نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۷۸۲-۷۶۹.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 769-782

مقاله علمی-پژوهشی

توسعه چارچوب ارزیابی تأثیر ریسک اقلیمی در عملکرد گندم با مدل‌سازی گیاهی و تئوری فازی

معصومه متانت[۱]، کامران داوری[۲]، سید محمدرضا ناقدی‌فر[۳]، حسین بانژاد[۴*]، محمد کافی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

چکیده

گندم به‌عنوان محصولی استراتژیک، به شدت تحت تأثیر مخاطرات اقلیمی قرار دارد. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی برای ارزیابی ریسک نسبی تنش‌های اقلیمی (گرمازدگی، سرمازدگی و باد گرم) در مراحل مختلف رشد گندم در منطقه مشهد انجام شد. در این مطالعه، داده‌های هواشناسی بلندمدت به‌مدت ۴۰ سال و اطلاعات تخصصی مراحل رشد گندم از طریق مصاحبه با خبرگان جمع‌آوری شد. ریسک‌های اقلیمی در مراحل مختلف رشد بر اساس شدت و احتمال وقوع هر پدیده با استفاده از مدل‌سازی فازی محاسبه گردید تا میزان حساسیت گندم در مراحل مختلف رشد مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد مراحل گرده‌افشانی و شیری شدن دانه بیشترین ریسک را نسبت به گرما و باد گرم دارند؛ این تنش‌ها موجب کاهش لقاح، و افت کیفیت دانه می‌شوند. در مقابل، تنش سرما عمدتاً مراحل اولیه نظیر جوانه‌زنی و پنجه‌زنی را هدف قرار می‌دهد. مقایسه مقادیر ریسک تجمیعی نشان داد سرمازدگی با میزان ریسک ۱۳۲ تهدید غالب منطقه مشهد بوده و مقدار آن از گرمازدگی با میزان ۱۱۵ بیشتر است. در مقابل، پنجه‌زنی و رشد طولی ساقه کم‌ریسک‌ترین مراحل نسبت به هر سه نوع تنش بودند. براساس نتایج، اقداماتی نظیر تنظیم زمان کاشت، آبیاری تکمیلی، احداث بادشکن و استفاده از ارقام مقاوم پیشنهاد می‌شود. این اقدامات می‌توانند به کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و بهبود پایداری تولید گندم در شهر مشهد کمک کنند.

واژه‌های کلیدی: باد گرم، ریسک نسبی، سرمازدگی، گرمازدگی، مدل فازی

مقدمه

گندم با نام علمی .Triticum aestivum L به‌عنوان محصولی استراتژیک و پایه‌ای در امنیت غذایی جهان شناخته می‌شود که تولید آن به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. این تغییرات با ایجاد طیفی از ریسک‌ها، پایداری سامانه‌های کشاورزی را تهدید می‌کنند. از جمله این ریسک‌ها می‌توان به مخاطرات فیزیکی مانند کاهش میزان بارش و افزایش دما، ریسک‌های مرتبط با کاهش عملکرد محصول، و در نهایت پیامدهای اقتصادی برای بهره‌برداران کشاورزی و تهدید امنیت غذایی در سطح ملی و جهانی اشاره کرد. از این رو، ارزیابی ریسک تولید گندم با هدف کاهش آسیب‌پذیری و تدوین راه‌کارهای مدیریتی مناسب، اهمیت ویژه‌ای دارد (Hassan et al., 2021; Matthews et al., 2013). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی احتمال وقوع ریسک‌های شدید محیطی مانند سرمازدگی و خشکسالی را افزایش داده و تأثیر منفی بر رشد و توسعه گیاه دارد به‌طوری‌که طبق گزارش سایت IPCC[۶] افزایش دمای جهانی به میزان ۲ درجه سلسیوس نسبت به دوران قبل از انقلاب صنعتی، باعث کاهش ۵ تا ۲۰ درصدی عملکرد جهانی محصولات زراعی شده است (Hassan et al., 2021; Matthews et al., 2013; Simpson et al., 2021).

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۵- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: banejad@um.ac.ir)

6- Intergovernmental Panel on Climate Change

در پاسخ به چالش ریسک مخاطرات اقلیمی، مدل‌های شبیه‌سازی محصولات کشاورزی مانند AquaCrop و DSSAT ظهور کرده‌اند. این مدل‌ها با تلفیق داده‌های هواشناسی، خصوصیات فیزیکی خاک و مدیریت زراعی، امکان پیش‌بینی عملکرد تحت سناریوهای مختلف اقلیمی را فراهم می‌کنند (Zhu et al., 2021; Matthews et al., 2013; Olen & Auld., 2018; Mehrabi & Sepaskhah., 2019; Mirshekari et al., 2025). برای مثال، نتایج مطالعات انجام‌شده در شرق استرالیا نشان دادند که استفاده از این مدل‌ها می‌تواند با ارائه راهکارهای مؤثری مانند تغییر زمان کاشت یا انتخاب ارقام مقاوم، به کاهش خسارات ناشی از تغییرات اقلیمی کمک کند (wang et al., 2020). با این حال، پیچیدگی و هزینه‌بر بودن استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی برای پیش‌بینی عملکرد محصول که به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی و مدیریت مزرعه قرار دارد به‌ویژه در کشور ما که با کمبود داده مواجه هست، همچنان چالشی اساسی محسوب می‌شود.

تصمیم‌گیری در کشاورزی شامل ارتباط بین عوامل بیولوژیکی، محیطی و اقتصادی است. این عوامل اغلب نامشخص و اندازه‌گیری آنها دشوار است. مدل‌های تصمیم‌گیری سنتی به شدت به رویکردهای قطعی و احتمالی متکی هستند که ممکن است در درک ابهام ذاتی و ذهنی بودن این عوامل شکست بخورند. نظریه مجموعه‌های فازی، راهی جدید برای مدل‌سازی چنین اطلاعات غیردقیقی ارائه می‌دهد. برخلاف چارچوب‌های سنتی تصمیم‌گیری که به داده‌های دقیق متکی هستند، منطق فازی در شرایطی که ابهام غالب است، عملکرد بهتری دارد و عدم قطعیت‌های رایج در کشاورزی را بهتر مدیریت کنند. این انعطاف‌پذیری، آن را به‌ویژه برای مدیریت ریسک کشاورزی مناسب می‌سازد، جایی که بینش‌های کیفی اغلب بر فرآیندهای تصمیم‌گیری حاکم هستند (Sidhu, 2024; Shelash et al., 2025).

تجربیاتی در سایر نقاط جهان، مانند مطالعه آیموفوآ و همکاران نشان دادند که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تعیین بهترین شرایط آب و هوایی برای محصولات زراعی که به آب زیادی نیاز دارند از جمله برنج بین ماه‌های ژوئیه و اوت بهترین زمان کشت هستند (Aimufua et al., 2022). همچنین رونکو و همکاران در ایتالیا و پژوهش پاتل و شارما در هند، نشان داده‌اند که رویکردهای منطقه محور و داده‌بنیان می‌توانند تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی را به طور معناداری افزایش دهند. این مطالعات با ارائه ابزارهای کاربردی و انعطاف‌پذیر، گامی مهم در جهت تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه و افزایش پایداری تولید محصولات زراعی در شرایط تغییر اقلیم برداشته‌اند، ادغام ارزیابی ریسک اقلیمی در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی می‌تواند تاب‌آوری سامانه‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. به‌طوری‌که با ارائه نقشه‌های ریسک منطقه‌ای و تقویم‌های زمانی مخاطرات، ابزار قدرتمندی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در اختیار قرار می‌دهد که می‌تواند الگویی برای سایر مناطق با شرایط مشابه باشد (Ronco et al., 2017; Patel & Sharma., 2025). ترکیب دانش بومی با فناوری‌های نوین مدل‌سازی در این پژوهش، الگویی مناسب برای سایر مناطق با شرایط مشابه ارائه می‌دهد که می‌تواند اساس برنامه‌ریزی‌های کلان بخش کشاورزی قرار گیرد.

هدف از انجام این پژوهش، توسعه چارچوبی برای ارزیابی ریسک نسبی مخاطرات اقلیمی براساس مقدار و شدت تغییرات پارامترهای اقلیمی وقوع یافته در مراحل مختلف نمو گندم در شهر مشهد است، که در آن ریسک نسبی مخاطرات عواملی همچون سرمازدگی، گرمازدگی و باد گرم، مورد بررسی قرار گرفت. این چارچوب می‌تواند به کشاورزان و سیاست‌گذاران در جهت اتخاذ تصمیمات بهینه از جمله پیشنهاد زمان کاشت و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی کمک کند. با توجه به اینکه استفاده از مدل‌های پیچیده برای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت زمان‌بر و پرهزینه است، چارچوب پیشنهادی در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ساده‌تر و کاربردی‌تر برای ارزیابی ریسک در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

جهت توسعه چارچوب و مدل اجرایی برای ارزیابی و تعیین ریسک نسبی تنش‌های سرما، گرما و باد گرم این پژوهش به‌صورت کلی در چهار مرحله به شرح زیر صورت‌گرفته است.

