"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و هفتم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

DOI:

پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شناختی اراضی کشاورزی ایران بر اساس شبیه سازی رشد و عملکرد علوفه یونجه (*Medicago sativa* L.) آبی و دیم در شرایط اقلیمی فعلی و آینده

Agro-ecological zoning of agriculatural lands of Iran based on simulation of growth and forage yield of irrigated and rainfed alfalfa (*Medicago sativa* L.) under current and future climatic conditions

عفت پراور[۱]، افشین سلطانی[۲]، ابراهیم زینلی[۳]، حسین کاظمی[۴] و امیر دادرسی[۵]

چکیده

پراور، ع.، ا. سلطانی، ا. زینلی، ح. کاظمی و ا. دادرسی. ۱۴۰۴. پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شناختی اراضی کشاورزی ایران بر اساس شبیه سازی رشد و عملکرد علوفه یونجه آبی و دیم در شرایط اقلیمی فعلی و آینده. **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۷ (۳): ۳۰۳ -۲۸۵.**

پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شناختی با ایجاد یک پایگاه اطلاعاتی جامع، به برنامه ریزی و انطباق فعالیت‌های زراعی با شرایط بوم‌شناختی موجود و نیز آثار تغییر اقلیم در هر منطقه کمک شایانی می‌کند. در این تحقیق برای شبیه سازی رشد و عملکرد یونجه آبی و دیم از مدل SSM-iCrop2 استفاده شده و تغییر اقلیم در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بر اساس عملکرد علوفه خشک یونجه آبی، کشور به پنج پهنه (یا طبقه) قابل تقسیم است که شامل پهنه‌هایی با عملکرد علوفه خشک کمتر از ۲۰ تن در هکتار، ۲۰ تا ۲۵، ۲۵ تا ۳۰، ۳۰ تا ۳۵ و بیش از ۳۵ تن در هکتار می‌باشد که به‌ترتیب حدود یک، ۱۴، ۴۶، ۳۴ و پنج درصد از مساحت کل اراضی کشاورزی را پوشش می‌دهند. پهنه‌های با عملکرد علوفه خشک یونجه آبی بیش از ۳۵ تن در هکتار در بخش‌هایی از شمال شرقی (استان خراسان جنوبی) و بخش‌های مرکزی کشور (استان‌های فارس،کرمان، خراسان جنوبی، یزد و سیستان و بلوچستان) قرار دارند. تغییر اقلیم در پهنه‌های اقلیمی با ۶۰۰۰ و کمتر واحد دمایی سالانه (با دمای پایه صفر) باعث افزایش عملکرد و پهنه‌های اقلیمی با ۷۰۰۰ روز-درجه رشد سالانه (با دمای پایه صفر) و بالاتر باعث کاهش عملکرد علوفه خشک شدند. بر اساس عملکرد علوفه خشک یونجه دیم، کشور به پنج پهنه تقسیم شد که شامل پهنه‌هایی با عملکردکمتر از پنج تن ، ۵ تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۵، ۱۵ تا ۲۰ و بیش از ۲۰ تن در هکتار بودند. پهنه‌های دارای عملکرد بیش از ۲۰ تن در هکتار در بخش‌هایی از گیلان و مازندران قرار گرفته و کمتر از یک درصد از مساحت کل اراضی کشاورزی را پوشش دادند.۳۴ درصد از مساحت کل اراضی کشاورزی کشور دارای عملکرد کمتر از ۵ تن و ۵۵ درصد از اراضی دارای عملکرد ۵ تا ۱۰ تن در هکتار برای یونجه دیم بودند. نتایج نشان داد که در شرایط دیم، تغییر اقلیم در اکثر پهنه‌های اقلیمی مهم، باعث افزایش عملکرد علوفه خشک شد. بر اساس نتایج این تحقیق، با شناسایی وضعیت پهنه‌های زراعی- بوم‌شناختی کشور در شرایط فعلی و شرایط تغییر اقلیم در آینده می‌توان برای برنامه‌های تحقیقاتی و مدیریت تولید یونجه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، پهنه‌های زراعی- بوم‌شناختی، تغییر اقلیم، شبیه سازی، عملکرد علوفه خشک و یونجه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ این مقاله مستخرج از رساله دکتری نگارنده اول می‌باشد

۱- دانش آموخته دکتری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (مکاتبه کننده، paravar20@gmail.com ✉)
۲- استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳- دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴- استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۵- دانش آموخته دکتری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

2025© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

Iranian Journal of Crop Sciences
Vol. 27, No. 3, Autumn 2025

RESEARCH ARTICLE

DOI

Agro-ecological zoning of agriculatural lands of Iran based on simulation of growth and forage yield of irrigated and rainfed alfalfa (*Medicago sativa* L.) under current and future climatic conditions

Paravar, E.[1], Soltani, A.[2], Zeinali, E.[3], Kazemi, H.[4] and Dadrasi, A.[5]

ABSTRACT

Paravar, E., Soltani, A., Zeinali, E., Kazemi, H. and Dadrasi, A. 2025. Agro-ecological zoning of agricultural lands of Iran based on simulation of growth and forage yield of irrigated and rainfed alfalfa (*Medicago sativa* L.) under current and future climatic conditions. **Iranian Journal of Crop Sciences. 27(3): 285-303. (In Persian).**

Introduction: Agro-ecological zoning provides a comprehensive scientific database for identifying suitable areas for crop cultivation and plays an important role in agricultural planning and adaptation to existing ecological conditions. It also contributes to evaluating the potential impacts of climate change on agricultural production and supports decision-making for sustainable crop management. Alfalfa (*Medicago sativa* L.) is one of the most important perennial forage crops in Iran, and its productivity is strongly influenced by climatic conditions. Therefore, evaluating the spatial distribution of alfalfa productivity under present and future climatic conditions is essential for sustainable agricultural development. The objective of this study was to determine the agro-ecological zoning of irrigated and rainfed alfalfa across Iran using the SSM-iCrop2 crop simulation model and to evaluate the effects of climate change under the Representative Concentration Pathway (RCP4.5 and RCP8.5) scenarios.

Materials and Methods: The study was conducted at the national scale covering the agricultural lands of Iran. Long-term climatic data, soil characteristics, and crop management information were integrated into the SSM-iCrop2 simulation model to estimate alfalfa forage yield. Future climatic conditions were evaluated using the Representative Concentration Pathways (RCP4.5 and RCP8.5). Agro-ecological zoning was performed based on simulated forage yield and annual accumulated growing degree-days (GDD) using a base temperature of 0°C. The simulated yields were spatially analyzed in a geographic information system (GIS), and thematic zoning maps were produced for both irrigated and rainfed alfalfa. The country was classified into five productivity classes according to simulated forage yield.

Results: The simulation results revealed considerable spatial variation in alfalfa productivity across Iran. For irrigated alfalfa, five productivity zones were identified (<20, 20–25, 25–30, 30–35, and >35 $t.ha^{-1}$), representing approximately 1%, 14%, 46%, 34%, and 5% of the country's agricultural lands, respectively. The highest-yielding areas (>35 $t.ha^{-1}$) were mainly located in central and southeastern provinces, including Fars, Kerman, Yazd, Sistan and Baluchestan, and parts of South Khorasan. Future climate projections indicated that regions with annual GDD values below 6000 would benefit from climate change through increased forage production. In contrast, areas with annual GDD values of 7000 or higher would experience yield reductions because of excessive heat accumulation and increased evapotranspiration demand. Rainfed alfalfa was also divided into five productivity classes (<5, 5–10, 10–15, 15–20, and >20 $t.ha^{-1}$). The highest productivity zones were restricted to limited areas of Guilan and Mazandaran provinces, accounting for less than 1% of the country's agricultural land. Approximately 34% of agricultural lands produced less than 5 $t.ha^{-1}$, while nearly 55% produced between 5 and 10 $t.ha^{-1}$. Unlike irrigated conditions, climate change generally increased rainfed alfalfa productivity in most agro-climatic zones due to improved thermal conditions and longer growing seasons.

Conclusion: The present study produced national agro-ecological zoning maps for irrigated and rainfed alfalfa under current and projected climatic conditions using the SSM-iCrop2 simulation model. The results indicated that climate change will improve forage production in cooler regions while reducing productivity in warmer environments. Therefore, adaptation strategies should be region-specific and consider local climatic characteristics. The findings provide valuable scientific information for policymakers, agricultural planners, and researchers to optimize land use, improve water resource management, and enhance the resilience of forage production systems under future climatic conditions.

Key words: Agro-ecological zoning, Alfalfa, Climate change, Crop simulation, Dry forage yield and Water productivity

Received September, 2025 **Accepted: September, 2026**

1. Ph. D. Graduate, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
(Corresponding author, ✉ paravar20@gmail.com)
2. Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3. Associate Prof., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
4. Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
5. PhD, Graduate, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2025© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

مقدمه

استفاده از مدل‌های شبیه سازی تولید گیاهان زراعی با هر هدفی، نیازمند داده‌های قابل اعتماد منطقـــه‌ای از قبیل اطلاعات خاک و هواشناسی، تاریخ کاشت، تراکم بوته و زمان رسیدگی محصول می‌باشد کـه کلیه این داده‌ها برای اکثر مناطق به سهولت قابل دسترسی نمی‌باشند (Ramirez-Villegas and Challinor, 2012). بدست آوردن این اطلاعات در بسیاری از مناطق بسیار زمان‌یر و پرهزینـه بـوده و اغلـب بـه سـادگی امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین به یک پروتکل مشخص نیاز است تا با اســتفاده از آن بتوان تعداد مکان‌هـــای مـــورد نیاز برای شبیه سازی عملکرد را به حداقل رساند. به عبارت دیگر، در صورتی کـــه منـــاطقی کـــه از نظـــر شرایط اقلیمی، خاک و مدیریتی مشابه باشند، شناسایی شوند، زمان و هزینه مورد نیاز بـرای جمـع‌آوری اطلاعات در سطح وسیع به حداقل مقدار خواهد رسید. پهنه‌بندی زراعی- بوم شناختی کشور می‌تواند در تهیه اطلاعات لازم برای اجرای مدل‌های شبیه سازی تولید بسیار مفید باشد. پهنه‌بندی، اطلاعات مورد نیاز برای اســتفاده در مدل‌های شـبیه سـازی را نیز فراهم می‌کند. و با اسـتفاده از پهنه‌بندی می‌توان آثار ناشـــی از تغییر اقلیم را در هر پهنه اقلیمی مورد ارزیابی دقیق قرار داد، پهنه‌های دارای شـرایط مشابه را شناسایی کرد و راهبردهای زراعی جهت کاهش آثار منفی تغییر اقلیم بر عملکرد، رشـــد و بهره‌وری آب را در گیـاهـان زراعی بهتر پیش‌بینی نمود (Soltani *et al.*, 2018).

