. *Canadian Journal of Microbiology*, 54(3): 163-172

El-Khawas, H. & Adachi, K. (1999). Identification and quantification of auxins in culture media of *Azospirillum* and *Klebsiella* and their effect on rice roots. *Biology and Fertility of Soils*, 28: 377– 381.

Elbeltagy, A., Nishioka, K., Sato, T., Suzuki, H., Ye, B., Hamada, T., Isawa, T., Mitsui, H. & Minamisawa, K. (2001). Endophytic colonization and in planta nitrogen fixation by a *Herbaspirillum* sp. isolated from wild rice species. *Applied and Environmental Microbiology*, 67: 5285–5293.

Estrada, GA., Baldani, VLD. & de Oliveira, DM. (2013). Selection of phosphate-solubilizing diazotrophic *Herbaspirillum* and *Burkholderia* strains and their effect on rice crop yield and nutrient uptake. *Plant and Soil*, 369: 115–129.

Flores-Felix, JD., Silva, LR., Rivera, LP., Marcos-García, M., García-Fraile, P., Martínez-Molina, E., Mateos, PF., Velázquez, E., Andrade, P. & Rivas, R. (2015). Plants probiotics as a tool to produce highly functional fruits: the case of *Phyllobacterium* and vitamin C in strawberries. *PLoS One*, 10(4): e0122281.

Garcia-Fraile, P., Carro, L., Robledo M, Ramírez-Bahena, MH., Flores-Félix, J.D., Fernández, M.T., F. Mateos, P., Rivas, R., Igual, J.M., Martínez-Molina, E., Peix, A. & Velázquez, E. (2012). Rhizobium promotes non-legumes growth and quality in several production steps: towards a biofertilization of edible raw vegetables healthy for humans. *PLoS One*, 7.

Guo, H., Wang, Y., Liu, H., Hu, P., Jia, Y., Zhang, C., Gu, S., Yang, C. & Wang, C. (2015). Exogenous GA_3 application enhances xylem development and induces the expression of secondary wall biosynthesis related genes in *Betula platyphylla*. *International Journal of Molecular Sciences*, 16: 22960– 22975.

Habibi, S., Djedidi, S., Prongjunthuek, K., Mortuza, MF., Ohkama-Ohtsu, N., Sekimoto, H. & Yokoyoma, T. (2014). Physiological and genetic characterization of rice nitrogen fixer PGPR isolated from rhizosphere soils of different crops. *Plant and Soil*, 379: 51– 66.

Hider, RC. & Kong, X. (2010). Chemistry and biology of siderophores. *Natural Product Reports*, 27: 637– 657.

Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson,G.R., Merenstein, D.J., Pot, B., Morelli, L., Canani, R. B., Flint, H.J., Salminen, S., Calder, P.C.& Sanders, M.E. (2014). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 11: 506–514.

Harman, G.E., Doni, F., Khadka, R.B. & Uphoff, N. (2019). Endophytic strains of *Trichoderma* increase plants' photosynthetic capability. *Journal of Applied Microbiology*, 130(2): 529-546.

Harman, G., Khadka, R., Doni, F. & Uphoff, N. (2021). Benefits to Plant Health and Productivity From Enhancing Plant Microbial Symbionts. *Frontiers in Plant Science*, 11. DOI:10.3389/fpls.2020.610065

Joo, G.J., Kim, Y.M., Kim, J.T., Rhee, I.K., Kim, J.H. & Lee, I.J. (2005). Gibberellins-producing rhizobacteria increase endogenous gibberellins content and promote growth of red peppers. *Journal of Microbiology*, 43: 510–515

Jog, R., Pandya, M., Nareshkumar, G. & Rajkumar, S. (2014). Mechanism of phosphate solubilization and antifungal activity of *Streptomyces* spp. isolated from wheat roots and rhizosphere and their application in improving plant growth. *Microbiology*, 160: 778–788.

Khan, M.Y., Nadeem, SM., Sohaib, M., Waqas, MR., Alotaibi, F., Ali, L., Zahir, ZA. & Al-Barakah, FNI. (2022). Potential of plant growth promoting bacterial consortium for improving the growth and yield of wheat under saline conditions. *Frontiers in Microbiology*, 13: 958522

Kloepper, J.W. & Schroth, M.N. (1980). Plant growth-promoting rhizobacteria and plant growth under gnotobiotic conditions. *Ecology and Epidemiology*, 71(6).

Kim,Y.C. & J. Anderson, A. (2018). Rhizosphere *pseudomonads* as probiotics improving plant health. *Molecular plant pathology*,19 (10): 2349- 2359

Lenteren, J.C., Bueno, V. H. P., Luna, M. G., Colmenarez, Y. C. (2020). *Biological Control in Latin America and the Caribbean: Its Rich History and Bright Future.* CAB digital library.