ریسک ناشی از هر پدیده طبیعی، حاصل برهم‌کنش میان وقوع خود پدیده (مخاطره) و درجه آسیب‌پذیری سامانه یا محیط مورد نظر است (رابطه ۱). این مفهوم به‌طور کمی در معادله زیر قابل بیان است (Zhu et al., 2021).

$$Risk = Hazard \times Vulnerability \quad (۱)$$

در این رابطه مخاطره (Hazard) از حاصل ضرب دو عامل احتمال وقوع یک پیشامد طبیعی با شدت مشخص (از نظر اندازه و مدت) و پیامدهای مورد انتظار ناشی از وقوع آن پیشامد تشکیل می‌شود. آسیب‌پذیری (Vulnerability) نشان‌دهنده‌ی افت نسبی محصول و حساسیت یک سامانه به پیشامدهای طبیعی است و به عوامل فیزیکی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی وابسته است. از آنجا که آسیب‌پذیری یک مقدار بدون بعد است، واحد ریسک با واحد مخاطره یکسان در نظر گرفته می‌شود. با این تفاوت که مخاطره یک تهدید بالقوه است، در حالی که ریسک یک تهدید واقعی محسوب می‌شود. برای محاسبه‌ی مخاطره، میانگین ریسک در یک سال را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۲) بیان کرد.

$$R(D) = \int f_D(x) \times V(x)dx \qquad (۲)$$

در این رابطه $R(D)$ میانگین ریسک سالانه، $f_D(x)$ تابع احتمال پیشامد طبیعی و $V(x)$ تابع آسیب‌پذیری سامانه که نشان‌دهنده‌ی پیامدهای مورد انتظار برای مقدار مشخصی از پیشامد (x) است.

اطلاعات گیاهی

در این پروژه، گیاه گندم به‌عنوان یک محصول استراتژیک مورد مطالعه قرار گرفت. به‌منظور اجرای این پژوهش، جمع‌آوری مجموعه‌ای از داده‌های کمی (کتابخانه‌ای) و کیفی (از طریق مصاحبه) ضروری بود. این اطلاعات شامل تاریخ‌های کاشت و برداشت در منطقه، مراحل فیزیولوژیکی و فنولوژیکی گیاه مانند طول دوره رشد، تعداد و مدت مراحل نمو، میزان حساسیت به تنش‌های محیطی و عمق ریشه بوده است که از منابع علمی معتبر و مصاحبه با کارشناسان و کشاورزان محلی گردآوری شد.

برای تشخیص و ثبت مراحل فنولوژیک[۱] گندم، مقیاس‌های متفاوتی معرفی شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مقیاس زادوکس اشاره کرد. این مقیاس یک سیستم طبقه‌بندی استاندارد برای مراحل رشد گیاهان زراعی است که با استفاده از کدهای دو رقمی، مراحل مختلف رشد و نمو گیاه را به دقت توصیف می‌کند. رقم اول هر کد نشان‌دهنده مراحل اصلی رشد و رقم دوم بیان‌کننده جزئیات رشدی در هر مرحله است. مقیاس زادوکس به‌ویژه برای غلات مانند گندم طراحی شده و امکان تشخیص دقیق و آسان مراحل فنولوژیک را در شرایط مزرعه فراهم می‌سازد (zadoks el al., 1974). این مقیاس، به‌عنوان یک ابزار کارآمد، امکان پایش دقیق مراحل رشد گندم را در مزرعه فراهم می‌سازد. با تقسیم‌بندی چرخه رشد گیاه به مراحل مشخص، این سیستم به کشاورزان کمک می‌کند تا نیازهای آبی، تغذیه‌ای و مدیریتی محصول را در زمان مناسب تشخیص دهند.

مصاحبه

در این بخش جهت تعیین چارچوب برای ارزیابی ریسک نسبی پرسش‌نامه‌هایی تهیه شد و از ۸ فرد خبره که تجربه و دانش بالایی در زمینه زراعت گندم در منطقه داشتند مصاحبه صورت گرفت. افراد انتخاب‌شده دارای مدرک دکتری در رشته زراعت بوده و حداقل ده سال سابقه تحقیق و فعالیت اجرایی تخصصی در زمینه محصول گندم را دارا بودند. هدف از این مصاحبه‌ها، بهره‌گیری از تجربیات و دانش متخصصان به‌منظور تعیین میزان حساسیت گیاه گندم در مراحل مختلف رشد (دوره‌های نموی) نسبت به مخاطرات اقلیمی بود. پس از انجام مصاحبه با خبرگان، داده‌های به‌دست‌آمده سازماندهی و شاخص‌های آماری مانند میانگین، انحراف معیار، میانه و مد محاسبه شد. سپس با استفاده از متغیرهای کیفی و رویکرد منطق فازی، احتمال وقوع و میزان اثر هر یک از مخاطرات اقلیمی در مراحل مختلف رشد گیاه ارزیابی گردید.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی بلندمدت به‌صورت روزانه از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۴ از ایستگاه سینوپتیک مشهد که در عرض جغرافیایی ۳۶/۲۴ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۵۹/۶۳ درجه شرقی و ارتفاع ۹۹۹ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱)، جمع‌آوری شد. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر، ابتدا شاخص‌های آماری انحراف معیار و توزیع نرمال بر داده‌ها اعمال و سپس میانگین داده‌های چهل ساله به‌صورت روزانه محاسبه گردید.

۳- مدل فازی[۲]

برای محاسبه میزان ریسک‌پذیری و حساسیت نسبی گیاه به هر یک از مخاطرات اقلیمی مورد نظر، از رویکرد فازی بهره گرفته شد. منطق فازی به دلیل توانایی بالای خود در پردازش داده‌های محدود، مدیریت متغیرهای ذهنی و زمانی و مدل‌سازی نظرات کارشناسان، به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها در تحلیل ریسک به روش جعبه سفید شناخته می‌شود. این روش به‌ویژه در موقعیت‌هایی که اطلاعات کافی از رویدادهای آتی در دسترس نیست یا تجربیات گذشته محدود است، می‌تواند نتایج دقیق‌تر و قابل اتکاتری ارائه کند (داوری و همکاران، ۱۳۹۶).

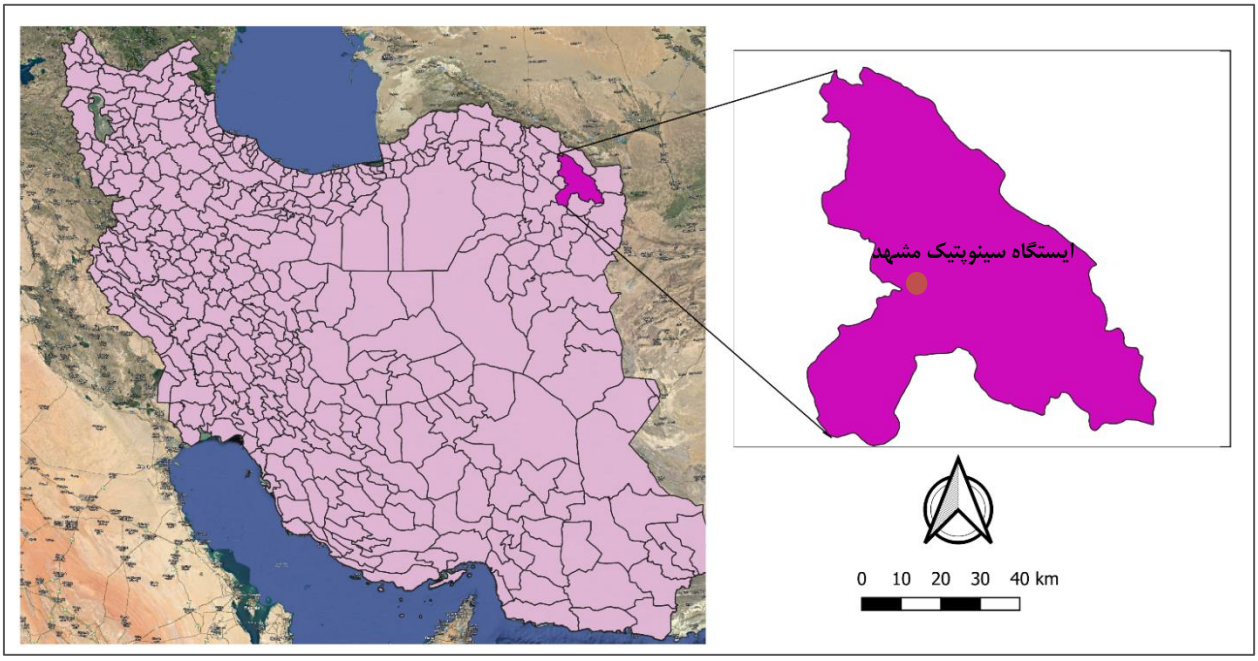
نظریه فازی تمامی نظریه‌هایی را در بر می‌گیرد که بر پایه مفاهیم مجموعه‌های فازی یا توابع عضویت استوار هستند. در این نظریه، درجه تعلق یک عنصر x به مجموعه فازی $\tilde{A}$ با مقداری بین ۰ تا ۱ بیان می‌شود که با نماد $\mu\tilde{A}(X)$ نشان داده می‌شود. تابع عضویت مربوط به یک مجموعه فازی مشخص، مقدار ورودی را به میزان عضویت متناظر آن تبدیل می‌کند. به‌منظور تعیین اعضای یک مجموعه فازی، تعریف تابع عضویت الزامی است. تابع عضویت مثلثی، با پارامترهای a و c به‌عنوان پایه‌ها و b به‌عنوان رأس مثلث، بر اساس رابطه زیر تعریف می‌شود (رابطه ۳).