تحقیقات انجام شده در ایران در ارتباط با پهنه‌بندی و پتانسیل‌یابی عملکرد گیاهان زراعی به طور عمده بر مبنای پهنه‌بندی اقلیمی انجام شـــده و برای پهنـه‌بنـدی منـاطق کوچک تحقیقات اندکی انجام شـــده اســـت. به‌علاوه ویژگی‌های خاک یک منطقه نیز همانند اقلیم و برهمکنش آنها، اثر چشمگیری بر تولید محصول گیاهان زراعی دارد. در صـــورتی کـه عوامـل اقلیمی و ویژگی‌هـای خـاک به‌صورت توام در پهنه‌بندی مد نظر قرار گرفته شوند، آن را پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شـــناختی می‌نامند (Soltani *et al.*, 2018). پهنه‌بندی زراعی-بوم‌شـناختی کشـور می‌تواند در تهیه اطلاعات لازم برای اجرای مدل‌های شبیه‌سازی تولید بسـیار مفید باشـد. مزایای پهنه‌بندی به‌طور کلی عبارتند از ۱- شناسایی نواحی مشابه یا متفاوت برای مقاصد مختلف، ۲- شـــناســـایی اولویت‌های محیطی در هر منطقه، ۳- جهت‌دهی تحقیقات علمی، ۴- تعیین زمان وقوع و طول دوره وقوع تنش روی گیاهان زراعی و ۵- تســهیل انتقال تکنولوژی و یـافتـه‌هـای تحقیقـاتی (Soltani, 2017; Williams *et al.*, 2008; Seppelt, 2000; Geerts *et al.*, 2006). برای پهنه‌بندی اقلیمی روش‌هایی با عنوان «دامنه برون‌یابی اطلس جهانی خلاء عملکرد» بـا اسـتفـاده از (Global Yield Gap Atlas; GYGA) ابداع شـده اسـت که عملا ترکیبی ساده شده از روش‌های موجود بوده و در آن پهنه‌های اقلیمی بر اســاس ســه متغیر؛ واحد دمایی با دمای پایه صـفر درجه سـانتی‌گراد (روز-درجه رشـد؛ GDD) ، نوسـانات دمای فصـلی و شـاخص خشـکی سـالیانه قابل تفکیک هستند (Soltani *et al.*, 2018). پهنه‌بندی خاک نیز یکی از پایگاه‌های مهم اطلاعاتی، به ویژه در مدل‌های گیاهی اســت. برای رفع محدودیت‌های داده‌های خاک و محدودیت مکانی اطلاعات، پروفیل‌های کلی خاک بر اســاس ســه معیار بافت خاک، عمق خاک و کربن آلی خاک تهیه شـده که به نقشـه خاک HC27 معروف اسـت (Koo and Dimes, 2013).

برای ارزیـابی واکنش گیـاهـان گیـاهی بـه تغییر اقلیم، مدل‌های شـبیه ســازی گیاهان زراعی به‌طور گســترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های شبیه‌سازی واکنش گیاه به عملیات مدیریتی (مانند آبیاری)، ویژگی‌های خاک (مانند بافت و عمق خاک)، واکنش به دمای هوا و غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری را شبیه سازی می‌کنند. جفت شـــدن مدل‌های گیاهان زراعی با ســناریوهای تغییر اقلیم، یک روش رایج برای ارزیابی واکنش گیاهان زراعی به اقلیم آینده است (Katerji *et al.*, ۲۰۱۰). پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی نشـان داده اسـت که ایران در آینده احتمالا با کـاهـش مـیـزان بـارنـدگـی، افـزایـش دمـا و افـزایـش

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری مواجه خواهد شد (Mosavi *et al.*, 2020).

زراعت بقولات علوفه‌ای مانند یونجه در معرض تهدید تغییر شرایط اقلیمی است و این تغییرات اقلیمی روی ارزش غذایی (Kulkarni *et al.*, 2018)، مدیریت و عملکرد بالقوه یونجه (Jing *et al.*, 2026) و بهره‌وری آب تاثیر می‌گذارد. گزارش شده است که افزایش دما، بدون تاثیر بر افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در آینده باعث کاهش عملکرد تا حدود ۱۱ درصد خواهد شد (Thivierge *et al.*, 2016). واکنش یونجه به افزایش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری ممکن است توسط دما، نیتروژن، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش بارندگی محدود شود. در یک آزمایش در مناطق شرقی کانادا روی گیاه یونجه با استفاده از مدل علوفه چند ساله CSM-CROGRO گزارش شده است که عملکرد سالانه شبیه سازی شده بدون تغییر در تعداد برداشت‌ها در سال، با افزایش دما به میزان دو درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای پایه و تنش گرمایی در برخی از مناطق، کاهش خواهد یافت و با افزایش تعداد برداشت‌های حاصل از دمای بالاتر از دو درجه سانتی‌گراد، همراه با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تا ۴۵۰ و ۵۲۰ قسمت در میلیون، عملکرد سالانه شبیه سازی شده افزایش خواهد یافت (Jing *et al.*, 2026).

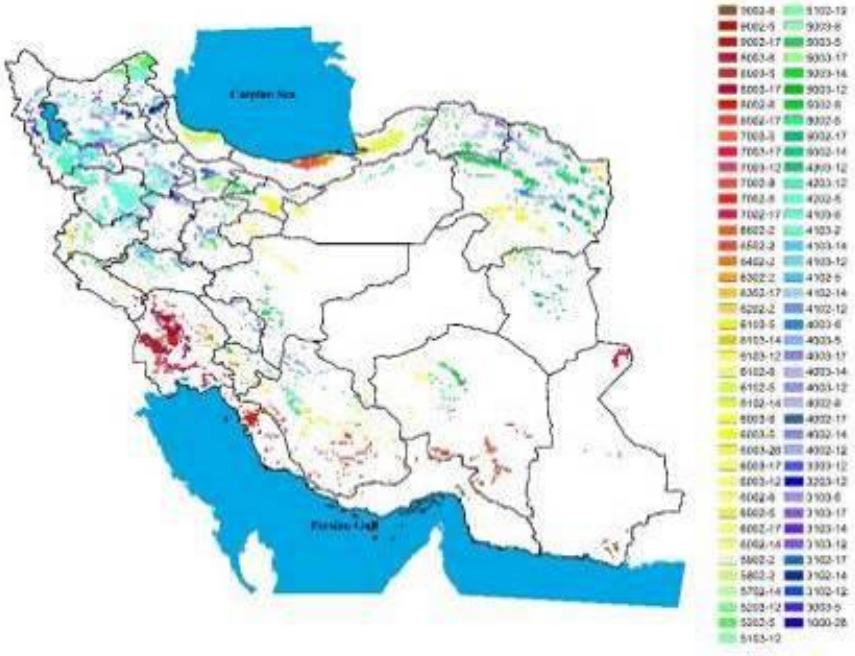
پژوهش حاضر با اهداف زیر انجام شده است: ۱- پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شناختی کشور به طوری که عوامل اقلیمی و خاک به‌صورت توام مد نظر قرار گرفته شوند، ۲- تهیه و تکمیل بانک اطلاعات اقلیمی و خاک در هر پهنه برای استفاده در مدل‌های شبیه سازی تولید گیاهان زراعی، ۳- تعیین وضعیت پهنه‌های به دست آمده در شرایط فعلی از نظر تولید محصول با استفاده از شبیه سازی تولید در شرایط آبی و دیم، ۴- تعیین تغییرات پهنه‌ها در شرایط اقلیمی آینده در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 (Representative Concentration Pathway). با توجه به چند ساله بودن گیاه یونجه و استقرار آن در تمام طول سال در زمین و بالا بودن میزان تولید زیست توده آن که امکان بدست آوردن اطلاعات مفیدی از نظر پتانسیل تولید در هر پهنه را فراهم می‌کند، در این تحقیق از گیاه یونجه استفاده شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق در ابتدا پهنه‌بندی اقلیمی به روش GYGA و پهنه‌بندی خاک بر اساس نقشه خاک HC27 انجام شد و سپس از ترکیب پهنه‌ها، پهنه‌های زراعی-بوم‌شناختی حاصل شدند. به این منظور با استفاده از نقشه اقلیمی GYGA و نقشه خاک HC27 و ترکیب و هم‌پوشانی دو نقشه، ۱۹۸ پهنه زراعی- بوم‌شناختی برای کل اراضی کشاورزی کشور بدست آمد. پهنه‌های زراعی- بوم‌شناختی ترکیبی از پهنه‌بندی اقلیمی کشور به روش GYGA و پهنه‌بندی خاک به روش HC27 می‌باشد (Paravar *et al.*, 2022). با استفاده از مدل SSM-iCrop2 شبیه‌سازی رشد و عملکرد یونجه برای شرایط اقلیمی فعلی و آینده در پهنه‌های زراعی- بوم‌شناختی (حاصل از ترکیب نقشه اقلیمی GYGA و نقشه خاک HC27) انجام شد. تعداد ایستگاه‌های هواشناسی که این پهنه‌های زراعی- بوم‌شناختی را شامل شده و شبیه سازی در آن‌ها انجام شد، ۱۳۰ ایستگاه می‌باشد که با توجه به آمار هواشناسی در دسترس شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش برای هرکدام از ایستگاه‌ها، مدل برای هشت تا ۳۲ سال اجرا شد. با توجه به داده‌های هواشناسی در دسترس، به جز چند مورد محدود، تعداد سال‌هایی که داده‌های هواشناسی در دسترس بودند بالای ۲۰ سال بود، امکان افزایش دقت نتایج نیز بالا بود. در مطالعات شبیه سازی برای دسترسی به داده‌های هواشناسی در سطح وسیع (۱۳۰ ایستگاه) معمولا با محدودیت مواجه است، با این حال بالا بودن تعداد سال‌های شبیه سازی برای اکثرایستگاه‌ها، باعث افزایش دقت نتایج می‌شود. در شکل۱ پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شناختی اراضی کشاورزی ایران نشان داده شده است (Paravar *et al.*, 2022). با توجه به اینکه تحقیق حاضر

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

فقط روی اراضی کشاورزی کشور انجام شده (نه برای کل اراضی کشور) و با توجه به اینکه پهنه‌های مورد ارزیابی ترکیبی از پهنه‌های اقلیمی‌و خاک است و ویژگی‌های اقلیمی‌و خاک به‌طور توام مورد استفاد قرار گرفتند، انتظار می‌رفت دقت کار مناسب باشد. اطلاعات نقشه پراکنش اراضی دیم و آبی جهت ارزیابی عملکرد در شرایط آبی و دیم از وزارت جهاد کشاورزی تهیه شد. تعیین دیم یا آبی بودن پهنه‌های زراعی-بوم‌شناختی به دست آمده بر اساس اطلاعات دریافت شده از وزارت جهاد کشاورزی انجام شد.