Liu, FP., Liu, HQ., Zhou, HL. & Dong, Z.G. (2014). Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from betel nut (*Areca catechu*) and their effects on plant growth and phosphorus mobilization in tropical soils. *Biology and Fertility of Soils*, 50: 927– 937.

Liu, QB., Ding, YL., Shi ,YT., Ma, L., Wang, Y. & Song, CP. (2021). The calcium transporter ANNEXIN1 mediates cold-induced calcium signaling and freezing tolerance in plants. *EMBO J.* 40(2).

Malusá, E. & Vassilev, N. A. (2014). Contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98: 6599– 6607.

Mark, G.L., Morrissey, J.P., Higgins, P. & Gara, F.O. (2006). Molecular-based strategies to exploit *Pseudomonas* biocontrol strains for environmental biotechnology applications. *FEMS Microbiology Ecology*, 56: 167– 177.

Meena,V.S., Maurya, B.R. & Verma, JP. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K^+ availability in agricultural soils?. *Microbiological Research*, 169 (5–6): 337-347.

Menendez, E. & Garcia-Fraile, P. (2017). Plant probiotic bacteria: Solutions to feed the world. *AIMS Microbiology*, 3: 502– 524.

Mehnaz, S. (2016). An Overview of Globally Available Bioformulations. In: Arora, N., Mehnaz, S., Balestrini, R. (eds). *Bioformulations: for Sustainable Agriculture*. New Delhi: Springer, 267– 281.

Nicot, P.C., Alabouvette, C., Bardin, M., Blum, B., Köhl, J. & Ruocco, M. (2012). Review of factors influencing the success or failure of biocontrol: Technical, industrial and socio- economic perspectives. *Biol. Control Fungal and Bact. Journal of Plant Pathology*, 78: 95– 98

Ortiz-Castro, R., Valencia-Cantero, E. & Lopez-Bucio, J. (2008). Plant growth promotion by *Bacillus megaterium* involves cytokinin signaling. *Plant Signaling & Behavior*, 3: 263– 265

O'Callaghan, M., A. Ballard, R. & Wright, D. (2022). Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil use and management*, 38(3): 1340- 1369

Pallai, R., Hynes, R.K., Verma, B. & Nelson, L.M. (2012). Phytohormone production and colonization of canola (*Brassica napus* L.) roots by *Pseudomonas fluorescens* 6-8 under gnotobiotic conditions. *Canadian Journal of Microbiology*, 58: 170–178.

Pretty, J., Sutherland, w. j., Ashby, J., Auburn, J., Baulcombe, D., Bell, M., Bentley, J., Bickersteth, S., Brown, K., Burke, J., Campbell, H., Chen, K., Crowley, E., Crute, I., Dobbelaere, D., Edwards-Jones, G., Funes- Monzote, F., Godfray, H. C.j., Griffon, M., Gypmantisiri, P., Haddad, L., Halavatau, S., Herren, H., Holderness, M., Izac, A.M., Jones, M., Koohafkan, P., Lal, R., Lang, T., McNeely, J., Mueller, A., Nisbett, N., Noble, A., Pingali, P., Pinto, Y., Rabbinge, R., Ravindranath, N. H., Rola,A., Roling, N., Sage, C., Settle, W., Sha, J.M., Shiming, L., Simons, T., Smith, P., Strzepeck, K., Swaine, H., Terry, E., Tomich, T.P., Toulmin, C., Trigo, E., Twomlow, S., Vis, J.K., Wilson, J. & Pilgrim, S. (2010). The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8: 219– 236.

Prajapati, S., Kumar, N., Kumar, S., Iakharan, L. & Maurya, S. (2020). Biological control a sustainable approach for plant disease management: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9: 1514– 1523.

Puri, A., Padda, KP. & Chanway, CP. (2016). Evidence of nitrogen fixation and growth promotion in canola (*Brassica napus* L.) by an endophytic diazotroph *Paenibacillus polymyxa* P2b-2R. *Biology and Fertility of Soils*, 52: 119–125.

Rajkumar, M. & Freitas, H. (2008). Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard. *Bioresource Technology* 99(9): 3491- 3498

Saleem, M., Arshad, M., Hussain, S. & Bhatti, A.S. (2007). Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC- deaminase in stress agriculture. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 34: 635– 648.

Sadeghi, A., Koobaz, P., Azimi, H., Karimi, E. & Akbari, A.R. (2017). Plant growth promotion and suppression of Phytophthora drechsleri damping-off in cucumber by cellulase-producing *Streptomyces*. *BioControl*, 62(1): 1- 15.

Silo-Suh, LA., Lethbridge, B.J., Raffe, S.J., He, H., Clardy, J. & Handelsman, J. (2023). Biological activities of two fungistatic antibiotics produced by *Bacillus cereus* UW85. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(6): 2023- 30.

Sangeeth, KP., Bhai, R.S. & Srinivasan, V. (2012). *Paenibacillus glucanolyticus*, a promising potassium solubilizing bacterium isolated from black pepper (*Piper nigrum* L.) rhizosphere. *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 21(1).

