نشریه علمی

بـوم شنـاسی کشاورزی (فصلنامه)

جلد ۱۶ شماره ۴

زمستان ۱۴۰۳

(شماره پیاپی ۶۲)

شاپا: ۲۰۰۸-۷۷۱۳

عنوان مقالات

نشریه بوم شناسی کشاورزی (فصلنامه)

دانشگاه فردوسی مشهد

با شماره پروانه ۸۹/۲۲۵۱۵ مورخه ۸۹/۹/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی

درجه علمی پژوهشی شماره ۸۹/۳/۱۱/۵۲۴۷۹ مورخه ۸۹/۹/۸ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸ ، کلیه نشریات دارای درجه" علمی -پژوهشی "به نشریه" علمی "تغییر نام یافتند.

جلد۱۶ شماره٤ زمستان ۱٤۰۳

صاحب امتیاز و ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: دکتر بهنام کامکار، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

سردبیر: دکتر پرویز رضوانی مقدم، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر داخلی: دکتر سرور خرم‌دل، دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، دبیرخانه نشریات علمی، دفتر نشریه بوم شناسی کشاورزی، صندوق پستی: ۱۱۶۳-۹۱۷۷۵

تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۴۶۵۴ **نمابر:** ۰۵۱-۳۸۷۸۷۴۳۰

پست الکترونیکی: agroecology@um.ac.ir **آدرس سایت:** https;//agry.um.ac.ir

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:

DOAJ, CABI, Google Scholar, AGRIS, Internet Archive, Ebsco, Europub

پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC) ، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

مقالات این شماره در سایت https://agry.um.ac.ir به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 587-604

Investigating the Effect of Chicken Manure and Potassium Sulfate on the Physiological Properties of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) Medicinal Plant

Mohammad Hossein Aminifard[1*], Sajjad Nadafan[2], Hassan Bayat[3] & Mehdi Jahani[4]

1- Associate Professor, Department of Horticultural Sciences and Regional Plant Research Center, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran.
2 and 3- MSc. Student and Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran, respectively.
4- Associate Professor, Department of Plant Pathology, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
(*- Corresponding author's Email: mh.aminifard@birjand.ac.ir)

Received: 10-12-2023 Revised: 03-02-2024 Accepted: 12-02-2024 Available Online: 12-02-2024	**How to cite this article:** Aminifard, M.H., Nadafan, S., Bayat, H., & Jahani, M. (2025). Investigating the effect of chicken manure and potassium sulfate on the physiological properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) medicinal plant. *Journal of Agroecology*, *16*(4), 587-604. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.85755.1175

Introduction

Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) is an annual plant found in many countries in Africa, Asia, and Europe, and India is the largest producer in the world. There are two types of fenugreek, one botanically known as *Trigonella foenum-gracum* and the other *Trigonella corniculata* (Champa or Kasturi Methi) of the Leguminosae family. The integrated management system is a system in which reducing the use of chemical fertilizers, and the combined use of chemical fertilizers and organic materials are considered. Among organic fertilizers, chicken manure is very important due to its high nitrogen concentration, high carbon quality, low carbon-nitrogen ratio, and large amounts of important nutrients required for plant growth. The appropriate amount of potassium sulfate fertilizer in the soil facilitates the osmotic adjustment in the soil, as a result of which the osmotic pressure remains in the leaves, and in this way, the plant's ability to cope with drought stress increases. Therefore, considering the mentioned cases and the lack of scientific information in the field of combining fertilizers, in this research, an attempt was made to find a suitable fertilizer combination consisting of chicken manure and potassium sulfate for the fenugreek plant.

Materials and Methods

To investigate the effect of chicken manure and potassium sulfate on the physiological characteristics of the fenugreek medicinal plant, factorial research was conducted based on a randomized complete block design with three replications in the crop year 2021-2022 in Qochan city in the north of Razavi Khorasan province.

https://doi.org/10.22067/agry.2024.85755.1175

Experimental treatments included chicken manure at three levels (0, 1000, and 2000 kg. h^{-1}) and potassium sulfate at four levels (0, 1.5, 3, and 5 per thousand). The chicken manure concentrate was given to the ground according to the investigated area before planting. The planting depth of fenugreek seeds was considered to be 1.5 cm. To prevent the binding of seeds, the seeds were covered with fine sand mixed with animal manure. Then, at the 4-6 leaf stage, thinning was done to reach the appropriate density. The first irrigation after planting and subsequent irrigations were done once every six days until the end of the growing season. Also, Soluptas fertilizer was applied as a foliar spray after planting, from the six-leaf stage to the flowering stage, three times with an interval of 14 days. The investigated traits of this experiment included morphological and physiological traits, which were sampled after the plants were fruited and the pods turned yellow by removing the marginal effect.

Results and Discussion

The results showed that the highest level of secondary and main stem height, leaf dry weight and other growth traits were obtained with the highest level of chicken manure (2000 kg/ha), which, of course, was not significantly different from the level of 1000 kg/ha of chicken manure. The use of chicken manure, especially in arid and semi-arid areas, which mainly have low organic matter levels, in addition to increasing soil organic matter and availability of nutrients, can improve the physical, chemical, and biological characteristics of these soils. Also, the highest amount of growth traits was obtained with the use of the highest level of Soluptas, i.e. five per thousand. In the interaction effect of two investigated fertilizers, it was observed that the interaction of organic and chemical fertilizers caused a double effect on the investigated growth traits. The level of 2000 kg of chicken manure caused a 16.38% increase in the weight of a thousand fenugreek seeds compared to no fertilization. The weight of 1,000 seeds was 10.408 gr at the 5 per thousand Soluptas level and 8.906 gr at the non-fertilization level. Also, the interaction of chicken manure 2000 kg/ha with each level of Soluptas caused the highest number of pods in the fenugreek plant. The highest levels of both treatments caused an increase of 83.76% and 93.28% of seed and biological yield compared to no fertilization (control level).

Conclusion

In general, it can be concluded that among the simple effects, the highest amount of traits was related to chicken manure, and among the investigated levels in two treatments, the highest yield of fenugreek dry matter was obtained with the consumption of 2000 kg/ha of chicken manure and 5 per thousand Soluptas.

Keywords: Harvest index, Organic fertilizer, Pods, Soluptas

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ١٤٠٣، ص ٦٠٤-٥٨٧

بررسی تأثیر کود مرغی و سولفات پتاسیم بر خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه دارویی شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.)

محمدحسین امینی‌فرد[1]*، سجاد ندافان[2]، حسن بیات[3] و مهدی جهانی[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر کود مرغی و سولفات پتاسیم بر خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.)، پژوهشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در شهرستان قوچان در شمال استان خراسان رضوی انجام گردید. تیمارهای آزمایش شامل کود پلیت مرغی در سه سطح (صفر و ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) به‌صورت کاربرد خاکی و سولفات پتاسیم (سولوپتاس) در چهار سطح (صفر، ۱/۵، ۳ و ۵ در هزار) به‌صورت محلول‌پاشی بودند. نتایج نشان داد که بالاترین میزان ارتفاع ساقه فرعی و اصلی، وزن خشک برگ و دیگر صفات رشدی با مصرف بیشترین سطح کود مرغی (۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد، که البته با سطح ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی اختلاف معنی‌داری نداشت. همچنین بیشترین میزان صفات رشدی با کاربرد بیشترین سطح سولوپتاس یعنی پنج در هزار حاصل شد. نتایج اثر متقابل دو کود مورد بررسی نشان داد که برهم‌کنش کود آلی و شیمیایی سبب تأثیر دوچندان بر صفات رشدی مورد بررسی گردید. سطح ۲۰۰۰ کیلوگرم کود مرغی موجب افزایش ۱۶/۳۸ درصدی وزن هزار دانه شنبلیله نسبت به عدم کوددهی شد. وزن هزار دانه در سطح پنج در هزار سولوپتاس به‌میزان ۱۰/۴۰۸ گرم و در سطح عدم کوددهی ۸/۹۰۶ گرم بود. همچنین برهم‌کنش کود مرغی ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار با هر سطح از سولوپتاس موجب بیشترین تعداد غلاف در بوته شنبلیله شد. بیشترین سطوح هر دو تیمار سبب افزایش عملکرد دانه و بیولوژیک نسبت به عدم کوددهی (سطح شاهد) شد. در مجموع بیشترین عملکرد ماده خشک شنبلیله با مصرف ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی و پنج در هزار سولوپتاس به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: سولوپتاس، شاخص برداشت، غلاف، کود آلی

مقدمه

شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.)، گیاهی است یک ساله از خانواده لگومینوز که در بسیاری از کشورهای آفریقا، آسیا و اروپا یافت می‌شود و هند بزرگ‌ترین کشور تولیدکننده در جهان است (Aasim et al., 2018). دو گونه شنبلیله وجود دارد، یکی از نظر گیاه‌شناسی به‌نام *Trigonella foenum gracum* و دیگری *Trigonella corniculata* (Kasturi Methi یا Champa) است. برگ شنبلیله حاوی چهار درصد پروتئین، یک درصد چربی و شش درصد کربوهیدرات است (Gopalan et al., 2004). برگ‌های شنبلیله به‌دلیل وجود ترکیباتی مانند آنتول و سوتولون دارای عطر و طعم بی‌نظیری هستند که آن را به یک گیاه دارویی محبوب تبدیل کرده است (Wani & Kumar, Mandal & DebMandal, 2016 ;

۱- دانشیار، گروه علوم باغبانی و مرکز پژوهشی گیاهان ویژه منطقه، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۴- دانشیار، گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: mh.aminifard@birjand.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/agry.2024.85755.1175

2018). برگ‌ها و دانه‌های شنبلیله به‌طور گسترده‌ای برای تهیه عصاره و پودر برای کاربردهای درمانی در تحقیقات متعدد مورد استفاده قرار می‌گیرند. چندین آزمایش اولیه روی حیوان و انسان انجام شده است که نشان می‌دهد، شنبلیله اثرات کاهش قند، چربی و کلسترول خون دارد. همچنین گزارش شده است که شنبلیله دارای اثرات ضدباروری، ضدسرطانی، ضدانگلی و ضدمیکروبی است (ElNour et al., 2015).

سیستم مدیریت تغذیه تلفیقی گیاه، سیستمی است که در آن کاهش مصرف کودهای شیمیایی و کاربرد ترکیبی کودهای شیمیایی و مواد آلی در نظر گرفته می‌شود (Chen, 2006). کاربرد توأم کودهای شیمیایی و آلی، یکی از راهکارهای مورد تأکید متخصصان تغذیه و تولید گیاهان زینتی در سال‌های اخیر بوده است که به‌عنوان سیستم مدیریتی صحیح در مصرف کودهای شیمیایی و جلوگیری از اثرات زیان‌آور بر آب‌های سطحی و زیرزمینی شناخته شده است که توازن تغذیه‌ای در گیاه را حفظ کرده و عملکرد را بهبود بخشیده است (Allahvirdizadeh & Deljou, 2014). براساس تحقیقات انجام شده، تلفیق کودهای شیمیایی به همراه منابع آلی و بیولوژیک، نتایج مطلوبی در افزایش بازده تولید فرآورده‌های کشاورزی داشته است که خود می‌تواند راهی به‌سوی زراعت ارگانیک و در نهایت، کشاورزی پایدار باشد (Griffe et al., 2003). آزمایشی به‌منظور بررسی اثر نسبت کشت مخلوط بر ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک تاج‌پوشش و عملکرد اسانس شنبلیله و سیاهدانه (*Nigella sativa*) تحت منابع مختلف کودی انجام شد، نتایج این آزمایش نشان داد که بیشترین عملکرد دانه هر دو گیاه از تیمار یک ردیف سیاهدانه + دو ردیف شنبلیله تغذیه شده از منبع کود تلفیقی (۵۰ درصد کود مرغی+۵۰ درصد کود شیمیایی) به‌دست آمد و بیشترین میزان کلروفیل a (۱/۲۱ میکرومول بر میلی‌گرم) به تیمار یک ردیف سیاهدانه + دو ردیف شنبلیله تحت سیستم تلفیقی (۵۰ درصد کود مرغی + ۵۰ درصد کود شیمیایی) اختصاص داشت (Rostaei & Fallah, 2016). همچنین در پژوهشی دیگر، بیشترین (۸/۶) و کمترین (۷/۴) تعداد شاخه جانبی در گیاه شنبلیله به‌ترتیب با کاربرد کود شیمیایی + کود مرغی و کود شیمیایی حاصل شد (Salehi et al., 2017). در همین ارتباط، اثرات مثبت و طولانی‌مدت تلفیق کودهای شیمیایی و آلی بر حاصلخیزی خاک و عملکرد گیاهان زراعی و دارویی توسط دیگر محققان نیز به اثبات رسیده است (Alizadeh et al., 2012; Fallah et al., 2013).

کودهای آلی به‌دلیل دارا بودن عناصر غذایی ضروری و دیگر مزایا (اغلب کم‌هزینه و قابل دسترس)، برای ارتقاء کیفیت و سلامت خاک و همچنین افزایش عملکرد گیاهی استفاده می‌شوند (Perramon et al., 2016). در میان کودهای آلی، کود مرغی به‌دلیل غلظت نیتروژن بالا، کیفیت بالای کربن، نسبت کربن به نیتروژن پایین و فراهم کردن مقادیر زیادی از عناصر غذایی مهم مورد نیاز رشد گیاه، اهمیت زیادی دارد (Abbasi et al., 2010). از طرفی، برخی گزارش‌ها حکایت دارد که کاربرد کودهای آلی به‌تنهایی، برای تأمین همه عناصر مورد نیاز گیاه و بازگشت مواد مغذی به خاک مناسب نیست (Pandey & Patra, 2015; Siadat & Moradi-Telavat, 2018)، بنابراین طبق آزمایش‌های طولانی‌مدت، کاربرد ترکیبی مناسب از کودهای آلی و غیرآلی نه تنها منجر به حفظ حاصلخیزی خاک و بهبود بهره‌وری زراعی می‌شود، بلکه تولید بالاتر گیاه و حداکثر مزایا را نیز برای کشاورزی به دنبال دارد و یک راهبرد امیدبخش برای توسعه بیشتر پایداری کشاورزی به‌شمار می‌رود (Zhao et al., 2016). در آزمایشی به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف کودهای آلی بر صفات مرفوفیزیولوژیکی کاکوتی (*Ziziphora clinopodioides*) مشاهده شد که مصرف کودهای آلی همانند کود مرغی تا میزان دو تن در هکتار با فراهم ساختن عناصر غذایی مورد نیاز گیاه کاکوتی موجب بهبود رشد گیاه، افزایش ارتفاع بوته و فلاونوئید شد (Karimi Zinkanlou et al., 2017).

کودهای شیمیایی یکی از مهم‌ترین نهاده‌های کشاورزی پیشرفته است و اعمال آن در جهت افزایش عملکرد محصولات کشاورزی به عنوان سریع‌ترین رویکرد رفع نیازهای تغذیه‌ای گیاه در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه بسیار متداول و موفقیت‌آمیز بوده است (Al-Taai, 2021). مصرف بهینه کودها آسان‌ترین، سریع‌ترین و کارآمدترین روش دستیابی به افزایش عملکرد در واحد سطح و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی است (Scharf et al., 2005) و بدون اطمینان از تأمین تغذیه مناسب و متعادل گیاهان، امکان دستیابی به عملکرد زیاد وجود ندارد.

پتاسیم یکی از عناصر اصلی و پرمصرف شیمیایی، نقش اصلی در فعالیت رشدونمو گیاهان دارد. همچنین، این عنصر دارای نقش فیزیولوژیکی در رابطه با سلامت گیاه و مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی است. افزایش جذب پتاسیم، باعث تأثیر مثبت در

فتوسنتز، افزایش میزان رشد و شاخص سطح برگ، تقویت سنتز ATP و NADPH، افزایش سنتز کلروفیل b و a، افزایش سرعت انتقال مواد نیتروژنه به دانه‌ها، سنتز بیشتر پروتئین و ترکیبات پلیمری، تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها، افزایش تعداد روزنه‌ها، کاهش تعرق و مهم‌ترین مسئله در هنگام تنش آب یعنی افزایش جذب آب و به‌وجود آوردن شرایط داخلی مناسب از طریق تنظیم فشار اسمزی و همچنین کاهش تعرق می‌گردد (Sakinejad, 2003). در تحقیقی گزارش شد که در گیاه شنبلیله بالاترین ارتفاع گیاه (۳۵/۵۸ سانتی‌متر در گیاه)، تعداد شاخه (۵/۶۶ در هر گیاه)، تعداد غلاف (۱۲/۱۶ غلاف در هر گیاه)، تعداد دانه (۱۱/۵۰ دانه در غلاف) و عملکرد کل (۳۰۵/۵۰ کیلوگرم در هکتار) از مصرف ۴۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در ۱۰۰ لیتر آب به‌دست آمد (Naser, 2017).

لذا، با توجه به موارد اشاره شده و کمبود اطلاعات علمی در زمینه تلفیق کودها، در این پژوهش سعی در دستیابی به یافتن ترکیب کودی مناسب متشکل از کود مرغی (به‌عنوان کود آلی) و سولفات پتاسیم (به‌عنوان کود شیمیایی) برای افزایش صفات فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه شنبلیله شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در اوایل سال ۱۴۰۰ در شهرستان قوچان در شمال استان خراسان رضوی در یک مزرعه شخصی انجام گردید. قبل از کاشت، پنج نمونه خاک از مکان‌های مختلف انتخاب شد. سپس، آن‌ها را ترکیب کرده و یک نمونه مرکب از آن‌ها تهیه شد و پس از آن برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

جدول ۱- خصوصیات خاک آزمایش قبل از کاشت
Table 1- Characteristics of the experiment soil before planting

pH	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	مواد آلی Organic matter (%)	فسفر قابل جذب Absorbable P (ppm)	پتاسیم قابل جذب Absorbable K (ppm)	نیتروژن کل Total N (%)	آهک Lime (%)	بافت Texture
8	1.1	0.57	1.5	90	0.055	37	لومی Loam

به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف کود پلیت مرغی و محلول‌پاشی سولفات پتاسیم (به‌صورت کود تجاری سولوپتاس) بر خصوصیات فیزیولوژیکی شنبلیله، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول، کود پلیت مرغی شامل سه سطح صفر، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار و فاکتور دوم، محلول‌پاشی کود سولوپتاس شامل چهار سطح صفر، ۱/۵، ۳ و ۵ در هزار بود. مشخصات تجزیه کود پلیت مرغی ۷۰ درصد کود مرغی و سولفات پتاسیم مورد استفاده در آزمایش در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

برای آماده‌سازی بستر کشت، ابتدا پس از شخم، دیسک و مسطح کردن خاک اقدام به کرت‌بندی زمین شد. ابعاد کرت آزمایش به‌میزان ۱/۵ در یک و فاصله بین کرت‌ها نیم متر در نظر گرفته شد. همچنین فاصله بین بلوک تا بلوک دیگر، یک متر و فاصله کاشت بین ردیف‌ها، ۲۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف‌ها، ۱۰ سانتی‌متر بود. عمق کاشت بذور شنبلیله نیز ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کود پلیت مرغی را برحسب سطح مورد بررسی قبل از کاشت به زمین داده شد. به‌منظور جلوگیری از سله بستن، روی بذرها را با ماسه‌های ریز مخلوط با کود دامی پوشانده شد. سپس در مرحله ۴-۶ برگی برای رسیدن به تراکم مناسب (۵۰ بوته در مترمربع) تنک انجام شد.

جدول ۲- مشخصات تجزیه کود پلیت مرغی ۷۰٪ کود مرغی مورد استفاده در آزمایش
Table 2- Characteristics of chicken manure decomposition of 70% chicken manure used in the experiment

نیتروژن کل Total N (%)	فسفر قابل استفاده P_2O_5 (%)	پتاسیم محلول در آب K_2O (%)	گوگرد کل Total S (%)	کربن آلی Organic C (%)	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	pH	رطوبت حداکثر Maximum humidity (%)
2	1	2	7	20	4.28	8.42	10

جدول ۳- مشخصات تجزیه کودی سولفات پتاسیم مورد استفاده در آزمایش
Table 3- Characteristics of decomposition of potassium sulfate fertilizer used in the experiment

حداقل حلالیت Minimum solubility (g.L^{-1})	حداکثر رطوبت Maximum humidity (%)	منگنز کلاته با EDTA Mn chelate with EDTA (%)	مس کلاته با EDTA Cu chelated with EDTA (%)	روی کلاته با EDTA Zn chelate with EDTA (%)	آهن کلاته با EDTA Fe chelate with EDTA (%)	گوگرد محلول در آب Sulfur S in water (%)	پتاسیم محلول در آب K_2O (%)
110	1.5	0.05	0.05	0.05	0.1	18	50

اولین آبیاری، پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی به‌فاصله هر شش روز یک بار تا آخر فصل رشد انجام شد. همچنین کود سولوپتاس به‌صورت محلول‌پاشی بعد از کاشت از مرحله شش برگی تا مرحله گل‌دهی طی سه نوبت به‌فاصله ۱۴ روز اعمال گردید. از زمان کاشت تا نمونه‌برداری، وجین و مبارزه با علف‌های هرز نیز انجام شد.

همزمان با رسیدگی فیزیولوژیک (زرد شدن برگ‌ها و غلاف‌ها) از هر کرت پنج بوته با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای به‌طور تصادفی انتخاب شده و سپس صفات شامل ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد غلاف در بوته، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک اندازه‌گیری شدند.

ارتفاع بوته به‌وسیله خط‌کش از قسمت طوقه بوته اندازه‌گیری و میانگین گرفته شد. قطر ساقه اصلی نیز توسط کولیس اندازه‌گیری شد. برای محاسبه وزن تر بوته، پس از اطمینان از نبود خاک روی سطح بوته، وزن آن با ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. همچنین برای تعیین وزن خشک بوته، نمونه‌ها درون پاکت‌های کاغذی در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند و سپس با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ توزین شدند. برای اندازه‌گیری فاصله میان‌گره با استفاده از کولیس دیجیتال، از یک گره تا گره دیگر در قسمت میانی ساقه، اندازه‌گیری انجام شد و سپس میانگین این مقادیر محاسبه گردید. جهت اندازه‌گیری وزن هزار دانه، چند توده ۱۰۰۰ بذری شنبلیله شمارش و میانگین وزن آن‌ها به‌عنوان وزن هزار دانه در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری متوسط وزن غلاف، پنج غلاف از هر کرت به‌صورت تصادفی انتخاب و وزن شدند و میانگین آن‌ها به‌عنوان متوسط وزن غلاف یادداشت گردید. جهت اندازه‌گیری تعداد دانه در بوته، پنج بوته از هر کرت به‌صورت تصادفی انتخاب و تعداد دانه‌های آن شمارش و میانگین آن‌ها به‌عنوان تعداد دانه در بوته یادداشت گردید. برای تعیین عملکرد نهایی، پس از حذف اثر حاشیه‌ای، کل بوته‌های هر کرت کف‌بر شده و پس از کوبیدن، دانه‌ها جدا و برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. برای تعیین عملکرد بیولوژیک، بوته‌های موجود در یک مترمربع در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک با رعایت اثر حاشیه‌ای، کف‌بر شدند و وزن آن‌ها توسط ترازو اندازه‌گیری و ثبت گردید. جهت محاسبه شاخص برداشت نیز از معادله زیر استفاده شد:

۱۰۰ × (عملکرد بیولوژیک/عملکرد دانه) = شاخص برداشت

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مورد مقایسه قرار گرفت. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

صفات رویشی: ارتفاع ساقه اصلی و فرعی

نتایج نشان داد که اثر کود مرغی و سولوپتاس و اثر متقابل دو فاکتور مورد بررسی بر صفت ارتفاع ساقه اصلی گیاه شنبلیله معنی‌دار بود (جدول ۴). اثر متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر صفت مذکور نشان داد که در حضور کود مرغی، سولوپتاس تأثیر بیشتری بر ارتفاع ساقه داشت. بیشترین طول ساقه اصلی مربوط به اثر متقابل کود مرغی ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و سولوپتاس پنج در هزار به‌میزان ۲۵/۷۶ سانتی‌متر بود که نسبت به عدم مصرف کود ۳۲/۵ درصد افزایش داشت. همچنین مشاهده شد که اثر متقابل سولوپتاس پنج در هزار به همراه کود مرغی ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار، اختلاف معنی‌داری با بالاترین سطوح اثر متقابل نداشت (جدول ۶).

نتایج نشان داد که اثر کود مرغی و سولوپتاس و همچنین اثر متقابل دو فاکتور مورد بررسی بر طول ساقه فرعی نیز معنی‌دار بود (جدول ۴). در اثر متقابل دو فاکتور مورد بررسی بر صفت طول ساقه فرعی مشاهده شد که بیشترین میزان این صفت در برهم‌کنش‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی و پنج در هزار سولوپتاس بود.

جدول ٤- تجزیه واریانس اثر کود مرغی و سولوپتاس و اثر متقابل آن‌ها روی صفات رویشی شنبلیله

Table 4- Variance analysis of the effect of chicken manure and Soluptas and their mutual effect on the vegetative traits of fenugreek

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع ساقه اصلی Main stem height	ارتفاع ساقه فرعی Secondary stem height	قطر ساقه Stem diameter	وزن تر بوته Plant fresh weight	وزن خشک بوته Plant dry weight	وزن برگ در بوته Leaf weight per plant	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	تعداد گره در بوته Number of nodes per plant	فاصله میان‌گره Internode distance
بلوک Block	2	4.110^{ns}	1.144^{ns}	0.001^{ns}	1.935^{ns}	0.061^{ns}	0.0001^{ns}	5.77^{ns}	10.75^{ns}	1.47^{ns}
کود مرغی Chicken manure (C)	2	12.199^{*}	10.483^{**}	0.136^{ns}	19.992^{**}	0.340^{**}	0.0065^{**}	40.44^{*}	3.25^{ns}	2.83^{ns}
سولوپتاس Soluptas (S)	3	118.685^{**}	59.732^{**}	0.436^{**}	149.652^{**}	2.126^{**}	0.00346^{**}	389.33^{**}	104.25^{**}	4.25^{*}
C × S	6	16.268^{**}	6.436^{**}	0.143^{*}	10.410^{**}	0.111^{**}	0.0031^{**}	28.00^{*}	13.25^{ns}	0.877^{ns}
خطا Error	22	2.149	1.018	0.043	1.229	0.027	0.0002	10.14	6.11	1.346
ضریب تغییرات C.V.		4.55	10.29	7.25	10.02	9.27	13.42	13.91	10.05	10.62

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و بدون اختلاف معنی‌دار

*, ** and ns: significant at 5 and 1% probability levels and without significant difference, respectively

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات رویشی تحت اثر سطوح کود مرغی و محلول‌پاشی سولوپتاس

Table 5- Mean Comparison of average vegetative traits under the effect of chicken manure levels and Soluptas foliar application

تیمارها Treatments	ارتفاع ساقه اصلی Main stem height (cm)	ارتفاع ساقه فرعی Secondary stem height (cm)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	وزن تر بوته Plant fresh weight (g)	وزن خشک بوته Plant dry weight (g)	وزن برگ در بوته Leaf weight per plant (g)	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	تعداد گره در بوته Number of nodes per plant	فاصله میان‌گره Internode distance (cm)
کود مرغی (کیلوگرم در هکتار) Chicken manure ($kg.ha^{-1}$)									
0	20.70	8.76	2.74	4.78	0.81	0.043	5.25	8.00	2.60
1000	21.90	10.10	2.94	5.86	0.86	0.054	5.75	8.25	2.73
2000	21.82	10.55	2.91	5.94	0.98	0.066	6.16	8.33	2.85
$LSD_{0.05}$	0.98	0.98	0.26	0.59	0.10	0.004	0.97	0.94	0.30
سولوپتاس (در ۱۰۰۰) Soluptas (in 1000)									
0	17.97	7.00	2.58	2.94	0.64	0.026	3.88	7.11	2.47
1.5	19.97	8.29	2.79	4.93	0.72	0.035	4.88	7.33	2.83
3	23.30	11.47	3.07	6.69	1.01	0.060	6.55	9.00	2.79
5	24.66	12.45	3.02	7.54	1.16	0.095	7.55	9.33	2.81
$LSD_{0.05}$	0.99	1.02	0.20	0.55	0.07	0.007	0.77	0.81	0.29

جدول ٦- مقایسه میانگین صفات رویشی تحت اثر ترکیبات تیماری کود مرغی و محلول‌پاشی سولوپتاس

Table 6- Mean comparison of average vegetative traits under the effect of chicken manure treatment compounds and Soluptas foliar application

تیمارها Treatments		ارتفاع ساقه اصلی Secondary stem height (cm)	ارتفاع ساقه فرعی Secondary stem height (cm)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	وزن تر بوته Plant fresh weight (g)	وزن خشک بوته Plant dry weight (g)	وزن برگ در بوته Leaf weight per plant (g)	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant
کود مرغی (کیلوگرم در هکتار) Chicken manure ($kg.ha^{-1}$)	سولوپتاس (در ۱۰۰۰) Soluptas (in 1000)							
0	0	17.37	6.43	2.56	2.68	0.58	0.023	4.00
	1.5	18.62	7.43	2.78	3.73	0.66	0.026	4.66
	3	23.80	11.26	3.10	6.69	1.04	0.060	6.00
	5	23.02	9.91	2.55	6.04	0.97	0.063	6.33
1000	0	20.11	8.71	2.49	3.96	0.62	0.033	4.33
	1.5	20.58	7.89	2.86	5.49	0.74	0.040	5.00
	3	21.73	10.36	3.12	5.92	0.85	0.045	6.00
	5	25.20	13.45	3.30	8.07	1.22	0.09	7.66
2000	0	16.44	5.87	2.68	2.19	0.72	0.023	3.33
	1.5	20.72	9.56	2.75	5.58	0.76	0.040	5.00
	3	24.36	12.79	3.00	7.46	1.13	0.076	7.66
	5	25.76	14.00	3.23	8.52	1.29	0.12	8.66
$LSD_{0.05}$		1.71	1.78	0.34	0.96	0.13	0.01	1.34

در عدم مصرف کود، طول ساقه فرعی ۵/۸۷ سانتی‌متر و در برهم‌کنش بالاترین میزان کودها، طول ساقه فرعی ۱۴ سانتی‌متر بود (جدول ۶).

کریمی زینکانلو و همکاران (Karimi Zinkanlou et al., 2015) در آزمایشی به‌منظور تأثیر سطوح مختلف کودهای آلی بر صفات مرفوفیزیولوژیکی کاکوتی دریافتند که مصرف کودهای آلی همانند کود مرغی تا میزان دو تن در هکتار با فراهم ساختن عناصر غذایی مورد نیاز گیاه کاکوتی موجب بهبود رشد گیاه و افزایش ارتفاع بوته شده است. همچنین تهامی و همکاران (Tahami et al., 2010) در یک آزمایش نشان دادند که کودهای آلی نسبت به شاهد و کودهای شیمیایی باعث افزایش ارتفاع بوته در ریحان (*Ocimum basilicum*) شد. یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده ارتفاع گیاه، تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است، تیمارهای کود مرغی با تأمین تدریجی عناصر غذایی، این عمل را به‌خوبی انجام داده و باعث افزایش ارتفاع گیاه می‌شوند.

گزارش شده است که پتاسیم از طریق تنظیم اسمزی، پتانسیل آب لازم را برای رشد و به تبع آن برای تقسیم سلولی حتی در شرایط خشکی فراهم می‌کند و با این کار نه تنها از کاهش ارتفاع ساقه جلوگیری می‌کند، بلکه در برخی مواقع منجر به افزایش ارتفاع ساقه نیز می‌شود (Marschner, 1995). نتایج تحقیق حاضر با مطالعات اسماعیلیان و جلالی (Esmaeilian & Jalali, 2022) مبنی بر افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته گیاه دارویی شنبلیله تغذیه شده با کود شیمیایی (۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب اوره، سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم) مطابقت دارد. سایر محققان نیز بیشترین ارتفاع بوته گیاه شنبلیله را از مصرف ۱۰۰ درصد توصیه کود شیمیایی سولفات آمونیوم + سولفات پتاسیم گزارش کردند (Ibrahim & Helaly, 2017). نتایج آزمایش ناصر (Naser, 2017) نیز نشان داد که از مصرف ۴۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در ۱۰۰ لیتر آب، بالاترین ارتفاع بوته شنبلیله به‌دست آمد.

قطر ساقه

نتایج به‌دست آمده از این آزمایش نشان داد که سولوپتاس و اثر متقابل سولوپتاس و کود مرغی بر صفت قطر ساقه شنبلیه به‌ترتیب معنی‌دار بود، ولی اثر کود مرغی بر صفت مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۴). در اثر متقابل سولوپتاس و کود مرغی بر صفت مورد بررسی مشاهده شد که بیشترین قطر ساقه مربوط به برهم‌کنش کود مرغی ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌همراه پنج در هزار سولوپتاس به‌دست آمد؛ همچنین کمترین قطر ساقه مربوط به عدم استفاده از

کود سولوپتاس و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی بـه‌میزان ۲/۴۹ میلی‌متر بود (جدول ۶).

آزادسازی کند عناصر غذایی بـه‌ویژه پتاسیم از کـود آلـی سـبب دسترسی بهتر به مواد غذایی و همچنـین وجـود مـاده آلـی در سـطح کودی موجب فراهم شدن شرایط مناسب‌تری برای انجـام فتوسـنتز و تخصیص ماده فتوسنتزی بیشتری به ساقه شده و بـه دنبـال آن قطـر ساقه نیز افزایش یافته است. نتایج به‌دست آمده با یافته‌های مقصودی و همکاران (Maghsudi et al., 2014) مبنی بر افزایش قطـر سـاقه ذرت (*Zea mays*) تحت تأثیر سیستم‌هـای تغذیـه تلفیقـی مطابقـت دارد. مصـرف تلفیقـی کودهـای شـیمیایی و آلـی، بـه‌عنوان سیسـتم مدیریتی صحیح و منطقی می‌تواند علاوه‌بر کاهش مصـرف کودهـای شیمیایی و جلوگیری از اثرهای زیان‌آور آن‌ها بـر آب‌هـای سـطحی و زیرزمینی، توازن تغذیه‌ای در گیاهان را حفظ کرده و عملکرد آن‌هـا را افزایش دهد (Javanmard & Shekari, 2016).

وزن تر و خشک بوته

داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش نشان داد که اثر کود مرغی، سولوپتاس و برهم‌کنش کود مرغی و سولوپتاس همگی بر صفت وزن تر بوته معنی‌دار بودند (جدول ۴). اثر متقابل فاکتورهای مورد بررسـی نشان داد که با حضور و افزایش میزان کود مرغی، تأثیر سولوپتاس نیز بر صفت وزن تر بوته بیشتر بود، به‌نحوی‌که بیشترین میـزان وزن تـر بوته در اثر متقابل کود مرغی ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و پنج در هـزار سولوپتاس به‌میزان ۸/۵۲ گرم بود کـه البتـه از نظـر آمـاری اخـتلاف معنی‌داری با سطح ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی و پنج در هزار سولوپتاس وجود نداشت (جدول ۶).

سایر محققان نیز بیشترین وزن تر گیاه شنبلیله را از مصرف کـود مرغی گزارش کردنـد (Jasim et al., 2016) کـه بـا نتـایج تحقیـق حاضر مطابقت دارد. محلول‌پاشی سطوح مختلف سولفات پتاسیم، وزن خشـک بـرگ، وزن تـر گـل آذیـن و وزن تـر انـدام هـوایی شـوید (*Anethum graveolens* L.) را افـزایش داد. بیشـترین میـزان ایـن صفات در تیمار محلول‌پاشی سولفات پتاسیم دو گرم بر لیتـر مشـاهده شد (Mehrafarin et al., 2017).

نتایج نشان داد که اثـر فاکتورهـای کـود مرغـی و سـولوپتاس و همچنین برهم‌کنش این دو فاکتور بر صفت وزن خشک بوته معنی‌دار بود (جدول ۴). اثر متقابل دو فاکتور مورد بررسی بر وزن خشک بوتـه نشان داد که در حضور کود مرغی، مصرف سولوپتاس نتیجـه بهتـری دارد و سبب افزایش بیشتر وزن خشک بوته شد. نتایج حاکی از آن بود که بیشترین وزن خشک بوته در اثر متقابل کود مرغی ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و پنج در هزار سولوپتاس به‌میزان ۱/۲۹ گرم بود که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با برهم‌کنش ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کـود مرغی و پنج در هزار سولوپتاس نداشت. کمترین میزان این صفت نیز مربوط به عدم مصرف هر دو کود بود (جدول ۶).

طی تحقیقی توسط میرهاشمی و همکاران (Mirhashmi et al., 2009) گزارش شد که بیشـترین تجمـع مـاده خشـک گیـاه دارویـی شنبلیله از مصرف ۲۵ تن در هکتار کود دامی به‌دست آمـد. قنبـری و همکـاران (Ghanbari et al., 2017) نیـز بیشـترین عملکـرد مـاده خشک شنبلیله را از سطح کودی ۲۴ تن در هکتار کـود دامـی اعـلام کردنـد. نتـایج ایـن آزمـایش بـا گـزارش مطالعـه ابـراهیم و هلالـی (Ibrahim & Helaly, 2017) مبنی بر افزایش وزن خشک بوته گیاه شنبلیله در نتیجه مصرف کود سولفات پتاسیم هماهنگ بود.

وزن برگ

نتایج داده‌های به‌دست آمده از ایـن آزمـایش نشـان داد کـه اثـر فاکتور کود مرغی و سولوپتاس و همچنین اثر متقابل سولوپتاس و کود مرغی بر صفت وزن برگ شنبلیه معنـی‌دار بودنـد (جـدول ۴). در اثـر متقابل دو فاکتور آزمایش مشاهده شد که برهم‌کنش بالاترین سـطوح دو فاکتور سبب تولید بیشترین وزن برگ به‌میزان ۰/۱۲۶ گرم شد که نسبت به سطح شاهد و عدم مصـرف کـود، ۴۲۱/۷۳ درصـد افـزایش داشت (جدول ۶).

نتایج نشان داد که با افزایش کود مرغی، وزن برگ نیـز افـزایش یافت و علّت این افزایش استفاده از مواد آلی اسـت کـه باعـث جـذب بهتر مواد غذایی شده و موجب افزایش تقسیم سلولی و بـزرگ شـدن سلول‌ها در گیاه می‌شود. کود مرغی با افزایش مـواد آلـی و هومـوس خاک، موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و پوشـاندن سـطح ذرات رس مانع تثبیت شدن فسفر در خاک می‌شود، در نتیجـه فسـفر موجود در خاک به‌خوبی می‌توانـد در اختیـار گیـاه قـرار گیـرد (BS, 2005). علاوه‌براین، این کودها منبع غنی از کلسـیم، منیـزیم، آهـن، روی، مس و گوگرد می‌باشند و در نهایت، منجر به افـزایش عملکـرد می‌شوند (Pandey et al., 2016). احتمـالاً افـزودن کنسـانتره کـود مرغ به خاک نیز نه تنهـا تـدارک عناصـر غـذایی مـورد نیـاز گیـاه را

افزایش داده است، بلکه با بهبود شرایط فیزیکی و فرآیندهای حیاتی خاک، ضمن ایجاد یک محیط مناسب برای رشد ریشه، موجب افزایش رشد اندام هوایی و تولید ماده خشک نیز شده است (Rezae & Baradaran, 2013).

جیانرونگ و همکاران (Jianrong et al., 1995) در چین با کاربرد سطوح مختلف پتاسیم بر روی توت (*Morus alba*) دریافتند که پتاسیم سبب افزایش رشد بهتر برگ‌ها و برگ‌های سبزتر و بزرگ‌تر شد. اثر پتاسیم در رشد به این دلیل است که این عنصر در ساخت مواد هیدروکربنه در گیاه نقش دارد و گیاه مبتلا به کمبود پتاسیم با تغییرات فتوسنتز و تنفس همراه است. کم شدن مواد هیدروکربنه کل گیاه در اثر کم شدن فتوسنتز و زیاد شدن تنفس است و در نتیجه، کاهش تجمع ماده خشک را به دنبال دارد (Sadrzadeh & Moalemi, 2005).

تعداد برگ

داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش نشان داد که اثر سولوپتاس و اثر متقابل کود مرغی و سولوپتاس بر صفت تعداد برگ شنبلیله تأثیر معنی‌داری داشت، ولی اثر کود مرغی بر صفت تعداد برگ تأثیر معنی داری نداشت (جدول ۴). اثر متقابل کود مرغی و سولوپتاس نشان داد که در برهم‌کنش این دو کود بیشترین تعداد برگ مربوط به بالاترین سطوح دوفاکتور بود، ولی اختلاف معنی‌داری با برهم‌کنش ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی و پنج در هزار سولوپتاس و همچنین برهم‌کنش ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی و سه در هزار سولوپتاس نداشت (جدول ۶).

به نظر می‌رسد که بهبود عناصر غذایی خاک و تا حدی بهبود کیفیت ساختار خاک، همراه با استفاده از کود مرغی، سبب افزایش تعداد برگ در بوته می‌شود. این امر موجب افزایش میزان جذب نور و فتوسنتز شده و در نتیجه، مواد هیدروکربنی بیشتری در برگ‌های گیاه تولید و وزن برگ افزایش می‌یابد. نتایج بررسی حاضر با گزارش ابراهیم و هلالی (Ibrahim & Helaly, 2017) که اظهار داشتند، با افزایش میزان مصرف کودهای شیمیایی سولفات آمونیوم + سولفات پتاسیم تعداد برگ گیاه دارویی شنبلیله افزایش می‌یابد، هماهنگی دارد. کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی و آلی باعث تأمین قسمتی از عناصر مورد نیاز گیاه، افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی و افزایش کارآیی جذب عناصر از کود شیمیایی می‌شود (Noorgholipour et al., 2019) که تحت تأثیر تیمار برهم‌کنش کود آلی و کود شیمیایی به‌دلیل بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش در تعداد برگ مشاهده شد که با نتایج تحقیقات مذکور مطابقت و هم‌خوانی دارد.

تعداد گره و فاصله میان‌گره

نتایج نشان داد که سولوپتاس بر صفت تعداد گره گیاه شنبلیله معنی‌دار بود، امّا اثر کود مرغی و همچنین اثر متقابل کود مرغی و سولوپتاس بر صفت مذکور معنی‌دار نبودند (جدول ۴). جدول مقایسه میانگین اثر سولوپتاس بر صفت تعداد گره نشان داد که تا سطح ۱/۵ در هزار سولوپتاس اثر معنی‌داری بر تعداد گره نداشت، ولی سطح سه و پنج در هزار سولوپتاس سبب افزایش معنی‌دار صفت مذکور نسبت به عدم استفاده از سولوپتاس شدند؛ به‌نحوی‌که سطح پنج در هزار سولوپتاس سبب افزایش ۳۱/۲۲ درصدی تعداد گره نسبت به شاهد شد. البته لازم به ذکر است که سطح سه و پنج در هزار سولوپتاس از نظر آماری با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۵).

داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش نشان داد که تنها اثر ساده سولوپتاس بر فاصله میان‌گره تأثیر معنی‌داری در سطح پنج درصد داشت و اثر ساده کود مرغی و اثر متقابل دو فاکتور ذکر شده تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشتند (جدول ۴). جدول مقایسه میانگین نشان داد که استفاده از سولوپتاس سبب افزایش فاصله میان‌گره شد، امّا اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف سولوپتاس وجود نداشت. در جدول ۵ مشاهده شد که سطح ۱/۵ در هزار سولوپتاس سبب افزایش ۱۲/۷ درصدی فاصله میان‌گره نسبت به عدم استفاده از سولوپتاس شد.

افزایش غلظت پتاسیم می‌تواند سبب افزایش میزان تولید مواد فتوسنتزی و افزایش سرعت تولید گره در گیاه کنف (*Hibiscus cannabinus* L.) شود (Hossain et al., 2010). شفیعی زرگر در بررسی صفات کمّی و کیفی خیار (*Cucumis sativus*) به تبعیت از مواد آلی و معدنی در کشت پاییزه به این نتیجه رسید که ۳۰ تن کود دامی در هکتار بیشترین تعداد گره در بوته را تولید می‌نماید (Shafii Zargar, 2015).

صفات زایشی: وزن هزار دانه

نتایج نشان داد که اثر کود مرغی و سولوپتاس بر صفت وزن هزار دانه بود. همچنین مشخص شد که برهم‌کنش دو فاکتور مورد بررسی

تأثیر معنی‌داری بر وزن هزار دانه شنبلیله نداشت (جدول ۷). مقایسه میانگین داده‌های به‌دست آمده نشان داد که کود مرغی تا سطح ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار اختلاف معنی‌داری با سطح عدم کوددهی نداشت، ولی سطح ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی موجب افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه شد، به‌نحوی‌که این سطح موجب افزایش ۱۶/۳۸ درصدی وزن هزار دانه شنبلیله نسبت به عدم کوددهی شد (جدول ۸). جدول مقایسه میانگین اثر سولوپتاس نشان داد که مصرف این کود سبب افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه شنبلیله نسبت به سطح شاهد شد، ولی اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف سولوپتاس وجود نداشت. وزن هزار دانه در سطح پنج در هزار سولوپتاس به‌میزان ۱۰/۴۰۸ گرم و در سطح عدم کوددهی ۸/۹۰۶ گرم بود (جدول ۸).

گزارش شده است که کاربرد خاکی سولفات پتاسیم موجب افزایش طول سنبله، وزن هزاردانه، تعداد دانه و عملکرد بیولوژیک گندم (*Triticum aestivum*) شد (Ghalenoei et al., 2014). وزن هزار دانه بستگی به مقدار کربوهیدرات‌های ذخیره شده در طی دوران پر شدن میوه دارد و اندازه نهایی دانه تا حدود زیادی بین ژنوتیپ‌های گیاه و نیز تحت شرایط محیطی مختلف متغیر است (Azizi et al., 2008). احتمالاً افزایش سطح برگ جهت تولید و انتقال ماده فتوسنتزی بیشتر به دانه، همچنین آزادسازی عناصر غذایی از جمله نیتروژن با کاربرد کود مرغی در مرحله پر شدن دانه، دلیل بالا بودن وزن هزار دانه نسبت به شاهد می‌باشد، همچنین به نظر می‌رسد که کودهای آلی با تأثیر در افزایش جذب عناصری نظیر نیتروژن و عناصر ریزمغذی، باعث افزایش وزن هزار دانه می‌شوند. یوواه و همکاران (Uwah et al., 2014) گزارش کردند که بیشترین وزن هزار دانه ذرت شیرین (*Zea mays* L. Saccharata Strut) به‌میزان ۹۰/۱۷ گرم در تیمار ۱۵ تن کود مرغی در هکتار و کمترین وزن هزار دانه به میزان ۶۴/۹۲ گرم در شاهد به‌دست آمد. روستایی و همکاران (Rostaie et al., 2015) نیز بیشترین وزن هزاردانه گیاه شنبلیله را در کشت خالص تحت کاربرد کود آلی و تلفیقی به‌دست آوردند.

وزن خشک غلاف

نتایج نشان داد که اثر کود مرغی و سولوپتاس بر صفت وزن خشک غلاف شنبلیله معنی‌دار بود و همچنین مشخص شد که برهم‌کنش دو فاکتور مورد بررسی تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک غلاف شنبلیله نداشت (جدول ۷). مقایسه میانگین داده‌های به‌دست آمده نشان داد که کود مرغی تا سطح ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار اختلاف معنی‌داری با سطح عدم کوددهی نداشت، ولی سطح ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی موجب افزایش معنی‌دار وزن خشک غلاف شد، به‌نحوی‌که این سطح موجب افزایش ۲۳/۵۲ درصدی وزن خشک غلاف شنبلیله نسبت به عدم کوددهی شد (جدول ۸).

جدول ۷- تجزیه واریانس صفات عملکرد و اجزاء عملکرد تحت اثر سطوح کود مرغی و محلول‌پاشی سولوپتاس

Table 7- Variance analysis of yield traits and yield components under the effect of chicken manure levels and Soluptas foliar application

منابع تغییرات S.O.V	وزن هزار دانه Weight of 1000-seeds	وزن خشک غلاف Dry weight of pods	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	تعداد غلاف در بوته Number of pods per plant	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index
بلوک Block	2.170^{ns}	0.00002^{ns}	306.01^{ns}	0.016^{ns}	219.44^{ns}	39869^{ns}	211.52^{ns}
کود مرغی Chicken manure (C)	7.598**	0.045**	29927**	7.221**	168369**	387703**	519.86^{ns}
سولوپتاس Soluptas (S)	3.433*	0.016*	13978**	5.987**	125437**	602521**	764.51*
C × S	2.093^{ns}	0.006^{ns}	3375^{ns}	2.712*	115351**	50088*	1468.8**
خطا Error	0.867	0.004	1478.1	1.089	21395	13614	258.49
ضریب تغییرات C.V.	9.69	12.28	25.40	9.177	13.74	9.06	12.62

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و بدون اختلاف معنی‌دار

*, ** and ns: significant at 5 and 1% probability levels and without significant difference, respectively

جدول ۸- مقایسه میانگین صفات عملکرد و اجزاء عملکرد تحت اثر سطوح کود مرغی و محلول‌پاشی سولوپتاس

Table 8- Mean comparison of average yield traits and yield components under the effect of chicken manure levels and Soluptas foliar application

تیمارها Treatments	وزن هزار دانه Weight of 1000-seeds (g)	وزن خشک غلاف Dry weight of pods (g)	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	تعداد غلاف در بوته Number of pods per plant	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha^{-1})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})	شاخص برداشت Harvest index (%)
			کود مرغی Chicken manure (kg.ha^{-1})				
0	9.03	0.51	105.68	10.76	47.45	115.50	41.52
1000	9.26	0.56	143.67	11.10	52.91	121.41	46.66
2000	10.51	0.63	204.67	12.24	59.29	149.16	40.53
LSD 0.05	0.43	0.08	47.53	2.00	3.73	5.65	2.93
			سولوپتاس (در ۱۰۰۰) Soluptas (in 1000)				
0	8.90	0.51	115.25	10.59	44.61	95.00	47.65
1.5	9.60	0.56	133.04	11.27	54.16	121.77	46.05
3	9.50	0.58	150.76	11.10	56.83	148.44	39.06
5	10.40	0.62	206.31	12.51	57.27	149.55	38.84
LSD 0.05	1.00	0.06	37.26	0.78	3.22	12.56	5.80

جدول ۹- مقایسه میانگین صفات عملکرد و اجزاء عملکرد تحت اثر ترکیبات تیماری کود مرغی و محلول‌پاشی سولوپتاس

Table 9- Mean comparison of average yield traits and yield components under the effect of chicken manure treatment compounds and Soluptas foliar application

تیمارها Treatments		تعداد غلاف در بوته Number of pods per plant	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha^{-1})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})	شاخص برداشت Harvest index (%)
کود مرغی Chicken manure (kg.ha^{-1})	سولوپتاس (در ۱۰۰۰) Soluptas (in 1000)				
0	0	9.66	38.00	89.33	43.69
	1.5	9.62	36.50	113.33	32.13
	3	10.77	57.83	129.33	44.79
	5	12.99	57.50	130.00	45.47
1000	0	10.44	47.33	93.00	51.90
	1.5	12.11	63.00	96.00	65.67
	3	9.99	56.83	150.66	38.54
	5	11.88	44.50	146.00	30.53
2000	0	11.66	48.50	102.66	47.37
	1.5	12.10	63.00	156.00	40.37
	3	12.55	55.83	165.33	33.84
	5	12.66	69.83	172.66	40.53
LSD 0.05		1.36	5.58	21.75	10.05

جدول مقایسه میانگین اثر سولوپتاس نشان داد که مصرف این کود سبب افزایش معنی‌دار صفت مورد بررسی نسبت به سطح شاهد شد، ولی اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف سولوپتاس وجود نداشت. وزن خشک غلاف در سطح پنج در هزار سولوپتاس به‌میزان ۰/۶۲۰ گرم و در سطح عدم کوددهی ۰/۵۱۷ گرم بود (جدول ۸). محققان در بررسی اثرات کودها بر رشد و اجزاء عملکرد شنبلیله در شرایط مزرعه به این نتیجه رسیدند که بیشترین میانگین وزن غلاف در هر گیاه و عملکرد از مصرف کود شیمیایی NPK (۸۰:۴۰:۴۰) نسبت به سایر کودها به‌دست آمد (Vedpathak & Chavan, 2016).

تعداد دانه در بوته

نتایج نشان داد که اثر کود مرغی و اثر سولوپتاس بر صفت تعداد دانه در بوته معنی‌دار بود، ولی برهم‌کنش دو فاکتور مورد بررسی تأثیر

معنی‌داری بر تعداد دانه در بوته شنبلیله نداشت (جدول ۷). مقایسه میانگین اثر کود مرغی نشان داد که با افزایش در هر سطح این کود، تعداد دانه در بوته نیز افزایش می‌یابد، به‌نحوی‌که بیشترین تعداد دانه در بوته شنبلیله در سطح ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی به‌میزان ۲۰۴/۶۷ و کمترین این صفت مربوط به عدم کوددهی به‌میزان ۱۰۵/۶۸ بود. در اثر سولوپتاس مشاهده شد که با افزایش میزان این صفت تا سطح سه در هزار سولوپتاس، افزایش معنی‌داری در تعداد دانه در بوته مشاهده نگردید، ولی سطح پنج سولوپتاس سبب افزایش معنی‌دار این صفت به‌میزان ۷۹/۰۱ درصد نسبت به عدم کوددهی شد (جدول ۸). می‌توان این‌گونه برداشت کرد که به‌علّت افزایش تعداد دانه در غلاف و افزایش غلاف در بوته در مصرف کود دامی و شیمیایی، به تبع آن تعداد دانه در بوته نیز افزایش یافته است.

عرضه پتاسیم برای گیاهان دچار کمبود میزان کلروفیل برگ، هدایت روزنه‌ای، فتوسنتز و انتقال اسیدهای آمینه در گیاه به‌ویژه انتقال آبی به دانه‌های در حال رشد را افزایش می‌دهد. در سطوح زیاد پتاسیم، انتقال تا چند برابر هم افزایش می‌یابد (Seilsepour, 2014). طی آزمایشی با بررسی اثر سطوح مختلف کود سولفات پتاسیم بر عملکرد و اجزاء عملکرد سه رقم ماش (*Vigna radiata*) نتایج نشان داد که اثر کود پتاس بر تعداد دانه در غلاف معنی‌دار است (Shirvanipour et al., 2013). همچنین نتایج دیگر محققان حاکی از آن است که کاربرد تلفیقی کود شیمیایی به‌همراه کود دامی به‌طور معنی‌داری سبب افزایش تعداد دانه گیاه شنبلیله شد (Rostaie et al., 2015).

تعداد غلاف در بوته

داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش نشان داد که اثر سولوپتاس و همچنین اثر متقابل این دو فاکتور نیز بر صفت تعداد غلاف در بوته معنی‌دار بود، امّا اثر کود مرغی بر صفت مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۷). در اثر متقابل فاکتورهای مورد بررسی مشاهده شد که در عدم حضور کود مرغی، سولوپتاس تا سطح سه در هزار نتوانست موجب افزایش معنی‌دار تعداد غلاف در بوته شود. همچنین از این سو مشاهده شد که در برهم‌کنش کود مرغی ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار با هر سطح از سولوپتاس موجب بیشترین تعداد غلاف در بوته شنبلیله شد و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۹).

پژوهشگران بیان کردند که کمبود پتاسیم موجود در خاک در مرحله دانه‌بندی، سبب کاهش غلظت این عنصر در برگ‌ها به کمتر از ۱۰ گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاهی می‌شود که ریزش غلاف، کاهش تعداد دانه و وزن ۱۰۰ دانه گیاه سویا (*Glycine max*) را به دنبال دارد (Hanway & Johnson, 1985). طی آزمایشی با بررسی اثر سطوح مختلف کود سولفات پتاسیم بر عملکرد و اجزاء عملکرد سه رقم ماش نتایج نشان داد که اثر کود پتاس بر تعداد دانه در غلاف معنی‌دار است (Shirvanipour et al., 2013). محلول‌پاشی پتاسیم (۴۰۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ لیتر آب) نیز منجر به افزایش تعداد غلاف در بوته گیاه شنبلیله شد (Naser, 2017). ادیم و همکاران (Adim et al., 2022) گزارش کردند که بیشترین تعداد غلاف در بوته گیاه کلزا (*Brassica napus*) در تیمار کود شیمیایی ۵۰ درصد + کود مرغی ۵۰ درصد + کود کمپوست ۵۰ درصد + کود زیستی (T6) مشاهده شد که نسبت به شاهد (با کمترین مقادیر) افزایش ۳۷/۶ درصدی داشت (p<۰/۰۵).

عملکرد دانه

نتایج داده‌های به‌دست آمده نشان داد که اثر سولوپتاس و همچنین برهم‌کنش این دو کود بر صفت عملکرد دانه شنبلیله معنی‌دار بودند(جدول ۷). در جدول اثر متقابل داده‌های به‌دست آمده مشاهده شد که بیشترین سطوح هر دو تیمار سبب افزایش ۸۳/۷۶ درصدی عملکرد دانه نسبت به عدم کوددهی (سطح شاهد) شد (جدول ۹).

در تأیید نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، صالحی و همکاران (Salehi et al., 2017) با بررسی تغذیه گیاه دارویی شنبلیله با کودهای آلی (کود مرغی) و شیمیایی به این نتیجه رسیدند که کود تلفیقی در شنبلیله، عملکرد دانه را نسبت به کودهای شیمیایی افزایش داد. همچنین روستایی و فلاح (Rostaei & Fallah, 2016) بیشترین عملکرد دانه هر دو گیاه را از تیمار یک ردیف سیاهدانه + دو ردیف شنبلیله تغذیه شده از منبع کود تلفیقی (۵۰ درصد کود مرغی + ۵۰ درصد کود شیمیایی) گزارش کردند. در آزمایشی که بر روی اثر نوع و مقدار کود دامی بر عملکرد پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) صورت گرفت، نتایج نشان داد که کود مرغی به‌میزان ۲۰ تن در هکتار بیشترین عملکرد پنبه را تولید کرد (Houshyarifard & Qaranchik, 2009). در نتایجی مشابه روی گیاه شنبلیله، گزارش شده است که محلول‌پاشی پتاسیم در بالاترین سطح (۴۰۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ لیتر) سبب افزایش معنی‌دار عملکرد کل نسبت به شاهد شد

(Naser, 2017). همچنین در پژوهشی دیگر، عملکرد دانه شنبلیله در تیمار تغذیه شیمیایی (۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب اوره، سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم) بیشترین افزایش را داشت (Esmaeilian & Jalali, 2022).

عملکرد بیولوژیک

داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش نشان داد که اثر کود مرغی و سولوپتاس و همچنین اثر متقابل این دو فاکتور نیز بر صفت عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود (جدول ۷). اثر متقابل دو فاکتور بر صفت عملکرد بیولوژیک نشان داد که کمترین میزان این صفت مربوط به سطح شاهد (عدم استفاده از کودها) و همچنین سطوح ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی و عدم سولوپتاس بود؛ همچنین در سطح ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی مشاهده شد که با استفاده از سولوپتاس، بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک به‌دست آمد (جدول ۹).

صالحی و همکاران (Salehi et al., 2017) گزارش کردند که کاربرد کود آلی (کود مرغ) در گیاه شنبلیله سبب افزایش عملکرد بیولوژیک شد. اسماعیلیان و جلالی (Esmaeilian & Jalali, 2022) نیز بیان کردند که عملکرد بیولوژیک شنبلیله در تیمار کود شیمیایی (۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب اوره، سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم) بالاتر بود.

شاخص برداشت

داده‌های به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که اثر کود مرغی و سولوپتاس و اثر متقابل کود مرغی و سولوپتاس بر شاخص برداشت معنی‌دار بود (جدول ۷). در اثر متقابل سولوپتاس و کود مرغی بر صفت مورد بررسی مشاهده شد که بیشترین شاخص برداشت مربوط به برهم‌کنش کود مرغی ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌همراه ۱/۵ در هزار سولوپتاس به‌دست آمد (جدول ۹). نتایج حاکی از آن است که تخصیص مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی و در نتیجه، سهم عملکرد دانه در تعیین شاخص برداشت با کاربرد کودهای آلی بیشتر بوده است.

میرلوحی و همکاران (Mirlouhi et al., 2008) در یک بررسی چند ساله در مورد اثر تیمارهای مختلف کودی بر عملکرد گیاه جو (*Hordeum vulgare*) گزارش کردند که مصرف کودهای آلی در مقادیر زیاد سبب افزایش شاخص برداشت و عملکرد گیاه جو شد. اصفهانی و همکاران (Esfahani et al., 2005) هم دریافتند که مقادیر مختلف پتاس تأثیر معنی‌داری بر شاخص برداشت نداشت. پتاس به‌علّت افزایش برخی از اجزاء عملکرد موجب افزایش شاخص برداشت گیاه برنج (*Oryza sativa*) می‌شود.

نتیجه‌گیری

در تولید گیاهان دارویی علاوه‌بر شرایط آب‌وهوایی، فاکتورهای خاکی نیز از اهمیت خاصی برخوردار هستند. عناصر غذایی نه‌تنها در افزایش میزان محصول گیاهان دارویی همانند بقیه گیاهان مؤثر هستند، بلکه کیفیت محصول تولیدی را نیز تغییر می‌دهند. استفاده از کود مرغی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک که عمدتاً از سطح ماده آلی پایین برخوردارند، علاوه‌بر افزایش ماده آلی خاک و فراهمی عناصر غذایی می‌تواند خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی این خاک‌ها را بهبود بخشد. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین سطح تیمار کود مرغی، بالاترین میزان اکثر صفات رشدی را دارا بود که البته با سطح ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی اختلاف معنی‌داری نداشتند. همچنین در اثر کود سولوپتاس، بیشترین سطح سولوپتاس یعنی پنج در هزار، بیشترین میزان صفات رشدی را دارا بود. در اثر متقابل دو کود مورد بررسی مشاهده شد که برهم‌کنش کود آلی و شیمیایی سبب تأثیر دوچندان بر صفات رشدی مورد بررسی گردید. در اثر کود مرغی مشاهده شد که به‌جز صفت شاخص برداشت، این کود روی همه صفات عملکردی تأثیر معنی‌داری داشت و بیشترین سطح یعنی ۲۰۰۰ در بین سطوح مورد بررسی، بیشترین میزان صفات را دارا بود. همچنین بیشترین سطح سولوپتاس، بالاترین میزان این صفات را دارا بود. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که در بین اثرهای ساده، بیشترین میزان صفات مربوط به کود مرغی بود و در بین سطوح مورد بررسی در دو تیمار، سطح ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کود مرغی و پنج در هزار سولوپتاس برای دستیابی به محصول بهتر برای گیاه شنبلیله پیشنهاد می‌گردد.