شکل ۱- پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شناختی اراضی کشاورزی کشور ایران
پهنه‌های گرم با رنگ‌های گرم (قرمز و نارنجی) و اقلیم‌های سردتر با رنگ‌های سرد نشان داده شده است

Fig. 1. Agro-ecological zoning of arable lands in Iran (Paravar *et al.*, 2022)

مدل SSM-iCrop2 نسخه ساده‌تری از مدل‌های SSM (Simple Simulation Models) است که برای تخمین میزان تولید در مقیاس بزرگ مربوط به گیاهان مختلف زراعی، به‌ویژه ارزیابی در دسترس بودن مواد غذایی و آثار تغییرات آب و هوایی مناسب است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این مدل در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان توسط سلطانی و همکاران (Soltani *et al.*, 2013) طراحی شده است. در این مدل، مقدار عملکرد بالقوه بر اساس داده‌های هواشناسی، وضعیت خاک، نحوه مدیریت (مانند آبیاری) و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود. در این مدل شبیه‌سازی به‌صورت روزانه انجام شده و از اطلاعات قابل دسترس آب و هوا و خاک استفاده می‌شود (Soltani and Sinclair, 2011). مدل حاصل با استفاده از آزمایش‌های مزرعه‌ای متعدد برای بیش از ۳۰ گونه گیاهی ایران پارامتریابی و آزمایش شده است. به‌علاوه پارامتریابی و ارزیابی مدل برای یونجه نیز انجام شده است (Pourshirazi *et al.*, 2023). گزارش شده است که این مدل برای پیش‌بینی عملکرد محصول و مصرف آب بسیار مناسب است. زیرمدل iCrop2 نیز برگرفته از مدل اصلی SSM می‌باشد (Soltani *et al.*, 2020). در این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز در نظر گرفته نمی‌شود.

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

جدول ۱- پارامترهای برآورد شده در مدل SSM-iCrop2 برای یونجه آبی

Table 1. Estimated parameters in the SSM-iCrop2 model for irrigated alfalfa (Pourshirazi *et al.*, 1400)

Parameter	پارامتر	Abv حروف اختصاری	Value مقدار
Base Temp. for development (˚C)	دمای پایه نمو	TBD	5
Lower Opt. Temp. for development (˚C)	دمای مطلوب تحتانی نمو	TP1D	30
Upper Opt. Temp. for development (˚C)	دمای مطلوب فوقانی نمو	TP2D	30
Ceiling Temp. for development (˚C)	دمای سقف نمو	TCD	40
Thermal units from Jan. 1 for spring regrowth	واحد دمایی از اول ژانویه برای رشد مجدد بهاره	ForReq	180
Thermal units for growth	واحد دمایی برای شروع رشد	tu EMR	6.5
Thermal units for beginning of seed growth	واحد دمایی برای شروع رشد بذر	tu BSG	7.15
Thermal units for termination of seed growth	واحد دمایی برای پایان رشد بذر	tu TSG	643.5
Thermal units to physiological maturity	واحد دمایی برای رسیدگی فیزیولوژیکی	tu PM	643.5
Thermal units to harvest	واحد دمایی برای برداشت	tu HAR	650
First point of normalized leaf area index curve	نقطه اول منحنی شاخص سطح برگ نرمال شده	x1,y1	0.15, 0.01
Second point of normalized leaf area index curve	نقطه دوم شاخص سطح برگ نرمال شده	x1,y1	0.8,0.95
Maximum leaf area index	حد اکثر شاخص سطح برگ	LAIMX	3-5
Thermal units to beginning of leaf senescence	واحد دمایی از کاشت تا شروع پیر شدن برگ‌ها	tu BLS	643.5
Leaf senescence rate coefficient	ضریب سرعت پیر شدن برگ	SRATE	0
Freezing threshold for leaf death	آستانه انجماد مرگ برگ	FrzTh	-7
Relative leaf death below freezing threshold	مرگ نسبی برگ زیر دمای انجماد به ازای کاهش دما	FrzLDR	0.01
Heat threshold for leaf senescence	دمای آستانه پیر شدن برگ‌ها	Heat TH	35
Relative increase in leaf senescence due to heat	افزایش نسبی سرعت پیری برگ به ازای افزایش دما	HtLDR	0.1
Base temperature for dry matter production	دمای پایه برای تولید ماده خشک	TBRUE	0
Lower optimum temperature for dry matter production	دمای مطلوب پایین برای تولید ماده خشک	TP1RUE	8
Upper optimum temperature for dry matter production	دمای مطلوب بالا برای تولید ماده خشک	TP2RUE	25
Ceiling temperature for dry matter production	دمای سقف برای تولید ماده خشک	TCRUE	40
Light extinction coefficient for PAR	ضریب خاموشی برای تابش فعال فتوسنتزی	KPAR	0.65
Radiation use efficiency	کارآیی مصرف تابش	RUE	2.3
CO_2 response coefficient for RUE	ضریب پاسخ RUE به غلظت دی‌اکسید کربن	C3,C4	0.8
Maximum harvest index	حداکثر شاخص برداشت	HImax	0.9
Fraction of remobilized dry matter	ماده خشک قابل انتقال مجدد	FRTRL	0.05
Grain conversion coefficient	ضریب تبدیل دانه	GCC	1
Thermal units for root growth initiation	واحد دمایی برای شروع رشد ریشه	tuBRG	6.5
Thermal units for root growth termination	واحد دمایی برای پایان رشد ریشه	tuTRG	
Root depth at emergence	عمق ریشه در زمان سبز شدن	iDEPORT	1000
Maximum effective rooting depth	حداکثرعمق موثر ریشه	MEED	1300
Transpiration efficiency coefficient	ضریب کارآیی تعرق	TEC	5
Fraction of available soil water reducing dry matter production	آستانه آب قابل دسترس برای تولید ماده خشک	WSSG	0.5
Fraction of available soil water reducing leaf expansion	آستانه آب قابل دسترس برای گسترش سطح برگ	WSSL	0.5
Sensitivity coefficient of development and senescence to water stress	ضریب حساسیت نمو و پیر شدن به تنش خشکی	WSSD	0

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

عملکرد علوفه بر اساس ماده خشک حاوی ۷ تا ۲۰ درصد رطوبت است، اما مقدار رطوبت علوفه به‌طور استاندارد ۱۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس مقدار ماده خشک علوفه، منطبق با ترکیب خوراک USDA/NRCS ۸۵ درصد است. در مدل SSM-iCrop2 عملکرد علوفه با صفر درصد رطوبت در نظر گرفته می‌شود و در عمل برای قابل مقایسه بودن با آمارنامه‌ها، ۱۵ درصد رطوبت (عدد تیپیک) به آن اضافه می‌شود. بنابراین، اعداد ارائه شده در تحقیق حاضر علوفه خشک یونجه حاوی ۱۵ درصد رطوبت هستند. رطوبت علوفه تر یونجه در زمان برداشت ۷۵ تا ۸۰ درصد است.

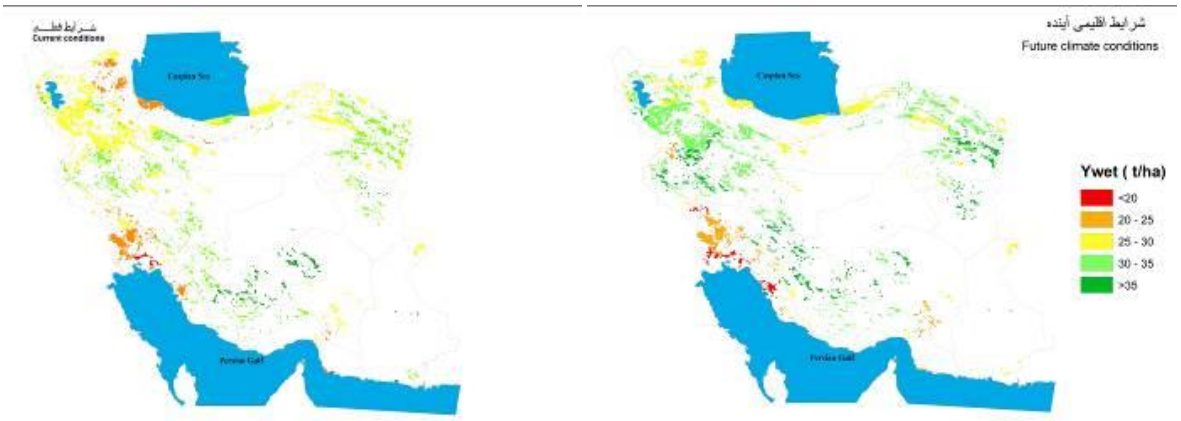
به‌منظور بررسی اثر تغییر اقلیم در آینده بر میزان رشد، عملکرد و مصرف آب یونجه از میانگین خروجی مدل‌های عمومی گردش (General Circulation Model; GCM) برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. در سناریوی RCP8.5 فرض می‌شود که شرایط فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای ادامه دارد. در این سناریو رشد جمعیت بالا، رشد اقتصادی کند، تغییرات تکنولوژی اندک و افزایش مصرف انرژی منظور شده است که در غیاب سیاست‌های مناسب تغییر اقلیم در بلند مدت باعث افزایش تقاضای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای خواهد شد (Soltani *et al.*, 2018). در این سناریو بالاترین حد انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است. در سناریوی RCP4.5 فرض می‌شود که فعالیت‌های بشر برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای در حد متوسط بوده و تولید انرژی عمدتا بر اساس استفاده از انرژی‌های تجدید ناپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی صورت می‌گیرد (Soltani and Mirzaei, 2021). بر اساس معدل مدل‌های مختلف عمومی گردش برای RCP8.5، غلظت دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۵۰ معادل ۵۴۱ قسمت در میلیون خواهد بود و برای شرایط ایران باعث دما افزایش شده، اما میزان بارندگی تغییری نخواهد داشت (Soltani *et al.*, 2018). در تحقق حاضر جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد یونجه آبی و دیم و همچنین مصرف آب در زراعت یونجه آبی در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5، بر اساس پیش‌بینی تا سال ۲۰۵۰، اثر تغییر اقلیم در سناریوی RCP4.5 با افزایش دما به میزان ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن به ۴۸۷ قسمت در میلیون و در سناریوی RCP8.5 با افزایش دما به میزان ۳/۷۵ درجه سانتی‌گراد و غلظت دی‌اکسید کربن به میزان ۵۴۱ قسمت در میلیون تغییر یافت و در مدل SSM-iCrop2 در قسمت مربوط به داده‌های هواشناسی در ستون tchng (تغییرات دما) و دی‌اکسید کربن اعمال شد. پس از شبیه سازی، نقشه‌های مورد نظر با استفاده از نرم افزار Arc GIS10.8 رسم شدند. (نقشه‌ها با وضوح بالاتر از طریق تماس قابل دریافت هستند؛ Afshin.Soltani@gmail.com).