Sheng, X.F. & He, L.Y. (2006). Solubilization of potassium- bearing minerals by a wild- type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. *Canadian Journal of Microbiology*, 52: 66– 72.

Shakeel, M., Rais, A., Hassan, M.N. & Hafeez, F.Y. (2015). Root Associated *Bacillus* sp. improves growth, yield and zinc translocation for basmati rice (*Oryza sativa*) varieties. *Front Microbiol*. 6: 1286.

Sharma, A. & Johri, BN. (2003). Combat of iron-deprivation through a plant growth promoting *Pseudomonas fluorescent* strain GRP3A in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilzeck). *Microbiological Research*, 158(1): 77-81.

Sundh, I. & Goettel, M.S. (2013). Regulating biocontrol agents: A historical perspective and a critical examination comparing microbial and macrobial agents. *BioControl*, 58: 575– 593.

Spaepen, S., Vanderleyden, J. & Remans R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 31 (4): 425– 448.

Tahir, H.A.S., Gui, Q., Wu, H., Raza, W., Hanif, A., Wu, L., Colman, M.V. & Gao, X. (2017). Plant growth promotion by volatile organic compounds produced by *Bacillus subtilis* SYST2. *Frontiers in Microbiology*, 8: 1– 11.

Tejera, N., Lluch, C., Martínez-Toledo, MV. & Gonzàlez-López, J. (2005). Isolation and characterization of *Azotobacter* and *Azospirillum* strains from the sugarcane rhizosphere. *Plant and Soil*, 270: 223– 232.

Timper, P. (2014). Conserving and Enhancing Biological Control of Nematodes. *Journal of Nematology*, 46: 75– 89

Umer, M., Mubeen, M., Iftikhar, Y., Shad, M.A., Usman, H.M., Sohail, M.A., Atiq, M.N., Abbas, A. & Ateeq, M. (2021). Role of Rhizobacteria on Plants Growth and Biological Control of Plant Diseases: A Review. *Plant Protection*,5: 59– 73.

Vessey, JK. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil* 255: 571– 586.

Walker, R., Pille, C., Gupta, S. & Roessner, U. (2020). Current perspectives and applications in plant probiotics. *Microbiology Australia*, 41(2).

Yu, Y., Gui,Y., Li, Z., Jiang, C., Guo, J. & Niu, D. (2022). Induced Systemic Resistance for Improving Plant Immunity by Beneficial Microbes. *Plants (Basel)*, 11(3): 386.

Zhan, J. & Mcdonald, B.A. (2013). Field-based experimental evolution of three cereal pathogens using a mark- Release- recapture strategy. *Plant Pathol*, 62: 106- 114.

Zhang, C. & Kong, F. (2014). Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Applied Soil Ecology*, 82: 18– 25.

Zuniga A., Poupin, M.J., Donoso, R., Ledger, T., Guiliani, N., Gutierrez, R.A. & Gonzalez, B. (2013). Quorum sensing and indole-3- acetic acid degradation play a role in colonization and plant growth promotion of *A. thaliana* by *Burkholderia phytofirmans* PsJN. *Molecular Plant- Microbe Interactions*, 26: 546-553.

Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 9(1):77-90 (2024)

Importance of Plant Probiotics in Sustainable Agriculture: Challenges and Solutions

Hashemi, S.[1] and Ahmadzade, M.[2]

It is necessary to move towards a productive and environmentally friendly agricultural system. Some microorganisms known as plant probiotics, can be used as biological fertilizers in the production of crops. Plant probiotics are compatible with any agricultural system, including the organic system, and play a special role in protecting the environment, reducing the need to use chemical pesticides, maintaining and improving the soil structure, and producing food for the growing world population. A better awareness and understanding of the functions of plant probiotics leads to accelerate the acceptance of the advantages and use of these microorganisms and creates a potential to overcome the obstacles to the acceptance of this management process. Some of the solutions to accelerate the adoption of biological control are increasing the awareness of farmers and stakeholde in the field of successful applied examples, clarifying the economic and environmental benefits of biological control as compared to chemical control, as well as incentive policies for the use of plant probiotics through the government and private sectors. In this article, in addition to addressing the importance of plant probiotics and their application to achieve an environmentally friendly and sustainable agricultural system, the challenges of using this management method and the solutions to solve these challenges have also been discussed.

Keywords: Plant probiotics, Biological control, Probiotic bacteria, Sustainable agriculture.

1. Corresponding author, Email: hashemi.sa@ut.ac.ir
2. Ph.D. Student and Professor, University of Tehran, Tehran, respectively.

پیوست‌ها

بر اساس مصوبه شورای دبیران مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، به منظور یادآوری، اطلاع‌رسانی و ثبت فعالیت‌های گذشته گروه علوم کشاورزی فرهنگستان علوم، شماری از بیانیه‌های همایش‌های برگزار شده، چکیده طرح‌های پایان یافته یا خلاصه سخنرانی‌های ایراد شده و مانند این‌ها، در هر شماره مجله به صورت پیوست و **بدون هیچ تغییری** آورده می‌شوند.