References

1. Aasim, M., Baloch, F., Nadeem, M., Bakhsh, A., Sameeullah, M., & Day, S. (2018). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.): An underutilized edible plant of modern world. In M. Ozturk, K. Rehman, H. Muhammad,

and S. Aqeel Ahmad (Eds). *Global Perspectives on Underutilized Crops*. Springer International Publishing AG. p. 381-408. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77776-4_12
2. Abbasi, M.K., Khaliq, A., Shafiq, M., Kazmi, M., & Ali, I. (2010). Comparative effectiveness of urea N, poultry manure and their combination in changing soil properties and maize productivity under rainfed conditions in Northeast Pakistan. *Experimental Agriculture, 46*(2), 211-230. https://doi.org/10.1017/s0014479709991050
3. Adim, G., Malekzadeh, E., Dordipour, E., Kiani, F., Mokhtarpour, H., & Moazzemi, S. (2022). Evaluation of the integrated effect of chemical and bio-organic fertilizers on yield and yield components of rapeseed. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture), 45*(2), 119-135. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22055/AGEN.2022.40631.1632
4. Al-Taai, S.H.H. (2021). The effect of fertilizer uses on environmental pollution: A review. *Review of International Geographical Education Online, 11*(5), 3620-3529.
5. Alizadeh, P., Fallah, S., & Raiesi, F. (2012). Potential N mineralization and availability to irrigated maize in a calcareous soil amended with organic manures and urea under field conditions. *International Journal of Plant Production, 6*(4), 493-512. https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.762
6. Allahvirdizadeh, N., & Deljou, M.N. (2014). Effect of humic acid on morph-physiological traits, nutrients uptake and postharvest vase life of pot marigold cut flower (*Calendula officinalis* cv. Crysantha) in hydroponic system. *Journal of Science Technology of Greenhouse Culture, 5*(18), 133-143. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089082.1393.5.2.12.6
7. Azizi, M., Soltani, A., & Khavari Khorasani, S. (2008). Canola (physiology, agronomy, breeding and biotechnology). Jihad University of Mashhad Press, Mashhad, Iran. 230 p. (In Persian)
8. BS, E. (2005). Effect of poultry dung and cattle manure on chemical properties of clay and sandy clay loam soil. *Journal of Animal and Veterinary Advances, 4*(10), 839-841.
9. Chen, J.H. (2006). *The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility*. Paper presented at the International workshop on sustained management of the soil-rhizosphere system for efficient crop production and fertilizer use.
10. ElNour, M.E., Ali, A.M., & Saeed, B. (2015). Antimicrobial activities and phytochemical screening of callus and seeds extracts of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*). *International Journal of Current Microbiology Applied Sciences, 4*(2), 147-157.
11. Esfahani, M., Sadrzadeh, S.M., Kavoosi, M., & Dabagh-Mohammadi-Nasab, A. (2005). Study the effect of different levels of nitrogen and potassium fertitizers on yield, yield components and growth of rice c. v. Khazar. *Iranian Society of Crops and Plant Breeding Sciences, 7*(3), 226-241. (In Persian with English abstract). http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1384.7.3.4.0
12. Esmaeilian, Y., & Jalali, A. (2022). Evaluation of quantitative, qualitative, and economic aspects of garlic (*Allium sativum* L.) and fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) intercropping under organic and chemical nutrition systems. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 38*(1), 133-149. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.354814.3003
13. Fallah, S., Ghalavand, A., & Raiesi, F. (2013). Soil chemical properties and growth and nutrient uptake of maize grown with different combinations of broiler litter and chemical fertilizer in a calcareous soil. *Communications in Soil Science Plant Analysis, 44*(21), 3120-3136. https://doi.org/10.1080/00103624.2013.832284
14. Ghalenoei, M., Moafporian, G., & Drostkar, M. (2014). Effect of potassium and zinc application on yield and yield components in normal irrigation and deficit irrigation. *Journal of Plant Ecophysiology, 6*(18), 55-68. (In Persian with English abstract). https://doi.org/20.1001.1.20085958.1393.6.18.5.4
15. Ghanbari, S., Moradi Telavat, M., & Siadat, S.A. (2017). Evaluation of competitive indices in barley intercropped with fenugreek under manure applications. *Journal of Crops Improvement, 18*(4), 821-834. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jci.2017.56654
16. Gopalan, C., Rama Sastri, B., & Balasubramanian, S. (2004). *Nutritive Value of Indian Foods. National Institute of Nutrition, ICMR, Hyderabad*.
17. Griffe, P., Metha, S., & Shankar, D. (2003). Organic production of medicinal, aromatic and dye yielding plants (MADPs): forward, preface and introduction. *Food Agriculture Organization, 2*, 52-63.
18. Hanway, J.J., & Johnson, J.W. (1985). Potassium nutrition of soybeans. In R.D. Munson (Ed.). *Potassium in Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA. p. 753-764.

19. Hossain, M.D., Musa, M.H., Talib, J., & Jol, H. (2010). Effects of nitrogen, phosphorus and potassium levels on kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) growth and photosynthesis under nutrient solution. *Journal of Agricultural Science, 2*(2), 49-57. https://doi.org/10.5539/jas.v2n2p49
20. Houshyarifard, M., & Qaranchik, A. (2009). Effect of source and rate of manures on incidence and severity of important diseases, yield and yield components in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Iranian Society of Crops and Plant Breeding Sciences, 11*(3), 237-248. (In Persian with English abstract)
21. Ibrahim, F.R., & Helaly, A. (2017). Growth and productivity response to nitrogen, potassium and humic acid of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) plant. *Middle East Journal of Agriculture Research, 6*(4), 1526-1535.
22. Jasim, A.H., Ali, A.H., & Lilo, S.A. (2016). Effect of organic and chemical soil fertilizers and their interactions with foliar fertilizer on some vegetative growth of fenugreek. *Annales of West University of Timisoara. Series of Biology, 19*(2), 199-206.
23. Javanmard, A., & Shekari, F. (2016). Improvement of seed yield, its components and oil content of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by applications of chemical and organic fertilizers. *Journal of Crop Ecophysiology, 10*(37 (1)), 35-56. (In Persian with English abstract)
24. Jianrong, F., Changgeng, Z., Lina, J., & Zheng, W.J. (1995). Potassium improves yield and quality of mulberry leaves. *Beter Crops*, 79(4).
25. Karimi Zinkanlou, S., Hemti, K., & Khairkhah, M. (2015). The effect of different levels of organic fertilizers on the morphophysiological traits of *Ziziphora clinopodioides*. *Plant Production Research Journal, 23*(4), 1-16. http://dx.doi.org/10.12988/asb.2015.519
26. Maghsudi, E., Ghalavand, A., & Aghaalikhan, M. (2014). The effect of different levels of fertilizer (organic, biological and chemical) on morphological traits and yield of maize single cross hybrid 704. *Applied Field Crops Research, 27*(104), 129-135. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22092/AJ.2014.101820
27. Mandal, S., & DebMandal, M. (2016). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) oils. In V.R. Preedy (Ed.) *Essential oils in food preservation, flavor and safety*. (Elsevier. p. 421-429. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-416641-7.00047-x
28. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd Ed. Institute of Plant Nutrition University of Hohenheim: Germany.
29. Mehrafarin, A., Naghdi Badi, H., Mirzai Motlagh, M., Salehi, M., & Ghiasi Yekta, M. (2017). Phytochemical and morphophysiological responses of dill (*Anethum graveolens* L.) to foliar application of potassium sulfate and methanol biostimulant. *Journal of Medicinal Plants, 16*(64), 93-108.
30. Mirhashemi, S.M., Koocheki, A.R., Parsa, M., & Nassiri Mahallati, M. (2009). Evaluating the benefit of ajowan and fenugreek intercropping in different levels of manure and planting pattern. *Iranian Journal of Field Crops Research, 7*(1), 271-281. (In Persian with English abstract).
31. Mirlouhi, A.F., Mohammadi, R., Razavi, S.J., & Nourbakhsh, F. (2008). Effect of different fertilizer applications during rice and corn cultivation on barley yield in a three years replication. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science, 18*(3), 161-171. (In Persian with English abstract).
32. Naser, A.A. (2017). Study of response *Trigonella foenum-graecum* to spraying with high potassium (Miller) and high phosphor (Agroleaf). *Tikrit Journal of Pure Science, 22*(9), 6-10. https://doi.org/10.25130/tjps.v22i9.866
33. Noorgholipour, F., Samavat, S., & Tehrani, M. (2019). *The necessity of combined application of chemical and organic fertilizers in sustainable agricultural systems*. Paper presented at the First Congress of Fertilizer Challenges in Iran: Half a Century of Fertilizer Consumption, Tehran, Iran.
34. Pandey, V., Patel, A., & Patra, D. (2016). Integrated nutrient regimes ameliorate crop productivity, nutritive value, antioxidant activity and volatiles in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops Products, 87*, 124-131. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.035
35. Pandey, V., & Patra, D. (2015). Crop productivity, aroma profile and antioxidant activity in *Pelargonium graveolens* L'Hér. under integrated supply of various organic and chemical fertilizers. *Industrial Crops Products, 67*, 257-263. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.042
36. Perramon, B., Bosch-Serra, A., Domingo, F., & Boixadera, J. (2016). Organic and mineral fertilization management improvements to a double-annual cropping system under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy, 76,* 28-40. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.014
37. Rezae, M., & Baradaran, R. (2013). Effects of bio fertilizers on the yield and yield components of pot marigold

(*Calendula officinalis* L.). *Iranian Journal of Medicinal Aromatic Plants Research*, *29*(3), 635-650. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.4047

38. Rostaei, M., & Fallah, S. (2016). Assessment of canopy characteristics and essential oil yeild of fenugreek and black cumin in intercropping under application of organic and chemical ferilizer. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *25*(4), 1-23. (In Persian with English abstract).
39. Rostaie, M., Falah, S., & Souraki, A. (2015). Effect of fertilizer sources on growth, yield and yield components of fenugreek intercropped with black cumin. *Journal of Crop Production*, *7*(4), 222-197. (In Persian with English abstract). http://doi.org/20.1001.1.2008739.1393.7.4.11.0
40. Sadrzadeh, M., & Moalemi, N. (2005). The effect of water and potassium stress on the vegetative characteristics of young olive seedlings, Zard cultivars and Baghmolek. *Agricultural Research*, *6*(4), 1-10.
41. Sakinejad, T. (2003). Study of effect of water deficit on the trend of uptake of N, P, K and Na at different growth stages considering the morphological and physiological traits of maize in Ahvaz climate. Ph.D. Dissertation on Crop Physiology, Science and Research Branch, Ahvaz, Iran,
42. Salehi, A., Fallah, S., Abasi Sourki, A., & Tadayon, M.R. (2017). Evaluation of yield and yield components of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) under organic and chemical fertilizers. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *33*(2), 338-352. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2017.106802.1804
43. Scharf, P.C., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Davis, J.G., Hubbard, V.C., & Lory, J.A. (2005). Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agronomy Journal*, *97*(2), 452-461. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0452
44. Seilsepour, M. (2014). Study of potassium and zinc effects on quantity and quality parameters and grain cadmium content of winter wheat irrigated by waste water. *Applied Field Crops Research*, *27*(104), 96-105. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22092/AJ.2014.101683
45. Shafii Zargar, A. (2015). Investigating the quantitative and qualitative characteristics of green cucumber according to organic and mineral substances in autumn cultivation. M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
46. Shirvanipour, L., Panahi Kordloghari, K., & Kalidri, A.p. (2013). Investigating the effect of different levels of potassium sulfate on yield and yield components of three varieties of mung bean. Paper presented at the Second National Conference on Medicinal Plants and Sustainable Agriculture. Hamedan. Hegmatane Environmental Assessor Association, Iran.
47. Siadat, S.A., & Moradi-Telavat, M.R. (2018). *Practical Aspects of Organic Farming*. Tehran: Agricultural Education and Extension Press, 500 p. (In Persian).
48. Tahami, S., Rezvani Moghaddam, P., & Jahan, M. (2010). Comparison the effect of organic and chemical fertilizers on yield and essential oil percentage of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Agroecology*, *2*(1), 63-74. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22067/JAG.V2I1.7603
49. Uwah, D.F., Ogar, C.C., & Akpan, R.J. (2014). Effects of poultry manure and plant population on soil properties and agronomic performance of sweet maize (*Zea mays* L. Saccharata Strut). *International Journal of Applied*, *4*(4), 1-20.
50. Vedpathak, M., & Chavan, B. (2016). Fertilizers effects on growth and yield components of fenugreek vegetable (*Trigonella foenum-graecum* L.) in a field trial. *International Journal for Innovative Research in Science Technology*, *3*(7), 180-183.
51. Wani, S.A., & Kumar, P. (2018). Fenugreek: A review on its nutraceutical properties and utilization in various food products. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *17*(2), 97-106. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.01.007
52. Zhao, J., Ni, T., Li, J., Lu, Q., Fang, Z., Huang, Q., Zhang, R., Li, R., Shen, B., & Shen, Q. (2016). Effects of organic–inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice–wheat cropping system. *Applied Soil Ecology*, *99*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.11.006

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 605-624

Evaluation of Ecological Resilience of Agricultural Ecosystems in Razavi Khorasan Province: Comparison of Integrated and Non-Integrated Ecosystems

Pegah Naghipour[1], Mehdi Nassiri Mahallati[2*], Alireza Koocheki[2], and Soroor Khorramdel[3]

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively
(*- Corresponding author's Email: mnassiri@um.ac.ir)

Received: 26-01-2022 Revised: 29-01-2024 Accepted: 30-01-2024 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Naghipour, P., Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., & Khorramdel, S. (2025). Evaluation of ecological resilience of agricultural ecosystems in Razavi Khorasan province: Comparison of integrated and non-integrated ecosystems. *Journal of Agroecology*, *16*(4), 605-624. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.86287.1184

Introduction

Agriculture plays a very important role in the realization of many of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). If agriculture is to make a positive contribution to achieving these goals, ensuring the ecological resilience of farmers, i.e. improving the adaptation capacity of the households as well as the whole production system to a wide range of environmental changes and shocks, is crucial. The intensification of climate change caused by global warming and its consequences, including the occurrence of long droughts, floods and other natural disasters, have threatened the food security of subsistence farmers and smallholders in the first place, and the food security of large communities in the long run. Also, recently, the COVID-19 pandemic and the possibility of similar epidemics have created more concerns. Therefore, the issue of resilience has been highly considered by researchers and international organizations, especially the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), so resilience has been defined as one of the 10 elements of agroecology. On the other hand, numerous research evidence have shown that integrated systems (combination of crop cultivation and animal husbandry) in order to increase structural and functional diversity and increase ecological resilience against severe environmental stresses and climate changes. In addition, integrated systems have different resilience and ecological stability depending on the intensity, amount and type of integration. Therefore, in recent years, a large number of researches have been conducted to address the resilience of agricultural systems. Since the ecological dimensions of resilience have not been comprehensively investigated in Iran, the purpose of this research is to evaluate the ecological resilience of rural households in Razavi Khorasan province and compare systems based on agriculture, based on livestock and integrated systems of agriculture and livestock. In this research, the recommended method of FAO has been used to evaluate resilience.

Materials and Methods

The required information was collected from 87 households from 10 cities within the province by completing a comprehensive questionnaire and face-to-face interviews with households. Data were analyzed using the

https://doi.org/10.22067/agry.2024.86287.1184

RIMA II-FAO method. Clustering of 87 households based on their corresponding cultivated area of crops, saffron and the number of livestock units resulted in 4 livelihood groups, including only cropping (G1), the integrated crop-livestock at medium level (G2), only livestock at large level (G3) and integrated crop-livestock both at large level (G4). The resilience of households in each group was evaluated based on 5 components (asset, adaptive capacity, biodiversity, intensification, and use of ecosystem services), each measured by a number of indicators. The scores of 5 components were aggregated after weighting by using factor analysis and normalization to develop a composite resilience index on a 1-5 scale.

Results and Discussion

The results showed a significant relationship between the resilience of rural households and the 5 mentioned components, where intensification had a negative correlation with resilience, while the impact of assets, adaptation capacity, biodiversity and use of ecosystem services on household resilience was positive with the highest correlation for biodiversity. The households of integrated crop-livestock groups (G2) and (G4) had the highest resilience compared to households in single enterprise groups i.e. only cropping (G1) and only livestock (G3), with the lowest resilience in G3. In general, the high score of the components of biodiversity, ecosystem services, and adaptive capacity, as well as the low level of intensification in small to medium-scale integrated crop-livestock systems, resulted in more resilient households while large-scale single enterprise households had lower resilience despite their higher assets.

Conclusion

Resilience is a fundamental basis of sustainability, and it refers to the ability of systems to return to their initial state after facing environmental tensions. The main purpose of the present study was to evaluate the ecological resilience of the agriculture ecosystems of Khorason Razavi province. The main findings indicated that the integrated farmlands with other activities, particularly with animal husbandry, are much more resilient than pure and monotype farm production systems.

Acknowledgements

We are grateful to the Honorable Vice Chancellor of Research and Technology of Ferdowsi University of Mashhad for providing the costs of this research.

Keywords: Adaptive capacity, Biodiversity, Composite resilience index, Integrated system, Intensification, Sustainable agriculture

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ١٤٠٣، ص ٦٢٤-٦٠٥

ارزیابی تاب‌آوری اکولوژیکی بوم‌نظام‌های کشاورزی استان خراسان رضوی: مقایسه بوم‌نظام‌های تلفیقی و غیر تلفیقی

پگاه نقی پور[1]، مهدی نصیری محلاتی[2*]، علیرضا کوچکی[2] و سرور خرم دل[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

چکیده

کشاورزی بخش بسیار مهمی از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل را در بردارد. کشاورزی در صورتی می‌تواند نقش مثبتی در دستیابی اهداف توسعه پایدار داشته باشد که از تاب‌آوری اکولوژیکی و بهبود ظرفیت‌های مرتبط با آن در جهت مقابله با طیف گسترده‌ای از چالش‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی برخوردار باشد. در این پژوهش، تاب‌آوری اکولوژیکی بوم‌نظام‌های کشاورزی استان خراسان رضوی براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از ۸۷ خانوار و در ۱۰ شهرستان این استان مورد ارزیابی کمّی قرار گرفت. برای این منظور، اطلاعات مورد نیاز با تکمیل پرس‌شنامه جامع و مصاحبه حضوری با خانوارها جمع‌آوری شد و داده‌ها با استفاده از روش RIMA II-FAO تجزیه و تحلیل شدند. در این رابطه، ابتدا خانوارهای روستایی براساس سطح زیرکشت محصولات زراعی و همچنین تولید زعفران (*Crocus sativus*) و تعداد واحدهای دامی در مالکیت آن‌ها خوشه‌بندی شد و بوم‌نظام‌ها در چهار گروه دسته‌بندی شدند. گروه اول: تنها به زراعت مشغول بودند (G_1)، گروه دوم: نظام تلفیقی زراعت و دامداری در سطح متوسط داشتند (G_2)، گروه سوم: تنها به دامداری در سطح بزرگ مشغول بودند (G_3) و گروه چهارم: دارای هر دو نظام تلفیقی زراعت و دامداری در سطح بزرگ (G_4) بودند. تاب‌آوری خانوارها در هر یک از این چهار گروه براساس پنج مؤلفه (میزان دارایی، ظرفیت سازگاری، وضعیت تنوع زیستی، شدت فشرده‌سازی و استفاده از خدمات بوم‌نظامی) که هر یک با تعدادی نمایه سنجیده شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. امتیازهای این پنج مؤلفه بعد از وزن دهی و نرمال‌سازی تجمیع شد و شاخصی در مقیاس صفر تا پنج برای تاب‌آوری محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بین تاب‌آوری سیستم‌های زراعی و پنج مؤلفه مذکور، رابطه مستقیم و معنی‌داری وجود داشت و از بین آن‌ها، تنوع زیستی بیشترین تأثیر را بر تاب‌آوری خانوارهای کشاورز داشت. همچنین مؤلفه‌های میزان دارایی، ظرفیت سازگاری و استفاده از خدمات بوم‌نظامی نیز به‌طور مستقیم بر افزایش تاب‌آوری خانوارهای روستایی تأثیرگذار بودند، درحالی‌که فشرده‌سازی دارای تأثیر منفی بر شاخص تاب‌آوری خانوارهای روستایی بود. بر این اساس، خانوارهای گروه (G_2) و (G_4) یعنی بوم‌نظام‌هایی که با تلفیق دامداری و زراعت مدیریت می‌شدند، به‌ترتیب بیشترین میزان تاب‌آوری را نسبت به دو گروه دیگر، یعنی خانوارهایی که تنها به زراعت مشغول بودند (G_1) و خانوارهایی که تنها به دامداری مشغول بودند (G_3) به خود اختصاص دادند و کمترین میزان تاب‌آوری مربوط به خانوارهایی بود که تنها به دامداری در سطح بزرگ مشغول بودند (G_3) بود. در مقایسه نظام‌های تلفیقی مشخص شد که به‌طور کلی، بالا بودن امتیاز مؤلفه‌های تنوع زیستی، خدمات بوم‌نظام، ظرفیت سازگاری، میزان پایین فشرده‌سازی، همچنین سطوح کوچک‌تر مزارع مربوط به خانوارهایی که نظام تلفیقی زراعت و دامداری در سطح متوسط داشتند (G_2) از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده سطح بالای تاب‌آوری در این گروه نسبت به نظام‌های تلفیقی زراعت و دامداری هر دو در سطح بزرگ (G_4) بود.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، تنوع زیستی، شاخص مرکب ظرفیت سازگاری، فشرده‌سازی، کشاورزی پایدار، نظام تلفیقی

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mnassiri@um.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/agry.2024.86287.1184

مقدمه

در طی بیش از ۵۰ سال گذشته، فشرده‌سازی بوم‌نظام‌های کشاورزی با صرف انرژی بالا برای تولید محصولات غذایی در بسیاری از مناطق جهان از جمله ایران رایج شده است. اگرچه این نظام‌ها با موفقیت اقتصادی همراه هستند، امّا نگرانی‌های بسیاری در مورد اثرات منفی ناخواسته آن‌ها بر محیط‌زیست وجود دارد (Panel et al., 2014).

هولینگ (Holling, 1973) برای اولین بار، تاب‌آوری زیست‌محیطی را به‌عنوان توانایی سیستم‌های طبیعی برای حفظ کارکرد و ساختار اصلی خود در هنگام بروز اختلال تعریف کرد. از آن زمان، تعاریف متعددی برای تاب‌آوری ارائه‌شده، امّا به‌طور کلی تاب‌آوری معیاری از "ظرفیت سیستم برای تحمل تنش‌ها" می‌باشد (Bousquet et al., 2016). تاب‌آوری یکی از شاخص‌های مهم در برآورد میزان مقاومت بوم‌نظام‌های زراعی در مواجهه با تنش‌های شدید محیطی و تغییر اقلیم است، ازاین‌رو بسیاری از محققان، تاب‌آوری را به‌عنوان بخش مهمی از پایداری می‌دانند (Marchese et al., 2017). به بیان دیگر، بوم‌نظام‌هایی دارای تاب‌آوری بالا هستند که قادر باشند از طریق تنوع ساختاری و کارکردی بالا در مقابل تغییرات اقلیمی و تنش‌های محیطی مقاومت کنند (Gil et al., 2017). بر این اساس، فشرده‌سازی و کاهش تنوع در سیستم‌های رایج نسبت به سیستم‌های تلفیقی باعث کاهش کارکردهای بوم‌نظام‌ها شده و درنتیجه، ثبات، تاب‌آوری و پایداری آن‌ها کاهش می‌یابد (Oliver et al., 2017).

تشدید تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی و پیامدهای آن شامل بروز خشک‌سالی‌های طولانی، سیل و سایر بلایای طبیعی در وهله اول امنیت غذایی کشاورزان معیشتی و خرده‌مالکان و در درازمدت امنیت غذایی جوامع بزرگ را مورد تهدید قرار داده (Bizikova et al, 2016) و اخیراً پاندمی کووید ۱۹ (Christophe et al., 2021) و امکان بروز همه‌گیری‌های مشابه، نگرانی‌های بیشتری را به‌وجود آورده است. ازاین‌رو، موضوع تاب‌آوری به‌شدت مورد توجه محققان و سازمان‌های بین‌المللی به‌ویژه سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (فائو)[1] قرار گرفته، به‌طوری‌که تاب‌آوری به‌عنوان یکی از عناصر ۱۰گانه اگرواکولوژی تعریف شده است (Barrios et al., 2020). تحقیقات و مطالعات صورت گرفته در مورد تاب‌آوری خانوارهای روستایی و نظام‌های کشاورزی از نظر امنیت غذایی در فلسطین و کرانه باختری (Alinovi et al., 2008)، نیجریه (Aboubakr et al., 2016)، کنیا (Alinovi et al., 2010)، لیتوانی (Volkov et al., 2021)، انگلستان و ویلز (Berry et al., 2022) مثال‌هایی از مطالعات گسترده‌ای است که در دو دهه گذشته انجام گرفته است.

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه تاب‌آوری بوم‌نظام‌های کشاورزی انجام شده است، برای مثال در ارزیابی تاب‌آوری بوم‌نظام‌های زراعی ایران به تغییر اقلیم گزارش شده است که استان‌های گیلان، هرمزگان و بوشهر بیشترین و استان‌های چهارمحال و بختیاری، قم و مرکزی کمترین تاب‌آوری را دارند و استان خراسان رضوی دارای تاب‌آوری متوسط می‌باشد (Ehsani & Shokoohi, 2022). مطالعه تاب‌آوری تولیدات کشاورزی ایران از نظر امنیت غذایی (Nakhli.& Bastani, 2023) و ارزیابی ظرفیت سازگاری نظام‌های زراعی ایران به تغییر اقلیم (Abdollahzadeh et al., 2023) نیز ازجمله پژوهش‌های جدید در این ارتباط هستند.

در مطالعات فوق و نیز سایر پژوهش‌های انجام شده در ایران، تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی ارزیابی شده و ابعاد اکولوژیکی تاب‌آوری کمتر مورد توجه قرار گرفته است، درحالی‌که تاب‌آوری نسبت به تغییرات محیطی مستلزم وجود ویژگی‌های ساختاری و کارکردی در بوم‌نظام است (Allen et al., 2014) و بدون تحقق این ویژگی‌ها، تاب‌آوری حاصل نخواهد شد. بر این اساس، اخیراً برخی محققان با تأکید بر اهمیت ابعاد اکولوژیکی به بررسی تاب‌آوری در تولید محصولات زراعی (Zampieri et al., 2020)، نقش تنوع زیستی (Dardonville et al., 2022) و خدمات بوم‌نظامی (Varyvoda & Taren, 2022) در شکل‌گیری و بالا بردن سطح تاب‌آوری پرداخته‌اند. در همین راستا، کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2022)، تاب‌آوری بوم‌نظام‌های تولید گندم دیم ایران (*Triticum aestivum*) به تغییرات اقلیمی را ارزیابی کرده و با استفاده از مدل شبیه‌سازی نشان دادند که استفاده از تناوب مناسب (افزایش تنوع زمانی) تأثیر چشمگیری در بالا بردن تاب‌آوری این بوم‌نظام‌ها دارد.

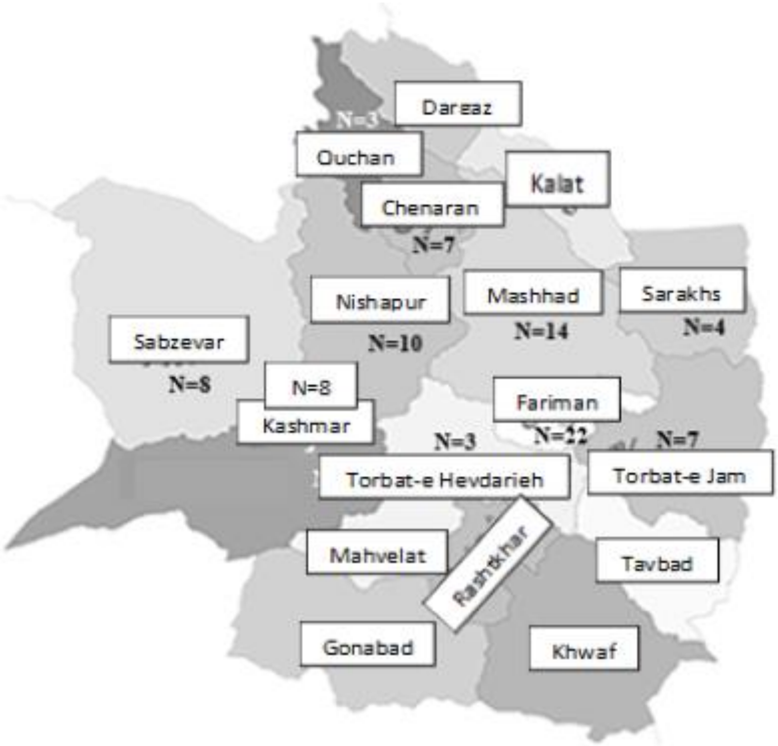
1 -Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

از سوی دیگر، شواهد متعدد پژوهشی نشان داده است که نظام‌های تلفیقی (تلفیق کشت محصولات زراعی و دامداری) به جهت افزایش تنوع ساختاری و کارکردی، تاب‌آوری اکولوژیکی را در برابر تنش‌های شدید محیطی و تغییرات اقلیمی افزایش می‌دهند (Panel et al., 2014). به‌علاوه سیستم‌های تلفیقی بسته به شدت، میزان و نوع تلفیق، از تاب‌آوری و پایداری اکولوژیکی متفاوتی برخوردار هستند (Gil et al, 2017). یافته‌های مطالعه‌ای در هندوستان (Paramesh et al., 2022) نشان داد که تلفیق زراعت و دامداری تاب‌آوری، ثبات، بازده اقتصادی و امنیت غذایی خانوارهای روستایی را در مقابل تغییرات اقلیمی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. در مطالعه دیگری نیز نتایج مشابهی از تأثیر مثبت نظام‌های تلفیقی بر افزایش تاب‌آوری گزارش شده است (Szymczak et al., 2020)، به نظر می‌رسد که تلفیق دامداری و زراعت از طریق ارتقاء خدمات بوم‌نظامی باعث بهبود تاب‌آوری در مقابل تغییرات محیطی می‌شود (Franzluebbers et al., 2023).

ازآن‌جاکه ابعاد بوم‌شناختی تاب‌آوری در ایران به‌طور جامع بررسی نشده است، هدف از این پژوهش ارزیابی تاب‌آوری اکولوژیکی خانوارهای روستایی استان خراسان رضوی و مقایسه نظام‌های متکی به زراعت، متکی به دامداری و نظام‌های تلفیقی زراعت و دامداری است. در این تحقیق از روش توصیه شده فائو برای ارزیابی تاب‌آوری استفاده شده است (FAO, 2016).

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: این پژوهش در سال ۱۳۹۸ در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی (قوچان، چناران، مشهد، فریمان، نیشابور، سبزوار، سرخس، تربت‌جام، تربت‌حیدریه و کاشمر اجرا شد. طبقه‌بندی اقلیمی نواحی جغرافیایی استان خراسان رضوی با استفاده از هشت پارامتر مهم اقلیمی (میانگین دما، حداکثر دما، حداقل دما، رطوبت اتمسفری، سرعت باد، یخبندان، بارش و تعداد ساعات آفتابی)، برای ۱۷ ایستگاه سینوپتیک واقع استان خراسان رضوی انجام شده است (Zandi, 2017)، مؤلفه‌های یاد شده، حدود ۳/۹۷ رفتار اقلیمی استان را تبیین کردند.



شکل ۱- شهرستان‌های منتخب در استان خراسان رضوی

Fig. 1- Selected counties in Khorasan Razavi province

تعداد نمونه (N) در هر شهرستان روی نقشه ذکر شده است.

Sample size (N) for each county is shown on the map

تحلیل روی پارامترهای یاد شده، وجود شش ناحیه آب‌وهوایی براساس شاخص دومارتن را در استان نشان داد؛ بر این اساس، نمونه‌برداری براساس اقلیم استان صورت گرفت و درمجموع، تعداد ۵۸ روستا در شهرهای مذکور انتخاب و در هر روستا، تعدادی از خانوارهای کشاورز مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۱، شهرستان‌ها و تعداد نمونه مربوط به هر شهرستان مشخص شده است. شهرستان‌هایی که در نقشه نمونه‌برداری نشدند دارای اقلیم مشابهی با شهرستان‌های انتخاب‌شده برای نمونه‌برداری بودند.

روش نمونه‌گیری: تعداد نمونه (N) در هر شهرستان براساس معادله کوکران (معادله ۱) برآورد شد (Cochran, 1977). بدین منظور، ابتدا با انتخاب تصادفی ۳۰ نمونه، واریانس (S^2) بین نمونه‌ها محاسبه شد و سپس، با اطمینان ۹۵ درصد ($Z_{5\%} = 1.96$) و پذیرش ۱۰ درصد خطا (e=0.1)، حجم نمونه محاسبه شد.

$$N = \frac{S^2 Z^2}{e^2}$$ معادله (۱)

لازم به ذکر است که جهت افزایش دقت، به تعداد نمونه تعیین شده از طریق معادله ۱، ۱۰ درصد اضافه شد.

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها: این مطالعه به‌صورت مقطعی[1] اجرا شد و داده‌های مورد نیاز برای ارزیابی تاب‌آوری خانوارهای کشاورز از طریق پرسش‌نامه و با انجام مصاحبه حضوری جمع‌آوری گردید. بدین منظور، پرسش‌نامه‌های جامعی شامل سؤالات متنوع از جنبه‌های مختلف جمعیت‌شناسی، اقتصادی، زراعی و اکولوژیک تهیه و با مصاحبه رودررو با کشاورزان تکمیل شدند. بسیاری از سؤالات پرسش‌نامه به‌طور مستقیم در محاسبه شاخص تاب‌آوری به‌کار نرفته‌اند، ولی اطلاع از آن‌ها برای شناخت بهتر روش‌های مدیریت بوم‌نظام و نیز ساختن اجزاء و نمایه‌های مرتبط با شاخص تاب‌آوری ضروری بوده است.

پیش از انجام محاسبات مربوط به شاخص تاب‌آوری، پاسخ‌های ذکر شده در پرسش‌نامه‌ها در معرض آزمون روایی[2] قرار گرفتند. هدف از اجرای این آزمون، اطمینان از انسجام و دقت در نتایج جمع‌آوری شده است، به بیان دیگر، آزمون روایی نشان می‌دهد که تا چه میزان بین پاسخ‌های داده شده به سؤالات مرتبط با هم، همبستگی وجود

1- Cross sectional
2 Reliability

دارد. آلفای کرونباخ[3]، متداول‌ترین آماره برای اطمینان از روایی نتایج است، مقدار این آماره همیشه مثبت بوده و بین صفر و یک قرار دارد و مقادیر ۰/۷ یا بالاتر، نشان‌دهنده روایی مطلوب در پاسخ‌های جمع‌آوری شده است (Tavakol & Dennick, 2011). برای حصول روایی مطلوب، با تکرار آزمون روایی، داده‌هایی که از انسجام کافی برخوردار نبودند، حذف شدند (Wu et al., 2022) و در نهایت، ۸۷ پرسش‌نامه که دقت لازم برای آن‌ها احراز شد (آلفای کرونباخ = ۰/۷۶) در محاسبات ارزیابی تاب‌آوری مورد استفاده قرار گرفتند.

روش ارزیابی تاب‌آوری

در این پژوهش، شاخص تاب‌آوری براساس روش فائو موسوم به RIMA II[4] محاسبه و تجزیه و تحلیل شد (FAO, 2016). این روش به‌طور اساسی برای ارزیابی تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای کشاورز طراحی شده و برای اجرای آن باید مراحل زیر دنبال شود:

انتخاب اجزاء یا پایه‌های اصلی شکل‌گیری تاب‌آوری:

در مطالعه حاضر، پنج جزء اصلی برای توصیف تاب‌آوری انتخاب شدند: دارایی کشاورزی خانوار[5] (Ag-Assets)، ظرفیت سازگاری[6] (Ad-Cap)، تنوع زیستی[7] (BioDiv)، فشرده‌سازی[8] (Intens) و خدمات بوم‌نظام[9] (Eco-Serv).

تعیین نمایه‌های مربوط به هر جزء اصلی: چون اجزاء اصلی به‌صورت یک متغیر قابل‌اندازه‌گیری نیستند، لذا برای توصیف هر یک از آن‌ها از تعدادی نمایه[10] (متغیر) استفاده شد. در جدول ۱، نمایه‌های استفاده شده برای توصیف هر یک از اجزاء تاب آوری ارائه شده است.

استاندارد کردن داده‌ها: بعد از مراحل ۱ (تعیین اجزاء اصلی تاب‌آوری) و ۲ (انتخاب نمایه‌های هر جزء اصلی)، داده‌های مربوط به هر نمایه (متغیر) برای ۸۷ خانوار تحت بررسی از پرسش‌نامه‌ها استخراج شدند.

3-Cronbach’s Alpha
4- Resilience Index Measurement and Analysis
5- Agricultural assets
6-Adaptive capacity
7- Biodiversity
8- Intensification
9- Ecosystem services
10- Indicator

جدول ۱- اجزاء اصلی اندازه‌گیری تاب‌آوری و نمایه‌های استفاده شده برای توصیف هر یک از اجزا
Table 1- The main components for resilience measurement and the corresponding indicators for each component.

اجزاء اصلی **Main components**	ویژگی اجزاء **Component's characteristics**	نمایه‌های توصیف‌کننده **Describing indicators**
Ag-Assets	نشان‌دهنده دارایی‌های مربوط به خانوار کشاورز Indicating agricultural assets of households	سطح زیرکشت Cultivated area تعداد واحدهای دامی Livestock units سطح زیرکشت زعفران[1] Saffron cultivation area
Ad-Cap	نشان‌دهنده ظرفیت سازگاری خانوار به تغییرات اقلیمی و ایجاد ثبات Indicating household adaptation capacity to climate variability and stability	راهکارهای سازگاری با تنش سرما/گرما/خشکی، خشک‌سالی و تعداد منابع درآمد Adaptation methods to cold/heat/water stress, drought and number of income items
BioDiv	نشان‌دهنده میزان استفاده خانوار از مزایای تنوع زیستی Indicating how households use of the benefits of biodiversity	غنا و شاخص شانون گونه‌های زراعی، کشت مخلوط Richness and Shannon index of crop species, intercropping
Intens	نشان‌دهنده شدت فشرده‌سازی در استفاده از نهاده‌های خارجی Indicating the level of intensification and usage of external inputs	سطح مکانیزاسیون Mechanization level مصرف کود شیمیایی Chemical fertilizers مصرف آفت‌کش و علف‌کش‌ها Pesticides and herbicides
Eco-Serv	نشان‌دهنده میزان تقویت و بهره‌برداری از خدمات بوم‌نظام با روش‌های مدیریت Indicating enhancement of ecosystem services by management practices	افزایش ماده آلی خاک Soil organic matter تناوب با بقولات Rotation with legiumes کشاورزی حفاظتی Conversation agriculture مدیریت تلفیقی آفات Integrated pest management تلفیق دامداری و زراعت Mixed (crop + animal) farming

۱- چون سطح زیرکشت زعفران، صرف نظر از سطح زیرکشت کل محصولات همبستگی معنی‌داری با درآمد خانوارها دارد (r=0.52**) و در نتیجه، داشتن مزارع زعفران در کنار سایر فعالیت‌های کشاورزی می تواند در افزایش تاب‌آوری مؤثر باشد، بنابراین به‌عنوان یک نمایه مجزا در نظر گرفته شد.

این نمایه‌ها بسته به ماهیت آن‌ها به سه صورت تعریف می‌شوند (Volkov et al., 2021;Alinovi et al., 2008)، متغیرهای پیوسته[1] مثل سطح زیرکشت که دارای واحد اندازه‌گیری هستند، متغیرهای جهت‌دار[2] که شدت متغیر را از خیلی کم تا خیلی زیاد توصیف می‌کند و در قالب مقیاس پنج نقطه‌ای لایکرت[3] تعریف می‌شوند و متغیرهای ساختگی[4] که بسته به ماهیت نمایه، مقادیر صفر یا یک به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. به‌دلیل تفاوت نوع متغیرها، پیش از انجام محاسبات، کلیه داده‌های مربوط به ۸۷ خانوار استاندارد شدند و عدد استاندارد (نمره Z[5]) آن‌ها با تفریق مقدار عددی هر متغیر از میانگین و تقسیم آن بر انحراف معیار به‌دست می‌آید، البته روش‌های دیگری نیز برای استاندارد کردن این نوع داده‌ها وجود دارد، ولی عدد استاندارد شده Z رایج‌ترین روش در مطالعات تاب‌آوری و پایداری بوم‌نظام‌های زراعی است (Gan et al., 2017).

تجمیع نمایه‌های استاندارد شده و محاسبه شاخص تاب‌آوری: برای محاسبه شاخص تاب‌آوری، ابتدا مقادیر استاندارد شده نمایه‌های مربوط به هر یک از پنج جزء اصلی تجمیع شدند (معادله ۲):

$$AC_i = \sum_{k=1}^{n} w_k \cdot I_k \qquad \text{(۲) معادله}$$

که در آن، AC_i: مقدار تجمیع شده نمایه‌های جزء اصلی i ام، I_k: مقدار نمایه kام در آن جزء اصلی و w_k: وزن نمایه k ام است؛ و درنهایت، شاخص تاب‌آوری (R_{index}) که نوعی شاخص مرکب[6] محسوب می‌شود، با تجمیع مقادیر AC_i برای پنج جزء اصلی محاسبه شد (معادله ۳):

$$R_{index} = \sum_{i=1}^{5} w_i \cdot AC_i \qquad \text{(۳) معادله}$$

که در آن، w_i: وزن جزء اصلی i ام است.

تعیین وزن برای نمایه‌ها و اجزاء اصلی: معادله‌های ۱ و ۲ در واقع میانگین‌های موزون شده هستند و تعیین وزن مناسب برای هر نمایه و نیز وزن مربوط به هر جزء اصلی یکی از مهم‌ترین عوامل برای محاسبه انواع شاخص‌های اکولوژیکی از جمله شاخص تاب‌آوری است. ازاین‌رو، محققان روش‌های مختلفی را برای تعیین وزن عناصر در شاخص‌های مرکب ارائه کرده‌اند. یکی از رایج‌ترین و درعین‌حال دقیق‌ترین روش‌ها، تعیین وزن با اجرای روش آماری تحلیل فاکتورهاست[7] که در دستورالعمل RIMA II نیز توصیه شده است. تحلیل فاکتورها نوعی روش چند متغیره آماری مشابه تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) است، این روش ابتدا برای هر یک از پنج جزء اصلی اجرا شد تا وزن نمایه‌ها (w_k در معادله ۲) تعیین شود و در ادامه، امتیازهای تجمیع شده هر جزء (AC_i) مجدداً در معرض تجزیه فاکتورها قرار گرفت تا وزن هر جزء اصلی (w_i در معادله ۳) به‌دست آید، محاسبه وزن براساس نتایج تحلیل فاکتور با استفاده از معادله ۴ انجام شد (Gan et al., 2017):

$$w_i = r_j \cdot \left(\frac{L_{ij}^{2}}{E_j}\right) \qquad \text{(۴) معادله}$$

که در آن، r_j: نسبت واریانس توصیف شده توسط اولین فاکتور (مؤلفه) اصلی، L_{ij}: بار[8] i امین نمایه (یا iامین جزء اصلی) در فاکتور اصلی اول و E_j: مقدار ویژه[9] (مقدار واریانس توصیف شده) به‌وسیله اولین فاکتور اصلی می‌باشند.

برای درک بهتر، مقادیر عددی شاخص تاب‌آوری نرمال‌سازی شدند، در این مطالعه از روش توصیه شده در RIMA II استفاده شد (معادله ۵) تا بدین‌وسیله مقادیر در دامنه بین صفر (حداقل تاب‌آوری) و یک (حداکثر تاب‌آوری) قرار گیرند. با ضرب مقادیر نرمال شده در هر عدد ثابت (برای مثال ۵، ۱۰ یا ۱۰۰) می‌توان دامنه تغییرات شاخص را تنظیم نمود (Moreira et al., 2021).

$$X_n = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \qquad \text{(۵) معادله}$$

که در آن، X_n: مقدار نرمال شده شاخص، X_i: مقدار نرمال نشده، و min و max: حداقل و حداکثر مقدار شاخص هستند.

کلیه محاسبات آماری در اکسل و Minitab ver. 21.0 انجام شد و نمودارها نیز در محیط اکسل رسم شدند.

نتایج و بحث

گروه‌بندی جمعیت تحت بررسی

خانوارهای کشاورز تحت بررسی از نظر میزان درآمد و متغیرهای اصلی مرتبط با آن دامنه تغییرات وسیعی داشتند؛ بنابراین پیش از

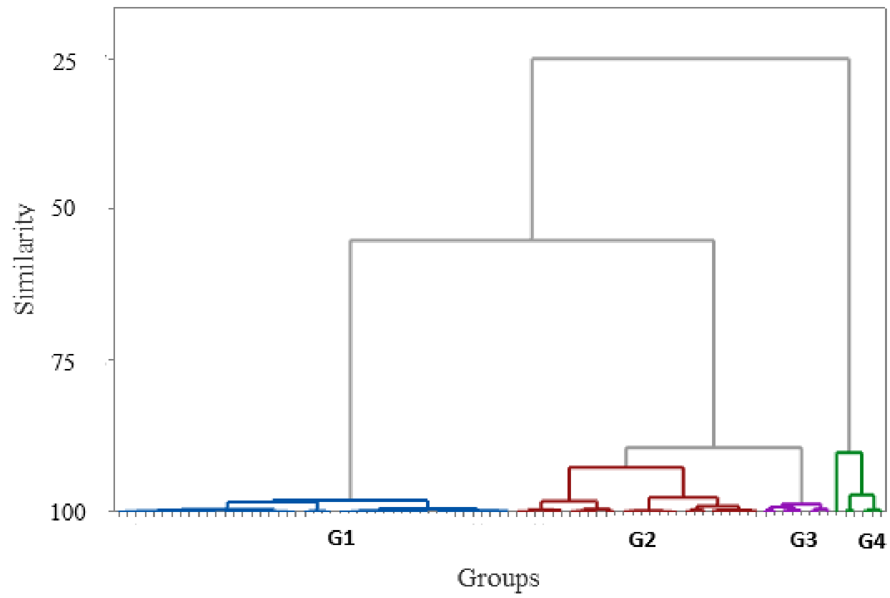
1- Continuous variables
2- Ordinal variables
3- Likert's 5-point scale
4- Dummy variables
5- Z score
6- Composite index
7- Factor analysis
8- Loading
9- Eigen value

محاسبه شاخص تاب‌آوری، ۸۷ خانوار منتخب در گروه‌هایی دسته‌بندی شدند که بیشترین میزان شباهت را در این زمینه داشتند. بدین منظور، ابتدا اطلاعات مربوط به سه متغیر تعیین‌کننده میزان درآمد (تعداد واحدهای دامی، سطح زیرکشت محصولات زراعی و سطح زیرکشت زعفران) استفاده شد تا داده‌ها بتوانند معنی‌دارترین و همگن‌ترین گروه‌های خانوار را شناسایی کنند. سپس، متغیرهای فوق براساس ضرایب همبستگی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که درآمد کشاورزان با دو متغیر یعنی سطح زیرکشت محصولات زراعی و تعداد واحدهای دامی هر خانوار همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت (جدول ۲). به‌علاوه اغلب مواردی وجود داشت که علی‌رغم پایین بودن سطح زیرکشت محصولات زراعی، درآمد کشاورزان قابل‌توجه بود و این درآمد از کشت سطوح کوچک زعفران حاصل می‌شد، بنابراین سطح زیرکشت زعفران نیز به‌عنوان یک متغیر در تعیین درآمد کشاورزان تعریف شد که همبستگی بالایی (r=0.52) با درآمد نشان داد (جدول ۲).

جدول ۲- ضرایب همبستگی پیرسون بین درآمد محصولات زراعی و دامی با سطح زیرکشت و تعداد واحد دامی هر خانوار (n=87)

Table 2- Pearson's correlation coefficients between crop and livestock income with cultivated area and the number of livestock units per household (n=87)

	درآمد (محصولات زراعی) Income (crops)	درآمد (دامداری) Income (animals)
واحد دامی Livestock units	-	0.629**
سطح زیرکشت زعفران Saffron cultivated area	0.525**	-
سطح زیرکشت محصولات زراعی Crop cultivated area	0.434**	-



شکل ۲- دندروگرام تجزیه کلاستر روی ۸۷ خانوار منتخب براساس سه متغیر تعیین‌کننده درآمد

Fig. 2- Dendrogram of cluster analysis on 87 selected households based on 3 income determining variables

آنالیز کلاستر به‌روش وارد[1] و خوشه‌بندی براساس ۷۵ درصد تشابه انجام شده است. تنها زراعت (G1)، مدیریت تلفیقی در سطح متوسط (G2)، تنها دام‌پروری (G3)، مدیریت تلفیقی در سطح بالا (G4)

Cluster analysis was done by Ward method and clustering based on 75% similarity. Agriculture only (G_1), medium level integrated management (G_2), animal husbandry only (G_3), high level integrated management (G_4)

1- Ward

گروه‌بندی خانوارهای کشاورز، روش رایجی برای ایجاد گروه‌های مشابه از نظر نوع معیشت محسوب می‌شود و در مطالعات زیادی جهت ارزیابی میزان تاب‌آوری اکولوژیکی و اقتصادی به‌کار برده شده است. بری و همکاران (Berry et al., 2022) برای ارزیابی آسیب‌پذیری اقتصادی و شاخص تاب‌آوری کشاورزی در انگلستان و ویلز، خانوارهای کشاورز را گروه‌بندی کردند. خوشه‌بندی خانوارها در مطالعات مربوط به ارزیابی تاب‌آوری، در هند (Paramesh et al., 2021) آفریقای جنوبی (Olalekan et al, 2023)، آمریکای مرکزی و حوزه کارائیب (Sibrian et al., 2021) و برخی مناطق دیگر جهان نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج آنالیز خوشه‌ای (شکل ۲) نشان داد که ۸۷ خانوار منتخب براساس سه متغیر (تعداد واحدهای دامی، سطح زیرکشت محصولات زراعی و نیز سطح زیرکشت زعفران) در چهار گروه (G_1-G_4) گروه‌بندی شدند. مشخصات این چهار گروه در جدول ۳ ارائه شده است. واحد دامی به‌منظور بیان انواع و سنین مختلف دام و مقایسه و تبدیل آن‌ها به یک واحد به‌کار می‌رود و معمولاً براساس وزن زنده و وزن متابولیکی دام غالب در هر منطقه تعیین می‌شود. در ایران، گوسفند دام غالب بوده و به‌عنوان یک واحد دامی و گاو به‌عنوان چهار واحد دامی در نظر گرفته می‌شود (Mansourikhah et al., 2022). با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، گروه اول (G_1) شامل خانوارهایی بود که تنها به کشت محصولات زراعی اشتغال داشتند و تعداد واحدهای دامی آن‌ها اندک بود (میانگین ۱۵ واحد دامی)، این گروه ۵۱/۷ درصد از کل خانوارهای تحت بررسی را شامل شدند. گروه دوم (G_2) که ۳۲/۲ درصد از خانوارها در آن قرار گرفتند، به‌صورت تلفیقی اداره می‌شد و سطح زیرکشت محصولات زراعی و تعداد واحدهای دامی هر دو، مقدار متوسطی داشتند. گروه سوم (G_3) با میانگین ۵۲۴ واحد دامی و ۵/۷ هکتار اراضی زراعی، خانوارهای بودند که تنها به دامداری اشتغال داشتند و ۶/۸ درصد کل خانوارها را در برگرفتند. گروه چهارم کشاورزان دامدار بودند (G_4) که ۹/۲ درصد از خانوارها را شامل شدند و مشابه G_3 به‌صورت تلفیقی اداره می‌شد، با این تفاوت که خانوارهای این گروه دارای اراضی بزرگ و تعداد زیادی واحد دامی بودند (جدول ۳). بر این اساس، ۸۷ خانوار مورد مطالعه در دو گروه با مدیریت تلفیقی (G_2 و G_4) و دو گروه با مدیریت تنها زراعت (G_1) یا تنها دامداری (G_2) قرار گرفتند.

جدول ۳- مشخصات گروه‌های چهارگانه براساس میانگین سطح زیرکشت محصولات زراعی، زعفران و تعداد واحدهای دامی

Table 3- Characteristics of the four household groups based on cultivated area of crops and saffron and number of livestock units

گروه‌های خانوار Groups	G_1	G_2	G_3	G_4
میانگین سطح زیرکشت محصولات زراعی Mean cropping area (ha)	24.1	3.40	5.7	7.12
میانگین تعداد واحد دامی Mean animal unit	15	247	524	366
میانگین سطح زیرکشت زعفران Mean saffron area (ha)	1.17	27.3	0.9	2.37
فراوانی Frequency (%)	51.7	32.2	6.9	9.2

توزیع فراوانی مؤلفه‌های تاب‌آوری بین گروه‌ها

در شکل ۳، توزیع فراوانی امتیاز نرمال شده هر یک از پنج مؤلفه تاب‌آوری برای چهار گروه خانوار نشان داده شده است. یافته‌های مطالعه حاکی از آن است که بیش از ۵۰ درصد خانوارهایی که معیشت آن‌ها تنها زراعت بود (G_1) در مؤلفه دارایی امتیاز ۰/۲۵ یا کمتر داشتند، در گروه G_2 یعنی خانوارهای با مدیریت تلفیقی زراعت و دامداری در سطح کوچک، توزیع امتیاز دارایی در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار داشت و ۵۰ درصد خانوارها امتیاز بیشتر از ۰/۵ کسب کردند. در گروه‌های G_3 (تنها دامداری) و G_4 (تلفیق زراعت و دامداری در سطح بزرگ)، امتیاز مؤلفه دارایی به‌مراتب بیشتر از دو گروه اول بود و ۵۰ درصد از خانوارهای این دو گروه به امتیاز بالاتر از ۰/۷ رسیدند.

در رابطه با مؤلفه ظرفیت سازگاری، بالاترین امتیاز در گروه G_2 و G_1 به‌دست آمد و ۵۰ درصد خانوارهای این گروه‌ها، امتیاز ۰/۶ یا بالاتر داشتند، گروه G_3 کمترین ظرفیت سازگاری را داشت و امتیاز این مؤلفه در ۵۰ درصد خانوارهای این گروه کمتر از ۰/۳ بود، در گروه G_4 امتیاز این مؤلفه بیشتر از گروه G_3 بود، البته ۷۵ درصد خانوارهای این گروه امتیازی کمتر از ۰/۵ داشتند (شکل ۳).

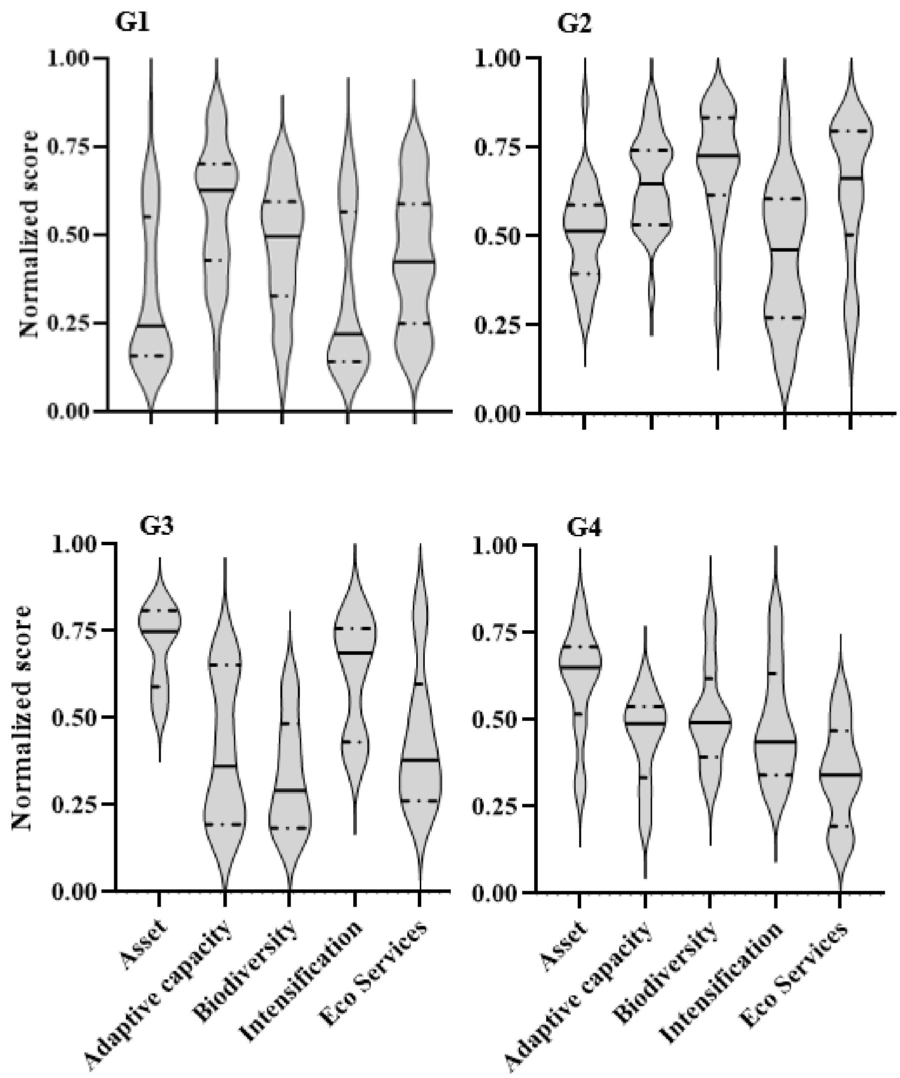
بالاترین امتیاز تنوع زیستی در گروه G_2 مشاهده شد و ۷۵ درصد خانوارهای این گروه به امتیاز بالاتر از ۰/۶ رسیدند (شکل ۳)، درحالی‌که امتیاز این مؤلفه در گروه G_3 در پایین‌ترین مقدار بود و ۷۵ درصد خانوارها، امتیازی کمتر از ۰/۵ داشتند. در گروه‌های G_1 و G_4، فراوانی امتیاز تنوع زیستی توزیع یکنواختی داشت و در هر دو گروه، ۵۰ درصد خانوارها به امتیاز بالاتر از ۰/۵ رسیدند.

فشره‌سازی در خانوارهای با معیشت مبتنی بر دامداری (G_3) بیشترین سطح و در معیشت مبتنی بر زراعت (G_1) کمترین سطح را داشت، به‌طوری‌که ۵۰ درصد از خانوارهای این دو گروه به‌ترتیب امتیاز بالاتر از ۰/۷ و کمتر از ۰/۲۵ داشتند. توزیع فراوانی امتیاز این مؤلفه در گروه‌های G_2 و G_4 تقریباً مشابه بود و ۷۵ درصد از خانوارهای این گروه‌ها امتیازی کمتر از ۰/۶ کسب کردند (شکل ۳).

توزیع فراوانی میزان بهره‌گیری از خدمات بوم‌نظامی بین چهار گروه خانوار متفاوت بود و بالاترین امتیاز این مؤلفه در گروه G_2 مشاهده شد، به‌طوری‌که ۷۵ درصد خانوارهای این گروه امتیازی بالاتر از ۰/۵ داشتند. در مقابل، گروه G_4 کمترین امتیاز را کسب کرد و امتیاز ۷۵ درصد از خانوارها در این گروه کمتر از ۰/۵ بود. توزیع فراوانی امتیاز این مؤلفه در گروه‌های G_1 و G_3 تقریباً مشابه بود و در هر دو گروه، ۵۰ درصد خانوارها امتیازی کمتر از ۰/۴ داشتند (شکل ۳).

مؤلفه‌هایی که در ارزیابی تاب‌آوری مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً ابعاد اقتصادی تاب‌آوری را پوشش می‌دهند، برای مثال در مطالعه تاب‌آوری اقتصادی نظام‌های کشاورزی ایران (Shakeri Bostanabad et al., 2012) از هست شاخص اقتصادی استفاده شد که هر یک توسط تعدادی نمایه توصیف می‌شدند. لیث و همکاران (Leis et al., 2022) در پژوهشی، تاب‌آوری کشاورزان میاندوآب را براساس شش مؤلفه اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه‌ای به‌منظور بررسی تاب‌آوری نوار غزه و کرانه باختری برای امنیت غذایی (Alinovi et al., 2008) از روش RIMA استفاده شد و تاب‌آوری براساس شش مؤلفه مورد سنجش قرار گرفت. تاب‌آوری اقتصادی کشاورزان در کشور لیتوانی نیز با سه مؤلفه که هر یک مشتمل بر تعدادی نمایه بودند، ارزیابی شد (Volkov et al., 2021). این شواهد نشان می‌دهد که محققان برای ارزیابی تاب‌آوری اقتصادی، مؤلفه‌های متفاوتی را مورد استفاده قرار می‌دهند که معمولاً براساس اهداف مطالعه انتخاب می‌شوند. البته باید توجه داشت که تاب‌آوری نوعی متغیر پنهان[1] است و به‌طور مستقیم قابل‌اندازه‌گیری نیست، لذا برای کمّی کردن آن باید از نمایه‌هایی استفاده کرد که در عمل قابل اندازه‌گیری باشند. در روش RIMA (FAO, 2016 a,b)، تاب‌آوری دارای پنج مؤلفه شامل دارایی، ظرفیت سازگاری، دسترسی به خدمات عمومی، شبکه امنیت اجتماعی و درآمد خانوارهای روستایی است که البته این مؤلفه‌ها خود متغیرهای پنهان هستند و باید توسط تعدادی نمایه سنجیده شوند. متغیرهای تاب‌آوری در RIMA همگی اقتصادی هستند، البته محققان (Alinovi et al., 2010; Zampieri et al., 2020) بیان داشتند که این روش انعطاف‌پذیر است و می‌توان مؤلفه‌ها و نمایه‌های توصیف‌کننده تاب‌آوری را بسته به اهداف پژوهش تغییر داد. برای مثال، در ارزیابی تاب‌آوری کشاورزان کشور نیکاراگوئه (Ciani & Romano, 2014) علاوه‌بر پنج مؤلفه RIMA، چهار مؤلفه دیگر نیز برای سنجش تاب‌آوری تعریف شد که همگی اقتصادی بودند. تاب‌آوری کشاورزان انگلستان و ولز نیز با روش RIMA با پنج متغیر متفاوت شامل ثبات مالی خانوارها، رونق اقتصادی، تنوع منابع درآمد، تنوع محصولات زراعی و ثبات مورد بررسی قرار گرفت (Berry et al., 2022). در مطالعه حاضر، تاب‌آوری با پنج مؤلفه سنجیده شد که دو مؤلفه آن (دارایی و ظرفیت سازگاری خانوارها) مشابه RIMA انتخاب شدند و سه مؤلفه دیگر (فشرده‌سازی، تنوع زیستی و بهره‌گیری از خدمات بوم‌نظام) با این هدف تعریف شدند که ابعاد اکولوژیکی نیز در شاخص نهایی تاب‌آوری گنجانده شود و توزیع فراوانی آن‌ها بین خانوارهای کشاورز بررسی گردید.

