مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

استراتژی‌های کاهش اثرگذاری قارچ فوزاریوم بر دانه گندم

نوع مقاله: مروری 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5

معصومه خادمی[۱]، عباس عابدفر[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

a.abedfar@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴

صفحه ۱۳۲-۱۱۱

چکیده

بیماری فوزاریوم سنبله گندم یکی از مهم‌ترین بیماری‌های قارچی گندم در سراسر جهان است. اگرچه اغلب گونه‌ی *Fusarium graminearum* به عنوان عامل اصلی این بیماری شناخته می‌شود، اما گونه‌های مختلف فوزاریوم نظیر *Fusarium culmorum* و *Fusarium avenaceum* در این بیماری دخیل هستند. گونه‌های عامل این بیماری مایکوتوکسین‌هایی مانند دئوکسی نیوالنول (DON) و زئارالنون (ZEA) تولید می‌کنند که باعث کاهش کیفیت و عملکرد محصول و همچنین خطرات سلامتی برای انسان و حیوان می‌شوند. این بیماری سالانه میلیاردها دلار خسارت به تولید گندم دنیا وارد می‌کند. استفاده از روش‌های مختلف برای محدود کردن توسعه‌ی بیماری فوزاریوم سنبله گندم و آلودگی دانه به مایکوتوکسین‌ها عنصری مهم در کشاورزی پایدار و تولید غذای ایمن است. این مقاله به بررسی گونه‌های فوزاریوم دخیل در بیماری فوزاریوم سنبله گندم و روش‌های مختلف مدیریت این بیماری و مایکوتوکسین‌های تولید شده می‌پردازد. استراتژی‌های اعمال شده شامل اقدامات زراعی، اصلاح نژاد، روش‌های شیمیایی، کنترل بیولوژیک که قبل از برداشت اعمال می‌شوند و استراتژی‌های پس از برداشت شامل روش‌های فیزیکی، بیولوژیک، شیمیایی و سنجش از دور برای پایش و فنوتیپینگ بیماری فوزاریوم سنبله که قبل و بعد از برداشت مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌باشند و بر اهمیت هر یک از این روش‌ها بر افزایش اثر بخشی مدیریت این بیماری تأکید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دئوکسی نیوالنول (DON)، زئارالنون (ZEA)، فوزاریوم سنبله گندم (FHB)، قارچ فوزاریوم، مایکوتوکسین

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

مقدمه

گندم یک محصول غذایی عمده با تولید سالانه ۷۶۰ میلیون تن است که منبع تغذیه حدود ۴۰٪ از جمعیت جهان را تأمین می‌کند و ۲۰٪ از پروتئین روزانه را تشکیل می‌دهد. تولید گندم تحت تأثیر بیماری‌های گیاهی مانند عفونت‌های قارچی قرار دارد که در شرایط مطلوب می‌تواند منجر به کاهش عملکرد تا ۶۰ ٪ شود (Thuraga et al. 2024).

فوزاریوم سنبله گندم (FHB) یک بیماری غلات است که تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و شیوع آن بیشتر در مناطق تولید گندم گزارش شده است (McMullen et al. 2012). فوزاریوم سنبله توسط گونه‌ها یی از قارچ فوزاریوم ایجاد می‌شود که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به *Fusarium graminearum*، *Fusarium culmorum* و *Fusarium avenaceum* اشاره کرد. *F. graminearum* و *F. culmorum* رایج‌ترین و بیماری‌زاترین گونه‌ها هستند و به نظر می‌رسد پراکنش جغرافیایی آن‌ها با دما و رطوبت مرتبط باشد. گونه *F. graminearum* عمدتاً در مناطق گرم‌تر و مرطوب جهان از جمله آمریکای شمالی، اروپای شرقی، استرالیا و جنوب چین یافت می‌شود. درحالی‌که *F. culmorum* عمدتاً در مناطق سردتر و خشک‌تر مانند اروپای غربی یافت می‌شود (Parry et al. 1995). علائم به صورت سفید شدن یک یا چند سنبله ظاهر می‌شود. سفید شدن می‌تواند از هر نقطه روی سنبله شروع شود، اما اغلب از مرکز سنبله آغاز شده و می‌تواند تا زمانی که کل سنبله سفید شود ادامه یابد (Wegulo et al. 2015) این بیماری برای اولین بار در سال ۱۸۸۴ در انگلستان و سپس چند سال بعد در سال‌های ۱۸۹۰ و ۱۸۹۱ در ایالات متحده گزارش شد (Parry et al. 1995; Stack, 2003). این بیماری در اواخر قرن نوزدهم در ایالات متحده منجر به خسارت هنگفت ۴/۸ میلیارد دلاری در تولید گندم شد. علاوه بر این خسارت مستقیم آن حدود ۱/۳ میلیارد دلار برآورد شد (Bai and Shaner, 2004). آلوده شدن بوته‌های گندم به قارچ عمدتاً از طریق باد یا آب باران و پراکنده شدن آسکوسپورها رخ می‌دهد. حساس‌ترین زمان برای توسعه‌ی FHB، مرحله گلدهی است، زیرا اسپورهایی که از بقایای گیاهی آزاد می‌شوند روی گل‌های گندم می‌نشینند و می‌توانند باعث آلودگی پرچم‌ها شوند. از آنجا، قارچ می‌تواند به دانه در حال توسعه و پوشینه‌های گل نفوذ کند. دانه‌های آلوده کوچک، چروکیده، سبک و از کیفیت پایینی برخوردار هستند و علاوه بر این به مایکوتوکسین‌هایی آلوده می‌شوند که برای انسان و حیوان مضر هستند. مهم‌ترین مایکوتوکسین‌های تولید شده توسط گونه‌های فوزاریوم عبارتند از

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

تریکوتسن‌ها، زئارالنون‌ها، فومونیسین‌ها و مایکوتوکسین‌های جدید مانند بوئرووورسین، انیاتین‌ها و فوساپرولیفرین (Ferrigo et al. 2016). سموم Deoxynivalenol (DON)و Zearalenone (ZEA) به ترتیب برای انسان و حیوان سمی هستند.

درسطح سلولی، تریکوتسن‌ها سنتز پروتئین را مهار می‌کنند، فعالیت آنزیم‌ها را کاهش می‌دهند، تقسیم سلولی را مختل می‌کنند، بر نفوذپذیری غشای سیتوپلاسمی تأثیر می‌گذارند، باعث ناهنجاری‌های کروموزومی می‌شوند و چرخه سلولی را مختل می‌کنند. از میان همه مایکوتوکسین‌ها،DON یک مهارکننده بالقوه سنتز پروتئین با مقاومت در برابر حرارت، فشار، اتمسفر، اسید ضعیف و ذخیره سازی طولانی مدت است (Thuraga et al. 2024). این مقاله به معرفی گونه‌های مختلف قارچ فوزاریوم دخیل در بیماری فوزاریوم سنبله گندم و بررسی روش‌های مختلف مدیریت بیماری FHB و مایکوتوکسین‌ها می‌پردازد. این روش‌ها شامل اقدامات پیش از برداشت از جمله اقدامات زراعی، روش‌های شیمیایی، کنترل بیولوژیک و کنترل ژنتیکی که شامل اصلاح نژاد برای ایجاد مقاومت است و اقدامات پس از برداشت از جمله روش‌های فیزیکی، کنترل بیولوژیک، روش‌های شیمیایی و همچنین سنجش از دور برای پایش و فنوتیپینگ بیماری فوزاریوم سنبله است و بر اهمیت هر یک از این روش‌ها یا ترکیبی از روش‌ها برای افزایش اثربخشی مدیریت این بیماری تأکید می‌کند.

۲-گونه‌های فوزاریوم ایجاد کننده بیماری فوزاریوم سنبله گندم

قارچ *F. graminearum* مهم‌ترین عامل بیماری فوزاریوم سنبله گندم در سراسر جهان است (Summerell, 2019). با این حال مطالعات مختلف نشان داده‌اند که گونه‌های دیگر فوزاریوم ممکن است به طور قابل توجهی در بروز این بیماری در مناطق مختلف جهان با شرایط آب و هوایی متفاوت، نقش داشته باشند. به عنوان مثال در اروپا گونه‌هایی مانند *F. graminearum*، *F. culmorum*، *F. avenaceum*، *Fusarium poae* و *Fusarium tricinctum* گونه‌های غالب هستند (Oerke et al. 2010; Spanic et al. 2010; Nielsen et al. 2014). درکانادا، *F. avenaceum*، *F. equiseti*، *F. graminearum*، *F. poae* و *Fusarium sporotrichioides* شایع‌ترین گونه‌ها در دو دهه اخیر بوده‌اند (Xue et al. 2019).