نتایج و بحث

براساس نتایج حاصل از شبیه سازی، بر اساس عملکرد علوفه خشک یونجه آبی، کشور به پنج پهنه (یاطبقه) تقسیم شد که شامل پهنه‌هایی با عملکرد کمتر از ۲۰ تن در هکتار، ۲۰ تا ۲۵، ۲۵ تا ۳۰، ۳۰ تا ۳۵ و بیش از ۳۵ تن درهکتار می‌باشند که به ترتیب حدود یک، ۱۴، ۴۶، ۳۴ و پنج درصد از مساحت کل اراضی کشاورزی کشور را به خود اختصاص دادند. نتایج نشان داد پهنه‌های با عملکرد بیش از ۳۵ تن درهکتار در بخش‌هایی از شمال شرقی (استان خراسان جنوبی) و بخش‌های مرکزی کشور (استان‌های فارس،کرمان، خراسان جنوبی، یزد و سیستان و بلوچستان) قرار دارند. پهنه‌های با عملکرد کمتر از ۲۰ تن در هکتار نیز بخش‌هایی از استان‌های خوزستان و هرمزگان قرار دارند (شکل ۲). نتایج شبیه سازی مربوط به یونجه آبی در شرایط اقلیمی‌آینده (میانگین دو سناریوی ذکر شده) نشان داد که مساحت پهنه‌های با عملکرد کمتر از ۲۰ تن در هکتار از یک درصد در شرایط فعلی به حدود چهار درصد در شرایط اقلیمی‌آینده افزایش خواهد یافت.

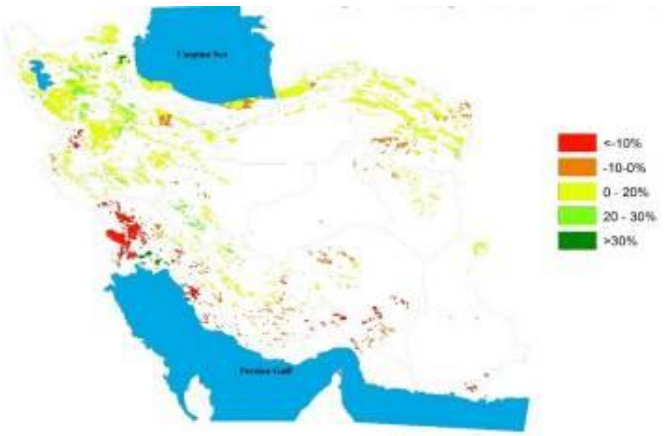
[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

سهم پهنه‌های با عملکرد ۲۰ تا ۲۵ تن در هکتار نیز درشرایط اقلیمی آینده از ۱۴ درصد به ۱۲ درصد کاهش خواهد یافت. سهم پهنه‌های دارای عملکرد ۲۵ تا ۳۰ تن در هکتار از ۴۶ درصد به ۲۵ درصد کاهش خواهد یافت و پهنه‌های با عملکرد ۳۰ تا ۳۵ و بیش از ۳۵ تن در هکتار که در شرایط اقلیمی‌فعلی به ترتیب ۳۴ و پنج درصد از مساحت کل را به خود اختصاص داده‌اند، در شرایط اقلیمی آینده به ترتیب ۴۴ و ۱۹ درصد از مساحت کل را خواهند داشت (شکل ۳). با توجه به اینکه در شرایط آبی محدودیت آب وجود ندارد، بنابراین علت افزایش عملکرد در شرایط آبی می‌تواند به این علت باشد که با افزایش دما و غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری، دمای پهنه به دمای مطلوب جهت فتوسنتز و رشد گیاه نزدیک می‌شود و بنابراین میزان فتوسنتز و تولید علوفه افزایش خواهد یافت و در پهنه‌هایی که دمای هوا پایین‌تر است، این افزایش بیشتر خواهد بود.



شکل۲- پهنه‌بندی اراضی کشاورزی کشور بر اساس عملکرد علوفه خشک یونجه آبی در شرایط اقلیمی فعلی و آینده

Fig. 2. Agro-ecological zoning of agricultural fields in Iran based on dry forage yield of irrigated alfalfa under current and future climatic conditions



شکل ۳- پهنه‌بندی اراضی کشاورزی کشور بر اساس درصد تغییرات عملکرد علوفه خشک یونجه آبی در شرایط اقلیمی آینده

Fig. 3. Agro-ecological zoning of agricultural fields in Iran based on the percentage change of dry forage yield of irrigated alfalfa under future climatic conditions

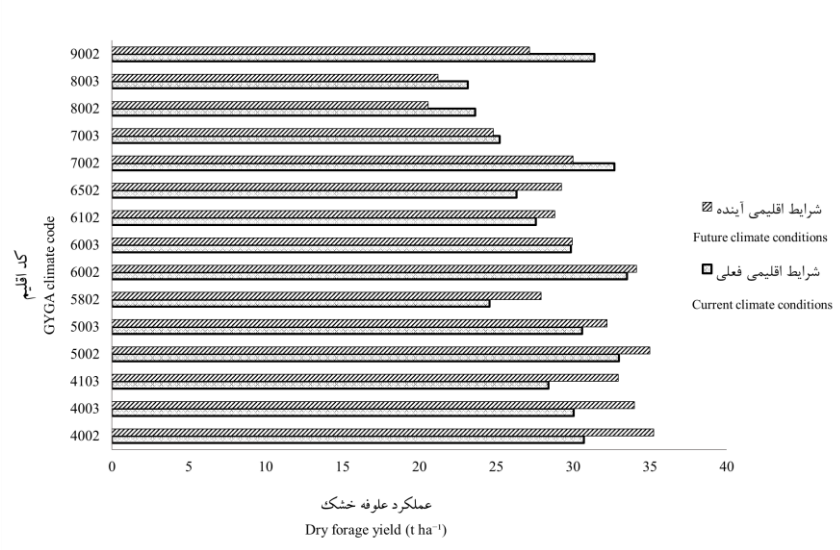
[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

نتایج نشـــان داد که تغییر اقلیم در پهنه‌های مهم آبی (پهنه‌های دارای کد اقلیمی ۴۰۰۰ تا ۹۰۰۰ روز-درجه رشـــد ســـالانه با دمای پایه صـــفر) که کد اقلیم آن‌ها بر اســـاس GYGA، ۶۰۰۰ و کمتر بود، بـاعـث افزایش عملکرد علوفه خشـــک و در کد اقلیمی ۷۰۰۰ و بالاتر (شامل بخش‌هایی از استان خوزستان، بوشهر، هرمزگان و ســیســتان و بلوچســتان)، باعث کاهش عملکرد تا ۱۵ درصـــد شـــد. اقلیم‌های با کد ۶۰۰۰ و کمتر اقلیم‌های سردتر و معتدل هستند (شکل‌های ۴ و۵). در این اقلیم‌ها در شـرایط عدم محدودیت آب، با افزایش دما و غلظت دی‌اکسـید کربن اتمسـفری شـرایط به وضـعیت مطلوب برای رشـد نزدیک تر شـده عملکرد افزایش می‌یابد، اما در پهنه‌هایی با کد ۷۰۰۰ و بالاتر که گرم‌تر هســـتند، افزایش دما محدود کننده رشـــد بوده و عملکرد کاهش خواهد یافت.

افزایش عملکرد یونجه آبی در ســـناریوهای اقلیمی آینـده را می‌توان حـاصـــل بر هم‌کنش افزایش دمـا و افزایش غلظت دی‌اکسـید کربن اتمسـفری دانسـت. در شرایطی که محدودیت آب وجود نداشته باشد، افزایش دما در پهنه‌های ســـردتر می‌تواند باعث نزدیک شـــدن شـرایط دمایی به دامنه مناسـب رشـد یونجه، طولانی‌تر شـدن فصـل رشـد و در نتیجه افزایش فرصـت برای رشـد مجدد گیاه و تعداد برداشـت‌های بیشـتر شـود. نتایج یک تحقیق در کانادا نیز نشـان داد که افزایش دما می‌تواند با طولانی‌تر کردن فصـل رشـد یونجه، باعث جلو انداختن زمان شـروع رشـد و به تاخیر انداختن پایان رشـد گیاه شـــده و در نتیجه امکان افزایش تعداد برداشـــت‌ها و افزایش عملکرد فراهم خواهد شـد (Jing *et al.*, 2026). از ســـوی دیگر، افزایش غلظـت دی‌اکســـیـد کربن اتمســـفری می‌تواند در یونجه که یک گیاه ســـه کربنی اســـت، بـاعـث تحریـک فتوســـنتز و افزایش تولیـد زیســـت‌توده شـــود. در آزمـایش روی دو رقم یونجه گزارش شـــد کـه افزایش غلظـت دی‌اکســـیـد کربن اتمسفری از ۴۰۰ به ۶۰۰ و ۸۰۰ قسمت در میلیون باعث افزایش معنی‌دار فتوســـنتز، ســـطح برگ و تولیـد مـاده خشـک شـد. پاسـخ یونجه به افزایش غلظت دی‌اکسـید کربن اتمسـفری در غلظت‌های بسـیار بالا مکن اسـت به اشـباع برسـد و اثر افزایشـی دی‌اکسـید کربن لزوما با افزایش غلظـت آن بـه‌صـورت خطی ادامـه نمی‌یـابـد (Kizildeniz, 2024). افزایش بیشـتر عملکرد در پهنه‌های ســـردتر را می‌توان با این فرض تبیین کرد که این مناطق در شـــرایط اقلیم پایه، بیش‌تر در محدودیت دمایی قرار دارند و افزایش دما در سـناریوهای آینده می‌تواند باعث نزدیک‌تر شـــدن آنها به شـــرایط دمایی مناســـب‌تر برای رشـد شـود. درمقابل در پهنه‌های گرم‌تر، افزایش بیشـتر دما ممکن است باعث نزدیک شدن دما به محدوده‌های تنش گرمایی شـــده و باعث خنثی شـــدن بخشـــی از اثر مثبت افزایش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ عملکرد یونجه به تغییر اقلیم دارای وابســـتگی مکـانی و اقلیمی اســـت؛ به‌گونه‌ای که در پهنه‌های ســـردتر، افزایش دما و غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری می‌تواند اثر مثبت داشته باشد، در حالی که در مناطق گرم‌تر، افزایش دما ممکن اســـت به یک عامل محدودکننده تبدیل شـــود. این نتیجه‌گیری با نتایج ســـایر تحقیقات نیز مطابقت دارد که افزایش عملکرد آینـده یونجه بـه افزایش طول فصـــل رشـــد، افزایش تعداد برداشـت‌ها و بهبود کارایی فتوسـنتزی در غلظت بالای دی‌اکسـید کربن نسـبت داده شـده اسـت (Jing *et al.*, 2026).