1- Hidden variable



شکل ۳- نمودار ویولنی توزیع فراوانی امتیاز مؤلفه‌های تاب‌آوری برای چهار گروه خانوار (G_1-G_4)

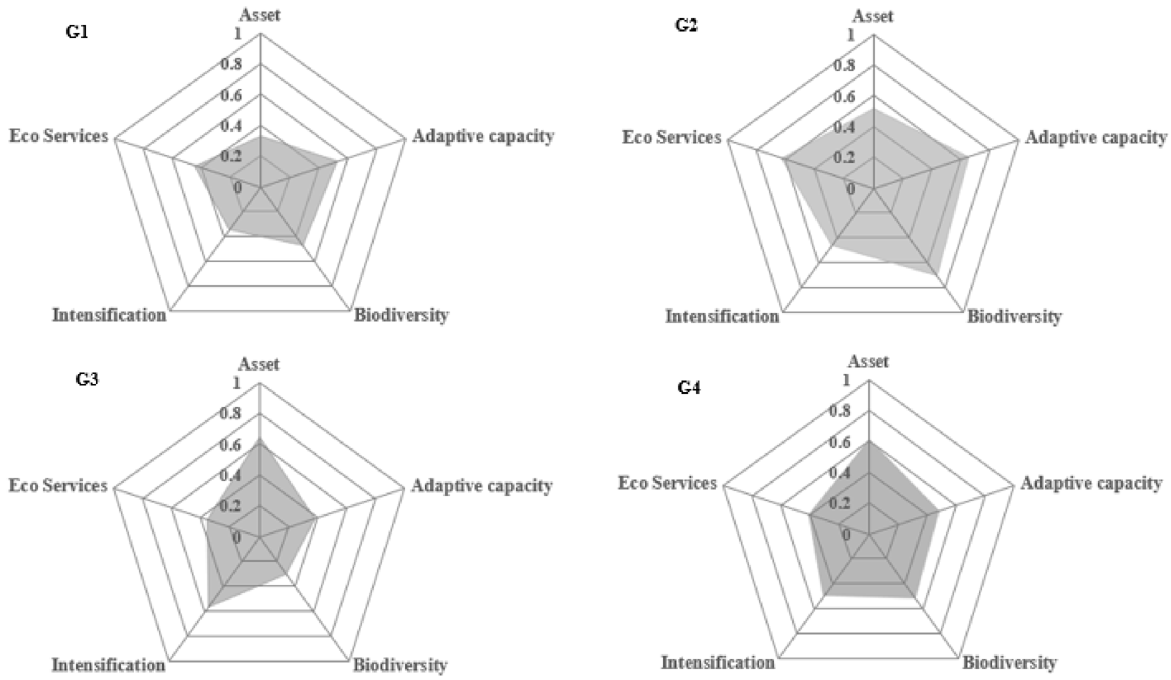
Fig. 3- Violin plot showing frequency distribution of normalized score of each resilience component for 4 household groups (G_1-G_4)

امتیاز هر مؤلفه در مقیاس صفر تا یک نرمال شده، متغیرهای استفاده شده برای محاسبه امتیاز هر مؤلفه در جدول ۱ آمده است. در نمودار ویولنی خط ممتد نشان‌دهنده میانه و خطوط مقطع چارک (۲۵ درصد) پایین و بالای توزیع را مشخص می‌کنند.

Scores are normalized in 0-1 scale, variables used in calculation of score for each component are presented in Table 1. In violin plot solid line shows median and broken lines show upper and lower quartiles.

در شکل ۴، میانگین امتیاز پنج مؤلفه تاب‌آوری برای هر گروه خانوار نشان داده شده است. براساس این نتایج، در بوم‌نظام‌های کشاورزی تلفیقی که معیشت خانوارها با تلفیق زراعت و دامداری (گروه‌های G_2 و G_4) تأمین می‌شد، امتیاز اغلب مؤلفه‌های تاب‌آوری بالاتر از بوم‌نظام‌های غیر تلفیقی یعنی تنها زراعت (G_1) یا تنها دامداری (G_3) بود. میانگین امتیاز دارایی در گروه‌های G_3 (دامداری‌های بزرگ) و G_4 (تلفیق زراعت و دامداری هر دو در سطح بزرگ) بالاتر از دو گروه دیگر بود، به‌علاوه این دو گروه سطح بالاتری از فشرده‌سازی را نیز به‌کار می‌برند که موجب امتیاز بالای این مؤلفه به‌ویژه در گروه G_3 شد. در مقابل، میانگین امتیاز تنوع زیستی، ظرفیت سازگاری و بهره‌گیری از خدمات بوم‌نظامی در گروه تلفیقی G_2 در بیشترین مقدار خود بود و گروه G_1 (تنها زراعت)

کمترین میانگین را در مؤلفه‌های دارایی و فشرده‌سازی داشت، درحالی‌که میانگین امتیاز این گروه از نظر ظرفیت سازگاری، تنوع زیستی و استفاده از خدمات بوم‌نظامی بالاتر از گروه G_3 (تنها دامداری) بود (شکل ۴).



شکل ٤- میانگین امتیاز پنج مؤلفه تاب‌آوری محاسبه‌شده برای چهار گروه خانوار (G_1-G_4)

Fig. 4- Mean score for 5 resilience components calculated for 4 household groups (G_1-G_4)

امتیاز هر مؤلفه در مقیاس صفر تا یک نرمال شده است.

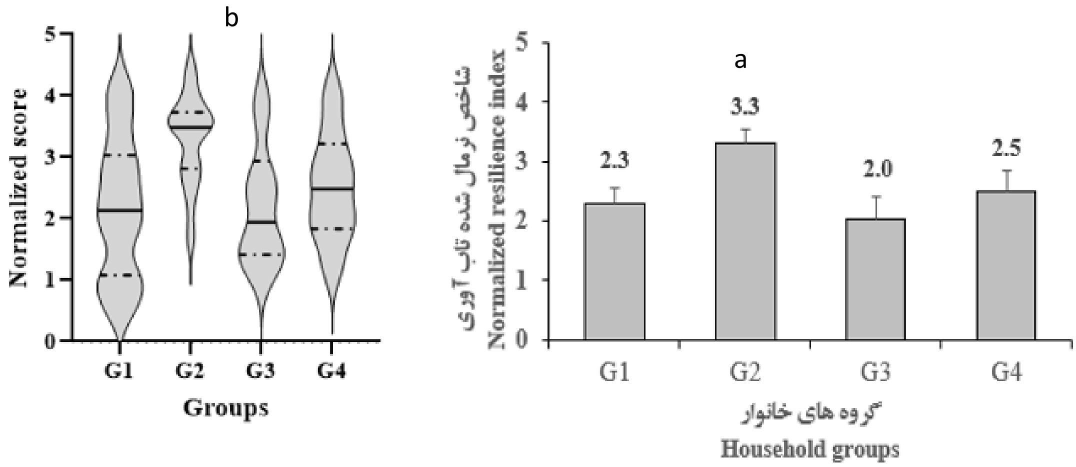
Scores are normalized in 0-1 scale.

شاخص تاب‌آوری و مقایسه آن بین گروه‌های خانوار

شاخص مرکب تاب‌آوری با تجمیع امتیاز پنج مؤلفه بعد از وزن‌دهی به آن‌ها در مقیاس یک تا پنج محاسبه شد. لازم به ذکر است که هنگام تجمیع امتیازها برای ساختن شاخص‌های مرکب، باید اطمینان یافت که مؤلفه‌ها از یکدیگر مستقل هستند و هم‌خطی[1] بین آن‌ها وجود ندارد (Berry et al., 2022;Gan et al., 2017). در تحقیق حاضر، ضرایب همبستگی بین پنج مؤلفه بی‌معنی و در محدوده ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ قرار داشت که مؤید عدم وجود هم‌خطی بین آن‌هاست. بالاترین میانگین شاخص تاب‌آوری (R_{index} = 3.3) برای گروه (G_2) به‌دست آمد (شکل ۵a) که در آن، معیشت خانوارها با تلفیق زراعت و دامداری در سطح کوچک تا متوسط مدیریت می‌شد. در شکل ۵b، توزیع فراوانی مقدار شاخص تاب‌آوری نیز به‌صورت نمودار ویولنی ارائه شده است که نشان می‌دهد در گروه G_2، امتیاز تاب‌آوری ۷۵ درصد از خانوارها بالاتر از ۲/۹ بود. در مقابل، خانوارهای گروه G_3 (تنها دامداری) کمترین میزان تاب‌آوری را داشتند (R_{index} = 2.3) و امتیاز تاب‌آوری ۷۵ درصد از خانوارهای این گروه کمتر از سه بود (شکل ۵b).

نتایج تاب‌آوری به تفکیک گروه‌ها (شکل ۵a) نشان داد که میانگین شاخص تاب‌آوری برای گروه G_1 (R_{index} = 2.3) بود و در نمودار ویولنی مربوطه، امتیاز تاب‌آوری ۷۵ درصد از خانوارهای این گروه کمتر از سه بود. گروه G^4 دارای میانگین شاخص تاب‌آوری (R_{index} = 2.5) بود و امتیاز تاب‌آوری ۷۵ درصد از خانوارهای این گروه که در آن معیشت خانوارها با تلفیق زراعت و دامداری در سطح بالا مدیریت می‌شد، کمتر از ۳/۳ بود.

1- Collinearity



شکل ۵– a) میانگین شاخص مرکب تاب‌آوری برای چهار گروه خانوار (G_1-G_4) که در مقیاس صفر تا پنج نرمال شده است، میله‌های عمودی انحراف معیار میانگین‌ها را نشان می‌دهد. b) نمودار ویولنی توزیع فراوانی شاخص مرکب تاب‌آوری برای چهار گروه خانوار، خط ممتد نشان‌دهنده میانه و خطوط مقطع چارک (۲۵ درصد پایین و بالای توزیع را مشخص می‌کنند

Fig. 5- a) Mean values of composite resilience index for 4 household groups (G_1-G_4) normalized in 0-5 scale, bars are standard error of means. b) Violin plot showing frequency distribution of composite resilience index for 4 household groups (G_1-G_4), the index is normalized in 0-5 scale, in violin plot solid line shows median and broken lines show upper and lower quartiles

یافته‌های پژوهش نشان داد که خانوارهایی که از مدیریت تلفیقی زراعت و دامداری بهره می‌بردند در مقایسه با خانوارهایی با مدیریت منفرد (تنها دامداری یا تنها زراعت) از تاب‌آوری بیشتری برخوردار بودند و این برتری، زمانی بارزتر شد که نظام تلفیقی در سطوح کوچک مورد استفاده قرار گرفت. به بیان دیگر، حتی در نظام‌های تلفیقی نیز بزرگ شدن مساحت اراضی یا زیاد شدن تعداد واحدهای دامی تحت مالکیت خانوارها، باعث کاهش تاب‌آوری خواهد شد.

تاب‌آوری بیشتر در بوم‌نظام‌های دارای انواعی از مدیریت تلفیقی به‌ویژه تلفیق زراعت و دامداری توسط محققان مختلف گزارش شده است. برای مثال، در مطالعه‌ای در کشور برزیل (Peterson et al., 2020)، تاب‌آوری نظام‌های تلفیقی دام و گیاه زراعی و نظام‌های با مدیریت منفرد در بازه زمانی ۲۰۶۰–۲۰۲۰ به‌وسیله مدل APSIM شبیه‌سازی شد، نتایج نشان داد که در ۹۵ درصد از سال‌های شبیه‌سازی شده، نظام‌های تلفیقی تاب‌آوری بیشتری داشتند. در مطالعه دیگری در هندوستان (Paramesh et al., 2022) گزارش شد که نظام‌های تلفیقی کشاورزی در مقایسه با نظام‌های غیر تلفیقی، ۲۵۶ درصد سودآوری و ۱۴۳ درصد اشتغال‌زایی بیشتری داشتند و به‌علاوه تاب‌آوری آن‌ها به تغییرات اقلیمی نیز به‌طور قابل‌توجهی بیشتر بود. شواهد پژوهشی حاکی از این است که بالابودن تاب‌آوری در نظام‌های تلفیقی عمدتاً از طریق تنوع زیستی بیشتر در این نظام‌ها حاصل می‌شود (Szymczak et al., 2020; Paramesh et al., 2022; López Rodríguez et al., 2024). یافته‌های این تحقیق نیز نشان داد که خانوارهای گروه G_2 که بالاترین امتیاز تنوع زیستی را بین چهار گروه داشتند (شکل ۴)، دارای بیشترین امتیاز تاب‌آوری بودند (شکل ۵). به نظر می‌رسد که تنوع زیستی از طریق بهبود ظرفیت سازگاری (Szymczak et al., Paramesh et al., 2022; 2020; Abdollahzadeh et al., 2023) و ارتقاء سطح خدمات بوم‌نظامی (Varyvoda et al., 2022;Oliver et al., 2015) باعث افزایش تاب‌آوری خانوارهای روستایی می‌شود. در مقابل، فشرده‌سازی بوم‌نظام‌های زراعی از طریق مصرف نهاده‌های خارجی به‌جای بهره‌گیری از خدمات بوم‌نظامی و کاهش ظرفیت سازگاری بوم‌نظام به‌دلیل وابستگی به نهاده‌های خارجی، تاب‌آوری بوم‌نظام‌ها را کاهش خواهد داد (Franzluebbers et al., 2023;Oliver et al., 2015). این وضعیت در خانوارهای گروه G_3 به‌وضوح مشهود بود (شکل ۴) و حتی در گروه تلفیقی G_4 نیز تا حدودی بروز کرد. به‌علاوه گزارش شده است که مزارع کوچک در مقایسه با اراضی زراعی بزرگ از تنوع

زیستی بیشتری برخوردار بوده و شدت فشرده‌سازی در آن‌ها کمتر است (Salek et al., 2018;Fahrig et al., 2015) و در نتیجه، انتظار می‌رود که تاب‌آوری خانوارهایی که مزارع کوچک‌تری دارند، بیشتر باشد، نظیر خانوارهای گروه G_2 در مقایسه با گروه G_4 (شکل‌های ۴ و ۵).

بررسی رابطه شاخص تاب‌آوری و مؤلفه‌های آن

باوجودی‌که بین مؤلفه‌های تاب‌آوری همبستگی معنی‌داری وجود نداشت، ولی بین این پنج مؤلفه و شاخص مرکب تاب‌آوری، رابطه رگرسیون معنی‌داری مشاهده شد (شکل ۶) بدین‌صورت که رابطه بین شاخص تاب‌آوری و دارایی خانوارها، ظرفیت سازگاری، تنوع زیستی و میزان بهره‌گیری از خدمات بوم‌نظام مثبت، ولی با شدت فشرده‌سازی منفی بود.

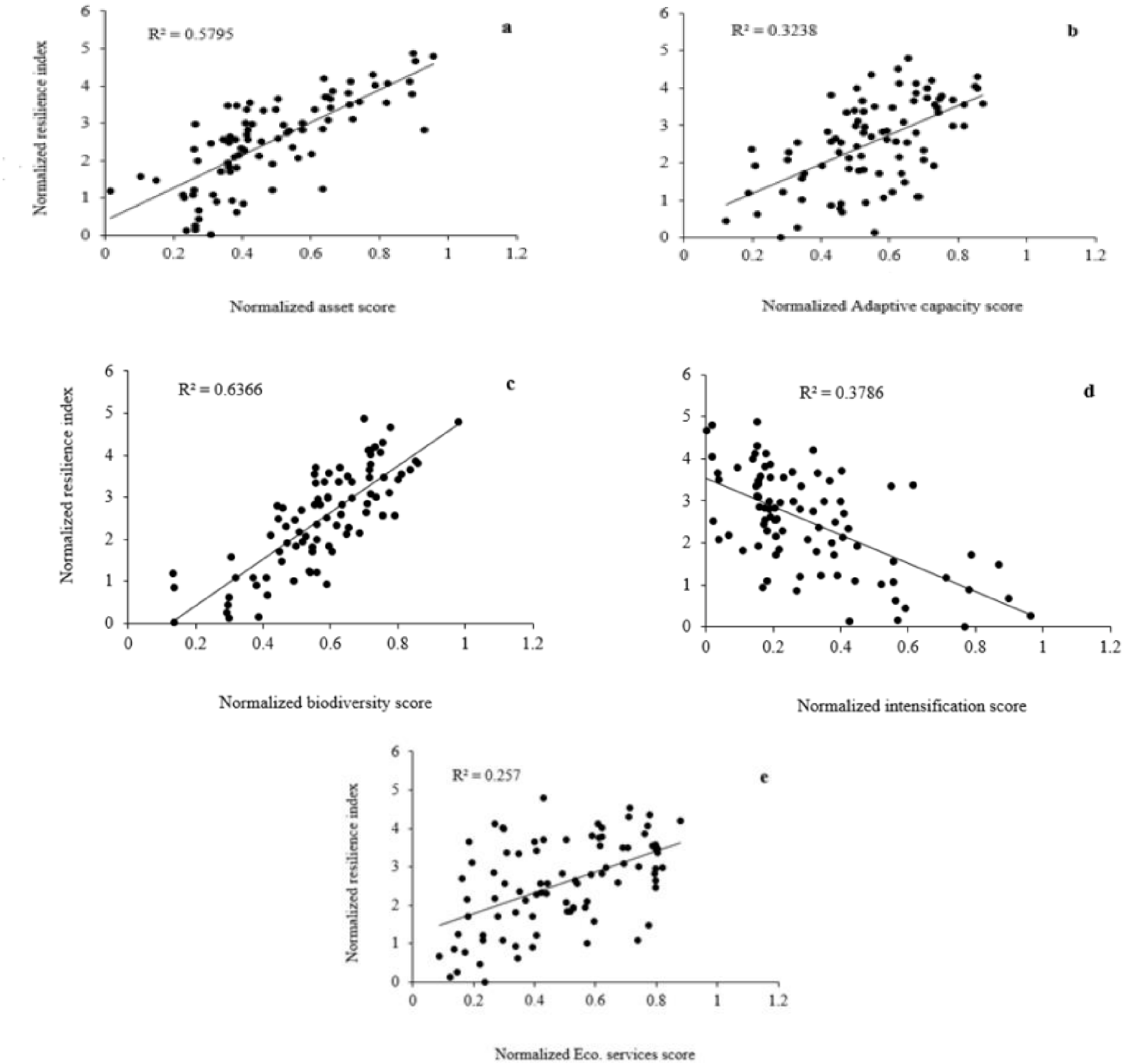
رابطه مثبت بین دارایی و تاب‌آوری (شکل ۶a) در همه مطالعاتی که تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی را بررسی کرده‌اند، گزارش شده است. برای مثال، در ارزیابی تاب‌آوری اقتصادی کشاورزان در نیجریه که با روش RIMA انجام شد (Gambo Boukary et al., 2016)، رابطه مثبت و معنی‌داری بین شاخص تاب‌آوری و مؤلفه‌های دارایی و شبکه امنیت اجتماعی به‌دست آمد. این محققان اظهار داشتند که برای تقویت تاب‌آوری خانوارها در برابر ناامنی غذایی، به افزایش کمک به خانوارها از طریق شبکه‌های امنیت اجتماعی و جمع‌آوری منابع بیشتر برای بالا بردن دارایی‌های آن‌ها نیاز است. نتایج مشابهی در مورد تأثیر مثبت دارایی بر تاب‌آوری خانوارها در کنیا (Alinovi et al., 2010)، نیکاراگوئه (Ciani et al., 2014)، هند (Paramesh et al., 2022) و بنگلادش (Szabo 2015,) نیز گزارش شده است. البته باید توجه داشت که تاب‌آوری با نوعی شاخص مرکب سنجیده می‌شود که دارایی، یکی از مؤلفه‌های آن است؛ برای مثال در تحقیق حاضر، خانوارهایی که تنها به دامداری مشغول بودند (G_3)، همچنین خانوارهایی با مدیریت تلفیقی در سطح بزرگ (G_4)، از میزان دارایی بیشتری نسبت به دو گروه دیگر یعنی تنها زراعت (G_1) و خانوارهایی با معیشت تلفیقی در سطح متوسط (G_2) برخوردار بودند، ولی این برتری الزاماً منجر به افزایش میزان تاب‌آوری در این گروه‌ها نخواهد شد، زیرا اثر مستقیم یا غیرمستقیم سایر مؤلفه‌ها می‌تواند شاخص تاب‌آوری را علی‌رغم بالا بودن دارایی خانوار کاهش دهد.

نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش ظرفیت سازگاری، میزان تاب‌آوری خانوارهای روستایی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۶b)، البته ضریب همبستگی بین این مؤلفه با تاب‌آوری، کمتر از دارایی خانوارها بود و تنها ۳۲ درصد از تغییرات شاخص تاب‌آوری را توصیف کرد. در مطالعات اخیر، تأثیر مثبت ظرفیت سازگاری بر میزان تاب‌آوری توسط محققان تأیید شده است (Renard & Tilman, 2019; Zhang et al., 2019; Kahiluoto et al., 2019) به‌طور کلی، به نظر می‌رسد که تاب‌آوری بوم‌نظام‌های زراعی را می‌توان با افزایش سطح سازگاری و مدیریت، یعنی با انتخاب گونه‌های مقاوم، مدیریت مناسب خاک، آب، مواد غذایی، آفات و بیماری‌ها افزایش داد.

(Macholdt et al., 2019; Olesen et al., 2011; Peltonen-Sainio et al., 2009; Zhang et al., 2015)

وجود رابطه معنی‌دار و مثبت بین تنوع زیستی و تاب‌آوری (شکل ۶c) دور از انتظار نیست، به‌علاوه تنوع زیستی در بین پنج مؤلفه، بالاترین همبستگی را با شاخص مرکب تاب‌آوری داشت، به بیان دیگر خانوارهایی که از تنوع زیستی (ساختاری و کارکردی) بالاتری برخوردار باشند، تاب‌آوری بیشتری در مقابل تغییرات اقلیمی و تنش‌های محیطی خواهند داشت (Brenda, 2011; Oliver et al., 2015). در همین ارتباط گزارش شده است که کاهش تاب‌آوری نظام‌های تولید گندم اروپا، بیش از هر عاملی به‌دلیل حذف تدریجی تنوع زیستی از این مزارع است (Kahiluoto et al., 2019). در مطالعه‌ای در کشور انگلستان که به‌روش RIMA انجام شد (Berry et al., 2022)، تنوع زیستی محصولات زراعی تأثیر مثبت و قابل توجهی بر تاب‌آوری خانوارهای کشاورز داشت.

یافته‌های این مطالعه نشان داد که میزان تنوع زیستی در خانوارهایی با معیشت مبتنی بر تلفیق زراعت و دامداری در سطح متوسط (G_2) به‌دلیل تأثیر کشاورزی تلفیقی در بالاترین مقدار نسبت به گروه‌های قرار داشت و کمترین میزان این مؤلفه مربوط به خانوارهای متکی به دامداری (G_3) بود، به عبارتی نظام‌های تلفیقی از تنوع زیستی بالاتری برخوردارند و همین امر منجر به افزایش میزان تاب‌آوری خانوارها می‌شود (Paramesh et al., 2022). نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های سایر محققان (Gil et al., 2017; Peterson et al, 2020; Franzluebbers et al., 2023) در مورد بالا بودن تاب‌آوری خانوارها در نظام‌های تلفیقی و به‌ویژه تلفیق زراعت و دامداری مطابقت دارد.



شکل ٦- رابطه بین شاخص مرکب نرمال شده تاب‌آوری با هر یک از مؤلفه‌های تاب‌آوری

Fig. 6- Relationship between normalized resilience index and components of resilience

مقادیر ضرایب همبستگی در مورد نمودارهای a تا e معنی‌دار است (p<0.05; n=87)

Correlation coefficients in panels a-e are significant (p<0.05; n=87).

در بین مؤلفه‌های مورد بررسی، فشرده‌سازی، تنها مؤلفه‌ای بود که رابطه معکوس و معنی‌داری با شاخص تاب‌آوری خانوارها داشت (شکل ۶d)، به‌طوری‌که در خانوارهایی که متکی به دامداری بودند (G_3)، به‌دلیل وابستگی زیاد به نهاده‌های دامی یا به عبارت دیگر، فشرده‌سازی بوم‌نظام، میزان تاب‌آوری به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. از طرفی، میزان این مؤلفه در خانوارهایی که تنها به زراعت مشغول بودند (G_1)، در کمترین مقدار خود نسبت به گروه‌های دیگر بود. همان‌طورکه گفته شد، خانوارهایی با معیشت متکی به کشاورزی تلفیقی (گروه G_2 و G_4) از طریق کاهش مصرف نهاده‌های خارجی و اتکا به نهاده‌های درون مزرعه، از فشرده‌سازی کمتری و در نتیجه، از

تاب‌آوری بالاتری برخوردارند و برعکس، در گروه G_3 به‌دلیل صرف هزینه‌های بیشتر برای تهیه نهاده‌های ورودی، میزان فشرده‌سازی بالاتر بود و در نتیجه، تاب‌آوری در این گروه کاهش یافت.

میزان بهره‌گیری خانوارها از خدمات بوم‌نظام با میزان تاب‌آوری آن‌ها رابطه‌ای مستقیم داشت (شکل ۶e)، به‌طوری‌که با افزایش ماده آلی خاک، تناوب با بقولات، کشاورزی حفاظتی، مدیریت تلفیقی آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز (یعنی نمایه‌هایی که برای کمّی‌کردن خدمات بوم‌نظامی مورد استفاده قرار گرفتند) تاب‌آوری خانوارها بهبود یافت. میزان این مؤلفه در کشاورزانی که دامداری را همراه با زراعت به‌صورت تلفیقی انجام می‌دهند، یعنی گروه دوم (G_2)، در بالاترین مقدار قرار داشت، بنابراین این گروه از کشاورزان در مواجهه با تغییرات محیطی و اقلیمی می‌توانند تصمیمات و راهکارهای مدیریتی صحیح و به‌موقع اتخاذ کرده و از این طریق تاب‌آوری را افزایش دهند، درحالی‌که کمترین میزان این مؤلفه مربوط به خانوارهایی بود که تنها متکی به زراعت بودند (G_1).

جیل و همکاران (Gil et al., 2017) با ارزیابی تاب‌آوری نظام‌های تلفیقی زراعت و دامداری در مقابل تغییرات اقلیمی با تأکید بر روابط هم‌افزایی بین عناصر گیاهی و دامی برای تقویت فرآیندهای حیاتی بوم‌نظام کشاورزی بیان کردند که سیستم‌های کشاورزی تلفیقی در برابر تغییرات شرایط محیطی و اقلیمی انعطاف‌پذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهند.

به‌طور کلی، با مقایسه تأثیر مؤلفه‌های مورد نظر بر میزان تغییرات تاب‌آوری مشاهده شد که به‌ترتیب مؤلفه‌های تنوع زیستی، دارایی، ظرفیت سازگاری و خدمات بوم‌نظام بیشترین تأثیر مثبت را در افزایش شاخص تاب‌آوری در خانوارهای کشاورز داشتند و مؤلفه فشرده‌سازی به‌تنهایی رابطه معکوسی با شاخص مذکور دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که دو گروه کشاورزان دامدار با نظام تلفیقی زراعت و دامداری به‌ترتیب در دو سطح متوسط و بزرگ (G_4 و G_2)، تاب‌آوری بالاتری نسبت به دو گروه دیگر که تنها به زراعت و یا دامداری مشغول بودند (G_1 و G_3)، داشتند و از بین این دو گروه (G_2 و G_4)، خانوارهایی با سطوح کوچک‌تر زراعت و تعداد دام متوسط به‌دلیل تنوع زیستی بالاتر و فشرده‌سازی کمتر دارای تاب‌آوری بالاتر بودند. این گروه از کشاورزان به‌دلیل وابستگی زیاد به یک یا تعداد اندکی محصول در برابر تغییرات اقلیمی و تنش‌های محیطی با خطر بیشتری مواجهه می‌باشند، بنابراین اگر در این گروه میزان تنوع زیستی افزایش یابد، از طریق بهره‌گیری از خدمات بوم‌نظام، افزایش ظرفیت سازگاری و کاهش فشرده‌سازی، تاب‌آوری افزایش خواهد یافت و این راهکار برای کمک به تصمیم‌گیری‌ها و تدوین راهبردهایی برای ترویج کشاورزی پایدار، بسیار مؤثر خواهد بود.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد بابت تأمین هزینه‌های این پژوهش قدردانی می‌شود.

References

1. Abdollahzadeh, G., Sharifzadeh, M.S., Sklenička, P., & Azadi, H. (2023). Adaptive capacity of farming systems to climate change in Iran: Application of composite index approach. *Agricultural Systems*, *204*, 103537. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103537
2. Aboubakr, G., Diaw, A., & Wünscher, T. (2016). Factors affecting rural households' resilience to food insecurity in Niger. *Sustainability, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, *8*(3), 1-10. https://doi.org/10.3390/su8030181
3. Alinovi, L., D'errico, M., Mane, E., & Romano, D. (2010). Livelihoods strategies and household resilience to food insecurity: An empirical analysis to Kenya. *European Report on Development*, *1*(1), 1-52.
4. Alinovi, L., Mane, E., & Romano, D. (2008). Towards the measurement of household resilience to food insecurity: Applying a model to Palestinian household data. In Deriving Food Security Information from National Household Budget Surveys. Experiences, Achievement, Challenges (pp. 137-152). Food and Agricultural Organization of the United Nations.

5. Allen, C.R., Angeler, D.G., Garmestani, A.S., Gunderson, L.H., & Holling, C.S. (2014). Panarchy: Theory and application. *Ecosystems*, *17*, 578-589. https://doi.org/10.1007/s10021-013-9744-2
6. Barrios, E., Gemmill-Herren, B., Bicksler, A., Siliprandi, E., Brathwaite, R., Moller, S., Batello C., & Tittonell, P. (2020). The 10 Elements of Agroecology: enabling transitions towards sustainable agriculture and food systems through visual narratives. *Ecosystems and People*, *16*(1), 230-247, https://doi.org/10.1080/26395916.2020.1808705
7. Béné, C., Bakker, D., Chavarro, M. J., Even, B., Melo, J., & Sonneveld, A. (2021). Global assessment of the impacts of COVID-19 on food security. *Global Food Security*, *31*, 100575. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100575
8. Brenda, B. L. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management. *BioScience*, *61*(3), 183-193. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4
9. Berry, R., Vigani, M., & Urquhart, J. (2022). Economic resilience of agriculture in England and Wales: A spatial analysis. *Journal of Maps*, *18*(1), 70-78. https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2072242
10. Bizikova, L., Waldick, R., & Larkin, P. (2017). Can we measure resilience? Reducing agriculture's vulnerability to climate change. International Institute for Sustainable Development, 8 pp.
11. Bousquet, F., Botta, A., Alinovi, L., Barreteau, O., Bossio, D., Brown, K., & Staver, C. (2016). Resilience and development: Mobilizing for transformation. *Ecology and Society*, *21*(3), 40. https://doi.org/10.5751/ES-08754-210340
12. Ciani, F., & Romano, D. (2014). Testing for Household Resilience to Food Insecurity: Evidence from Nicaragua. Third Congress from Italian Association of Agricultural and Applied Economics (AIEAA), June 25-27, Alghero, Italy. https://doi.org/10.22004/ag.econ.172958
13. Cochran, W.G. (1977) *Sampling Techniques*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, 330 p.
14. Dardonville, M., Bockstaller, C., Villerd, J., & Therond, O. (2022). Resilience of agricultura systems: Biodiversity-based systems are stable, while intensified ones are resistant and hig yielding. *Agricultural Systems*, *197*, 103365. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103365
15. Ehsani, M., & Shokoohi Z. (2022). Estimation of Iran's agricultural resilience index to climate change. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, *7*(1), 63-78.
16. Fahrig, L., Girard, J., Duro, D., Pasher, J., Smith, A., Javorek, S., King, D., Lindsay, K.F., Mitchell, S., & Tischendorf, L. (2015). Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity. *Agriculture Ecosystem and Environment 200*, 219–234. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.018
17. FAO, (2016a). RIMA 2: Resilience index measurement and analysis 2. Rome: Italy: United Nations Food and Agriculture Organization. URL: http://www.fao.org/3/ai5665e. Pdf
18. FAO, (2016b). Analyzing resilience for better targeting and action. Resilience Index Measurement and Analysis-II. Food and Agriculture Organization of the United Nations, p. 80.
19. Franzluebbers, A.J., & Hendrickson, J.R. (2023). Should we consider integrated crop-livestock systems for ecosystem services, carbon sequestration, and agricultural resilience to climate change? *Agronomy Journal*, *116*(2), 415-432.
20. Gambo Boukary, A., Diaw, A., & Wünscher, T. (2016). Factors affecting rural households' resilience to food insecurity in Niger. *Sustainability*, *8*(3), 181. https://doi.org/10.3390/su8030181
21. Gan, X., Fernandez, I.C., Guo, J., Wilson, M., Zhao, Y., Zhou, B., & Wu, J. (2017). When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators. *Ecological Indicators*, *81*, 491-502. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.068
22. Gil, J.D., Cohn, A.S., Duncan, J., Newton, P., & Vermeulen, S. (2017). The resilience of integrated agricultural systems to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *8*(4), e461.
23. Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *4*(1), 1-23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245
24. Kahiluoto, H., Kaseva, J., Balek, J., Olesen, J.E., Ruiz-Ramos, M., Gobin, A., & Trnka, M. (2019). Decline in climate resilience of European wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(1), 123-128. https://doi.org/10.1073/pnas.1804387115
25. Koocheki, A., Mahallati, M.N., Bannayan, M., & Yaghoubi, F. (2022). Simulating resilience of rainfed wheat–based cropping systems of Iran under future climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *27*(4), 27. https://doi.org/10.1007/s11027-022-09996-3

26. Leis, N., & Rostami, F., & Alibeygi, A.H. (2022). Strategies to improve farmers' resilience to drought from the perspective of experts: A study in Miandoab county. *Geography and Development*, *19*(65), 77-98. http://doi.org/10.22111/J10.22111.2021.6540
27. López Rodríguez, S., van Bussel, L.G.J., & Alkemade, R. (2024). Classification of agricultural land management systems for global modeling of biodiversity and ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *360*, 108795. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108795
28. Macholdt, J., Piepho, H.P., & Honermeier, B. (2019). Does fertilization impact production risk and yield stability across an entire crop rotation? Insights from a long-term experiment. *Field Crops Research*, *238*, 82-92. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.014
29. Mansourikhah, H., Chamani, M., Karimi, N., Asgari, Q., & Karimi, K. (2022). Determining the metabolizable energy and the daily requirement of forage dry matter under maintenance conditions for grazing sheep in the Siya Plus pasture (study: Lar National Park). *Animal Science Knowledge and Research*, *6*(1), 43-56. https://doi.org/10.22092/ASJ.2020.128835.2021
30. Marchese, D., Reynolds, E., Bates, M.E., Morgan, H., Clark, S.S., & Linkov, I. (2018). Resilience and sustainability: Similarities and differences in environmental management applications. *Science of the Total Environment*, *613*, 1275-1283. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.086
31. Moreira, L.L., de Brito, M.M., & Kobiyama, M. (2021). Effects of different normalization, aggregation, and classification methods on the construction of flood vulnerability indexes. *Water*, *13*(1), 98. https://doi.org/10.3390/w13010098
32. Nakhli, S.R., & Bastani, M. (2023) An Investigating and calculating the resilience of agricultural production with an emphasis on Iran's food security. *Journal of Defense Economics and Sustainable Development*, *29*, 73-101. https://doi.org/10.30495/JAE.2021.20982.2000
33. Olalekan, O.S., & Abbyssinia, M. (2023). Access to special support grants and relative impact of resilience pillars on households' resilience capacity in the Eastern Cape, South Africa: Application of FAO's Shiny RIMA tool. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*.
34. Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., & Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, *34*(2), 96-112. https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.003
35. Oliver, T.H., Heard, M.S., Isaac, N.J., Roy, D.B., Procter, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, C.L., Petchey, O.L., Proença, V., Raffaelli, D., Suttle, K.B., Mace, G.M., Martín-López, B., Woodcock, B.A., & Bullock, J.M. (2015). Biodiversity and resilience of ecosystem functions. *Trends in Ecology and Evolution*, *30*(11), 673-684. https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.009
36. Pannell, D.J., & Glenn, N.A. (2014). A framework for the economic evaluation and selection of sustainability indicators in agriculture. *Ecological Economics*, *33*(1), 135-149. https://doi.org/10.3390/su10124823
37. Paramesh, V., Ravisankar, N., Behera, U., Arunachalam, V., Kumar, P., Solomon Rajkumar, R., Dhar Misra, S., Mohan Kumar, R., Prusty, A. K., Jacob, D., & Panwar, A.S. (2022). Integrated farming system approaches to achieve food and nutritional security for enhancing profitability, employment, and climate resilience in India. *Food and Energy Security*, *11*, e321. https:// doi. org/ 10. 1002/ fes3. 321
38. Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., & Laurila, I.P. (2009). Cereal yield trends in northern European conditions: Changes in yield potential and its realisation. *Field Crops Research*, *110*(1), 85-90. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.007
39. Peterson, C.A., Bell, L.W., Carvalho, P.C.D.F., & Gaudin, A.C. (2020). Resilience of an integrated crop–livestock system to climate change: A simulation analysis of cover crop grazing in southern Brazil. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 604099. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.604099
40. Renard, D., & Tilman, D. (2019). National food production stabilized by crop diversity. *Nature*, *571*(7764), 257-260. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y
41. Salek, M., Hula, V., Kipson, M., Dankova, R., Niedobova, J., & Gamero, A. (2018). Bringing diversity back to agriculture: Smaller fields and non-crop elements enhance biodiversity in intensively managed arable farmlands. *Ecological Indicators*, *90*, 65–73. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.03.001
42. Shakeri Bostanabad, R., Mahdiar Esmaili, M.R., & Salehi Kamroudi, M.(2022). Economic Resilience of Iran's Agriculture Sector. *Journal of Agricultural Economics Research*, *13*(4), 41-59. SID. https://sid.ir/paper/999909/en

43. Sibrian, R., d'Errico, M., Palma de Fulladolsa, P., & Benedetti-Michelangeli, F. (2021). Household resilience to food and nutrition insecurity in Central America and the Caribbean. *Sustainability*, *13*(16), 9086. https://doi.org/10.3390/su13169086
44. Szabo, S., Hossain, M.S., Adger, W.N., Matthews, Z., Ahmed, S., Lázár, A.N., & Ahmad, S. (2016). Soil salinity, household wealth and food insecurity in tropical deltas: Evidence from south-west coast of Bangladesh. *Sustainability Science*, *11*, 411-421. https://doi.org/10.1007/s11625-015-0337-1
45. Szymczak, L.S., de Faccio Carvalho, P.C., Lurette, A., De Moraes, A., de Albuquerque Nunes, P.A., Martins, A.P., & Moulin, C.H. (2020). System diversification and grazing management as resilience-enhancing agricultural practices: The case of crop-livestock integration. *Agricultural Systems*, *184*, 102904. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102904
46. Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, *2*, 53. https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd
47. Tam, G. C. (Ed.). (2017). *Managerial strategies and green solutions for project sustainability*. IGI Global.
48. Varyvoda, Y., & Taren, D. (2022). Considering ecosystem services in food system resilience. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(6), 3652. https://doi.org/10.3390/ijerph19063652
49. Volkov, A., Žičkienė, A., Morkunas, M., Baležentis, T., Ribašauskienė, E., & Streimikiene, D. (2021). A multi-criteria approach for assessing the economic resilience of agriculture: The case of Lithuania. *Sustainability*, *13*(4), 2370. https://doi.org/10.3390/su13042370
50. Wu, R.M., Zhang, Z., Yan, W., Fan, J., Gou, J., Liu, B., & Wang, Y. (2022). A comparative analysis of the principal component analysis and entropy weight methods to establish the indexing measurement. *PloS One*, *17*(1), e0262261. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262261
51. Yang, L.N., Pan, Z.C., Zhu, W., Wu, E.J., He, D.C., Yuan, X., Qin, Y.Y., Wang, Y., Chen, R.S., Thrall, P.H., Burdon, J.J., Shang, L.P., Sui, Q.J., & Zhan, J. (2019). Enhanced agricultural sustainability through within-species diversification. *Nature Sustainability*, *2*(1), 46-52. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0201-2
52. Zampieri, M., Weissteiner, C.J., Grizzetti, B., Toreti, A., van den Berg, M., & Dentener, F. (2020). Estimating resilience of crop production systems: From theory to practice. *Science of the Total Environment*, *735*, 139378. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139378
53. Zandi, R, (2017). Climatic classification of Razavi-Khorasan province with de Martonne method using geographic information system. *New Research in Geographical Sciences, Architecture and Urban Planning*, *10*(1): 21-34.
54. Zhang, J., Ren, W., An, P., Pan, Z., Wang, L., Dong, Z., & Tian, H. (2015). Responses of crop water use efficiency to climate change and agronomic measures in the semiarid area of northern China. *PloS One*, *10*(9), e0137409. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137409

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 625-641

Estimation of Willingness to Pay for Life Cycle Eco-label Using Spike Model (A Case Study of Fresh Packaged Agricultural Products)

Samaneh Heydari [1], Leily Abolhasani [2*], Morteza Molaei [3] and Ali Firoz-Zare [2]

1 and 2- M.Sc. Student and Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
3- Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
(*- Corresponding author's Email: l.abolhasani@um.ac.ir)

Received: 14-01-2024 Revised: 24-03-2024 Accepted: 29-05-2024 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Heydari, S., Abolhasani, L., Molaei, M. & Firoz-Zare, A. (2025). Estimation of willingness to pay for life cycle eco-label using Spike model (A case study of fresh packaged agricultural products). *Journal of Agroecology, 16*(4), 625-641. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.86245.1187

Introduction

In recent years, attention has been attracted to the environmental pollution resulting from the production of products, and as a result, the interest of the communities to know more about the environmental protection and destruction factors has increased. Eco-labels are defined to respond to this need of society. Estimating the economic value of eco-labels of agricultural products that provide environmental information about products and their production process to consumers shows what share of the costs necessary to collect such information and data will be paid by consumers. In this way, the value of labels can be determined for consumers. In Iran, especially in Mashhad, where a significant part of fresh agricultural products is irrigated with urban and industrial wastewater and the use of chemical fertilizers and pesticides in the production of agricultural products is common, the implementation of the labelling scheme for fresh agricultural products due to its impact on the health of consumers and the environment is very important. A large number of consumers of the above products want to have information about the level of contamination of these products and use healthier products, and therefore they are willing to pay to provide this information.

Materials and Methods

In this research, the evaluation of eco-labels on freshly packaged agricultural products by measuring people's willingness to pay for these products in 11 regions of Mashhad is discussed. In the present study, the contingent valuation method and single-bound dichotomous questionnaires were used, and the bid amounts used in the questionnaire were designed using the Boyle and Bishop methods. The spike model has been used to measure the willingness to pay and check the factors affecting it.

Results and Discussion

The results from the questionnaires indicate that out of 150 participants, 27 stated they would not be willing to pay for eco-labels on freshly packaged agricultural products. Consequently, the bids, designed using Boyle

https://doi.org/10.22067/agry.2024.86245.1187

and Bishop's method, were applied to the remaining 123 participants. The suggested bid amounts were 10%, 20%, 30%, 50%, and 80%. The results from the spike model show that the variables of marital status, monthly family income, the market where the product was purchased, the importance of the product's appearance, the individual's attitude towards the environmental impact of traditional agriculture, prior knowledge of eco-labels, and the bid amount all have a significant and positive effect. The variables of age and the importance of the shape of product packaging have significant and negative effects on willingness to pay. The studied population is willing to pay about 71% more for freshly packaged agricultural products with an eco-label than the sample price without a label. The significant percentage of willingness to pay calculated in this research is due to the fact that the percentage results depend on the price of goods, and for goods and services that have a lower price (such as fresh agricultural products considered in this research), the percentage of willingness to pay will be higher. It should also be noted that the statistical population of the present study is the 11th district of Mashhad, whose residents have a relatively high income level (the opinion of municipal experts). The estimated willingness to pay also indicates the importance of eco-labels for freshly packaged agricultural products.

Conclusion

The studied population is willing to pay about 71% more for freshly packaged agricultural products with an eco-label than the sample price without a label. The significant percentage of willingness to pay for eco-labels indicates the importance of these labels for freshly packaged agricultural products from the consumers' point of view.

Keywords: Bid design, Boyle and Bishop Method, Contingent valuation, Dichotomous response method, Eco-label design

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ٦٤١-٦٢٥

تخمین تمایل به پرداخت برچسب محیط زیستی چرخه زندگی با استفاده از مدل اسپایک (مطالعه موردی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده)

سمانه حیدری[1]، لیلی ابوالحسنی[2*]، مرتضی مولائی[3] و علی فیروز زارع[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴
تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۰۱/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

چکیده

در سال‌های اخیر، علاقه‌مندی جوامع به دانستن بیش‌تر در مورد عوامل حفاظت و تخریب محیط زیست افزایش یافته است، برچسب‌های محیط زیستی برای پاسخ به این نیاز جامعه تعریف شده‌اند. برآورد ارزش اقتصادی برچسب‌های محیط زیستی محصولات کشاورزی که اطلاعات محیط زیستی مربوط به محصولات و فرآیند تولید آن‌ها را به مصرف‌کنندگان ارائه می‌دهند، نشان می‌دهد که مصرف‌کنندگان چه سهمی از هزینه‌های لازم برای جمع‌آوری چنین اطلاعات و داده‌هایی را خواهند پرداخت. در این پژوهش، به ارزش‌گذاری برچسب‌های محیط زیستی چرخه زندگی موجود روی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده پرداخته شده است. لازم به ذکر است که برچسب محیط زیستی ارائه شده، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از یک پرسش‌نامه باز طراحی شده است. جهت جمع‌آوری اطلاعات تمایل‌به‌پرداخت، از روش ارزش‌گذاری مشروط و پرسش‌نامه‌های دوگانه یک‌بعدی استفاده شده و مبالغ پیشنهادی مورد استفاده در پرسش‌نامه با استفاده از روش بویل‌وبیشاپ به‌دست آمد. برای تخمین تمایل به پرداخت و بررسی عوامل مؤثر بر آن نیز مدل اسپایک که پاسخ‌های صفر در پرسش‌نامه ارزش‌گذاری مشروط را نیز در برآورد نهایی وارد می‌کند، به‌کار برده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که متغیرهای وضعیت تأهل، درآمد ماهیانه خانواده، بازار محل خرید، اهمیت شکل ظاهری محصول، نگرش فرد به آسیب‌های محیط زیستی کشاورزی سنتی، شناخت برچسب‌های محیط زیستی از قبل و مقدار پیشنهادی، تأثیر معنادار و مثبت و متغیرهای سن و اهمیت شکل بسته‌بندی محصول تأثیر معنادار و منفی بر میزان تمایل به پرداخت داشته و جمعیت مورد مطالعه حاضرند برای محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی‌شده دارای برچسب محیط زیستی نسبت به قیمت نمونه بدون برچسب حدود ۷۱ درصد بیش‌تر پرداخت کنند.

واژه‌های کلیدی: ارزش‌گذاری مشروط، روش بویل و بیشاپ، روش دوگانه، طراحی برچسب محیط زیستی، طراحی مقدار پیشنهادی

مقدمه

افزایش نگرانی‌های مرتبط با مشکلات و مسائل محیط زیستی (به‌طور خاص، آلودگی‌های محیط زیستی حاصل از تولید محصولات) موجب افزایش علاقه‌مندی جوامع به دانستن بیش‌تر در مورد عوامل حفاظت و تخریب محیط زیست شده است. برچسب‌های محیط زیستی برای پاسخ به این نیاز جامعه تعریف شده‌اند (Grebitus et al., 2016).

برچسب‌های محیط زیستی به‌عنوان یک کانال ارتباطی مهم بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، وظیفه انتقال اطلاعات پنهان در رابطه با میزان استفاده از کارکردهای محیط زیستی در حین تولید محصول را دارند و می‌توانند به مصرف‌کنندگان در مورد محیط زیستی بودن یک محصول اطمینان دهند و از این طریق، به ترویج و گسترش محصولات سازگار با محیط زیست کمک می‌کنند (Song et

---

۱و ۲- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۳- دانشیار، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: l.abolhasani@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/agry.2024.86245.1187

al., 2019). استانداردهای ایزو ۱۴۰۲۰ که استانداردی بین‌المللی در جهت اصول راهبردی توسعه و استفاده از برچسب‌ها و اعلامیه‌های محیط زیستی می‌باشد، سه دسته برچسب محیط زیستی را معرفی کرده است. برچسب‌های فوق براساس نوع و اینکه چه شخص یا نهادی برچسب را تأیید کرده است، به سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارت‌اند از:

نوع اول- برچسب‌های استاندارد تولید: این نوع برچسب‌ها تطابق کامل ویژگی‌های محصول تولید شده با دستورالعمل‌ها و قواعد محیط زیستیِ از پیش تعیین شده در رابطه با فرآیند تولید را نشان می‌دهند. تأیید این تطابق توسط شخص ثالث (نهادی به‌غیر از تولیدکننده) صورت می‌گیرد.

نوع دوم- برچسب‌های نشان‌دهنده قابلیت بازیافت: برچسب‌هایی هستند که نشان‌دهنده قابلیت بازیافت یا عدم بازیافت محصول تولید شده هستند. تصمیم‌گیری و تأیید در مورد قابل بازیافت بودن محصول توسط خود تولیدکننده و طبق دستورالعمل‌ها و قواعد از پیش تعیین شده انجام می‌گیرد.

نوع سوم- برچسب‌های چرخه زندگی (LCA)[1]: این برچسب‌ها به‌عنوان قالبی برای گزارش داده‌های قابل اندازه‌گیریِ چرخه زندگی[2] شناخته می‌شوند. برچسب‌های چرخه زندگی نشان می‌دهند که محصول مورد نظر طی فرآیند تولید چگونه و چه‌قدر از محیط زیست استفاده کرده است. تأیید این نوع از برچسب‌ها نیز توسط شخص ثالث انجام می‌شود. این نوع از برچسب‌ها (نوع سوم) براساس نهاد تأییدکننده به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- **کسب‌وکار به کسب‌وکار[3]:** برای محصولاتی که یک بنگاه تولیدکننده به بنگاه تولیدکننده دیگر می‌فروشد و

۲- **کسب‌وکار به مصرف‌کننده[4]:** برای محصولاتی که از بنگاه تولیدی به‌طور مستقیم به‌دست مصرف‌کننده می‌رسد.

برآورد تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان برای برچسب محیط زیستی (محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده)، جهت بررسی وجود تقاضا برای چنین برچسب‌هایی بسیار مهم است. تمایل به پرداخت برآورد شده، نشان‌دهنده مبلغی است که مصرف‌کنندگان حاضرند برای ارائه چنین برچسب‌هایی پرداخت کنند. ازآن‌جاکه

1- Life cycle assessment
2- Quantifiable life cycle data
3- Business-to-business
4- Business-to-consumer

محاسبه مبلغ پرداختی توسط مصرف‌کنندگان، به‌علت نقش آن در تعیین قیمت محصول، دنبال کردن اهداف بازاریابی و تحلیل اثربخشی سیاست برچسب‌گذاری محیط زیستی ضروری است، تعیین تمایل به پرداخت بالقوه برای محصولات کشاورزی تازه همواره مورد توجه سیاست‌گذاران می‌باشد (Salladarre et al., 2016).

در تولیدات و محصولات کشاورزی، برچسب‌های محیط زیستی که می‌توانند نشان‌دهنده کشاورزی دوست‌دار محیط زیست باشند، جایگاه ویژه‌ای دارند. این برچسب‌ها در سطح بین‌المللی که مربوط به تولید و تجارت محصولات کشاورزی می‌باشد نیز توسعه یافته‌اند. در واقع، از زمان انتشار اهداف توسعه پایدار توسط سازمان ملل متحد، توجه تصمیم‌گیران بخش کشاورزی به پایداری اکوسیستم و برچسب‌های مرتبط با آن بیش‌تر از قبل شده است. در ایران و به‌خصوص شهر مشهد که بخش قابل توجهی از محصولات کشاورزی تازه با پساب فاضلاب‌های شهری و صنعتی آبیاری می‌شوند و استفاده از کودها و سموم شیمیایی در تولید محصولات کشاورزی متداول است (Mazhari & Haghigi, 2016; Selgi et al., 2020)، اجرای طرح برچسب‌گذاری محصولات کشاورزی تازه به‌دلیل تأثیر آن بر سلامت مصرف‌کنندگان و محیط زیست، اهمیت بالایی دارد. تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان محصولات فوق، خواستار داشتن اطلاعات در زمینه سطح آلودگی این محصولات و استفاده از محصولات سالم‌تر می‌باشند و بنابراین، حاضرند جهت ارائه این اطلاعات، هزینه بپردازند (Haqjo et al., 2011). برآورد ارزش اقتصادی برچسب‌های محیط زیستی برای محصولات کشاورزی نشان می‌دهد که مصرف‌کنندگان چه سهمی از هزینه‌های لازم برای جمع‌آوری چنین اطلاعات و داده‌هایی را خواهند پرداخت و از این طریق، می‌توان محصولاتی که این برچسب‌ها را دارا هستند، قیمت‌گذاری کرد. قیمت‌گذاری صحیح این محصولات (با انجام تحقیقات و اقدامات لازم) از جهت حفظ حقوق مصرف‌کننده و تولیدکننده به‌طور همزمان و تشویق آن‌ها برای همکاری در ترویج برچسب‌های محیط زیستی اهمیت دارد.

در بررسی پژوهش‌های انجام شده در ایران، مطالعات اندکی برای تخمین تمایل به پرداخت برچسب‌های محیط زیستی یافت شد. در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ای با عنوان "تحلیل ترجیحات مصرف‌کنندگان برای استفاده از سبزی‌های تازه دارای برچسب محیط زیستی" که با هدف برآورد تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان برای

هر یک از اطلاعات فراهم شده در برچسب کشاورزی حفاظتی و تعیین عوامل مؤثر بر تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان انجام شده بود، اشاره کرد (Taghizadeh et al., 2023). نتایج این مطالعه که به‌منظور تحلیل ترجیحات مصرف‌کنندگان برای تولیدات کشاورزی حفاظتی در شهر مشهد، از روش آزمون انتخاب و برای برآورد پارامترهای آن از الگوهای لاجیت شرطی و لاجیت با پارامترهای تصادفی استفاده کردند، نشان داد که تمایل به پرداخت نهایی برای ویژگی‌های دقت روش اندازه‌گیری و سازمان صادرکننده برچسب به‌ترتیب ۱۷/۰۴ و ۵ تومان است. متغیرهای جنسیت، حضور کودک در خانواده و حضور افراد با بیماری خاص در خانواده، اثر مثبت و معنی‌دار و متغیر سن اثر منفی و معنی‌داری بر میزان تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان داشته است. نتایج مطالعه همچنین نشان داد که میزان تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان برای کسب اطلاعات مربوط به نحوه کشت و آسیب به محیط زیست بسیار پایین است. در مطالعه دیگری با هدف بررسی مهم‌ترین مؤلفه‌های اثرگذار بر ترجیح مصرف گوشت مرغ دارای برچسب‌های پایداری، الگوی لاجیت ترتیبی تعمیم یافته مورد استفاده قرار گرفته و نتیجه‌گیری شد که متغیرهای جنسیت، دفعات خرید گوشت مرغ در ماه و قیمت منطقی نسبت به کیفیت، احتمال ترجیح مصرف گوشت مرغ با برچسب سبز و سالم را نسبت به گوشت مرغ با برچسب ارگانیک افزایش می‌دهند (Aghasafari & Karbasi, 2021).

در مطالعات خارجی، موارد زیادی مرتبط با تخمین تمایل به پرداخت برچسب‌های محیط زیستی برای محصولات و خدمات مختلف (کشاورزی و غیرکشاورزی) موجود است. در ارتباط با تمایل به پرداخت برچسب‌های محیط زیستی برای محصولات کشاورزی تازه (که در پژوهش حاضر، این‌گونه محصولات در نظر گرفته شده)، نیز مطالعات زیادی وجود دارد (Witkin et al., 2015; De-Magistris & Gracia, 2016; McFadden & Huffman, 2017; My et al., 2018; Rihn et al., 2019; Argemí-Armengol et al., 2019; Hori et al., 2020; Yang et al., 2020; Riccioli et al., 2020; Yin et al., 2020; García-Gudiño et al., 2021). به‌طور کلی، نتایج مطالعات یافت شده در این زمینه نشان داد: ۱- برخلاف مطالعات گذشته که تنها به برآورد تمایل به پرداخت برای برچسب‌های محیط زیستی پرداخته شده، در مطالعات سال‌های اخیر، قالب و ظاهر برچسب‌ها، میزان و چگونگی اطلاعات روی برچسب و به‌طور کلی، چگونگی طراحی برچسب‌های محیط زیستی که تأثیر قابل توجهی بر مقدار تمایل به پرداخت برآورد شده دارند نیز مورد توجه قرار گرفته است. ۲- در مطالعات اخیر نسبت به مطالعات گذشته توجه بیش‌تری به میزان اطلاعات مصرف‌کننده در مورد تولید پایدار محصول مورد نظر و برچسب‌های محیط زیستی شده است؛ داشتن دانش قبلی مصرف‌کننده در این مورد، دادن اطلاعات به پاسخ‌دهندگان پیش از پرسیدن تمایل به پرداخت آن‌ها و یا استفاده از برچسب‌هایی که حاوی اطلاعات کاملی هستند، تأثیر قابل توجهی بر مقدار تمایل به پرداخت برآورد شده خواهد داشت. ۳- پرداختن به مسائل جدیدی همچون رفاه حیوانات در مطالعات اخیر نسبت به مطالعات پیش‌تر به چشم می‌خورد. ۴- اگرچه اغلب مطالعات مرتبط با برچسب محیط زیستی در کشورهای توسعه یافته و بسیار پیشرفته انجام شده است، امّا در سال‌های اخیر انجام چنین مطالعاتی در کشورهای در حال توسعه نیز دیده می‌شود. ۵- در تمامی مطالعات بررسی شده، تمایل به پرداخت مثبت برای محصولات دارای برچسب محیط زیستی برآورد شده است (در بعضی مطالعات به‌صورت درصدی و در برخی به‌شکل واحد پولی کشور مورد مطالعه). ۶- در اغلب مطالعات، متغیر درآمد یک متغیر معنادار و دارای اثر مثبت بر مقدار تمایل به پرداخت برآورد شده بوده و متغیر تحصیلات اثر معناداری در پژوهش‌های بررسی شده نداشت. جنسیت و سن نیز در بیش‌تر پژوهش‌ها به‌عنوان دو متغیر معنادار شناخته شدند.

در مطالعه حاضر به ارزش‌گذاری برچسب‌های محیط زیستی موجود روی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده با اندازه‌گیری میزان تمایل به پرداخت افراد برای این محصولات با استفاده از روش ارزش‌گذاری مشروط و پرسش‌نامه‌های دوگانه یک‌بعدی پرداخته شده و بررسی تمایل به پرداخت و عوامل مؤثر بر آن نیز با استفاده از مدل رگرسیونی اسپایک بررسی می‌شود. از مزیت‌های این مطالعه نسبت به سایر مطالعات انجام شده در این زمینه، می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱- در این مطالعه تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان برای اطلاعات برچسب‌ها و کیفیت این اطلاعات که اصلی‌ترین هدف اجرای طرح برچسب‌گذاری می‌باشد، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. ۲- برخلاف برچسب‌های استاندارد تولید و نشان‌دهنده قابلیت بازیافت که مطالعات نسبتاً مناسبی روی آن‌ها صورت گرفته است، این مطالعه به بررسی ترجیحات مصرف‌کنندگان برای برچسب‌های چرخه زندگی می‌پردازد. بررسی پسشینه نشان می‌دهد که مطالعات بسیار

کمی در رابطه با این برچسب‌ها صورت گرفته است. ۳- برچسب ارائه شده در این مطالعه، با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از یک پرسش‌نامه باز، به‌دقت طراحی شده و از برچسب‌های موجود استفاده نشده است. ۴- مبالغ پیشنهادی در پرسش‌نامه ارزش‌گذاری مشروط با استفاده از روش بویل و بیشاپ طراحی شده که نتایج دقیق‌تری از تمایل به پرداخت را نسبت به روش‌های رایج مانند استفاده از میانه داده‌های پیش آزمون به‌دست می‌دهد. ۵- جهت تحلیل رگرسیون و برآورد تمایل به پرداخت از مدل اسپایک استفاده شده که پاسخ‌های صفر در پرسش‌نامه ارزش‌گذاری مشروط را در برآورد نهایی وارد کرده و از این طریق از خطای نتایج بدست آمده می‌کاهد. ۵- مقدار تمایل به پرداخت به‌صورت درصدی از قیمت محصول بدون برچسب محیط زیستی در نظر گرفته شده و نتایج آن پس از تغییرات قیمت محصول نیز کارآیی خود را دارد.

مواد و روش‌ها

طراحی برچسب محیط زیستی

پیش از طراحی ویژگی‌های موجود در برچسب محیط زیستی مورد استفاده در این پژوهش، سؤالاتی در ارتباط با ویژگی‌هایی که از نظر مصرف‌کنندگان دارای اهمیت است، به‌وسیله یک پرسش‌نامه باز، پرسیده شد و برچسب محیط زیستی مذکور با توجه به نتایج استخراج شده از این پرسش‌نامه طراحی شد.

برچسب مورد نظر در مطالعه حاضر، در شکل ۱ نشان داده شده است. این برچسب، برچسبی از نوع سوم (برچسب‌های چرخه زندگی)، دسته کسب‌وکار به مصرف‌کننده (که پیش‌تر توضیح داده شد) می‌باشد.

Global warming (increasing temperature)
✓✓✓
High (more than 30% of the standard level)

Water pollution
✓✓
Middle (standard)

Air pollution
✓
Low (less than 30% of standard level)

Type of organization issuing the label:

Governmental | Local
International | Private

Accuracy of the measurement method:

Very much | Much | Middle | Low | Very little

شکل ۱- برچسب محیط زیستی مورد استفاده در این مطالعه

Fig 1- Eco-label used in this study

برچسب فوق نشان می‌دهد که طی فرآیند تولیدِ محصول مورد نظر، به چه میزان از منابع محیط زیستی استفاده شده و یا چه آسیب‌هایی به محیط زیست وارد شده است. به‌عنوان مثال، این برچسب نشان می‌دهد که تولید این محصول تا چه میزان دمای هوا را به‌دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌دهد یا اینکه تولید این محصول به چه میزان آلودگی آب‌ها را در پی داشته است. در این برچسب همچنین میزان آسیب وارد شده با سه درجه کم، متوسط و زیاد مشخص شده است و نوع سازمان صادرکننده برچسب نیز عنوان شده است (به‌عنوان مثال، مشخص می‌شود که سازمان صادرکننده برچسب، یک سازمان دولتی بوده یا خصوصی یا محلی و یا بین‌المللی). مطالعه حاضر به برآورد تمایل به پرداخت برچسب محیط زیستی مذکور برای محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده می‌پردازد. در قسمت آخر برچسب نیز دقت روش اندازه‌گیری آسیب‌های واردشده به محیط زیست با پنج درجه از خیلی کم تا خیلی زیاد مشخص می‌شود.

لازم به ذکر است، ازآن‌جاکه هدف اصلی این مطالعه تخمین تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان برای آگاهی پیدا کردن از فرآیند تولید محصول از جنبه آسیب محیط زیستی آن می‌باشد، برچسب‌ها

بدون رنگ و یا شکل خاص طراحی شده تا تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان برای این اطلاعات بدون تأثیر رنگ و یا طراحی برآورد شود.

منطقه مورد مطالعه

به‌دلیل محدودیت‌های مالی و زمانی، این مطالعه تنها در منطقه ۱۱ مشهد صورت گرفته است که البته امکان عمومیت دادن نتایج این مطالعه را برای مقیاس‌های وسیع‌تر مانند شهر مشهد محدود می‌کند. مساحت منطقه ۱۱ شهر مشهد (با دو ناحیه و نه محله)، ۱۵۳۴ هکتار بوده و ۲۰۰۱۶۱ نفر (۶۰۶۰۹ خانوار) در آن سکونت دارند.

با توجه به هدف پژوهش (برآورد تمایل به پرداخت برآورد شده برای برچسب‌های محیط زیستی) و در نظر گرفتن این نکته که جامعه آماری همگن، خطای نتایج به‌دست آمده را در رسیدن به هدف فوق کاهش می‌دهد، در این مطالعه تنها یک منطقه (منطقه ۱۱) به‌عنوان جامعه آماری در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب منطقه ۱۱ در میان مناطق مختلف مشهد نیز همگن بودن نسبی منطقه از نظر سطح درآمدی براساس نظر خبرگان شهرداری و بالا بودن تعداد بازارها و فروشگاه‌های مواد غذایی در این منطقه است.