۳- مایکوتوکسین‌های فوزاریوم و تاثیر آن بر سلامت انسان و حیوان

تأثیر مایکوتوکسین‌ها بر بدن می‌تواند مزمن (سمیت مزمن) یا حاد (سمیت حاد) باشد که به

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

مقدار یا دوز و مدت زمان قرار گرفتن درمعرض سموم بستگی دارد. اغلب اختلالاتی در متابولیسم پروتئین ها، چربی ها و کربوهیدرات ها رخ می‌دهد که منجر به اختلال در سنتز اسیدهای نوکلئیک می‌شود و در نهایت می‌تواند باعث آسیب به کلیه و کبد و همچنین ایجاد سرطان شود (Denning et al. 2006). اثرات اقتصادی آلودگی غذا و خوراک دام به مایکوتوکسین‌ها بسیار قابل توجه است. این مایکوتوکسین‌ها هزینه های مراقبت بهداشتی و دامپزشکی را افزایش می‌دهند، تولیدات دامی را کاهش می‌دهند و همچنین می‌توانند منجر به از دست رفتن جان انسان و حیوان شوند. گونه‌های جنس فوزاریوم اغلب ترکیبات تریکوتسنی، زئارالنون (ZEA) و فومونیسین را در غلات تولید می‌کنند (Yazar and Omurtag, 2008).

۴-استراتژی‌های کاهش فوزاریوم و مایکوتوکسین‌ها

۴-۱-استراتژی‌های پیش از برداشت

این استراتژی‌ها شامل تمام اقدامات پیشگیرانه قبل از برداشت محصول هستندو هدف از این اقدامات، کاهش تا حد ممکن خطر آلودگی محصولات به قارچ‌های تولید کننده مایکوتوکسین است. روش‌های زراعی، اصلاح نژاد و انتخاب روش‌های بیولوژیک و شیمیایی برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴-۱-۱-روش‌های زراعی و کشت

۴-۱-۱-۱-تناوب زراعی، کشت ارقام مقاوم، شخم و کود دهی

شخم زدن برای مدفون کردن بقایای گیاهی میزبان و تناوب زراعی با گیاهان غیر میزبان باعث کاهش شدت بیماری فوزاریوم سنبله گندم و تجمع سم دئوکسی نیوالنول (DON) در دانه می‌شود. محتوای دئوکسی نیوالنول در گندم برداشت شده از مزارعی با حداقل شخم یا بدون شخم از ۲/۱ تا ۱۵/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و از مزارعی که از شخم برگرداندار شخم زده شده بودند از ۰/۱ تا ۹/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. استفاده از شخم برگرداندار باعث کاهش متوسط محتوای DON در گندم تا ۳۳±۷ درصد می‌شود (Klix, 2007). علاوه بر نوع شخم، عمق شخم نیز بر روی جمعیت قارچ های فوزاریوم تأثیرگذار است. هر چه عمق شخم بیشتر باشد، جمعیت قارچ های جدا شده از خاک کمتر خواهد بود (Steinkellner and Langer, 2004). به‌کارگیری ارقام مقاوم همراه با اجرای تناوب زراعی مناسب و تنظیم تاریخ کاشت به‌منظور ایجاد تفاوت زمانی در آغاز گلدهی، نقش مؤثری در کنترل بیماری فوزاریوم سنبله دارد (Cowger et al. 2020). علاوه بر این کاهش فشار آلودگی در طول گلدهی گندم می‌تواند نقش مهمی در مدیریت بیماری داشته باشد. یک روش برای

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

کاهش فشار آلودگی، اجتناب از میزبان‌های زراعی فوزاریوم سنبله مانند ذرت به عنوان محصول قبلی در مزارع گندم است. در میسوتا، ایالات متحده، دریافتند که شدت بیماری فوزاریوم سنبله زمانی که گندم بعد از ذرت کشت شود، بیشتر و زمانی که بعد از سویا کشت شود، کمتر است. همچنین مشاهده شد که شدت بیماری فوزاریوم سنبله در مزارعی که شخم عمیق داشتند کمتر از مزارع شخم کم عمق یا بدون شخم است. به طور متوسط در تمام روش‌های شخم زدن، غلظت سم دئوکسی نیوالنول در تناوب سویا-گندم ۲۵٪ کمتر از تناوب گندم-گندم و ۴۹٪ کمتر از تناوب ذرت-گندم بود (Dill-Macky and Jones, 2000). در تحقیقی که در انتاریو کانادا انجام شده، دریافتند که شاخص بیماری فوزاریوم سنبله و سطح سم دئوکسی نیوالنول در گندم زمستانه در مزارعی که کشت حداقل یا بدون شخم داشته‌اند و کشت قبلی آن‌ها ذرت بوده، نسبت به مزارعی که شخم عمیق انجام شده بود، بالاتر بوده است (Schaafsma et al. 2005). کشت گیاهان ریشه‌ای و حبوبات می‌تواند به عنوان پیش‌کشت مناسب‌تر عمل کند و وقوع گونه‌های فوزاریوم را در سیستم‌های مختلف کشت محدود کند (Fernandez and Conner, 2011). مشخص شده است که عدم تناوب زراعی در کشت متداول غلات می‌تواند منجر به آلودگی بیشتر به گونه‌های فوزاریوم نسبت به سیستم کشاورزی ارگانیک در نروژ شود (Bernhoft et al. 2012). استفاده از کود های معدنی در کشاورزی می‌تواند خطر آلودگی به قارچ فوزاریوم را افزایش دهد. این قارچ‌ها عمدتاً از طریق نرخ تجزیه بقایای گیاهی، سرعت رشد گیاه و تغییرات در ساختار خاک و فعالیت بیولوژیک آن، محصول را آلوده می‌کنند. افزایش نیتروژن در خاک، احتمال آلودگی دانه به قارچ‌های فوزاریوم را بیشتر می‌کند. نوع کود نیز می‌تواند بر میزان آلودگی دانه به قارچ‌ها تأثیرگذار باشد، اما بر میزان DON تأثیری ندارد (Yi et al. 2001). در برخی مطالعات، مشخص شده است که گندم‌های زمستانه‌ای که با دوز بالای نیتروژن (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) کود دهی شده‌اند، نسبت به گندم‌هایی که با دوز پایین‌تر نیتروژن (۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) کوددهی شده‌اند، میزان مایکوتوکسین بیشتری را در خود تجمع می‌دهند (Podolska et al. 2017).

۴-۱-۱-۲-بذر، تاریخ کاشت و شرایط آب و هوایی

بذر با کیفیت بالا یک عنصر مهم در پیشگیری از بروز قارچ‌های بیماری‌زا مانند گونه‌های فوزاریوم و متابولیت‌های آن در کشت گیاهان است. بذر باید سالم باشد، بدون هیچ گونه نشانه‌ای از آسیب بتواند از نفوذ پاتوژن جلوگیری کند و همچنین

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

باید دارای قوه‌ی نامیه کافی باشد. تکنیک‌های مختلف تیمار می‌توانند برای بهبود قوه‌ی نامیه بذر استفاده شوند. تنها بذرهای با کیفیت بالا می‌توانند با عوامل نامطلوب در طول رشد مانند پاتوژن‌ها و آفات رقابت کنند (Jard et al. 2011). پارامترهای فیزیکی بذر از جمله رطوبت نیز مهم هستند. تاریخ مناسب کاشت نیز می‌تواند بر حفاظت محصول در برابر قارچ‌های بیماری‌زا تأثیر بگذارد. خطر آلودگی گیاه توسط قارچ‌های فوزاریوم و در نتیجه آلودگی به مایکوتوکسین‌ها همیشه زمانی که دوره‌ی گلدهی یک گیاه به تاریخ آزاد شدن اسپور قارچ نزدیک باشد، بیشتر است (Champeil et al. 2004). انواع زمستانه غلات مانند جو و گندم که بسیار زودتر از انواع بهاره رشد می‌کنند، نسبت به آلودگی به قارچ‌های جنس فوزاریوم کمتر حساس هستند (Jouany, 2007). تأثیر قابل توجه شرایط آب و هوایی بر توسعه بیماری‌های فوزاریومی نیز توسط مطالعات سایر محققان نشان داده شده است. با توجه به گرمایش جهانی و افزایش دما، احتمال شیوع گسترده این بیماری به ویژه در شرایط رطوبت بالا در آینده نزدیک وجود دارد (Shah et al. 2014).