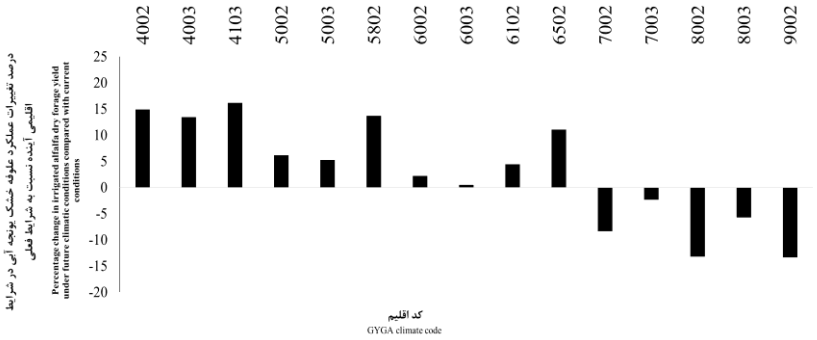
با فرض زراعت یونجه به شـیوه فاریاب در اراضـی کشاورزی کل کشور، از نظر نیاز آبیاری خالص، کشور به پنج پهنه (طبقه) تقسـیم شـد که شـامل پهنه‌های با نیاز آبیاری کمتر از چهار هزار متر مکعب در هکتار، ۴ تا ۸، ۸ تـا ۱۲، ۱۲ تـا ۱۶ و بیش از ۱۶ هزار متر مکعـب در هکتـار بود. پهنـه‌هـای دارای کمترین میزان نیـاز آب آبیاری (کمتر از چهار هزار متر مکعب) شامل استان‌های گیلان و مازندران بود. پهنه‌های دارای بیشـــترین میزان نیاز آبی (بیشـــتراز ۱۵ هزار متر مکعب) نیز اســـتان‌های

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]



شکل ۴- عملکرد علوفه خشک یونجه آبی درپهنه‌های مهم آبی در شرایط اقلیمی حال و آینده

Fig. 4. Dry forage yield of irrigated alfalfa in major irrigated agro-ecological zones under current and future climatic conditions



شکل ۵- درصد تغییرات عملکرد علوفه خشک یونجه در پهنه‌های مهم آبی در شرایط اقلیمی آینده

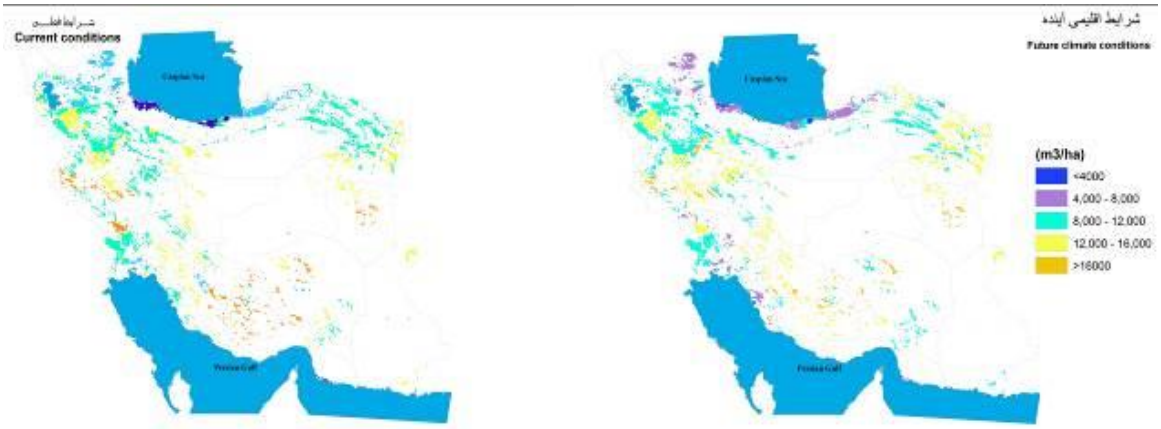
Fig. 5. Percentage change of dry forage yield of irrigated alfalfa in major irrigated agro-ecological zones under future climatic conditions

خراسان جنوبی، لرستان، کرمانشاه، فارس، خوزستان،کرمان، سیستان و بلوچستان، یزد و هرمزگان را شامل شد. در پهنه‌هایی که کداقلیمی‌آن‌ها بر اساس GYGA، ۵۰۰۰ و کمتر بود، در شرایط اقلیمی‌آینده میزان نیاز آب آبیاری افزایش نشان داد. در پهنه‌های اقلیمی با کد ۶۰۰۰ و بالاتر در اقلیم آینده، کاهش میزان آب آبیاری مشاهده شد (شکل‌های ۶ و۷). علت این موضوع احتمالا کاهش رشد در اثر افزایش دما در پهنه‌های دارای اقلیم گرم، کاهش سطح برگ و در نتیجه کاهش تعرق گیاه می‌باشد که این موضوع نشان دهنده اهمیت تعرق در تعیین حجم آب مصرفی در شرایط اقلیمی‌آینده می‌باشد. در پهنه‌های دارای اقلیم سردتر، با افزایش دما، میزان رشد و سطح برگ گیاه افزایش خواهد یافت، در نتیجه در این پهنه‌ها در اثر افزایش تعرق، میزان آب آبیاری افزایش خواهد یافت. در پهنه‌های سردتر، افزایش دما در شرایط اقلیمی آینده

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

می‌تواند شرایط دمایی را به محدوده مناسب رشد یونجه نزدیک کرده و باعث افزایش رشد و توسعه سطح برگ شود. افزایش سطح برگ و زیست‌توده فعال، باعث افزایش ظرفیت تعرق گیاه، افزایش مصرف آب و افزایش نیاز آبی گیاه شود. نتایج سایر تحقیقات جدید نیز نشان داده است که تغییرات دما و طول فصل رشد اثر قابل توجهی بر رشد، عملکرد و مصرف آب یونجه داشته و پاسخ گیاه در مناطق مختلف اقلیمی یکسان نیست(Jing *et al.*, 2026). در مقابل، در پهنه‌های گرم‌تر، افزایش دما ممکن است باعث عبور دما از محدوده بهینه رشد یونجه شده و با کاهش رشد و توسعه سطح برگ گیاه همراه شود. کاهش سطح برگ فعال باعث کاهش ظرفیت تعرق پوشش گیاهی شده و در نتیجه میزان آب مورد نیاز برای تامین تبخیر و تعرق کاهش یابد. شواهد آزمایشی نیز نشان داده است که افزایش دما و محدودیت‌های محیطی با کاهش رشد و تبادل کربن در یونجه همراه هستند (Jing *et al.*, 2026). بنابراین کاهش نیاز آب آبیاری در پهنه‌های گرم‌تر لزوما به معنای بهبود شرایط آبی گیاه نیست، بلکه ممکن است پیامد کاهش رشد و کاهش سطح پوشش فعال گیاهی باشد. در شرایطی که آب خاک عامل محدودکننده اصلی نباشد، تغییرات در اندازه تاج پوشش گیاهی سهم قابل‌توجهی در تغییر تبخیر-تعرق واقعی و در نتیجه نیاز آبی گیاه دارد. نتایج تحقیقات نشان داده است که عملکرد و بهره‌وری آب در یونجه تحت تأثیر برهمکنش دما، آب در دسترس و سطح فعالیت پوشش گیاهی قرار دارد (Hammond *et al.*, 2025). بنابراین، افزایش نیاز آبی در پهنه‌های سردتر را می‌توان به افزایش رشد و توسعه سطح برگ و به دنبال آن افزایش تعرق گیاه نسبت داد، در حالی که که کاهش نیاز آبی در پهنه‌های گرم‌تر احتمالا ناشی از کاهش رشد، محدود شدن توسعه تاج پوشش و کاهش تعرق گیاه است.

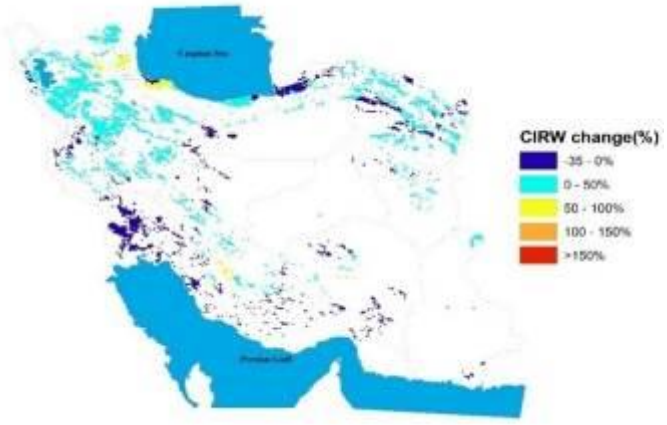
بر اساس نتایج شبیه سازی در شرایط فعلی، از نظر عملکرد علوفه خشک یونجه دیم، کشور به پنج پهنه (طبقه) تقسیم شد که شامل پهنه‌هایی با عملکرد کمتر از پنج تن در هکتار، ۵ تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۵، ۱۵ تا ۲۰ و بیش از ۲۰ تن در هکتار بود. پهنه‌های دارای عملکرد بیش از ۲۰ تن در هکتار در بخش‌هایی از گیلان ومازندران قرار گرفته و کمترازیک درصد از مساحت کل را به خود اختصاص دادند.۳۴ درصد از مساحت کل اراضی



شکل ۶- پهنه‌بندی اراضی کشاورزی کشور بر اساس حجم آب آبیاری یونجه در شرایط فعلی و آینده

Fig. 6. Zoning of agricultural fields in Iran based on irrigation water volume for alfalfa under current and future climatic conditions

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]



شکل ۷- پهنه‌بندی اراضی کشاورزی کشور بر اساس درصد تغییرات حجم آب آبیاری یونجه در شرایط اقلیمی آینده