اعتبارسنجی مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی

مرتضی خوشخوی و ضحی مختارزاده[1]

با بهره گیری از Google Form، برای اعتبارسنجی مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، پرسشنامه ای برای ۳ گروه نویسندگان، داوران و اعضای گروه علوم کشاورزی با ۶ پرسش کلی، ارسال شد. پس از دریافت دستکم ۲۰ پاسخ از هر گروه، بر پایه گزارش این پایگاه، جمع‌بندی نتایج برای هر ۳ گروه در جدول های ۱ تا ۳ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج اعتبارسنجی با پرسشنامه از نویسندگان (مقاله‌های پذیرفته شده یا رد شده).

پرسش ها	پاسخ ها			
	کمتر از ۲۰ ٪	٪۵۰	٪۸۰	٪۱۰۰
کیفیت مقاله‌ها و مطالب علمی این مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟	نامناسب ٪۰	متوسط ٪۵	خوب ٪۵۰	عالی ٪۴۵
مقاله ای را که به این مجله ارسال کرده اید از نظر داوری و ویراستاری چگونه ارزیابی می کنید؟	نامناسب ٪۵	متوسط ٪۰	خوب ٪۴۰	عالی ٪۵۵
دسترسی به پایگاه اینترنتی و دفتر مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟	نامناسب ٪۰	متوسط ٪۵	خوب ٪۴۰	عالی ٪۵۵
آیا این مجله را برای ارسال مقاله به دیگران توصیه می کنید؟	خیر ٪۵	کم ٪۰	گاهی ٪۳۵	زیاد ٪۶۰
مقاله های این مجله تا چه حد برای پیشبرد کشاورزی و منابع طبیعی کشور اثرگذار هستند؟	کم ٪۰	متوسط ٪۱۵	به نسبت زیاد ٪۲۰	زیاد ٪۶۵
تا چه حد این نشریه را در سطح یک مجله علمی-پژوهشی می دانید؟	٪۰	٪۱۵	٪۲۵	٪۶۰

۱- به ترتیب سردبیر و کارشناس مجله

جدول ۲- نتایج اعتبارسنجی با پرسشنامه از داوران.

پرسش ها	پاسخ ها			
	کمتر از ۲۰ ٪	٪۵۰	٪۸۰	٪۱۰۰
کیفیت مقاله‌ها و مطالب علمی این مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟	نامناسب ٪۰	متوسط ٪۹/۵	خوب ٪۵۷/۱	عالی ٪۳۳/۳
مقاله های این مجله تا چه حد برای پیشبرد کشاورزی و منابع طبیعی کشور اثرگذار هستند؟	نامناسب ٪۰	متوسط ٪۲۳/۸	به نسبت زیاد ٪۵۲/۴	زیاد ٪۲۳/۸
مقاله های این مجله تا چه اندازه به روز هستند؟	به روز نیست ٪۰	تاحدودی به روز است ٪۳۸/۱	به روز است ٪۴۲/۵	بسیار به روز است ٪۱۹
سطح مقاله‌های ارسال شده برای داوری را چگونه ارزیابی می کنید؟	نامناسب ٪۴/۸	متوسط ٪۱۴/۳	خوب ٪۶۶/۷	عالی ٪۱۴/۳
پرسش های فرم ارزیابی مقاله ها را چگونه ارزیابی می کنید؟	نامناسب ٪۰	متوسط ٪۲۳/۸	خوب ٪۵۲/۴	عالی ٪۲۳/۸
تا چه حد این نشریه را در سطح یک مجله علمی-پژوهشی می‌دانید؟	٪۰	٪۱۴/۳	٪۵۷/۱	٪۲۸/۶

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی با پرسشنامه از اعضای گروه.

پرسش ها	پاسخ ها			
	کمتر از ۲۰ ٪	٪۵۰	٪۸۰	٪۱۰۰
تا چه حد به این نشریه فرهنگستان علوم آشنا هستید؟	٪۸/۳	٪۸/۳	٪۲۰/۸	٪۶۲/۵
کیفیت مقاله‌ها و مطالب علمی این مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟	نامناسب ٪۰	متوسط ٪۸/۳	خوب ٪۵۸/۳	عالی ٪۳۳/۳
مقاله های این مجله تا چه حد برای پیشبرد کشاورزی و منابع طبیعی کشور اثرگذار هستند؟	کم ٪۰	متوسط ٪۲۹/۲	به نسبت زیاد ٪۳۳/۳	زیاد ٪۳۷/۵
آیا این مجله را برای ارسال مقاله به دیگران توصیه می کنید؟	خیر ٪۰	کم ٪۰	گاهی ٪۲۹/۲	زیاد ٪۷۰/۸
مقاله های این مجله تا چه اندازه به روز هستند؟	به روز نیست ٪۰	تاحدودی به روز است ٪۲۹/۲	به روز است ٪۵۰	بسیار به روز است ٪۲۰/۸
تا چه حد این نشریه را در سطح یک مجله علمی-پژوهشی می‌دانید؟	٪۰	٪۲۰/۸	٪۴۵/۸	٪۳۳/۳