۴-۱-۱-۳-مدیریت آبیاری

رطوبت یکی از عوامل کلیدی در گسترش بیماری فوزاریوم سنبله و تجمع سم DON در غلات به‌شمار می‌رود. ازاین‌رو، در شرایطی که بارندگی‌های شدید وجود ندارد، مدیریت دقیق آبیاری و جلوگیری از رطوبت بیش از حد در مزارع گندم می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی خطر بروز و توسعه بیماری فوزاریوم سنبله و تجمع DON را کاهش دهد. در یک مطالعه میدانی، اثر افزایش مدت‌زمان رطوبت پس از مرحله گلدهی بر شدت بیماری فوزاریوم سنبله، میزان DON، درصد دانه‌های آسیب‌دیده فوزاریومی (FDK) و نسبت دانه‌های آلوده به فوزاریوم، در چند رقم گندم زمستانه دانه نرم با درجات متفاوت مقاومت به بیماری، بررسی شد. در این پژوهش، خوشه‌ها در مرحله گلدهی با ماکروکونیدیوم‌های *F. graminearum* تلقیح شدند و نتایج نشان داد که به‌طور میانگین، اعمال مه‌پاشی به‌مدت ۱۰ یا ۲۰ روز پس از گلدهی، شدت بیماری، میزان DON، FDK و درصد دانه‌های آلوده به فوزاریوم را نسبت به تیمار بدون مه‌پاشی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد(Cowger et al. 2009). در حالی که اثر رطوبت در افزایش شدت بیماری فوزاریوم سنبله در بین مطالعات منتشر شده ثابت است، برخی از محققان کاهش DON را به دلیل آبیاری طولانی مدت پس از گلدهی گزارش کرده‌اند که نشان دهنده سود مندی رطوبت پس از گلدهی است (Gautam and Dill-Macky, 2012). با این حال، این سودمندی کاهش DON در مقایسه با

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

سودمندی حاصل از مدیریت آب برای کاهش شدت بیماری احتمالاً ناچیز است.

۴-۱-۱-۴-کاشت ارقام با ویژگی‌های زراعی نامطلوب برای آلودگی به فوزاریوم سنبله

برخی از صفات زراعی در غلات دانه ریز با مقاومت غیر فعال در برابر FHB مرتبط هستند. استفاده از این صفات می‌تواند اثر بخشی سایر استراتژی‌های مدیریت FHB را افزایش دهد. زمانی که دو جمعیت درون آمیزی زمستانه گندم به طور مصنوعی با *F. graminearum* تلقیح شدند، مشاهده شد که شدت بیماری فوزاریوم سنبله در گیاهان کوتاه‌تر به طور قابل توجهی بالاتر است (Buerstmayer et al. 2014). به طور مشابه در مطالعه‌ای دیگر دریافت شد که در شرایط طبیعی، ارقام پاکوتاه گندم زمستانه نسبت به ارقام پابلند بیشتر تحت تأثیر FHB قرار می‌گیرند با این حال، تلقیح مصنوعی منجر به واکنش‌های حساس در هر دو فنوتیپ شد (Mesterhazy, 1995). در فنوتیپ‌های پابلند، سنبله‌ها به دلیل قرار گرفتن در معرض بیشتر باد و جریان هوا، سریع‌تر از فنوتیپ‌های پاکوتاه خشک می‌شوند و این امر می‌تواند به طور قابل توجهی شدت بیماری را کُند کند. تجمع DON در دانه‌ها در بخش‌های خوابیده مزارع جو، گندم و جو دو سر بیشتر از سایر بخش‌ها مشاهده شده است (Nakajima et al. 2008). افزایش DON به دلیل خوابیدگی را می‌توان به حفظ رطوبت بیشتر و رطوبت بالاتر نزدیک سطح خاک نسبت به مکان‌های بالاتر در تاج گیاه که رطوبت نسبی توسط گردش هوا محدود می‌شود، نسبت داد.

۴-۱-۲-اصلاح نژاد و انتقال ژن برای مقاومت و انتخاب واریته

به‌نژادی ژنتیکی گیاهان چه از طریق کلاسیک و چه از طریق مولکولی که می‌تواند منجر به تولید ارقامی شود که یا مقاومت کامل و یا جزیی نسبت به این بیماری دارند، پایدارترین روش برای کاهش خسارت حاصل از این قارچ و آلودگی مایکوتوکسینی مواد خام کشاورزی است (Perincherry et al. 2019). چندین مؤلفه از مکانیسم‌های مقاومت غلات به آلودگی توسط گونه‌های فوزاریوم توصیف شده است: نوع I- مقاومت به آلودگی، نوع II- مقاومت به گسترش پاتوژن در سنبله، نوع III - به عنوان مقاومت به دئوکسی نیوالنول یا توانایی تجزیه آن، نوع IV- شامل تحمل گیاه به آلودگی و حضور دئوکسی نیوالنول و سایر متابولیت‌های ثانویه و نوع V- به عنوان مقاومت به تجمع و تخریب مایکوتوکسین‌ها در دانه با تبدیل آن‌ها به مشتقات غیرسمی (Kluger et al. 2015). در ایالات متحده آمریکا با بودجه USWBSI اقدام به تولید ارقام مقاوم گندم

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

و جو از طریق به‌نژادی کرده‌اند و توانسته‌اند ارقام با مقاومت نسبی در برابر FHB و DON تولید کنند. این ارقام و اطلاعات دقیق در مورد آن‌ها بر اساس ایالت و کلاس گندم و جو در وب سایت SCABSMART (http://www.scabsmart.org/) منتشر شده است. بیش از ۱۰۰ ژن مرتبط با مقاومت به بیماری FHB شناسایی شده است. یکی از مهم‌ترین این ژن‌ها، *Fhb1* نام دارد که از رقم گندم چینی "سومای ۳" به دست آمده و به طور گسترده به عنوان منبع مقاومت استفاده می‌شود. ژن *Fhb1* در بخش انتهایی بازوی بلند کروموزوم 3B گندم بهاره شناسایی شد (Cuthbert et al. 2006). مطالعه بعدی برای نقشه برداری از ژن *Fhb2* که بر مقاومت به بیماری فوزاریوم تأثیر می‌گذارد، این ژن را در کروموزوم 6B قرار داد (Cuthbert et al. 2007). یک ژن جدید مقاوم دیگر به بیماری فوزاریوم *Fhb3* است که این ژن در ناحیه انتهایی بازوی کوتاه کروموزوم شماره ۷ قرار دارد (Qi et al. 2008). در مطالعه‌ای دیگر، یک ژن مقاوم به FHB به نام *Fhb4* روی کروموزوم 4B گندم نان شناسایی شده است (Xue et al. 2010). همچنین مطالعه دیگری روی این گندم نشان داد که یک QTL روی کروموزوم 5A وجود دارد که به مقاومت نوع I فوزاریوم سنبله کمک می‌کند. بعدها مشخص شد که ژنی به نام *Fhb5* در این QTL قرار دارد (Xue et al. 2011). در ادامه طی تحقیقی ژن مقاوم به FHB به نام *Fhb6* که روی کروموزوم شماره ۱ علف چند ساله *Elymus tsukushiensis* بود شناسایی شد (Cainong et al. 2015). این ژن از طریق تلاقی بین‌گونه‌ای و انتقال کروموزومی دورگه‌ای و با استفاده از انتخاب به‌کمک نشانگرهای مولکولی به بازوی کوتاه کروموزوم 1A (1AS) گندم منتقل شد و حضور آن موجب کاهش حدود ۲۸ درصدی شدت بیماری فوزاریوم سنبله در گیاهان حاوی این ژن شد. علاوه بر این، نشان داده شد که کروموزوم 7A دارای یک QTL جدید دیگر برای FHB است که *Fhb7AC* نامیده می‌شود و ۲۲٪ از تغییرات فنوتیپی برای مقاومت نوع II و۲۴٪ برای مقاومت نوع III را توضیح می‌دهد (Jayatilake et al. 2011).

۴-۱-۳-روش‌های شیمیایی

کنترل شیمیایی مؤثر FHB باید با سایر روش‌های مدیریت تلفیقی همراه باشد. برای مؤثر بودن، کاربرد قارچ‌کش معمولاً در مرحله گلدهی یا حداکثر شش روز پس از گلدهی انجام می‌شود زیرا حساسیت به آلودگی‌های FHB در این مرحله به بالاترین حد می‌رسد (D'Angelo et al. 2014). به طور کلی عواملی که بر اثر بخشی قارچ‌کش‌ها تأثیر می‌گذارند عبارتند از مقاومت ارقام، آب و هوا، بازده اقتصادی یا افزایش محصول، نوع و دوز