روش جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر در منطقه ۱۱ شهر مشهد و با استفاده از روش میدانی و جمع‌آوری پرسش‌نامه به‌دست آمد. کلیه مصرف‌کنندگان ۲۰ تا ۵۹ ساله محصولات تازه بسته‌بندی شده که در منطقه ۱۱ مشهد سکونت داشتند، به‌عنوان جامعه آماری تحقیق در نظر گرفته شدند. به‌منظور تعیین حجم نمونه از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده (معادله ۱) استفاده شد.

معادله (۱)
$$n = \frac{z^2 N V_x^2}{z^2 V_x^2 + (N-1)\varepsilon^2}$$

که در آن، z: ضریب قابلیت اطمینان (z=۱/۶۴ برای اطمینان در سطح ۹۰ درصد در نظر گرفته شد)، N: اندازه جامعه، V_x^2: واریانس نسبی متغیر مورد نظر و ε^2: نشان‌دهنده مجموعه ویژگی‌هایی است که برحسب حداکثر تفاوت نسبی مجاز بین برآورد و مقادیر واقعی نامعلوم جامعه‌ای برای برآورد تعیین شده است (ε=۰/۱۲ در نظر گرفته شد). برآورد V^2 نیز به شرح زیر است:

معادله (۲)
$$V_x^2 = \frac{\sigma_x^2}{\hat{\bar{X}}^2} = \frac{\left[\frac{(N-1)}{N}\right] S_x^2}{\hat{\bar{X}}^2}$$

که در آن، S_x (۱۷/۹) و $\hat{\bar{X}}$ (۲۰/۰۳): به‌ترتیب انحراف معیار و میانگین متغیر مورد نظر هستند. در کاربرد واقعی معمولاً چند مورد از مهم‌ترین متغیرها (به‌جای در نظر گرفتن تنها یک متغیر) به‌عنوان پایه محاسبه حجم نمونه انتخاب شده و اندازه نمونه‌ای برای هر یک از این متغیرها محاسبه می‌شود (Mokhtari AmirMajdi, 2002). در این مطالعه، ابتدا دو متغیر تمایل به پرداخت و سن به‌عنوان پایه محاسبات انتخاب شدند. ازآن‌جاکه حجم نمونه به‌دست آمده مربوط به متغیر سن بسیار کوچک بود (۱۲ نفر)، در نهایت حجم نمونه به‌دست آمده از متغیر تمایل به پرداخت انتخاب شده و در انتها، حجم نمونه ۱۵۰ نفر تعیین شد.

پرسش‌نامه‌ها با استفاده از روش ارزش‌گذاری مشروط و با سؤالات دوگانه یک‌بعدی طراحی شد، به این صورت که پس از پرسیدن سؤالات جمعیت‌شناختی و سؤالات مرتبط با نگرش و آگاهی مصرف‌کنندگان (که همگی متغیرهای توضیحی مدل رگرسیونی را ایجاد می‌کنند)، از فرد پاسخ‌دهنده پرسیده شد که «آیا حاضر است برای محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده دارای برچسب محیط زیستی نسبت به نمونه بدون برچسب، مبلغ بیش‌تری را پرداخت کند؟» درصورتی‌که فرد به این سؤال پاسخ مثبت دهد، مبلغی به فرد پیشنهاد شده و او می‌تواند با بله یا خیر، نظر خود را اعلام کند. لازم به ذکر است که مبالغ پیشنهادی در پرسش‌نامه با استفاده از روش بویل و بیشاپ (Boyle et al., 1988) طراحی شد.

طراحی مقادیر پیشنهادی در پرسش‌نامه ارزش‌گذاری مشروط

روش ارزش‌گذاری مشروط، روشی پرسش‌نامه محور است که تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان را از طریق طراحی پرسش‌نامه برآورد می‌کند. در این روش به مصاحبه‌شوندگان، مبالغی مشخص در ازای ارائه کالا یا خدمات محیط زیستی پیشنهاد می‌شود و پاسخ-دهندگان تمایل به پرداخت خود را با بله یا خیر تعیین می‌کنند. مبلغ معینی که به پاسخ‌دهندگان پیشنهاد می‌شود، «پیشنهاد اولیه»[1] نامیده می‌شود. نتایج روش ارزش‌گذاری مشروط به مبلغ پیشنهاد اولیه بسیار

1- Starting bid

حساس است؛ به عبارت دیگر، درصورتی‌که مبالغ متفاوتی به‌عنوان پیشنهاد اولیه به پاسخ‌دهندگان ارائه شود، تصمیم‌ها و واکنش‌های متفاوت پاسخ‌دهندگان را در پی خواهد داشت که منجر به تخمین‌های متفاوت تمایل به پرداخت می‌شود. در اکثر مطالعات مربوط به روش ارزش‌گذاری مشروط از میانه و میانگین برای تعیین نقطه شروع (پیشنهاد اولیه) استفاده می‌کنند. یکی از کم‌خطاترین روش‌های طراحی پیشنهادها، روش بویل و بیشاپ است. طراحی مقادیر پیشنهادی در پرسش‌نامه ارزش‌گذاری مشروط در این پژوهش با استفاده از روش بویل و بیشاپ (روش اعداد تصادفی مکمل)[1] (Boyle et al., 1988) انجام گرفت. در این روش از تابع توزیع مقادیر پیش‌آزمون برای استخراج پیشنهادهای اولیه استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، فرض بر آن است که توزیع پیشنهادهای پیش‌آزمون (مبالغ تمایل به پرداخت در داده‌های پیش‌آزمون که از روش انتها- باز تعیین می‌شوند) با توزیع تمایل به پرداخت‌های واقعی یکسان می‌باشد. طراحی مبالغ پیشنهاد در این روش، شامل چهار مرحله است:

الف) ابتدا براساس تعداد نمونه N، به تعداد N/2 اعداد تصادفی (P_i) با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه صفر و یک ایجاد می‌شود ($P_1, P_2, P_3, \ldots, P_{N/2}$).

ب) به تعداد N/2 داده اضافی با استفاده از معادله ۳، q_i تولید می‌گردد:

$$q_i= 1-P_i= (1-P_1, 1-P_2, 1-P_3, \ldots, 1-P_{N/2}) \qquad \text{معادله (۳)}$$

ج) مقادیر احتمالات P_i و q_i، با استفاده از تابع توزیع تجمعی تجربی داده‌های پیش‌آزمون و از طریق معکوس تابع توزیع تجمعی مقادیر احتمالات، تبدیل به مقادیر پیشنهادها می‌شوند.

$$b_i= F^{-1}(P_i) \qquad \text{معادله (۴)}$$

د) در نهایت، تعداد پرسش‌نامه‌های مربوط به هر پیشنهاد، به‌طور تصادفی تعیین می‌شود.

مدل اقتصادسنجی

تجزیه و تحلیل رایج داده‌های ارزش‌گذاری مشروط مانند مدل لاجیت و پروبیت، نمونه‌هایی از حذف تمایل به پرداخت صفر را ارائه می‌دهند. در این مطالعه، جهت تحلیل عوامل مؤثر بر تمایل به پرداخت از مدل اسپایک[2] استفاده می‌شود (Kristrom, 1997). مزیت مدل اسپایک این است که در پژوهش‌های ارزش‌گذاری مشروط دوگانه، احتمال تمایل صفر برای پرداخت را در برآورد نهایی وارد کرده و امکان تحلیل‌های مختلفی را فراهم می‌کند که در مدل‌های استاندارد موجود مانند لاجیت و پروبیت امکان‌پذیر نیست. در واقع، مدل اسپایک به فرد اجازه می‌دهد تا تفاوت بین دو فرض "افراطی" را تجزیه و تحلیل کند: (الف) میانگین wtp افراد پاسخگو برابر با میانگین wtp برآورد شده در نمونه فرض می‌شود و (ب) wtp غیرپاسخ‌دهندگان برابر با صفر است. در مورد اول، افراد غیرپاسخگو در تجزیه و تحلیل آماری لحاظ نمی‌شوند و در حالت دوم، افراد غیرپاسخگو به‌عنوان دارای wtp صفر کدگذاری می‌شوند (Kristrom, 1997). مدل اسپایک مشابه نتیجه راه حل گوشه‌ای در بازارهای کالاهای خصوصی است؛ به‌طوری‌که حتی وقتی قیمت صفر است، کالا خریداری نمی‌شود (Aizaki et al., 2022). اثربخشی مدل اسپایک در برخی از مطالعات تأیید شده است (Yoo & Kwak, 2002; Tan et al., 2022).

دو نسخه از مدل اسپایک ارائه شده است. در نسخه اول، نمونه اساساً به پاسخ‌دهندگان با wtp صفر و wtp مثبت تقسیم می‌شود، امّا هدف نسخه دوم این مدل، تقسیم پاسخ‌دهندگان به سه دسته مختلف: ۱- کسانی که پروژه را دوست ندارند (تمایل به پرداخت منفی)، ۲- کسانی که بی‌تفاوت هستند (تمایل به پرداخت صفر) و ۳- کسانی که متوجه می‌شوند که این پروژه در حال بهبود رفاه است (تمایل به پرداخت مثبت) است (Kristrom, 1997). در این مطالعه از نسخه اول با عنوان «ساده‌ترین مدل اسپایک» استفاده شده است.

این احتمال که مقدار تمایل به پرداخت یک فرد (wtp) از مقدار مبلغ معین پیشنهادی برای پذیرش یا رد یک پروژه (A) تجاوز نکند، به‌صورت ذیل نمایش داده می‌شود:

$$\text{Prob}(WTP \leq A) = F_{wtp}(A) \qquad \text{معادله (۵)}$$

که در آن، $F_{wtp}(A)$: یک تابع راست، پیوسته و بدون کاهش است. در نتیجه، WTP مورد انتظار به این شکل خواهد بود:

معادله (۶)

$$E(WTP) = \int_0^{\infty} 1 - F_{wtp}(A)dA - \int_{-\infty}^{0} F_{wtp}(A)dA.$$

به‌منظور تخمین $F_{wtp}(A)$ در هنگام استفاده از سؤالات ارزشیابی باینری، A باید در سراسر نمونه تغییر کند. مقدار $F_{wtp}(A)$ را می‌توان با روش‌های مختلفی از جمله حداکثر احتمال تخمین زد.

در مدل اسپایک، فرض شده است که تابع توزیع WTP به‌شکل زیر است:

1- The method of complementary random numbers
2- Spike model

معادله (۷)
$$F_{wtp}(A) = \begin{cases} 0 & \text{if } A < 0 \\ p & \text{if } A = 0 \\ G_{wtp}(A) & \text{if } A > 0 \end{cases}$$

که در آن، p متعلق به (۱، ۰) بوده و $G_{wtp}(A)$ یک تابع پیوسته و افزایشی است، به‌طوری که $G_{wtp}(0) = p$ و $\lim_{A\to\infty} G_{wtp}(A) = 1$. بنابراین، یک پرش- ناپیوستگی[1] (اسپایک) در صفر وجود دارد.

مدل اسپایک اساساً از دو سؤال ارزشیابی استفاده می‌کند: یکی می‌پرسد که آیا فرد اصلاً می‌خواهد در پروژه مشارکت داشته باشد یا خیر؟ و دیگری قیمت A را پیشنهاد می‌کند. برای هر فرد i، شاخصی تعریف می‌شود که نشان دهد آیا فرد در بازار است یا خیر:

معادله (۸)
$$S_i = 1 \text{ if } WTP > 0 \text{ (0 otherwise).}$$

به طور مشابه، T_i نشان می‌دهد که آیا پاسخ‌دهنده مایل به پرداخت قیمت پیشنهادی است یا خیر:

معادله (۹)
$$T_i = 1 \text{ if } WTP > A \text{ (0 otherwise).}$$

سپس، لگاریتم درست‌نمایی برای نمونه به‌شکل زیر نمایش داده می‌شود (Kristrom, 1997):

معادله (۱۰)
$$l = \sum_{1}^{N} S_i T_i \ln[1 - F_{wtp}(A)] + S_i(1 - T_i)\ln[F_{wtp}(A) - F_{wtp}(0)] + (1 - S_i)\ln[F_{wtp}(0)].$$

متغیرهای توضیحی این مدل شامل ویژگی‌های اقتصادی- اجتماعی (جنسیت، وضعیت تأهل، سن و درآمد ماهیانه خانواده)، عناصر آمیخته بازاریابی (4p) که مجموعه‌ای از ابزارهای مؤثر بر عملکرد بازاریابی و رفتار خرید مصرف‌کنندگان است (متغیرهای بازار محل خرید (مکان[2])، توجه به تبلیغات (ترفیع[3])، اهمیت شکل ظاهری محصول و اهمیت شکل بسته‌بندی محصول (محصول[4]) و مقدار پیشنهادی (قیمت[5])) و نگرش و سطح آگاهی مصرف‌کنندگان (متغیرهای نگرش فرد به رابطه مثبت انجام فعالیت‌های محیط زیستی و پرستیژ، نگرش فرد به آسیب‌های محیط زیستی کشاورزی سنتی، اهمیت وجود هر نوع برچسب روی محصول و شناخت برچسب‌های محیط زیستی از قبل) می‌باشد.

نتایج و بحث

جدول ۱ نشان‌دهنده آماره‌های توصیفی متغیرهای ویژگی‌های اقتصادی- اجتماعی است. براساس نتایج این جدول، تعداد پاسخ‌دهندگان زن (۱۱۷ نفر) بیش‌تر از پاسخ‌دهندگان مرد (۳۳ نفر) بوده و ۷۸ درصد جمعیت را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین ۵۲/۶۷ درصد از پاسخ‌دهندگان مجرد و ۴۷/۳۳ درصد از آن‌ها متأهل هستند. اکثر پاسخ‌گویان بالای ۲۵ سال سن دارند (۶۲/۶۷ درصد) و سن ۵۶ نفر از آن‌ها، ۲۵ سال و کم‌تر است. در ارتباط با درآمد ماهیانه خانواده، بیش‌تر خانواده‌ها درآمدشان بین هشت تا ۱۶ میلیون بود (۳۳/۳۳ درصد) و پس از آن به‌ترتیب ۳۰ درصد از آن‌ها درآمدی بین ۱۶ تا ۲۴ میلیون، ۱۹/۳۳ درصد درآمد بالای ۲۴ میلیون و ۱۷/۳۳ درصد کم‌تر از هشت میلیون درآمد دارند. اگرچه بازار محل خرید محصولات کشاورزی تازه برای ۶۲/۶۷ درصد از پاسخ‌دهندگان، مغازه‌های میوه‌فروشی (خرده‌فروشی) است، امّا ۵۶ نفر از آن‌ها (۳۷/۳۳ درصد) نیز از بازارهای دیگر مانند هایپرمارکت‌ها و فروشگاه‌های زنجیره‌ای، فروشگاه‌های محصولات سالم و ارگانیک، فروشگاه‌های اینترنتی و یا به‌طور مستقیم از کشاورز خرید می‌کنند.

جدول ۲ و شکل ۲ نشان‌دهنده آماره‌های توصیفی متغیرهای عناصر آمیخته بازاریابی و نگرش و سطح آگاهی مصرف‌کنندگان است.

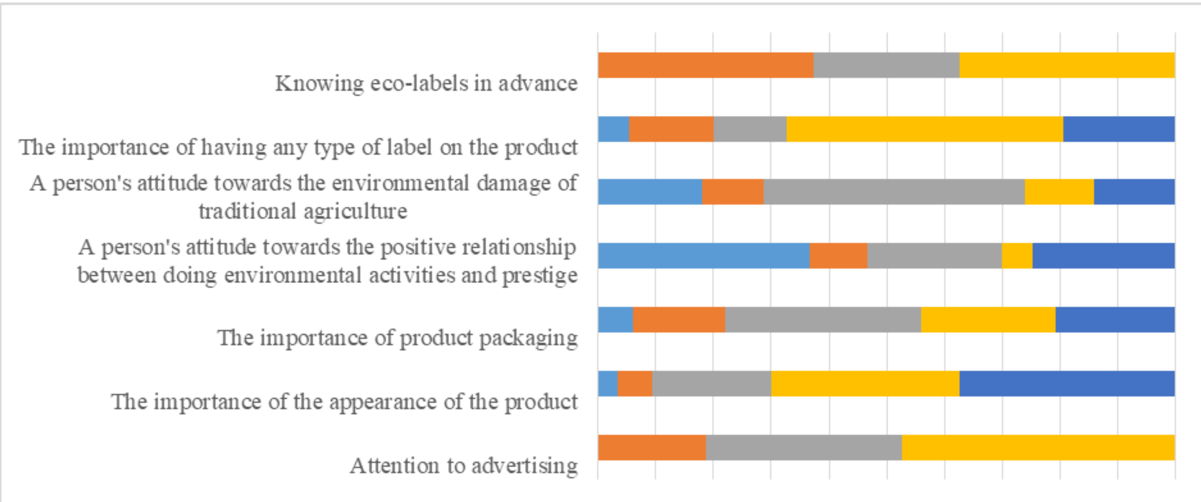
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، اکثر پاسخ‌دهندگان به تبلیغات توجه داشته و به شکل ظاهری و بسته‌بندی محصول نیز اهمیت می‌دهند. همچنین بیش‌تر افراد این تصور که «انجام فعالیت‌های محیط زیستی باعث می‌شود که در نظر دیگران موقعیت اجتماعی بالاتر (پرستیژ بیش‌تر) داشته باشیم» را مورد قبول نمی‌دانند. در ارتباط با آسیب رساندن کشاورزی سنتی به محیط زیست، ۴۵/۳۳ درصد از پاسخ‌دهندگان نظری نداشتند و میزان نظرات مخالف و موافق نیز بسیار به هم نزدیک بود. شرکت‌کنندگان، وجود برچسب (هر نوع برچسب آگاهی‌دهنده) روی محصولات را ضروری می‌دانند و ۶۷/۳۳ درصد از آن‌ها اهمیت وجود برچسب را زیاد و یا بیش از حد اعلام کرده‌اند. ۳۷/۳۳ درصد از افراد برچسب‌های محیط زیستی را، پیش از پر کردن پرسش‌نامه این پژوهش، کم می‌شناختند و ۲۵/۳۳ درصد و ۳۷/۳۳ درصد از آن‌ها به‌ترتیب به‌میزان متوسط و زیاد با این برچسب‌ها آشنایی داشتند.

1- Jump-discontinuity
2- Place
3- Promotion
4- Product
5- Price

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای ویژگی‌های اقتصادی- اجتماعی

Table 1- Descriptive statistics of independent variables

متغیر **Variable**	دسته‌بندی **Grouping**	فراوانی **Frequency (percentage)**
جنسیت Gender	مرد Man	33 (22.00%)
	زن Female	117 (78.00%)
وضعیت تأهل Marital status	مجرد Single	79 (52.67%)
	متأهل Married	71 (47.33%)
سن Age	۲۵ سال و کمتر Years and under 25	56 (37.33%)
	بیشتر از ۲۵ سال More than 25 years	94 (62.67%)
درآمد ماهیانه خانواده (تومان) Monthly family income	زیر هشت میلیون Under 8 million	26 (17.33%)
	هشت تا ۱۶ میلیون 8 to 16 million	50 (33.33%)
	۱۶ تا ۲۴ میلیون 16 to 24 million	45 (30.00%)
	بالای ۲۴ میلیون Above 24 million	29 (19.33%)
بازار محل خرید Shopping market	مغازه میوه‌فروشی Fruit shop	94 (62.67%)
	سایر بازارها Other markets	56 (37.33%)



شکل ۲- طیف لیکرت آماره‌های توصیفی متغیرهای توضیحی

Fig. 2- Likert spectrum of descriptive statistics of independent variables

جدول ۲- آماره‌های توصیفی متغیرهای عناصر آمیخته بازاریابی و نگرش و سطح آگاهی مصرف‌کنندگان
Tabel 2- Descriptive statistics of independent variables with Likert scale

متغیر **Variable**	**فراوانی** **Frequency (percentage)**				
توجه به تبلیغات **Attention to advertising**	**هرگز** **Never** **28** **(18.67%)**		**بعضی اوقات** **Sometimes** **51** **(34.00%)**		**همیشه** **Always** **71** **(47.33%)**
اهمیت شکل ظاهری محصول The importance of the appearance of the product	اهمیت ندارد Not important 5 (3.33%)	کم Low 9 (6.00%)	متوسط medium 31 (20.67%)	زیاد Much 49 (32.67%)	بیش از حد More than 56 (37.33%)
اهمیت شکل بسته‌بندی محصول The importance of product packaging	اهمیت ندارد Not important 9 (6.00%)	کم Low 24 (16.00%)	متوسط Medium 51 (34.00%)	زیاد Much 35 (23.33%)	بیش از حد More than 31 (20.67%)
نگرش فرد به رابطه مثبت انجام فعالیت‌های محیط زیستی و پرستیژ A person's attitude towards the positive relationship between doing environmental activities and prestige	کاملاً مخالفم Completely opposed 55 (36.67%)	مخالفم Against 15 (10.00%)	نظری ندارم No comment 35 (23.33%)	موافقم Agree on 8 (5.33%)	کاملاًموافقم Completely agree 37 (24.67%)
نگرش فرد به آسیب‌های محیط زیستی کشاورزی سنتی A person's attitude towards the environmental damage of traditional agriculture	کاملاً مخالفم Completely opposed 27 (18.00%)	مخالفم Against 16 (10.67%)	نظری ندارم No comment 68 (45.33%)	موافقم Agree on 18 (12.00%)	کاملاًموافقم Completely agree 21 (14.00%)
اهمیت وجود هر نوع برچسب روی محصول The importance of having any type of label on the product	اهمیت ندارد Not important 8 (5.33%)	کم Low 22 (14.66%)	متوسط Medium 19 (12.67%)	زیاد Much 72 (48.00%)	بیش از حد More than 29 (19.33%)
شناخت برچسب‌های محیط زیستی از قبل Knowing eco-labels in advance	کم Low 56 (37.33%)		متوسط Medium 38 (25.33%)		زیاد Much 56 (37.33%)

جدول ۳، آماره‌های توصیفی پاسخ به پیشنهادهای طراحی شده را نشان می‌دهد. از میان ۱۵۰ شرکت کننده، ۲۷ نفر اعلام کردند که برای برچسب‌های محیط زیستی روی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده، تمایل به پرداخت ندارند و در نتیجه، مقادیر طراحی شده به ۱۲۳ نفر باقی‌مانده پیشنهاد شد. مقادیر پیشنهادی، ۱۰ درصد، ۲۰ درصد ، ۳۰ درصد ، ۵۰ درصد و ۸۰ درصد هستند. به‌عنوان نمونه، طبق جدول مقدار ۱۰ درصد به ۲۵ نفر پیشنهاد شده که ۲۴ نفر از آن‌ها این پیشنهاد را پذیرفته و تنها یک نفر آن را رد کرده است. همچنین طبق اطلاعات جدول ۳، با افزایش مقادیر پیشنهادی، نسبت پاسخ‌های خیر به بله روندی تقریباً صعودی دارد.

جدول ۳- آماره‌های توصیفی پاسخ به پیشنهاد
Table 3- Descriptive statistics of the response to the proposal

		مقادیر پیشنهاد **Bid amounts (%)**					
		10	**20**	**30**	**50**	**80**	**جمع** **Total**
پاسخ به مقادیر پیشنهاد Response to the bid amount	خیر	1	8	15	15	17	56
	بلی	24	20	13	4	6	67
	جمع Total	25	28	28	19	23	123

جدول ۴، نتایج مدل اسپایک را نشان می‌دهد. تعداد مشاهده‌ها، ۱۵۰ مورد بوده و معناداری کل مدل ۰/۰۰۰۰ است.

متغیر جنسیت در مدل برآورد شده معنادار نیست. تأثیر این متغیر در مطالعات مختلف (مطالعات مرتبط با تمایل به پرداخت برای برچسب‌های محیط زیستی محصولات کشاورزی تازه) متفاوت تخمین زده شده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای با هدف بررسی رابطه بین فرمت و قالب برچسب‌های محیط زیستی با ترجیحات مصرف‌کننده، تمایل به پرداخت و توجه بصری برای گیاهان تولیدکننده میوه در آمریکا، متغیر جنسیت معنادار نیست (Rihn et al., 2019)، امّا در برخی مطالعات (McFadden & Huffman, 2017; Argemí-Armengol et al., 2019)، متغیر معنادار بوده و زنان نسبت به مردان، تمایل به پرداخت بیش‌تری برای برچسب‌های محیط زیستی داشتند.

متغیر وضعیت تأهل تأثیر مثبت و معناداری بر تمایل به پرداخت داشته و از این منظر با مطالعات هم‌خوانی دارد (Riccioli et al., 2020). این متغیر نشان می‌دهد که احتمال پرداخت برای برچسب‌های محیط زیستی موجود روی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده در افراد متأهل نسبت به افراد مجرد بیش‌تر است.

متغیر معنادار سن با ضریب منفی نشان می‌دهد که در جوانان (سن ۲۵ سال و کمتر)، احتمال تمایل به پرداخت برای برچسب‌های محیط زیستی ارائه شده در این مطالعه نسبت به افراد مسن‌تر بیش‌تر است. نتیجه مطالعات دیگر با هدف بررسی و تخمین تمایل به پرداخت برای چند نوع برچسب محیط زیستی، با نتیجه مذکور هم‌راستا است (De-Magistris & Gracia, 2016; McFadden & Huffman, 2017).

ضریب متغیر معنادار درآمد ماهیانه خانواده دارای علامت مثبت بوده، به این معنا که هر چه میزان درآمد شخص بالاتر باشد، احتمال تمایل به پرداخت بیش‌تری برای برچسب‌های محیط زیستی وجود خواهد داشت. متغیر درآمد در مطالعات دیگر در ارتباط با تمایل به پرداخت برچسب‌های محیط زیستی محصولات کشاورزی تازه، نیز معنادار و مثبت است (McFadden & Huffman, 2017; My et al., 2018; Rihn et al., 2019).

در ارتباط با بازار محل خرید که یک متغیر معنادار است، احتمال تمایل به پرداخت افرادی که از مغازه‌های میوه‌فروشی (خرده‌فروشی) خرید می‌کنند، نسبت به افرادی که از سایر بازارها مانند هایپرمارکت‌ها و فروشگاه‌های زنجیره‌ای، فروشگاه‌های محصولات سالم و ارگانیک، فروشگاه‌های اینترنتی و یا به‌طور مستقیم از کشاورز خرید می‌کنند، برای برچسب‌های محیط زیستی ارائه شده کم‌تر است.

متغیر توجه به تبلیغات در این مدل معنادار نیست.

متغیر اهمیت شکل ظاهری محصول در سطح پنج درصد معنادار بوده و علامت ضریب آن مثبت است. اگرچه انتظار می‌رفت برای کسانی که بیش‌تر به شکل ظاهری محصول اهمیت می‌دهند، مسائل محیط زیستی مرتبط با تولید محصول (نسبت به شکل ظاهری) اهمیت کم‌تری داشته و برای برچسب‌های محیط زیستی، تمایل به پرداخت کم‌تری داشته‌باشند (علامت منفی برای ضریب)، امّا نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توجه بیش‌تر به ظاهر محصول موجب کاهش احتمال تمایل به پرداخت نشده و به‌عکس، این افراد تمایل به پرداخت بیش‌تری برای برچسب‌های محیط زیستی موجود روی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده دارند.

اهمیت شکل بسته‌بندی محصول، یک متغیر معنادار با ضریب منفی بوده و به این معنا است که هرچه افراد برای بسته‌بندی محصول اهمیت بیش‌تری قائل باشند، احتمال تمایل به پرداخت آن‌ها برای برچسب‌های محیط زیستی ارائه شده در این پژوهش کم‌تر است.

متغیر نگرش فرد به رابطه مثبت انجام فعالیت‌های محیط زیستی و پرستیژ (به این معنا که انجام فعالیت‌های محیط زیستی نشانه داشتن موقعیت اجتماعی بالاتر در نظر دیگران است)، معنادار نشد.

متغیر نگرش فرد به آسیب‌های محیط زیستی کشاورزی سنتی، معنادار شده و ضریب مثبت این متغیر نشان می‌دهد، برای افرادی که تصور می‌کنند کشاورزی سنتی به محیط زیست آسیب می‌رساند، احتمال تمایل به پرداخت بیش‌تری برای برچسب‌های محیط زیستی وجود دارد. وجود برچسب‌های محیط زیستی روی محصولات کشاورزی کمک می‌کند تا این افراد از میزان آسیب‌های محیط زیستی محصول آگاه شده و می‌توانند خرید محصولات کشاورزی تازه را با استفاده از اطلاعات موجود روی این برچسب‌ها انجام دهند.

متغیر اهمیت وجود هر نوع برچسب روی محصول (برچسب‌های رایج موجود روی محصولات مانند برچسب نشانگرهای رنگی تغذیه ای)، اثر معناداری بر احتمال تمایل به پرداخت برچسب‌های محیط زیستی ندارد.

جدول ٤- برآورد مدل اسپایک
Table 4- Estimation of the spike model

متغیر Variable	ضریب Coefficient	خطای استاندارد Std. error	z	P > |z|
جنسیت Gender	-0.1176089	0.6090325	-0.19	0.847
وضعیت تأهل Marital status	1.108437	0.5967402	1.86	0.063
سن Age	-1.735772	0.674621	-2.57	0.010
درآمد ماهیانه خانواده Monthly family income	0.4902125	0.2574905	1.90	0.057
بازار محل خرید Shopping market	1.052265	0.5422007	1.94	0.052
توجه به تبلیغات Attention to advertising	0.0333536	0.3740859	0.09	0.929
اهمیت شکل ظاهری محصول The importance of the appearance of the product	0.5598942	0.2813358	1.99	0.047
اهمیت شکل بسته‌بندی محصول The importance of product packaging	-0.6541791	0.2900694	-2.26	0.024
نگرش فرد به رابطه مثبت انجام فعالیت‌های محیط زیستی و پرستیژ A person's attitude towards the positive relationship between doing environmental activities and prestige	-0.2601341	0.1879686	-1.38	0.166
نگرش فرد به آسیب‌های محیط زیستی کشاورزی سنتی A person's attitude towards the environmental damage of traditional agriculture	0.334121	0.1749805	1.91	0.056
اهمیت وجود هر نوع برچسب روی محصول The importance of having any type of label on the product	-0.1796699	0.183377	-0.98	0.327
شناخت برچسب‌های محیط زیستی از قبل Knowing eco-labels in advance	0.6414721	0.3105154	2.07	0.039
مقدار پیشنهادی Bid amount	0.0678237	0.014801	4.58	0.000
عرض از مبدأ Cons	4.783705	1.015401	4.71	0.000

تعداد مشاهدات= ۱۵۰
Number of obs = 150
Wald chi2 (13) = 49.63
Prob > chi2 = 0.0000
Log likelihood = -54.363447

متغیر شناخت برچسب‌های محیط زیستی از قبل در سطح پنج درصد معنادار بوده و اثر مثبت بر احتمال تمایل به پرداخت دارد، به این معنا که هرچه افراد بیش‌تر با این برچسب‌ها آشنایی داشته باشند، احتمال تمایل به پرداخت آن‌ها برای برچسب‌های محیط زیستی موجود روی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده، بیش‌تر است. این نتیجه به‌دست آمده با مطالعه‌ای با هدف برآورد تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان برای برنج[1] دارای برچسب محیط زیستی در ویتنام، مطابقت دارد (My et al., 2018).

در جدول ۴، همچنین متغیر مقدار پیشنهادی (پیشنهادهای طراحی شده به‌روش بویل و بیشاپ) در سطح ۱٪ معنادار بوده و ضریب آن دارای علامت مثبت است. اگرچه علامت مثبت این متغیر به‌طور معمول قابل تفسیر نمی‌باشد، چنین نتیجه‌ای در مطالعات دیگر

1- *Oryza sativa*

که از مدل اسپایک برای برآورد تمایل به پرداخت استفاده کردند، دیده شده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای با هدف «برآورد تمایل به پرداخت برای ارتقاء اتوبوس‌های هیدروژنی» (Wang et al., 2023)، مطالعه‌ای با هدف «مقایسه‌ی مدل اسپایک با یک مدل معمولی» (Yoo & Kwak, 2002) و مطالعه دیگری با هدف «برآورد مزایای اجتماعی مجموعه‌ای از بهبودهای محیط زیستی و شهری برنامه‌ریزی شده» (Saz-salazar & Garcia-Menendez, 2001)، که مدل اسپایک در آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته شده نیز ضریب متغیر مقدار پیشنهادی دارای علامت مثبت است.

جدول ۵ نتایج آزمون آماری در رابطه با تمایل به پرداخت برآوردشده را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی فوق نشان می‌دهد که متوسط تمایل به پرداخت ۷۰/۶۵۴۳٪ می‌باشد که به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با تمایل به پرداخت صفر دارد؛ به این معنا که جمعیت مورد مطالعه حاضرند برای محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده‌ی دارای برچسب محیط زیستی نسبت به قیمت نمونه بدون برچسب حدود ۷۱٪ بیش‌تر پرداخت کنند.

جدول ۵- برآورد مقدار اسپایک و تمایل به پرداخت

Table 5- Estimation of spike amount and willingness to pay

	مقدار The amount of	خطای استاندارد Std .error	z	P > |z|
تمایل به پرداخت Willingness to pay	70.6543	20.89637	3.38	0.001

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر توجه به آلودگی‌های محیط زیستی حاصل از تولید محصولات و در نتیجه علاقه‌مندی جوامع به دانستن بیش‌تر در مورد عوامل حفاظت و تخریب محیط زیست افزایش یافته است. برچسب‌های محیط زیستی برای پاسخ به این نیاز جامعه تعریف شده‌اند. این برچسب‌ها، اطلاعات محیط زیستی مربوط به محصولات و فرآیند تولید آن‌ها را به مصرف‌کنندگان ارائه می‌دهند؛ در واقع اطلاعات موجود روی این برچسب‌ها نشان می‌دهد تولید محصول مورد نظر چه آسیب‌هایی و به چه میزان برای محیط زیست داشته و یا فرآیند تولید تا چه حد طبق رفتارهای دوستارانه‌ی محیط زیست بوده‌است. برآورد ارزش اقتصادی برچسب‌های محیط زیستی برای محصولات کشاورزی نشان می‌دهد که مصرف‌کنندگان چه سهمی از هزینه‌های لازم برای جمع‌آوری چنین اطلاعات و داده‌هایی را خواهندپرداخت و از این طریق می‌توان تصمیمات موثرتری در رابطه با سیاست‌های مربوطه گرفت. قیمت‌گذاری صحیح این محصولات (با انجام تحقیقات و اقدامات لازم) از جهت حفظ حقوق مصرف‌کننده و تولیدکننده به‌طور همزمان و تشویق آن‌ها برای همکاری در رواج برچسب‌های محیط زیستی اهمیت دارد. با وجود اهمیت ارزگذاری اقتصادی در ارتباط با برچسب‌های محیط زیستی، مطالعات کمی در ادبیات داخلی به این موضوع پرداخته‌اند. در مطالعه حاضر به ارزش‌گذاری برچسب‌های محیط زیستی موجود روی محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده با اندازه‌گیری میزان تمایل به پرداخت افراد برای این محصولات با استفاده از روش ارزش‌گذاری مشروط و پرسش‌نامه‌های دوگانه یک بعدی پرداخته شده است. لازم به ذکر است، برچسب محیط زیستی ارائه شده در این مطالعه، با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از یک پرسش‌نامه باز طراحی شده است. در پرسش‌نامه مذکور، در ارتباط با اهمیت ویژگی‌های محیط زیستی که لازم است در طراحی برچسب مورد استفاده قرار گیرند، از پاسخ‌دهندگان سؤالاتی پرسیده شد.

ازآن‌جاکه مبالغ پیشنهادی در روش ارزش‌گذاری مشروط بر مقدار تمایل به پرداخت برآورد شده تاثیرگذار است، انتخاب روش طراحی مناسب برای مبالغ پیشنهادی که خطای نتایج را به حداقل برساند از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مطالعه از روش بویل و بیشاپ به‌عنوان یکی از کم‌خطاترین روش‌ها برای طراحی پیشنهادها استفاده شد. بررسی تمایل به پرداخت و عوامل مؤثر بر آن نیز با استفاده از مدل رگرسیونی اسپایک انجام گرفته است. مزیت مدل اسپایک نسبت به مدل‌های رگرسیونی رایج در پژوهش‌های ارزش‌گذاری مشروط دوگانه این است که احتمال تمایل به پرداخت صفر را حذف نکرده و در برآورد نهایی وارد می‌کند؛ در نتیجه استفاده از مدل اسپایک در پژوهش حاضر، خطا و سوگیری در نتایج را کاهش می‌دهد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که متغیرهای وضعیت تأهل، درآمد

ماهیانه خانواده، بازار محل خرید، اهمیت شکل ظاهری محصول، نگرش فرد به آسیب‌های محیط زیستی کشاورزی سنتی، شناخت برچسب‌های محیط زیستی از قبل و مقدار پیشنهادی، تأثیر معنادار و مثبت و متغیرهای سن و اهمیت شکل بسته‌بندی محصول تأثیر معنادار و منفی بر احتمال تمایل به پرداخت دارند. همچنین متغیرهای جنسیت، توجه به تبلیغات، نگرش فرد به رابطه مثبت انجام فعالیت‌های محیط زیستی و پرستیژ و اهمیت وجود هر نوع برچسب روی محصول اثر معناداری بر احتمال تمایل به پرداخت نشان ندادند.

ازآن‌جاکه متغیر محل خرید تأثیر معنادار و مثبت بر احتمال تمایل به پرداخت دارد، پیشنهاد می‌شود که محصولات دارای برچسب محیط زیستی، به‌جای مغازه‌های خرده‌فروشی، در هایپرمارکت‌ها و فروشگاه‌های زنجیره‌ای، فروشگاه‌های محصولات سالم و ارگانیک و فروشگاه‌های اینترنتی برای فروش به خریداران ارائه شود، زیرا مصرف‌کنندگانی که محصولات مورد نیاز خود را از این فروشگاه‌ها خریداری می‌کنند، تمایل به پرداخت بیش‌تری برای برچسب‌های محیط زیستی دارند. همچنین ازآن‌جاکه برای افرادی که به شکل ظاهری محصول اهمیت می‌دهند، احتمال تمایل به پرداخت برچسب‌های محیط زیستی بیش‌تر است، توصیه می‌شود که اجرای طرح برچسب‌گذاری برای محصولاتی که از نظر ظاهری دارای کیفیت مطلوب هستند، صورت پذیرد.

در ارتباط با علامت مثبت ضریب مقدار پیشنهادی نیز می‌توان دلایل زیر را ارئه داد:

۱- ازآن‌جایی‌که این نتیجه در مطالعات دیگر نیز یافت شده است، احتمال دارد مدل اسپایک به‌طور ذاتی علامت متغیر قیمت پیشنهادی را در شرایطی مثبت فرض می‌کند.

۲- علت مثبت شدن علامت ضریب مقدار پیشنهادی را می‌توان در تئوری سیگنال قیمت[1] جستجو کرد. طبق تئوری مذکور، درصورتی‌که اطلاعات مصرف‌کننده در مورد کیفیت کالا ناقص یا کم باشد، تمایل دارد این‌گونه فرض کند که محصول گران‌تر نسبت به نمونه‌های مشابه، دارای کیفیت بالاتری است. در واقع، ازآن‌جایی‌که خریداران تمایل دارند محصولات گران‌تر را با کیفیت‌تر فرض کنند، می‌خواهند محصول گران‌تر را خریداری کنند (Baye & Harbaugh, 2021).

مقدار تمایل به پرداخت برای برچسب‌های محیط زیستی مورد بررسی ۷۰/۶۵۴۳ درصد برآورد شده است که به این معنا است که جمعیت مورد مطالعه حاضرند برای محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده دارای برچسب محیط زیستی نسبت به قیمت نمونه بدون برچسب حدود ۷۱ درصد بیش‌تر پرداخت کنند. دو مطالعه در زمینه مورد بررسی به‌ترتیب تمایل به پرداخت برچسب محیط زیستی برای محصول برنج و بادام را، ۳۳ درصد و ۲۵ درصد تخمین زدند (De-Magistris & Gracia, 2016; My et al., 2018). بالابودن تمایل به پرداخت (به صورت درصدی) برای برچسب محیط زیستی مربوط به محصولات تازه کشاورزی در مقایسه با تمایل به پرداخت برای محصولات دیگر مانند برنج (My et al., 2018) و بادام (De-Magistris & Gracia, 2016) می‌تواند به‌دلیل بالابودن قیمت این محصولات باشد؛ نتایج درصدی به قیمت کالا بستگی داشته و برای کالاها و خدماتی که قیمت پایین‌تری دارند (مانند محصولات کشاورزی تازه که در این پژوهش مد نظر است)، تمایل به پرداخت به شکل درصدی بالاتر خواهد بود. همچنین باید توجه داشت که جامعه آماری مطالعه حاضر، منطقه ۱۱ مشهد بوده که براساس نظر خبرگان شهرداری، ساکنان آن از سطح درآمدی نسبتاً بالایی برخوردارند. بنابراین، چنانچه مطالعه فوق در مناطق دیگر شهر صورت گیرد، انتظار بر این است که تمایل به پرداخت متفاوتی برآورد شود. ازاین‌رو، برای تعمیم نتایج مطالعه حاضر به مناطق دیگر شهر باید تعدیلاتی متناسب با شرایط اقتصادی– اجتماعی آن مناطق صورت گیرد. بالا بودن تمایل به پرداخت برآورد شده نشان‌دهنده ارزش بالای برچسب‌های محیط زیستی برای مصرف‌کنندگان محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده نیز هست.

با توجه به حجم نمونه کوچک در مطالعه حاضر و بررسی تنها یکی از مناطق شهر مشهد، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده به ارزش‌گذاری برچسب‌های محیط زیستی و بررسی تمایل به پرداخت آن برای سایر مناطق شهر مشهد و دیگر شهرهای کشور پرداخته شود. همچنین در این پژوهش، محصولات کشاورزی تازه بسته‌بندی شده مورد مطالعه قرار گرفت، حال آن که با توجه به برچسب‌های موجود در بزرگ‌ترین فهرست جهانی برچسب‌های محیط زیستی (شاخص برچسب محیط زیستی، ۲۰۲۳) می‌توان این برچسب‌ها را برای سایر محصولات و خدمات مانند انواع محصولات کشاورزی بخش زراعی، باغبانی، دامپروری و شیلات، انواع غذاها و نوشیدنی‌ها، لوازم آرایشی، مبلمان و لوازم خانگی، پروازهای هواپیمایی و حتی خود

1- Price signal theory

شرکت‌ها نیز مورد بررسی قرار داد. علاوه‌بر برآورد تمایل بـه پرداخـت برای برچسب‌های محیط زیستی، پرداختن به قالب و ظاهر برچسب‌ها، میزان و چگونگی اطلاعات روی برچسـب و بـه‌طور کلـی، چگـونگی طراحی برچسب‌های محیط زیستی نیز در مطالعه‌های آینـده ضـروری به نظر می‌رسد. انجام مطالعه‌هایی به‌منظور تخمین تمایل به پرداخـت مصرف‌کنندگان برای اطلاعـات برچسـب‌های مختلـف ردپـا (شـامل ردپای آب، نیترژن و کربن) نیز پیشنهاد می‌شود.

References

1. Aghasafari, H., & Karbasi, A. (2021). Factors affecting consumers' preference for chicken meat with sustainability labels (case study: Mashhad city). *Journal of Agricultural Economics Research*, *13*(2), 197-216. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086407.1400.13.2.10.1
2. Aizaki, H., Nakatani, T., Sato, K., & Fogarty, J. (2022). R package DCchoice for dichotomous choice contingent valuation: A contribution to open scientific software and its impact. *Japanese Journal of Statistics and Data Science*, *5*, 871-884.
3. Argemí-Armengol, I., Villalba, D., Ripoll, G., Teixeira, A., & Álvarez-Rodríguez, J. (2019). Credence cues of pork are more important than consumers' culinary skills to boost their purchasing intention. *Meat Science*, *154*, 11-21. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.04.001
4. Baye, M.R., & Harbaugh, R. (2021). Good, Better, Best: Comparative Price Signaling. Indiana University, Kelley School of Business, p. 1-20.
5. Boyle, K.J., Welsh, M.P., & Bishop, R.C. (1988). Validation of empirical measures of welfare change: Comment. *Land Economics*, *64*(1), 94-98.https://doi.org/10.2307/3146613
6. De-Magistris, T., & Gracia, A. (2016). Consumers' willingness-to-pay for sustainable food products: The case of organically and locally grown almonds in Spain. *Journal of Cleaner Production*, *118*, 97-104. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.050
7. García-Gudiño, J., Blanco-Penedo, I., Gispert, M., Brun, A., Perea, J., & Font-i-Furnols, M. (2021). Understanding consumers' perceptions towards Iberian pig production and animal welfare. *Meat Science*, *172*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108317
8. Grebitus, C., Steiner, B., & Veeman, M.M. (2016). Paying for sustainability: A cross-cultural analysis of consumers' valuations of food and non-food products labelled for carbon and water footprints. *Journal of Behavioral and Experimental Economics*, *63*, 50-58. https://doi.org/10.1016/j.socec.2016.05.003
9. Haqjo, M., Hayati, B., Mohammad Rezaei, R., Pish Bahar, E., & Dashti, G. (2011). Factors affecting Potential consumers' willingness to pay a premium for safe food products (Case study: Agricultural Administration of East Azarbaijan). *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, *21*(3), 105-117. (In Persian with English abstract)
10. Hori, J., Wakamatsu, H., Miyata, T., & Oozeki, Y. (2020). Has the consumers awareness of sustainable seafood been growing in Japan? Implications for promoting sustainable consumerism at the Tokyo 2020 Olympics and Paralympics. *Marine Policy*, *115*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103851
11. Kristrom, B. (1997). Spike Models in Contingent Valuation. *American Journal of Agricultural Economics*, *79(3)*, 1013-1023. https://doi.org/10.2307/1244440
12. Mazhari, A., & Haghigi, F. (2016). Assessing the health risks of heavy metals from irrigation of agricultural soils with municipal wastewater in the south of Sabzevar. *Sabzevar University of Medical Sciences*, *24*(4), 281-291. (In Persian with English abstract)
13. McFadden, J.R., & Huffman, W.E. (2017). Consumer valuation of information about food safety achieved using biotechnology: Evidence from new potato products. *Food Policy*, *69*, 82-96. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.03.002
14. Mokhtari Amir Majdi, G. (2002). *Sampling (methods and applications).* Statistical Center of Iran, Tehran, Iran.
15. My, N.H.D., Demont, M., Van Loo, E.J., de Guia, A., Rutsaert, P., Huu Tuan, T., & Verbeke, W. (2018). What is the value of sustainably-produced rice? Consumer evidence from experimental auctions in Vietnam. *Food Policy*, *79*, 283-296. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.08.004
16. Riccioli, F., Moruzzo, R., Zhang, Z., Zhao, J., Tang, Y., Tinacci, L., & Boncinelli, F. (2020). Willingness to pay in

main cities of Zheijiang provice (China) for quality and safety in food market. *Food Control*, *108*, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106831

17. Rihn, A., Wei X., & Khachatryan, H. (2019). Text vs. logo: Does eco-label format influence consumers' visual attention and willingness-to-pay for fruit plants? An experimental auction approach. *Journal of Behavioral and Experimental Economics, 82*, 1-11. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.socec.2019.101452
18. Salladarre, F., Brecard, D., Lucas, S., & Ollivier, P. (2016). Are French consumers ready to pay a premium for eco-labeled seafood products? A contingent valuation estimation with heterogeneous anchoring. *Agricultural Economics*, *47*, 247-258. https://doi.org/10.1111/agec.12226
19. Saz-salazar, S., & Garcia-menendez, L. (2001). Willingness to pay for environmental improvements in a large city. *Environmental and Resource Economics, 20*, 103-112.
20. Selgi, E., Shahvardi Nik, M., & Ramezani, M. (2020). Impact of untreated municipal wastewater irrigation on heavy metal accumulation in topsoil and subsoil. *Environmental Science and Technology, 22*(3), 317-333. (In Persian with English abstract)
21. Song, L., Lim, Y., Chang, P., Guo, Y., Zhang, M., Wang, X., Yu, X., Lehto, M.R., & Cai, H. (2019). Ecolabel's role in informing sustainable consumption: A naturalistic decision making study using eye tracking glasses. *Journal of Cleaner Production*, *218*, 685-695. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.283
22. Taghizadeh, A., Abolhassani, L., Sabohi, M., & Durandish, A. (2023). Analyzing consumers' preferences for using fresh vegetables with eco-labels. *Agricultural Ecology*, *16(2)*, 331-351. (In Persian with English abstract)
23. Tan, Y., Fukuda, H., Zhang, L., & Wang, S. (2022). An investigation into residents' willingness to pay for vertical greening in China. *Urban Ecosyst*, *25(2)*, 1-12. https://doi.org/10.1007/s11252-022-01223-w
24. Wang, S., Tan, Y., Fukuda, H., & Gao, W. (2023). Willingness of Chinese households to pay extra for hydrogen-fuelled buses: A survey based on willingness to pay. *Environmental Science*, *11*,1-11. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1109234
25. Witkin, T., Dissanayake, S.T.M., & McClenachan, L. (2015). Opportunities and barriers for fisheries diversification: Consumer choice in New England. *Fisheries Research*, *168*, 56-62. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.03.019
26. Yang, W., Rennie, G., Ledgard, S., Mercer, G., & Lucci, G. (2020). Impact of delivering 'green' dairy products on farm in New Zealand. *Agricultural Systems*, *178*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102747
27. Yin, Sh., Han, F., Chen, M., Li, K., & Li, Q. (2020). Chinese urban consumers' preferences for white shrimp: Interactions between organic labels and traceable information. *Aquaculture*, *521*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735047
28. Yoo, S.H., & Kwak, S.J. (2002). Using a spike model to deal with zero response data from double bounded dichotomous choice contingent valuation surveys. *Applied Economics Letters*, *9*, 929-932. https://doi.org/10.1080/13504850210139378

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 643-659

Effect of Irrigation Interval and Corn (*Zea mays* L.)-Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Intercropping on the Quantitative and Qualitative Characteristics of Fodder

Saeed Sadeghzadeh Hemayati[1*], Hamed Mansouri[2] and Mohsen Shahsavarpour[3]

1- Associate Professor, Sugar Beet Seed Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
2- Assistant Professor, Sugar Beet Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran.
3- M.Sc. Graduated, Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Jiroft University, Jiroft, Iran.
(*- Corresponding author's Email: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir)

Received: 01-03-2024 Revised: 14-05-2024 Accepted: 25-05-2024 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Sadeghzadeh Hemayati, S., Mansouri, H., & Shahsavarpour, M. (2025). Effect of irrigation interval and corn (*Zea mays* L.)-sorghum (*Sorghum bicolor* L.) intercropping on the quantitative and qualitative characteristics of fodder. *Journal of Agroecology, 16*(4), 643-659. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.86693.1190

Introduction

Iran is located in the arid and semi-arid region of the world and is considered one of the low-rainfall regions of the world (Khatami et al., 2020). The agricultural sector is considered to be the major water consumer therefore paying attention to the optimal use of water in this sector is of great importance, and any saving in this sector is considered an effective contribution to saving water resources (Khajeh Khezri et al., 2018). The selection of suitable cultivation patterns and systems is one of the useful solutions for the optimal use of production resources, including water. In agricultural systems with limited resources, the use of intercropping is of particular importance. It has been reported that between 16 and 22 percent of the production of the agricultural sector in the world is supplied through various intercropping systems (Chamkhi et al., 2022). Many studies have been done regarding the intercropping of two C4 fodder plants in the investigation of their performance under mixed cultivation conditions. The value of LER in corn (*Zea mays* L.) – sorghum (*Sorghum bicolor* L.) intercropping under normal irrigation and moisture stress conditions were reported as 1.35 and 1.62 respectively, which indicated the superiority of corn and sorghum intercropping over the monoculture of both plants, especially under stress conditions. In all countries of the world - especially in Iran - research and progress in fodder production, management and exploitation of these plants have received less attention than other plants. This experiment was carried out with the aim of evaluating the quantitative and qualitative performance of two types of forage corn and sorghum in the intercropping system and the responses of these plants to different levels of drought stress.

Materials and Methods

The experiment was carried out as strip plots based on randomized complete block design with three replications in Hasharabad village, Regan city, Kerman province. In this experiment, the irrigation regimes with

https://doi.org/10.22067/agry.2024.86693.1190

three levels were considered as a vertical plot and different proportions of corn and sorghum mixture with five levels as a horizontal plot. The vertical plot includes three levels of irrigation 100 mm of evaporation from the class A evaporation pan (control), 175 mm of evaporation from the class A evaporation pan (mild stress) and 250 mm of evaporation from the class A evaporation pan (severe stress). The horizontal plot also has five levels of different proportions of fodder corn and sorghum, including monoculture of corn (M), intercropping of three-quarters of corn + one-quarter of sorghum (3M:1S), one-half of corn + one half of sorghum (2M:2S), one-quarter of corn + three-quarters of sorghum (1M:3S) and monoculture sorghum (S). Quality characteristics included Dry Matter Digestibility (DMD), Water Soluble Carbohydrates (WSC), Crude Protein (CP), Acid Detergent Fiber (ADF), Total ASH, and Crude Fiber (CF) were measured and analysed. In order to calculate the benefits of intercropping, the evaluation indicators of intercropping, including Land Equivalent Ratio (LER), Actual Yield Loss (AYL) and Intercropping Advantage (IA) were used (Javanshir et al., 2000). Data were analyzed using SAS 9.1 software, and the means were separated by the least significant difference test at 5% probability level.

Results and Discussion

The experimental results revealed that as the irrigation interval increased and drought stress intensified, there was a decrease in total fodder yield, total ash content, acid detergent fiber, dry matter digestibility, and the yield of protein and crude fiber in the fodder. Regarding the effect of intercropping on the qualitative characteristics of fodder, the findings indicated that an increase in the proportion of sorghum in the intercropping system led to a significant reduction in the share of leaves in the total sorghum biomass, water-soluble carbohydrates, acid detergent fiber, and fodder digestibility. The evaluation of the advantage of intercropping based on LER and AYL index showed that the intercropping of 75% corn with 25% sorghum in severe water shortage stress (irrigation after 250 mm evaporation) compared to other ratios intercropping had a higher superiority than the monoculture of the species.

Conclusion

In general, the results of this experiment showed that the use of intercropping, especially under conditions of limited irrigation, can be a suitable solution to improve fodder production compared to pure cultivation.

Keywords: Advantage of intercropping, Irrigation restriction, Quality of fodder, Replacement intercropping

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ٦٥۹-٦٤۳

اثر دور آبیاری و کشت مخلوط ذرت (*Zea mays* L.) و سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) علوفه‌ای بر خصوصیات کمی و کیفی علوفه

سعید صادق‌زاده حمایتی[1*]، حامد منصوری[2] و محسن شهسوارپور[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

چکیده

به منظور ارزیابی سودمندی کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای تحت رژیم‌های مختلف آبیاری، آزمایشی به‌صورت کرت‌های نواری در منطقه ریگان استان کرمان اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل دور آبیاری با سه سطح (۱۰۰، ۱۷۵ و ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) به‌عنوان کرت عمودی و نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جایگزینی ذرت (*Zea mays* L.) و سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) با پنج سطح (کشت خالص ذرت علوفه‌ای (M)، کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۲۵ درصد سورگوم علوفه‌ای (3M:1S)، کشت ۵۰ درصد ذرت علوفه‌ای + ۵۰ درصد سورگوم علوفه‌ای (2M:2S)، کشت ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای (1M:3S) و کشت خالص سورگوم علوفه‌ای (S)) به‌عنوان کرت افقی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش دور آبیاری از عملکرد علوفه کل، خاکستر کل و عملکرد پروتئین و فیبر خام کاسته شد. افزایش سهم سورگوم در مخلوط با کاهش میزان سهم برگ در زیست‌توده گیاه سورگوم، کربوهیدرات‌های محلول در آب و قابلیت هضم علوفه همراه شد. بیشترین و کمترین عملکرد علوفه خشک با ۱۴/۳۵ و ۱۱/۶۴ تن در هکتار به‌ترتیب مربوط به دور آبیاری بعد از ۱۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر بود. ارزیابی سودمندی کشت مخلوط براساس شاخص نسبت برابری زمین و افت واقعی عملکرد نشان داد که تیمار ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد سورگوم در شرایط تنش و نسبت کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد سورگوم در شرایط نرمال آبیاری در مقایسه با سایر نسبت‌های کشت مخلوط از برتری بالاتری نسبت به کشت خالص گونه‌ها برخوردار بود. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از کشت مخلوط گونه‌ها به‌ویژه در شرایط محدودیت آبیاری می‌تواند راهکار مناسبی در جهت بهبود تولید علوفه در مقایسه با کشت خالص گونه‌ها باشد.

واژه‌های کلیدی: سودمندی کشت مخلوط، کشت جایگزینی، کیفیت علوفه، محدودیت آبیاری

مقدمه

کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره زمین واقع شده است و جزء مناطق کم‌بارش دنیا محسوب می‌شود (Khatami et al., 2020) که متوسط بارندگی سالیانه آن ۲۳۰ میلی‌متر است. پراکنش بارش‌ها در کشور، گاهی منطبق با نیازهای زراعی نبوده و با توجه به اینکه تولید محصولات کشاورزی به‌شدت به تأمین منابع آب وابسته است، دور آبیاری اثرات منفی شدیدی بر تولید گذاشته و همواره محصولات دچار تنش طولانی و یا موقت می‌شوند (Cominelli & Tonelli, 2010). بنابراین، باید با مدیریت مطلوب، امکان استفاده بهینه از مناطق نیمه‌خشک را میسر کرده و به سطح زیرکشت و

۱- دانشیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲- استادیار، بخش تحقیقات چغندرقند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.

(*- نویسنده مسئول: Email: s.sadeghzadeh@areeo.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/agry.2024.86693.1190

بازدهی این مناطق افـزود. در نـواحی خشـک و نیمـه‌خشـک جهـان دسترسی به عملکرد بالا فقط از طریق آبیاری امکان‌پذیر اسـت و بـه دلیل نیاز شدید به آب در این مناطق اگر مدیریت مصرف آب مناسـب نباشد، عملکرد محصول کاهش یافته و موجب تلف شـدن آب خواهـد شـد (Oweis & Hachum, 2006). بخـش کشـاورزی عمـده‌تـرین مصرف‌کننده آب به‌شمار می‌آید، بنابراین توجه به مصرف بهینه آب در این بخش از اهمیت زیادی برخوردار است (Khajeh Khezri et al., 2018).

انتخاب الگوها و سیستم‌های مناسب کشت از جملـه راهکارهـای مفید در استفاده بهینه از منابع تولید از جمله آب می‌باشد. در سیسـتم-های کشاورزی با منابع محدود اسـتفاده از کشـت مخلـوط از اهمیـت ویژه‌ای برخوردار است. گزارش شده است کـه تقریبـاً بـین ۱۶ تـا ۲۲ درصد تولیـدات بخـش کشـاورزی در جهـان از طریـق سیسـتم‌هـای مختلف کشت مخلوط تـأمین مـی‌گـردد (Chamkhi et al., 2022). کشت مخلوط به‌عنوان یک نمونـه از سـامانه‌هـای کشـاورزی پایـدار، اهدافی همچون تعادل اکولوژیکی، استفاده کارآمدتر از منابع و افزایش حاصلخیزی خـاک را دنبـال مـی‌کنـد (Dahmardeh & Hodiani, 2016). در کشت مخلوط با تلفیق نیازهای اکولوژیکی دو یا چند گیـاه زراعی سازگار با محیط که دارای نیازهای متفاوتی می‌باشـند از منـابع موجـود ماننـد آب و عناصـر غـذایی بـه‌نحو کارآمـدتر و مطلـوبی بهره‌بـرداری مـی‌گـردد (Hasanvand et al., 2019a). در کشـت مخلوط از یک طرف با توجه به تفاوت در عمق فعالیت ریشه، رقابـت بین گیاهان برای جذب آب و عناصـر غـذایی مـورد نیـاز کمتـر بـوده (Sarto et al., 2020Ogindo & Walker, 2005;) و از طـرف دیگر، ترشحات ریشه دو گیاه با هم مخلوط شده و فراهمی عناصر در ریزوسـفر افـزایش مـی‌یابـد (Ahmadvand & Hajinia, 2019). بنابراین، در سیستم کشت مخلوط، جذب عناصر غذایی افزایش یافتـه و منجر به تولید بیشتر نسبت به تک‌کشتی گونه‌ها می‌شـود (Zhang et al., 2012). مطالعات زیادی در خصوص بررسی عملکـرد گیاهـان علوفه‌ای چهار کربنه در شرایط کشت مخلوط صورت گرفته اسـت. در تحقیقی گزارش شد که کشت مخلوط دو گیاه سـورگوم (*Sorghum bicolor* L.) و ارزن (*Panicum miliaceum* L.) نسـبت بـه تک‌کشتی از نسبت برابری زمین بالاتری برخوردار بود که این موضوع برتری کشت مخلوط سورگوم و ارزن نسـبت بـه تک‌کشـتی آن‌هـا را نشان داد (Heydari, 2015). نتایج تحقیقی نشان داد کـه عملکـرد و نسبت برابری زمین در کشت مخلوط ذرت و سـورگوم در مقایسـه بـا کشت خـالص آن‌هـا بـه‌میزان ۲۴ درصـد بیشـتر بـود (Lesoing & Francis, 1999). نسبت برابری زمین در کشت مخلـوط ذرت (*Zea mays* L.) و سـورگوم در شـرایط آبیـاری نرمـال و تـنش رطـوبتی به‌ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۶۲ گزارش شد که بیانگر برتـری کشـت مخلـوط ذرت و سورگوم نسبت به تک‌کشتی آن‌ها در شرایط تنش کم‌آبی بـود (Beheshti et al., 2019). مشخص شده اسـت کـه کشـت مخلـوط علاوه‌بر افزایش عملکرد کمّی کل علوفه، باعث افزایش عملکرد کیفی علوفه نیز می‌گردد (Hasanvand et al., 2019b). بنابراین، اسـتفاده از کشت مخلوط گیاهان علوفه‌ای می‌تواند منجر به افـزایش عملکـرد کمّی و کیفی علوفه در مقایسه با تک‌کشتی آن‌ها نیز گردد.