در یک نگاه کلی مشاهده می شود که کیفیت مقاله های مجله را نویسندگان، داوران و اعضای گروه به ترتیب ۴۵، ۳۳/۳ و ۳۳/۳٪ عالی و ۵۰، ۵۷/۱ و ۵۸/۳٪ خوب ارزیابی کرده اند. در پاسخ به این که مقاله های این مجله تا چه حد برای پیشبرد کشاورزی و منابع طبیعی کشور اثرگذار هستند، نویسندگان ۶۵٪ زیاد، ۲۰٪ به نسبت زیاد؛ داوران ۲۳/۸٪ زیاد، ۵۲/۴٪ به نسبت زیاد و اعضای گروه ۳۷/۵٪ زیاد و ۳۳/۳٪ به نسبت زیاد دانسته اند. همچنین، نتایج نظرسنجی درباره این که تا چه حد این نشریه را در سطح یک مجله علمی-پژوهشی می‌دانید، نشان داد که ۲۵ و ۶۰٪ نویسندگان؛ ۵۷/۱ و ۲۸/۶٪ داوران و ۴۵/۸ و ۳۳/۳٪ اعضای گروه به ترتیب به نسبت زیاد یا زیاد، مجله را علمی-پژوهشی ارزیابی کرده اند.

به هر ۳ گروه فرصت داده شد تا همراه پاسخ پرسشنامه ها چنانچه نظر ویژه ای دارند، ابزار دارند. نظرهای دریافتی بدون هیچگونه تغییر، به قرار زیر است:

۱- نویسندگان:

همراه با پاسخ به «کیفیت مقاله‌ها و مطالب علمی این مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟»

- دیدگاه این مجله قابل ستایش است که به راهبردهای بخش کشاورزی و منابع طبیعی توجه دارد. ولی در مواردی مقالات غیرراهبردی نیز دیده می شود.

همراه با پاسخ به «مقاله ای را که به این مجله ارسال کرده اید از نظر داوری و ویراستاری چگونه ارزیابی می‌کنید؟»

- بازبینی مقاله با داوران تخصصی مناسبی انجام شده بود
- تنها ایراد آن طولانی بودن پروسه داوری است.

همراه با پاسخ به «دسترسی به پایگاه اینترنتی و دفتر مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟»

- می تواند بیشتر معرفی شود. بسیاری از مدیران هنوز از وجود این مجله خبر ندارند.
- بهتر است لینک DOI به مقالات اضافه گردد که در گوگل اسکالر یا اورسید نمایه شود.

همراه با پاسخ به «آیا این مجله را برای ارسال مقاله به دیگران توصیه می کنید؟»

- با توجه به اینکه این مجله نمایه سازی خوبی نداشته مثلا در پایگاه جهان اسلام (آس اس سی) یا حتی لیست مجلات وزارت علوم نمایه نشده شاید برای نویسندگان چندان تمایلی وجود نداشته باشد.
- برای بنده افتخار بزرگی است که در مجله وزین شما مقاله ارائه دهم. این کار را مجددا با کمال افتخار انجام خواهم داد. دانش آموخته مقطع کارشناسی دانشگاه شیراز هستم و همواره خود را دانشجوی شما و دانشگاه شیراز می دانم. ولی امروزه اکثر اعضای هیات علمی نیاز به مقاله علمی - پژوهشی دارند واز نظرارزیابی وزارت علوم، این مجله فاقد درجه علمی پژوهشی است. اگرچه نظر شخصی بنده این است که این مجله سرآمد مجله های علمی پژوهشی فارسی زبان در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی است ولی درجه علمی پژوهشی مجله برای اعضاء هیات علمی جوان که دنبال امتیاز هستند خیلی مهم است. این مجله با تمام شایستگی هایی که دارد و از نظر بنده در مجلات داخلی رتبه اول است ولی از نظر ممیزی وزارت علوم درجه علمی پژوهشی ندارد و این نقص بزرگی برای مجله به حساب می آید. بیش از ۹۰٪ نویسندگان به امتیاز علمی مجله نیاز دارند و مقاله در آن امتیازی برای ترفیع و ارتقاء اعضای هیات علمی ندارد. پیشنهاد می شود برای بدست آوردن درجه علمی - پژوهشی مجله اقدام شود و بنده هم امر بفرمایید در خدمت شما هستم.
- این مجله را به خصوص به مدیران بالایی و میانی کشور در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی توصیه می کنم.