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

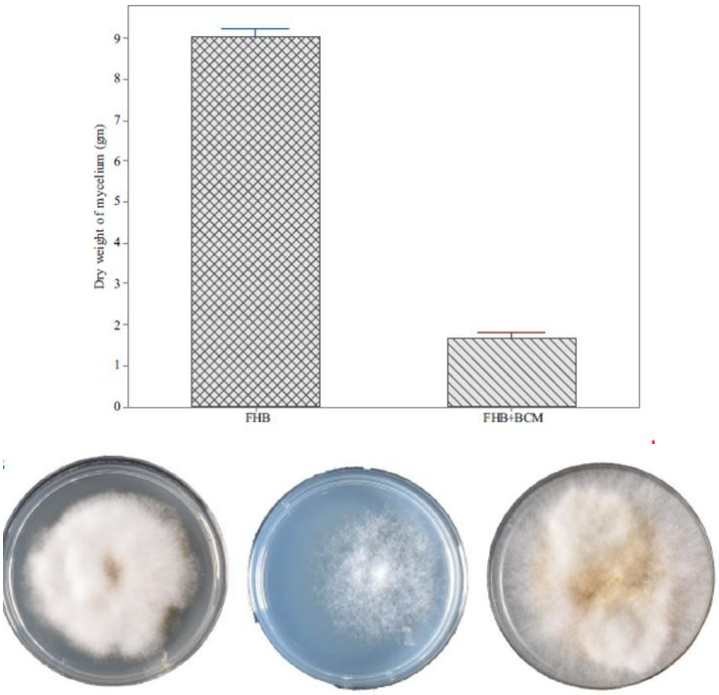
قارچ‌کش و مدیریت ورودی‌ها که شامل زمان وتعداد دفعات کاربرد می‌شود. گزارش‌های اخیر نشان می‌دهد که به دلیل استفاده بیش از حد از یک نوع قارچ‌کش، احتمال ایجاد مقاومت در قارچ‌ها بسیار زیاد است. این موضوع با شناسایی گونه‌ای از قارچ فوزاریوم در آمریکا که نسبت به قارچ‌کش تبوکونازول مقاوم شده و همچنین برخی سویه‌های مقاوم به بنزیمیدازول در چین تأیید می‌شود (Chen and Zhou, 2009; Spolti et al. 2014). نشان داده شده است که قارچ‌کش‌های مهار کننده دمتیلاسیون (DMI) مانند متاکونازول، پروتیوکونازول، بتوکونازول و ترکیب پروتیوکونازول + بتوکونازول نسبت به پروپیکونازول مؤثرتر هستند (Paul et al. 2018). عامل دیگری که بر کارایی قارچ‌کش تأثیر می‌گذارد نوع نازل و زاویه پاشش است. مطالعات نشان داده‌اند که پاشش جانبی (به سمت طرفین) در مقایسه با پاشش عمودی، مقدار قارچ‌کش در سنبله‌های گندم را تا ۱/۴۳ برابر افزایش می‌دهد (Lehoczki-Krsjack et al. 2015). علاوه بر این، افزایش پوشش سنبله از ۱۹ درصد به ۳۷ درصد، باعث کاهش قابل توجه شیوع FHB و مقدار DON در همه قارچ‌کش‌های مورد آزمایش شد (Mesterházy et al. 2011). لازم به ذکر است که استفاده از مواد شیمیایی در گیاهان، خطر کاهش کیفیت مواد اولیه و محصولات کشاورزی را در زمینه‌ی ایمنی و سلامت انسان افزایش می‌دهد.

۴-۱-۴-کنترل بیولوژیک گیاه در طول رویش (BMC)

مشخص کردن اندوفیت‌ها و نقش آن‌ها در کشاورزی، به ویژه در مقاومت گیاه در برابر بیماری‌ها، بسیار مهم است. عوامل بیولوژیک جایگزین مناسبی برای مواد شیمیایی هستند. این عوامل منشأ طبیعی دارند و عمدتاً شامل میکروارگانیسم‌های آنتاگونیست هستند. باکتری‌های جنس (*Bacillus*، *Pseudomonas* و *Lysobacter*) و همچنین قارچ‌های جنس (*Trichoderma*، *Cryptococcus* و *Clonostachys rosea*) به عنوان عوامل محدود کننده‌ی پاتوژن‌های گیاهی در نظر گرفته می‌شوند. در پژوهشی از شش ایزوله باکتریایی شامل *Pseudomonas tolaasii* و *Serratia marcescens* در یک ژنوتیپ گندم نان بهاره Sw151002، در شرایط آزمایشگاهی علیه ایزوله‌های *F. graminearum* استفاده شد. میزان وزن خشک میسلیوم قارچ فوزاریوم تحت تأثیر BCM به طور قابل توجهی کاهش یافت و این امر باعث کاهش شدت بیماری فوزاریوم سنبله و همچنین منجر به کاهش قابل توجه تجمع DON در دانه (۴۷ ٪) شد و مقاومت نوع V را القا کرد (شکل ۱).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]



شکل ۱- آزمون آنتاگونیستی کاهش رشد میسلیومی ناشی از BCM (Thuraga et al. 2024)

کلروفیل سنبله در نمونه‌های تیمار شده باFHB به طور قابل توجهی کاهش یافت، اما اعمال BCM این کاهش را تا حدود ۹٪ تعدیل و کلروفیل سنبله را حفظ کرد. حفظ کلروفیل سنبله می‌تواند عامل حیاتی برای عدم کاهش محصول و مقاومت به بیماری باشد. اثر آنتاگونیستی BCM بر FHB منجر به حفظ اندازه و حجم کل دانه و در نتیجه عملکرد بهتر می‌شود (Thuraga et al. 2024).

اثرات بازدارندگی رشد سودوموناس بر روی فوزاریوم از طریق تولید آنتی‌بیوتیک باکتریایی پیرولنیترین انجام می‌شود که علیه آلودگی FHB عمل می‌کنند (Huang et al. 2018). باکتری *Serratia marcescens* یکی از باکتری‌های کیتینولیتیک شامل دو ژن رمزگذار کتیناز به نام‌های *chiA* و *chiB* می‌باشد که روی پیوندهای گلیکوزیدی ۴ و ۱ -β دیواره سلولی کیتین عمل می‌کنند و باعث تخریب یکپارچگی ساختاری دیواره سلولی شده و منجر به مهار رشد میسلیوم قارچ فوزاریوم می‌شود (Guo et al. 2020). نتایج حاصل از آزمایش‌های میدانی یکنواخت انجام شده در ایالات متحده نشان می‌دهد که در بیشتر موارد، عوامل کنترل بیولوژیک مورد استفاده در سرکوب FHB و DON هنگامی که به تنهایی استفاده می‌شوند، مؤثر نبوده‌اند، اما در برخی موارد، کارایی قارچ‌کش‌های دی متیل (DMI) را افزایش می‌دهند. بر اساس این نتایج، به نظر می‌رسد که عوامل کنترل بیولوژیک زمانی که به صورت تلفیقی با قارچ‌کش‌ها استفاده شوند، به

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

ویژه اگر بتوانند سنبله‌ها را در دوره فاصله تا برداشت، دوره‌ای که در آن استفاده از قارچ‌کش‌های شیمیایی مجاز نیست محافظت کنند، مؤثرتر هستند (McMullen et al. 2012).

۴-۲-استراتژی‌های پس از برداشت

در استراتژی‌های پس از برداشت، آموزش و آگاه کردن کشاورزان در زمینه کاربرد روش‌های مختلف، به ویژه شیوه‌های مطلوب کشاورزی که مقدار مایکوتوکسین‌ها را در محصولات کشاورزی محدود می‌کند، نقش مهمی ایفا می‌کند. روش‌های فیزیکی، بیولوژیک و شیمیایی برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴-۲-۱-روش‌های فیزیکی

تمام فعالیت‌های فیزیکی مرتبط با آماده سازی غلات برای ذخیره سازی می‌توانند نقش کلیدی در جلوگیری از آلودگی مایکوتوکسین‌ها داشته باشند. برای اطمینان از ذخیره سازی مناسب غلات، باید بلافاصله پس از برداشت تا رطوبت مناسب خشک شوند. این فرآیند تولید مایکوتوکسین ها را کاهش یا حتی از بین می‌برد (Chulze, 2010). درحین پوست کنی (دستی یا مکانیکی) باید مراقب بود تا آسیب به دانه به حداقل برسد، زیرا این امر باعث افزایش آلودگی به مایکوتوکسین‌ها می‌شود. مرتب‌سازی، شستشو یا آسیاب کردن غلات نیز در کاهش میزان مایکوتوکسین‌ها مهم است. مرتب سازی نوری که در دهه ۱۹۶۰ معرفی شد، از نور ماوراء بنفش یا مرتب سازی اپتو الکترونیکی استفاده می‌کند (Karlovsky et al. 2016). بخش بزرگی از مایکوتوکسین‌ها در دانه‌های آسیب دیده، مواد ریز و گردوغبار یافت می‌شوند، بنابراین تمیز کردن سطح دانه نیز توصیه می‌شود که باعث بهبود شرایط بهداشتی به ویژه در جلوگیری از کلونی سازی توسط قارچ‌های جنس فوزاریوم و تجمع متابولیت‌های ثانویه آن‌ها می‌شود (Mielniczuk & Skwaryło-Bednarz, 2020). دمای ذخیره سازی نیز بسیار مهم است و زمانی که این پارامترها تنظیم شوند آلودگی به مایکوتوکسین بسیار نادر است. یک روش امیدوار کننده روش جذب است که از عوامل چند جزئی مانند آلومینو سیلیکات‌ها و سیپولیت‌ها یا کربن فعال استفاده می‌کند و قادر به جذب ۱۰۰٪ فومونیسین B_1 است (Camilo et al. 2000). اثر ضدقارچی اُزن و پلاسمای سرد نیز امید زیادی را برای استریل کردن بذرهای گیاهان مختلف از جمله غلات بوجود آورده است. تولید گاز اُزن از طریق تخلیه الکتریکی اکسیژن به طور قابل توجهی به کاهش میزان دئوکسی نیوالنول در دانه گندم کمک می‌کند (Trombete et al. 2016).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