$$y = trimf(x, [a\ b\ c]) \qquad \text{رابطه ۱}$$

که در آن X بردار ورودی و $y = \mu\tilde{A}(x)$ بردار خروجی در محدوده‌ی [۰،۱] است $\mu\tilde{A}(x)$ با مقادیر x از طریق Error! Reference source not found. به دست می‌آید

۱- Phenological

2 . Fuzzy model



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

$$\mu_{\tilde{A}}(x)=\begin{cases}0 & if \quad x<a\\ \dfrac{x-a}{b-a} & if \quad a\le x\le b\\ \dfrac{c-x}{c-b} & if \quad b\le x\le c\\ 0 & if \quad x>c\end{cases} \qquad (۴)$$

همان‌طور که گفته شد Error! Reference source not found. نشان‌دهنده‌ی یک عدد فازی مثلثی است که نوع خاصی از اعداد فازی محسوب می‌شود. یک عدد فازی مثلثی با سه پارامتر تعریف می‌گردد. در این تعریف، مقادیر a، b و c به ترتیب نشان‌دهنده‌ی حد پایین، مقدار میانی و حد بالایی عدد فازی هستند که روی مجموعه‌ی مرجع تعریف می‌شوند.

همچنین مقدار عضویت $\tilde{\mu}A(x)$ در یک تابع عضویت ذوزنقه‌ای به‌صورت Error! Reference source not found. محاسبه می‌شود.

$$y=trapmf(x,[a\ b\ c\ d]) \qquad (۵)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x)=\begin{cases}0 & if \quad x<a\\ \dfrac{x-a}{b-a} & if \quad a\le x\le b\\ 1 & if \quad b\le x\le c\\ \dfrac{d-x}{d-c} & if \quad c\le x\le d\\ 0 & if \quad x>d\end{cases} \qquad (۶)$$

نشان‌دهنده‌ی Error! Reference source not found. یک عدد فازی ذوزنقه‌ای است که نوع خاصی از اعداد فازی محسوب می‌شود. یک عدد فازی ذوزنقه‌ای با چهار پارامتر تعریف می‌شود. در این تعریف، مقادیر a، b، c و d به‌ترتیب a نشان‌دهنده‌ی حد پایین، b و c مقدار میانی و d حد بالایی عدد فازی هستند که روی مجموعه‌ی مرجع تعریف می‌شوند (Araghinejad, 2013).

ارزیابی ریسک یعنی شدت و احتمال وقوع هر کدام از مخاطرات که براساس نظرات کارشناسان و مطالعات کتابخانه‌ای انجام‌گرفته و نتایج در قالب اعداد فازی ارائه شده است. در مورد ارزیابی ریسک تمام حالات بروز مخاطره از بدبینانه تا خوش‌بینانه‌ترین حالت مدنظر قرار گرفته، سپس عدم قطعیت مخاطرات مبتنی بر اعداد فازی ارائه شده است (داوری و همکاران، ۱۳۹۶).

برای فازی‌سازی شاخص‌های ورودی و خروجی، ابتدا دامنه تغییرات هر یک با توجه به اطلاعات موجود بازبینی شد و سپس تعداد مناسب سطوح برای متغیرهای ورودی و خروجی مدل تعیین گردید. در این مطالعه، برای پارامتر دمای حداقل ۲۲ بازه، دوره نموی ۹ بازه، دمای حداکثر ۲۳ بازه و سرعت باد ۲۱ بازه در نظر گرفته شد. همچنین، خروجی مدل در قالب پنج سطح (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) برای میزان وقوع تنش‌های سرما، گرما و باد و همچنین حساسیت گیاه نسبت به این تنش‌ها تعریف شد.

با به‌دست‌آوردن مقدار و زمان وقوع مخاطرات اقلیمی و با به‌دست‌آوردن حساسیت‌های گیاه در دوره‌های نموی مختلف به‌صورت متغیرهای زبانی (linguistic variables) در نهایت ریسک حاصل از تعامل بین وقوع حادثه طبیعی و درجه آسیب‌پذیری محصول که در بالا ذکر شد، به‌دست‌آمده است.

برای به‌دست‌آوردن ضرب دو خروجی فازی به کمک برنامه‌نویسی در Matlab این امر صورت گرفت و نمودارهای آن استخراج شد (Error! Reference source not found.).

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik} \times b_{kj} \quad (۷)$$

a_{ik} خروجی ماتریس مدل فازی مخاطره است با دو ستون و ۲۵۳ سطر و b_{kj} خروجی ماتریس مدل فازی آسیب‌پذیری با ۲۵۳ ستون و یک سطر می‌باشد.

در رابطه با متغیر باد گرم به دلیل اینکه دو ریسک گرمازدگی و باد در یکدیگر ضرب می‌گردند برای تعیین یک محدوده مشخص این رابطه در یک تابع tansig ضرب گردید تا میزان ریسک واقعی از باد گرم به دست آید (Error! Reference source not found.).

$$tansig\ (x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (۸)$$

در نهایت با استفاده از مدل AquaCrop شدت اثر پدیده‌های اقلیمی (مخاطره) بر فرآیند رشد گیاه گندم در مراحل مختلف نموی و ترکیب آن با مدل فازی جهت محاسبه ریسک نسبی اقلیمی انجام شد. به کمک این مدل داده‌های کمی در خصوص شدت گرما و سرما در مراحل مختلف رشد به دست آمد (رابطه ۹).

$$k_s = \frac{s_n s_x}{s_n + (s_x - s_n) exp^{-r(1-s_{rel})}} \quad (۹)$$

در این رابطه Sn و Sx سطوح تنش نسبی به ترتیب در آستانه‌ی پایین و بالا هستند و r عامل نرخ است.

اثرات تنش‌ها در نرم‌افزار AquaCrop بر رشد محصول با استفاده از ضرایب تنش (Ks) مدل‌سازی می‌شود. در اصل، Ks یک عامل اصلاح‌کننده برای پارامتر هدف مدل است و مقدار آن از یک (بدون تنش) تا صفر (تنش کامل) متغیر است.

سپس میزان ریسک محاسبه شده با مدل AquaCrop و میزان حساسیت محاسبه شده با مدل فازی به کمک برنامه Matllab در یکدیگر ضرب گردید و میزان ریسک نهایی برای هر مخاطره به‌دست آمد.

این محاسبه با استفاده از Error! Reference source not found. انجام شد.

$$Risk_{final} = hazard_{AquaCrop} \times Vulnerability_{fuzzy} \quad (۱۰)$$

در این رابطه Hazard $_{AquaCrop}$ میزان تنش محاسبه‌شده توسط مدل AquaCrop و Vulnerability $_{fuzzy}$ میزان حساسیت محاسبه‌شده توسط مدل فازی می‌باشد.

و درنهایت برای به‌دست آوردن ریسک مخاطرات در تمام طول دوره نموی گیاه از رابطه ۱۰ سیگما گرفته می‌شود (رابطه ۱۱).

$$\sum Risk_{final} = hazard_{AquaCrop} \times Vulnerability_{fuzzy} \quad (۱۱)$$

نتایج و بحث

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، ارزیابی ریسک شامل شدت و احتمال وقوع هر یک از مخاطرات براساس نظرات کارشناسان انجام گردید و نتایج به‌صورت اعداد فازی در جدول ۱ ارائه شده است. بر مبنای این داده‌ها، مدل فازی مطابق جدول ۲ توسعه یافت. تحلیل داده‌های حاصل از مدل فازی و داده‌های هواشناسی نشان می‌دهد که تغییرات پارامترهای محیطی نظیر دما و باد تأثیر قابل توجه و معناداری بر میزان خطرپذیری محصول گندم دارند. در ادامه، تحلیل تفصیلی نمودارهای مربوط به این نتایج ارائه خواهد شد.