همراه با پاسخ به «تا چه حد این نشریه را در سطح یک مجله علمی-پژوهشی می دانید؟»

- متاسفانه این مجله هنوز در ارزیابی کیفی مجلات پژوهشی وزارت علوم یا پایگاه ISC قرار ندارد در صورتیکه از نظر موضوعی و مفید بودن برای کشور در سطح بسیار بالایی می تواند قرار گیرد.
- بیشتر برای استنتاجات راهبردی و ترویج یافته های علمی مناسب تر است

۲- داوران:

همراه با پاسخ به «کیفیت مقاله‌ها و مطالب علمی این مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟»

- مقالات این مجله عموماً راهبردی و افق کاوی هستند.
- مقالات خوب و قوی هستند اما پیشنهاد آن است که تعداد بیشتری از محققین یک حوزه در تهیه مقالات دخیل باشند و صرفا به اعضای فرهنگستان بسنده نشود.

همراه با پاسخ به «مقاله های این مجله تا چه حد برای پیشبرد کشاورزی و منابع طبیعی کشور اثرگذار هستند؟»

- این مجله موجب طرح و تبیین مسائل پژوهشی نوین و الگوبرداری می شود.
- کیفیت مقاله الزاما به معنای کاربردی بودن آن نیست. اگرچه مقالات مجله از دیدگاه بنیادی و راهبردی مطلوب هستند اما ممکن است بخشی از آنها عملیاتی نباشند.
- با توجه به این که مقالات دیدگاههای کلان نگر دارند پتانسیل خوبی برای مداقه سیاستگذاران و مدیران دارد اما اینکه تا چه اندازه مورد توجه و بهره برداری آنان قرار می گیرد جای شک است.

همراه با پاسخ به «مقاله های این مجله تا چه اندازه به روز هستند؟»

- اگر منظور متناسب با شرایط مبتلا به کشاورزی روز کشور است، می توان گفت به روز است، اما بدیهی است که با پژوهشها و فناوری‌های روز دنیا کمی فاصله دارد. به نظر می رسد ملاک به روز بودن شرایط داخلی باشد که در این صورت مقالات متناسب و روزآمد است.

همراه با پاسخ به «پرسش های فرم ارزیابی مقاله ها را چگونه ارزیابی می کنید؟»

- البته بنده از سوالات پرسشنامه بی اطلاع هستم ولکن تحت نظر اساتید محترم فرهنگستان، مجموعه سوالات بی تردید از ویژگی‌های احراز صلاحیت مقاله از ابعاد اعتبار و پایایی برخوردار است .

همراه با پاسخ به «تا چه حد این نشریه را در سطح یک مجله علمی-پژوهشی می دانید؟»

- مجله وزین و کارامد و در عین حال دارای مقالات کاربردی و تحلیلی از مسایل حوزه کشاورزی است و در سطح کلان ملی راهبردهای زیر بخش های کشاورزی را مد نظر قرار می دهد
- به نظر اینجانب نشریه علمی - سیاست گذاری در زمینه کشاورزی و منابع طبیعی است.
- همانطور که در بندهای پیشین اشاره شد مقالات متناسب با شرایط روز کشاورزی کشور تهیه و تدوین می شوند و بر این اساس علاوه بر علمی بودن از لحاظ فرآیند انجام پژوهش و بررسی یک مسئله کلان، به امور اجرایی هم گوشه چشمی دارد. این موضوع یک مزیت است گرچه ممکن است با مرزهای دانش فاصله هم داشته باشد.
- مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی برای کمک به حل مشکلات کلان کشاورزی ایران مفید می باشد.

۳- اعضای گروه:

همراه با پاسخ به «تا چه حد با این نشریه فرهنگستان علوم آشنا هستید؟»

- در دو سه سال اخیر فعالیت فرهنگستان و دورهمآیی های آن بسیارمحدود بوده است. در مورد این مجله هم آگاهی رسانی کافی نبوده است.

همراه با پاسخ به «کیفیت مقاله ها و مطالب علمی این مجله را چگونه ارزیابی می کنید؟»

- مطالب و مقالات مجله مخاطبین خاصی می طلبد و جنبه های عمومی آن کم است. در مورد نقد شرایط کنونی هم مطلب خاصی ندیده ام.

همراه با پاسخ به «مقاله های این مجله تا چه حد برای پیشبرد کشاورزی و منابع طبیعی کشور اثرگذار هستند؟»

- این مجله تنها مجله ایران در خصوص پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی است و مقالات آن برای دانشمندان، محققین، دانشجویان و تصمیم گیران کشور بسیار مفید است
- پنداشت من این است که مخاطبین مقالات سیاستگزاران و برنامه ریزان هستند و جنبه های اجرایی مطالب محدود است . سیاستگزاران در مجموع شرایط کنونی الزاما نقش مهم یا مثبتی در پیشبرد کشاورزی ندارند.
- کیفیت مطلوب یک مقاله به منزله کاربردی و اثرگذار بودن آن نیست.
- بیشتر مقاله ها مستخرج از طرحهای مطالعاتی فرهنگستان هستند و طبعا در برنامه ریزی های دراز مدت، البته اگر مورد توجه مسئولان اجرایی کشور قرار گیرند، مفید واقع می‌شوند.
- بخشی از طرحها باید سفارش محور شوند تا گره گشایی مشکلات کشور باشند.