۴-۲-۲-کنترل بیولوژیک

دو گروه اصلی از نحوه عملکرد میکروارگانیسم‌ها را می‌توان بر اساس جذب و تبدیل مایکوتوکسین‌ها متمایز کرد. یک راه حل، استفاده از میکروارگانیسم‌های متصل شونده به مایکوتوکسین به ویژه باکتری‌های اسید لاکتیک و همچنین باکتری‌های اسید پروپیونیک و کلی باسیل است. نشان داده شده است که مکانیسم مسئول حذف زئارالنون (ZEA) و مشتق آلفا-زئارالنون (α-ZEA) آن توسط گونه *Lactobacillus rhamnosus*، جذب سم به دیواره سلولی باکتریایی و نه جذب به داخل سلول است (El-Nezami et al. 2002). در مطالعه دیگری، باکتری‌های اسید لاکتیک، *Pediococcus acidilactici*، *Lactobacillus sakei* و *Pediococcus pentosaceus* محتوای DON در نمونه‌های دانه گندم مالت را تا ۴۷٪ و *Pediococcus acidilactici* و *Pediococcus pentosaceus* محتوای ZEA را تا ۳۸-۳۷٪ کاهش داد (Juodeikiene et al. 2018). طی مطالعه‌ای میزان جذب بسیار بالای زئارالنون (۹۹-۹۵٪) توسط سلول‌های *Lactobacillus plantarum* گزارش شده است (Čvek et al. 2012). گروه دوم روش‌ها بر اساس تجزیه یا تبدیل مایکوتوکسین‌ها است. زئارالنون می‌تواند به ترکیبات مزدوجی مانند گلیکوزیدهای ZEA و سولفات‌های ZEA تبدیل شود که متابولیت‌هایی با سمیت کمتر هستند، همانطور که در مطالعه‌ای روی موش‌های صحرایی نر تغذیه شده با دوزهای ۴۰۰ و ۸۰۰ ppm ZEA خوراکی تأیید شد و متابولیت‌های مزدوج آن گلیکوزیدها و سولفات‌های (ZEA) در ادرار، مدفوع و بافت‌های کبدی شناسایی شدند. این متابولیت‌ها سمیت استروژنیک بسیار کمتری نسبت به ZEA اصلی نشان دادند، به‌طوری‌که دوز کشنده ۵۰٪ (LD50) آن‌ها بیش از ۱۰ برابر ZEA اولیه بود و اثرات اختلال هورمونی کمتری در موش‌ها ایجاد کردند (Plasencia and Mirocha, 1991). سولفونه شدن ZEA آسپرژیلوس-نایجر نیز منجر به تشکیل یک ترکیب با سمیت کم‌تر می‌شود. شواهد زیادی برای تخریب مایکوتوکسین‌های تریکوتسن توسط میکروارگانیسم‌های جدا شده از دستگاه گوارش گاو و خوک‌ها وجود دارد (Kollarczik et al. 1994). از روش‌های بیولوژیک دیگر، استفاده از میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌های گروه آگروباکتریوم- ریزوبیوم هستند که گروه هیدروکسیل در موقعیت C3 دئوکسی نیوالنول را اکسید کرده و به کتون تبدیل می‌کنند (Völkl et al. 2004).

۴-۲-۳- روش‌های شیمیایی

استراتژی‌های مرتبط با غیر فعال‌سازی شیمیایی مایکوتوکسین‌ها عمدتاً شامل تخریب یا غیر

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

فعال‌سازی مایکوتوکسین-ها توسط اسیدها، بازها، ترکیبات اکسید کننده و احیا کننده یا ترکیبات کلر است. نتایج خوبی با استفاده از اسیدهای آلی مانند سیتریک و لاکتیک اسید در کاهش غلظت مایکوتوکسین‌های معمول، به ویژه DON و مشتق آن، 15Ac-DON و NIV حاصل شده است (Humer et al. 2016). تحقیقات علمی نشان می‌دهد که استفاده از آمونیوم هیدروکسید نیز غلظت فومونیسین‌ها، به ویژه FB1 را ۳۰-۴۵٪ کاهش می‌دهد. همچنین نشان داده شده است که استفاده از سولفات هیدروژن در غیر فعال‌سازی یک یا چند مایکوتوکسین مؤثر است (Vanhoutte et al. 2016). لازم به ذکر است که افزودن هر گونه ماده شیمیایی ممکن است بر خواص حسی، عملکردی و مهم تر از همه، خواص تغذیه‌ای محصولات و فرآورده‌های تهیه شده از آن‌ها تأثیر منفی بگذارد.

۴-۳-سنجش از دور برای پایش و فنوتیپینگ بیماری فوزاریوم سنبله

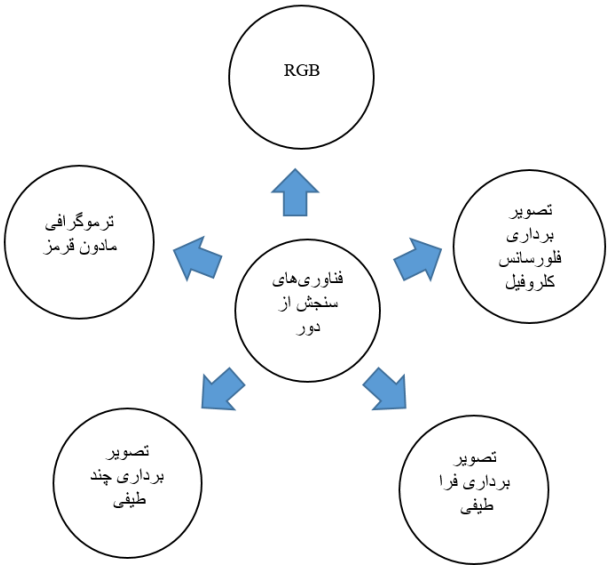
حسگرهای نوری از جمله فناوری‌های سنجش از دور هستند که به طور گسترده‌ای در پایش بیماری‌های گیاهی و فنوتیپینگ گیاهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۲). این حسگرها شامل تصویر برداری RGB (باندهای قرمز، سبز و آبی)، تصویر برداری چند طیفی و فرا طیفی در محدوده مرئی نزدیک مادون قرمز و محدوده مادون قرمز کوتاه، ترموگرافی مادون قرمز در محدوده طیفی ۱۴۰۰۰-۷۵۰۰ نانومتر و تصویر برداری فلورسانس کلروفیل هستند (Mahlein, 2016).

۴-۳-۱-تکنیک‌های طیفی

حسگرهای طیفی بازتاب طیفی یک شیء را اندازه‌گیری می‌کنند. بر اساس تعداد باندهای طیفی ثبت شده، این حسگرها به دو دسته چند طیفی (Multi Spectral sensors) و فرا طیفی (Hyper Spectral Sensors) تقسیم می‌شوند.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]



شکل ۲- حسگرهای طیفی در مدیریت یکپارچه بیماری FHB (Alisaac and Mahlein, 2023)

حسگرهای چند طیفی بازتاب طیفی باندهای طیفی جداگانه (مانند باندهای RGB یا باندهای خاص در محدوده مادون قرمز نزدیک) را ثبت می‌کنند. در حالی که حسگرهای فرا طیفی بازتاب طیفی را در تعداد زیادی از باندهای طیفی در طیف الکترومغناطیسی از ۲۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر ثبت می‌کنند. این اطلاعات با رنگدانه‌های گیاهی، ترکیبات شیمیایی و محتوای آب گیاه مرتبط است (Mahlein et al. 2018). در مطالعه‌ای، امکان سنجی استفاده از تصویربرداری فرا طیفی (Hyper Spectral Imaging) در محدوده طیفی مرئی (VIS) و نزدیک مادون قرمز (NIR) برای تشخیص زود هنگام بیماری FHB با استفاده از داده‌های شرایط کنترل شده و میدانی بررسی شد. نتایج نشان دادند که بهترین زمان برای تشخیص بیماری در ابتدای مرحله شیری (GS71-85 طبق مقیاس لانکشایر) است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای آشکار سازی طول موج‌های مرتبط با بافت سالم و بیمار گندم استفاده شد. بر اساس این رویکرد، نواحی سالم و بیمار سنبله گندم به ترتیب با دقت ۱۰۰ و ۹۴ ٪ طبقه بندی شدند (Bauriegel et al. 2011; Lancashire et al. 1991). یک نگاشت زاویه طیفی (SAM) نیز توانست ناحیه بیمار را با دقت ۸۷ ٪ طبقه بندی کند. با این حال، عیب اصلی SAM، زمان بر بودن آن است. طی تحقیقی برتری تصویر برداری فرا طیفی(HSI) در تشخیص FHB در شرایط کنترل شده نسبت به شرایط میدانی در مرحله رشد GS71-73 نشان داده شده است (Menesatti et al. 2013). علاوه بر این، HSI نتایج امیدوار کننده‌ای را به عنوان یک

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

روش سریع، غیر تهاجمی و غیر مخرب برای پیش غربالگری آلودگی فوزاریوم و آلودگی به مایکوتوکسین در مقیاس دانه و آرد نشان داد. این امر می‌تواند با جایگزینی روش‌های شیمیایی پر زحمت و پر هزینه، فرایند مرتب‌سازی دانه را تسریع کند. در مطالعه‌ای دیگر در شرایط مزرعه از بازتاب طیفی در محدوده‌های NIR، VIS و SWIR برای تشخیص FHB استفاده کردند. شش باند طیفی مرتبط با FHB با استفاده از تحلیل موجک پیوسته استخراج شد. سپس، از این باندها برای ایجاد یک مدل تفکیک کننده با استفاده از تحلیل تشخیص خطی فیشر (FLDA) استفاده شد. آن‌ها با استفاده از این مدل به دقت ۸۹ ٪ در تشخیص FHB در شرایط مزرعه دست یافتند (Ma et al. 2020).