جدول ۱- نتایج به دست آمده از مصاحبه‌ها و مطالعات کتابخانه‌ای

مراحل نموی	دوره رشدی (روز)	بازه دمایی مطلوب (درجه سانتی‌گراد)	نقطه دمایی مطلوب (درجه سانتی‌گراد)	تنش گرمایی	تنش سرمایی	تنش باد
سبزشدن یا جوانه‌زنی (G)	۰-۱۰	۱۰-۲۵	۲۰	۳	۴	۱
پنجه‌زنی (T)	۱۰-۴۵	۵-۱۸	۱۵	۳	۳	۱
رشد طولی ساقه (S)	۴۵-۱۵۰	۱۵-۲۵	۲۰	۳	۴	۳
ظهور برگ‌پرچمی (B)	۱۵۰-۱۸۷	۱۵-۲۵	۲۰	۳	۴	۳
ظهور سنبله (H)	۱۸۷-۱۹۸	۱۴-۲۵	۱۶	۴	۴	۴
گرده‌افشانی (A)	۱۹۸-۲۰۸	۱۵-۲۵	۱۸	۵	۴	۴
شیری دانه (M)	۲۰۸-۲۲۲	۱۵-۲۵	۱۸	۴	۴	۵
خمیری دانه (D)	۲۲۲-۲۳۷	۱۵-۲۵	۱۸	۴	۴	۵
رسیدگی فیزیولوژیکی (PH)	۲۳۷-۲۵۳	۱۵-۲۵	۱۸	۴	۲	۵

۱. آسیب‌پذیری خیلی کم - ۲. آسیب‌پذیری کم - ۳. آسیب‌پذیری متوسط - ۴. آسیب‌پذیری زیاد - ۵. آسیب‌پذیری خیلی زیاد

جدول ۲- مشخصات مدل‌های فازی توسعه یافته

Input	Membership Function	Range	Output	Range	Membership Function	Inference
دمای بیشینه (درجه سانتی گراد)	trimf	-۱۰ – ۴۵ ۰ – ۲۵۳	خطر گرمازدگی	۰-۱	trapmf	Mamdani
دوره نموی (روز)						
دمای کمینه (درجه سانتی گراد)	trimf	-۲۱ – ۳۰ ۰ – ۲۵۳	خطر سرمازدگی	۰-۱	trapmf	
دوره نموی (روز)						
باد (متر بر ثانیه)	trimf	۰ – ۱۰ ۰ – ۲۵۳	خطر سرمازدگی	۰-۱	trapmf	
دوره نموی (روز)						
دوره نموی (روز)	trimf	۰ – ۲۵۳	حساسیت‌پذیری نسبت به گرما	۰-۱	trapmf	
دوره نموی (روز)	trimf	۰ – ۲۵۳	حساسیت‌پذیری نسبت به سرما	۰-۱	trapmf	
دوره نموی (روز)	trimf	۰ – ۲۵۳	حساسیت‌پذیری نسبت به باد	۰-۱	trapmf	

تحلیل نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مراحل مختلف رشد گندم در شهر مشهد با سطوح متفاوتی از ریسک‌های اقلیمی مواجه هستند.که به شرح زیر بیان می‌شود.

تنش گرمازدگی

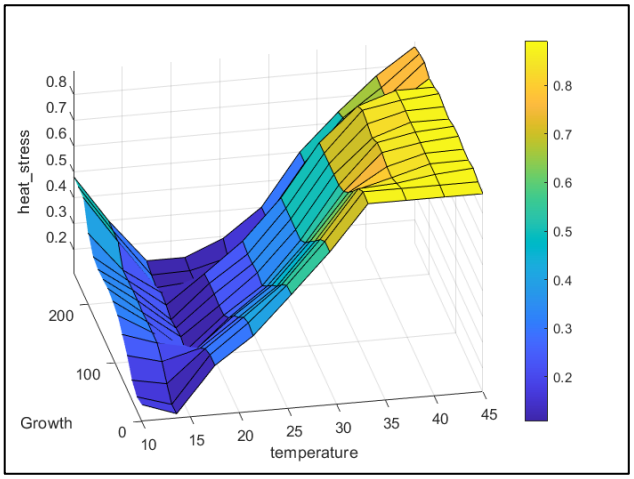
شکل ۲ شدت استرس گرمازدگی را در طول مراحل مختلف رشد گندم بر اساس دماهای بالا نشان می‌دهد. بیشترین میزان استرس گرمایی ابتدا در مرحله گرده‌افشانی (۱۹۸ تا ۲۰۸ روز) و سپس در مرحله شیری دانه تا برداشت (۲۰۸ تا ۲۳۲ روز) مشاهده شد. در این دوره‌ها، دماهای بالاتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان بیشترین تهدید برای عملکرد گیاه عمل کرده‌اند. در مقابل، مراحل پنجه‌زنی و رشد طولی ساقه (۱۰ تا ۱۰۵ روز) کمترین میزان استرس را به دلیل حساسیت کمتر و عدم وجود دماهای بحرانی تجربه کرده‌اند. اگرچه دمای بالا می‌تواند بر جوانه‌زنی و پنجه‌زنی اثر منفی بگذارد، اما شدت آسیب‌پذیری در مراحل زایشی به‌مراتب بیشتر است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت گیاه به گرمازدگی در مرحله گرده‌افشانی (A) بوده و مراحل اولیه مانند جوانه‌زنی (G) تا ظهور سنبله (S) از حساسیت کمتری برخوردارند. در شکل ۴، ریسک نهایی از طریق ضرب شدت مخاطره در حساسیت‌پذیری گیاه محاسبه شده و رابطه مستقیم بین این دو متغیر تأیید شده است. شکل ۵ نیز خروجی ترکیب دو مدل فازی و AquaCrop را نمایش می‌دهد که بالاترین مقدار ریسک را در بازه زمانی ۱۹۸ تا ۲۰۸ روز رشد نشان می‌دهد.

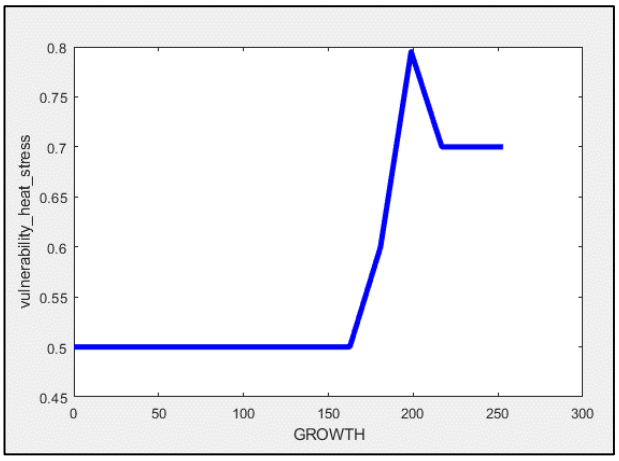
ترکیب این دو مدل حاکی از آن است که تمرکز اقدامات مدیریتی باید در مراحل حساس زایشی، به‌ویژه گرده‌افشانی و شیری دانه باشد.

این نتایج با پژوهش‌های پیشین نیز هم‌راستا است؛ به‌عنوان نمونه، آسنگ و همکاران نشان دادند که تنش گرمایی در مرحله گرده‌افشانی، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک، کاهش عملکرد قابل‌توجهی در پی دارد. کاهش وزن هزار دانه و تعداد دانه در سنبله از جمله آثار اصلی این تنش هستند (Asseng et al., 2015). همچنین افزایش دما علاوه بر تأثیر مستقیم بر فرآیندهای زیستی گیاه، می‌تواند از طریق تغییر فرآیندهای فیزیولوژیکی-بیوشیمیایی مانند فتوسنتز، تنفس، آسیب اکسیداتیو، فعالیت هورمون‌های القا شده توسط تنش، ترکیبات آنتی‌اکسیداتیو آنزیمی و غیرآنزیمی، روابط آب و عناصر غذایی و ویژگی‌های تشکیل دهنده عملکرد (زیست توده، تعداد پنجه، تعداد و اندازه دانه) پس از قرار گرفتن در معرض دماهای بالاتر از محدوده بهینه، بر رشد و نمو گندم تأثیر بگذارد (Yadav et al, 2022). بیشترین آسیب وارده ناشی از تنش گرما در مرحله زایشی به صورت کاهش تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه می‌باشد. همچنین، افزایش دمای بالاتر از حد آستانه گیاه باعث تسریع فرآیند پیری برگ و کاهش سطح سبز برگ در مراحل زایشی شده و در نهایت با کاهش پنجه‌های بارور در بوته منجر به کاهش عملکرد گندم میگردد. پاسخ اجزای عملکرد به دمای بالا با توجه به زمان وقوع و مدت زمان قرار گرفتن در معرض دمای بالا و همچنین نوع رقم متفاوت می‌باشد (امیدی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین، تحقیقات دیگری نشان داد که افزایش دما می‌تواند منجر به کاهش فعالیت آنزیم‌های کلیدی در فرآیند فتوسنتز شود، که این امر به نوبه خود باعث کاهش تولید زیست توده[1] و عملکرد نهایی محصول می‌شود (Farooq et al., 2011).