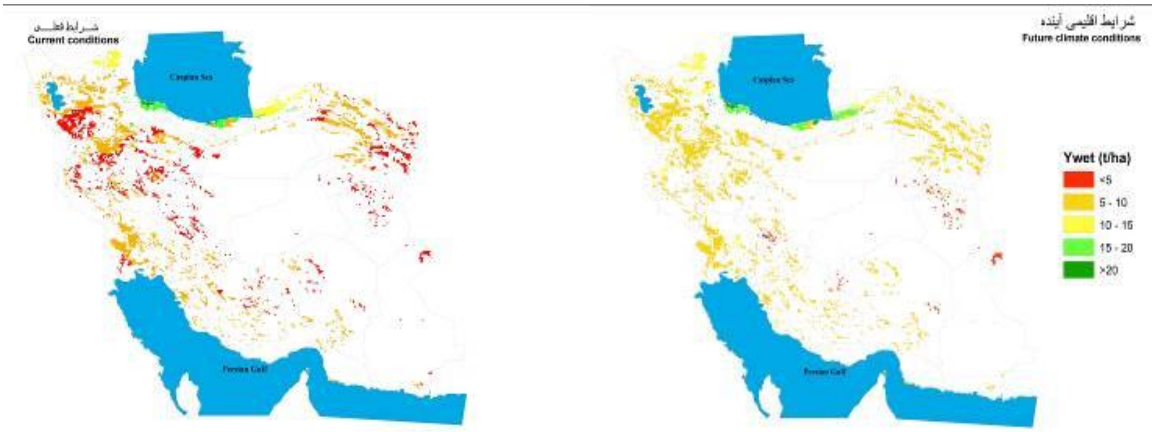
Fig. 7. Zoning of agricultural fields in Iran based on the percentage changes in irrigation water volume for alfalfa under future climatic conditions

کشاورزی کشور دارای عملکرد کمتر از پنج تن در هکتار و ۵۵ درصد از اراضی عملکرد ۵ تا ۱۰ تن در هکتار داشتند. پهنه‌های دارای کمترین عملکرد یونجه دیم (کمتر از پنج تن در هکتار) استان‌های کرمانشاه، اصفهان، فارس، خوزستان، مرکزی، کردستان، خراسان جنوبی، همدان، خراسان رضوی، قزوین، کرمان، زنجان، سیستان و بلوچستان، قم، آذربایجان غربی، یزد، لرستان، مرکزی، چهارمحال و بختیاری را شامل شد (شکل ۸). در شرایط اقلیمی آینده تغییر قابل ملاحظه‌ای در سهم پهنه‌های دارای عملکرد بالای ۲۰ تن در هکتار مشاهده نشد، اما درصد پهنه‌های دارای عملکرد کمتر از پنج تن در هکتار کاهش چشمگیری داشت و از ۳۴ درصد به حدود سه درصد رسید. در اثر تغییر اقلیم، سهم پهنه‌های دارای عملکرد ۵ تا ۱۰ تن در هکتار از ۵۵ درصد به ۸۳ درصد افزایش یافت (شکل ۹). نتایج تحقیقات نشان داده است که رشد و عملکرد یونجه به‌شدت تحت تاثیر شرایط اقلیمی و ویژگی‌های محیطی قرار گرفته و اثر این عوامل در مناطق مختلف یکسان نیست(Asakavičiūtė et al., 2025) . یکی از توضیحات محتمل برای این تغییر، بهبود شرایط دمایی در مناطقی است که در اقلیم پایه با محدودیت دمایی مواجه بوده‌اند. افزایش دما در این مناطق می‌تواند شروع رشد را تسریع کرده و پایان دوره رشد را به تاخیر اندازد، در نتیجه طول فصل رشد و فرصت تجمع ماده خشک افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از مدل‌سازی چند مدلی در کانادا نیز نشان داده است که گرم‌تر شدن هوا در آینده می‌تواند فصل رشد یونجه را طولانی‌تر کرده و از طریق افزایش تعداد برداشت‌ها و بهبود کارایی فتوسنتزی، عملکرد یونجه دیم را افزایش دهد (Jing *et al.*, 2026). در تحقیق حاضر پهنه‌های دارای عملکرد ۱۰ تا ۱۵ تن و ۱۵ تا ۲۰ تن در هکتار که در شرایط فعلی به ترتیب حدود شش و چهار درصد از مساحت اراضی کشاورزی کشور را شامل می‌شدند، در شرایط اقلیمی آینده به ترتیب هشت چهار درصد از مساحت کل را به خود اختصاص خواهند داد و تغییر آنها چندان محسوس نیست.

افزایش دما در شرایط دیم الزاما در همه مناطق اثر مثبت ندارد، زیرا در زراعت دیم مقدار و توزیع زمانی بارندگی نقش تعیین‌کننده‌ای در تامین آب مورد نیاز گیاه دارد. نتایج یک تحقیق در کانادا نشان داد که

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

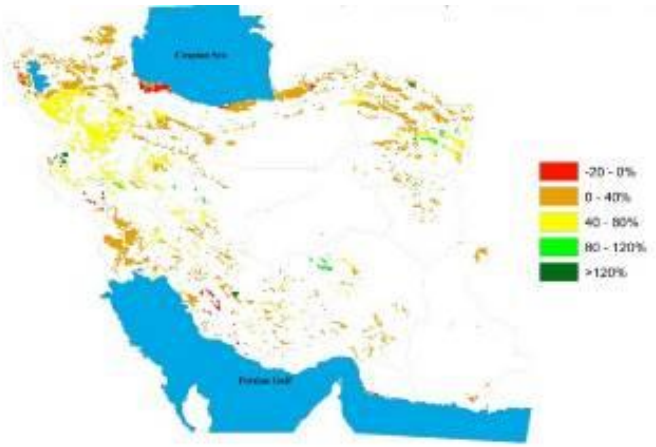
اگرچه عملکرد یونجه دیم در میانگین کشور در سناریوهای آینده افزایش داشت، در بخش‌هایی از مناطق نیمه‌خشک، به دلیل کاهش بارندگی، افزایش عملکرد بسیار محدودتر بود (Jing *et al.*, 2026). نتایج تحقیق حاضر نیز با این موضوع مطابقت دارد و نشان می‌دهد که اثر مثبت افزایش دما در پهنه‌های سردتر زمانی می‌تواند باعث افزایش عملکرد شود که افزایش تقاضای تبخیری و کاهش رطوبت خاک، باعث خنثی شدن اثر مثبت افزایش طول فصل رشد نشود. افزایش دما در مناطق گرم‌تر ممکن است باعث افزایش تقاضای تبخیری و تشدید تنش آبی شود. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده است که کمبود آب رشد و عملکرد یونجه را به‌طور قابل‌توجهی محدود می‌کند؛ به‌ویژه در شرایطی که دمای هوا نیز افزایش یافته باشد (Wang *et al.*, 2025). در چنین شرایطی، افزایش دما ممکن است به جای افزایش عملکرد، باعث کاهش رشد و کاهش تجمع ماده خشک شود. بنابراین، تفاوت پاسخ پهنه‌های مختلف کشور در نتایج حاضر را می‌توان به برهمکنش دما و آب نسبت داد، به‌گونه‌ای که در مناطق سردتر، اثر مثبت افزایش دما بر طول فصل رشد و رشد گیاه غالب است، در حالی که در مناطق گرم و خشک، افزایش تقاضای تبخیری و محدودیت رطوبت می‌تواند اثر منفی داشته باشد. نکته قابل توجه، ثابت ماندن نسبی سهم پهنه‌های دارای عملکرد ۱۵ تا ۲۰ و بیش از ۲۰ تن در هکتار است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییر اقلیم بیشتر باعث بهبود عملکرد در مناطق دارای محدودیت شدید و انتقال آنها به طبقه عملکرد متوسط شده است و الزاما به افزایش عملکرد در مناطق دارای پتانسیل بالا منجر نشده است. در مناطق مرطوب شمال کشور که در شرایط فعلی نیز محدودیت رطوبتی کمتری دارند، افزایش دما ممکن است مزیت دمایی محدودی ایجاد کند و هم‌زمان افزایش تقاضای تبخیر، بخشی از این اثر مثبت را کاهش دهد. بنابراین، پایداری نسبی پهنه‌های با عملکرد بالاتر از ۱۵ تن در هکتار می‌تواند نشان دهنده نزدیک بودن این مناطق به شرایط مناسب رشد در اقلیم پایه باشد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر اقلیم احتمالا توزیع جغرافیایی عملکرد یونجه دیم را بیش از آنکه به سمت افزایش عملکرد سوق دهد، به سمت کاهش



شکل ۸- پهنه‌بندی اراضی کشاورزی کشور بر اساس شبیه سازی عملکرد علوفه خشک یونجه دیم در شرایط اقلیمی فعلی و آینده

Fig. 8. Agro-ecological zoning of agricultural fields in Iran based on simulated dry forage yield of rainfed alfalfa under current and future climatic conditions

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]



شکل ۹- پهنه‌بندی اراضی کشاورزی کشور بر اساس درصد تغییرات عملکرد علوفه خشک یونجه دیم در شرایط اقلیمی آینده

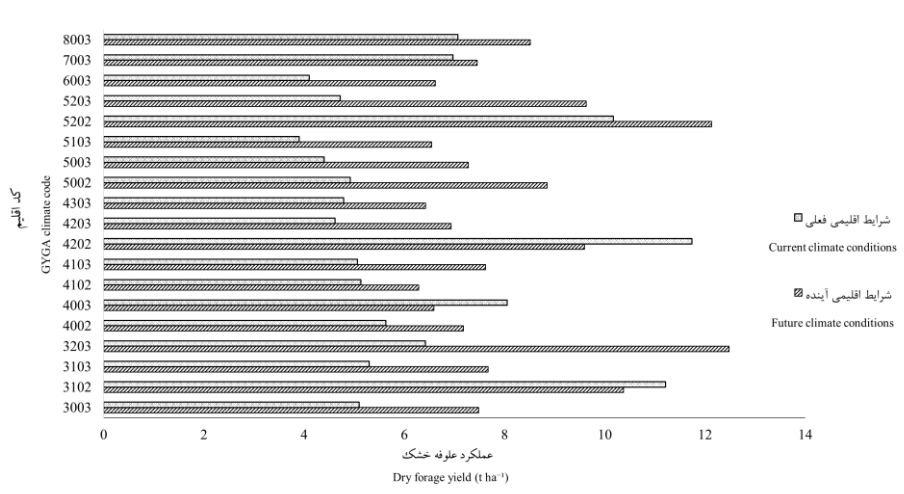
Fig. 9. Agro-ecological zoning of agricultural fields in Iran based on the percentage change in simulated dry forage yield of rainfed alfalfa under future climatic conditions

سطح مناطق بسیار کم‌بازده و افزایش سطح مناطق با عملکرد متوسط تغییر می‌دهد. این پاسخ مکانی ناهمگون با یافته‌های مدل‌سازی یونجه تحت تغییر اقلیم مطابقت دارد و اهمیت توجه هم‌زمان به دما، بارش، طول فصل رشد و دسترسی گیاه به آب را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر تولید یونجه دیم نشان می‌دهد (Jing *et al.*, 2026; Asakavičiūtė *et al.*, 2025).