پهپادها (unmanned aerial vehicle) ابزاری مؤثر و انعطاف‌پذیر برای اخذ تصاویر با وضوح بالا از مساحت‌های بزرگ در زمان کوتاه و با هزینه کم هستند. در پژوهشی از تصاویر فرا طیفی UAV برای تشخیص کمی FHB در مزرعه استفاده کردند. آن‌ها با ترکیب ویژگی‌های طیفی و تصویری به دست آمده از UAV، آلودگی مزرعه را به عفونت خفیف، متوسط و شدید طبقه بندی کردند (Zhang et al. 2022).

۲-۳-۴- ترموگرافی مادون قرمز

ترموگرافی مادون قرمز دمای گیاه را تعیین می‌کند که بازتاب دهنده وضعیت آب گیاه است. پاتوژن‌های گیاهی بر تعادل آب در بافت گیاه تأثیر می‌گذارند و این اثر را می‌توان به طور غیر مستقیم اندازه گیری و به عنوان یک تصویر کاذب رنگی توسط IRT تجسم کرد. حداکثر اختلاف دما (MTD) و میانگین اختلاف دما (ΔT) پارامترهایی هستند که از IRT مشتق شده و می‌توانند با موفقیت در تشخیص بیماری گیاه استفاده شوند. MTD تفاوت بین حداکثر و حداقل دمای درون شیء را نشان می‌دهد، در حالی که ΔT تفاوت بین میانگین دمای هوای محیط و میانگین دمای شیء را نشان می‌دهد. این پارامترها با استفاده از رویکرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای تشخیص FHB در مقیاس سنبله با موفقیت پیاده سازی شدند (Mahlein et al. 2019).

۲-۳-۴- تصویر برداری فلورسانس کلروفیل

تصویربرداری فلورسانس کلروفیل وضعیت فتوسیستم II (PSII) گیاه را ارزیابی می‌کند. فلورسانس پایه (Fo) میزان نور فلورسانسی اطلاق می‌شود که از کلروفیل‌های گیاه در شرایط تاریکی یا پس از توقف نور منتشر می‌شود. این فلورسانس پایه، زمانی اندازه‌گیری می‌شود که گیاه تحت شرایط عادی قرار دارد و هیچ گونه تحریک نوری

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

شدید یا تغییرات محیطی در حال رخ دادن نیست. فلورسانس حداکثر (Fm) به حداکثر میزان نور فلورسانسی گفته می‌شود که پس از تحریک سریع گیاه با یک پالس نوری اشباع‌کننده اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری آن گیاه ابتدا در تاریکی قرار می‌گیرد تا فتوسیستم II در حالت غیرفعال قرار گیرد سپس یک پالس نوری بسیار شدید، به حدی شدید که تمام سیستم فتوسیستم II را تحریک کند، به گیاه می‌تابانند و میزان فتوسنتز را اندازه‌گیری می‌کنند و فلورسانس متغیر (Fv) تفاوت بین Fm و Fo را نشان می‌دهد. نسبت Fv/Fm حداکثر بازده کوانتومی فتوشیمی فتوسیستم PSII II را نشان می‌دهد که برای گیاه سالم که تحت تنش نیست، میزان آن برابر با مقدار ثابت تقریباً ۰/۸۳ است که در حقیقت به عنوان یک عدد مرجع برای مقایسه با گیاه تحت تنش که آسیب فتوسنتزی دیده است، استفاده می‌شود (Baker, 2008) آلودگی FHB باعث کاهش قابل توجه فعالیت فتوسنتزی سنبله‌های گندم می‌شود، این کاهش را می‌توان با تصویر برداری فلورسانس کلروفیل تشخیص داد (Bauriegel et al. 2011).

نتیجه گیری

بیماری فوزاریوم سنبله یک بیماری مخرب در غلات از جمله گندم است که باعث کاهش قابل توجه عملکرد و کیفیت محصول می‌شود. این بیماری سالانه میلیاردها دلار خسارت در سطح جهانی ایجاد می‌کند. استفاده از روش‌های منفرد برای کاهش تولید مایکوتوکسین و مدیریت بیماری فوزاریوم سنبله گندم به اندازه کافی مؤثر نیست. بنابراین، ترکیب روش‌های مختلف از جمله روش‌های زراعی مناسب با استفاده از تناوب زراعی با گیاهان غیر میزبان، انتخاب ارقام مقاوم و کاشت ارقام با ویژگی‌های زراعی نامناسب برای آلودگی FHB، شخم وکود دهی، انتخاب بذر مناسب، تاریخ کاشت و مدیریت آبیاری، به‌نژادی ژنتیکی به منظور ایجاد مقاومت در برابر بیماری، کنترل بیولوژیک و استفاده از القاکنندگان مقاومت از جمله میکروارگانیسم‌های آنتاگونیست، اندوفیت‌ها و مواد فعال زیستی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. ایجاد شرایط مناسب برای نگهداری غلات پس از برداشت نیز بسیار مهم است. این روش‌ها که شامل استفاده از سویه‌های باکتریایی آنتاگونیست و همچنین برخی روش‌های فیزیکی مانند مرتب‌سازی نوری و یا اوزون زایی می‌باشند، نتایج خوبی را ارائه می‌دهند. با این حال، پیش بینی و پایش بیماری به تصمیم گیری برای استفاده از روش‌های فوق در طول فصل رشد کمک خواهد کرد. علاوه بر این برداشت گزینشی با اجتناب از مناطق آلوده به مایکوتوکسین، یک ابزار مفید برای کاهش آلودگی به مایکوتوکسین در دانه‌های برداشت شده است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

از ایـــن دیـــدگاه، حســـگرهای نـــوری بـــه ویـــژه حسگرهای مادون قرمز، ابزارهای امیدوار کننده‌ای برای پایش عفونت FHB در گندم است.

فهرست منابع References

Alisaac E, Mahlein AK. 2023. Fusarium head blight on wheat: Biology, modern detection and diagnosis and integrated disease management. Toxins. 15(3): 192. https://doi.org/10.3390/toxins15030192.

Bai G, Shaner G. 2004. Management and resistance in wheat and barley to Fusarium head blight. Annual Reviews of Phytopathology. 42: 135–161. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040803.140340.

Baker NR. 2008. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo*. Annual Review of Plant Biology. 59: 89–113. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.

Bauriegel E, Giebel A, Geyer M, Schmidt U, Herppich WB. 2011. Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper- spectral imaging. Computers Electronic in Agriculture. 75: 304–312. https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.006.

Bauriegel E, Giebel A, Herppich WB. 2011. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging to analyse the impact of Fusarium culmorum on the photosynthetic integrity of infected wheat ears. Sensors. 11: 3765–3779. https://doi.org/10.3390/s110403765.

Bernhoft A, Torp M, Clasen PE, Løes AK. 2012. Influence of agronomic and climatic factors on Fusarium infestation and mycotoxin contamination of cereals in Norway. Food Additives & Contaminants. 29: 1129–1140. https://doi.org/10.1080/19440049.2012.672476.

Buerstmayr H, Steiner B, Lemmens M, Ruckenbauer P. 2014. Resistance to Fusarium head blight in winter wheat: heritability and trait associations. Crop Science. 40: 1012e1018. https://doi.org/10.2135/cropsci2000.4041012x.

Čvek D, Markov K, Frece J, Friganović M, Duraković L, Delaš F. 2012. Adhesion of zearalenone to the surface of lactic acid bacteria cells. Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology and Nutrition. 7: 49–52.

Cainong JC, Bockus WW, Feng Y, Chen P, Qi L, Sehgal SK, Danilova TV, Koo DH, Friebe B, Gill BS. 2015. Chromosome engineering, mapping, and transferring of resistance to Fusarium head blight disease from *Elymus tsukushiensis* into wheat. Theoretical and Applied Genetics. 128: 1019-1027. https://doi.org/10.1007/s00122-015-2485-1.

Camilo SB, Ono CJ, Ueno Y, Hirooka EY. 2000. Anti-Fusarium moniliforme activity and fumonisin biodegradation by corn and silage microflora. Brazilian Archives of Biology and Technology. 43: 2. https://doi.org/10.1590/S1516-89132000000200004.