همراه با پاسخ به «آیا این مجله را برای ارسال مقاله به دیگران توصیه می کنید؟»

- به افرادی که توانایی نگارش مقاله در زمینه مسایل راهبردی کشاورزی و منابع طبیعی را داشته باشد توصیه می کنم- در غیر این صورت خیر.

همراه با پاسخ به «مقاله های این مجله تا چه اندازه به روز هستند؟»

- علت انتخاب این گزینه این است که بسیاری از مقاله‌های مروری بر مبنای پژوهش‌های پیشین انجام می‌گیرد.

همراه با پاسخ به «تا چه حد این نشریه را در سطح یک مجله علمی-پژوهشی می دانید؟»

- به نظرم این مجله باید از شماره اول علمی پژوهشی شود چون توسط بالاترین سازمان علمی کشور که برجسته ترین اساتید کشور در آن عضو هستند به چاپ می رسد.
- آگاهی رسانی در مورد مجله و انتشار آن کم بوده است و مطالب بیشتر برای مخاطبین متخصص است و برای دانشجویان یا کشاورزان جذابیت وکاربرد زیادی ندارد. در مورد پیشنهاد برنامه یا نقد شرایط کنونی هم مطلب خاصی ندیده ام.
- به نظر اینجانب یک نشریه علمی- سیاست گذاری است تا پژوهشی.
- ساختار و اهداف مجله با یک مجله علمی پژوهشی دانشگاهی تفاوت دارد. در و اقع، علمی پژوهشی بودن یا شدن مجله نباید یک هدف باشد. بلکه باید نوآورانه و نوع جدیدی از یک مجله علمی باشد. وگرنه در دور تکراری سایر مجلات می افتد و شأن و اعتبار علمی خود را تنزل خواهد داد.

بیانیه همایش

دورنمای مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز[1]

دکتر امیر سعدالدین[2]

جلسه سخنرانی «دورنمای مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز» در تاریخ ۱۹ بهمن ماه ۱۴۰۱ توسط شاخه مرتع و آبخیزداری گروه علوم کشاورزی فرهنگستان علوم در فضای مجازی اسکای روم و با حضور بیش از ۶۰ نفر از اعضای گروه، استادان، متخصصان و پژوهشگران از دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی به صورت حضوری و مجازی در فرهنگستان علوم برگزار شد.

در آغاز این جلسه، آقای دکتر حسن احمدی، رییس شاخه مرتع و آبخیزداری فرهنگستان و دبیر علمی جلسه، به نیابت از دکتر عباس شریفی تهرانی رئیس گروه علوم کشاورزی فرهنگستان علوم، ضمن خوش‌آمدگویی به شرکت کنندگان، با ارائه بیاناتی جلسه را افتتاح و سپس، آقای دکتر امیر سعدالدین، عضو هیأت علمی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، به ارائه سخنرانی پرداخت.

امروزه برای همه متخصصان علوم منابع طبیعی مشخص شده است که وضعیت منابع آبی، خاکی و گیاهی در ایران در موقعیت بحرانی به سر می‌برد. عوامل گوناگونی باعث ایجاد چنین وضعیتی گردیده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتنداز: مدیریت نامناسب در بهره‌برداری، وضعیت اقتصادی- اجتماعی بهره‌برداران و مسائل ساختاری و نبود انسجام درون سازمانی و بین سازمانی در بهره‌برداری از منابع پایه. شرایط فوق درکنار تغییرات اقلیم جهانی موجب شده است تا شرایط منابع طبیعی و محیط زیست به عنوان ابر چالش‌های جهانی، منطقه‌ای و ملی در مناطق مختلف کرۀ زمین و ازجمله ایران جلوه‌گر شده باشد. در این راستا محققان و متفکران در عرصه علوم آبخیزداری با معرفی مفهوم مدیریت جامع حوزه آبخیز به دنبال یافتن راهکارهای علاج بخش هستند. مدیریت حوزه آبخیز طی سه دهۀ گذشته مورد بحث و تبادل‌نظر جوامع علمی بوده است.

جمع‌بندی دیدگاه‌های مطرح شده در مجموع مبین موارد زیر می‌باشد:

۱- با توجه به گستردگی عوامل مختلف در حوزه آبخیز ضروری است تا برای اجرای عملی این برنامه طرح راهبردی و نقشه راه تهیه شود و مبنای اقدامات بعدی قرار گیرد.