تغییراقلیم در پهنه‌های مهم دیم (با کد اقلیمی ۳۰۰۰ تا ۸۰۰۰ روز-درجه رشد سالانه با دمای پایه صفر) که کد اقلیم آن‌ها بر اساس GYGA، ۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰ بود، باعث افزایش عملکرد علوفه خشک از ۱۵ درصد تا حدود ۱۷۰ درصد شد. به عبارت دیگر در اکثر پهنه‌های دیم عملکرد علوفه خشک در شرایط اقلیمی آینده افزایش یافت (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). افزایش عملکرد یونجه دیم در اکثر پهنه‌های دارای کد اقلیمی ۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰ نشان می‌دهد که در بخش قابل توجهی از دیمزارهای کشور، شرایط دمایی آینده می‌تواند نسبت به شرایط فعلی برای رشد یونجه مناسب‌تر باشد. بیشترین درصد افزایش عملکرد احتمالا مربوط به پهنه‌هایی است که در شرایط پایه به دلیل دمای پایین‌تر، محدودیت دمایی بیشتری داشتند، بنابراین تغییر اقلیم در این پهنه‌ها می‌تواند از طریق افزایش دمای مؤثر رشد، طولانی‌تر شدن دوره رشد و بهره‌مندی بیشتر از دی‌اکسید کربن اتمسفری افزایش‌یافته و باعث افزایش عملکرد شود، هرچند تحقق این افزایش در شرایط واقعی مزرعه به میزان و توزیع بارندگی و وضعیت رطوبت خاک نیز وابسته خواهد بود.

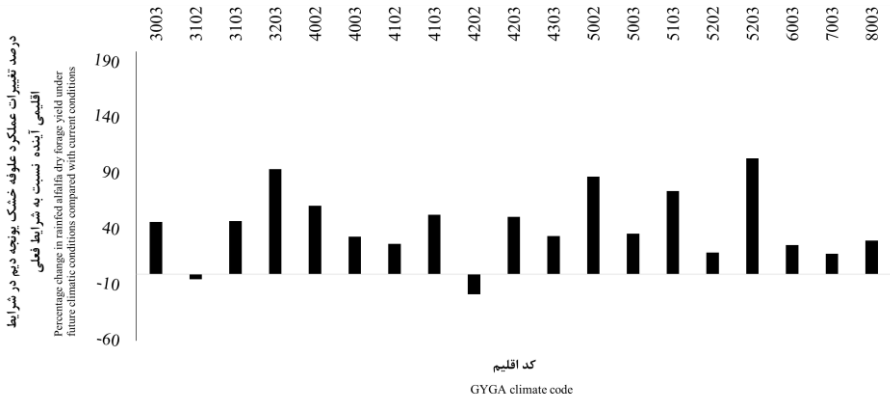
امروزه پهنه‌بندی به عنوان یک رویکرد برای تقسیم بندی زمین به مناطق مختلف برای استفاده‌های خاص، در بسیاری از کشورها به کار می‌رود. در این رویکرد، اراضی کشاورزی به مناطق مختلف تقسیم بندی شده و برای هر منطقه، مقررات و محدودیت‌هایی در نظر گرفته می‌شود که برای آن منطقه رعایت شود. این محدودیت‌ها شامل مقررات ساخت و ساز، کاربری زمین و استفاده از زمین برای اهداف خاص مانند مسکن، تجارت، صنعت، کشاورزی، حمل و نقل، محیط زیست و غیره هستند. برای پهنه‌بندی اقلیمی روش‌های مختلفی

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]



شکل ۱۰- عملکرد علوفه خشک یونجه درپهنه‌های مهم دیم درشرایط اقلیمی فعلی و آینده

Fig. 10. Dry forage yield of alfalfa in major rainfed agro-ecological zones under current and future climatic conditions



شکل ۱۱- درصد تغییرات عملکرد علوفه خشک یونجه در پهنه‌های مهم دیم در شرایط اقلیمی‌آینده

Fig. 11. Percentage change of dry forage yield of alfalfa in major rainfed agro-ecological zones under future climatic conditions

وجود دارد که شامل پهنه‌بندی اقلیمیFAO، GAEZ-LGP، Holdridge، Köppen-Geiger، Pappadakis، Prentice، CGIAR-TAC، HCAEZ3، SAGE4، GEnS6 و GLI5 هستند. امروزه روش GYGA به دلیل دقت و قابلیت استفاده در سراسر جهان، به‌عنوان یکی از روش‌های مهم پهنه‌بندی اقلیمی محسوب می‌شود. بر خلاف روش‌های GLI و SAGE که برای محاسبه روز-درجه رشد از دمای پایه هر گیاه زراعی استفاده می‌شود، در GYGA-ED تنها از یک دمای پایه (صفر درجه سانتی‌گراد) استفاده می‌شود (Soltani *et al*., 2018). در این حالت یک مجموعه واحد از مناطق اقلیمی برای کلیه گیاهان زراعی تهیه می‌شود که استفاده از آن را ساده‌تر می‌کند. در روش GYGA-ED از شاخص خشکی استفاده می‌شود که مستقیما از اطلاعات پایگاه‌های هواشناسی به دست می‌آید. در این روش، برخلاف سایر روش‌ها، به اطلاعات خاک برای برآورد

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

ظرفیت نگهداری آب خاک و استفاده از مفروضات با عدم قطعیت نیازی نیست. روش GYGA-ED دارای ۲۶۵ پهنه اقلیمی است و تعداد بیشتر پهنه‌ها و کوچک‌تر بودن آن‌ها باعث افزایش دقت پهنه‌بندی می‌شود (Soltani *et al.*, 2018). یکی دیگر از موارد پهنه‌بندی، پهنه‌بندی خاک است. با استفاده از پهنه‌بندی خاک، نوع خاک هر منطقه بر اساس ویژگی‌های آن مشخص شده و این موضوع نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی جهت حفظ و بهره‌برداری صحیح از خاک دارد. روش HC27 یا "روش پهنه‌بندی خاک با استفاده از شاخص‌های کمی" یکی از روش‌های پهنه‌بندی خاک است که در برخی از کشورها مورد استفاده قرار گرفته و توسط کمیته فنی CEN/TC 345 اتحادیه اروپا تدوین شده است (Soltani *et al.*, 2018). روش HC27 به دلیل استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، امکان تعیین وضعیت خاک و مدیریت بهینه منابع خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک را فراهم می‌کند.

با توجه به محدودیت اراضی قابل استفاده برای کشاورزی و روند روزافزون ناشی از تخریب آن، باید برای استفاده از این منابع محدود برنامه‌ریزی کرد تا بتوان در عین استفاده بهینه، از آن به عنوان یکی از ضروری‌ترین منابع مورد نیاز انسان حفاظت نمود. پیش از این، پهنه‌بندی زراعی- بوم‌شناختی برای تولید انواع مختلف گیاهان زراعی در ایران نیز انجام شده است. محققان پهنه‌بندی گندم دیم را در استان زنجان با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام دادند. در این تحقیق، اطلاعات خاک و اراضی، توپوگرافی (شیب، جهت شیب و ارتفاع) و اطلاعات هواشناسی (نوع اقلیم، متوسط بارندگی و متوسط دما) استان زنجان بررسی شد و منطقه بر اساس استعداد کشت گندم به مناطق کاملا مناسب، مناسب، مناطق با تناسب بحرانی یا ضعیف و مناطق نامناسب پهنه‌بندی شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید گندم دیم، کمبود رطوبت، خصوصیات خاک و شیب اراضی بوده است (Damavandi *et al.*, 2010). در استان گلستان، با استفاده از مدل شبیه سازی SSM-Wheat ، میانگین عملکرد بالقوه گندم آبی و دیم به ترتیب ۸۱۴۰ و ۴۹۳۰ کیلوگرم در هکتار و تولید محصول در شرایط آبی و دیم به‌ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۱۱ میلیون تن گزارش شد (Ahmadi Alipour *et al.*, 2018). تبخیر و تعرق یکی از شاخص‌های مهم مرتبط با تولید و مصرف آب است که تا کنون تحقیقات زیادی در مورد آن صورت گرفته است. با توجه به اینکه گیاه پوششی یونجه که در تمام طول سال در زمین استقرار دارد، می‌تواند به عنوان شاخص مناسبی برای برآورد میزان تولید، تبخیر و تعرق و مصرف آب مورد استفاده قرار گیرد. یونجه گیاهی چندساله است که در زمستان و دماهای پایین رشد آن محدود می‌شود و با افزایش دما در فصل بهار رشد آن مجددا شروع می‌شود. با افزایش دمای پیش‌بینی شده و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری، در اکثر مناطق افزایش عملکرد یونجه پیش‌بینی می‌شود. در مناطق سرد و معتدل غرب و شمال غرب، افزایش دما باعث نزدیک شدن آن به دمای مطلوب رشد یونجه شده و پوشش گیاهی زودتر بسته می‌شود که باعث افزایش جذب تابش فعال فتوسنتزی می‌شود. این موضوع همراه با تاثیر مثبت افزایش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری بر فتوسنتز، باعث افزایش عملکرد یونجه در این مناطق خواهد شد. در اقلیم‌های گرم و خشک، افزایش دما و خروج آن از محدوده دمای مطلوب رشد یونجه، اثر مثبت افزایش غلظت دی‌اکسید کربن خنثی شده و با افزایش تنفس، به ویژه در فصل تابستان و کاهش کارایی استفاده از تابش، کاهش عملکرد در این مناطق پیش‌بینی می‌شود. با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، سرعت رشد گیاه افزایش می‌یابد، ولی سرعت افزایش آن در ابتدا سریع‌تر و سپس آهسته‌تر افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در مقادیر پیش‌بینی شده تاثیر منفی بر رشد گیاه ندارد، به عبارت دیگر رشد گیاه یا افزایش

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

می‌یابد یا بدون تغییر باقی می‌ماند و کاهش نمی‌یابد (Soltani and Mirzaei, 2021).