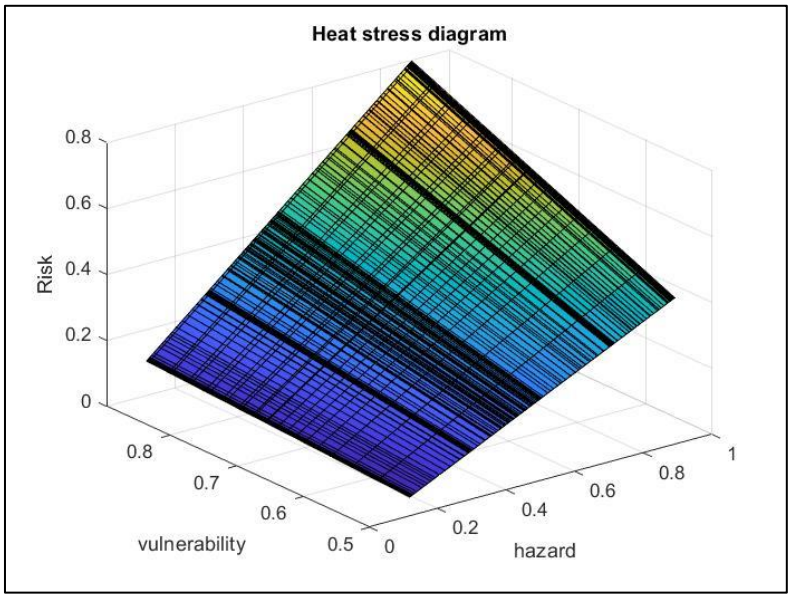
1 . Biomass



شکل ۲- نمودار میزان مخاطره گیاه به تنش گرمازدگی در طول دوره نموی



شکل ۳- میزان حساسیت گیاه نسبت به تنش گرمازدگی در طول دوره نموی



شکل ٤- میزان ریسک گیاه به تنش گرمازدگی در طول دوره نموی

تنش سرمازدگی

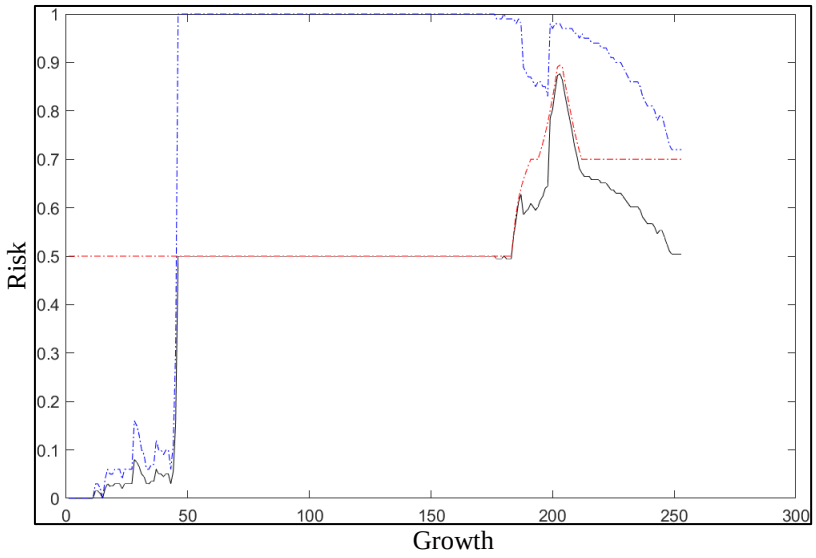
شکل ۶ شدت مخاطره سرمازدگی را در مراحل مختلف رشد گندم نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آن در مراحل جوانه‌زنی و پنجه‌زنی مشاهده شده است. شکل ۷ میزان حساسیت گیاه به سرما را نشان می دهد و بیانگر آن است که از مرحله جوانه‌زنی تا خمیری دانه، گیاه حساسیت بالایی دارد.

شکل ۸ ریسک نهایی سرمازدگی را با ضرب شدت مخاطره در حساسیت‌پذیری فازی محاسبه کرده و نشان می‌دهد که با افزایش هر دو عامل، احتمال وقوع ریسک نیز بیشتر می‌شود. در شکل ۹ که خروجی ترکیب مدل فازی و AquaCrop است، دوره پرریسک برای سرمازدگی بین روزهای ۱۰۰ تا ۱۷۰ یعنی دوره رشد طولی ساقه تا ظهور برگ پرچمی تشخیص داده شده است.

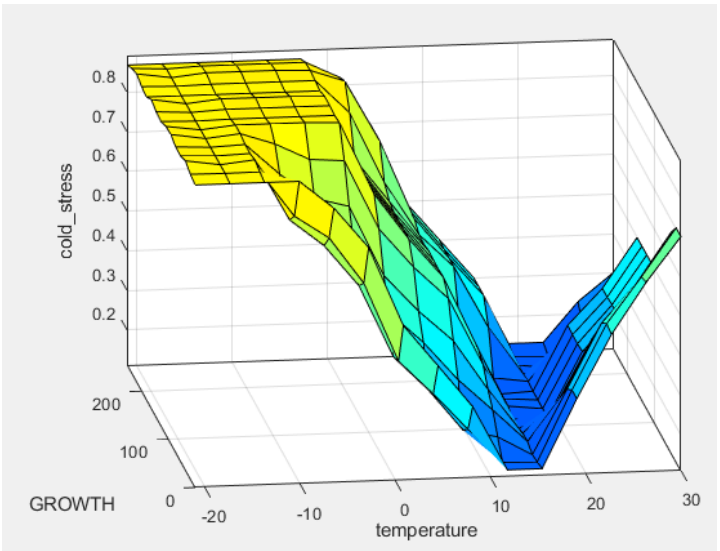
این امر به دلیل حساسیت بالای گیاه در مراحل رویشی به دماهای پایین است. بنابراین توجه مدیریتی در دوره رشد طولی ساقه و ظهور برگ پرچمی ضروری است. مطالعات آروکا و همکاران، بیان کردند که شرایط سرما باعث اختلال در جذب آب توسط ریشه شده و کمبود آب در ساقه منجر به ایجاد تنش خشکی می‌شود (Aroca et al., 2012)، این شرایط خشکی ناشی از اختلال در تعادل آبی، باعث

کاهش جذب مواد مغذی توسط ریشه و محدود شدن انتقال عناصر غذایی به سایر بخش‌های گیاه شده و در نهایت رشد گیاه را متوقف می‌کند (Nezhadahmadi et al., 2013).

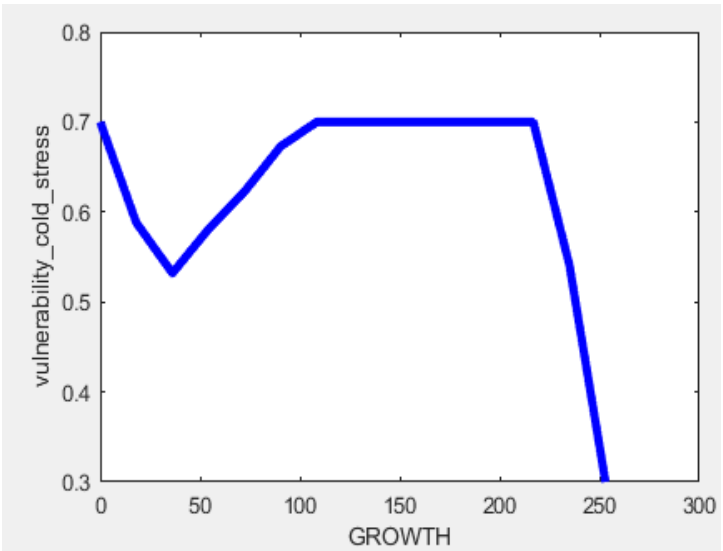
کاهش عملکرد ناشی از سرمازدگی شامل کاهش تعداد پنجه‌های بارور، سنبله‌ها و دانه‌های هر سنبله است که ازنظر زیستی با کوتاهی ساقه، کاهش سطح برگ و کاهش ظرفیت فتوسنتزی مرتبط است (Valluru et al., 2012) طبق مطالعات طاووسی و همکاران دماهای پایین‌تر از ۵ درجه سانتی‌گراد باعث کندی رشد و کاهش فعالیت آنزیمی در گیاه می‌شوند. سرمای شدید در مراحل اولیه رشد می‌تواند به کاهش تراکم بوته‌ها و عملکرد کلی مزرعه منجر شود (طاوسی و همکاران، ۱۳۹۳). مطالعه دیگری در این زمینه نشان داده است که وقوع تنش سرما در زمستان، در اغلب موارد سبب بروز خسارت‌های شدید در گندم مخصوصاً تیپ پاییزه می‌شود (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۸).