۲- ضروری است تا در تدوین برنامه راهبردی هفتم توسعه، مدیریت جامع حوزۀ آبخیز مورد توجه قرار گیرد و ضمن دعوت از متخصصان این امر خط مشی‌های لازم تدوین شود.

۳- مفهوم مدیریت جامع آبخیز فراتر از حکمرانی آب می‌باشد، به گونه‌ای که در حکمرانی آب تمرکز بر خدمات تولید پایدار آب بر اساس رهیافت فنی – مهندسی است (آب شیرین‌کن، سدسازی و انتقال آب بین حوزه‌ای) در صورتی

۱- برگرفته از نشست هم اندیشی که در تاریخ ۱۴۰۱/۱۱/۱۹ در گروه علوم کشاورزی فرهنگستان علوم ج. ا. ایران برگزار شده است.

۲- استاد دانشگاه گرگان، گرگان.

که مدیریت جامع حوزه آبخیز به دنبال ایجاد یکپارچگی خدمات اکوسیستمی و ردپای اکولوژیک بر پایه رهیافت تاب‌آوری است.

۴- با توجه به گستردگی ظرف مدیریت جامع حوزهٔآبخیز و نظر کارشناسان موجود در نشست در عمل شرح وظایف ومسئولیت‌های نهادهای موجود خارج از بحث مدیریت جامع می‌باشد. بنابراین درکنار تسریع در قانونمند شدن لایحه آبخیزداری نیاز به بازبینی اصلاح هرم ساختاری- نهادی سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور می‌باشد.

۵- رویکرد موجود در مدیریت حوزهٔ آبخیز بیشتر بر پایه دولت محور و تک بعدی است و مشارکت ذینفعان با در نظر گرفتن اندیشه‌ها، آرا و ارزش‌ها و منافع اجتماعی مورد توجه قرارگیرد.

۶- در چارچوب مدیریت جامع آبخیز ارزیابی سلامت و پایداری حوزه آبخیز، تدوین راهبردهای مالی، سازمانی، حقوقی، تلفیق و ارائه الگوی ملی تبین شود.

۷- حمایت از اندیشه فوق ضمن ایجاد بستر مناسب برای مدیریت پایدار منابع تجدید شونده (آب، خاک، فون و فلور) شرایط بهره‌گیری عقلایی از خدمات اکوسیستمی، کاهش و ایستا کردن مخاطرات طبیعی (سیل، فرونشست زمین، فرسایش و تخریب خاک، گرد و غبار و خشکسالی) را به همراه خواهد داشت.

۸- اجرا کردن پایلوت‌های مختلف مدیریت جامع حوزه آبخیز در مناطق مختلف ایران و اخذ بازخوردهای حاصله در کوتاه مدت به منظور اجرایی کردن مدیریت یکپارچه سرزمین.

۹- ایجاد سیستم پایش و ارزیابی طرح‌های منابع طبیعی به منظور موفقیت یا عدم موفقیت پروژه‌ها.

۱۰- با توجه به تعریف حوزه آبخیز واحد کاری منابع طبیعی تجدید شونده حوزه آبخیز در نظر گرفته شود تا تمام اکوسیستم‌های جنگل، مرتع و بیابان را در برگیرد تا بتوان مفهوم مدیریت جامع حوزه آبخیز به سرانجام رساند.

۱۱- آنچه مسلم است باید رویه‌های ناصواب از قبیل تمرکز بر احداث سازه به جای حفظ خاک و آب از طریق احیاء پوشش گیاهی مورد توجه قرار گیرد.

۱۲- به منظور رسیدن به اهداف مورد نظر در سند آمایش سرزمین ایران، رهیافت مدیریت یکپارچه حوزه‌های آبخیز مورد توجه قرار گیرد.

CONTENTS

Crisper Technology and Its Application in Food Industries.
Yazdanpanah, E., Eghbalsaid Abueshaghi, S. & Khomeiri, M.……..…..1

Gradual Reduction of Agricultural Water Withdrawal an Effective Step in Adapting to Water Scarcity in Iran.
Zad-Parsa, S., Didari S. & Sepaskhah A.R. …….…..….19

Environmental Challenges Facing Zagros Forests.
Hosseini, A. ……..…...35

New Technologies for Assay and Management of Plant Viruses and Virus-Like Agents: 1- Assay.
Izadpanah K. …….....….51

Review of New Adaptive Ecosystem Technologies in Smart Agriculture.
Abbaspour-Gilandeh, Y. & Mohtasebi, S.S. …….....……..…65

Importance of Plant Probiotics in Sustainable Agriculture: Challenges and Solutions.
Hashemi, S. & Ahmadzade, M. ……...……..77

APPENDICES

Validation of Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources.91
Declarations of Seminars Performed in Department of Agricultural Sciences…….. 97

PUBLISHER: ACADEMY OF SCIENCES OF ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN
p-ISSN: 2423-4745 e-ISSN:2981-1945 DOI: 10.22047/srjasnr