نتایج شبیه سازی حجم آب مصرفی نشان داد که در اقلیم‌های سرد و مرطوب در شرایط اقلیمی‌آینده، میزان مصرف آب افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش دما در این اقلیم‌ها، به دلیل نزدیک شدن دما به دمای مطلوب در روزهای بیشتری از سال، میزان رشد گیاه افزایش یافته و در نتیجه تبخیر و تولید زیست‌توده افزایش یافته و حجم آب مصرفی نیز افزایش خواهد یافت. در اقلیم‌های گرم و خشک، افزایش دما باعث ایجاد تنش گرمایی و افزایش تنفس می‌شود که باعث کاهش رشد و تولید زیست‌توده و کاهش تبخیر خواهد شد. بنابراین، در این اقلیم‌ها در شرایط اقلیمی‌آینده حجم آب مصرفی کاهش خواهد یافت (Soltani and Mirzaei, 2021). در برخی مناطق با میانگین دمای بالا، تغییر اقلیم باعث کاهش تولید محصول خواهد شد و در برخی پهنه‌ها میزان عملکرد محصولات افزایش می‌یابد. به گزارش پورشیرزادی و همکاران (Pourshirazi *et al*. 2023) در مناطق سرد و معتدل، عملکرد یونجه در شرایط اقلیمی‌آینده ۳۲ درصد افزایش یافته و در مناطق گرم و خشک، تغییر اقلیم موجب کاهش عملکرد به میزان ۳۳ درصد خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پهنه‌های زراعی- بوم‌شناختی یک بار با فرض زراعت آبی و یک بار با فرض زراعت دیم یونجه با مدل SSM-iCrop2 برای شرایط اقلیمی حال و آینده شبیه سازی شد. در مرحله بعد اراضی کشاورزی کشور بر اساس شبیه سازی عملکرد علوفه خشک یونجه آبی، یونجه دیم و حجم آب آبیاری پهنه‌بندی شد و تغییرات این پهنه‌ها در شرایط اقلیمی‌آینده مشخص شد. نتایج شبیه سازی یونجه آبی در شرایط اقلیمی‌آینده نشان داد که مساحت پهنه‌های با عملکرد کمتر از ۲۰ تن در هکتار از یک درصد در شرایط فعلی به حدود چهار درصد درشرایط اقلیمی‌آینده افزایش یافت و پهنه‌های با عملکرد ۳۰ تا ۳۵ و بیش از ۳۵ تن در هکتار که در شرایط اقلیمی‌فعلی به ترتیب ۳۴ و پنج درصد از مساحت را به خود اختصاص دادند، در شرایط اقلیمی‌آینده به ترتیب ۴۴ و ۱۹ درصد از مساحت کل اراضی کشاورزی را شامل خواهند شد. در پهنه‌هایی که کد اقلیمی آن‌ها بر اساس GYGA، ۵۰۰۰ و کمتر بود، در شرایط اقلیمی‌آینده میزان نیاز آب آبیاری خالص افزایش خواهد یافت. در پهنه‌های اقلیمی با کد ۶۰۰۰ و بالاتر دراقلیم آینده، کاهش میزان آب آبیاری مشاهده شد. علت این موضوع احتمالا کاهش رشد در اثر افزایش دما در پهنه‌های دارای اقلیم گرم، کاهش سطح برگ و در نتیجه کاهش تعرق گیاه می‌باشد که این موضوع نشان دهنده اهمیت تعرق درتعیین حجم آب مصرفی در شرایط اقلیمی‌آینده است. در پهنه‌های دارای اقلیم سردتر با افزایش دما، میزان رشد گیاه افزایش یافته و سطح برگ افزایش خواهد یافت. در نتیجه دراین پهنه‌ها در اثر افزایش تعرق، میزان نیاز آب آبیاری افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که تغییر اقلیم در پهنه‌های مهم دیم (دارای کد اقلیمی ۳۰۰۰ تا ۸۰۰۰ روز-درجه رشد سالانه با دمای پایه صفر) باعث افزایش عملکرد از ۱۵ درصد تا حدود ۱۷۰ درصد شد.

پهنه‌بندی در تعمیم این نتایج به نواحی مشابه کمک کرده و انتقال یافته‌های تحقیقاتی را تسریع و تسهیل می‌نماید. پهنه‌بندی به شناسایی نقاط زراعی- بوم‌شناختی مشابه (یا متفاوت) کمک کرده و با استفاده از نتایج پهنه‌بندی می‌توان اولویت‌های محیطی هر منطقه شناسایی کرده و برای تخصیص منابع برنامه ریزی کرد. به این ترتیب مشخص می‌شود که در هر منطقه از منابع موجود برای تولید کدام گیاهان استفاده شود و یا این‌که چقدر از نهاده‌های زراعی به هر گیاه اختصاص داده شود. پهنه‌بندی به انتخاب طرح‌های تحقیقاتی متناسب نیز کمک می‌کند.

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

به عنوان مثال اجرای آزمایشـــات در مورد آثار تنش‌های سرمایی در یک پهنه گرمسیری موجه نیست. به این ترتیب لازم است مدیریت تولید گیاهان زراعی بر اساس شناخت اقلیمی که تولید در آن انجام می‌شود استوار شود.

سپاسگزاری

.بدین‌وسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به‌پاس حمایت‌های علمی، پژوهشی و اجرایی در انجام این تحقیق، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

Ahmadi Alipour, H., Soltani, A., Kazemi, H. and Nehbandani, A., 2018. Agro-ecological zoning of Golestan province based on wheat yield potential using SSM-Wheat simulation model. *Journal of Agricultural Sciences, 20*(1), pp.129–144. [In Persian]. doi: 10.22059/jci.2018.237053.1784

Asakavičiūtė, R., Čekstere-Muižniece, G. and Osvalde, A., 2025. Impact of soil and climate on alfalfa growth and yield. *Zemdirbyste-Agriculture, 75*(1), https://doi.org/10.1080/09064710.2025.2577422

Damavanandi, A., Taheri, M., Esmaeili, M. and Mokhalfi, J., 2010. Agro-ecological zoning of suitable areas for dryland wheat cultivation in Zanjan Province using GIS. *Modern Technology in Agriculture, 4*, pp.81–101. [In Persian].

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Del Castillo, C. and Buytaert, W., 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: a case study for quinoa. *Agricultural and Forest Meteorolgy, 139*, pp.399–412. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.018

Hammond, K., Kerry, R., Spackman, R., Hulet, A., Hopkins, B. G., Yost, M.A. and Hansen, N.C., 2025. Crop water productivity: Within-field spatial variation in irrigated alfalfa (*Medicago sativa* L.). *AgriEngineering, 7*(4), 115. https://doi.org/10.3390/agriengineering7040115

Jing, Q., Crépeau, M., Grant, B., Jégo, G., Smith, W., and Qian, B., 2026. Growth and yield of forage alfalfa under a changing climate in Canada. *Agronomy Journal, 118*(1), e70295. https://doi.org/10.1002/agj2.70295

Katerji, N., Mastrorilli, M. and Cherni, H.E., 2010. Effects of corn deficit irrigation and soil properties on water use efficiency: a 25-year analysis of a Mediterranean environment using the STICS model. *European Journal of Agronomy, 32*, pp.177–185. https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.11.001

Kizildeniz, T., 2024. Assessing the growth dynamics of alfalfa varieties (*Medicago sativa* cv. Bilensoy 80 and Nimet) response to varied carbon dioxide (CO_2) concentrations. *Heliyon, 10*(7), e28975. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28975

Koo, J. and Dimes, J., 2013. HC27 Generic Soil Profile Database. Version 4. International Food Policy Research Institute. Washington, DC, USA.

Kulkarni, K.P., Tayade, R., Asekova, S., Song, J.T., Shannon, J.G. and Lee, J.D., 2018. Harnessing the potential of forage legumes under changing climate. *Frontiers in Plant Science, 9*, pp.1310. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01310

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]

Mosavi, S.H., Soltani, A. and Khalilian, S., 2020. Coping with climate change in agriculture: Evidence from Hamadan-Bahar plain in Iran. Agricultural Water Management, *241*, 106332. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106332

Paravar, A., Soltani, A., Zeinali, A., Kazemi, H. and Dadrasid, A., 2022. Agro-ecological zoning of Iran for plant production. *Iranian Journal of Agricultural Research, 21*(2), pp.189-202. [In Persian]. doi: 10.22067/jcesc.2022.78336.1195

Pourshirazi, S., Soltani, A., Zeinali, E. and Torabi, B., 2023. Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for alfalfa (MEDICAGO SATIVA L.) growth and yield in Iran. *Journal of Agroecology, 15*(1), pp.191–211. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/agry.2021.70433.1044

Ramirez-Villegas, J. and Challinor, A., 2012. Assessing relevant climate data for agricultural applications. *Agricultural and Forest Meteorolgy, 161*, pp.26–45. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.03.015

Seppelt, R., 2000. Regionalised optimum control problems for agroecosystem management. *Ecological Modelling, 131*, pp.121–132. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00270-2

Soltani, A. and Mirzaei, M.R., 2021. Sustainable Agriculture. Tehran, Iran: Vazegansir Publishing. [In Persian].

Soltani, A., Alimagham, M. and Nehbandani, A., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Vades, V., Sinclair, T.R. and van Ittersum, M.K. 2020. Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. *Agricultural Systems, 183*(7), 102859. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102859

Soltani, A., Nehbandani, A., Dadresi, A., Alimqam, M., Zeinali, A. and Torabi, B., 2018. Ecological Agronomic Zoning of the Country for Plant Production. Research Project. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [In Persian].

Soltani, A., 2017. Agro-Ecological Zoning and Crop Production Planning. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [In Persian].

Soltani, A. and Sinclair, T.R., 2013. Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. Wallingford, UK: CAB International. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021

Soltani, A. and Sinclair, T.R., 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research, 124*, pp.252–260. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021

Thivierge, M.N., Jégo, G., Bélanger, G., Bertrand, A., Tremblay, G.F., Rotz, C.A. and Qian, B., 2016. Predicted yield and nutritive value of an alfalfa–timothy mixture under climate change and elevated atmospheric carbon dioxide. *Agronimy Journal, 108*(2), pp.585–603. https://doi.org/10.2134/agronj2015.0484

Wang, T., Mallick, K., Verfaille, J., Szutu, D. and Baldocchi, D., 2025. Water scarcity in semi-arid California compromises perennial alfalfa's high yield and carbon sinking potentials. *Agricultural Water Management, 308*, 109284. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109284

Williams, C.L., Liebman, M., Edwards, J.W., James, D.E., Singer, J.W., Arritt, R. and Herzmann, D., 2008. Patterns of regional yield stability in association with regional environmental characteristics. *Crop Science, 48*, pp.1545–1559. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.12.0837

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-10-18]