در همه کشورهای جهان به‌ویژه در ایران، تحقیـق و پیشـرفت در زمینه گیاهان علوفه‌ای نسبت به سایر گیاهان کمتر مـورد توجـه قـرار گرفته است. ارزش اصلی علوفه بـه ارزش اقتصـادی گوشـت، شـیر و سایر فرآورده‌های دامی مربوط می‌شود که با تغذیه دام از علوفه تولیـد می‌شوند (Arzani, 2008). بنابراین، علوفه‌هـایی کـه دارای خـوش-خوراکی و مقدار جذب ماده خشک بالایی باشـند، در اولویـت انتخـاب دامدار قرار دارند. ذرت به‌دلیل دارا بودن مقدار کم دیواره سـلولی غیـر قابل هضم، کربوهیدرات‌های زیاد و نسبت بیشتر دانه در کل علوفه از ارزش هضمی بالایی برخوردار بوده و برای دام، خوش‌خـوراک اسـت. سورگوم علوفه‌ای نسبت به ذرت، دیواره سلولی آن غیر قابل هضم‌تر و نسبت کمتر دانـه در کـل علوفـه را داشـته و خوش‌خـوراکی و ارزش تغذیـه‌ای کمتـری نسـبت بـه ذرت دارد (Oliver et al., 2004). در مناطقی که میران بارندگی آن‌ها پایین بوده و ذرت عملکـرد مطلـوبی تولید نکند، استفاده از سورگوم می‌تواند راهکار مناسبی برای جایگزینی با ذرت باشد، زیرا سورگوم به‌دلیل مقاومت نسبتاً بالا به شرایط کم‌آبی و ریشه‌دوانی بیشتر در لایه‌های عمیـق‌تـر خـاک بـرای جـذب آب از کارآیی بالاتری برخوردار است (Sarto et al., 2021). به‌طور کلی، در شرایط عدم تنش رطوبتی و در شرایطی که محدودیتی از لحاظ تأمین آب برای گیاه ذرت وجود نداشته باشد، کشت ذرت بهترین گزینه برای تولید علوفه می‌باشد؛ امّا در شرایط وجود محدودیت آبـی کـه در اکثـر مناطق کشور با آن مواجـه هسـتیم، کشـت مخلـوط ذرت و سـورگوم راهکار مناسبی به‌عنوان جایگزین گیاه ذرت می‌باشد. شهرستان ریگان دارای آب‌وهوای گرم و خشـک بـوده و ذرت و سـورگوم سـهم قابـل ملاحظه‌ای در تناوب زراعی منطقه ایفا می‌کنند. با توجـه بـه مشـکل

کمبود آب به‌خصوص در ماه‌های تابستان و ضرورت تأمین گیاهان علوفه‌ای و انتخاب و کاشت گیاهان مناسب و دارای بازده بالا، این آزمایش با هدف ارزیابی عملکرد کمّی و کیفی دو گونه ذرت و سورگوم علوفه‌ای در سیستم کشت مخلوط و عکس‌العمل این گیاهان نسبت به سطوح مختلف دور آبیاری در منطقه ریگان اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در روستای حشرآباد منطقه ریگان با عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه شرقی با ارتفاع ۶۴۰ متر از سطح دریا اجرا شد. شهرستان ریگان دارای آب‌وهوای گرم و خشک و در فاصله ۲۸۵ کیلومتری مرکز استان کرمان واقع شده است. میانگین حداکثر و حداقل دمای سالیانه منطقه در سال اجرای آزمایش به‌ترتیب معادل ۳۲/۳ و ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش ۵۹/۴ میلی‌متر بود (جدول ۱).

به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش، نمونه مرکبی از دو عمق صفر تا ۳۰ و۳۰ تا۶۰ سانتی‌متر نیمرخ خاک تهیه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن توسط آزمایشگاه آب بید کرمان تعیین شد (جدول ۲).

جدول ۱- خصوصیات اقلیمی محل اجرای آزمایش

Table 1- Climate characteristics of the experiment site in 2019

	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	میانگین سال Average annual
دمای حداکثر Max temperature(°C)	31.3	35.4	42.8	44.6	43.2	42.0	38.0	27.8	23.2	13.9	20.1	25.3	32.3
دمای حداقل Min temperature(°C)	17.7	23.2	27.7	29.8	29.4	24.7	22.2	13.5	9.6	2.2	8.6	13.3	18.5
بارندگی Precipitation (mm)	36.6	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.0	6.6	12.8	0.2	1.8	59.4

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 2- Physical and chemical characteristics of the experiment soil

خصوصیات خاک Soil characteristics	عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر Depth (0-30 cm)	عمق ۳۰ تا ٦۰ سانتی‌متر Depth (30-60 cm)
بافت Texture	لومی شنی Sandy loam	لومی شنی Sandy loam
کربن آلی Organic C (%)	0.15	0.15
هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	4.16	3.12
pH	8.1	7.8
نیتروژن کل Total N (%)	0.15	0.15
فسفر قابل جذب Absorbable P ($mg.kg^{-1}$)	1.2	1.5
پتاسیم قابل جذب Absorbable K ($mg.kg^{-1}$)	151	142

این پژوهش به‌صورت کرت‌های نواری (استریپ پلات) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش،

دور آبیاری با سه سطح به‌عنوان کرت عمودی و نسبت‌های مختلف مخلوط ذرت و سورگوم با پنج سطح به‌عنوان کرت افقی در نظر گرفته شد. کرت عمودی شامل سه سطح آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A (I_{100})، آبیاری پس از ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A (I_{175}) و آبیاری پس از ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A (I_{250}) بود. کرت افقی نیز در پنج سطح نسبت‌های مختلف کشت مخلوط ذرت علوفه‌ای و سورگوم علوفه‌ای شامل کشت خالص ذرت علوفه‌ای (M)، کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۲۵ درصد سورگوم علوفه‌ای (3M:1S)، کشت ۵۰ درصد ذرت علوفه‌ای + ۵۰ درصد سورگوم علوفه‌ای (2M:2S)، کشت ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای (1M:3S) و کشت خالص سورگوم علوفه‌ای (S) بود.

هر کرت دارای شش ردیف کاشت به‌طول هشت متر و با فاصله بین ردیف ۷۵ سانتی‌متر بود. فاصله بین بوته‌ها روی ردیف برای ذرت علوفه‌ای و سورگوم علوفه‌ای به‌ترتیب معادل ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر و عمق کاشت به‌ترتیب معادل پنج و سه سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تراکم بوته ذرت علوفه‌ای و سورگوم علوفه‌ای به‌ترتیب معادل ۸/۸۸ و ۱۳/۳۳ بوته در مترمربع بود. فاصله افقی بین کرت‌های مجاور و فاصله عمودی بین کرت‌ها، معادل دو متر در نظر گرفته شد. رقم مورد کاشت برای ذرت علوفه‌ای، رقم سینگل کراس ۷۰۴ و برای سورگوم علوفه‌ای، رقم اسپیدفید که از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان تهیه شده بود، مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور مبارزه با علف‌های هرز، یک ماه قبل از اجرای آزمایش با علف‌کش آترازین + لاسو (یک لیتر در هکتار) اقدام به سم‌پاشی شد. سپس زمین به‌وسیله دیسک سنگین بر هم زده شد و پس از گذشت ۱۵ روز، اقدام به آبیاری زمین و بعد از سه روز (پس از گاورو شدن خاک) اقدام به آماده‌سازی خاک شامل شخم، دو دیسک عمودبرهم و لولر شد. به‌منظور تهیه بستر بذر، اقدام به ایجاد جوی و پشته در سطح زمین شد. کشت به‌صورت کپه‌ای و هیرم‌کاری در تاریخ ۱۵ مرداد صورت پذیرفت. مصرف کود نیتروژن در دو نوبت (همزمان با کاشت و مرحله پنج تا هفت برگی) و مصرف کودهای سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم براساس نتایج تجزیه خاک و توصیه‌های کودی مرکز تحقیقات کشاورزی جیرفت در زمان کاشت، حدود ۱۰ سانتی‌متر زیر بذر به‌صورت خطی مصرف شد. آبیاری براساس سطوح مورد آزمایش تنش به‌روش نشتی انجام شد. حجم آب آبیاری به‌ترتیب برای تیمارهای I_{100}، I_{175} و I_{250} برابر با ۷۳۴۸، ۴۴۹۰ و ۳۱۳۹ مترمکعب در هکتار بود. لازم به ذکر است که پس از کاشت تا مرحله چهار برگی، آبیاری به‌صورت معمول انجام و سپس سطوح تنش اعمال شد. طی فصل رشد، علف‌های هرز مزرعه (شامل کهورک، جغجغه، اویارسلام، سلمه تره و پیچک صحرایی) به‌صورت مکانیکی مهار شد. محصول علوفه در یک چین و در تاریخ ۲۵ آبان توسط کارگر برداشت شد. برداشت علوفه در مرحله خمیری دانه‌های ذرت و پس از حذف نیم متر از ابتدا و انتهای دو ردیف میانی هر کرت، از ارتفاع هشت سانتی‌متری بالای خاک انجام شد. به‌منظور اندازه‌گیری وزن خشک اندام‌های مختلف گیاه، پس از تعیین وزن تر و نمونه‌برداری، برگ‌ها و ساقه به‌ترتیب به‌مدت ۴۸ و ۷۲ ساعت در آون الکتریکی با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس وزن خشک آن‌ها توزین و ثبت شد.

برای اندازه‌گیری کیفیت علوفه، در سال‌های اخیر تکنولوژی طیف سنجی مادون قرمز نزدیک (NIR)[1] توسعه فراوانی یافته و اندازه‌گیری ترکیبات فرآورده‌های زراعی و دامی با این سیستم امکان‌پذیر شده است. تکنولوژی NIR براساس جذب و انعکاس اشعه مادون قرمز در طول موج‌های بین ۲۵۰۰–۷۰۰ نانومتر استوار است. در این روش، اشعه بر جسم تابانیده می‌شود و انرژی منعکس شده (R) از نمونه براساس LogL/R اندازه‌گیری می‌شود و براساس برازش معادله‌های خطی رگرسیونی چند متغیره بین انرژی‌های منعکس شده از جسم و داده‌های شیمیایی دستگاه کالیبره می‌شود (Jafari et al., 2003). دقت NIR بستگی به دقت در کالیبراسیون آن دارد. بنابراین، روش‌های استاندارد آزمایشگاهی باید دقیق و استاندارد باشند و نمونه‌های علوفه مورد استفاده باید دامنه کافی برای صفات داشته باشند، پس از کالیبراسیون دستگاه NIR، اندازه‌گیری صفات کیفی شامل درصد ماده خشک قابل هضم (DMD)[2]، درصد کربوهیدرات محلول در آب (WSC)[3]، پروتئین خام (CP)[4]، دیواره سلولی منهای همی سلولز (ADF)[5]، خاکستر کل (ASH)[6] و فیبر خام (CF)[7] در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع براساس روش ارائه شده

1-Near infrared reflectance spectroscopy
2-Dry matter digestibility
3-Water soluble carbohydrates
4-Crude protein
5-Acid detergent fiber
6-Total ash
7-Crude fiber

توسط جعفری و همکاران (Jafari et al., 2003) انجام شد. لازم به توضیح است که نمونه علوفه از هر کرت شامل مخلوطی از ساقه، برگ، دانه و بلال به نسبت مورد اندازه‌گیری در وزن خشک این اندام‌ها و نیز نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بود. به‌منظور تعیین میزان سودمندی کشت مخلوط، شاخص‌های ارزیابی کشت مخلوط شامل کاهش یا افزایش عملکرد واقعی (AYL)[1]، نسبت برابری زمین (LER)[2] و سودمندی کشت مخلوط (IA)[3] (Javanshir et al., 2000) محاسبه شد.

نسبت برابری زمین (LER) متداول‌ترین و مهم‌ترین شاخص ارزیابی کشت مخلوط است، این شاخص اولین بار توسط مید و وایلی (Mead & Wiley, 1980) پیشنهاد شد و نشانگر مقدار زمین مورد نیاز کشت خالص هر یک از اجزاء مخلوط برای تولید عملکرد مشابه کشت مخلوط آن‌ها می‌باشد. برای محاسبه شاخص نسبت برابری زمین از معادله ۱ استفاده شد.

معادله (۱) $LER = LER_a + LER_b = Y_{ab} / Y_{aa} + Y_{ba} / Y_{bb}$

که در آن، Y_{aa} و Y_{bb}: به‌ترتیب عملکرد کشت خالص اجزاء a و b؛ Y_{ab}، Y_{ba}: نیز به‌ترتیب عملکرد کشت مخلوط اجزاء a و b را شامل می‌شود. افزایش یا کاهش عملکرد واقعی (AYL) نیز از طریق معادله ۲ محاسبه شد.

معادله (۲)
$$AYL = AYL_a + AYL_b = \left[LER_a \times \left(\frac{100}{Z_{ab}}\right) - 1\right] + \left[LER_b \times \left(\frac{100}{Z_{ba}}\right) - 1\right]$$

که در آن، AYL_a و AYL_b: به‌ترتیب افزایش و کاهش عملکرد واقعی گونه a و گونه b در کشت مخلوط، Z_{ab}: سهم گونه a در کشت مخلوط و Z_{ba}: سهم گونه b در کشت مخلوط است. در نهایت نیز شاخص سودمندی کشت مخلوط از معادله ۳ به‌دست آمد.

معادله (۳)
$$IA = \left[\left(\frac{pa}{pa + pb}\right) \times AYL_a \right] + \left[\left(\frac{pb}{pa + pb}\right) \times AYL_b \right]$$

که در آن، pa: قیمت هر واحد محصول گونه a و pb: قیمت هر واحد گونه b است. ازآنجاکه شاخص سودمندی با توجه به قیمت هر واحد محصول محاسبه می‌شود، در این شاخص براساس قیمت محصولات در منطقه، قیمت هر کیلوگرم محصول ذرت ۲۸۰۰۰ ریال و قیمت هر کیلوگرم محصول سورگوم ۲۵۰۰۰ ریال در نظر گرفته شد. داده با استفاده از نرم‌افزار SAS ver 9.1 تجزیه و تحلیل و مقایسه میانگین صفات با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)[4] در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

سهم برگ از کل زیست‌توده

دور آبیاری، نسبت‌های مختلف کشت مخلوط و اثر متقابل دو عامل تأثیر معنی‌داری بر سهم برگ از کل زیست‌توده ذرت علوفه‌ای نداشت (جدول ۳). در سورگوم نیز تأثیر دور آبیاری بر سهم برگ از کل زیست‌توده سورگوم معنی‌دار نشد. اگر چه سهم برگ در سورگوم تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری قرار نگرفت، ولی نتایج نشان داد که با افزایش دور آبیاری، سهم برگ در سورگوم افزایش داشت. صیادی آذر و همکاران (Sayyadi Azar et al., 2019) نیز در بررسی اثر دور آبیاری بر گیاه سورگوم گزارش کردند که با افزایش دور آبیاری، نسبت برگ افزایش داشت. نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر این صفت گذاشت (جدول ۳)، به‌نحوی‌که با افزایش سهم سورگوم در مخلوط، از سهم برگ در کل زیست‌توده گیاه کاسته شد و بیشترین سهم برگ (۷/۱۸–۶/۸۳ درصد) با ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد سورگوم در مخلوط حاصل شد و در کشت خالص سورگوم علوفه‌ای، سهم برگ از کل زیست‌توده به ۶/۱۷ درصد کاهش یافت (جدول ۴). بین اجزاء عملکرد در گیاهان علوفه‌ای، برگ دارای ارزش غذایی بالایی است و ساقه ارزش غذایی کمتری دارد. بنابراین، با افزایش نسبت برگ به ساقه، کیفیت علوفه افزایش می‌یابد (Arzani et al., 2004). علاوه‌براین، قابلیت هضم برگ بیشتر از ساقه است و با افزایش نسبت برگ به ساقه معمولاً کیفیت علوفه افزایش می‌یابد (Lemaire & Belanger, 2019).

کربوهیدرات‌های محلول در آب

تأثیر دور آبیاری بر میزان کربوهیدرات‌های محلول در آب معنی‌دار نبود (جدول ۳). این در حالی است که نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری ($p \leq 0.01$) بر کربوهیدرات‌های محلول در آب علوفه گذاشت (جدول ۳). علی‌رغم عدم اثر معنی‌دار دور آبیاری بر کربوهیدرات‌های محلول در

1-Actual yield loss
2-Land equivalent ratio
3-Intercropping advantage

4-Least significant difference

آب ، میزان این صفت با افزایش دور آبیاری، افزایش نشان داد. کربوهیدرات‌های محلول در آب نه‌تنها نقش مهمی در مقاومت به سرما و چرای دام دارند، بلکه تأثیر بسزایی در افزایش کیفیت علوفه نیز دارند. بنابراین، از کربوهیدرات‌های محلول در آب به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی کیفی علوفه بعد از صفت قابلیت هضم علوفه نام برده می‌شود (Nakhzari Moghaddam, 2016).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر دور آبیاری و کشت مخلوط بر برخی خصوصیات کمی و کیفی ذرت و سورگوم علوفه‌ای

Table 3- The results of variance analysis of irrigation interval and intercropping effects on some quantitative and qualitative characteristics of fodder corn and sorghum

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	سهم برگ در ذرت Leaf share in corn	سهم برگ در سورگوم Leaf share in sorghum	کربوهیدرات محلول در آب WSC	دیواره سلولی منهای همی سلولز ADF	قابلیت هضم علوفه DMD	خاکستر کل ASH	عملکرد علوفه خشک Dry fodder yield	عملکرد پروتئین خام CP yield	عملکرد فیبرخام CF yield
تکرار Replication	2	0.55^{ns}	2.80^{ns}	11.36^{ns}	19.98^{ns}	8.99^{ns}	1.71^{ns}	4.35^{ns}	0.05^{ns}	0.24^{ns}
دور آبیاری Irrigation interval (A)	2	1.24^{ns}	5.50^{ns}	41.59^{ns}	521.3*	710.1*	1.48*	29.9**	0.33*	0.25**
خطای a Error a	4	0.774	3.28	27.7	36.8	57.3	0.252	0.936	0.056	0.250
کشت مخلوط Intercropping (B)	3	0.11^{ns}	2.45*	162.6**	211.4**	439.9*	0.55^{ns}	7.20^{ns}	0.06^{ns}	3.29*
خطای b Error b	6	0.473	0.413	7.87	21.91	74.34	0.412	2.63	0.042	0.540
A×B	6	1.12^{ns}	1.27^{ns}	16.3^{ns}	27.9^{ns}	118.6*	0.51^{ns}	8.83^{ns}	0.05^{ns}	1.45^{ns}
خطای b Error b	12	0.49	1.498	7.887	12.872	47.381	0.396	7.237	0.052	1.641
CV (%)	-	12.29	17.79	10.94	13.55	20.93	13.90	20.35	22.01	21.74

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and **: non-significant, significant at the 1% and 5% probability level, respectively.

WSC: کربوهیدرات محلول‌درآب، ADF: دیواره‌سلولی منهای همی‌سلولز، DMD: قابلیت هضم علوفه، ASH: خاکسترکل، CP: عملکرد پروتئین خام، CF: عملکرد فیبر خام

WSC: water soluble carbohydrates, ADF: acid detergent fiber, DMD: dry matter digestibility, ASH: total Ash, CP: crude protein, CF: crude fiber

رهبری و همکاران (Rahbari et al., 2015) نیز نتایج مشابهی در خصوص افزایش کربوهیدرات‌های محلول در آب با افزایش دور آبیاری را گزارش و بیان نمودند که افزایش کربوهیدرات‌های محلول در آب با افزایش دور آبیاری را می‌توان به توقف رشد گیاه یا ساخت این ترکیبات از مسیرهای غیر فتوسنتزی و همچنین تخریب قندهای نامحلول نسبت داد. کمترین مقدار کربوهیدرات‌های محلول در آب (۱۹/۵۵ درصد) به کشت خالص سورگوم علوفه‌ای اختصاص داشت و افزایش مقدار ذرت در ترکیب کشت مخلوط منجر به افزایش مقدار کربوهیدرات‌های محلول در آب شد. بیشترین کربوهیدرات‌های محلول در آب نیز به ترکیب کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد سورگوم (۲۷/۹۶ درصد) و کشت خالص ذرت (۳۰/۴۵ درصد) اختصاص داشت (جدول ۴). در مطالعه‌ای، مقدار کربوهیدرات‌های محلول در آب با افزایش سهم ذرت از ۲۵ درصد به ۷۵ درصد در کشت مخلوط ذرت و سورگوم منجر به افزایش ۵/۰۴ میلی‌گرم بر گرم در علوفه گردید که این افزایش به‌دلیل کمتر بودن مقدار دیواره سلولی در ذرت نسبت به سورگوم بیان شد، زیرا به دنبال کمتر شدن دیواره سلولی، سهم بخش کربوهیدرات‌های محلول افزایش می‌یابد (Rahmanian Sharifabad et al., 2023).

دیواره سلولی منهای همی‌سلولز

تأثیر دور آبیاری بر میزان دیواره سلولی منهای همی‌سلولز در سطح پنج درصد معنی‌دار (p-value $\leq$ 0.05) بود (جدول ۳). نتایج

نشان داد که با افزایش دور آبیاری، میزان دیواره سلولی منهای همی‌سلولز کاهش یافت، به‌طوری‌که تیمار آبیاری پس از ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر کمترین میزان دیواره سلولی منهای همی‌سلولز (۱۲/۷۴ درصد) را داشته و نسبت به دور آبیاری پس از ۱۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر به‌ترتیب به‌میزان ۱۲/۴۸ و ۳۰/۷۵ درصد از دیواره سلولی منهای همی‌سلولز کمتری برخوردار بود (جدول ۴).

جدول ٤- مقایسه میانگین‌های برخی خصوصیات کمّی و کیفی علوفه تحت تأثیر دور آبیاری و کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای

Table 4- Mean comparison of some quantitative and qualitative characteristics of fodder as affected by irrigation interval and corn-sorghum intercropping

تیمار **Treatment**	عملکرد فیبرخام **CF yield**	عملکرد پروتئین خام **CP yield**	عملکرد علوفه خشک **dry fodder yield**	خاکستر کل **ASH**	قابلیت هضم علوفه **DMD**	دیواره سلولی منهای همی سلولز **ADF**	کربوهیدرات محلول در آب **WSC**	سهم برگ در سورگوم **leaf share in sorghum**	سهم برگ در ذرت **leaf share in corn**
	(ton.ha^{-1})				(%)				
					دور آبیاری Irrigation interval				
I_{100}	6.52	1.17	14.35	4.56	29.79	18.40	23.88	6.52	5.58
I_{175}	6.01	1.07	13.67	4.82	32.38	14.56	25.96	6.68	5.44
I_{250}	5.15	0.873	11.64	4.20	36.47	12.74	27.18	7.64	6.05
LSD (5%)	0.42	0.21	1.87	0.39	3.08	4.01	3.51	2.08	0.98
					کشت مخلوط Intercropping				
M	5.15	0.973	12.10	4.22	43.51	9.71	30.45	-	5.79
3M:1S	5.85	1.15	13.52	4.64	35.60	13.02	27.96	7.18	5.64
2M:2S	5.46	0.934	12.45	4.43	29.68	13.41	26.97	7.34	5.78
1M:3S	6.57	1.05	13.98	4.46	30.39	17.87	23.44	6.83	5.56
S	6.42	1.07	14.05	4.88	25.22	22.18	19.56	6.16	-
LSD (5%)	0.85	0.24	2.87	0.74	9.94	5.39	3.23	0.74	0.79

I_{100}: آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر، I_{175}: آبیاری پس از ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر، I_{250}: آبیاری پس از ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر

M: ذرت، S: سورگوم

I_{100}: irrigation after 100 mm evaporation from class A evaporation pan, I_{175}: irrigation after 175 mm evaporation from class A evaporation pan, I_{250}: irrigation after 250 mm evaporation from class A evaporation pan

M: Corn, S: Sorghum

WSC: کربوهیدرات محلول‌درآب، ADF: دیواره‌سلولی منهای همی‌سلولز، DMD: قابلیت هضم علوفه، ASH: خاکسترکل، CP: عملکرد پروتئین خام، CF: عملکرد فیبر خام

WSC: water soluble carbohydrates, ADF: acid detergent fiber, DMD: dry matter digestibility, ASH: total ash, CP: crude protein, CF: crude fiber

صفت دیواره سلولی منهای همی‌سلولز که بیان‌کننده میزان دیواره سلولی گیاه می‌باشد، به‌عنوان عاملی مهم و تأثیرگذار بر کیفیت علوفه است که افزایش آن موجب کاهش قابلیت هضم علوفه می‌گردد (Francisco et al., 2009). کاهش میزان دیواره سلولی منهای همی‌سلولز با افزایش دور آبیاری در مطالعات دیگر (Jahanzad et al., 2013; Carmi et al., 2006) نیز گزارش شد که با یافته‌های تحقیق مطابقت داشت. نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر دیواره سلولی منهای همی‌سلولز علوفه گذاشت (جدول ۳). کمترین مقدار دیواره سلولی منهای همی‌سلولز (۹/۷۱ درصد) به کشت خالص ذرت علوفه‌ای و بیشترین مقدار به کشت خالص سورگوم علوفه‌ای (۲۲/۱۸ درصد) اختصاص داشت. با افزایش مقدار سورگوم در ترکیب کشت مخلوط بر مقدار دیواره سلولی منهای همی‌سلولز علوفه حاصل افزوده شد (جدول ۴). بیشترین دیواره سلولی منهای همی‌سلولز در بین سطوح مختلف کشت مخلوط نیز در کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای (۱۷/۸۷ درصد) به‌دست آمد.

قابلیت هضم علوفه

تیمار دور آبیاری تأثیر معنی‌داری در سطح پنج درصد (p-value ≤ 0.05) بر میزان قابلیت هضم علوفه داشت (جدول ۳)، به‌طوری‌که

با افزایش دور آبیاری قابلیت هضم علوفه افـزایش یافـت. دور آبیـاری ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر نسبت به ۱۰۰ و ۱۷۵ میلی‌متـر تبخیـر بـه‌ترتیب ۲۲/۴ و ۱۲/۶ درصد قابلیت هضم علوفه بیشتری برخوردار بود (جدول ۴). قابلیت هضم علوفه، کارآیی تبدیل عناصـر مغـذی به‌وسیله دام را بهبود بخشیده و مهم‌ترین صفت برای افزایش وزن دام و تولیـد شـیر محسوب می‌گردد (Yilmaz et al., 2015). با توجه به کاهشی بودن میزان دیواره سلولی منهای همی‌سلولز علوفه، با افـزایش دور آبیـاری می‌توان دلیل افزایش قابلیت هضم علوفه با اعمـال دور آبیـاری را بـه ارتباط و همبستگی منفی بـین دیـواره سـلولی منهـای همی‌سـلولز و قابلیت هضم علوفه نسبت داد. جهان زاد و همکـاران (Jahanzad et al., 2013) بیان کردند که قابلیت هضم علوفه در آبیـاری بعـد از ۷۰ میلی‌متر تبخیر، کـاهش معنـی‌داری داشـت و دلیـل ایـن موضـوع را همبستگی منفی با میزان دیواره سلولی ذکر کردند. لایتورگایـــدیس‌و همکـــاران (Lithourgidis et al., 2006) نیز پـایین بـودن قابلیـت هضم علوفه را به بالا بودن دیواره سلولی منهای همی‌سلولز آن نسبت دادند.

نسبت‌های مختلف کشت مخلـوط ذرت و سـورگوم علوفـه‌ای در سطح احتمال یک درصد بر میزان قابلیت هضم علوفه تـأثیر گذاشـت (جدول ۳). همراه با افزایش سـهم سـورگوم علوفـه‌ای در مخلـوط، از قابلیت هضم علوفه کاسته شد (جدول ۴). کمترین مقدار قابلیت هضم علوفه (۲۵/۲۲ درصد) به کشت خالص سـورگوم علوفـه‌ای اختصـاص داشته و به‌تدریج با افزایش سهم ذرت در مخلوط، بـر میـزان قابلیـت هضم علوفه افزوده شد (جدول ۴). با افزایش سهم ذرت علوفـه‌ای بـه ۷۵ درصد مخلوط، قابلیت هضم علوفه به بیشترین سطح خود در بـین سـطوح مختلـف کشـت مخلـوط (۳۵/۶ درصـد) رسـید (جـدول ۴). لیتورگیدیز و همکاران (Lithourgidis et al., 2011) در بررسـی اثـر کشت مخلوط بر میزان قابلیت هضم علوفه نیـز گـزارش نمودنـد کـه سیستم کشت مخلوط از قابلیت هضم علوفـه بیشـتری در مقایسـه بـا سیستم تک‌کشتی برخوردار است. اثر متقابل دور آبیاری × نسبت‌های کشت مخلوط بر میزان قابلیت هضـم علوفـه در سـطح احتمـال پـنج درصد معنی‌دار (p-value ≤ 0.05) بود (جدول ۳). این تأثیر بـه‌نحوی بود که افزایش دور آبیاری در سطوح کشت خـالص ذرت علوفـه‌ای و کشت مخلوط به نسبت ۲۵ درصد سورگوم علوفه‌ای، موجـب افـزایش میزان قابلیت هضم علوفه شـده و در نسـبت‌های کشـت مخلـوط ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای و کشـت خـالص سورگوم علوفه‌ای، افزایش دور آبیاری به کاهش میزان قابلیت هضـم علوفه منجر شد (جدول ۵). در مجموع، کمترین میزان قابلیـت هضـم علوفـه در تیمـار ۲۵ درصـد ذرت علوفـه‌ای + ۷۵ درصـد سـورگوم علوفـه‌ای در دور آبیـاری ۲۵۰ میلی‌متـر تبخیـر (۱۸/۵۲ درصـد) و بیشترین میزان آن در کشت خالص ذرت علوفه‌ای با دور آبیـاری ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر (۴۴/۴۱ درصد) حاصل شد (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین قابلیت هضم علوفه (DMD)حاصل از کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای تحت تأثیر برهم‌کنش دور آبیاری × کشت مخلوط

Table 5- Mean comparison of dry matter digestibility (DMD) in fodder produced from corn and sorghum intercropping as affected by irrigation interval × intercropping interaction

دور آبیاری Irrigation interval	کشت مخلوط Intercropping				
	M	3M:1S	2M:2S	1M:3S	S
I_{100}	44.19	30.27	34.61	41.84	31.43
I_{175}	44.41	40.08	26.74	30.79	19.90
I_{250}	41.93	36.46	27.69	18.52	24.34
LSD 5%=12.24					

I_{100}: آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر، I_{175}: آبیاری پس از ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر، I_{250}: آبیاری پس از ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر

M: ذرت، S: سورگوم

I_{100}: irrigation after 100 mm evaporation from class A evaporation pan, I_{175} : irrigation after 175 mm evaporation from class A evaporation pan, I_{250}: irrigation after 250 mm evaporation from class A evaporation pan

M: corn, S: sorghum

خاکستر کل

تأثیر دور آبیاری بر میزان خاکستر کل علوفـه، در سـطح احتمـال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). با افـزایش دور آبیـاری از ۱۰۰ بـه ۱۷۵ میلی‌متر، تفاوت معنی‌داری در میزان خاکستر کـل علوفـه وجـود

نداشت، امّا با افزایش دور آبیاری به ۲۵۰ میلی‌متر، از میـزان خاکستـر کل علوفه کاسته شد (جدول ۴). به عبارت دیگر، افزایش دور آبیـاری به ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر، تأثیر معنی‌داری بر میزان خاکستر کل علوفـه نسـبت بـه دور آبیـاری نرمـال (۱۰۰ میلی‌متـر تبخیـر) نداشـت، درصورتی‌که بـا اعمـال دور آبیـاری در ۲۵۰ میلی‌متـر تبخیـر، میـزان خاکستر کل نیز کاهش یافت. کاهش کیفیـت گیاهـان بـا اعمـال دور آبیاری توسـط احمدونـد و حـاجی نیـا (Ahmadvand & Hajinia, 2019) نیز گزارش شد، به‌طوری‌که کـاهش غلظـت فسـفر در کشـت مخلوط ارزن و سویا (*Glycin max* L.) بـا اعمـال تـنش آبـی از ۶۰ میلی‌متر تبخیر بـه ۱۲۰ میلی‌متـر تبخیـر بـه‌ترتیب کـاهش ۶۷/۱۴ و ۴۰/۷ درصد را شامل گردید. خاکسـتر کـل نشـان‌دهنده میـزان مـواد معدنی موجود در بافت‌های مختلف گیاه بـوده و جـذب ایـن مـواد در شرایط تنش رطوبتی به‌دلیل کاهش سرعت انتشـار عناصـر غـذایی از خاک به سطح ریشه کاهش می‌یابد (Marshner, 1995). دور آبیاری از طریق تأثیر بر میزان جذب و حلالیت عناصر، تعرق، رشد و توسـعه سیسـتم ریشـه‌ای منجـر بـه کـاهش جـذب عناصـر در گیـاه شـده (Hopkins & Huner, 2009) و در نتیجه، میـزان مـواد معـدنی یـا خاکستر کل گیاه کاهش می‌یابد.

عملکرد کل علوفه خشک

نسبت‌های مختلف کشت مخلوط اثر معنی‌داری بر عملکـرد کـل علوفه خشک نداشت، درحالی‌که اثر دور آبیاری بر عملکرد کل علوفـه در سطح احتمال یـک درصـد معنـی‌دار بـود (جـدول ۳). بیشـترین و کمترین عملکـرد علوفـه خشـک بـا ۱۴/۳۵ و ۱۱/۶۴ تـن در هکتـار به‌ترتیب مربوط به دور آبیاری بعد از ۱۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر بـود. اخـتلاف آمـاری معنـی‌داری بـین دو تیمـار دور آبیـاری ۱۰۰ و ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر از لحاظ عملکرد علوفه خشک مشاهده نشـد؛ بـا ایـن وجود افزایش دور آبیاری از ۱۰۰ به ۱۷۵ میلی‌متر تبخیـر، بـا کـاهش ۴/۷۶ درصدی عملکرد کل علوفه همراه بود (جدول ۴). این در حـالی است که افزایش دور آبیاری به ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر ، موجب شـد کـه به‌شکل معنی‌داری عملکرد کل علوفه کاهش یافته و به ۱۱/۶۴ تن در هکتار برسد که کـاهش ۱۸/۹ درصـدی نسـبت بـه دور آبیـاری ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر را شامل شد (جدول ۴). آبیاری دیرتر به‌دلیـل کـاهش میزان رشد رویشی گیاه، میزان وزن تـر انـدام‌هـای رویشـی (بـرگ و سـاقه) را کـاهش مـی‌دهـد (Shrestha et al., 2006). موسـوی و همکاران (Mosavi et al., 2008) طی آزمایشی نشان دادند کـه اثـر دور آبیاری بر تمامی صفات عملکرد تر و خشک کل، عملکرد خشـک و تر برگ و ساقه و گل‌آذین علوفه معنی‌دار بود و افزایش دور آبیـاری سـبب کـاهش معنـی‌دار ایـن صـفات شـد. صـیادی آذر و همکـاران (Sayyadi Azar et al., 2019) اعـلام نمودنـد کـه بـا افـزایش دور آبیاری از میزان عملکرد علوفه کاسته شـد، به‌طوری‌کـه افـزایش دور آبیاری از ۶۰ میلی‌متر تبخیر به ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر منجر به کـاهش ۲۶ درصدی عملکرد علوفه گردید. کاهش میـزان عملکـرد علوفـه بـا افزایش دور آبیاری، به کاهش جذب عناصـر غـذایی، کـاهش سـطح برگ و فتوسنتز گیاه و افزایش رادیکال‌هـای فعـال اکسـیژن در گیـاه نسبت داده می‌شود (Marsalis et al., 2010).

عملکرد پروتئین خام علوفه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رژیـم آبیـاری بـر عملکـرد پروتئین خـام در سـطح احتمـال پـنج درصـد معنـی‌دار بـود، امّـا اثـر نسبت‌های مختلف کشت مخلوط روی عملکرد پروتئین خام معنـی‌دار نبود (جدول ۳). اختلاف معنی‌داری در عملکرد پـروتئین خـام بـین دو رژیم آبیاری ۱۰۰ و ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر وجود نداشت، بـا ایـن وجـود افزایش دور آبیاری از ۱۰۰ به ۱۷۵ میلـی‌متـر منجـر بـه کـاهش ۸/۵ درصدی عملکرد پروتئین خام شد؛ این در حالی است کـه بـا افـزایش دور آبیاری به ۲۵۰ میلی‌متـر تبخیـر، عملکـرد پـروتئین خـام، ۲۵/۱۹ درصد کاهش یافت (جدول ۴). کاهش درصد پروتئین بـا افـزایش دور آبیاری توسط میسرا (Misra, 1994) نیز گزارش شده است. علت این امر را می‌توان به تجزیه برخی پروتئین‌ها و عدم سنتز دوباره آن‌هـا در این شرایط مربوط دانست (Kramer, 1983).

عملکرد فیبر خام علوفه

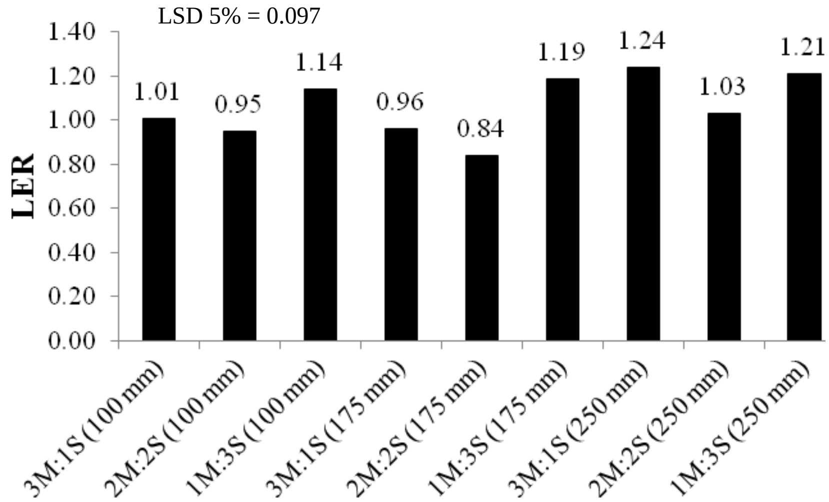
عملکرد فیبر خام علوفه از لحـاظ آمـاری تحـت تـأثیر تیمارهـای مختلف رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد و کشـت مخلـوط در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت (جدول ۳). افزایش دور آبیـاری از ۱۰۰ به ۱۷۵ و ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر بـه‌ترتیب باعـث کـاهش ۷/۹۳ و ۲۱/۱۱ درصدی عملکرد فیبـر خـام علوفـه گردیـد (جـدول ۴). تـأثیر نسبت‌های مختلف کشت مخلوط بر عملکرد فیبر خام علوفه نشان داد که همراه با افزایش سهم سورگوم علوفـه‌ای بـر عملکـرد فیبـر خـام علوفه افزوده شد (جدول ۳). بیشترین عملکرد فیبر خام علوفه در تیمار

کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای با ۶/۵۷ تن در هکتار و کمترین مقدار آن در کشت خالص ذرت به‌میزان ۵/۱۶ تن در هکتار تولید شد (جدول ۴). در تحقیقی که به منظور مقایسه عملکرد سه گیاه علوفه‌ای تحت شرایط آبیاری محدود انجام شده بود، عملکرد بیشتر ماده خشک ذرت علوفه‌ای در مقایسه با سورگوم علوفه‌ای گزارش شد و علت بالا بودن مقدار عملکرد علوفه خشک در ذرت به داشتن بافت‌های خشبی در مقایسه با سورگوم علوفه‌ای نسبت داده شد (Nabati & Rezvani Moghadam, 2010). با توجه به این ویژگی ژنتیکی و همچنین با توجه به مقدار علوفه تر این گیاهان انتظار می‌رود که مقدار علوفه خشک بالا بوده و از روند علوفه تر پیروی کند.

ارزیابی کشت مخلوط

نسبت برابری زمین

نتایج نشان داد که در اکثر ترکیب‌های مختلف کشت مخلوط در سطوح مختلف آبیاری، نسبت برابری زمین بیشتر از یک بود (شکل ۱) که بیانگر سودمندی کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی می‌باشد (Balasubramanian & Sekayange, 1990; Ahmadvand & Hajinia, 2019). بیشترین نسبت برابری زمین به کاشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۲۵ درصد سورگوم علوفه‌ای با دور آبیاری ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر (۱/۲۴) و کمترین آن به کشت مخلوط ۵۰ درصد ذرت علوفه‌ای + ۵۰ درصد سورگوم علوفه‌ای با دور آبیاری ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر (۰/۸۴) اختصاص داشت (شکل ۱). نتایج نشان داد که در شرایط آبیاری دیربه‌دیر، استفاده از سیستم کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص منجر به کارآیی بیشتر در تولید علوفه شد. همچنین کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای با دور آبیاری ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر (با نسبت برابری زمین معادل ۱/۲۱) در مقایسه با آبیاری نرمال (۱۰۰ میلی‌متر تبخیر با نسبت برابری زمین ۱/۱۴) از ۰/۷ نسبت برابری زمین بالاتری برخوردار بود. بهشتی و همکاران (Beheshti et al., 2019) نیز گزارش کردند که نسبت برابری زمین در کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای در شرایط نرمال و تنش بیشتر از یک بوده و این برتری در شرایط محدودیت آبی بیشتر از شرایط نرمال آبیاری بود که دلیل این موضوع را افزایش کارآیی مصرف آب و استفاده بهتر از منابع آبی در شرایط تنش و در نتیجه، افزایش نسبت برابری زمین نسبت به شرایط نرمال آبیاری بیان کردند.



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل دور آبیاری × کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای بر نسبت برابری زمین

Fig. 1- Mean comparison of irrigation interval × corn and sorghum intercropping interaction on LER

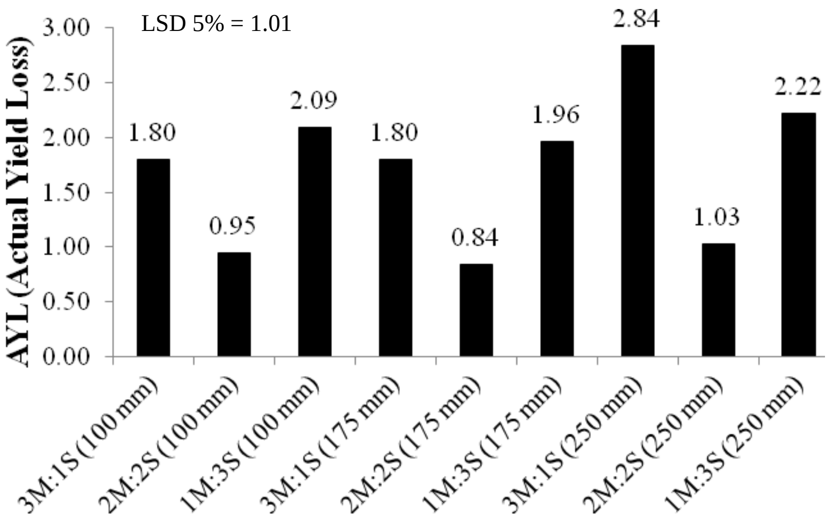
3M:1S (۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد سورگوم)، **2M:2S** (۵۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد سورگوم)، **1M:3S** (۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد سورگوم)

3M:1S (75% corn + 25% sorghum), 2M:2S (50% corn + 50% sorghum), 1M:3S (25% corn + 75% sorghum)

افت واقعی عملکرد

نتایج آزمایش در خصوص اثر ترکیب‌های مختلف کشت مخلوط

در سطوح آبیاری نشان داد که بیشترین افت واقعی عملکرد (۲/۸۴) در تیمار کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۲۵ درصد سورگوم علوفه‌ای در تنش شدید کم‌آبی یعنی با دور آبیاری ۲۵۰ میلی‌متر و و کمترین مقدار (۰/۸۴) در کشت مخلوط ۵۰ درصد ذرت علوفه‌ای + ۵۰ درصد سورگوم علوفه‌ای با دور آبیاری ۱۷۵ میلی‌متر به‌دست آمد (شکل ۲). اگر شاخص افت واقعی عملکرد مثبت باشد، برتری کشت مخلوط نسبت به کشت خالص و در صورتی که مقدار این شاخص منفی باشد، برتری کشت خالص را نسبت به کشت مخلوط نشان می‌دهد (Mansouri et al., 2013). بنابراین، با توجه به مقادیر مثبت به‌دست آمده برای شاخص افت واقعی عملکرد در آزمایش می‌توان عنوان کرد که کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای نسبت به کشت خالص هر دو گونه برتری داشت. در بررسی کشت مخلوط ذرت با ارزن نیز مشخص شد که مقادیر شاخص افت واقعی عملکرد برای تیمارهای مختلف کشت مخلوط مورد بررسی مثبت بود که بیانگر سودمندی کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی بود که علت این امر، استفاده بهتر از منابع تولید در کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص و مهار جمعیت علف‌های هرز در کشت مخلوط عنوان شد (Shaygan et al., 2008).



شکل ۲- افت واقعی عملکرد (AYL) ترکیب‌های مختلف تیماری دور آبیاری × نسبت‌های کشت مخلوط

Fig. 2- AYL values for different treatments of irrigation interval × intercropping

3M:1S (۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد سورگوم)، **2M:2S** (۵۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد سورگوم)، **1M:3S** (۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد سورگوم)

3M:1S (75% corn + 25% sorghum), 2M:2S (50% corn + 50% sorghum), 1M:3S (25% corn + 75% sorghum)

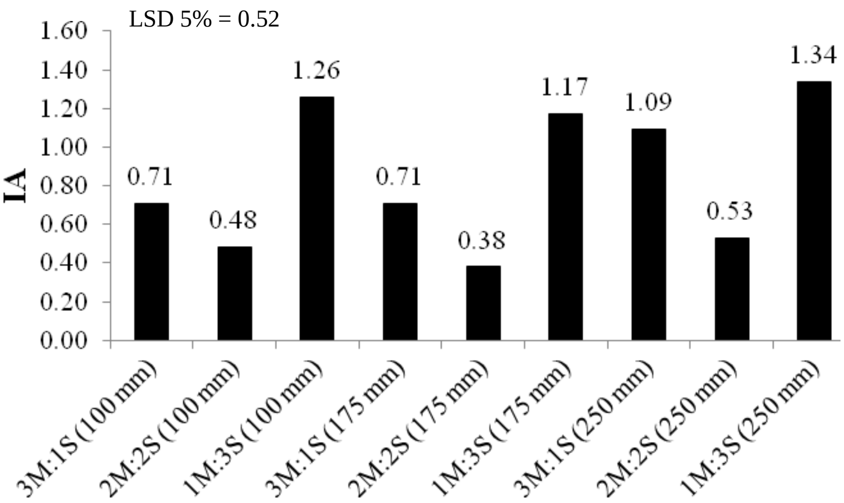
سودمندی کشت مخلوط

با توجه به اینکه شاخص سودمندی کشت مخلوط تاکید بر سودمندی اقتصادی کشت مخلوط دارد، نتایج به‌دست آمده در این شاخص با دیگر شاخص‌های ارزیابی کشت مخلوط در این مطالعه متفاوت بود، به‌طوری‌که بیشترین شاخص سودمندی کشت مخلوط در کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای با دور آبیاری ۲۵۰ میلی‌متر (۱/۳۴) به‌دست آمد، امّا همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، در شاخص‌های LER و AYL، بالاترین برتری کشت مخلوط در کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت علوفه‌ای + ۲۵ درصد سورگوم علوفه‌ای با دور آبیاری ۲۵۰ میلی‌متر مشاهده شد. کمترین شاخص سودمندی کشت مخلوط نیز مربوط به کاشت مخلوط ۵۰ درصد ذرت علوفه‌ای + ۵۰ درصد سورگوم علوفه‌ای در دور آبیاری ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر (۰/۳۸) بود (شکل ۳).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دور آبیاری، عملکرد علوفه کل، میزان خاکستر کل، عملکرد پروتئین خام و عملکرد فیبر خام علوفه کاهش یافت. در بررسی اثر کشت مخلوط بر خصوصیات کیفی علوفه، نتایج حاکی از این بود که با افزایش سهم سورگوم در کشت مخلوط، میزان سهم برگ در کل زیست‌توده گیاه سورگوم، قندهای محلول در آب و قابلیت هضم علوفه کاهش معنی‌داری داشت. به‌طور کلی، ارزیابی سودمندی کشت مخلوط براساس شاخص

LER و AYL نشان داد که کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت علوفه‌ای به همراه ۲۵ درصد سورگوم علوفه‌ای در تنش شدید کم‌آبی (دور آبیاری ۲۵۰ میلی‌متر تبخیر) در مقایسه با سایر نسبت‌های کشت مخلوط از برتری بالاتری نسبت به تک‌کشتی گونه‌ها برخوردار بود.



شکل ۳- سودمندی کشت مخلوط (IA) در ترکیب‌های مختلف تیماری دور آبیاری × نسبت‌های کشت مخلوط

Fig. 3- IA values for different treatments of irrigation interval × intercropping

3M:1S (۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد سورگوم)، **2M:2S** (۵۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد سورگوم)، **1M:3S** (۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد سورگوم)

3M:1S (75% corn + 25% sorghum), 2M:2S (50% corn + 50% sorghum), 1M:3S (25% corn + 75% sorghum)

البته لازم به ذکر است که براساس شاخص IA که تأکید بر سودمندی اقتصادی کشت مخلوط دارد، کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت علوفه‌ای به همراه ۷۵ درصد سورگوم علوفه‌ای در شرایط تنش شدید رطوبتی به‌عنوان بهترین نسبت کشت مخلوط معرفی شد. در شرایط تنش، اختلاف آماری معنی‌داری بین دو تیمار ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد سورگوم و تیمار ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد سورگوم براساس شاخص‌های ارزیابی مزیت کشت مخلوط مشاهده نشد. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از کشت مخلوط گونه‌ها به‌ویژه در شرایط محدودیت آبیاری می‌تواند راهکار مناسبی در جهت بهبود تولید علوفه در مقایسه با کشت خالص گونه‌ها باشد. با توجه به نتایج سودمندی کشت مخلوط، تیمار ۷۵ درصد ذرت به همراه ۲۵ درصد سورگوم در شرایط تنش و نسبت کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت به همراه ۷۵ درصد سورگوم در شرایط نرمال آبیاری به‌عنوان تیمار برتر عنوان شد.

References

1. Ahmadvand, G., & Hajinia, S. (2019). Effect of intercropping on water use efficiency, yield quantity and quality of millet and soybean in different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *49*(4), 97-113. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.230808.654302
2. Arzani, H. (2008). *Forage Quality and Daily Requirement of Grazing Animal*. University of Tehran Press, Tehran, Iran. p. 354.
3. Arzani, H., Zohdi, M., Fish, E., Amiri, G.Z., Nikkhah, A., & Wester, D. (2004). Phenological effects on forage quality of five grass species. *Journal of Range Management*, *57*(6), 624-629. https://doi.org/10.2111/1551-5028(2004)057[0624:PEOFQO]2.0.CO;2
4. Balasubramanian, V., & Sekayange, L. (1990). Area harvests equivalency ratio for measuring efficiency in multi season intercropping. *Agronomy Journal*, *82*, 519-522. https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200030016x

5. Beheshti, A., Kiani Feriz, M.R., Basaf, M., & Nabavi, G. (2019). The impact of maize and sorghum intercropping on water use efficiency and forage production. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, 7(2), 187-196. https://doi.org/10.22092/rafhc.2019.122230.1145
6. Carmi, A., Aharoni, Y., Edelstein, M., Umiel, N., Hagiladi, A., Yosef, E., Nikbachat, M., Zenou, A., & Miron, J. (2006). Effects of irrigation and plant density on yield, composition and *in vitro* digestibility of a new forage sorghum variety, Tal, at two maturity stages. *Animal Feed Science and Technology, 131,* 120–132. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.02.005
7. Chamkhi, I., Cheto, S., Geistlinger, J., Zeroual, Y., Kouisni, L., Bargaz, A., & Ghoulam, C. (2022). Legume-based intercropping systems promote beneficial rhizobacterial community and crop yield under stressing conditions. *Industrial Crops and Products, 183,* 114958. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114958
8. Cominelli, E., & Tonelli, C. (2010). Transgenic crops coping with water scarcity. *New Environmental Management, 185,* 21-30. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2010.08.005
9. Dahmardeh, M., & Hodiani, A. (2016). Assessment of soil elements in intercropping based on mathematical modelling. *Computers and Electronics in Agriculture, 122,* 218–224. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.036
10. Francisco, E., Govea, C., Muck, E.R., Armstrong, L.K., & Albrecht, K. (2009). Ferment ability of corn–lablab bean mixtures from different planting densities. *Animal Feed Science and Technology, 149,* 298–306. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.05.009
11. Hasanvand, M., Hoseini, M.B., & Jahansooz, M.R. (2019a). Effect of replacing ratios of maize: Sorghum intercropping on yield and yield components. *Iranian Journal of Field Crop Science, 50(3),* 109-120. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.248035.654421
12. Hasanvand, M., Hoseini, M.B., & Jahansooz, M.R. (2019b). The effect of intercropping of maize: Sorghum on grain and forage yield. *Iranian Journal of Field Crop Science, 50(2),* 11-21. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.233771.654325
13. Heydari, S. (2015). Evaluation of seed yield and yield components for intercropped foxtail millet (*Setaria italica*) and sorghum (*Sorghum bicolor*). M.Sc. Thesis, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. p. 78. (In Persian with English abstract).
14. Hopkins, W.G., & Huner, N.P.A. (2009). *Introduction to Plant Physiology*, Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc. New York, USA.
15. Jafari, A., Connolly, V., Frolich, A., & Walsh, E.K. (2003). A note on estimation of quality in perennial ryegrass by near infrared spectroscopy. Irish *Journal of Agricultural and Food Research*, *42*, 293-299.
16. Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.R., & Dashtaki, M. (2013). Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. *Agricultural Water Management*, *117,* 62-69. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.001
17. Javanshir, A., Dabbagh, A., & Hamidi, A. (2000). *The Ecology of Intercropping*. Jihad Daneshgahi of Mashhad Press, Mashhad, Iran. p. 222. (In Persian with English abstract).
18. Khajeh Khezri, A., Rezaei Estakhroeih, A., & Golestani Kermani, S. (2018). Evaluating the effects of alternative and regulated deficit irrigation on yield and some components in intercropping (sorghum – red bean). *Irrigation Sciences and Engineering, 41(2),* 77-92. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22055/jise.2018.13614
19. Khatami, S.S., Bouzarjomehri, K., Zarrin, A., & Falsolayman, M. (2022). Analysis of water resources management studies in Iran and the world. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(2), 251-271. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.73891.1136
20. Kramer, P.J. (1983). *Water Relation of Plants*. Academic Press, New York.
21. Lemaire, G., & Belanger, G. (2019). Allometries in plants as drivers of forage nutritive value: A review. *Agriculture*, *10*(1), 5. https://doi.org/10.3390/agriculture10010005
22. Lesoing, G.W., & Francis, C.A. (1999). Strip intercropping effects on yield and yield components of corn, grain sorghum, and soybean. *Agronomy Journal*, *91*(5), 807-813. https://doi.org/10.2134/agronj1999.915807x
23. Lithourgidis, A.S., Vlachostergios, D.N., Dordas, C.A. & Damalas, C.A. (2011). Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea cereal intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, *34*, 287-294. https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.007

24. Lithourgidis, A.S., Vasilakoglou, I.B., Dhima K.V., Dordas, C.A., & Yaikoulaki, M.D. (2006). Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, *99*, 106-113. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.03.008
25. Mansouri, L., Jamshidi, K., Rastgoo, M., Saba, J., & Mansouri, H. (2013). The Effect of additive maize-bean intercropping on yield, yield components and weeds control in Zanjan climate conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *11*(3), 483-492. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v11i3.29751
26. Marsalis, M.A., Angadi, S.V., & Contreras-Govea, F.E. (2010). Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates. *Field Crops Research*, *116*, 52–57. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.11.009
27. Marshner, H. (1995). *Mineral Nutrient of Higher Plants*. Academic Press, London.
28. Mead, R., & Wiley, R.W. (1980). The concept of a "Land Equivalent Ratio" and advantage in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*, *16*(3), 217-228. https://doi.org/10.1017/S0014479700010978
29. Misra, A.N. (1994). Pearl millet, seedling establishment under variable soil moisture stress. *Acta Physiologia Plantarum*, *16*(2), 101-103.
30. Mosavi, G., Seghat-eslami, M.J., Javadi, H., & Ansariniya, A. (2008). Effect of irrigation interval and planting pattern on grain yield and its components in forage sorghum cv. Speed- Feed under Birjand conditions. 10th Iranian Crop Science Congress. 18 August. Karaj, Iran. (In Persian)
31. Nabati, J., & Rezvani Moghaddam, P. (2010). Effect of irrigation intervals on the yield and morphological characteristics of forage millet, sorghum and corn. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *41*(1), 179-186. (In Persian with English abstract).
32. Nakhzari Moghaddam, A. (2016). Effect of nitrogen and different intercropping arrangements of barley (*Hordeum vulgare* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) on forage yield and competitive indices. *Journal of Agroecology*, *8*(1), 47-58. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v8i1.12534
33. Ogindo, H.O., & Walker, S. (2005). Comparison of measured changes in seasonal soil water content by rained maize- bean intercrop and component cropping in semi-arid region in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, *30*, 799-808. https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.08.023
34. Oliver, A.l., Grant, R.J., Pedersen, J.F., & Rear, J.O. (2004). Comparison of brown mbidrib-6 and -18 forage sorghum with conventional sorghum and corn silage. *Journal of Dairy Science*, *87*, 637-644. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73206-3
35. Oweis, T., & Hachum, A. (2006). Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management*, *80*(1-3), 57-73. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.004
36. Rahbari, A., Masood Sinaki, J., & Zarei, M. (2015). Effects of phosphate fertilizer and less irrigation on grain yield of the forage millet. *Journal of Agronomy Science*, *5*(10), 27-38.
37. Rahmanian Sharifabad, N., Salehifar. E., & Foroghi, A. (2023). Effect of harvest stage and ratio of forage sorghum to corn silage on its nutritional value and degradability. *Iranian Journal of Animal Science Research*, *14*(4), 487-504. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ijasr.2022.70346.1024
38. Sarto, M.V., Borges, W.L., Sarto, J.R., Rice, C.W., & Rosolem, C.A. (2020). Root and shoot interactions in a tropical integrated crop–livestock–forest system. *Agricultural Systems*, *181*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102796
39. Sarto, M.V., Borges, W.L., Bassegio, D., Rice, C., & Rosolem, C. A. (2021). Maize and sorghum root growth and yield when intercropped with forage grasses. *Agronomy Journal*, *113*(6), 4900-4915. https://doi.org/10.1002/agj2.20920
40. Sayyadi Azar, Z., Javanmard, A., Shekari, F., Abbasi, A., & Amani Machiani, M. (2019). Amount of production and nutritional value of cultivated forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) with integrated application of bio and chemical fertilizers under different irrigation regimes. *Journal of Agroecology*, *11*(3), 1021-1035. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v11i3.71013
41. Shaygan, M., Mazaheri, D., Rahimian Mashhadi, H., & Peyghambari, S.A. (2008). Effect of planting date and intercropping of maize (*Zea mays* L.) and foxtail millet (*Setaria italica* L.) on their grain yield and weeds control. *Iranian Journal of Crop Science*, *10*(1), 31-46. (In Persian with English abstract). http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1387.10.1.3.6

42. Shrestha, R., Turner, N.C., Siddique, K.H.M., Turner, D.W., & Speijers, J. (2006). A water deficit during pod development in lentils reduces flower and pod number but not pod size. *Australian Journal of Agricultural Research*, *57*(4), 427-438. https://doi.org/10.1071/AR05225
43. Yilmaz, Ş., Özel, A., Atak, M., & Erayman, M. (2015). Effects of seeding rates on competition indices of barley and vetch intercropping systems in the eastern mediterranean. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *39*(1), 135–143. https://doi.org/10.3906/tar-1406-155
44. Zhang, Y., Chen, F., Li, L., Chen, Y., Liu, B.R., Zhou, Y.L., Yuan, L.X., Zhang, F.S., & Mi, G.H. (2012). The role of maize root size in phosphorus uptake and productivity of maize/faba bean and maize/wheat intercropping systems. *Research Paoer*, *55*, 993-1001. https://doi.org/10.1007/s11427-012-4396-6

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 661-681

Evaluation of Yield, Yield Component and Usefulness Indices of Bean (*Phaseolus vulgaris*) and Maize (*Zea mays*) Intercropping under Inoculation with *Rhizobium phaseoli*

Ebrahim Zolfagari Kotbehsara[1], Peyman Sharifi[2*] and Mohammad Hossein Ansari[2]

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran, respectively.
(*- Corresponding author's Email: sharifi@iaurasht.ac.ir & peyman.sharifi@gmail.com)

Received: 06-02-2024 Revised: 05-04-2024 Accepted: 08-05-2024 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Zolfagari Kotbehsara, E., Sharifi, P., & Ansari, M. H. (2025). Evaluation of yield, yield component and usefulness indices of bean (*Phaseolus vulgaris*) and maize (*Zea mays*) intercropping under inoculation with *Rhizobium phaseoli*. *Journal of Agroecology*, *16*(4), 661-681. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.86727.1191

Introduction

Intercropping involves cultivating two or more crops together in the same field within a single cropping year. One common method to supply nitrogen to plants is through the use of chemical fertilizers containing nitrogen. However, excessive use of nitrogen fertilizers conflicts with the principles of sustainable agriculture. An alternative approach is to utilize microorganisms capable of nitrogen fixation, such as rhizobial bacteria and non-symbiotic bacteria (*Azospirillum*, *Herbaspirillum*, *Azotobacter*, etc.). The purpose of this study is to evaluate the usefulness of intercropping of Guilan bean (*Phaseolus vulgaris*) landrace and maize (*Zea mays*) under inoculation with Rhizobium *phaseoli*.

Materials and Methods

The present study was conducted in Talesh, Guilan province, as split plots based on the randomized complete block design with three replications. The main factor was the use of bacteria at two levels (inoculation and non-inoculation) and the split factor was the ratio of maize-bean intercropping in five levels (monoculture of maize and bean, 25% bean + 75% maize, 50% bean + 50% maize and 75% bean + 25% maize). Maize and bean seeds were planted simultaneously on May 22, 2022. Beans were harvested in late August, and maize was harvested in mid-September. Each gram of inoculant contained 10^7 bacterial cells. To inoculate with bacteria, the seeds were first coated with Arabic gum, and then 10 grams of inoculant was added per kilogram of seeds. Planting was done after half an hour and drying the inoculated seeds in the shade. After measuring seed yield at harvest, various indices were used to evaluate the effectiveness of intercropping, including the Land Equivalence Ratio (LER), Relative Crowding Coefficient (RCC), Competition Ratio (CR), Aggressivity, and Relative Value Total (RVT). The analysis involved variance assessment, mean comparisons, and calculations of intercropping usefulness indices, all performed using R software.

https://doi.org/10.22067/agry.2024.86727.1191

Results and Discussion

In bean, the effect of inoculation was significant on plant height, number of pods per plant, number of seeds per pod, pod length, hundred seed weight, biological yield, seed yield, and harvest index and the effect of intercropping was significant on plant height, number of pods per plant, number of seeds per pod, biological yield, seed yield and harvest index and the interaction effects of two factor were significant on plant height, biological yield and seed yield. In maize, the effect of inoculation was significant on plant height, ear length and grain yield. The effect of intercropping was significant on plant height, ear length, number of grains in the ear, grain yield, biological yield and harvest index, and the interaction effects of two factors were significant on ear length and hundred-grain weightUnder both inoculated and non-inoculated conditions, the Land Equivalence Ratio (LER) exceeded one across all intercropping ratios, demonstrating the superiority of intercropping over monoculture in these systems. The highest LER and Relative Crowding Coefficient (RCC) were observed in the planting ratio of 75% bean + 25% maize under inoculated conditions, indicating that inoculation enhanced the yield of both species compared to non-inoculated conditions. In the inoculated condition, the Competition Ratio (CR) was greater than 1 for beans and less than 1 for maize across all intercropping ratios. However, under non-inoculated conditions, for the ratios of 75% bean + 25% maize and 25% bean + 75% maize, the CR was greater than 1 for maize and less than 1 for beans. This shift indicates that maize had a lower competitive ability compared to beans in inoculated conditions within the mixed cropping system. The Aggressivity index for beans was positive under inoculated conditions across all three intercropping ratios, further supporting its competitive advantage. The Relative Value Total (RVT), which combines the RVT values of beans and maize, was greater than 1 in all intercropping ratios, highlighting the economic benefits of mixed cropping compared to monocropping of either species.