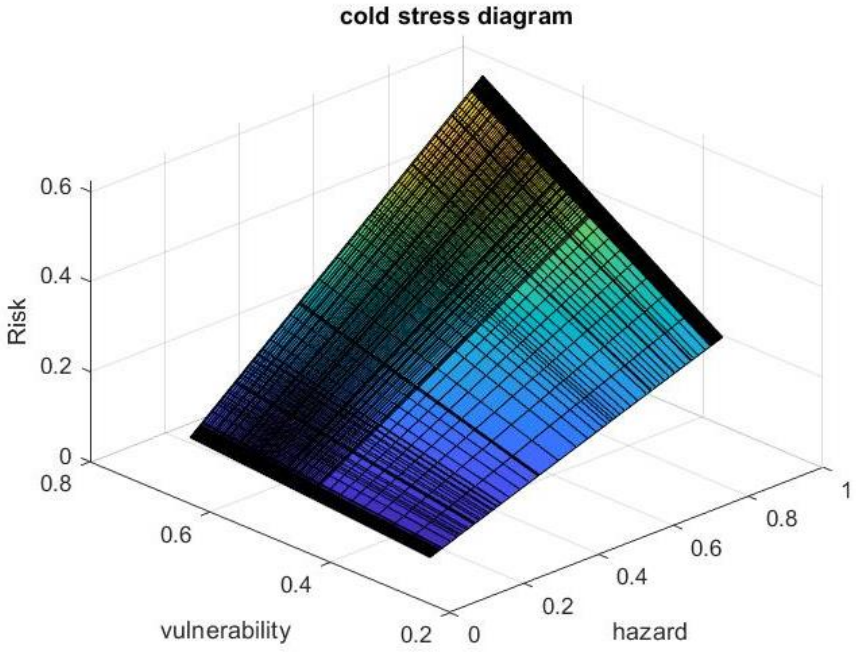
شکل ۵- میزان تنش گرمازدگی وارد شده در طول دوره نموی



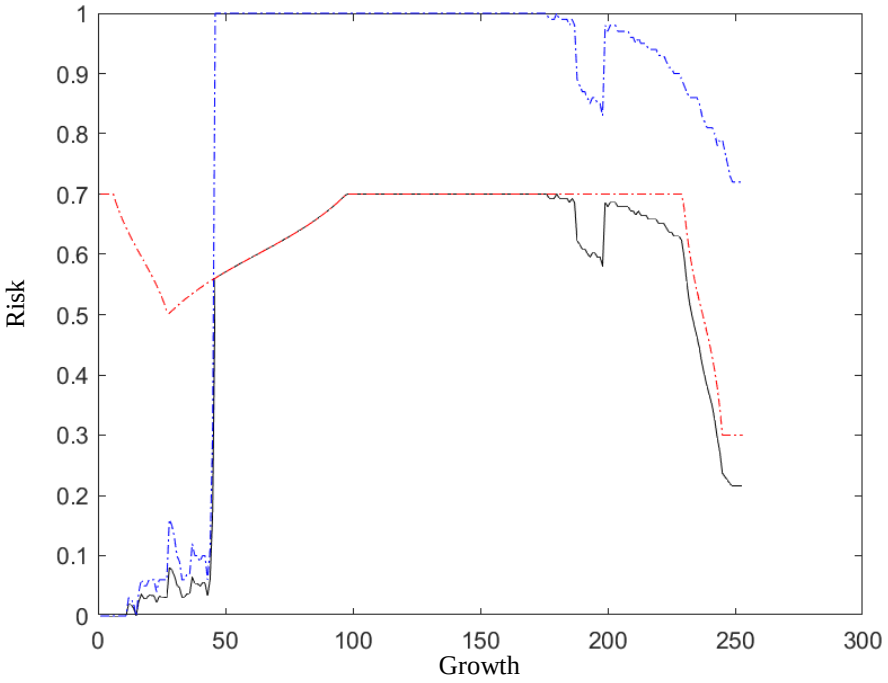
شکل ٦- نمودار میزان مخاطره گیاه به تنش سرمازدگی در طول دوره نموی



شکل ۷- میزان حساسیت گیاه نسبت به تنش سرمازدگی در طول دوره نموی



شکل ۸- میزان ریسک گیاه به تنش گرمازدگی در طول دوره نموی



شکل ۹- میزان استرس سرمازدگی وارد شده در طول دوره نموی

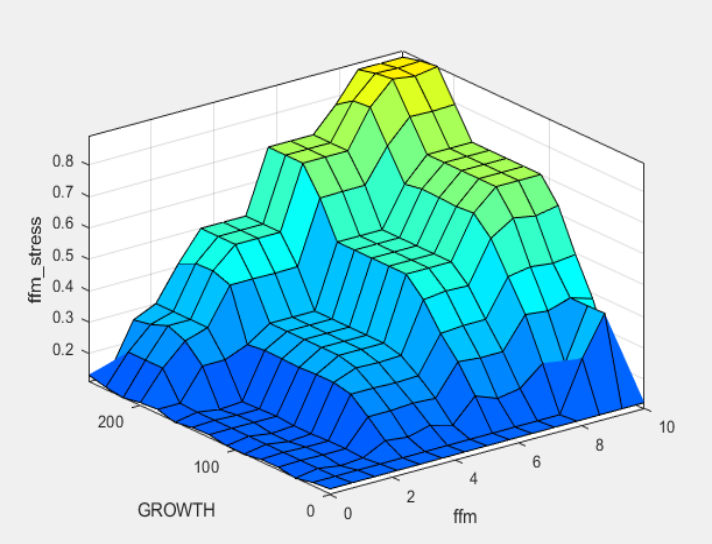
تنش باد و باد گرم

شکل ۱۰ شدت مخاطره باد را نشان می‌دهد که به‌ویژه در مرحله شیری دانه تا برداشت در سرعت‌های بیش از ۶ متر بر ثانیه می‌تواند اثر منفی قابل‌توجهی داشته باشد. باد شدید (بیش از ۸ متر بر ثانیه) در مرحله رشد ساقه موجب شکستگی یا خوابیدگی گیاه شده و استحکام بوته را کاهش می‌دهد.

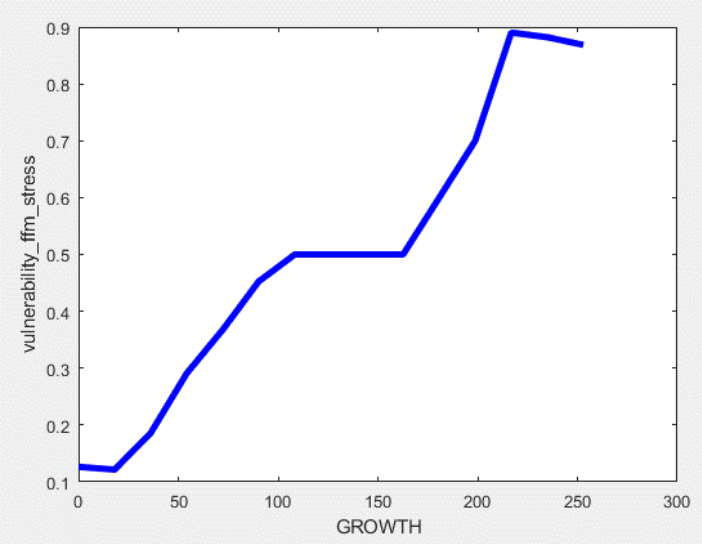
خوابیدگی باعث اختلال در انتقال آب و مواد مغذی به دانه‌های در حال توسعه می‌شود (خواجه‌پور و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین، در مرحله گرده‌افشانی، باد شدید منجر به کاهش لقاح و باروری سنبله‌ها می‌شود. طبق گزارش ویبل و پندلیتون، خوابیدگی در مراحل مختلف رشد می‌تواند عملکرد را تا ۳۱٪ کاهش دهد (Weibel and

Pendleton., 1964). مطالعه دیگری نشان داد که خوابیدگی کامل در کل دوره پر شدن دانه ممکن است ۶۰ تا ۷۵ درصد عملکرد را از بین ببرد (Berry and Spink., 2012). شکل ۱۱ حساسیت گیاه به باد و شکل ۱۲ ریسک نهایی باد را بر اساس مدل فازی نمایش می دهد.