Champeil A, Fourbet JF, Dore T, Rossignol L. 2004. Influence of cropping system on Fusarium head blight andmycotoxin levels in winter wheat. Crop Protection. 23: 531–537. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.011.

Chen Y, Zhou MG. 2009. Characterization of Fusarium graminearum isolates resistant to both carbendazim and a new fungicide JS399-19. Phytopathology. 99: 441-446. https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-4-0441.

Chulze SN. 2010. Strategies to reduce mycotoxin levels in maize during storage: A review. Food Additives and Contaminants Part A. 27: 651–657. https://doi.org/10.1080/19440040903573032.

Cowger C, Patton-Özkurt J, Brown-Guedira G, Perugini L. 2009. Post-anthesis moisture increased Fusarium head blight and deoxynivalenol levels in North Carolina winter wheat. Phytopathology. 99: 320-327. https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-4-0320.

Cowger C, Smith J, Boos D, Bradley CA, Ransom J, Bergstrom GC. 2020. Managing a destructive, episodic crop disease: A national survey of wheat and barley growers' experience with Fusarium head

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

blight. Plant Disease. 104: 634–648. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-18-1803-SR.

Cuthbert PA, Somers DJ, Brule-Babel A. 2007. Mapping of *Fhb2* on chromosome 6BS: a gene controlling Fusarium head blight field resistance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Theoretical and Applied Genetics. 114: 429-437. https://doi.org/10.1007/s00122-006-0439-3.

Cuthbert PA, Somers DJ, Thomas J, Cloutier S, Brule-Babel A. 2006. Fine mapping *Fhb1*, a major gene controlling Fusarium head blight resistance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Theoretical and Applied Genetics. 112: 1465-1472. https://doi.org/10.1007/s00122-006-0249-7.

D'Angelo DL, Bradley CA, Ames KA, Willyerd KT, Madden LV, Paul PA. 2014. Efficacy of fungicide applications during and after anthesis against Fusarium head blight and deoxynivalenol in soft red winter wheat. Plant Disease. 98: 1387-1397. https://doi.org/10.1094/PDIS-01-14-0091-RE.

Denning DW, Driscoll BR, Hogaboam CM. 2006. The link between fungi and severe astma: A sumary of the evidence. European Respiratory Journal. 27: 615–626. https://doi.org/10.1183/09031936.06.00074705.

Dill-Macky R, Jones RK. 2000. The effect of previous crop residues and tillage on Fusarium head blight of wheat. Plant Disease. 84: 71-76. https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.1.71.

El-Nezami H, Polychronaki N, Salminen S, Mykkänen H. 2002. Binding rather than metabolism may explain the interaction of two food-grade *Lactobacillus* strains with zearalenone and its derivative á-zearalenol. Applied and Environmental Microbiology. 68: 3545–3549. https://doi.org/10.1128/AEM.68.7.3545-3549.2002.

Fernandez MR, Conner RL. 2011. Root and crown rot of wheat. Prairie Soils Crops Journal. 4: 151–157.

Ferrigo D, Raiola A, Causin R. 2016. Fusarium toxins in cereals: Occurrence, legislation, factors promoting the appearance and their management. Molecules. 21: 627. https://doi.org/10.3390/molecules21050627.

Gautam P, Dill-Macky R. 2012. Free water can leach mycotoxins from Fusarium infected wheat heads. Journal of Phytopathology. 60: 484-490. https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2012.01928.x.

Guo Z, Zhang X, Wu J, Yu J, Xu M, Chen D, Zhang Z, Li X, Chi Y, Wan SH. 2020. *In vitro* inhibitory effect of the bacterium *Serratia marcescens* on *Fusarium proliferatum* growth and fumonisins production. Biological Control. 143: 104188. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104188.

Huang R, Feng ZH, Chi X, Sun X, Lu Y, Zhang B, Lu R, Luo W, Wang Y, Miao J, Ge Y. 2018. Pyrrolnitrin is more essential than phenazines for *Pseudomonas chlororaphis* G05 in its suppression of *Fusarium graminearum*. Microbiological Research. 215: 55–64. https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.06.008.

Humer E, Lucke A, Harder H, Metzler-Zebeli BU, Böhm J, Zebeli O. 2016. Effects of citric and lactic acid on the reduction of deoxynivalenol and its derivatives in feeds. Toxins. 8: 285. https://doi.org/10.3390/toxins8100285.

Jard G, Liboz T, Mathieu F, Guyonvarc'h A, Lebrihi A. 2011. Review of mycotoxin reduction in food and feed: From prevention in the field to detoxification by adsorption or transformation. Food Additives and Contaminants. Part A. 28: 1590–1609. https://doi.org/10.1080/19440049.2011.595377.

Jayatilake D, Bai G, Dong Y. 2011. A novel quantitative trait locus for Fusarium head blight resistance in chromosome 7A of wheat. Theoretical and Applied Genetics. 122: 1189-1198. https://doi.org/10.1007/s00122-010-1523-2.

Jouany JP. 2007. Methods for preventing, decontaminating and minimizing the toxicity of mycotoxins in feeds. Animal Feed Science and Technology. 137: 342–362. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.06.009.

Juodeikiene G, Bartkiene E, Cernauskas D, Cizeikiene D, Zadeike D, Lele V, Bartkevics V. 2018. Antifungal activity of lactic acid bacteria and their application for Fusarium mycotoxinreduction in malting wheat grains. Food Science and Technology. 89: 307–314.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.10.061.

Karlovsky P, Suman M, Berthiller F, Meester J, Eisenbrand G, Perrin I, Oswald IP, Speijers G, Chiodini A, Recker T, Dussort P. 2016. Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination. Mycotoxin Research. 32: 179–205. https://doi.org/10.1007/s12550-016-0257-7.

Klix MB. 2007. Major mycotoxin producin Fusarium species in wheat-factors affecting the species complex composition and disease management. Cuvillier Verlag, Germany.

Kluger B, Bueschl C, Lemmens M, Michlmayr H, Malachova A, Koutnik A, Maloku I, Berthiller F, Adam G, Krska R, Schuhmacher R. 2015. Biotransformation of the mycotoxin deoxynivalenol in Fusarium resistant and susceptible near isogenic wheat lines. PLoS ONE. 10: e0119656. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119656.

Kollarczik B, Gareis M, Hanelt M. 1994. *In vitro* transformation of the *Fusarium* mycotoxins deoxynivalenol and zearalenone by the normal gut microflora of pigs. Nature Toxins. 2: 105–110. https://doi.org/10.1002/nt.2620020303.

Lancashire PD, Bleiholder H, van den Boom T, Langelüddeke P, Stauss R, Weber E, Witzenberger A. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. Annals of Applied Biology. 119: 561–601. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x.

Lehoczki-Krsjak S, Varga M, Mesterházy Á. 2015. Distribution of prothioconazole and tebuconazole between wheat ears and flag leaves following fungicide spraying with different nozzle types at flowering. Pest Management Science. 71: 105–113. https://doi.org/10.1002/ps.3774.

Ma H, Huang W, Jing Y, Pignatti S, Laneve G, Dong Y, Ye H, Liu L, Guo A, Jiang J. 2020. Identification of Fusarium head blight in winter wheat ears using continuous wavelet analysis. Sensors. 20: 20. https://doi.org/10.3390/s20010020.

Mahlein AK, Alisaac E, al Masri A, Behmann J, Dehne HW, Oerke EC. 2019. Comparison and combination of thermal, fluorescence, and hyperspectral imaging for monitoring Fusarium head blight of wheat on spikelet scale. Sensors. 19: 2281. https://doi.org/10.3390/s19102281.

Mahlein AK, Kuska MT, Behmann J, Polder G, Walter A. 2018. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: State of the art. Annual Review of Phytopathology. 56: 535–558. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050100.

McMullen M, Bergstrom G, de Wolf E, Dill-Macky R, Hershman D, Shaner G, van Sanford D. 2012. A unified effort to fight an enemy of wheat and barley: Fusarium head blight. Plant Disease. 96: 1712–1728. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-12-0291-FE.

Menesatti P, Antonucci F, Pallottino F, Giorgi S, Matere A, Nocente F, Pasquini M, D'Egidio MG, Costa C. 2013. Laboratory vs. in-field spectral proximal sensing for early detection of Fusarium head blight infection in durum wheat. Biosystem Engineering. 114: 289–293. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.004.

Mesterhazy A. 1995. Types and components of resistance to Fusarium head blight of wheat. Plant Breeding. 114: 377-386. https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1995.tb00816.x.

Mesterházy Á, Tóth B, Varga M, Bartók T, Szabó-Hevér Á, Farády L, Lehoczki-Krsjak S. 2011. Role of fungicides, application of nozzle types, and the resistance level of wheat varieties in the control of Fusarium head blight and deoxynivalenol. Toxins. 3: 1453–1483. https://doi.org/10.3390/toxins3111453.