Conclusion

In general, for the sustainable production of crops, the intercropping of bean and maize under inoculation with *rhizobium* bacteria can be one of the suitable solutions to reach the optimal yield performance.

Keywords: Biological nitrogen fixation, Growth promoting bacteria, Land Equivalence Ratio, Rhizobial symbiosis, Sustainable agriculture

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ١٦، شماره ٤، زمستان ١٤٠٣، ص ٦٨١-٦٦١

ارزیابی عملکرد، اجزاء عملکرد و شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) و ذرت (*Zea mays*) تحت تلقیح با باکتری *Rhizobium phaseoli*

ابراهیم ذوالفقاری خطبه سرا[۱]، پیمان شریفی[۲*] و محمدحسین انصاری[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

چکیده

کشت مخلوط، به‌عنوان روشی مؤثر برای استفاده از منابع، سبب افزایش عملکرد و پایداری محصول در مقایسه با کشت خالص می‌شود. مطالعه حاضر به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اصلی در دو سطح (تلقیح و عدم تلقیح با باکتری) و فاکتور فرعی، نسبت کشت مخلوط ذرت (*Zea mays*)- لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) (کشت خالص ذرت و لوبیا، نسبت‌های ۲۵ درصد لوبیا + ۷۵ درصد ذرت، ۵۰ درصد لوبیا + ۵۰ درصد ذرت و ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا) بود. بیشترین نسبت برابری زمین (LER) و ضریب ازدحام نسبی (RCC) در نسبت ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا در شرایط تلقیح با باکتری به‌دست آمد، که نشانگر این است که تلقیح با باکتری، سبب افزایش عملکرد هر دو گونه گیاهی در مقایسه با شرایط عدم تلقیح شد. در شرایط تلقیح با باکتری، شاخص نسبت رقابت (CR) در تمام نسبت‌های کشت مخلوط، برای لوبیا بالاتر از یک و برای ذرت کمتر از یک بود. کمتر بودن این شاخص برای ذرت نسبت به لوبیا نشان می‌دهد که در این شرایط، ذرت در کشت مخلوط، توانایی رقابت کمتری نسبت به لوبیا داشت. در شرایط تلقیح با باکتری، شاخص قابلیت تهاجم برای لوبیا مثبت بود. مجموع ارزش نسبی (RVT) برای دو گونه گیاهی، در کلیه نسبت‌های کشت مخلوط، بالاتر از یک بود که نشان‌دهنده سودمندی اقتصادی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص دو گونه بود. در مجموع، این نتایج نشان داد که کشت مخلوط لوبیا و ذرت تحت تلقیح با باکتری *ریزوبیوم*، می‌تواند راهکاری مناسب برای دسترسی به عملکرد مطلوب باشد.

واژه‌های کلیدی: باکتری محرک رشد، تثبیت زیستی نیتروژن، کشاورزی پایدار، نسبت برابری زمین، همزیستی ریزوبیومی

مقدمه

افزایش تنوع در تولید یکی از ارکان کشاورزی پایدار محسوب می‌شود و کشت مخلوط گیاهان زراعی یکی از بهترین راه‌های افزایش تنوع در تولید به‌شمار می‌آید (Chen et al., 2022). کشت مخلوط به کشت دو و یا تعداد بیشتری محصول زراعی گفته می‌شود که با یکدیگر در یک قطعه زمین و در یک سال زراعی کشت می‌شوند، به ترتیبی که یک گیاه در بیشتر دوره رویش خود در کنار گیاه دیگر باشد (Raei et al., 2020). البته لزومی ندارد که این گیاهان با هم کاشت و برداشت شوند، بلکه می‌توان یک گیاه را همزمان یا مدتی پس از گیاه اول کشت نمود و همزمان، پیش و یا پس از آن، برداشت کرد. مهم‌ترین اهداف کشت مخلوط، افزایش تنوع، پایداری و نمود مشارکت بیش از رقابت است (Zhao et al., 2020). برخی از مزیت‌های نسبی آن نیز شامل ثبات بیشتر عملکرد، کارآیی بالاتر، استفاده بهینه از زمین و نیروی کارگری، افزایش توانایی رقابتی در مهار علف‌های هرز، بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک به‌دلیل افزایش تثبیت نیتروژن حاصل از جزء بقولات و نیز استفاده

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران.
(*- نویسنده مسئول: (Email: sharifi@iaurasht.ac.ir
https://doi.org/10.22067/agry.2024.86727.1191

بهتر از عوامل محیطی مانند نور، آب و مواد غذایی موجود در خاک است. علاوه‌براین، کشت مخلوط لگوم و غیرلگوم برای بهبود کیفیت و کمیت محصولات علوفه‌ای نیز در نظر گرفته می‌شود (Banik et al., 2006). معمولاً در کشت مخلوط با حبوبات، ذرت (*Zea mays*) به‌عنوان یک غله ترجیحی در ترکیب با لوبیا (*Phaseolus vulgaris*)، باقلا (*Vicia faba*) یا سویا (*Glycine max*) استفاده می‌شود. در مطالعات مشابه درباره کشت مخلوط حبوبات و ذرت، گبیهو و سیمانه (Gebyehu & Simane., 2006) تفاوت معنی‌دار تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن ۱۰۰ دانه و شاخص برداشت لوبیا را گزارش کردند. توسوبو و همکاران (Tsubo et al., 2001) نیز نشان دادند که کشت مخلوط لوبیا با ارقام زودرس ذرت سودمندتر بود و نسبت برابری زمین با مقادیر بیشتر از یک در آن‌ها بیشتر از بقیه ارقام بود. آن‌ها با بررسی کارآیی مصرف نور در کشت مخلوط نشان دادند که کارآیی جذب نور در کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص بود و تجمع بیشتر ماده خشک در کشت مخلوط عمدتاً مربوط به دریافت زیادتر نور بود. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2010) نشان دادند که بیشترین میزان تجمع ماده خشک در کشت نواری دو ردیفی ذرت و لوبیا و کمترین آن در کشت خالص به‌دست آمد،بنابراین با افزایش عرض نوار، تجمع ماده خشک به‌تدریج کاهش یافت. در تحقیق دیگری در کشت مخلوط ذرت و لوبیا نشان داده شد که بیشترین نسبت برابری کل زمین برابر با ۱/۲۴ از کشت دو ردیف لوبیا و دو ردیف ذرت به‌دست آمد (Charani et al., 2017). در آزمایش دیگری با کشت مخلوط لوبیا و ذرت نشان داده شد که ضریب تراکم نسبی کل (RCC) در تمام سیستم‌های کشت مخلوط بالاتر از یک بود که بیانگر مزیت عملکرد در کشت مخلوط بود. مقدار نسبت رقابتی (CR) لوبیا کمتر از ذرت بود که بیانگر این است که لوبیا در سیستم کشت مخلوط، توان رقابتی کمتری نسبت به ذرت داشت (Charani et al., 2018).

نیتروژن مهم‌ترین عنصر برای رشد و تولید محصول در سیستم‌های تک‌کشتی و کشت مخلوط است که یک راهکار تأمین آن، استفاده از کودهای شیمیایی حاوی نیتروژن است. امّا کاربرد بیش از حد کودهای شیمیایی، علاوه‌بر آسیب‌های زیست‌محیطی و افزایش هزینه تولید، با کشاورزی پایدار در تضاد است. ازاین‌رو، راهکار دیگر برای افزایش نیتروژن خاک، تحت مدیریت تغذیه‌ای برای تولید محصول سالم و ارزان، استفاده از باکتری‌هایی با قابلیت تثبیت بیولوژیک نیتروژن مانند باکتری‌های همزیست ریزوبیومی و غیرهمزیست (*آزوسپریلوم*، *هرباسپریلوم* و *ازتوباکتر* و .....) است (Sharma & Garg, 2018). در گیاهان خانواده لگومینوز مانند لوبیا، باقلا، سویا و نخود (*Cicer arietinum*)، باکتری‌های همزیست ریزوبیومی مستقر روی ریشه گیاه میزبان، می‌توانند نیتروژن اتمسفری را تثبیت و در اختیار گیاه قرار دهند (Sharma & Garg, 2018). در همین راستا، بقاتاچارجه و همکاران (Bhattacharjee et al., 2008) افزایش مقدار نیتروژن برگ گیاه میزبان را تا ۳۰-۴۵ میلی‌گرم، ناشی از تثبیت N_2، در گیاهچه‌های شش هفته‌ای لوبیا گزارش نموده‌اند. این گروه از باکتری‌ها علاوه‌بر قابلیت تثبیت N_2 به‌روش همزیستی، در حل کردن عناصری چون فسفر، پتاسیم و آهن شرکت می‌کنند و توانایی تولید فیتوهورمون‌ها، ویتامین‌ها و سیدروفورها را نیز دارند (Hasen & Bin-Sahid, 2016). به این ریزجانداران به‌دلیل اثرات مثبتی که در تحریک رشد گیاه دارند، ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه[1] گفته می‌شود (Vora et al., 2021). به همین دلایل، علاقه زیادی به توسعه استفاده از این نوع باکتری‌ها، به‌عنوان جایگزین کودهای شیمیایی یا برای کاهش مقدار استفاده از آن‌ها وجود دارد (Aguirre-Noyola et al., 2021).

در کشت مخلوط ذرت و لوبیا، این دو گیاه می‌توانند با در هم آمیختن ریشه‌های خود، محیط ریشه را برای افزایش تثبیت نیتروژن، جذب عناصر و استفاده اشتراکی از آن، بهبود بخشند (Rebollar et al., 2017; Aguirre-von-Wobeser et al., 2018; Gastélum & Rocha, 2020). همچنین با بررسی جمعیت‌های ریزوبیومی در ذرت نشان داده است که سویه *Rhizobium phaseoli* Ch24-10 به‌وفور در ذرت یافت می‌شود (Rosenblueth & Martínez-Romero, 2004). نیتروژن تأمین شده توسط گره‌های لوبیا می‌تواند در درازمدت برای ذرت، که برای رشد خود به‌مقدار زیادی از این عنصر نیاز دارد، مفید باشد. این مکمل متابولیکی بین *ریزوبیوم*، لوبیا و ذرت می‌تواند به عملکرد بالای دانه در مزرعه بینجامد (Aguilar-Jiménez et al., 2019). در تحقیقی، لوبیاهای رشد یافته در سیستم کشت مخلوط، گره‌های تثبیت‌کننده نیتروژن مشابه لوبیاهای سیستم تک‌کشتی را تشکیل دادند. بنابراین، حضور ذرت با همزیستی *ریزوبیوم* – لوبیا تداخلی نداشت (Aguirre-Noyola et al., 2021). همچنین نشان داده

1- Plant growth promoting rhizobacteria, PGPR

شده است که *R. etli*، که به‌طور معمول گره‌های تثبیت‌کننده نیتروژن را روی لوبیا تشکیل می‌دهد، یک اندوفیت طبیعی ذرت است (Rosenblueth & Martinez-Romero, 2004). در پژوهش دیگری نشان داده شد که تلقیح چندگونه‌ای (*R. Phaseoli*، *americanum Sinorhizobium*، *Azospirillum brasilense*، *amyloliquefaciens Bacillus* و *Methylobacterium extorquens*) تأثیر مفیدی بر ذرت در مقایسه با تلقیح با فقط یک باکتری داشت (Gómez-Godínez et al., 2019). در پژوهش دیگری نیز نشان داده شد که بوته‌های ذرت تلقیح شده با سویه‌های *ریزوبیوم* (*R. leguminosarum* bv. *Phaseoli* RRE6، *R. undicola* RRE36، *Burkholderia cepacia* (RRE5, RRE3, RRE25))، نسبت به شاهد تلقیح نشده افزایش معنی‌داری در ارتفاع بوته، طول ریشه، اندام هوایی و وزن خشک ریشه داشتند (Singh et al., 2013).

با این وجود، در خاک‌های ایران به‌علت پایین بودن حاصل‌خیزی، همزیستی ریزوبیومی بسیار پایین است. بنابراین، در این خاک‌ها استفاده از مایه تلقیح ریزوبیومی ممکن است به افزایش جمعیت باکتری و تثبیت بیولوژیک نیتروژن در گیاه میزبان (گیاهان خانواده لگومینوزها) کمک کند. به همین منظور، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی عملکرد و اجزاء عملکرد لوبیای محلی گیلان و ذرت در نسبت‌های مختلف کشت خالص و مخلوط آن‌ها تحت شرایط تلقیح با باکتری *R. phaseoli* و تعیین سودمندی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص، انجام شد.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر در شهرستان تالش، در استان گیلان (طول جغرافیایی ۴۸ درجه، ۳۸ دقیقه و ۳۲ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه، ۵۰ دقیقه و ۲۰ ثانیه شمالی و با ارتفاع ۱۴۶۰ متر از سطح دریا) به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد، که در آن عامل اصلی تلقیح با باکتری *R. phaseoli* در دو سطح (تلقیح و عدم تلقیح) و عامل فرعی، نسبت کشت مخلوط جایگزینی ذرت - لوبیا در پنج سطح (کشت خالص ذرت، کشت خالص لوبیا، ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا، ۵۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد لوبیا، ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا) بود.

در این تحقیق، ذرت رقم سینگل کراس ۳۰۱ و لوبیای محلی رگه قرمز گیلان کشت شدند. ذرت رقم سینگل کراس ۳۰۱ از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج و توده محلی لوبیای گیلان، از مرکز تحقیقات کشاورزی استان گیلان تهیه شدند.

قبل از انجام آزمایش، از خاک مزرعه جهت تعیین برخی از ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر صورت گرفت. نتایج تجزیه خاک نشان داد که pH خاک، ۶/۱۰؛ ماده آلی، ۰/۹۸ درصد؛ هدایت الکتریکی، ۰/۴۷ دسی‌زیمنس بر متر؛ مقدار نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب به‌ترتیب ۰/۰۹ درصد، ۱۶/۸ و ۱۱۰ پی‌پی‌ام و مقدار رس، لوم و شن به‌ترتیب ۱۱/۶، ۳۶ و ۵۲/۴ درصد بود.

جهت تهیه بستر کشت، شخم نسبتاً عمیقی در اویل بهار زده شد و پس از آن، زمین دیسک زده شد و پیش از اجرای آزمایش، خاک مزرعه تسطیح گردید. هر بلوک شامل ۱۰ کرت بود، که فاصله هر بلوک از بلوک دیگر، دو متر بود. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۵۰ سانتی‌متر؛ فاصله بوته‌های روی ردیف کاشت به‌ترتیب ۴۰ و ۲۰ سانتی‌متر برای ذرت و لوبیا و تراکم کاشت ۵۰۰۰۰ (ذرت) و ۱۰۰۰۰۰ (لوبیا) بوته در هکتار بود. زمین محل آزمایش در سال قبل، آیش بود و در پاییز سال پیش، شخم زده شده بود. در فروردین، معادل ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره (۴۶ درصد نیتروژن) و ۷۰ کیلوگرم در هکتار فسفر به‌صورت سوپر فسفات تریپل روی زمین پاشیده شد و به‌وسیله دیسک با خاک مخلوط گردید. نصف دیگر کود اوره (۵۰ کیلوگرم در هکتار) به‌صورت سرک و در مرحله ۷–۸ برگی ذرت به‌صورت سرک در مزرعه توزیع شد.

کشت بذور ذرت و لوبیا در تاریخ ۱ خرداد سال ۱۴۰۱ به‌صورت همزمان انجام شد. برداشت لوبیا در اواخر مرداد و برداشت ذرت در اواسط شهریور انجام شد.

برای تیمار باکتری، مایه تلقیح باکتری *ریزوبیوم فازئولی* (*R. phaseoli*) از بخش میکروبیولوژی خاک، مرکز تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد، که هر گرم از مایه تلقیح، حاوی 10^7 سلول باکتری بود. برای تلقیح با باکتری پیش از کاشت، ابتدا بذرها به صمغ عربی آغشته شدند و سپس به‌ازاء هر کیلوگرم بذر، ۱۰ گرم مایه تلقیح به آن‌ها اضافه شد. پس از گذشت نیم ساعت و خشک کردن بذرهای تلقیح شده در سایه، عملیات کاشت انجام شد.

یادداشت‌برداری صفات از خطوط میانی به جهت کاهش اثر

حاشیه در مراحل مختلف رشد انجام شد. برای اندازه‌گیری صفات در لوبیا، در هر کرت، تعداد ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب شد و ارتفاع بوته در آن‌ها اندازه‌گیری گردید، همچنین تعداد غلاف‌های آن‌ها نیز شمارش شدند. تعداد دانه، طول و عرض دانه نیز در این غلاف‌ها شمارش شدند. از میانگین این صفات در تجزیه‌ها استفاده گردید. در هنگام رسیدگی کامل، از یک مترمربع در هر کرت برداشت انجام شد و عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک توزین و برمبنای کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. از دانه‌های رسیده برداشت شده، تعداد ۱۰ نمونه ۱۰۰ تایی با استفاده از ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرمی وزن و پس از میانگین‌گیری، وزن ۱۰۰ دانه محاسبه شد. از تقسیم عملکرد دانه بر عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت محاسبه شد. در ذرت در مرحله رسیدگی، تعداد ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی در هر کرت انتخاب شد و صفات ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته، تعداد بلال در بوته، طول بلال، تعداد ردیف در بلال و تعداد دانه در بلال در هر بوته اندازه‌گیری شد و سپس میانگین آن ثبت گردید. در هنگام رسیدگی، از یک مترمربع در هر کرت، بوته‌های ذرت برداشت شدند و صفات عملکرد دانه و وزن ۱۰۰ دانه توزین شدند. همچنین پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون و در دمای ۴۸ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷۲ ساعت، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت در آن‌ها اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی سودمندی کشت مخلوط از مشخصه‌های زیر استفاده شد:

نسبت برابری زمین[1] (LER): برای تعیین این شاخص، عملکرد نسبی هر جزء (معادله‌های ۱ و ۲) محاسبه و از مجموع آن‌ها میزان LER (معادله ۳) محاسبه شد (Alexander & Genter, 1962).

$$LER_b = \frac{Y_b}{Y_{sb}} \qquad \text{(۱) معادله}$$

که در آن، LER_b: نسبت برابری زمین جزئی برای لوبیا، Y_b: عملکرد لوبیا در کشت مخلوط و Y_{sb}: عملکرد لوبیا در کشت خالص است.

$$LER_m = \frac{Y_m}{Y_{sm}} \qquad \text{(۲) معادله}$$

که در آن، LER_m: نسبت برابری زمین جزئی برای ذرت، Y_m: عملکرد ذرت در کشت مخلوط و Y_{sm}: عملکرد ذرت در کشت خالص است. نسبت برابری زمین در دو گونه کشت شده از طریق معادله زیر محاسبه شد:

$$LER = \frac{Y_b}{Y_{sb}} + \frac{Y_m}{Y_{sm}} \qquad \text{(۳) معادله}$$

ضریب ازدحام نسبی[2] (RCC): برای محاسبه این شاخص که بیان‌کننده میزان رقابت بین لوبیا (b) و ذرت (m) است، ابتدا با استفاده از معادله‌های ۴ و ۵، ضریب ازدحام نسبی هر یک از دو گونه محاسبه شد و سپس ضریب ازدحام نسبی کل (معادله ۶) به‌دست آمد (Banik et al., 2006):

$$k_{bean} = \frac{Y_{bm} \times Z_{mb}}{(Y_{bb} - Y_{bm})Z_{bm}} \qquad \text{(۴) معادله}$$

که در آن، k_{bean}: ضریب ازدحام نسبی گونه b (لوبیا)، Y_{bm}: عملکرد گونه b (لوبیا) در زراعت مخلوط، Y_{bb}: عملکرد گونه b (لوبیا) در کشت خالص، Z_{bm}: نسبت مخلوط گونه b (لوبیا) و Z_{mb}: نسبت مخلوط گونه m (ذرت) است.

$$k_{maize} = \frac{Y_{mb} \times Z_{bm}}{(Y_{mm} - Y_{mb})Z_{mb}} \qquad \text{(۵) معادله}$$

که در آن، k_m: ضریب ازدحام نسبی گونه m (ذرت)، Y_{mb}: عملکرد گونه m (ذرت) در زراعت مخلوط، Y_{mm}: عملکرد گونه m (ذرت) در کشت خالص، Z_{bm}: نسبت مخلوط گونه b (لوبیا) و Z_{mb}: نسبت مخلوط گونه m (ذرت) است.

$$RCC = k_{maize} \times k_{bean} \qquad \text{(۶) معادله}$$

ضریب ازدحام نسبی (RCC)، از حاصل‌ضرب ضریب ازدحام نسبی دو گونه محاسبه شد. اگر این شاخص بزرگتر از یک باشد، بیانگر سودمند بودن زراعت مخلوط است و اگر مساوی با یک باشد، نشان می‌دهد که در کشت مخلوط نسبت به سامانه تک‌کشتی، هیچ‌گونه کاهش یا افزایش محصول اتفاق نمی‌افتد و نشان‌دهنده برقراری تعادل یا موازنه در کشت مخلوط است. همچنین اگر این شاخص کمتر از یک باشد، بیانگر این است که میزان محصول به‌دست آمده از زراعت مخلوط کمتر از محصول تک‌کشتی است (Banik et al., 2006).

1- Land equivalence ratio,

2- Relative crowding coefficient

شاخص نسبت رقابت[1] (CR): این شاخص نشان‌دهنده نسبت مقادیر LER جزئی هرکدام از دو گونه گیاهی است و با معادله‌های ۷ و ۸ برای هرکدام از دو گونه در کشت مخلوط محاسبه می‌شود (Dhima et al., 2007):

معادله (۶) $CR_{maize}=(LER_{maize}/LER_{bean})(Z_{bm}/Z_{mb})$

معادله (۷) $CR_{bean}=(LER_{bean}/LER_{maize})(Z_{mb}/Z_{bm})$

قابلیت تهاجم[2]: شاخص قابلیت تهاجم که شاخص غالبیت نیز نامیده می‌شود، برای گونه لوبیا به‌صورت زیر محاسبه شد (McGilchrist, 1965):

معادله (۸)

$$A_b=[Y_{bm}/(Y_{bb}\times Z_{bm})]-[Y_{mb}/(Y_{mm}\times Z_{mb})]$$

که در آن، Y_{bm}: عملکرد گونه لوبیا در مخلوط با گونه ذرت، Y_{bb}: عملکرد گونه لوبیا در کشت خالص، Y_{mb}: عملکرد گونه ذرت در مخلوط با گونه لوبیا، Y_{mm}: عملکرد گونه ذرت در کشت خالص، Z_{bm}: نسبت مخلوط گونه لوبیا و Z_{mb}: نسبت مخلوط گونه ذرت است.

اگر، $A_b=0$، هیچ رقابتی بین دو گونه وجود ندارد، اگر $A_b > 0$، گونه لوبیا در رقابت با گونه ذرت، غالب است، و اگر $A_a<0$، گونه لوبیا در رقابت با گونه ذرت، مغلوب است.

برای گونه ذرت نیز این شاخص به‌صورت زیر محاسبه شد:

معادله (۹)

$$A_m=[Y_{mb}/(Y_{mm}\times Z_{mb})]-[Y_{bm}/(Y_{bb}\times Z_{bm})]$$

که در آن، Y_{mb}: عملکرد گونه ذرت در مخلوط با گونه لوبیا، Y_{mm}: عملکرد گونه ذرت در کشت خالص، Y_{bm}: عملکرد گونه لوبیا در مخلوط با گونه ذرت، Y_{bb}: عملکرد گونه لوبیا در کشت خالص، Z_{bm}: نسبت مخلوط گونه لوبیا و Z_{mb}: نسبت مخلوط گونه ذرت است.

مجموع ارزش نسبی[3] (RVT): مجموع ارزش نسبی به‌عنوان شاخص سودمندی اقتصادی برای ذرت و لوبیا با استفاده از معادله‌های ۱۰ و ۱۱ برآورد شد (Vandermeer, 1990)

معادله (۱۰)
$$RVT_m=\frac{(P_m\times Y_{mb})+(P_b\times Y_{bm})}{P_m\times Y_{mm}}$$

1- Competition ratio
2- Aggressivity
3- Relative value total

معادله (۱۱)
$$RVT_m=\frac{(P_m\times Y_{mb})+(P_b\times Y_{bm})}{P_b\times Y_{bb}}$$

که در آن، Pm و Pb: به‌ترتیب قیمت دانه ذرت و لوبیا برحسب ریال است.

تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزار R و براساس آزمایش کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط با بسته intercropping.pe در نرم‌افزار R محاسبه شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌های صفات لوبیا

اثر اصلی تلقیح باکتری بر ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، طول غلاف، وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت و اثر اصلی کشت مخلوط بر ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه معنی‌دار بود. ضمن آن که برهم‌کنش باکتری در کشت مخلوط بر ارتفاع بوته، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه لوبیا معنی‌دار بود (جدول ۱). با توجه به نتایج تجزیه واریانس، مقایسه میانگین اثر اصلی باکتری برای صفات تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، طول غلاف، وزن ۱۰۰ دانه و شاخص برداشت انجام شد. همچنین اثر اصلی نسبت کشت مخلوط بر تعداد غلاف در بوته ارزیابی شد. برای صفات ارتفاع گیاه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه که برهم‌کنش دو فاکتور معنی‌دار شده بود، اثر ساده نسبت کشت مخلوط در هر سطح باکتری ارزیابی شد.

مقایسه میانگین اثر اصلی تلقیح باکتری نشان داد که بیشترین تعداد غلاف در بوته (۲۳/۸۳)، تعداد دانه در غلاف (۷/۰۸)، طول غلاف (۱۹/۸۳ سانتی‌متر) و وزن ۱۰۰ دانه (۵۱/۸۳ گرم)، تحت تلقیح با باکتری به‌دست آمد (جدول ۲). میزان شاخص براشت در شرایط عدم تلقیح با باکتری بیشتر از شرایط تلقیح با باکتری بود. شاخص برداشت، آن بخشی از عملکرد بیولوژیک است که عملکرد اقتصادی را تشکیل می‌دهد و معیاری برای نشان دادن درصد انتقال مواد فتوسنتزی از منبع به مخزن است (Koocheki et al., 2010).

جدول ۱- تجزیه واریانس برخی از صفات لوبیا تحت تلقیح باکتری و نسبت‌های کشت مخلوط

Table 1- Analysis of variance for some of bean traits under Inoculation with bacteria and intercropping ratios

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares (MS)							
		ارتفاع بوته Plant Height	تعداد غلاف در بوته No. of pods per plant	تعداد دانه در غلاف No. of seeds per pod	طول غلاف Pod lenght	وزن صددانه Hundred seed weight	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	شاخص برداشت Harvest Index
تکرار Replication	2	0.54^{ns}	0.12^{ns}	0.54^{ns}	1.79^{ns}	3.16^{ns}	858776^{ns}	5706^{ns}	10.75^{ns}
تلقیح Inoculation	1	876**	145*	37.50*	260.04**	40.04*	40820400**	547526**	53.10*
تلقیح × تکرار (خطای a) Inoculation × replication (Error a)	2	1.79	1.54	0.87	2.04	1.16	177682	26194	0.95
کشت مخلوط Intercrropng	3	30.15*	25.0**	0.44^{ns}	2.15^{ns}	7.82^{ns}	86165600**	3231873**	0.74^{ns}
تلقیح × کشت مخلوط ×Inoculation intercrropng	3	21.37*	1.15^{ns}	1.05^{ns}	0.93^{ns}	1.04^{ns}	3966319*	69526*	16.62^{ns}
خطا Error	12	5.22	2.05	1.04	1.58	7.22	835034	18346	6.53
ضریب تغییرات C.V (%)	-	4.12	6.70	18.01	7.60	5.31	11.97	9.12	12.81

ns، ** و *: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

ns, ** and *: non-significant, significant at 1% probability level and significant at 5% probability level, respectively

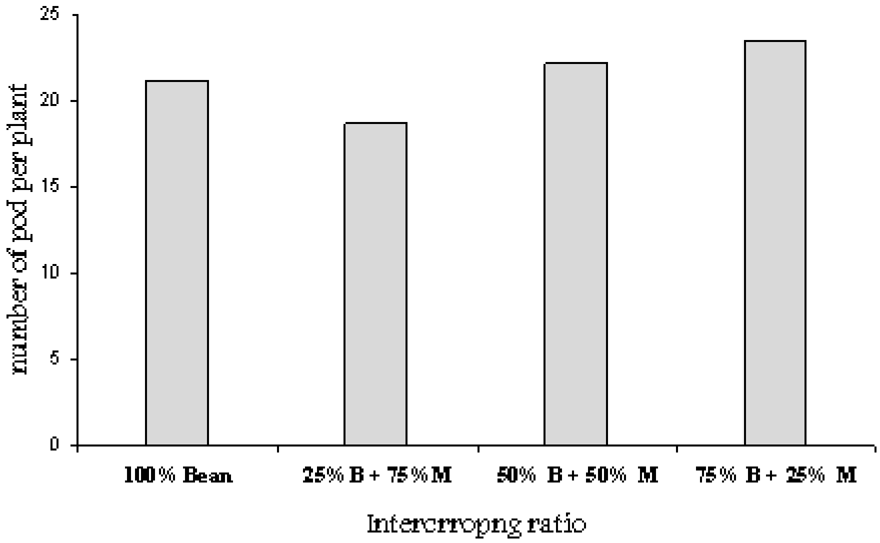
کاهش شاخص برداشت در شرایط تلقیح با باکتری در مقایسه با شرایط بدون تلقیح، می‌تواند ناشی از آن باشد که تلقیح بذر لوبیا با باکتری، سبب تحریک تولید هورمون‌های رشد گیاهی شده است و در نتیجه، گیاه برای ساخت هورمون، مقداری از انرژی خود را مصرف کرده است. همچنین بخشی از فرآیندهای متابولیکی گیاهی صرف رشد شده است و مانع از انتقال مواد به بذر لوبیا نسبت به شاهد بدون تلقیح شده است و در نتیجه، شاخص برداشت لوبیا در شرایط تلقیح با باکتری نسبت به شرایط بدون تلقیح کمتر بود. البته در ارتباط با شاخص برداشت باید به این نکته نیز توجه شود که شاخص برداشت بالاتر که در شرایط بدون تلقیح مشاهده شد، زمانی مناسب است که گیاه از لحاظ عملکرد اقتصادی و عملکرد بیولوژیک به پتانسیل ژنتیکی خود رسیده باشد و سهم عمده‌ای از عملکرد بیولوژیک مربوط به عملکرد اقتصادی گیاه باشد (Koocheki et al., 2010).

مقایسه میانگین اثر اصلی کشت مخلوط بر تعداد غلاف در بوته نشان داد که کمترین تعداد غلاف در بوته در نسبت کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا (۱۸/۶۷) به‌دست آمد (شکل ۱). تعداد غلاف در گیاه از مهم‌ترین ویژگی‌های تعیین‌کننده عملکرد لوبیا و حساس‌ترین جزء عملکردی آن است (Gebyehu & Simane., 2006). در نسبت کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا، کاهش تعداد غلاف در گیاه که خود ناشی از کاهش تعداد گل‌های بارور حاصل از افزایش رقابت بین‌گونه‌ای در کشت مخلوط لوبیا و ذرت است، می‌تواند کاهش عملکرد لوبیا را در پی داشته باشد. سایه‌اندازی ذرت هم می‌تواند باعث کاهش تعداد غلاف و تعداد دانه لوبیا شده باشد (Koocheki et al., 2010). در ارتباط با تأثیر کشت مخلوط بر تعداد دانه در غلاف و تعداد غلاف در بوته، پیروزی و همکاران (Piroozi et al., 2014) نیز نتایج مشابهی با پژوهش حاضر گرفتند.

جدول ۲- اثر تیمارهای تلقیح و عدم تلقیح با باکتری بر برخی از صفات لوبیا

Table 2– Effect of Inoculation and non-inoculation with bacteria on some of bean traits

باکتری Bacteria	تعداد غلاف در بوته No. of pods per plant	تعداد دانه در غلاف No. of seeds per pod	طول غلاف Pod lenght (cm)	وزن ۱۰۰ دانه Hundred seed weight (g)	شاخص برداشت Harvest index (%)
عدم تلقیح Non-inoculation	18.91	4.41	13.25	49.25	21.45
تلقیح Inoculation	23.83	6.91	19.83	51.83	18.47
حداقل اختلاف معنی‌دار (۵٪) LSD (5%)	1.27	0.91	1.12	2.39	2.27



شکل ۱- تعداد غلاف در بوته لوبیا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط

Fig. 1- Number of pods per plants of bean under the difference intercrroping ratio
LSD(5%)= 1.81

در هر دو شرایط تلقیح و عدم تلقیح با باکتری، بیشترین ارتفاع بوته، به‌ترتیب با مقادیر برابر با ۶۵/۳۳ و ۵۱/۳۳ سانتی‌متر از نسبت کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا به‌دست آمد (جدول ۳). نتایج نسبت‌های کشت متناظر در دو شرایط تلقیح و عدم تلقیح با باکتری نشان داد که ارتفاع بوته لوبیا در تمامی نسبت‌های کشت خالص و مخلوط در شرایط تلقیح بیشتر از شرایط عدم تلقیح بود. افزایش ارتفاع بوته در تیمارهای تلقیح با باکتری می‌تواند به تولید و ترشح ترکیبات تحریک‌کننده رشد گیاه و یا برخی هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد از جمله سیتوکنین نسبت داده شود (Gastélum & Rocha, 2020). دلیل دیگر افزایش ارتفاع بوته در این نسبت کشت مخلوط، می‌تواند ناشی از سایه‌اندازی ذرت روی لوبیا، عدم تعادل نسبت نور قرمز با نور قرمز دور و رقابت نوری بین بوته‌ها باشد (Dahmardeh & Keshtegar, 2014). در ارتباط با برتری ارتفاع بوته در کشت دیم، اردلانی و همکاران (Ardalani et al., 2014) اظهار داشتند که ارقام پابلند به‌واسطه وزن خشک بیشتر، سهم و انتقال مجدد بیشتری در پر کردن دانه نسبت به ارقام پاکوتاه دارند، بنابراین با توجه به انجام آزمایش حاضر به‌صورت دیم، داشتن ارتفاع بوته بیشتر، یک مزیت به حساب می‌آید. با توجه به ماهیت کشت مخلوط جایگزینی که در آن تراکم گیاه در کشت خالص نسبت به کشت مخلوط بیشتر است، در هر دو شرایط تلقیح و بدون تلقیح،

بیشترین عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در شرایط کشت خالص لوبیا به‌دست آمد که انتظار چنین نتیجه‌ای در سیستم‌های کشت مخلوط وجود دارد. ازاین‌رو در این سیستم‌ها، نتایج عملکرد دانه با استفاده از شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط ارزیابی می‌شوند. افزایش عملکرد لوبیا در کشت خالص نسبت به تیمارهای کشت مخلوط می‌تواند به‌دلیل عدم رقابت برون‌گونه‌ای لوبیا درکشت خالص بر سر جذب نور باشد که این امر باعث افزایش جذب نور به‌وسیله تاج‌پوشش لوبیا و در نتیجه، بهبود فتوسنتز شده و در نهایت، افزایش عملکرد اقتصادی لوبیا را به دنبال خواهد داشت. با بررسی اثر کشت مخلوط ذرت و لوبیا بر عملکرد دانه بیان شده است که در تیمارهای کشت مخلوط به‌دلیل افزایش رقابت ذرت با لوبیا بر سر جذب نور، عملکرد لوبیا می‌تواند به‌میزان زیادی کاهش یابد (Latati et al., 2013).

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های برخی از صفات لوبیا در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در شرایط تلقیح و عدم تلقیح با باکتری

Table 3- Mean comparison of some of bean traits under the difference intercrroping ratio in Inoculation and Non-inoculation with bacteria

باکتری Bacteria	نسبت کشت مخلوط Intercrropng ratio (B:bean -M:maize)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha^{-1})
عدم تلقیح Non-inoculation	۱۰۰٪ لوبیا 100% bean	50.66	9100.0	2093.3
	۲۵٪ لوبیا + ۷۵٪ ذرت 25% B + 75% M	51.33	2308.3	512.0
	۵۰٪ لوبیا + ۵۰٪ ذرت 50% B + 50% M	47.66	5433.3	1130.0
	۷۵٪ لوبیا + ۲۵٪ ذرت 75% B + 25% M	48	8475.0	1602.7
حداقل اختلاف معنی‌دار (۵٪) LSD (5%)		3.53	1175.3	68.9
تلقیح Inoculation	۱۰۰٪ لوبیا 100% bean	58.67	14066.7	2363.3
	۲۵٪ لوبیا + ۷۵٪ ذرت 25% B + 75% M	65.33	3616.7	655.3
	۵۰٪ لوبیا + ۵۰٪ ذرت 50% B + 50% M	64	7266.7	1310.0
	۷۵٪ لوبیا + ۲۵٪ ذرت 75% B + 25% M	58.00	10800.0	2217.7
حداقل اختلاف معنی‌دار (۵٪) LSD (5%)		5.4	2298.9	37.64

افزایش نسبت ذرت به لوبیا در کشت مخلوط به کاهش عملکرد بیولوژیک لوبیا در کشت مخلوط منجر شد و بیشترین عملکرد بیولوژیک در کشت خالص و کمترین آن در نسبت کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا در کشت مخلوط به‌دست آمد، که این نتیجه با نتایج دیگر محققان انطباق دارد (Rostami et al., 2011; Fotohi-Chianeh et al., 2012). همانند عملکرد دانه، به‌دلیل وجود رقابت بین‌گونه‌ای در نسبت‌های بالاتر ذرت، تمامی منابع موجود در اختیار لوبیا قرار نگرفته است و بنابراین، رقابت بر سر منابع دسترس (آب، نور، مواد غذایی و فضا) می‌تواند یکی از علل کاهش عملکرد بیولوژیک لوبیا در کشت مخلوط باشد.

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌های صفات ذرت

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تلقیح باکتری بر صفات ارتفاع بوته، طول بلال و عملکرد دانه و نیز اثر اصلی کشت مخلوط بر ارتفاع بوته، طول بلال، تعداد دانه در بلال، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت معنی‌دار بود.

جدول ٤- تجزیه واریانس برخی از صفات ذرت تحت تلقیح باکتری و نسبت‌های کشت مخلوط

Table 4- Analysis of variance for some of maize traits under Inoculation with bacteria and intercropping ratios.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares (MS)								
		ارتفاع بوته Plant height	تعداد برگ در بوته No. of leave per ear	طول بلال Ear lenght	تعداد بلال در بوته No. of ear per plant	تعداد دانه در بلال No. of grain per ear	وزن ۱۰۰ دانه Hundred grain weight	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت Harvest Index
تکرار Replication	2	12.54^ns	1.79^ns	0.04^ns	0.04^ns	553.62^ns	2.00^ns	1583516^ns	31094^ns	0.94^ns
تلقیح Inoculation	1	1980.16*	5.04^ns	117*	0.66^ns	112.66^ns	12.04^ns	1733438^ns	380772*	1.81^ns
باکتری × تکرار (خطای a) Inoculation × replicaton	2	28.04	0.79	3.79	0.29	385.29	1.16	292109	53887	2.74
کشت مخلوط Intercrropng	3	769.22**	0.48^ns	22.48**	0.27^ns	3489.38*	0.26^ns	657712882**	18820099**	9.00*
تلقیح × کشت مخلوط Inoculation × intercrropng	3	179.38^ns	0.15^ns	17.59**	0.33^ns	2066.11^ns	3.93*	1149549^ns	94682^ns	1.90^ns
خطا Error	12	108.34	1.90	0.91	0.38	676.79	0.97	2458403	39035	2.04
ضریب تغییرات C.V (%)		5.94	13.40	4.98	25.80	4.11	9.98	7.89	5.55	7.82

ns، ** و *: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

ns, ** and *: non-significant, significant at 1% probability level and significant at 5% probability level, respectively

علاوه‌براین، برهم‌کنش دو عامل بر طول بـلال و وزن ۱۰۰ دانـه ذرت معنی‌دار بود (جدول ۴). بنابراین، برای دو صـفت طـول بـلال و وزن ۱۰۰ دانه، اثر ساده نسبت کشت مخلوط در هر سـطح بـاکتری و برای سایر صفات، اثرات اصلی ارزیابی شدند.

مقایسه میانگین صفات در شرایط تلقیح و عدم تلقیح بـا بـاکتری نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته (۱۸۴/۲۵ سانتی‌متر) و عملکرد دانـه (۳۶۸۰/۳ گرم در مترمربع) در شرایط تلقیح بـا بـاکتری به‌دسـت آمـد (جدول ۵). به نظر می‌رسد که اسـتفاده از بـاکتری در کشـت مخلـوط به‌دلیل ایجاد تغییرات غیرمستقیم در ریخت‌شناسی گونه همراه، باعث رشد مناسب‌تر گیاه و در نتیجه، افزایش ارتفاع بوته و عملکرد دانـه در آن‌ها شده باشد (Jose´-Miguel et al., 2005). با توجه به اینکه ذرت یک گیاه نیتروژن‌دوست است، به نظر می‌رسد که لوبیا از طریق تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، باعث فراهمی بهتر این عنصر غذایی بـرای ذرت شده است و به‌طور غیرمستقیم سبب بهبـود عملکـرد دانـه ذرت شده باشد. در تطابق با نتیجه پژوهش حاضر مبنی بر افزایش عملکرد دانه در شرایط تلقیح با باکتری در مقایسه با شرایط عدم تلقیـح، دبـاغ محمدی نسب و همکاران (Dabbagh Mohammadi-Nassab et al., 2015) با بررسی سودمندی کشـت مخلـوط ذرت و لوبیـا بـه همراه کاربرد کودهای شیمیایی و زیستی به ایـن نتیجـه رسـیدند کـه استفاده از کود زیستی به‌جای کود شیمیایی، سـبب افـزایش مجمـوع عملکرد نسبی و نسبت برابری زمین می‌شود. این نتیجه بیانگر افزایش کارآیی کشت مخلوط ذرت: لوبیا در صورت استفاد از کودهای زیسـتی است. پژوهشگران دیگری نیز نشان دادنـد کـه تلقـیح بـا *ازتوباکتر*، قابلیت جذب نیتروژن و فسفر را به بالاترین حد خود رسـاند و میـزان محصول ذرت نیز به‌میزان قابـل تـوجهی افـزایش یافـت (Fatemi Devin et al., 2020). با توجه به بالا بودن نیـاز کـودی ذرت بـه نیتروژن، جذب نیتروژن اثر مستقیمی بر عملکرد ذرت دارد و از سـوی دیگر، با توجه به ویژگی تثبیت‌کنندگی نیتروژن توسط لوبیا، عملکـرد بیشتر ذرت در شرایط تلقیح ناشـی از همزیسـتی میکروباکتری‌هـا در گرهک‌های تثبیت‌کننده‌ی لوبیا اسـت (Aguirre-Noyola et al., 2021).

جدول ۵- اثر تیمارهای تلقیح و عدم تلقیح با باکتری بر برخی از صفات ذرت

Table 5– Effect of Inoculation and Non-inoculation with bacteria on some of maize traits

باکتری Bacteria	ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})
عدم تلقیح Non-inoculation	166.08	3428.3
تلقیح Inoculation	184.25	3680.3
حداقل اختلاف معنی‌دار (۵٪) LSD (5%)	9.25	175.7

مقایسه میانگین برخـی از صـفات ذرت در نسـبت‌هـای مختلـف کشت مخلوط نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته (۱۹۰/۳۳ سانتی‌متـر) در نسبت کشت مخلوط ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا به‌دست آمد (جدول ۶). این نتایج همچنین نشان داد که بیشـترین تعـداد دانـه در بلال در نسبت کشت ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا به‌دسـت آمـد، که با کشت خالص اختلاف معنی‌داری نداشت؛ با افزایش سـهم ذرت در کشت مخلوط، تعداد دانه در بلال کاهش یافت. ازآنجاکه در نسبت کشت ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا، تراکم ذرت در واحـد سـطح کم‌تر بود، به نظر می‌رسد که رقابت درون گونه‌ای کـاهش یافتـه و در نتیجه، فضای بیشتری برای رشد و گسترش بوته‌های ذرت فراهم شده است، که این عامل باعث گرده‌افشانی مطلوب بوته‌های ذرت شـده و در اثر آن، تعداد دانه در بلال افزایش یافـت (Chen et al., 2022). به بیانی دیگر، هم‌جواری گیاه C_3 (لوبیا) با گیاه C_4 (ذرت)، به‌ویـژه در تراکم کمتر ذرت، نه‌تنها باعث تشدید رقابت نشده است، بلکه با ایجاد سازوکار همکاری، سودمندی کل زراعت مخلوط، از جمله تعـداد دانـه در بـلال نیـز افـزایش یافتـه اسـت. نصـرالله‌زاده اصـل و طـالبی

(Nasrollahzadeh Asl et al., 2016) نیز با بررسی تأثیر نسبت ذرت در کشت مخلوط بر تعداد دانه در بلال، نتیجه مشابهی گزارش کردند. کاهش تعداد دانه در بلال در نسبت‌های بالاتر ذرت در کشت مخلوط می‌تواند ناشی از کاهش نفوذ نور به داخل تاج‌پوشش با افزایش تراکم ذرت، محدودیت دریافت تشعشع توسط برگ‌ها و افزایش رقابت بین‌گونه‌ای باشد، که در نهایت، به کاهش تعداد دانه در بلال می‌انجامد (Gastélum & Rocha, 2020). با توجه به تعداد بیشتر بوته‌های ذرت در کشت خالص انتظار به‌دست آمدن عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک بیشتر در کشت خالص ذرت و پس از آن، نسبت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا وجود داشت، که عملاً چنین نتیجه‌ای نیز دیده شد (جدول ۶). نتایج به‌دست آمده در ارتباط با به‌دست آمدن بیشترین عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه ذرت در کشت خالص و میزان کمتر این صفات در نسبت‌های کشت مخلوط، با نتایج برخی از محققان هماهنگ است (Fotohi-Chianeh et al., 2012; Charani et al., 2017). چنین به نظر می‌رسد که بالاتر بودن عملکرد بیولوژیک در کشت خالص ذرت نسبت به کشت های مخلوط به‌دلیل تراکم بالای ذرت باشد، بنابراین در یک سیستم کشت مخلوط، تراکم ذرت بیشتر از تراکم گیاه همراه، تعیین‌کننده عملکرد است، به‌طوری‌که گیاهان همراه با ذرت، توان رقابت برای نور و دیگر منابع مصرفی را ندارند، بنابراین عملکرد ذرت به ساختار و تاج‌پوشش خود وابسته است (Nachigera et al., 2008). همانند تحقیق حاضر، در پژوهشی رضایی چیانه و همکاران (Rezaei-Chianeh et al., 2011)، کاهش عملکرد بیولوژیک ذرت را در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص مشاهده کردند، که علت آن را ناشی از رقابت نوری بین اجزاء عملکرد در کشت مخلوط گزارش کردند. مقایسه میانگین شاخص برداشت نشان داد که مقدار این شاخص در کشت خالص کمتر از نسبت‌های کشت مخلوط بود (جدول ۶). بالاتر بودن شاخص برداشت ذرت در نسبت‌های کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص می‌تواند ناشی از این باشد که با توجه به نیتروژن‌دوست بودن ذرت، لوبیا با تثبیت بیولوژیکی این عنصر باعث فراهمی بهتر آن برای ذرت شده و منجر به بهبود شاخص برداشت ذرت در نسبت‌های کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص آن گردید (Rostami et al., 2011; Koocheki et al., 2010; Fotohi-Chianeh et al., 2012).

جدول ٦- مقایسه میانگین‌های برخی از صفات ذرت در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط

Table 6- Mean comparison of some of maize traits under the difference intercrroping ratio

نسبت کشت مخلوط Intercrropng ratio (B:bean - M:maize)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	طول بلال Ear lenght (cm)	تعداد دانه در بلال No. of grain per ear	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	شاخص برداشت Harvest Index (%)
۷۵٪ لوبیا + ۲۵٪ ذرت 75% B + 25% M	190.33	21.67	654.83	7600.0	1507.2	19.85
۵۰٪ لوبیا + ۵۰٪ ذرت 50% B + 50% M	177	19.83	617.67	16233.3	2796.7	17.31
۲۵٪ لوبیا + ۷۵٪ ذرت 25% B + 75% M	168.5	17.50	606.83	23425.0	4360.0	18.66
۱۰۰٪ ذرت 100% maize	164.83	17.83	651.67	32216.7	5553.3	17.30
حداقل اختلاف معنی‌دار (۵٪) LSD (5%)	13.09	1.20	32.73	1972.4	248.5	1.79

اثر ساده کشت مخلوط در هر سطح تلقیح و عدم تلقیح با باکتری برای صفات طول بلال و وزن ۱۰۰ دانه ارزیابی شد (جدول ۷). نتایج نشان داد که در شرایط عدم تلقیح، اختلاف معنی‌داری از نظر طول بلال بین سطوح مختلف کشت مخلوط وجود نداشت، حال آن‌که در شرایط تلقیح با باکتری، بیشترین طول بلال (۲۵/۶۶ سانتی‌متر) در نسبت کشت ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا مشاهده شد و در کشت خالص ذرت، طول بلال نسبت به سایر نسبت‌های کشت مخلوط کمتر بود. به نظر می‌رسد که تلقیح با باکتری از طریق تأثیر مثبتی که

بر لوبیا در این نسبت کشت مخلوط گذاشته است، با تـأمین برخـی از نیازهای گونه همراه، توانسته است به‌طور غیرمستقیم، طـول بـلال را در ذرت بهبود ببخشد (Vora et al., 2021). در شـرایط تلقـیح بـا باکتری، بین سطوح مختلف کشت مخلوط تفاوت معنـی‌داری از نظـر وزن ۱۰۰ دانه ذرت وجود نداشت، امّا در شرایط عدم تلقیح، بیشـترین وزن ۱۰۰ دانه در شرایط کشت خالص (۱۰/۰۰ گرم) به‌دست آمـد. در تمام نسبت‌های کشت خالص متناظر، وزن ۱۰۰ دانه در شرایط تلقـیح بالاتر از شرایط عدم تلقیح بود. به نظر می‌رسد که رشد مناسب‌تر گیاه ذرت در شرایط استفاده از باکتری در کشـت مخلـوط، باعـث افـزایش وزن ۱۰۰ دانه شده باشد (Jose´-Miguel et al., 2005).

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های برخی از صفات ذرت در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در شرایط تلقیح و عدم تلقیح با باکتری

Table 7- Mean comparison of some of maize traits under the difference intercrroping ratio in Inoculation and Non-inoculation with bacteria

باکتری Bacteria	نسبت کشت مخلوط Intercrropng ratio (B:bean -M:maize)	طول بلال Ear lenght (cm)	وزن ۱۰۰ دانه 100-grain weight (g)
عدم تلقیح Non-inoculation	۷۵٪ لوبیا + ۲۵٪ ذرت 75% B + 25% M	17.66	9.66
	۵۰٪ لوبیا + ۵۰٪ ذرت 50% B + 50% M	16.66	8.66
	۲۵٪ لوبیا + ۷۵٪ ذرت 25% B + 75% M	16.00	8.33
	۱۰۰٪ ذرت 100% maize	17.66	10
حداقل اختلاف معنی‌دار (۵٪) LSD (5%)		1.73	1.59
تلقیح Inoculation	۷۵٪ لوبیا + ۲۵٪ ذرت 75% B + 25% M	25.66	10.66
	۵۰٪ لوبیا + ۵۰٪ ذرت 50% B + 50% M	23.00	11
	۲۵٪ لوبیا + ۷۵٪ ذرت 25%B + 75% M	19.00	11.33
	۱۰۰٪ ذرت 100% maize	18.00	9.33
حداقل اختلاف معنی‌دار (۵٪) LSD (5%)		2.07	2.28

شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط

نسبت برابری زمین

در هر دو شرایط تلقیح و عدم تلقیح بـا بـاکتری، نسـبت برابـری زمین (LER) در همه نسبت‌های کشت مخلوط، بیشـتر از یـک بـود (جدول ۸) که نشان‌دهنده برتری کشـت مخلـوط نسـبت بـه سیسـتم تک‌کشتی در این الگوهای کشـت اسـت (Dhima et al., 2007). شاخص LER، نسبت برابری زمین براساس سـطح زمـین زیرکشـت است و به‌وسیله آن مشخص می‌شود که برای به‌دسـت آوردن مقـدار محصولی از یک واحد کشت مخلوط، چـه مقـدار از زمـین به‌صـورت زراعت تک‌کشتی مورد نیاز است، تا همان میـزان محصـول برداشـت شود. مجموع عملکرد نسـبی[1] (RYT)، نیـز بـا همـان رابطـه LER برآورد می‌شود. در هر دو شرایط تلقیح و عدم تلقیح، بیشـترین نسـبت برابری زمین جزئی برای لوبیا مربـوط بـه نسـبت کشـت مخلـوط ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا بود، که در شرایط عدم تلقیح، این نسبت برابر با ۰/۷۷ و در شرایط تلقیح با باکتری برابر با ۰/۹۴ بود. بیشـترین LER (۱/۲۱) در نسبت کشت مخلوط ۲۵ درصـد ذرت + ۷۵ درصـد لوبیا، در شرایط تلقیح با باکتری به‌دست آمد که نسبت به شرایط بدون

1- Relative yield total

تلقیح با باکتری (۱/۰۴) بیشتر بود (جدول ۸)، که نشانگر این است که تلقیح با باکتری، سبب افزایش عملکرد هر دو گونه گیاهی در مقایسه با شرایط عدم تلقیح شده است. ازآنجاکه LER =۱ بیانگر یکسان بودن محصول زراعت‌های تک‌کشتی و مخلوط است و مقادیر ۱ ≥ LER و ۱ ≤ LER، به‌ترتیب نشان‌دهنده سودمندی و عدم سودمندی کشت مخلوط است (Sarlak & Aghaalikhani, 2009)، در هر دو شرایط تلقیح و عدم تلقیح، در تمام نسبت‌های کشت مخلوط، سودمندی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص مشاهده شد. در تطابق با نتایج تحقیق حاضر، پژوهشگران دیگری نیز LER بیشتر از یک را در کشت مخلوط ذرت و لوبیا گزارش کردند (Farahvash et al., 2012; Fatemi Moradi et al., 2016; Devin et al., 202; 0). دلیل این سودمندی نسبی می‌تواند ناشی از وجود اختلافات ریخت‌شناختی در دو گونه و بهره‌برداری بهینه از منابع باشد. همچنین به‌علت تراکم مطلوب گیاهی در این نسبت کشت و استفاده بهتر از منابع محیطی، این دو گیاه توانسته‌اند با کارآیی بیشتری از منابع محیطی بهره ببرند. بالا بودن LER، به‌ویژه در تیمارهای تلقیح را می‌توان به تثبیت و جذب نیتروژن توسط لوبیا در کشت مخلوط نسبت داد (Vora et al., 2021). همچنین در این راستا اظهار شده است که کشت مخلوط بقولات همراه با سایر گیاهان می‌تواند سبب انتقال نیتروژن تثبیت شده توسط بقولات در خاک به گیاه همراه در کشت مخلوط شود و در نتیجه، منجر به افزایش محصول گیاه همراه گردد (Banik et al., 2006). میزان بالاتر LER در شرایط تلقیح با باکتری می‌تواند به‌دلیل بهبود شرایط محیطی مناسب‌تر کشت مخلوط به‌دلیل مزایای کشت لوبیای تلقیح شده با باکتری در این نوع سیستم کاشت باشد.

ضریب ازدحام نسبی

بیشترین سودمندی کشت مخلوط براساس شاخص ضریب ازدحام نسبی، در نسبت ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا با مقدار ۵/۶۲ (ضریب ازدحام نسبی برای لوبیا و ذرت به‌ترتیب برابر با ۵/۰۷ و ۱/۱۱) در شرایط تلقیح با باکتری به‌دست آمد (جدول ۸). این شاخص، میزان رقابت بین دو گونه را مشخص می‌کند که به‌روش جایگزینی با یکدیگر مخلوط شده‌اند. همچنین بیشترین مقدار ضریب ازدحام نسبی در شرایط عدم تلقیح در نسبت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا با مقدار ۱/۵۱ (ضریب ازدحام نسبی برای لوبیا و ذرت به‌ترتیب برابر با ۱/۵۵ و ۰/۹۷) مشاهده شد (جدول ۸). چنانچه ضریب ازدحام نسبی برای هر دو گونه برابر با واحد باشد، بیانگر برقراری تعادل یا موازنه در کشت مخلوط است؛ امّا اگر ضریب ازدحام نسبی برای هر گونه برابر با واحد نباشد، گیاه با ضریب بیشتر، گیاه غالب خواهد بود (Sarlak & Aghaalikhani, 2009).

از مقایسه این ضریب در شرایط تلقیح و عدم تلقیح با باکتری چنین برمی‌آید که در شرایط عدم تلقیح با باکتری، در دو نسبت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا و ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا، ضریب ازدحام نسبی ذرت، بیشتر از ضریب ازدحام نسبی لوبیا بود. در نسبت ۵۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد لوبیا در شرایط عدم تلقیح و تمام نسبت‌ها در شرایط تلقیح با باکتری، ضریب ازدحام نسبی برای ذرت در مقایسه با لوبیا کمتر بود، که نشان می‌دهد در این نسبت‌های کشت، عامل رقابت در مورد گیاه ذرت با شدت بیشتری اعمال شده است. در شرایط عدم تلقیح (به‌ویژه در دو نسبت کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا و ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا)، ذرت از توان رقابتی بالاتری برخوردار بود؛ حال آنکه در شرایط تلقیح با باکتری، مقدار این شاخص در لوبیا به مراتب بیشتر بود. این یافته می‌تواند به نقش تلقیح باکتری در تثبیت نیتروژن در لوبیا نسبت داده شود. بنابر نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر، بالاتر از یک بودن این ضریب در تمامی نسبت‌های کشت مخلوط در هر دو شرایط تلقیح و عدم تلقیح، بیانگر سودمند بودن زراعت مخلوط بود. با توجه به نتایج ضریب ازدحام نسبی (RCC) می‌توان نتیجه گرفت که کشت مخلوط نسبت به کشت خالص در هر دو شرایط تلقیح و عدم تلقیح سودمندی داشت.

پوشش سریع خاک و در نتیجه، کاهش تبخیر ناشی از رشد شتابان و پوشش گیاهی گسترده‌تر بقولات (Khan et al., 2005) می‌تواند منجر به افزایش کارآیی استفاده از آب و در نتیجه، بهبود عملکرد گیاه ذرت در شرایط عدم تلقیح گردد. افزون بر آن، افزایش نفوذ تابش به درون پوشش گیاهی در کشت مخلوط و بهره‌گیری از نیتروژن آلی تثبیت شده در خاک نیز می‌تواند عامل مؤثر دیگری در افزایش عملکرد گونه‌های همراه با بقولات در کشت مخلوط به‌شمار آید. در ارتباط با برتری کشت مخلوط نسبت به سامانه تک‌کشتی، اختلاف ارتفاع و تفاوت دوره رویش دو گونه گیاهی از علل اصلی برتری کشت مخلوط نسبت به سامانه تک‌کشتی عنوان شده است (Raei et al., 2020). در همین راستا، می‌توان جداسازی آشیان‌های اکولوژیک در

جذب منابع و برقراری سازوکار کاهش رقابت را به‌عنوان توجیهی علمی برای سودمندی کشت مخلوط ذرت و لوبیا نسبت به سامانه تک‌کشتی آن‌ها ارائه کرد (Singh et al., 2013).

شاخص نسبت رقابت (CR)

در شرایط تلقیح با باکتری، شاخص نسبت رقابت (CR) در تمام نسبت‌های کشت، برای لوبیا بالاتر از یک و برای ذرت کمتر از یک بود. حال آنکه در شرایط تلقیح برای دو نسبت کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا و ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا، این شاخص در ذرت بیشتر از یک و در لوبیا کمتر از یک بود. بیشترین میزان این شاخص (۱/۱۶) مربوط به لوبیا بود که در نسبت کشت ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا و در شرایط تلقیح با باکتری به‌دست آمد (جدول ۸). کمتر بودن این شاخص برای ذرت نسبت به لوبیا نشان می‌دهد که در شرایط تلقیح با باکتری، ذرت در سامانه کشت مخلوط نسبت به لوبیا، توانایی رقابت کمتری داشت؛ حال آنکه در شرایط عدم تلقیح، به‌ویژه در دو نسبت کشت نسبت کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا و ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا، این شاخص در ذرت بیشتر از لوبیا بود. این نتیجه، گویای نقش برجسته تلقیح با باکتری در یک سیستم کشت مخلوط است. بر طبق نظر وایلی و رائو (Willey & Rao, 1980)، CR معیار مناسب‌تری برای اندازه‌گیری قابلیت رقابت گیاه را فراهم می‌آورد و می‌تواند در مقایسه با RCC شاخص بهتری باشد. در زراعت مخلوط، سودمندی زمانی به‌دست می‌آید که گیاهان تشکیل‌دهنده مخلوط از نظر نحوه رشد و میزان جذب عوامل مؤثر در رشد (نور، آب و عناصر غذایی) با یکدیگر متفاوت باشند، زیرا در این صورت رقابت برون‌گونه‌ای کمتر از رقابت درون‌گونه‌ای می‌شود و با تقلیل رقابت، سودمندی کشت مخلوط تضمین می‌شود (Latati et al., 2013). در کشت مخلوط ذرت - لوبیا در شرایط تلقیح با باکتری، بیشتر بودن ضریب ازدحام نسبی لوبیا از ذرت (Kb>Ka)، نسبت رقابت بیش از یک (CRb>1) و غالبیت (A_b) مثبت (جدول ۸)، حاکی از توانایی رقابتی بالای لوبیا در شرایط تلقیح با باکتری و غالبیت آن در مخلوط با ذرت است. این امر به نقش تعیین‌کننده باکتری تثبیت‌کننده نیتروژن در بهبود عملکرد در لوبیا و ذرت در کشت مخلوط اشاره دارد. حال آنکه در شرایط بدون تلقیح، بر پایه این سه شاخص، ذرت گیاه غالب بود. چنین نتیجه‌ای به‌وسیله پژوهشگران دیگری هم گزارش شده است (Moradi et al., 2016). این امر با توجه به اینکه تاج‌پوشش ذرت دارای حجم و ارتفاع بیشتری در مقایسه با تاج‌پوشش لوبیا می‌باشد (Rostami et al., 2011) و می‌تواند رقیب قوی‌تری در جذب نور و سایر منابع برای لوبیا به‌شمار رود، توجیه‌پذیر است.