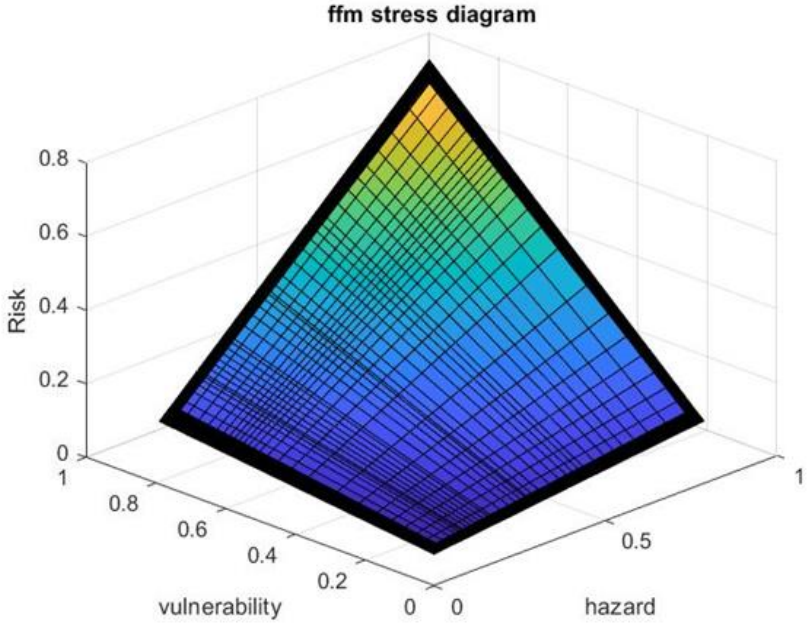
همچنین لازم به ذکر است که در شرایط ترکیبی گرما، خشکی و باد که اغلب به‌صورت گذرا و شدید رخ می‌دهد اثرات منفی بر عملکرد دوچندان خواهد شد (Zhao et al., 2022). باد گرم باعث افزایش تعرق، کاهش فتوسنتز و عقیمی گلچه‌ها می‌شود و در مراحل سنبله‌دهی تا بلوغ بیشترین آسیب را وارد می‌کند. شکل ۱۴، خروجی ترکیب مدل فازی برای شدت مخاطره گرما و باد را نشان می‌دهد که ریسک نهایی باد گرم را به‌وضوح ترسیم کرده است. یافته‌ها تأکید دارند که افزایش هم‌زمان گرما و باد منجر به افزایش مستقیم ریسک می‌شود. در نتیجه، استفاده از بادشکن، تنظیم تاریخ کاشت، آبیاری تکمیلی و کشت ارقام مقاوم در مراحل حساس، را می‌توان از مهم‌ترین راهکارهای مقابله با ریسک اقلیمی در منطقه دانست.



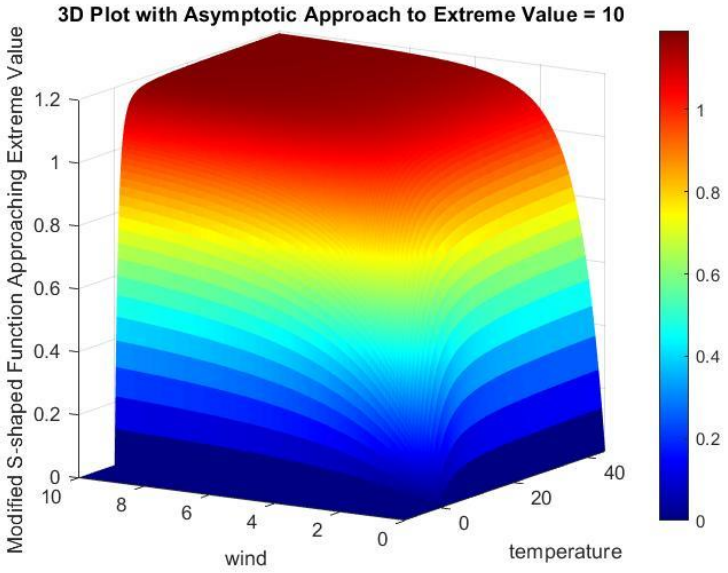
شکل ۱۰- نمودار میزان مخاطره گیاه به تنش باد در طول دوره نموی



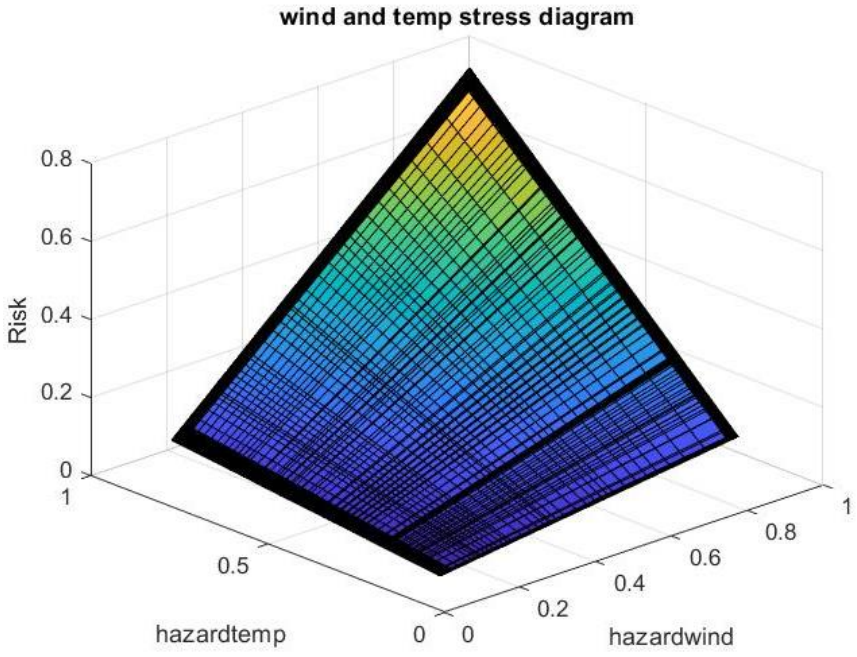
شکل ۱۱- میزان حساسیت گیاه نسبت به تنش باد در طول دوره نموی



شکل ۱۲- میزان ریسک گیاه به تنش باد در طول دوره نموی



شکل ۱۳- خروجی تابع tansig



شکل ١٤- میزان ریسک گیاه به تنش باد گرم در طول دوره نموی

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه نشان داد که تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دما و شدت باد، تأثیر مستقیمی بر تولید محصول گندم دارد. در شهر مشهد، میزان ریسک نهایی برای گندم در مراحل "گرده‌افشانی" و "شیری شدن دانه" به بیشترین حد خود می‌رسد که این امر ناشی از حساسیت بالای این مراحل به تغییرات دمایی و تأثیرات شدید باد و گرمای بیش‌از حد می‌باشد. در مرحله گرده‌افشانی، افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی باعث کاهش میزان لقاح و افزایش درصد عقیمی دانه‌ها شد. همچنین، در مرحله شیری دانه، گرمای شدید منجر به افزایش نرخ تبخیر وتعرق شده و فشار مضاعفی بر ذخیره‌سازی مواد مغذی در دانه وارد می‌کند که در نهایت باعث کاهش کیفیت و وزن دانه می‌شود. مدل‌سازی فازی نیز نشان داد که ترکیب دمای بالا و باد گرم بیشترین اثر منفی را بر عملکرد محصول دارد. در مقابل، کمترین میزان خطر در مراحل "پنجه‌زنی" و "رشد طولی ساقه" مشاهده شد که بیانگر مقاومت بالاتر این مراحل در برابر تغییرات اقلیمی است. با توجه به ریسک محاسبه شده میزان ریسکی که برای گرمازدگی و سرمازدگی در طول دوره رشد گیاه به دست آمد برابر ۱۱۵ و ۱۳۲ برای شهر مشهد است.

بر اساس نتایج حاصل از مدل فازی و داده‌های هواشناسی منطقه، مشخص شد که ریسک تجمعی سرمازدگی در دوره رشد گندم (۱۳۲) نسبت به گرمازدگی (۱۱۵) بیشتر است. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی شهر مشهد، تنش سرمایی، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد مانند پنجه‌زنی و جوانه‌زنی، تهدید غالب‌تری نسبت به تنش گرما محسوب می‌شود. از این‌رو، در برنامه‌ریزی مدیریت مزرعه، تدابیری همچون انتخاب تاریخ کاشت مناسب، افزایش پوشش گیاهی و استفاده از ارقام مقاوم به سرما باید در اولویت قرار گیرند.

منابع

امیدی، م.، سیاهپوش، م. ر.، مامقانی، ر. و مدرسی، م. ۱۳۹۲. اثر تنش گرمای انتهای فصل بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی خصوصیات مورفو-فنولوژیک ژنوتیپهای گندم در شرایط آب و هوایی اهواز. نشریه تولید گیاهان زراعی. ۶ (۴): ۳۳-۵۳.

خواجه پور، ر.، کافی، م.، نظامی، ا. و خزاعی، ح. ر. ۱۳۹۶. اثر تنش مکانیکی باد بر تعدادی از خصوصیات مورفوفیزیولوژیک دو رقم گندم پابلند و نیمه‌پاکوتاه. نشریه تولید گیاهان زراعی. ۱۰ (۲): ۱۰۱-۱۱۴.

داوری، ک.، قندهاری، ا.، قهرمان، ب. و عمرانیان خراسانی، ح. ۱۳۹۶. ارزیابی ریسک برنامه تأمین آب در محیط فازی، مورد مطالعاتی: تأمین آب دشت مشهد تا افق ۱۴۵۰. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳ (۳): ۵۶-۷۲.