Mielniczuk E, Skwaryło-Bednarz B. 2020. Fusarium head blight, mycotoxins and strategies for their reduction. Agronomy. 10(4): 509. https://doi.org/10.3390/agronomy10040509.

Nakajima T, Yoshida M, Tomimura K. 2008. Effect of lodging on the level of mycotoxins in wheat, barley, and rice infected with the *Fusarium graminearum* species complex. Journal of General Plant Pathology. 74: 289-295. https://doi.org/10.1007/s10327-008-0103-7.

Nielsen LK, Cook DJ, Edwards SG, Ray RV. 2014. The prevalence and impact of Fusarium head blight pathogens and mycotoxins on malting barley quality in UK. International Journal of Food Microbiology.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

179: 38–49. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.03.023.

Oerke EC, Meier A, Dehne HW, Sulyok M, Krska R, Steiner U. 2010. Spatial variability of Fusarium head blight pathogens and associated mycotoxins in wheat crops. Plant Pathology. 59: 671–682. https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02286.x.

Parry DW, Jenkinson P, McLeod L. 1995. Fusarium ear blight (scab) in small grain cereals e a review. Plant Pathology. 44: 207-238. https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb02773.x.

Paul PA, Bradley CA, Madden LV, Dalla Lana F, Bergstrom GC, Dill-Macky R, Esker PD, Wise KA, McMullen M, Grybauskas A, Kirk WW, Milus E, Ruden K. 2018. Meta-analysis of the effects of QoI and DMI fungicide combinations on Fusarium head blight and deoxynivalenol in wheat. Plant Disease. 102: 2602–2615. https://doi.org/10.1094/PDIS-02-18-0211-RE.

Perincherry L, Lalak-Kańczugowska J, Stępień Ł. 2019. Fusarium-produced mycotoxins in plant-pathogen interactions. Toxins. 11: 664. https://doi.org/10.3390/toxins11110664.

Plasencia J, Mirocha CJ. 1991. Isolation and characterization of zearalenone sulfate produced by *Fusarium* spp. Applied and Environmental Microbiology. 57: 146–150. https://doi.org/10.1128/aem.57.1.146-150.1991.

Podolska G, Bryła M, Sułek A, Waśkiewicz A, Szymczyk K, Jędrzejczak R. 2017. Influence of the cultivar and nitrogen fertilisation level on the mycotoxin contamination in winter wheat. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. 9: 451–461. https://doi.org/10.3920/QAS2016.1064.

Qi L, Pumphrey M, Friebe B, Chen P, Gill B. 2008. Molecular cytogenetic characterization of alien introgressions with gene *Fhb3* for resistance to Fusarium head blight disease of wheat. Theoretical and Applied Genetics. 117: 1155-1166. https://doi.org/10.1007/s00122-008-0853-9.

Schaafsma AW, Tamburic Ilincic L, Hooker DC. 2005. Effect of previous crop, tillage, field size, adjacent crop, and sampling direction on airborne propagules of Gibberella zeae/Fusarium graminearum, Fusarium head blight severity, and deoxynivalenol accumulation in winter wheat. Canadian Journal of Plant Pathology. 27: 217-224. https://doi.org/10.1080/07060660509507219.

Shah DA, De Wolf ED, Paul P, Madden L. 2014. Predicting Fusarium head blight epidemics with boosted regression trees. Phytopathology. 104: 702-714. https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-13-0273-R.

Spanic V, Lemmens M, Drezner G. 2010. Morphological and molecular identification of *Fusarium* species associated with head blight on wheat in east croatia. European Journal of Plant Pathology. 128: 511–516. https://doi.org/10.1007/s10658-010-9682-1.

Spolti P, Del Ponte EM, Dong Y, Cummings JA, Bergstrom GC. 2014. Triazole sensitivity in a contemporary population of *Fusarium graminearum* from New York wheat and competitiveness of a tebuconazole-resistant isolate. Plant Disease. 98: 607-613. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-13-1051-RE.

Stack RW. 2003. Fusarium head blight of wheat and barley. In: Leonard KJ, Bushnell WR. (Eds.) History of Fusarium head blight with emphasis on North America. APS Press, USA. 1-34.

Steinkellner S, Langer I. 2004. Impact of tillage on the incidence of *Fusarium* spp. Plant and Soil. 267: 13–22. https://doi.org/10.1007/s11104-005-2574-z.

Summerell BA. 2019. Resolving fusarium: Current status of the genus. Annual Review of Phytopathology. 57: 323–339. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082718-100204.

Thuraga V, Ghadamgahi F, Ayele Dadi F, Vetukuri R, Chawade A. 2024. A new bacterial consortia for management of Fusarium head blight in wheat. Scientific Reports. 14: 10131. https://doi.org/10.1038/s41598-024-60356-4.

Trombete FM, Porto YD, Freitas-Silva O, Pereira RV, Direito GM, Saldanha T, Fraga ME. 2016. Efficacy of ozone treatment on mycotoxins and fungal reduction in artificially contaminated soft wheat grains: Efficacy of O_3 on mycotoxins and fungi. Journal of Food Processing and Preservation. 41: e12927. https://doi.org/10.1111/jfpp.12927.

Vanhoutte I, Audenaert K, Gelder LD. 2016. Biodegradation of mycotoxins: Tales from known and unexplored worlds. Frontiers in Microbiology. 7: 561. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00561.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

Völkl A, Vogler B, Schollenberger M, Karlovsky P. 2004. Microbial detoxification of mycotoxin deoxynivalenol. Journal of Basic Microbiology. 44: 147–156. https://doi.org/10.1002/jobm.200310353.

Wegulo SN, Baenziger PS, Nopsa JH, Bockus WW, Hallen-Adams H. 2015. Management of Fusarium head blight of wheat and barley. Crop protection. 73: 100-107. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025.

Xue S, Li G, Jia H, Xu F, Lin F, Tang M, Wang Y, An X, Xu H, Zhang L. 2010. Fine mapping Fhb4, a major QTL conditioning resistance to Fusarium infection in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Theoretical and Applied Genetics. 121: 147-156. https://doi.org/10.1007/s00122-010-1298-5.

Xue S, Xu F, Tang M, Zhou Y, Li G, An X, Lin F, Xu H, Jia H, Zhang L. 2011. Precise mapping Fhb5, a major QTL conditioning resistance to Fusarium infection in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Theoretical and Applied Genetics. 123: 1055-1063. https://doi.org/10.1007/s00122-011-1647-z.

Xue AG, Chen Y, Seifert K, Guo W, Blackwell BA, Harris LJ, Overy DP. 2019. Prevalence of Fusarium species causing head blight of spring wheat, barley and oat in Ontario during 2001–2017. Canadian Journal of Plant Pathology. 41: 392–402. https://doi.org/10.1080/07060661.2019.1582560.

Yazar S, Omurtag GZ. 2008. Fumonisins, trichothecenes and zearalenone in cereals review. International Journal of Molecular Science. 9: 2062–2090. https://doi.org/10.3390/ijms9112062.

Yi C, Kaul HP, Kübler E, Schwadorf K, Aufhammer I. 2001. Head blight (*Fusarium graminearum*) and deoxynivalenol concentration in winter wheat as affected by pre-crop soil tillage and nitrogen fertilisation. Pflanzen. 108: 217–230.

Zhang H, Huang L, Huang W, Dong Y, Weng S, Zhao J, Ma H, Liu L. 2022. Detection of wheat Fusarium head blight using UAV-based spectral and image feature fusion. Frontiers in Plant Science. 13: 1004427. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1004427.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]

Strategies to Reduce the Impact of Fusarium Fungus on Wheat Grains

Massoumeh Khademi[1], Abbas Abedfar[2*]

1- MS Student, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Assistant Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran
a.abedfar@guilan.ac.ir

Abstract

Fusarium head blight (FHB) is one of the most significant fungal diseases affecting wheat worldwide. While the species *Fusarium graminearum* is often recognized as the primary causal agent of this disease, various species of Fusarium, such as *Fusarium culmorum* and *Fusarium avenaceum*, are also involved. The pathogens responsible for this disease produce mycotoxins like deoxynivalenol (DON) and zearalenone (ZEA), which lead to reduced quality and yield of the crop, as well as health risks for humans and animals. This disease causes billions of dollars in losses to wheat production annually. Employing various methods to limit the development of Fusarium head blight and contamination of grains with mycotoxins is a crucial element in sustainable agriculture and safe food production. This article examines the *Fusarium* species involved in Fusarium head blight and various management strategies for controling this disease and its produced mycotoxins. The strategies implemented include agronomic practices, breeding, chemical methods, and biological control measures applied before harvest, as well as post-harvest strategies involving physical, biological, chemical methods, remote sensing for monitoring, and phenotyping of Fusarium head blight before and after harvest. The importance of each of these methods in enhancing the effectiveness of managing this disease is emphasized.

Keywords: Deoxynivalenol (DON), Zearalenone (ZEA), Fusarium head blight (FHB), Fusarium fungus, mycotoxin

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.5.5]