قابلیت تهاجم (A)

شاخص غالبیت یا قابلیت تهاجم نیز شاخص دیگری برای مشخص کردن گونه غالب در یک سیستم کشت مخلوط است. بر پایه این شاخص، در شرایط تلقیح با باکتری در هر سه نسبت کشت مخلوط، قابلیت تهاجم برای لوبیا مثبت بود، درحالی‌که در شرایط عدم تلقیح، این نسبت برای لوبیا منفی (نسبت‌های نسبت کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا و ۲۵ درصد ذرت + ۷۵ درصد لوبیا) و یا نزدیک به صفر (نسبت کشت ۵۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد لوبیا) بود (جدول ۸). این یافته نشان می‌دهد که تلقیح با باکتری توانسته است که قدرت تهاجمی لوبیا را در یک سیستم کشت مخلوط افزایش دهد و آن را از یک گیاه مغلوب، به گیاهی غالب تبدیل کند. همانند نتایج پژوهش حاضر در شرایط عدم تلقیح، پژوهشگران دیگری نیز به غالبیت ذرت در سیستم کشت مخلوط اشاره نمودند (Rostami et al., 2011). همچنین در این راستا اشاره شده است که در اثر غالبیت ذرت در بیشتر سیستم‌های کشت مخلوط با بقولات دانه‌ای، جزء بقولات کاهش عملکرد نشان می‌دهد، ولی افزایش عملکرد ذرت، جبران کاهش فوق را می‌کند (Aguirre-Noyola et al., 2021).

مجموع ارزش نسبی (RVT)

مجموع ارزش نسبی (RVT) برای دو گونه گیاهی (جمع RVT لوبیا و ذرت) در این آزمایش، در کلیه ترکیبات کشت مخلوط، بالاتر از یک بود (جدول ۸) که نشان‌دهنده سودمندی اقتصادی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص دو گونه است (Raei et al., 2020). بنابراین، می‌توان گفت که کشت مخلوط ذرت و لوبیا علاوه‌بر ایجاد تنوع در اکوسیستم کشاورزی و همچنین ایجاد پایداری تولید، در افزایش درآمد اقتصادی و بهره‌وری استفاده از زمین‌های کشاورزی به‌طور قابل ملاحظه‌ای سهیم می‌باشد. شاخص RVT توسط پژوهشگران دیگری نیز برای ارزیابی سودمندی کشت مخلوط استفاده شده است و نتایج شاخص‌های دیگر همچون LER را تأیید کرده است (Rezaei Chianeh et al., 2011; Hamzei & Ghamari Rahim, 2014).

جدول ۸- اثر نسبت‌های کشت مخلوط ذرت و لوبیا بر شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط

Table 8– Effect of Intercrropng ratio on efficiency of bean-maize intercropping indices

باکتری Bacteria	نسبت کشت مخلوط *Intercrropng* ratio (B:bean -M:maize)	عملکرد دانه ذرت Maize grain yield ($kg.ha^{-1}$)	عملکرد دانه لوبیا Bean seed yield ($kg.ha^{-1}$)	نسبت برابری زمین ذرت LERmaize	نسبت برابری زمین لوبیا LERbean	برابری نسبت زمین Land equivalence ratio (LER)	شاخص نسبت رقابت ذرت Competition ration (CRmaize) CRa	شاخص نسبت رقابت لوبیا CRbean	ضریب ازدحام نسبی ذرت Kmaize	ضریب ازدحام نسبی لوبیا Kbean	ازدحام ضریب نسبی Relative crowding coefficient (RCC)	مجموع ارزش نسبی ذرت Relative value total (RVTmaize)	مجموع ارزش نسبی لوبیا RVTb	قابلیت تهاجم ذرت Aggressivity (A_{maize})	قابلیت تهاجم لوبیا A_{bean}
عدم تلقیح Non-inoculation	۲۵٪ لوبیا + ۷۵٪ ذرت 25%B + 75%M	4315.0	511	0.82	0.24	1.07	1.12	0.89	1.55	0.97	1.51	0.95	1.79	0.12	-0.12
	۵۰٪ لوبیا + ۵۰٪ ذرت 50% B + 50% M	2726.7	1130	0.52	0.54	1.06	0.96	1.04	1.08	1.17	1.27	0.81	1.52	-0.04	0.04
	۷۵٪ لوبیا + ۲۵٪ ذرت 75% B + 25% M	1431.7	1603	0.27	0.77	1.04	1.07	0.93	1.13	1.09	1.23	0.68	1.28	0.07	-0.07
تلقیح Inoculation	۲۵٪ لوبیا + ۷۵٪ ذرت 25% B + 75% M	4405.0	655	0.75	0.28	1.03	0.90	1.11	1.00	1.15	1.16	0.90	1.68	-0.11	0.11
	۵۰٪ لوبیا + ۵۰٪ ذرت 50% B + 50% M	2866.7	1310	0.49	0.55	1.04	0.88	1.13	0.96	1.24	1.19	0.79	1.46	-0.13	0.13
	۷۵٪ لوبیا + ۲۵٪ ذرت 75% B + 25% M	1582.5	2218	0.27	0.94	1.21	0.86	1.16	1.11	5.07	5.62	0.77	1.44	-0.17	0.17

در مطالعه حاضر، افزایش عملکرد و اجزاء آن در شرایط تلقیح با باکتری در تمام سطوح کشت خالص و مخلوط برای هر دو گونه گیاهی مشاهده شد. افزون‌براین، با شاخص‌های مختلف سودمندی کشت مخلوط نیز برتری کشت مخلوط در مقایسه با سیستم تک‌کشتی در هر دو شرایط عدم تلقیح و تلقیح با باکتری مشاهده شد، هر چند این برتری در شرایط تلقیح با باکتری نمود بیشتری یافته بود. در توجیه این نتایج، اظهار شده است که کشت مخلوط ذرت و لوبیا، سبب درهم‌آمیختن ریشه‌های آن‌ها با یکدیگر می‌شود که به تبادل میکروبی آن‌ها، از جمله روابط همزیستی مانند *ریزوبیوم‌ها*، کمک می‌کنند (Aguirre-Noyola et al., 2021). از جمله دلایل افزایش عملکرد ذرت در یک سیستم کشت مخلوط این است که با توجه به سیستم ریشه‌ای عمیق‌تر ذرت نسبت به لوبیا، ریشه‌های ذرت حجم بیشتری از خاک را برای جذب مواد مغذی و آب می‌کاوند و در نتیجه، استفاده از خاک کارآمدتر از سیستم‌های تک‌کشتی است (Aguilar-Jiménez et al., 2019). همچنین تنوع میکروبی ریزوسفر کشت‌های مخلوط بیشتر است، زیرا ترشحات ریشه به‌عنوان مواد مغذی و مواد شیمیایی جذب‌کننده عمل می‌کنند که به ریزجانداران اجازه می‌دهند تا میزبان‌های جدید را کلونیزه کنند که منجر به اشتراک عوامل میکروبی بین گیاهان، از جمله اندوفیت‌هایی مانند *ریزوبیوم* می‌شود (Mommer et al., 2016). اگرچه ذرت گره تشکیل نمی‌دهد، امّا با افزایش بیان ژن‌های ریشه حبوبات درگیر در سنتز فلاونوئیدها[1]، سیگنال‌دهی اکسین[2] و فرآیند گره‌زایی[3] ریزوبیومی و تثبیت نیتروژن در بقولات، رشد ریشه ذرت را نیز تحریک می‌کنند (Li et al., 2016). استفاده بهتر از مواد غذایی در ذرت کشت شده همراه با لوبیا (Aguirre-Noyola et al., 2021)، سویا (Nyoki & Ndakidemi, 2018) و نخود (Zhao et al., 2020) نیز مشاهده شده است.

نتیجه‌گیری

کشت مخلوط ذرت با لوبیای محلی گیلان به‌دلیل تعلق این گیاهان به دو خانواده مختلف و جنبه همیاری و همزیستی مکملی موجب شد تا بهره‌برداری از واحد سطح، بیشتر از کشت خالص آن‌ها باشد. در مجموع در تحقیق حاضر، در هر دو شرایط عدم تلقیح و تلقیح با باکتری، بیشترین عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در کشت خالص به‌دست آمد. در هر نسبت کشت مخلوط و خالص در شرایط تلقیح با باکتری، مقدار این دو صفت بالاتر از همان نسبت کشت مخلوط و خالص در شرایط عدم تلقیح بود. با توجه به تعداد بیشتر بوته‌های ذرت در کشت خالص انتظار به‌دست آمدن عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک بیشتر در کشت خالص ذرت و پس از آن نسبت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد لوبیا وجود داشت، که چنین نتیجه‌ای نیز به‌دست آمد. تجزیه و تحلیل شاخص‌های ارزیابی سودمندی کشت مخلوط با توجه به داشتن بالاترین نسبت برابری زمین، ضریب ازدحام نسبی، شاخص نسبت رقابت ذرت و سهم عملکرد ذرت نیز این نتیجه‌گیری را تأیید کرد. در مجموع، برای تولید پایدار محصولات، کشت مخلوط ذرت با لوبیا تحت تلقیح با باکتری *ریزوبیوم*، می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب برای دسترسی به عملکرد مطلوب باشد.

References

1. Aguilar-Jiménez, C.E., Galdámez-Gadámez, J., Martínez-Aguilar, F.B., Guevara-Hernández, F., & Vázquez-Solis, H. (2019). Eficiencia del policultivo maízfrijol-calabaza bajo manejo orgánico en la Frailesca, Chiapas, México. *RevistaCientífica Agroecosistemas*, *7*, 64–72.
2. Aguirre-Noyola, J.L., Rosenblueth, M., Santiago-Martínez, M.G., & Martínez-Romero, E. (2021). Transcriptomic responses of rhizobium phaseoli to root exudates reflect its capacity to colonize maize and common bean in an intercropping system. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 740818. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.740818
3. Aguirre-von-Wobeser, E., Rocha-Estrada, J., Shapiro, L.R., & de la Torre, M. (2018). Enrichment of verrucomicrobia, actinobacteria and burkholderiales drives selection of bacterial community from soil by maize

1- Flavonoids synthesis
2-Auxin signaling
3- Nodulation process

roots in a traditional milpa agroecosystem. *PLoS One*, *13*, e0208852. https://doi.org/10.1371/journal. pone.0208852

4. Alexander, M.W., & Genter, C.F. (1962). Production of corn and soybean in alternate pairs of rows. *Agronomy Journal*, *54*, 233-234.
5. Ardalani, S., Saeidi, M., Jalali-Honarmand, S., Ghobadi, M., & Abdoli, M. (2014). Evaluation of grain yield and its relationship with remobilization of dry matter in bread wheat cultivars under water deficit stress at the post anthesis. *Iranian Journal of Dryland Agronomy*, *3*(2), 173-195. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/idaj.2015.101297
6. Banik, P., Midya, A. Sarkar, B.K., & Ghose, S.S. (2006). Wheat and chickpea intercropping systems in additive series experiment: Advantages and smothering. *European Journal of Agronomy*, *24*, 324-332. https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.010
7. Bhattacharjee, R.B., Singh, A., & Mukhopadhyay, S.N. (2008). Use of nitrogen-fixing bacteria as biofertilizer for non-legumes: Prospects and challenges. *Applied and Environmental Microbiology*, *80*(2), 199-209. https://doi.org/10.1007/s00253-008-1567-2
8. Charani, E., Sharifi, P., & Aminpanah, H. (2017). Evaluation of grain yield and yield components in intercropping of maize and bean. *Biharean Biologist*, *11*(1), 37-42.
9. Charani, E., Sharifi, P., & Aminpanah, H. (2018). The competitive ability of maize (*Zea mays* L.)- common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercrops against weeds. *Revista de la Facultad de Agronomia*, *35*, 40-62.
10. Chen, N., Li, X., Shi, H., Hu, Q., Zhang, Y., Hou, C., & Liu, Y. (2022). Modeling evapotranspiration and evaporation in corn/tomato intercropping ecosystem using a modified ERIN model considering plastic film mulching. *Agricultural Water Management*, *260*, 107286. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107286
11. Dabbagh Mohammadi-Nassab, A., Amini, R., & Tamari, E. (2015). Evaluation of maize and three cultivars of common bean intercropping with application of biofertilizers and chemical fertilizers. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, *25*, 99-113. (In Persian with English abstract).
12. Dahmardeh, M., & Keshtegar, A. (2014). Evaluation of yield and yield components of maize (*Zea mays* L.) in intercropping with peanuts (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Agroecology*, *6*(2), 311-323. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v6i2.39371
13. Dhima, K., Lithourgidis, A., Vasilakoglou, I., & Dordas, C. (2007). Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratios. *Field Crops Research*, *100*(2-3), 249-256. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.008
14. Farahvash, F., Rahmati, A., Jafari, F., & Amir Hallaji, H. (2012). Effect of number of planting rows in strip intercropping of maize, pintobean and soybean and their sole cropping on seed yield. *Journal of Crop Ecophysiology*, *5*(20), 27-42. (In Persian with English abstract).
15. Fatemi Devin, R., Hosseini, S.B., Moghadam, H., & Motesharezadeh, B. (2020). Effect of organic and bio-fertilizers and additive and replacement intercropping systems on corn (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yields. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *51*(4), 133-145. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.286433.654634
16. Fotohi-Chianeh, S., Javanshir, A., Dabbagh Mohammadi Nassab, A., Zande, E., Razavi, F., & Rezaei-Chianeh, E. (2012). Effect of various corn (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping densities on crop yield and weed biomass. *Journal of Agroecology*, *4*(2), 131-143. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v4i2.14966
17. Gastélum, G., & Rocha, J. (2020). Milpas as a model for studying microbiodiversity and plant-microbe interactions. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, *23*, 1–13. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.254
18. Gebyehu, S., & Simane, B. (2006). Genotype × cropping systems interaction in climbing bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown as sole crop and in association with maize (*Zea mays* L.). *European Journal of Agronomy*, *24*, 396-403. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.01.005
19. Gómez-Godínez, L.J., Fernandez-Valverde, S.L., Martínez Romero, J.C., & Martínez-Romero, E. (2019). Metatranscriptomics and nitrogen fixation from the rhizoplane of maize plantlets inoculated with a group of PGPRs. *Systematic and Applied Microbiology*, *42*, 517–525. https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.05.003
20. Hamzei, J., & Ghamari Rahim, N. (2014). Evaluation of corn-soybean intercropping advantages using agronomic and weed control efficiency indices. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *24*(3), 61-74. (In

Persian with English abstract)
21. Hassan, M., & Bin Sahid, I. (2016). Evaluation of rhizobium inoculation in combination with phosphorus and nitrogen fertilization on groundnut growth and yield. *Journal of Agronomy*, *15*(3), 142-146. https://doi.org/10.3923/ja.2016.142.146
22. Jose´-Miguel, B., Mar ´a, J.P., Rosario, A., & Concepcio´n, A. (2005). Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, *56*(417), 1761-78. https://doi.org/10.1093/jxb/eri197
23. Khan, M., Khan, R.U., Wahab, A., & Rashid, A. (2005). Yield and yield components of wheat as influenced by intercropping of chickpea, lentil and rapeseed in different proportions. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, *42*, 1-3.
24. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Feizi, H., Amirmoradi, S., & Mondani, F. (2010). Effect of strip intercropping of maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on yield and land equivalent ratio in weedy and weed free conditions. *Journal of Agroecology*, *2*(2), 225-235. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v2i2.7627
25. Latati, M., Pansu, M., Drevon, J.J., & Ounane, S.M. (2013). Advantage of intercropping maize (*Zea mays* L.) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on yield and nitrogen uptake in Northeast Algeria. *International Journal of Research in Applied Sciences*, *1*, 1–7.
26. Li, B., Li, Y.Y., Wu, H.M., Zhang, F.F., Li, C.J., & Li, X.X. (2016). Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N_2 fixation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*, 6496–6501. https://doi.org/10.1073/pnas. 1523580113
27. McGilchrist, C.A. (1965). Analysis of competition experiments. *Biometrics*, *21*, 975–985. https://doi.org/10.2307/2528258
28. Mommer, L., Kirkegaard, J., & van Ruijven, J. (2016). Root–root interactions: Towards a rhizosphere framework. *Trends Plant Science*, *21*, 209–217. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.009
29. Moradi, P., Asghari, J., Mohsen Abadi, G., & Samiezadeh, H. (2016). Evaluation of the beneficial effects of triple intercropping of maize (*Zea mays* L.), pinto been (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Crop Production and Processing*, *6*(19), 177-189. (In Persian with English abstract). URL: http://jcpp.iut.ac.ir/article-1-2521-fa.html"
30. Nachigera, G.M., Ledent, J.F., & Draye, X. (2008). Shoot and root competition in potato/maize intercropping: Effects on growth and yield. *Environmental and Experimenttal Botany*, *64*(2), 180-188. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.05.008
31. Nasrollahzadeh Asl, A., & Talebi, M. (2016). Evaluation of sunflower (*Heliantus annus* L.) and corn (*Zea mays* L.) intercropping based on replacement method in Khoy region. *Journal of Crop Ecophysiology*, *8*(27), 204-215. (In Persian with English abstract).
32. Nyoki, D., & Ndakidemi, P.A. (2018). Root length, nodulation and biological nitrogen fixation of rhizobium inoculated soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) grown under maize (*Zea mays* L.) intercropping systems and P and K fertilization. *Advances in Bioresearch*, *9*, 173–180. https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1455846
33. Piroozi, B., Hosseini, S.M.B., Mazaheri, D., & Heidari, H. (2014). Evaluation of sowing time and intercropping on vegetative and reproductive traits of bean (*Phaseolus vulgaris*) and biological yield of forage maize (*Zea mays*) *Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi)*, *104*, 62-68. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/AJ.2014.101646
34. Raei, Y., Ahmadabad, M.S., Ghassemi-Golezani, K., & Ghassemi, S. (2020). Pinto bean and black mustard responses to bio-fertilizers under intercropping system. *Advances in Horticultural Science*, *34*(2), 175-182. https://doi.org/10.13128/ahsc-7407.
35. Rebollar, E.A., Sandoval-Castellanos, E., Roessler, K., Gaut, B.S., Alcaraz, L.D., & Benítez, M. (2017). Seasonal changes in a maize-based polyculture of central Mexico reshape the co-occurrence networks of soil bacterial communities. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 2478. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02478
36. Rezaei-Chianeh, E., Dabbagh Mohammadi Nassab, A., Shakiba, M.R., Ghassemi-Golezani, K., & Aharizad, S. (2011). Intercropping of maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) at different plant population densities. *African Journal of Agricultural Research*, *7*, 1786-1793.
37. Rosenblueth, M., & Martínez-Romero, E. (2004). Rhizobium etli maize populations and their competitiveness for root colonization. *Archives of Microbiology*, *181*, 337–344. https://doi.org/10.1007/s00203-004-0661-9
38. Rostami, L., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2011). The effect of different crop plant densities on radiation

absorption and use efficiency by corn (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropped canopy. *Journal of Agroecology*, *3*(3), 290-297. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v3i3.13554

39. Sarlak, Sh., & Aghaalikhani, M. (2009). Effect of pant dnsity and mxing rtio on cop yeld in sweet corn (*Zea mays* L. var Saccharata) and mngbean (*Vigna radiata* L.) intercropping. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *11*(4), 367-380. (In Persian with English abstract). URL: http://agrobreedjournal.ir/article-1-197-en.html
40. Sharma, K., & Garg, V.K. (2018). Comparative analysis of vermicompost quality produced from rice straw and paper waste employing earthworm Eisenia fetida (Sav.). *Bioresource Technology*, *250*, 708–715. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.101
41. Singh, R.K., Malik, N., & Singh, S. (2013). Impact of rhizobial inoculation and nitrogen utilization in plant growth promotion of maize (*Zea mays* L.). *Nusantara Bioscience*, *5*, 8-14. https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n050102
42. Tsubo, M., Walker, S., & Mukhala, E. (2001). Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Research*, *71*, 17-29. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00142-3
43. Vandermeer, J. (1990). *Intercropping. In Agroecology*, Mc Graw – Hill publishing Co.
44. Vora, S.M., Joshi, P., Belwalkar, M., & Archana, G. (2021). Root exudates influence chemotaxis and colonization of diverse plant growth promoting rhizobacteria in the pigeon pea–maize intercropping system. *Rhizosphere, 18*, 100331. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100331
45. Willey, R.W., & Rao, M.R. (1980). A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. *Experimental Agriculture, 16*(2), 117–125.
46. Zhao, C., Fan, Z., Coulter, J.A., Yin, W., Hu, F., & Yu, A. (2020). High maize density alleviates the inhibitory effect of soil nitrogen on intercropped pea. *Agronomy, 10*, 248. https://doi.org/10.3390/agronomy10020248

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 683-711

Estimating Suitable Areas for Dry Almond (*Amygdalus communis* L.) Cultivation Development in Fars Province using Geographic Information System (GIS)

Ayatollah Karami [1*], Alireza Salehi [2] and Vida Aliyari [3]

1 and 3- Professor and Ph.D. Student, Department of Rural Development Management, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran, respectively.
2-Assistant Professor, Department of Forest, Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran.
(*- Corresponding author's Email: ayatkarami@yu.ac.ir)

Received: 28-02-2024 Revised: 29-05-2024 Accepted: 11-06-2024 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Karami, A., Salehi, A., & Aliyari, V. (2025). Estimating suitable areas for dry almond (*Amygdalus communis* L.) چcultivation development in Fars province using Geographic Information System (GIS). *Journal of Agroecology*, *16*(4), 683-711. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.87067.1193

Introduction
Drought stress is one of the major environmental stresses affecting more than 60% of Iran's area. The use of drought-resistant plants, especially Almonds (*Amygdalus communis L.*) that grow in hilly areas with calcareous and stony soils is of great importance. Iran is recognized as the fifth largest almond producer in the world. Almond cultivation not only has high nutritional value but can also contribute to ecosystem improvement, increase farmers' income, and create job opportunities. Fars province is one of the suitable regions for almond cultivation, ranking first in terms of the cultivation of dry almonds and sixth in terms of under cultivation of irrigated almonds. However, almond performance in this province is unsatisfactory and is positioned lower. It appears that the province has not fully utilized its potential, and almond cultivation in many suitable lands has been neglected. Therefore, this study focuses on analyzing land suitability for almond cultivation in Fars province by integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy algorithm with the Geographic Information System (GIS).

Materials and Methods
In order to estimate the extent of suitable areas for dry almond cultivation in Fars province, four criteria (including climatic, topographic, environmental adaptation, and socio-economic) and 14 sub-criteria were used. These sub-criteria include elevation, land slope, slope aspects, land use, soil texture, seedling growth temperature, the minimum temperature during the flowering stage, relative humidity flowering stage, growth cycle temperature, fruit formation and ripening stage temperature, mean annual precipitation, distance from the road, distance from water levels and distance from population centers. The weights of criteria and sub-criteria in the study were calculated using the Analytic Hierarchy Process (AHP) process and Expert Choice software. After fuzzy mapping

https://doi.org/10.22067/agry.2024.87067.1193

and combining fuzzy scores with the weights obtained from the AHP analysis, the Fuzzy overlay algorithm was used to overlay different thematic layers (climatic, topographic, socio-economic, and environmental adaptation). Finally, the map estimating the extent of suitable areas for almond cultivation was classified into five classes.

Results and Discussion

In this research, suitable areas for almond cultivation have been identified using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS. These areas were selected based on 14 different sub-criteria. The findings identified mean annual precipitation as the most critical sub-criterion for almond tree cultivation, followed by elevation, mean seedling growth temperature, and relative humidity during the flowering stage. After fuzzifying the maps and combining the fuzzy scores with the assigned weights, thematic maps were generated for each criterion. Analysis of these maps revealed that the most limiting factors for almond cultivation in Fars Province are climatic conditions (including precipitation, mean minimum temperature during the flowering stage and temperatures during the fruit formation and ripening stages) and topography (slope percentage and elevation). Despite these limitations, the study found that Fars Province has significant potential for dry almond cultivation. Specifically, the study determined that highly suitable, suitable, and moderately suitable lands for almond cultivation account for 9.02%, 16.46%, and 21.63% of the province's area, respectively. The highly suitable zones, covering approximately 9.02% of the province, are particularly favourable for almond cultivation. Additionally, suitable and moderately suitable zones make up 16.46% and 21.63% of the region's area, respectively, further supporting the potential for almond farming in the province. However, the suitability of about 17.09% of the region for almond cultivation is low, and 5.01% of the province area is unsuitable for almond cultivation. Additionally, around 30.79% of the total province area is not recommended for almond cultivation due to land use types. In general, the northwestern, western, and southwestern areas of Fars province have suitable capability, and the southeastern region of Fars province has unsuitable capability for dry almond tree cultivation. Based on the analysis and results obtained, the importance of proper planning for agricultural crop cultivation and appropriate land suitability analysis for optimal land resource utilization for sustainable agricultural development is evident.

Conclusion

Based on the findings, Fars province holds significant potential for dry almond cultivation development, yet it has not fully utilized all of its capabilities to date. Consequently, it is recommended that the expansion of almond tree cultivation in this province be prioritized. Proper planning and optimal utilization of suitable areas in Fars province, considering environmental conditions and defined criteria, will enhance the performance of almond cultivation and facilitate sustainable agricultural development in this region. The results of this study can be valuable to all individuals and organizations active in the field of agricultural development and land resource management (including farmers and horticulturists in Fars province, officials and policymakers related to agriculture and rural development, researchers, and academics in geology, agriculture, and sustainable natural resource development in Fars province) and assist them in decision making regarding almond cultivation development.

Acknowledgements

The authors of the present study would like to express their gratitude to the collaboration of the National Meteorological Organization for providing the necessary data for this research.

Keywords: Feasibility assessment, Location analysis, Rural economy, Zoning

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ١٤٠٣، ص ٧١١-٦٨٣

برآورد سطح پهنه‌های مناسب توسعه کاشت بادام (.*Amygdalus communis* L) دیم در استان فارس با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

آیت‌اله کرمی[1]*، علیرضا صالحی[2] و ویدا علی‌یاری[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

چکیده

تجزیه و تحلیل تناسب زمین به پیش‌نیازی برای استفاده بهینه از منابع موجود زمین برای استفاده پایدار از اراضی با توجه به توانمندی آن‌ها تبدیل شده است. هدف از این مطالعه، برآورد سطح پهنه‌های مناسب توسعه کاشت بادام (.*Amygdalus communis* L) دیم در استان فارس با ادغام الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی (AHP) - فازی با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. با استفاده از AHP، وزن چهار معیار (شامل اقلیمی، توپوگرافی، سازگاری محیطی و اجتماعی- اقتصادی) و ۱۴ زیرمعیار مؤثر بر کاشت بادام دیم تعیین شد. براساس یافته‌ها، میانگین بارش سالیانه به‌عنوان مهم‌ترین زیرمعیار برای کاشت درخت بادام دیم تعیین شد و پس از آن، به‌ترتیب زیرمعیارهای ارتفاع، میانگین دمای رشد جوانه، رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی از اهمیت بیشتری برخوردار بودند. پس از فازی‌سازی نقشه‌ها و ترکیب امتیازهای فازی و وزن‌های به‌دست آمده، نقشه‌های موضوعی برای هر یک از معیارها ارائه شد. بررسی نقشه‌ها نشان داد که مهم‌ترین معیارهای محدودکننده برای کاشت بادام دیم در استان فارس شامل شرایط اقلیمی (بارش، میانگین حداقل دمای مرحله گل‌دهی، میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن) و توپوگرافی (درصد شیب و ارتفاع) است. براساس یافته‌ها، استان فارس از پتانسیل مطلوبی برای کاشت بادام دیم برخوردار می‌باشد، به‌گونه‌ای که اراضی بسیار مناسب، مناسب و نسبتاً مناسب برای کاشت بادام به‌ترتیب ۹/۰۲، ۱۶/۴۶ و ۲۱/۶۳ درصد از مساحت استان را شامل می‌شود. تناسب ۱۷/۰۹ درصد از استان فارس اندک بوده و ۵/۰۱ درصد برای کاشت بادام نامناسب می‌باشد. همچنین ۳۰/۷۹ درصد از کل سطح استان فارس به‌دلیل نوع کاربری اراضی برای کاشت بادام پیشنهاد نمی‌شود. به‌طور کلی، تحلیل نقشه تناسب نهایی نشان داد که نواحی شمال غربی، غرب و جنوب غربی استان فارس از توانمندی مناسب و نواحی جنوب شرقی استان فارس از توانمندی نامناسبی برای کاشت درخت بادام دیم برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: اقتصاد روستایی، امکان‌سنجی، پهنه‌بندی، مکان‌یابی

مقدمه

امروزه تهدیدات محدودکننده‌ای برای حفظ و پایداری منابع طبیعی وجود دارد. در بسیاری از مناطق جهان، تغییر اقلیم به‌دلیل اثرات منفی آن بر بهره‌وری کشاورزی و ایمنی مواد غذایی، به مشکل فزاینده حال حاضر و آینده بدل شده است (Sadiq et al., 2023). گسترش جمعیت و به‌دنبال آن، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی و تأثیر تغییر اقلیم بر کاهش منابع آب، مدیران و سیاست‌گذاران بخش کشاورزی را با چالشی بزرگ مواجه نموده است (Nungula et al., 2024;Mitra et al., 2023). بنابراین، جوامع علمی در سراسر جهان به‌دنبال راهکارهایی جهت پاسخ و سازگاری با تغییرات اقلیم در زمینه‌ی کشاورزی هستند (De Wit & Haines,

۱ و ۳- به‌ترتیب استاد و دانشجوی دکتری، گروه مدیریت توسعه روستایی،دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.
۲- استادیار گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج یاسوج، ایران.
(*- نویسنده مسئول: (Email: ayatkarami@yu.ac.ir
https://doi.org/10.22067/agry.2024.87067.1193

2022). ارزیابی تناسب زمین، یک رویکرد مهم در این زمینه است که به تدوین استراتژی‌هایی برای برنامه‌ریزی منطقی استفاده از زمین، استفاده پایدار و مناسب از منابع طبیعی و افزایش بهره‌وری کشاورزی کمک می‌کند (Mushtaq et al., 2023Hudait & Patel, 2022 ;)، چرا که هر یک از محصولات کشاورزی، شرایط اقلیمی خاصی برای کشت نیاز داشته و برنامه‌ریزی فضایی مناسب و متوازن با قابلیت اراضی برای تولید محصولات کشاورزی جهت تأمین نیازهای غذایی جمعیت در حال رشد جهان در شرایط تغییر اقلیم بسیار حائز اهمیت است (Mitra et al., 2023). در این بین، استفاده از مدیریت پایدار زمین با استفاده از فناوری سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)[1] به‌عنوان ابزار ضروری ارزیابی تناسب زمین، راهگشای استفاده از زمین در آینده است. GIS می‌تواند با استفاده از داده‌های مکانی مختلف، ضمن شناسایی محدودیت‌های زمین، به افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی و تضمین کشاورزی پایدار در منطقه کمک کند (Nungula et al., 2024). محدودیت زمین و فشار بر منابع آبی و خاکی در کشورهای در حال توسعه، سلامت و بهره‌وری بخش کشاورزی را بیش از سایر نقاط جهان تحت تأثیر قرار داده است (Mitra et al., 2023). با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور ایران (Khazaei et al., 2021) و قرارگیری بیش از ۶۰ درصد مساحت کشور در چنین مناطقی (Rahimi et al., 2021)، خشکی و محدودیت منابع آبی، عملکرد و تولید محصولات کشاورزی را بیش از هر تنش دیگری تحت تأثیر قرار داده و خسارت‌های فراوانی را به بار می‌آورد (Mohammadi, 2022; Moradi et al., 2019; Sharifzadeh et al., 2023). این در حالی است که بخش کشاورزی در کشور ایران یکی از سه بخش اصلی اقتصاد است که نقش مهمی در تأمین مواد غذایی، رفاه اجتماعی و تولید ناخالص داخلی (GDP)[2] دارد. بخش کشاورزی با توجه به ارتباطات گسترده‌ای که با سایر بخش‌های اقتصادی دارد، زمینه را برای تولید ثروت، ایجاد بازار و تولید ارز فراهم می‌کند (Zamanialaei et al., 2023). میانگین بارندگی سالانه در ایران ۲۵۰ میلی‌متر است که حدود یک‌سوم میانگین بارندگی سالانه جهان است (Kheyruri et al., 2023). تقریباً ۲۵ درصد از جمعیت ایران در مناطق روستایی زندگی می‌کنند و بیشتر آن‌ها به فعالیت‌های کشاورزی اشتغال دارند. ازآن‌جایی‌که کشاورزی منبع اصلی درآمد بسیاری از خانوارهای روستایی ایران است، خشکسالی و حداقل بارش منجر به کاهش درآمد می‌شود (Khalili et Khalili et al., 2020 ; al., 2021b). استان فارس یکی از بزرگ‌ترین (۱۲۱۰۰۰ کیلومترمربع، حدود ۷/۵ درصد از مساحت ایران) و پرجمعیت‌ترین استان‌های (بیش از چهار میلیون) ایران است و علاوه‌براین، یکی از مناطق پیشرو در تولید محصولات کشاورزی و برخی محصولات باغی است (Khalili et al., 2020Bijani et al., 2022 ; Khalili et ; al., 2021a Maleksaeidi & Keshavarz, 2019 ;). استان فارس دارای آب‌وهوای بسیار متنوعی از گرم و خشک در نواحی جنوبی و سرد در نواحی شرقی و مرطوب در نواحی شمالی است. دمای این استان، از ۱۰ درجه در زمستان تا ۴۵ درجه در تابستان متغیر است. میزان بارندگی سالانه در مناطق مختلف فارس ۲۹۴/۷ میلی‌متر است (۱۹۷۱-۲۰۱۴ میلادی) است (Karimi et al., 2021 ; Maleksaeidi & Keshavarz, 2019). این استان در دهه‌های اخیر، چندین دوره خشکسالی شدید را تجربه کرده که بیش از نیمی از منطقه را تحت تأثیر قرار داده است. در سال ۲۰۱۴، خشکسالی شدید به تولید محصولات زراعی آسیب رساند و ۶۹۰ میلیون دلار خسارت وارد کرد (Khalili et al., 2021a). ازآن‌جایی‌که اقتصاد مناطق روستایی به‌شدت به تولید محصولات سالانه و دائمی متکی است (Karimi et al., 2021) و بخش کشاورزی منبع اصلی درآمد جوامع روستایی فارس است (Maleksaeidi & Keshavarz, 2019)، مخاطره خشکسالی شدید کنونی به‌طور قابل توجهی معیشت و اقتصاد خانوارهای روستایی را تحت تأثیر قرار داده است. قابل ذکر است که علی‌رغم وابستگی قابل توجه ساکنان این نواحی به کشاورزی، تنها ۱۱/۴۲ درصد از اراضی استان فارس برای کشاورزی مناسب است. علاوه‌براین، بحران آب (یعنی کاهش قابل توجه منابع آب سطحی و زیرزمینی) محدودیتی بزرگ برای خانوارهای کشاورز است که آن‌ها را در برابر تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی آسیب‌پذیرتر می‌کند (Karimi et al., 2021). از سویی، توپوگرافی و شرایط اقلیمی خاص در کنار سایر شرایط خاص محیطی مانند قرار گرفتن در دامنه‌های رشته‌کوه زاگرس، تنوع زیادی در بوم‌سازگان و زیستگاه‌های این استان ایجاد کرده است. بااین‌حال، توسعه برنامه‌ریزی نشده، رشد جمعیت و تشدید فعالیت‌های کشاورزی در طول چند دهه گذشته، بوم‌سازگان شکننده و تنوع زیستی غنی منطقه را به مخاطره انداخته است. لذا، این استان به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد (Maleksaeidi &

1- Geographic Information Systems
2- Gross Domestic Product

Keshavarz, 2019). رخداد خشکسالی‌های مداوم اخیر همراه با افزایش برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش سطح این منابع در استان فارس (Solimani et al., 2021)، لزوم استفاده از گیاهان مقاوم به چنین آب‌وهوایی را آشکار می‌سازد (Rahimi et al., 2021). بادام (*Amygdalus communis* L.) یکی از درختان میوه مقاوم به کم‌آبی است (Borji et al., 2015) و به‌عنوان گونه‌ای سازگار با خاک‌های سنگلاخی، آهکی و خشک برای احداث باغ در زمین‌های شیب‌دار کشور مورد توجه فراوان است (Moradi et al., 2019)، به‌گونه‌ای که ایران در بین کشورهای تولیدکننده بادام پس از آمریکا، اسپانیا، سوریه و ایتالیا در رتبه پنجم قرار دارد (Tavakoli et al., 2021).

محصول بادام علاوه‌بر دارا بودن ارزش غذایی بالا، موجب بهبود کیفیت بوم‌سازگان، افزایش درآمد مزرعه و ایجاد فرصت‌های شغلی اساسی می‌شود (Alhajj Ali et al., 2023). لذا، به‌عنوان محصولی مهم و اقتصادی کشت شده (Abouei et al., 2021) و یکی از نمونه‌های مهم صادراتی کشور محسوب می‌گردد (Ministry of Agricultural Jihad, 2022b). صادرات هر کیلوگرم بادام حدود ۱۵ دلار ارزآوری دارد که بیانگر اهمیت اقتصادی، ضرورت سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی برای توسعه سطح زیرکشت و افزایش تولید این محصول است (Ahmadzadeh Chaleshtori et al., 2020). با توجه به اینکه عملکرد زراعت دیم نسبت به زراعت آبی از سالی به سال دیگر، و از یک مکان به مکانی دیگر به‌شدت متغیر است، این موضوع نشان می‌دهد که آب‌وهوا عامل اصلی در تغییرات عملکرد است. به همین علت، از عوامل موفقیت تولید محصول در نظام کشت دیم، شناخت شرایط مکانی، محیطی و اقلیمی است. با شناسایی نیازهای بوم‌شناختی و همچنین محدودیت‌ها و توانمندی‌های محیطی، می‌توان به عملکرد بیشتر و پایدار در واحد سطح همراه با حفظ منابع دست یافت (JafarNodeh et al., 2023). کشت دیم در کشور با توجه به رشد جمعیت و کافی نبودن اراضی تحت کشت آبی برای تولید محصولات راهبردی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در ایران سال‌ها است که در بیشتر مناطق نیمه‌کوهستانی، درختان بادام به‌صورت دیم کاشته شده‌اند (Khalili Torghabe et al., 2022).

استان فارس یکی از مناطق مستعد کشت بادام است که رتبه اول کشور را از نظر سطح زیرکشت بادام دیم و رتبه ششم کشور را از نظر سطح زیرکشت بادام آبی به خود اختصاص داده است (جدول ۱). این استان از نظر میزان تولید بادام دیم در رتبه اول کشور و از نظر میزان تولید بادام آبی، در رتبه ششم کشور قرار گرفته است، در حالی‌که استان فارس از نظر سطح زیرکشت و میزان تولید بادام رتبه اول کشور را داراست، امّا از نظر عملکرد بادام دیم و آبی، وضعیت مناسبی ندارد و به‌ترتیب در رده‌های ۱۶ و ۱۰ کشور قرار دارد (Ministry of Agricultural Jihad, 2022b). این ممکن است به عوامل زیادی نسبت داده شود، یکی از دلایل آن ممکن است کشت بادام در مناطق نامناسب باشد. اگرچه عوامل دیگری مانند آفات و بیماری‌ها، حاصلخیزی خاک و شیوه‌های بد زراعی ممکن است باعث تولید کم بادام شوند، زمین‌های نامناسب همچنان مانع از حداکثر بازده بالقوه بادام می‌شوند و بر تولید بادام تأثیر منفی می‌گذارند. به نظر می‌رسد که این استان از تمامی توان و توانمندی خود استفاده ننموده و کاشت درخت بادام در بسیاری از زمین‌های مستعد کشت، مغفول مانده است.

تحلیل تناسب زمین شامل ارزیابی‌های کیفی توپوگرافی، پوشش گیاهی، آب‌وهوا و ویژگی‌های خاک است که به‌طور معمول برای هر نوع محصول به‌طور جداگانه انجام می‌شود. ارزیابی تناسب زمین برای محصولات درختی برای تولید کشاورزی در مناطق آسیب‌پذیر بوم‌شناسی مناطق نیمه‌خشک بسیار قابل توجه است (Alhajj Ali et al., 2023). هدف اصلی فرآیند مکان‌یابی، جلوگیری از هدررفتن هزینه‌ها و تضمین کارآیی بیشینه می‌باشد و مانند هر فرآیند دیگری برای اجرای مکان‌یابی، وجود داده‌های خام ورودی ضروری است. ورودی‌های مورد نیاز شامل لایه‌های اطلاعاتی مختلف است که از منطقه مورد بررسی تهیه می‌شود که باید پیش از ورود به مدل‌های مکان‌یابی آماده‌سازی شوند. خروجی مدل‌های مکان‌یابی، مکان‌های مناسب برای ایجاد فعالیتی خاص می‌باشد که نتیجه ارزیابی و تلفیق داده‌های ورودی است. مطالعه تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر، تحقیقات متعددی در رابطه با تعیین مناطق مستعد کاشت درختان با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و تهیه نقشه‌های مرتبط در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در داخل و خارج کشور صورت پذیرفته است که در ادامه، به چند مورد از این مطالعات اشاره شده است.

جدول ۱- سطح، میزان تولید و عملکرد محصول بادام

Table 1- Area, production rate and yield of almond crop

	سطح غیربارور Non-fertile area (ha)			سطح بارور Fertile area (ha)		
	آبی Irrigated	دیم Dry	جمع Total	آبی Irrigated	دیم Dry	جمع Total
فارس Fars	686	6668	7354	5564	21808	27373
کشور Country	7009	9368	16377	78160	59876	138036
رتبه Rank	2	1	1	6	1	1

	میزان تولید Production rate (t)				عملکرد Yield (kg.ha^{-1})	
	آبی Irrigated	دیم Dry	پراکنده Scattered	جمع Total	آبی Irrigated	دیم Dry
فارس Fars	7005	14705	10	21719	1259	674
کشور Country	86558	31278	1385	119221	1107	522
رتبه Rank	6	1		1	16	10

منبع: (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱الف)

Source: (Ministry of Agricultural Jihad, 2022b)

در مطالعه‌ای، باقری بداغ‌آبادی و همکاران (Bagheri Bodaghabadi et al., 2020) به ارزیابی تناسب شهرستان سامان استان چهارمحال و بختیاری برای کاربری باغ پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که براساس ویژگی‌های اقلیمی و خاکی، مناطق مختلف درجه تناسب یا توان بوم‌شناسی متفاوتی دارند. مهم‌ترین محدودیت‌های موجود، محدودیت‌های عمق خاک، سنگریزه، شیب و اقلیمی تشخیص داده شد. جوزی و مرادی مجد (Jozi & Moradi Majd, 2020) در تحقیقی با روش تصمیم‌گیری چند معیاره به ارزیابی توان بوم‌شناسی رویشگاه بادام کوهی در منطقه زاگرس جنوبی پرداختند. نتایج نشان داد که در حدود ۵۹۹ هکتار معادل ۳۵/۵۹ درصد از منطقه در وضعیت عالی، ۴۷۱ هکتار معادل ۲۷/۹۷ درصد در وضعیت خوب و ۶۱۴ هکتار معادل ۳۶/۴۴ درصد در وضعیت ضعیف می‌باشد. میرعباسی نجف آبادی و همکاران (Mirabbasi Najafabadi et al., 2015) با بررسی تأثیر اقلیم بر فنولوژی بادام در شهرستان نجف‌آباد در دمای فعال بیان نمودند، در قسمت جنوب و جنوب شرقی و نواحی محدودی از شرق شهرستان به‌دلیل زمستان‌های گرم‌تر و میانگین دمای روزانه بالاتر، مراحل فنولوژی بادام سریع‌تر آغاز شده و امکان یخبندان دیررس بهاره وجود دارد. در قسمت مرکزی شهرستان به‌دلیل هوای سردتر، مراحل فنولوژی دیرتر آغاز می‌گردد و مناطق محدودی از شمال، شمال غرب و شمال شرق با یخبندان دیررس بهاره مواجه است. نتایج نشان داد که شمال غرب این شهرستان در معرض یخبندان‌های کشنده قرار دارد. یزدان‌پناه و همکاران (Yazdanpanah et al., 2006) در تحقیقی به مکان‌گزینی اراضی مستعد کشت بادام در استان آذربایجان شرقی پرداختند. پس از اعمال ضرایب وزنی و هم‌پوشانی پنج نقشه، ارتفاع، تناسب بارش، احتمال وقوع سرمای بهاره، واحدهای حرارتی، رطوبت نقشه نهایی هم‌اقلیمی کشاورزی مناطق مستعد کشت بادام دیم در استان آذربایجان شرقی تهیه شد. نقشه به چهار پهنه مناطق بسیار مطلوب، نسبتاً مطلوب، مناطق ضعیف و نامناسب تقسیم شدند.

برجی و همکاران (Borji et al., 2015) در مطالعه‌ای به مکان-گزینی اراضی مستعد کشت بادام دیم در حوضه آبخیز فاروب رومان در شهرستان نیشابور با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند. یافته‌ها بیانگر قابلیت بالای اراضی منطقه برای کشت بادام دیم و همچنین انعطاف‌پذیری بیشتر و عملکرد بهتر روش فازی نسبت به روش بولین برای مکان‌یابی مناطق مستعد کشت بادام بود. در تحقیقی با استفاده از سامانه تصمیم‌گیری چند معیاره فضایی به

تحلیل تناسب زمین حال و آینده برای محصولات بادام و پسته در منطقه Beira Baixa پرداخته شد. براساس یافته‌ها، در شرایط کنونی حدود ۱۶/۴ درصد از مساحت منطقه برای درخت بادام بسیار مناسب و ۱۵/۹ درصد مناسب درخت پسته هستند. برای سناریوهای آینده، مساحت با تناسب بالا هم برای درخت بادام و هم برای درخت پسته افزایش خواهد یافت (Quinta-Nova & Ferreira, 2022). در پژوهشی، اوتینو و همکاران (Otieno et al., 2023) با استفاده از تکنیک GIS-AHP به ارزیابی تناسب زمین برای تولید فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.) در شهرستان نایروبی کنیا پرداختند. نتایج نشان داد که حدود ۵۰ درصد از اراضی شهرستان کیامبو، هشت درصد در شهرستان کاجیادو و ۱۲ درصد در شهرستان ماچاکوس برای تولید فلفل دلمه‌ای مناسب است. مناطق باقی‌مانده به‌دلیل وجود برخی محدودیت‌ها از جمله بافت، pH خاک، زهکشی و آب‌وهوای نامساعد برای تولید این محصول مناسب نمی‌باشند. در تحقیقی، آلمایهو (Alemayehu, 2023) به ارزیابی تناسب زمین سایت تحقیقاتی سینانا در جنوب شرقی اتیوپی برای کاشت گندم و جو پرداختند. مطابق با نتایج، بیش از دوسوم سایت تحقیقاتی برای پرورش جو در حد اندکی مناسب بود، امّا ۲۹/۸ درصد از منطقه برای کشت این محصول "نامناسب" بود. همچنین ۵۷/۶ درصد از سطح منطقه برای تولید گندم در حد اندکی مناسب بود و ۴۲/۴ درصد باقی‌مانده آن نامناسب بود. کمبود نیتروژن، فسفر و قلیائیت خاک از محدودیت‌های اصلی تناسب زمین برای هر دو محصول بودند. بنابراین، استفاده تلفیقی از کودهای معدنی و آلی و کشت متناوب حبوبات با گندم و جو برای کاهش کمبود نیتروژن و فسفر در خاک توصیه شد. در تحقیقی (Everest, 2021)، به تعیین مکان‌های مناسب برای کشت پسته (*Pistacia vera*) با استفاده از خصوصیات پایه خاک، داده‌های اقلیمی، شرایط ارتفاعی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تجزیه و تحلیل تصمیم چند معیاره (MCDA) در منطقه خلیج ادرمیت، شمال غربی ترکیه پرداختند. نتایج نشان داد که در منطقه خلیج ادرمیت، ۲۷۸۹۸ هکتار مساحت بسیار مناسب، ۸۴۰۹ هکتار نسبتاً مناسب، ۱۲۱۷۲ هکتار در حد کمی مناسب و ۲۴۷۶۲۳ هکتار برای کشت پسته نامناسب است.

همان‌طور که مرور مطالعات گذشته نشان داد، با بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و تهیه نقشه‌های مرتبط در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌توان مناطق مستعد کاشت را شناسایی نمود. علی‌رغم اینکه مطالعات مختلفی به ارزیابی تناسب زمین برای محصولات کشاورزی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و ملی مختلف با استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره MCDM[1] و GIS پرداخته‌اند، پژوهش‌های محدودی در مورد انتخاب مکان مناسب کاشت بادام دیم با استفاده از ادغام GIS-MCDM وجود دارد. لذا، مطالعه حاضر برای کمک به پر کردن این شکاف دانش طراحی شده است. هدف از این مطالعه، تحلیل تناسب زمین برای کاشت درخت بادام دیم در استان فارس و تهیه نقشه تناسب اراضی برای کاشت بادام دیم با ادغام الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[2]- فازی با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌منظور بهبود کمّی و کیفی تولید بادام دیم در استان فارس است. نتایج ارزیابی تناسب زمین می‌تواند به ایجاد مقررات کاربری کارآمد زمین برای مدیریت بلندمدت مناطق کاشت بادام دیم کمک کند و در نتیجه، باعث افزایش تولید بادام دیم در استان فارس شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۲ شمسی، با هدف تعیین مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم در استان فارس با بهره‌گیری از تکنیک‌های تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. بدین منظور، ابتدا، ساختار سلسله مراتبی برای اولویت‌بندی معیارها و زیرمعیارها مشخص شد. معیارهای برآورد سطح مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم شامل چهار معیار (اقلیمی، توپوگرافی، سازگاری محیطی و اقتصادی- اجتماعی) و ۱۴ زیرمعیار ارتفاع از سطح دریا، شیب اراضی، جهت شیب، کاربری اراضی، بافت خاک، دمای رشد جوانه، حداقل دمای مرحله گل‌دهی، رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی، دمای دوره رشد، دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن، میانگین بارش سالیانه، دسترسی به جاده، دسترسی به منابع آبی و دسترسی به مراکز جمعیتی بود که با توجه به شرایط بوم‌شناسی منطقه و با بهره‌گیری از منابع معتبر و نظرات خبرگان و متخصصان مرتبط با موضوع تحقیق انتخاب شدند. برای به‌دست آوردن اطلاعات و آمار اقلیمی از آمار ۱۴ ساله (۲۰۲۲- ۲۰۰۹)، ۲۰ ایستگاه سینوپتیک استان فارس و همچنین، هشت ایستگاه سینوپتیک (هم‌دیدی) هم جوار به‌عنوان ایستگاه‌های کمکی استفاده شد. مبنای انتخاب

1- Multi-Criteria Decision Making
2- Analytical Hierarchy process

ایستگاه‌های هواشناسی، طول دوره آماری و پیوسته بودن (نبود خلأ آماری) بود. اطلاعات مورد نیز از سازمان هواشناسی کشور (Iran Meteorological Organization (http://www.irimo.ir/) اخذ و بررسی شد. برای میانگین‌گیری از آمار روزانه دوره‌های فنولوژی بادام در محیط Excel، مقادیر محاسبه شده در محیط GIS به‌روش IDW (تابع معکوس فاصله) مکان‌یابی و به پهنه‌های مختلف تبدیل شد. در روش IDW مقدار مجهول یک کمیت در هر نقطه براساس مقدار آن در نقاط معلوم و وزن فاصله به‌دست می‌آید، به‌گونه‌ای که با کم‌تر شدن فاصله نقطه مجهول از معلوم، وزن فاصله آن بیشتر می‌شود و برعکس. این روش توسط پژوهشگران فراوانی جهت درون‌یابی و پهنه‌بندی متغیرهای محیطی– اقلیمی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Mushtaq et al., 2023Kaboosi, 2020; Osei-; Gyabaah et al., 2023). مقیاس عمومی همه لایه‌ها ۱:۳۰۰۰۰۰۰ و سامانه تصویر همه آن‌ها UTM بود. همچنین، با استفاده از DEM ۳۰ متری استان طبقات ارتفاعی، درصد شیب و جهت شیب برای کل استان در محیط GIS تهیه شد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، از نقشه پوشش– کاربری اراضی سال ۱۳۸۸ سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (تهیه شده برای کل کشور به تفکیک استان‌ها) استفاده شد. سپس، منطقه مورد مطالعه از نقشه جدا شد (Karami & Feghhi, 2012) و با کمک این نقشه، نواحی مساعد کاشت بادام در استان استخراج و طبقه‌بندی شد. تقسیم‌بندی هر معیار به زیرگروه‌های مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب براساس کتب و مقالات علمی و نظر متخصصان و کارشناسان محترم جهاد کشاورزی استان فارس انجام شد. داده‌های بافت خاک براساس نقشه جهانی خاک و با استفاده از پایگاه داده‌ای و نرم‌افزار (SWAT2012.mlb) SWAT با عنوان usersoil با متصل نمودن پیکسل‌های منطبق بر نقشه‌های جهانی و پایگاه داده‌ای مدل SWAT با محدوده استان فارس، تطبیق و تهیه شد. وزن معیارها و زیرمعیارهای تحقیق با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP و نرم‌افزار Expert Choice نسخه ۱۱ محاسبه شد. لایه‌ها در محیط GISبراساس روش فازی خطی استانداردسازی شدند و در فاصله‌ای بین صفر تا یک به‌صورت لایه‌های رستری فازی ارزش‌گذاری شد. سپس امتیازهای فازی و وزن‌های به‌دست آمده از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ترکیب شد و در نهایت، از الگوریتم Fuzzy overlay برای هم‌پوشانی لایه‌های موضوعی مختلف استفاده و نقشه برآورد سطح مناطق مستعد کاشت درخت بادام در پنج طبقه بسیار مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب طبقه‌بندی شد.

نتایج و بحث

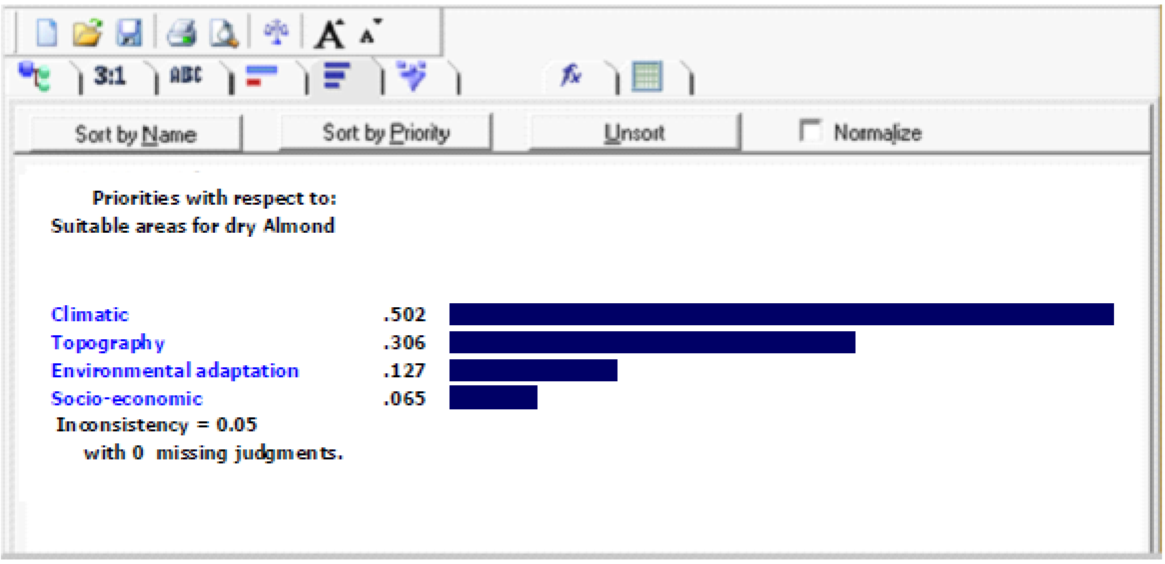
وزن دهی به معیارها و زیرمعیارها به‌روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از کارآمدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که اولین بار توسط توماس ال- ساعتی (۱۹۸۷) (Del Mar Esponda-Bernal et al., 2024) مطرح شد. این مدل براساس مقایسه زوجی بنا نهاده شده و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران و برنامه‌ریزان می‌دهد. بدین منظور، ابتدا ساختار سلسله مراتبی مسئله طراحی می‌شود که در آن هدف، معیارهای برآورد سطح کاشت درخت بادام مشخص می‌گردد. برای تعیین معیارها، با توجه به اینکه معیارهای متعددی در برآورد سطح کاشت درخت بادام نقش دارند، با بهره‌گیری از نظرات کارشناسان و متخصصان این حیطه، در نهایت، چهار معیار و ۱۴ زیرمعیار انتخاب شدند. جهت وزن‌دهی معیارهای برآورد سطح کاشت درخت بادام دیم در استان فارس، پس از توزیع و تکمیل پرسش‌نامه از کارشناسان مرتبط با موضوع تحقیق (شامل تعداد ۲۵ نفر از پژوهشگران مراکز تحقیقاتی، کارشناسان جهاد کشاورزی و کشاورزان پیشرو کاشت درخت بادام دیم) با مقایسه زوجی معیارها و زیرمعیارهای تحقیق، اطلاعات آن وارد نرم‌افزار Expert Choice شد. میزان شاخص ناسازگاری برای مقایسه معیارها و زیرمعیارها باید کم‌تر از ۰/۱ باشد. برای بررسی وضعیت پهنه‌ها به تفکیک زیرمعیارهای مورد بررسی، نیازهای مراحل مختلف رویشی بادام با استفاده از منابع معتبر و مشاوره با کارشناسان جهاد کشاورزی تعیین شد. تقسیم‌بندی هر زیرمعیار به زیر گروه‌های مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب براساس کتب و مقالات علمی و نظر متخصصان و کارشناسان محترم جهاد کشاورزی استان فارس انجام شد. سپس، براساس نیاز رویشی بادام دیم، ارزش‌گذاری و طبقه‌بندی شد. تعداد طبقات و درصد مساحت هر طبقه در هر لایه برای کاشت درخت بادام در استان فارس محاسبه شد.

در این تحقیق، میزان شاخص ناسازگاری برای مقایسه معیارها، ۰/۰۵ برآورد شد. در نتیجه، این مقایسه معتبر است. نتایج مقایسه زوجی نشان داد که بیشترین وزن نهایی مربوط به معیار اقلیم با وزن

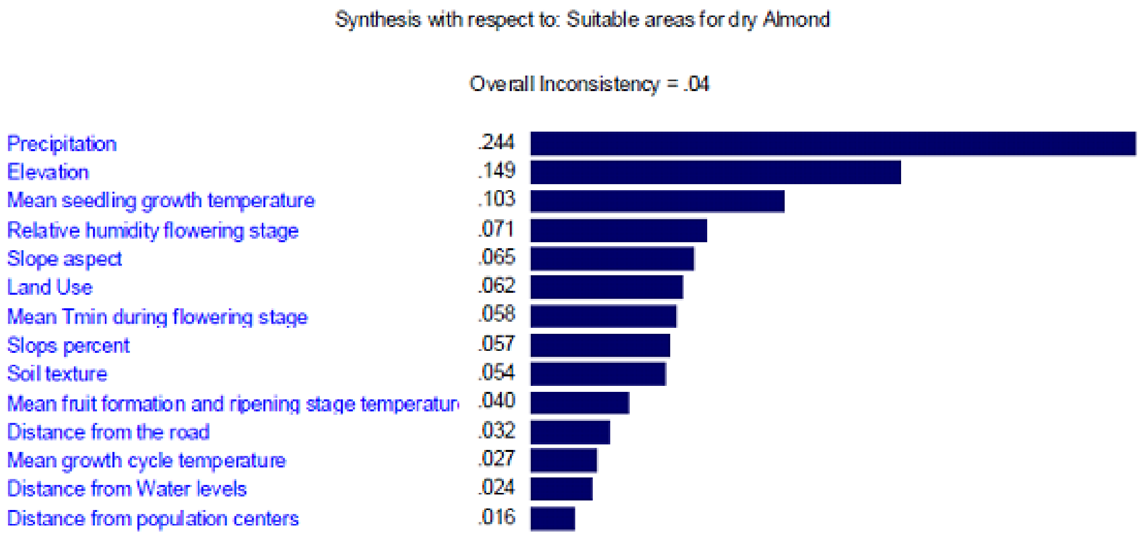
۰/۵۰ است، لذا اقلیم به‌عنوان مهم‌ترین معیار معرفی شد. معیار توپوگرافی با ارزش وزنی ۰/۳۱، سازگاری محیطی با وزن ۰/۱۳، معیار اقتصادی- اجتماعی با وزن ۰/۰۶ به‌ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند (شکل ۱).

جدول ۲، وزن زیرمعیارهای مورد مطالعه را در هر معیار نشان می‌دهد. نتایج مقایسه‌های زوجی نشان داد که در معیار اقلیمی، بیشترین وزن مربوط به زیرمعیار متوسط بارش سالیانه است. در معیار توپوگرافی، زیرمعیار ارتفاع با وزن ۰/۵۵، در معیار سازگاری محیطی، زیرمعیار کاربری اراضی با وزن ۰/۴۴ و در معیار اقتصادی- اجتماعی، زیرمعیار فاصله تا جاده با وزن ۰/۶۷ دارای بیشترین میزان اهمیت است. نرخ ناسازگاری معیار اقلیمی، ۰/۰۴، معیار توپوگرافی ۰/۰۲، معیار سازگاری محیطی ۰/۰۲، معیار اجتماعی- اقتصادی ۰/۰ محاسبه شد که حاکی از قابل اعتماد بودن ارزیابی‌ها می‌باشد.



شکل ۱- درجه اهمیت معیارهای مؤثر بر بادام دیم با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice و روش تحلیل سلسله مراتبی

Fig. 1- The importance of criteria affecting rainfed almond using Expert Choice software and Analytic Hierarchy Process method



شکل ۲- وزن نهایی زیرمعیارهای مؤثر بر کاشت بادام دیم مستخرج از نرم‌افزار Expert Choice

Fig. 2- Final weight of sub-criteria affecting the dry almond cultivation extracted from Expert Choice software

شکل ۲، درجه اهمیت زیرمعیارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. براساس یافته‌های قابل رؤیت در این شکل، بیشترین وزن نهایی مربوط به معیار متوسط بارش سالیانه (با وزن ۰/۲۴) است. در واقع، زیرمعیار متوسط بارش سالیانه به‌دلیل میزان اهمیت آن در کاشت بادام دیم به‌عنوان مهم‌ترین زیرمعیار شناخته شد. سپس، زیرمعیار ارتفاع از سطح دریا (با وزن ۰/۱۵) در رتبه دوم و زیرمعیار میانگین دمای رشد جوانه با وزن ۰/۱۰ در رتبه سوم اهمیت قرار گرفت. کم-اهمیت‌ترین زیرمعیار نیز فاصله از مراکز جمعیتی با وزن ۰/۰۲ معرفی شد. نرخ کلی ناسازگاری شاخص‌های مورد مطالعه ۰/۰۴ می‌باشد، بنابراین این میزان به‌دست آمده نشان می‌دهد که ارزش‌دهی زیرمعیارهای تحقیق تأیید شده و پذیرفته شده است؛ به عبارت دیگر، نرخ ناسازگاری محاسبه شده، درستی نتایج را تأیید نمود.

پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم

الف) پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس داده‌های اقلیمی

شاخص‌های آب‌وهوایی مرتبط با رشد بادام براساس مراحل مختلف رویشی و استفاده از منابع معتبر و مشاوره با کارشناسان جهاد کشاورزی تعیین شد. سپس برای هر ایستگاه، از آمار روزانه دوره‌های فنولوژی بادام (ارائه شده در جدول ۳) در محیط Excel میانگین‌گیری شد.