سعیدی، م.، عبدلی، م. و الیاسی، پ. ۱۳۹۸. بررسی تحمل به سرما در برخی از ژنوتیپهای گندم نان در مرحله گیاهچه‌ای تحت شرایط آزمایشگاهی. نشریه پژوهش‌های گندم. ۲ (۱): ۳۵-۵۲.

طاوسی، م.، نادری، ا. و لطفعلی‌آینه، غ. ع. ۱۳۹۳. ارزیابی واکنش فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های گندم به تنش سرما در مرحله پنجه‌زنی. فصلنامه علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی. ۶ (۲۱): ۲۹-۴۴.

Aimufua, G. I. O., Akimoh, J. O. and Jegede, A. J. 2022. Modeling of Climate Effect on Arable Crops Production of Oryza Sativa and Zea Mays in Nigeria Using Fuzzy Logic. Asian Journal of Engineering and Applied Technology. 11 (1): 46-53.

Araghinejad. Sh. 2013. Data-Driven Modeling: Using MATLAB in Water Resources and Environmental Engineering. Springer. DOI 10.1007/978-94-007-7506-0

Aroca, R., Porcel, R. and Ruiz-Lozano, J. M. 2012. Regulation of Root Water Uptake Under Abiotic Stress Conditions. Journal of Experimental Botany. 63 (1): 43–57.

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P et al. (50 More Authors). 2015. Rising Temperatures Reduce Global Wheat Production. Nature Climate Change. 5 (2): 143-147.

Berry, P. M. and Spink, J. 2012. Predicting Yield Losses Caused by Lodging in Wheat. Field Crops Research. 137: 19–26.

Farooq, M., Bramley, H., Palta, J. A. and Siddique, K. H. M. 2011. Heat Stress in Wheat During Reproductive and Grain-Filling Phases. Critical Reviews in Plant Sciences. 30:1–17

Hassan, M. A., Xiang, C., Farooq, M., Muhammad, N., Yan, Zh., Hui, X., Yuanyuan, K., Bruno, A.K., Lele, Zh. and Jincai, L. 2021. Cold Stress in Wheat: Plant Acclimation Responses and Management Strategies. Frontiers in Plant Science. 12: 676884.

Mahrookashani, A., Siebert, S., Huging, H. and Ewert, F. 2017. Independent and Combined Effects of High Temperature and Drought Stress Around Anthesis on Wheat. J Agro Crop Sci: 1–11.

Matthews, R. B., Rivington, M., Muhammed, Sh., Newton, A.C. and Hallett, P. D. 2013. Adapting Crops and Cropping Systems to Future Climates to Ensure Food Security: The Role of Crop Modelling. Global Food Security. 2: 24–28.

Mehrabi, F. and Sepaskhah, A. R. 2020. Winter Wheat Yield and DSSAT Model Evaluation in a Diverse Semi-Arid Climate and Agronomic Practices. Int. J. Plant Prod. 14: 221–243.

Consequences Of Early Chilling Stress in Two Triticum Species: Plastic Responses And Adaptive Significance. Plant Biology. 14, 641–651.

Wang, B., Feng, P., Liu, D. and Waters, C. 2020. Modelling Biophysical Vulnerability of Wheat to Future Climate Change: A Case Study in The Eastern Australian Wheat Belt. Ecological Indicators. 114, 106290.

Wang, Ch., Cui, H., Jin, M., Wang, J., Li, Ch., Li, Y., Luo, Y. and Wang, Z. 2025. Enhancement of Wheat Resistance To Dry–Hot Wind Stress During Grain Filling by 24- Epibrassinolide: Optimization of Hormone Balance and Improvement of Flag Leaf Photosynthetic Performance. Frontiers in Plant Science. 16:1552617.

Weibel, R. O. and Pendleton, J. W. 1964. Effect of Artificial Lodging on Winter Wheat Grain Yield and Quality. Agronomy Journal. 56 (5): 487-488.

Yadav, M. R., Choudhary, M., Singh, J., Lal, M. K., Jha. P. K., Udawat, P., Gupta, N. K., Rajput, V, D., Garg, N. K., Maheshwari, G., Hasan, M., Gupta, S., Jatwa, T. K., Kumar, R., Yadav, A. K. and Vara Prasad, P. V. 2022. Impacts, Tolerance, Adaptation, and Mitigation of Heat Stress on Wheat Under Changing Climates. International Journal of Molecular Sciences. 23, 2838.

Zadoks, J. C., Chang, T. T. and Konzak, C. F. 1974. A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals. Weed Research. 14: 415-421.

Zhao, H., Zhang, L., Kirkham, M. B., Welch, S. M., Nielsen-Gammon, J. W., Bai, G., Luo, J., Andresen, D. A., Rice, Ch. W., Wan, N., Lollato, R. P., Zheng, D., Gowda, P. H. and Lin, X. 2022. U.S. Winter Wheat Yield Loss Attributed to Compound Hot-Dry-Windy Events. Nature Communications. 13:7233.

Zhu, X., Xu, K., Liu, Y., Guo, R. and Chen, L. 2021. Assessing the Vulnerability and Risk of Maize to Drought in China Based on the Aquacrop Model. Agricultural Systems. 189: 103040.

Mirshekari, S., Yaghoubi, F. and Hashemi, S. F. 2025. Climate Change Impacts on Wheat Yields in Arid Regions of Iran: A Multimodel Approach for Adaptation Strategies. Int. J. Plant Prod. 19: 491–506.

Nezhadahmadi, A., Hossain Prodhan, Z. and Faruq, G. 2013. Drought Tolerance in Wheat. The Scientific World Journal. 610721.

Olen, B. and Auld, S. 2018. A Roadmap for Assessing Relative Risks for Agricultural Production, A Publication of The Agricultural & Applied Economics Association. 33 (4): 1-6.

Patel, R. K. and Sharma, A. 2025. Evaluating Climate Change Resilience in Central Indian Agriculture: A Regional Indicator Framework and Agro-Climatic Zoning. Avec Journal Of Environmental Science & Climate Studies. 1 (1): 25-45.

Ronco, P., Zennaro, F., Torresan, S., Critto, A., Santini, M., Trabucco, A., Zollo, A. L., Galluccio, G. and Marcomini, A. 2017. A Risk Assessment Framework for Irrigated Agriculture Under Climate Change. Advances in Water Resources. 110: 562-578.

Shelash, s., Vasudevan, a., Alqahtani, m. m., Sun, x. and Ali, i. 2025. Leveraging Fuzzy Logic for Resilient Agricultural Supply Chains: Risk Mitigation and Decision‐Making in Jordan. Research on World Agricultural Economy. 6 (3): 188-203.

Sidhu, s. k. 2024. Integrating fuzzy logic into smart agriculture systems for better yield predictions. journal Punjab academy of Sciences. 24: 80-85

Simpson, N. P., Mach, K., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., Lawrence, J., Lempert, R. J., Muccione, V., Mackey, B., New, M. G., O'neill, B., Otto, F., Po¨Rtner, H., Reisinger, A., Roberts, D., Schmidt, D. N., Seneviratne, S., Strongin, S., Aalst, M. V., Totin, E. and Trisos, Ch. 2021. A Framework for Complex Climate Change Risk Assessment. one Earth. 4 (4): 489-501.

Valluru, R., Link, J. and Claupein, W. 2012.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 769-782

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۷۸۲-۷۶۹.

Developing a Climate Risk Impact Assessment Framework on Wheat Performance through Crop Modeling and Fuzzy Logic Theory

M. Metanat[1], K. Davary[2], S. M. R. NaghdiFar[3], H. Banejad[*4], M. Kafi[5]
Recived: May.11, 2025 Accepted: Aug.23, 2025

Abstract

Wheat, as a strategic crop, is highly influenced by climatic hazards. This study aimed to present a framework for evaluating the relative risk of climatic stresses—namely heat stress, cold stress, and hot wind—across different growth stages of wheat in the Mashhad region. In this study, long-term meteorological data over a 40-year period and expert-based information on wheat phenology were collected through interviews. Climate risks during various growth stages were calculated using fuzzy modeling based on the intensity and probability of each event, in order to assess wheat sensitivity at different stages. The results showed that the pollination and milk development stages experienced the highest risk due to heat and hot wind, which led to reduced fertilization and decreased grain quality. In contrast, cold stress predominantly affected early growth stages such as germination and tillering. A comparison of cumulative risk values indicated that cold stress, with a risk level of 132, posed a more significant threat in the Mashhad region than heat stress, which had a risk level of 115. Conversely, tillering and stem elongation stages showed the lowest level of risk to all three types of stress.Based on the findings, recommended strategies include adjusting planting time, applying supplemental irrigation, using windbreaks, and cultivating resistant varieties. These actions can reduce the negative effects of climate change and enhance the sustainability of wheat production in Mashhad.

Keywords: Cold Stress, Fuzzy Model, Heat Stress, Hot Wind, Relative Risk

1- PhD Student in Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3 Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
4- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
5- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author: banejad@um.ac.ir)