جدول ۲- وزن زیرمعیارهای مورد مطالعه در هر معیار با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

Table 2- Sub-criteria weights of the study area in each criterion using the Analytic Hierarchy Process method

معیارها Criteria	وزن معیارها Criteria weights	زیرمعیارها Sub-criteria	وزن زیرمعیار در دسته Sub-criteria weights	نرخ ناسازگاری Inconsistency rate
اقلیمی Climatic	0.50	بارش Precipitation (mm)	0.45	0.04
		میانگین دمای رشد جوانه Mean seedling growth temperature (◦C)	0.19	
		رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی Relative humidity flowering stage (%)	0.13	
		میانگین حداقل دما مرحله گل‌دهی Mean T_{min} during flowering stage (◦C)	0.11	
		میانگین دمای چرخه رشد Mean growth cycle temperature (◦C)	0.05	
		میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن Mean fruit formation and ripening stage temperature (◦C)	0.07	
توپوگرافی Topography	0.31	ارتفاع Elevation (m)	0.55	0.02
		جهت شیب Slope aspect	0.24	
		درصد شیب Slops percent	0.21	
سازگاری محیطی Environmental adaptation	0.13	بافت خاک Soil texture	0.39	0.02
		فاصله تا منابع آبی Distance from water levels	0.17	
		کاربری اراضی Land use	0.44	
اجتماعی- اقتصادی Socio-economic	0.06	فاصله تا مراکز جمعیتی Distance from population centers	0.33	0.0
		فاصله تا جاده (متر) Distance from the road (meters)	0.67	

جدول ۳- دوره‌های فنولوژی بادام در ایستگاه‌های مورد بررسی
Table 3- Phenological stages of almonds at the studied stations

مرحله Stage	رشد جوانه Seedling growth	مرحله گل‌دهی Flowering stage	چرخه رشد Growth cycle	تشکیل میوه و مرحله رسیدن Fruit formation and ripening stage
آباده؛ ارسنجان؛ استهبان؛ فسا؛ نی‌ریز؛ درودزن؛ صفاشهر؛ شیراز؛ تخت جمشید؛ یاسوج؛ زرقان Abadeh; Arsanjan; Estahban; Fasa; Neyriz; Dorudzan; Safashahr; Shiraz; Persepolis; Yasouj; Zarqan	۱۵-۲۵ اسفند 6-16 March(3)	۲۵ اسفند–۱۰ فروردین 16-30 March(3)	۱۵ اسفند–۳۰ مهر 6 March(3)-22 October(10)	۱۰ فروردین– ۳۰ مهر 30 March(3)- 22 October(10)
جهرم؛ کازرون؛ لامرد؛ نورآباد ممسنی؛ زرین‌دشت؛ دیلم؛ بستک؛ جم؛ بوشهر Jahrom; Kazerun; Lamerd; Nurabad Mamasani; Zarin Dasht; Bandar Deylam; Bastak; Jam; Bushehr	۲۵-۱۰ بهمن 30 January(1)-14 February(2)	۲۵ بهمن– ۱۰ اسفند 14 February(2)-1 March(3)	۱۰ بهمن– ۱۵ آبان 30 January(1)- 6 November(11)	۱۰ اسفند–۱۵ آبان 1 March(3)- 6 November(11)
بوانات؛ اقلید؛ ایزدخواست؛ سپیدان Bavanat; Izadkhast; Sepidan	۲۵-۱۵ فروردین 4 April(4)-14 Apri(4)	۳۱-۲۲ فروردین 11 April(4)-20 Apri(4)	۱۵ فروردین– ۳۱ شهریور 4 April(4)-22 September(9)	۳۱ فروردین– ۳۱ شهریور 20 April(4)-22 September(9)
سمیرم Semirom	۱۵-۱ فروردین 21 March(3)- 4 April(4)	۲۵-۱۵ فروردین 4 April(4)- 14 April(4)	۱ فروردین– ۲۵ مهر 21 March(3)- 17 October(10)	۲۵ فروردین–۲۵ مهر 14 April(4)- 17 October(10)
سیرجان Sirjan	۲۰-۵ اسفند 24 February(2)-11 March(3)	۲۵ اسفند — ۱۵ فروردین 16 March(3)-4 April(4)	۵ اسفند– ۳۰ آبان 24 February(2)-21 November(11)	۱۵ فروردین–۳۰ آبان 4 April(4)-21 November(11)
اصفهان Isfahan	۲۹-۱۵ اسفند 6 March(3)-20 March(3)	۲۰-۵ فروردین 25 March(3)-9 April(4)	۱۵ اسفند– ۱ آبان 6 March(3)-23 October(10)	۲۰ فروردین–۱ آبان 9 April(4)- 23 October(10)

منبع: سالنامه آماری استان فارس– ۱۴۰۰؛ زین‌الدینی میمند و همکاران (۱۳۹۸الف)
Source: (Doke et al., 2021; Zainaldeeni Meymand et al., 2019a)

برای ارزیابی هر زیرمعیار اقلیمی، مقدار آن در دوره مربوطه، با استفاده از آمار هواشناسی محاسبه شد (جدول ۴). این زیرمعیارها شامل میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن، میانگین دمای چرخه رشد، رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی، میانگین حداقل دمای مرحله گل‌دهی و میانگین دمای رشد جوانه در یک دوره ۱۴ ساله (۲۰۲۲-۲۰۰۹) بود.

میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن، میانگین دمای چرخه رشد، درصد رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی، میانگین دمای رشد جوانه و بارش سالیانه در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در محیط GIS تحلیل شد و سپس براساس نیاز رویشی بادام دیم ارزش‌گذاری و طبقه‌بندی شد. تعداد طبقات و درصد مساحت هر طبقه در هر لایه برای کاشت درخت بادام در استان فارس محاسبه شد. در جدول ۵، مساحت به کیلومترمربع و درصد پوشش سطح استان، در طبقه با قابلیت بسیار مناسب تا نامناسب برای کاشت بادام در استان فارس درج گردیده است.

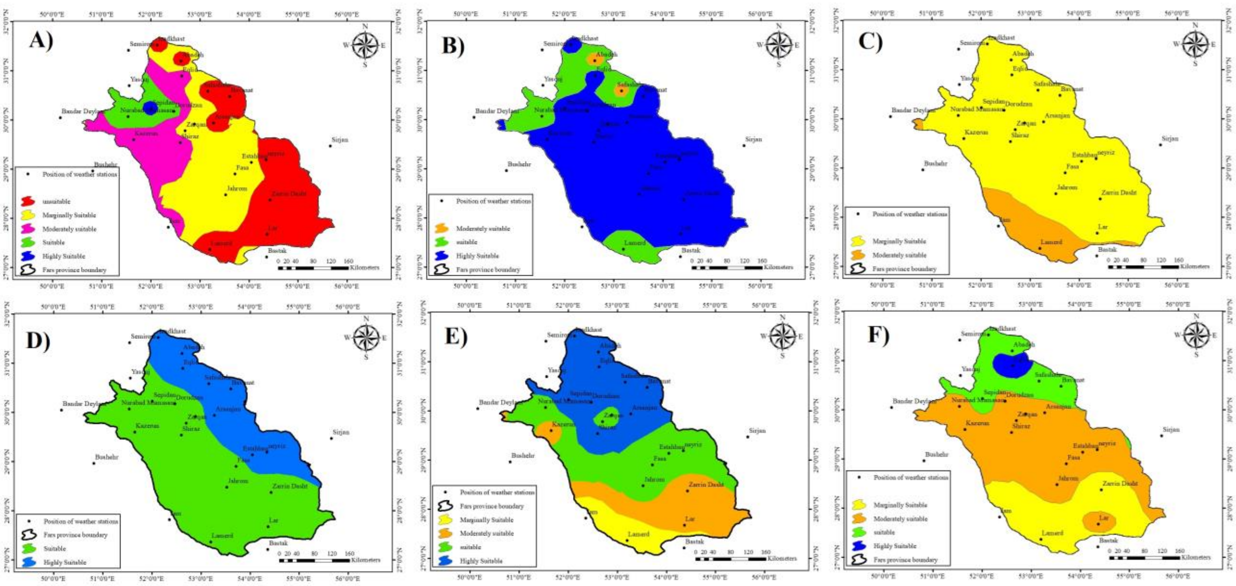
لایه‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی همسان‌سازی شد. وزن زیرمعیارهای اقلیمی (لایه‌های میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن، میانگین دمای چرخه رشد، درصد رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی، میانگین دمای رشد جوانه و بارش سالیانه) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP محاسبه و در محیط GIS براساس منطق فازی در فاصله‌ای بین صفر تا یک به‌صورت لایه‌های رستری فازی ارزش‌گذاری شد. به‌منظور پهنه‌بندی استان فارس براساس معیارهای اقلیمی از نظر قابلیت کشت بادام پس از فازی‌سازی لایه‌های زیرمعیارهای اقلیمی در نرم‌افزار ArcGIS از الگوریتم Fuzzy overlay برای هم‌پوشانی کردن لایه‌ها استفاده شده و نقشه برآورد سطح مناطق مستعد کاشت درخت بادام براساس داده‌های اقلیمی تهیه شد (شکل ۴ الف).

جدول ٤- اطلاعات مختصات دار جهت ورود به GIS

Table 4- Coordinate information for entry into GIS

شهرستان County	X	Y	میانگین دمای رشد جوانه Mean seedling growth temperature	میانگین حداقل دما مرحله گل‌دهی Mean T_{min} during flowering stage	رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی Mean RH. flowering stage	میانگین دما چرخه رشد Mean growth cycle temperature	میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن Mean fruit formation and ripening stage temperature	بارش Precipitation (mm)
آباده Abadeh	52.62	31.20	9.89	4.05	34.63	20.45	21.62	139.7
ارسنجان Arsanjan	53.28	29.94	13.24	7.96	39.08	24.93	26.25	230.5
استهبان Estahban	54.05	29.14	15.38	7.09	39.72	25.08	26.27	260.5
فسا Fasa	53.72	28.90	14.34	7.17	48.68	25.62	26.89	287.2
تخت جمشید Persepolis	52.89	29.92	13.94	5.55	47.18	25.50	26.81	282.9
درودزن Dorudzan	52.47	30.18	13.27	5.96	45.64	24.66	25.95	445.9
زرقان Zarqan	52.70	29.78	13.89	4.84	48.50	25.34	26.63	298.6
شیراز Shiraz	52.60	29.54	13.86	6.54	40.57	23.78	25.81	315.6
صفاشهر Safashahr	53.16	30.59	9.26	0.26	39.87	20.39	21.63	206.2
نی ریز Neyriz	54.35	29.19	15.60	9.47	35.81	26.65	27.89	195.6
یاسوج Yasuj	51.56	30.70	9.55	3.96	48.99	20.13	21.31	790.1
بوانات Bavanat	53.61	30.48	14.47	7.36	32.18	23.34	24.24	212.1
اقلید Eqlid	52.63	30.90	12.56	6.77	36.86	21.22	22.10	311.1
ایزدخواست Izadkhast	52.13	31.53	13.76	6.60	34.99	23.19	24.15	151.7
سپیدان Sepidan	52.01	30.23	13.23	8.23	44.79	23.58	24.63	631.8
سمیرم Semirom	51.55	31.42	8.71	5.50	41.39	20.22	21.57	502.0
سیرجان Sirjan	55.66	29.47	11.46	7.54	39.08	22.04	23.50	135.5
جهرم Jahrom	53.53	28.48	12.12	5.96	51.55	26.72	28.32	264.2
کازرون Kazerun	51.65	29.60	13.05	8.44	55.53	28.06	29.74	360.1
لامرد Lamerd	53.20	27.36	16.68	10.29	51.52	31.29	32.90	217.3

نورآباد ممسنی Nurabad Mamasani	51.54	30.07	11.41	5.88	57.45	26.23	27.90	462.3
زرین دشت Zarrin Dasht	54.43	28.37	13.76	7.77	43.83	28.79	30.46	224.9
لار Lar	54.37	27.67	13.24	8.62	51.49	27.63	29.22	213.0
اصفهان Isfahan	51.71	32.52	12.49	8.31	35.36	23.73	25.46	123.8
بندر دیلم Bandar Deylam	50.16	30.05	15.95	11.88	58.47	29.76	31.27	239
بوشهر Bushehr	50.82	28.96	16.81	13.65	63.72	26.14	29.23	248
بستک Bastak	54.36	27.21	18.29	11.50	53.78	29.82	32.68	262.8
جم Jam	52.36	27.82	15.20	10.04	51.29	29.32	30.88	344



شکل ۳- از چپ به راست: الف) نقشه توزیع جغرافیایی بارش سالیانه (میلی‌متر) در استان فارس، ب) نقشه توزیع جغرافیایی میانگین دمای رشد جوانه در استان فارس، ج) نقشه توزیع جغرافیایی میانگین حداقل دمای مرحله گل‌دهی در استان فارس، د) نقشه توزیع جغرافیایی درصد رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی در استان فارس، ه) نقشه توزیع جغرافیایی میانگین دمای چرخه رشد (درجه سانتی‌گراد) در استان فارس، ی) نقشه توزیع جغرافیایی میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن در استان فارس

Fig. 3- From left to right: A) map of annual precipitation distribution (mm) in Fars province, B) map of distribution of mean seedling growth temperature in Fars province, C) map of distribution of mean temperature during flowering stage in Fars province; D) map of distribution of mean RH. flowering stage in Fars province, E) map of distribution of mean growth cycle temperature (in degrees celsius) in Fars province and F) map of distribution of mean fruit formation and ripening stage temperature in Fars province

جدول ۵- وضعیت پهنه‌ها به تفکیک زیرمعیارهای اقلیمی برای کاشت بادام در استان فارس

Table 5- Status of zoning by climate sub-criteria for almond cultivation in Fars province

	گزینه Alternative	توصیف قابلیت Capability description	مساحت Area (km^2)	درصد مساحت Percentage of area
بارش سالانه Annual precipitation (mm)	>500	بسیار مناسب Highly suitable	719.54	0.59
	400-500	مناسب Suitable	9190.99	7.52
	300-400	نسبتاً مناسب Moderately suitable	23554.78	19.26
	250-300	تناسب کم Marginally suitable	46277.05	37.85
	<250	نامناسب unsuitable	42529.63	34.78
میانگین دمای رشد جوانه Mean seedling growth temperature	12-16	بسیار مناسب Highly suitable	98732.11	80.75
	16-19 and 10-12	مناسب Suitable	22068.78	18.05
	7-10 and 19-22	نسبتاً مناسب Moderately suitable	1471.11	1.20
میانگین حداقل دمای مرحله گل‌دهی Mean T_{min} during flowering stage	30-40	نسبتاً مناسب Moderately suitable	16200.91	13.25
	40-60	تناسب کم Marginally suitable	106071.09	86.75
رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی Mean RH. flowering stage	10-15 and 27-29	بسیار مناسب Highly suitable	36559.08	29.90
	0-10 and 29-32	مناسب Suitable	85712.92	70.10
میانگین دمای چرخه رشد Mean growth cycle temperature	17-25	بسیار مناسب Highly suitable	39694.86	32.46
	25-27 and 14-17	مناسب Suitable	42653.61	34.88
	27-29 and 12-14	نسبتاً مناسب Moderately suitable	28794.44	23.55
	10-12 and 29-35	تناسب کم Marginally suitable	11129.09	9.10
میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن Mean fruit formation and ripening stage temperature	22-24	بسیار مناسب Highly suitable	3428.48	2.80
	20-22 and 24-25	مناسب Suitable	20023.55	16.38
	17-20 and 25-30	نسبتاً مناسب Moderately suitable	66134.94	54.09
	15-17 and 30-35	تناسب کم Marginally suitable	32685.04	26.73

با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، زیرمعیارهای اقلیمی مؤثر در پهنه‌بندی اقلیمی مناطق مساعد کاشت بادام در استان فارس، نقشه پهنه‌بندی براساس روش شکست تهیه و در پنج طبقه (بسیار مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب) طبقه‌بندی شد (شکل ۴ ب). روش شکست براساس توزیع نرمال داده‌ها است و نقاط عطف داده‌ها، مرز بین طبقات را مشخص می‌نماید. تعداد طبقات و مساحت برحسب کیلومترمربع و درصد مساحت هر یک در جدول ۶ آورده شده است. محدوده بسیار مناسب برای کشت بادام با مساحت ۶۱۵۰/۲۸ کیلومترمربع، محدوده مناسب با مساحت ۳۳۳۳۱/۳۵ کیلومترمربع و محدوده نسبتاً مناسب با مساحت ۲۰۷۷۴/۰۱

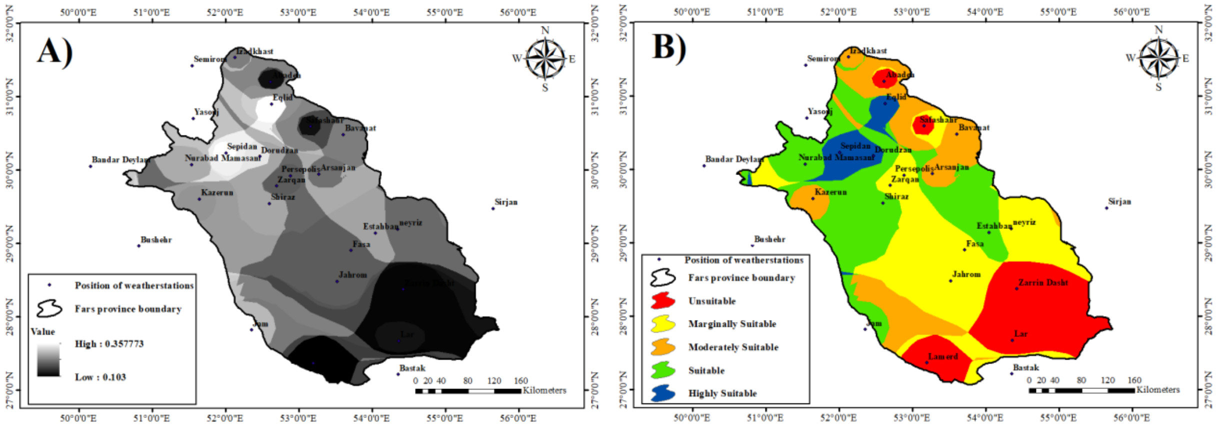
کیلومترمربع مجموعاً حـدود نیمـی از مسـاحت اسـتان را دربرگرفتـه است. تناسب اقلیمی کاشت بـادام بـرای ۳۷۲۰۷/۳۷ کیلومترمربـع از استان فارس اندک و برای ۲۴۸۰۸/۹۹ کیلومترمربع نامناسـب مـی-باشد.

در (شکل ۴ ب) محدوده‌های با آبی رنگ و سبز رنگ، وضـعیت اقلیمی بسیار مناسب و مناسب را شامل می‌شوند که نیمـی از سـطح استان فارس در این محدوده‌ها قرار دارنـد، بنـابراین توزیـع فضـایی اقلیمی متناسب با کاشت بادام مطلوب بوده است.

جدول ٦- طبقه‌بندی میانگین معیارهای اقلیمی در استان فارس

Table 6- Classification of average climate criteria in Fars province

ردیف Row	توصیف قابلیت Capability description	مساحت Area (km²)	درصد مساحت Percentage of area
1	نامناسب Unsuitable	24808.99	20.29
2	تناسب کم Marginally suitable	37207.37	30.43
3	نسبتاً مناسب Moderately suitable	20774.01	16.99
4	مناسب Suitable	33331.35	27.26
5	بسیار مناسب Highly suitable	6150.28	5.03



شکل ٤ - از چپ به راست: الف) نقشه فازیAHP برآورد سطح مناطق مساعد کاشت بادام در استان فارس براساس معیارهای اقلیمی ب) نقشه برآورد سطح مناطق مساعد کاشت بادام در استان فارس براساس معیارهای اقلیمی

Fig. 4- From left to right:A) AHP fuzzy map estimating suitable almond cultivation areas in Fars province based on the topographic criteria, B) map estimating suitable almond cultivation areas in the study area based on the topographic criteria

ب) پهنـه‌بنـدی منـاطق مسـتعد کاشـت درخـت بـادام دیـم براساس داده‌های توپوگرافی

به‌منظور پهنه‌بنـدی منـاطق مسـتعد کاشـت درخـت بـادام دیـم براساس داده‌های توپـوگرافی، زیرلایـه‌هـای ارتفـاع، درصـد شـیب و جهت‌های اصلی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع به‌دست آمد و طبقه-بندی گردید.

ارتفاع: شکل زمـین و ارتفـاع آن بـر عملکـرد محصـول تـأثیر فراوانی دارند. براساس یک قاعده کلی، با افزایش ارتفاع، بارندگی نیـز افزایش مـی‌یابـد (Eini et al., 2013). منـاطق کمتـر از ۱۷۰۰ متـر ارتفاع به‌دلیل سازگاری بالا از لحاظ ارتفاعی برای کشت بادام مناسب می‌باشند. از نظر ارتفاع، بخش‌های جنوبی و جنوب غربی منطقه برای کشت بادام مناسب‌تر از سایر نقاط مـی‌باشـند (Borji et al., 2015). ارتفاع ۱ تا ۶۵۰ متر برای رویش بادام بسیار مناسـب، ارتفـاع ۶۵۰ تـا ۱۰۵۰ متر برای رویش بـادام مناسـب و ارتفـاع ۱۰۵۰ تـا ۱۴۵۰ متـر

نسبتاً مناسب، ۱۷۰۰-۱۴۵۰ متر تناسب کم و بیشتر از ۱۷۰۰ متر نامناسب است. نقشه طبقات ارتفاع استان فارس با استفاده از مدل رقومی ارتفاع بەدست آمد و طبقەبندی گردید. در جدول ۷، طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه آمده است. با توجه به جدول مذکور، بیشترین مساحت با ۴۸۹۰۵/۱۵ کیلومترمربع (معادل ۴۰ درصد) مربوط به طبقه ارتفاعی نامناسب (بیشتر از ۱۷۰۰ متر) و کم‌ترین مساحت با مساحت ۱۲۴۰۵/۵۲ کیلومترمربع (معادل ۱۰/۱۴ درصد) مربوط به طبقه بسیار مناسب است.

جهت شیب: با توجه به اینکه سرمازدگی بهاره یکی از عوامل اصلی خسارت‌زا در منطقه می‌باشد، شیب‌های رو به شمال و شمال غرب و شمال شرق به‌علت دمای پایین‌تر در بهار، گل‌ها دیرتر باز می‌شوند و احتمال سرمازدگی دیرهنگام بهاره کاهش می‌یابد. با توجه به نقشه خروجی این لایه، بخش‌های زیادی از منطقه به‌صورت پراکنده برای احداث باغ مناسب هستند. تأمین نیاز گرمایی برای بیدار شدن جوانه‌ها و گل‌دهی در اوایل فصل رشد الزامی می‌باشد، که در شیب‌های مورد نظر این نیاز گرمایی دیرتر برطرف می‌شود. در نتیجه، گل‌دهی در بهار به تأخیر افتاده و خطر سرمازدگی در این فصل کاهش می‌یابد. همچنین میزان عملکرد در شیب‌های یاد شده از شیب‌های به سمت جنوب بیشتر می‌باشد (Borji et al., 2015). جهت‌های شمالی و شمال‌غربی برای رویش بادام عالی، جهت‌های شمال‌شرقی و غربی خوب، جهت‌های شرقی و جنوب‌غربی متوسط و جهت‌های جنوب‌شرقی و جنوبی برای رویش بادام ضعیف هستند (Jozi & Moradi Majd, 2020). در شیب‌های رو به شمال به‌دلیل دریافت حرارت تجمعی کمتر، میزان رطوبت نسبی خاک نسبت به سایر شیب‌ها بالاتر است.

نقشه جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع به‌دست آمد و طبقه‌بندی گردید و در نهایت، نقشه جهت شیب تهیه و در پنج طبقه بسیار مناسب (۲۲/۱۲ درصد مساحت کل استان)، مناسب (۲۴/۶۱ درصد مساحت کل استان)، نسبتاً مناسب (۲۷/۸۴ درصد مساحت کل استان) و تناسب کم (۲۵/۴۳ درصد مساحت کل استان) طبقه‌بندی شد (جدول ۷).

لایه شیب: یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در انتخاب پهنه‌های مناسب، شیب می‌باشد. درخت بادام در اراضی با شیب پنج درصد به‌خوبی رشد می‌کند، امّا در شیب‌های بیش از ۱۵ درصد، رشد گیاه محدود می‌شود. شیب ۵-۰ درصد برای رویش بادام بسیار مناسب، شیب ۱۰-۵ درصد مناسب، شیب ۱۵-۱۰ درصد نسبتاً مناسب، ۲۰-۱۵ درصد تناسب کم و بالای ۲۰ درصد از توان اندکی برخوردار است. طبقه شیب بیشتر از ۲۰ درصد با مساحت ۷۰۹۰۱/۸۷ کیلومترمربع (معادل ۵۷/۹۸ درصد) بیشترین مساحت و طبقه ۵-۰ درصد با مساحت ۴۸۲۶/۵۵ کیلومترمربع (معادل ۳/۹۵ درصد) کمترین مساحت را دارا است. طبقات مختلف شیب منطقه مورد مطالعه در جدول ۷ آمده است.

نقشه جهت شیب (شکل الف)، درصد شیب (شکل ب) و ارتفاع (شکل ج) در استان فارس در شکل ۵ آورده شده است.

لایه‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی همسان‌سازی شد. وزن زیرمعیارهای توپوگرافی (زیرلایه‌های ارتفاع، درصد شیب و جهت‌های اصلی) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP محاسبه و در محیط GIS براساس منطق فازی در فاصله‌ای بین صفر تا یک به صورت لایه‌های رستری فازی ارزش‌گذاری شد.

به‌منظور ترکیب زیرمعیارهای توپوگرافی در نرم‌افزار ArcGIS از الگوریتم Fuzzy overlay برای هم‌پوشانی کردن لایه‌ها استفاده شده و نقشه برآورد سطح مناطق مستعد کاشت درخت بادام براساس داده‌های توپوگرافی تهیه شد (شکل ۶ الف)؛ با هم‌پوشانی زیرمعیارهای توپوگرافی، نقشه پهنه‌بندی براساس روش شکست تهیه و در پنج طبقه (بسیار مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب) طبقه‌بندی شد (شکل ۶ ب). براساس اطلاعات جدول ۸، محدوده بسیار مناسب برای کشت بادام ۲۰۰۶۹/۳۲ کیلومترمربع، محدوده مناسب ۲۷۹۶۰/۵۹ کیلومترمربع، محدوده نسبتاً مناسب ۲۵۵۷۰/۷۲ کیلومترمربع از مساحت استان را دربرگرفته است. تناسب اقلیمی ۲۶۸۸۴/۰۵ کیلومترمربع از استان اندک بوده و ۲۱۷۸۷/۳۲ کیلومترمربع برای کاشت بادام نامناسب می‌باشد.

ج) پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس داده‌های سازگاری محیطی (قابلیت اراضی)

به‌منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس داده‌های سازگاری محیطی، زیرلایه‌های بافت خاک، کاربری اراضی و فاصله از منابع آبی تهیه و سپس براساس نیاز رویشی بادام دیم، ارزش‌گذاری و طبقه‌بندی شد.

جدول ۷- طبقه‌بندی معیارهای توپوگرافی در استان فارس

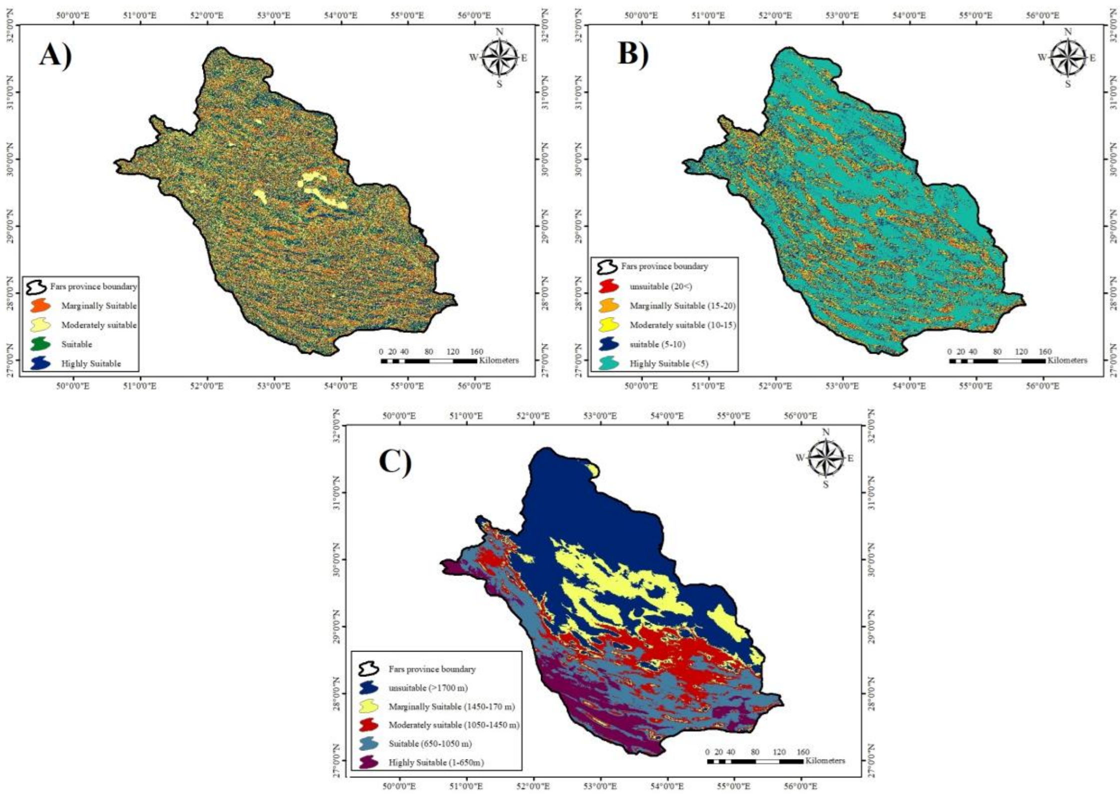
Table 7- Classification of topographic criteria in Fars province

	گزینه Alternative	توصیف قابلیت Capability description	مساحت Area (km^2)	درصد مساحت Percentage of area
جهات شیب Slope aspects	شمال و شمال غربی North and Western North	بسیار مناسب Highly suitable	27048.57	22.12
	شمال شرقی و غرب North-east and West	مناسب Suitable	30093.99	24.61
	شرق و جنوب غربی East and Southwestern	نسبتاً مناسب Moderately suitable	34036.45	27.84
	جنوب و جنوب شرقی South & Southeast	تناسب کم Marginally suitable	31093.00	25.43
درصد شیب Slops percent	۰–۵ درصد	بسیار مناسب Highly suitable	4826.55	3.95
	۵–۱۰ درصد	مناسب Suitable	6830.75	5.59
	۱۰–۱۵ درصد	نسبتاً مناسب Moderately suitable	14070.89	11.51
	۱۵–۲۰ درصد	تناسب کم Marginally suitable	25641.94	20.97
	بیشتر از ۲۰ درصد	نامناسب Unsuitable	70901.87	57.98
ارتفاع Elevation (m)	1-650	بسیار مناسب Highly suitable	12405.52	10.14
	650-1050	مناسب Suitable	24612.66	20.13
	1050-1450	نسبتاً مناسب Moderately suitable	18254.17	14.93
	1450-1700	تناسب کم Marginally suitable	18094.51	14.80
	>1700	نامناسب Unsuitable	48905.15	40.00

جدول ۸- طبقه‌بندی توپوگرافی در استان فارس

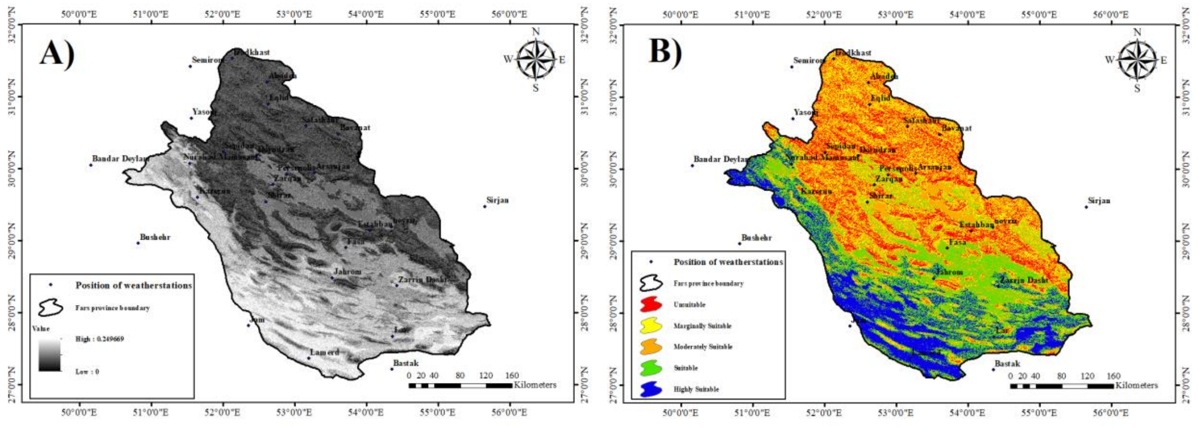
Table 8- Classification of topographic in Fars province

ردیف Row	توصیف قابلیت Capability description	مساحت Area (km^2)	درصد مساحت Percentage of area
1	بسیار مناسب Highly suitable	20069.32	16.41
2	مناسب Suitable	27960.59	22.87
3	نسبتاً مناسب Moderately suitable	25570.72	20.91
4	تناسب کم Marginally suitable	26884.05	21.99
5	نامناسب Unsuitable	21787.32	17.82



شکل ۵- از چپ به راست: الف) نقشه جهت شیب؛ ب) لایه درصد شیب و ج) لایه ارتفاع در استان فارس

Fig. 5- From left to right: A) slope aspect map; B) slope percentage layer and C) elevation layer in Fars province



شکل ٦- از چپ به راست: الف) نقشه فازی AHP برآورد سطح مناطق مساعد کاشت بادام در استان فارس براساس معیارهای توپوگرافی، ب) نقشه برآورد سطح مناطق مساعد کاشت بادام در منطقه مورد مطالعه براساس معیار توپوگرافی

Fig.6- From left to right: A) AHP fuzzy map estimating suitable almond cultivation areas in Fars province based on the topographic criteria, B) map estimating suitable almond cultivation areas of the study area based on the topographic criteria

بافت خاک: با توجه به شکنندگی شدید بادام به کمبود اکسیژن و خفگی ریشه، باید از کشت بادام در خاک‌های سنگین و رسی متراکم و یا خاک با زهکشی نامناسب خودداری شود. بادام خاک‌های عمیق با بافت متوسط و سبک را می‌پسندد (Zainaldeeni Meymand et al., 2019a). در استان فارس، از بین گروه‌های خاک، به‌ترتیب اولویت خاک‌هایی با بافت لومی، سیلتی- رسی و شنی- رسی، رسی- لوم برای کشت بادام مناسب هستند. براساس یافته‌های جدول ۹، ۶۴/۸۵ درصد از مساحت استان (۷۹۲۹۵/۰۵

کیلومترمربع) را بافت خاک لوم (بسیار مناسب)، ۲/۱۷ درصد (۲۶۵۲/۴۴ کیلومترمربع) را بافت خاک سیلتی–رسی و شنی–رسی (مناسب) و ۳۱/۴۲ درصد را بافت خاک رسی–لوم (نسبتاً مناسب) تشکیل داده است و تنها ۱/۵۶ درصد از مساحت استان فارس از نظر بافت خاک نامناسب است.

فاصله از منابع آبی: زمین‌های خشک که با تبخیر زیاد و بارش‌های نامنظم مشخص می‌شوند، بیش از ۹۰ درصد از کشور را پوشش می‌دهند (Nouri et al., 2023). با توجه به افزایش بی‌رویه جمعیت و نیاز به تولید غذای بیشتر، افزایش تولید در اراضی دیم ضروری است. البته با توجه به پراکنش نامناسب بارش در سال‌های اخیر، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، مدیریت تأمین آب برای این اراضی در شرایط بحرانی نیز در اولویت‌های تحقیقاتی و پژوهشی قرارگرفته است. نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که یک یا دو آبیاری در زمان‌های حساس قادر است که عملکرد و بهره‌وری آب مصرفی اراضی دیم را به‌شدت افزایش دهد. لذا، تأمین آب برای اراضی دیم به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است (Ramezani Etedali et al., 2022). در واقع، تولیدات کشاورزی متکی به آبیاری در اراضی دیم ایران است (Nouri et al., 2023). بادام، برای رشد مناسب به آب کافی نیاز دارد. پهنه‌بندی می‌تواند به شناسایی اراضی با دسترسی به منابع آب کافی (رودخانه، سفره‌های آب زیرزمینی و غیره) کمک نماید. پهنه‌بندی مناسب می‌تواند تضمین کند که مزارع بادام در مناطقی با منبع آب پایدار واقع شده‌اند و خطر کمبود آب و رقابت با سایر صنایع یا جوامع مصرف‌کننده آب را کاهش می‌دهد. براساس یافته‌های مندرج در جدول ۹، ۹/۴۷ درصد از مساحت استان از نظر فاصله از منابع آبی بسیار مناسب، ۱۱/۰۶ درصد مناسب و ۴/۹۰ درصد نسبتاً مناسب است. امّا ۱۰/۷۱ درصد در وضعیت تناسب کم و ۶۳/۸۶ درصد در وضعیت نامناسب قرار دارد.

کاربری اراضی: اطلاعات مندرج در جدول ۹، از نقشه‌های کاربری اراضی سال ۱۳۸۸ سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (مبتنی بر داده‌های تفکیک شده استانی) استخراج شده است. این نقشه براساس اهداف تحقیق دوباره طبقه‌بندی شده و در شش دسته بسیار نامناسب (مناطق مسکونی و نمکزارها و غیره)، نامناسب (اراضی لخت و مسیل)، تناسب کم (اراضی آیش و جنگل)، نسبتاً مناسب (اراضی کشاورزی)، مناسب (اراضی باغی) و بسیارمناسب (دیمزارها و مراتع) طبقه‌بندی شد. بیشترین مساحت کاربری استان فارس را (۵۷/۸۷ درصد) مراتع و دیمزارها تشکیل می‌دهد که برای کاشت بادام بسیار مناسب می‌باشد. سایر طبقه‌بندی‌ها در جدول ۹ قابل مشاهده است.

لایه‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی، همسان‌سازی شد. وزن زیرمعیارهای سازگاری محیطی (زیرلایه‌های فاصله از منابع آبی، بافت خاک و کاربری اراضی) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP محاسبه و در محیط GIS براساس منطق فازی در فاصله‌ای بین صفر تا یک به‌صورت لایه‌های رستری فازی ارزش‌گذاری شد.

به‌منظور ترکیب زیرمعیارهای سازگاری محیطی در نرم‌افزار ArcGIS از الگوریتم Fuzzy overlay برای هم‌پوشانی لایه‌ها استفاده و نقشه برآورد سطح مناطق مستعد کاشت درخت بادام براساس داده‌های سازگاری محیطی تهیه شد (شکل ۸ الف). با هم‌پوشانی زیرمعیارهای سازگاری محیطی (فاصله از منابع آبی، بافت خاک و کاربری اراضی) نقشه پهنه‌بندی براساس روش شکست تهیه و در پنج طبقه (بسیار مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب) طبقه‌بندی شد (شکل ۸ ب). محدوده بسیار مناسب برای کشت بادام ۵۴۳۹۲/۴۸ کیلومترمربع (۴۴/۴۸ درصد)، محدوده مناسب ۲۷۹۸۳/۱۲ کیلومترمربع (۲۲/۸۹ درصد)، محدوده نسبتاً مناسب ۲۵۰۴۳/۲۱ کیلومترمربع (۲۰/۴۸ درصد) از مساحت استان را دربرگرفته است. تناسب اقلیمی ۶۵۳۱/۷۵ کیلومترمربع (۵/۳۴ درصد) از استان فارس اندک بوده و ۸۳۲۱/۴۴ کیلومترمربع (۶/۸۱ درصد) برای کاشت بادام نامناسب می‌باشد (جدول ۱۰).

د) پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس معیار اجتماعی- اقتصادی

به‌منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس معیار اجتماعی- اقتصادی، زیرمعیارهای فاصله از جاده، دسترسی به مراکز جمعیتی تهیه و سپس براساس نیاز رویشی بادام دیم ارزش‌گذاری و طبقه‌بندی شد.

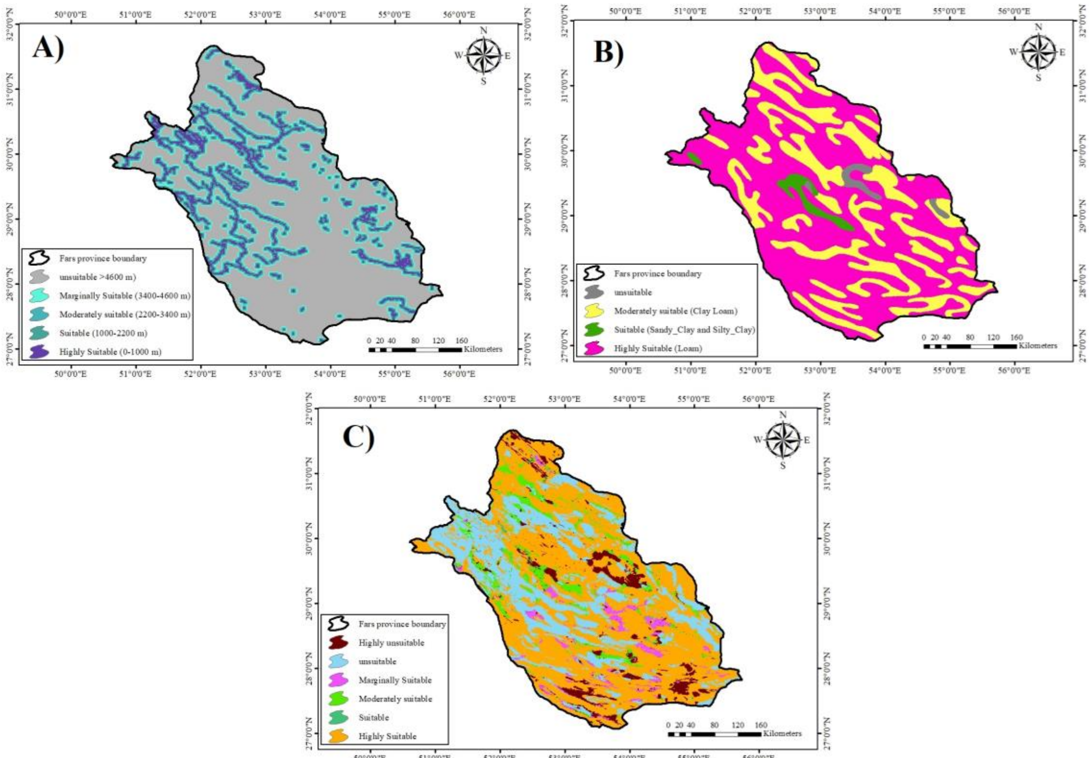
فاصله از جاده: به‌طور کلی، نزدیکی به جاده به‌عنوان یک معیار مهم در مکان‌یابی محصولات کشاورزی همواره مورد توجه است (Jahanshahi Joz & Parvazi, 2022). فاصله کمتر از جاده‌های اصلی و دسترسی راحت‌تر به آن، علاوه‌بر کاهش هزینه و زمان حمل‌ونقل، بهبود قابل توجهی در تأمین خدمات و عرضه محصولات و سودآوری کشاورزان ایجاد می‌کند. بنابراین، در برنامه‌ریزی مکان‌یابی محصولات کشاورزی، این عامل باید مد نظر قرار گیرد.

جدول ۹- طبقه‌بندی معیارهای سازگاری محیطی در استان فارس
Table 9- Classification of environmental adaptation criteria in Fars province

	گزینه Alternative	توصیف قابلیت Capability description	مساحت Area (km^2)	درصد مساحت Percentage of area
فاصله از منابع آبی Distance from water levels	0-1000	بسیار مناسب Highly suitable	11583.27	9.47
	1000-2200	مناسب Suitable	13522.12	11.06
	2200-3400	نسبتاً مناسب Moderately suitable	5982.61	4.90
	3400-4600	تناسب کم Marginally suitable	13098.64	10.71
	>4600	نامناسب Unsuitable	78085.35	63.86
بافت خاک Soil texture	لوم Loam	بسیار مناسب Highly suitable	79295.05	64.85
	سیلتی- رسی و شنی- رسی Silty-Clay and Sandy-Clay	مناسب Suitable	2652.44	2.17
	رسی-لوم Clay loam	نسبتاً مناسب Moderately suitable	38421.01	31.42
	شور Salt	نامناسب Unsuitable	1903.50	1.56
کاربری اراضی Land use	دیم‌زارها و مراتع Drylands and rangelands	بسیار مناسب Highly suitable	70689.51	57.87
	باغ Garden	مناسب Suitable	366.24	0.31
	اراضی کشاورزی Agricultural lands	نسبتاً مناسب Moderately suitable	8355.42	6.82
	اراضی آیش و جنگل Fallow land and forest	تناسب کم Marginally suitable	4082.25	26.56
	اراضی لخت، مسیل Bare lands, watercourse	نامناسب Unsuitable	31210.45	2.60
	مناطق مسکونی، نمکزارها و غیره Residental areas, salt marsh and etc	بسیار نامناسب Highly unsuitable	7568.13	5.84

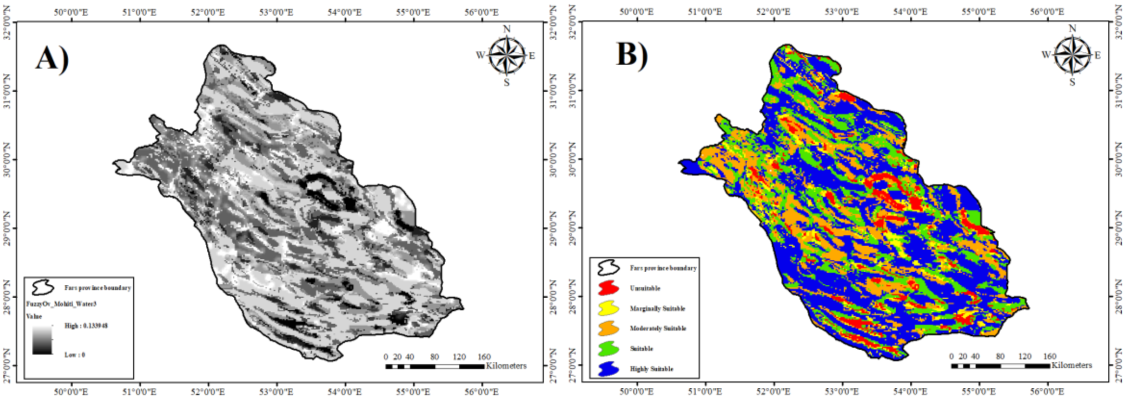
جدول ۱۰- سازگاری محیطی
Table 10- Environmental adaptation

طبقات Classes	درصد Percent	مساحت Area (km^2)
بسیار مناسب Highly suitable	44.48	54392.48
مناسب Suitable	22.89	27983.12
نسبتاً مناسب Moderately suitable	20.48	25043.21
تناسب کم Marginally suitable	5.34	6531.75
نامناسب Unsuitable	6.81	8321.44



شکل ۷- از چپ به راست: الف) نقشه پهنه‌بندی فاصله از منابع آبی، ب) بافت خاک؛ ج) کاربری اراضی جهت کاشت درخت بادام دیم در استان فارس

Fig.7- From left to right:A) zoning map distance from water levels, B) soil texture; C) land use for almond cultivation in Fars province



شکل ۸- از چپ به راست، الف) نقشه فازی AHP برآورد سطح مناطق مساعد کاشت بادام در استان فارس براساس معیار سازگاری محیطی، ب) نقشه برآورد سطح مناطق مساعد کاشت بادام در استان فارس براساس معیار سازگاری محیطی

Fig. 8- From left to right: A) AHP fuzzy map estimating suitable almond cultivation areas in Fars province based on the environmental adaptation criteria, B) map estimating suitable almond cultivation areas in the study area based on the environmental adaptation criteria

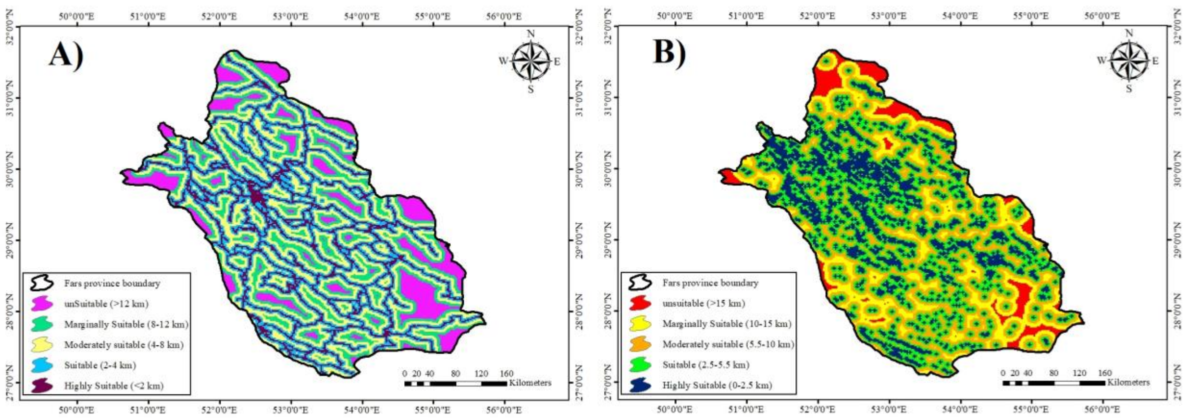
براساس جدول ۱۱، ۱۵/۰۸ درصد از مساحت استان فارس از نظر فاصله از جاده بسیار مناسب، ۲۵/۱۰ درصد مناسب، ۲۹/۸۲ درصد نسبتاً مناسب، ۱۶/۶۵ درصد تناسب کم و ۱۳/۳۵ درصد نامناسب می‌باشد.

در جدول ۱۱، مشخصات دسترسی به مراکز جمعیتی آورده شده است. براساس یافته‌ها، ۲۹۰۸۴/۹۹ کیلومترمربع (معادل ۲۳/۷۹

درصد) از مساحت استان از نظر زیرمعیار دسترسی به مراکز جمعیتی در وضعیت بسیار مناسب، ۳۵۱۲۳/۱۱ کیلومترمربع (معادل ۲۸/۷۲ درصد) از مساحت استان در وضعیت مناسب، ۳۳۱۴۴/۴۰ کیلومترمربع (معادل ۲۷/۱۱ درصد از مساحت استان) در وضعیت نسبتاً مناسب قرار دارد و تناسب ۱۷۴۴۵/۲۸ کیلومترمربع از مساحت استان کم و ۶/۱۱ درصد از مساحت استان نامناسب می‌باشد.

جدول ۱۱- طبقه‌بندی معیار اجتماعی- اقتصادی در استان فارس
Table 11- Classification of socio-economy criteria in Fars province

زیرمعیار Sub criteria	گزینه Alternative	تناسب Suitability	مساحت Area (km^2)	درصد مساحت Percentage of area
فاصله از جاده Distance from the road	0-2000	بسیار مناسب Highly suitable	18433.59	15.08
	2000-4000	مناسب Suitable	30689.44	25.10
	4000-8000	نسبتاً مناسب Moderately suitable	36460.32	29.82
	8000-12000	تناسب کم Marginally suitable	20364.14	16.65
	>12000	نامناسب Unsuitable	16324.52	13.35
دسترسی به مراکز جمعیتی Distance from population centers	0-2500	بسیار مناسب Highly suitable	29084.99	23.79
	2500-5500	مناسب Suitable	35123.11	28.72
	5500-10000	نسبتاً مناسب Moderately suitable	33144.40	27.11
	10000-15000	تناسب کم Marginally suitable	17445.28	14.27
	>15000	نامناسب Unsuitable	7474.22	6.11



شکل ۹- از چپ به راست: الف) نقشه برآورد فاصله از جاده، ب) دسترسی به مراکز جمعیتی جهت کاشت درخت بادام دیم در استان فارس
Fig. 9- From left to right: A) map estimating distance from the road, B) distance from population centers for almond cultivation in Fars province

لایه‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی، همسان‌سازی شد. وزن زیرمعیارهای اجتماعی- اقتصادی (فاصله از جاده؛ فاصله از مراکز جمعیتی) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP محاسبه و در محیط GIS براساس منطق فازی در فاصله‌ای بین صفر تا یک به صورت لایه‌های رستری فازی ارزش‌گذاری شد.

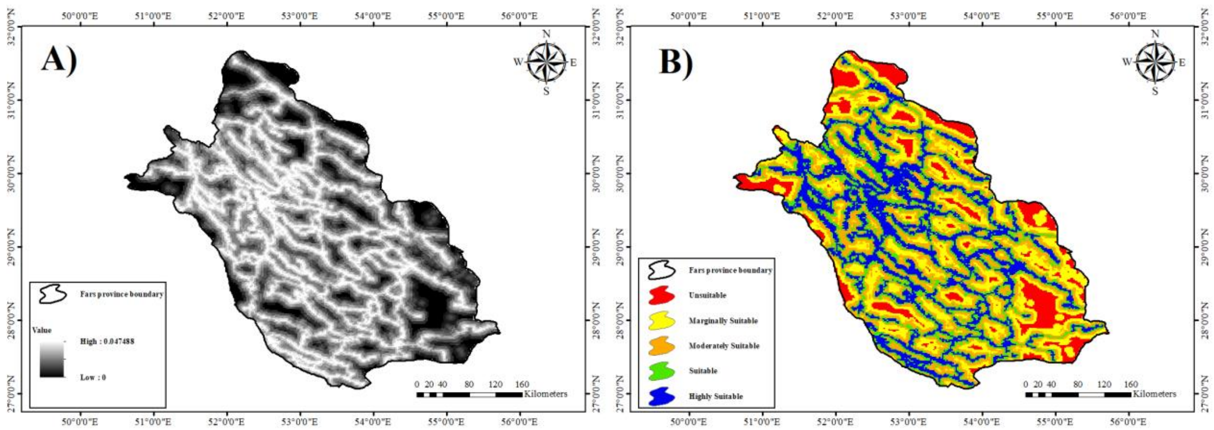
به‌منظور ترکیب زیرمعیارهای اجتماعی- اقتصادی در نرم‌افزار

ArcGIS از الگوریتم Fuzzy overlay برای هم‌پوشانی لایه‌ها استفاده و نقشه برآورد سطح مناطق مستعد کاشت درخت بادام براساس داده‌های اجتماعی- اقتصادی تهیه شد (شکل ۱۰ الف). با هم‌پوشانی زیرمعیارهای اجتماعی- اقتصادی (فاصله از جاده و دسترسی به مراکز جمعیتی) نقشه پهنه‌بندی براساس روش شکست تهیه و در پنج طبقه (بسیار مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب) طبقه‌بندی شد (شکل ۱۰ ب). براساس اطلاعات جدول ۱۲، محدوده بسیار مناسب برای کشت بادام ۲۷۸۴۱/۳۳ کیلومترمربع (۲۲/۷۷ درصد)، محدوده مناسب ۲۴۴۲۹/۹۵ کیلومترمربع (۱۹/۹۸ درصد)، محدوده نسبتاً مناسب ۳۰۷۶۳/۶۳کیلومترمربع (۲۵/۱۶ درصد)، از مساحت استان را دربرگرفته است. تناسب اجتماعی- اقتصادی ۲۶۰۰۷/۲۵ کیلومترمربع (۲۱/۲۷ درصد) از استان فارس اندک بوده و ۱۳۲۲۹/۸۳ کیلومترمربع (۱۰/۸۲ درصد) از مساحت استان فارس برای کاشت بادام نامناسب می‌باشد.

جدول ۱۲- نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس معیار اجتماعی- اقتصادی

Table 12- Zoning map suitable almond cultivation based on the socio-economy criteria

طبقات Classes	مساحت Area (km^2)	درصد Percent
بسیار مناسب Highly suitable	27841.33	22.77
مناسب Suitable	24429.95	19.98
نسبتاً مناسب Moderately suitable	30763.63	25.16
تناسب کم Marginally suitable	26007.25	21.27
نامناسب Unsuitable	13229.83	10.82



شکل ۱۰- از چپ به راست: الف) نقشه فازی پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس عوامل اجتماعی- اقتصادی، ب) نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت درخت بادام دیم براساس معیار اجتماعی- اقتصادی

Fig. 10- left to right: A) Fuzzy zoning map estimating suitable almond cultivation areas in Fars province based on the socio-economy criteria, B) zoning map suitable almond cultivation areas based on the socio-economy criteria

ه) نقشه نهایی مناطق مستعد توسعه کاشت بادام دیم در استان فارس

در این مرحله با عمل هم‌پوشانی (تلفیق) زیرمعیارها، به‌منظور ترکیب معیارها و پهنه‌بندی استان فارس از نظر قابلیت کشت بادام، پس از فازی‌سازی نقشه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS از الگوریتم Fuzzy overlay برای هم‌پوشانی کردن لایه‌های اطلاعاتی (اقلیمی، توپوگرافی، اجتماعی- اقتصادی و سازگاری محیطی) استفاده شد و نقشه برآورد سطح مناطق مستعد کاشت درخت بادام تهیه شد (شکل

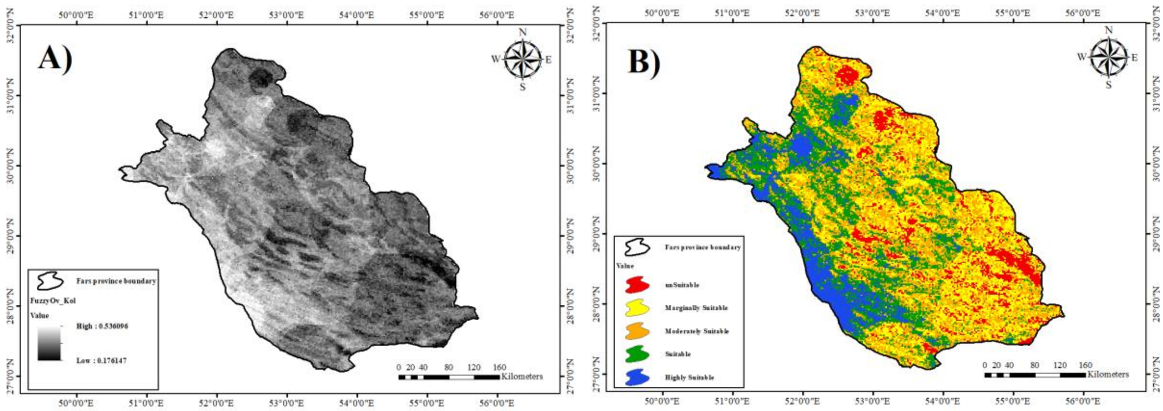
۱۱ الف). در نهایت، نقشه مکان‌یابی نواحی مساعد توسعه کاشت بادام براساس روش شکست که براساس توزیع نرمال داده‌ها است و نقاط عطف داده‌ها مرز بین طبقات را مشخص می‌نماید، در پنج طبقه طبقه‌بندی شد (شکل ۱۱ ب). در جدول ۱۳، مشخصات نقشه مکان‌یابی نواحی مساعد توسعه کاشت بادام ارائه شده است. مناطق بسیار مناسب، ۱۳۷۵۵/۶۰ کیلومترمربع (معادل ۱۱/۲۵ درصد) از مساحت استان، مناطق مناسب ۲۷۱۵۶/۶۱ کیلومترمربع (معادل ۲۲/۲۱ درصد) از مساحت استان، مناطق نسبتاً مناسب ۳۶۳۳۹/۲۴ کیلومترمربع (معادل ۲۹/۷۲ درصد از مساحت استان) را دربرگرفته‌اند و ۳۲۳۰۴/۲۶ کیلومترمربع (معادل ۲۶/۴۲ درصد از مساحت استان) دارای تناسب کم و ۱۲۷۱۶/۲۹ کیلومترمربع (معادل ۱۰/۴۰ از مساحت استان) برای کاشت بادام نامناسب هستند.

نقشه ارائه شده در (شکل ۱۱ ب) پهنه‌های مختلف استان فارس را از نظر مناسب بودن برای کشت دیم بادام در پنج طبقه بسیار مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب دسته‌بندی کرده است.

جدول ۱۳- نقشه پهنه‌بندی نهایی

Table 13- Final zoning map

طبقات Classes	مساحت Area (km^2)	درصد Percent
بسیار مناسب Highly suitable	13755.60	11.25
مناسب Suitable	27156.61	22.21
نسبتاً مناسب Moderately suitable	36339.24	29.72
تناسب کم Marginally suitable	32304.26	26.42
نامناسب Unsuitable	12716.29	10.40



شکل ۱۱- از چپ به راست: الف) نقشه مدل فازی نواحی مساعد توسعه کاشت درخت بادام در استان فارس، ب) نقشه نهایی مکان‌یابی نواحی مساعد توسعه کاشت درخت بادام

Fig. 11- From left to right: A) fuzzy model map of suitable almond cultivation development areas in Fars province, B) the final map of locating suitable almond cultivation development areas in Fars province

شکل ۱۲ الف، نحوه کاربری و مساحت کاربری‌های استان فارس را در سال ۱۳۸۸ نشان می‌دهد که از نقشه‌های کاربری اراضی که توسط سازمان جنگل‌ها ، مراتع و آبخیزداری کشور در سال ۱۳۸۸ برای استان‌های ایران به تفکیک تهیه شده است. این نقشه براساس اهداف تحقیق دوباره طبقه‌بندی شده و در نُه دسته جنگل، مناطق مسکونی، مراتع، اراضی دیم، مسیل، اراضی بدون پوشش گیاهی، اراضی باغی، اراضی زراعی و منابع آبی طبقه‌بندی شد.

در این نقشه، کاربری‌های مختلفی مشخص شده است. قابل ذکر

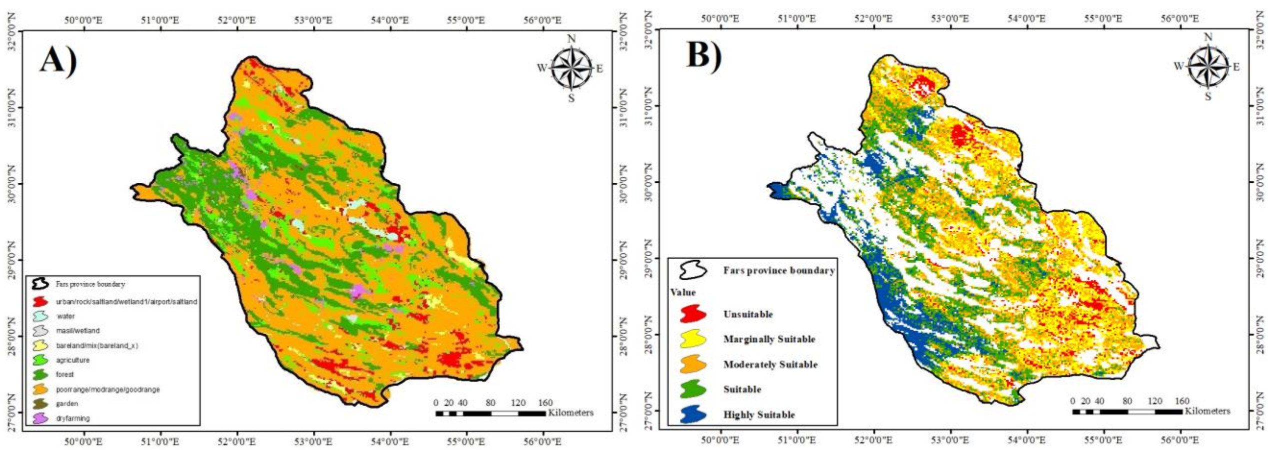
است که کاربری‌هایی مانند اراضی دریاچه‌ای، اراضی باتلاقی، شوره‌زارها، مناطق مسکونی و سایر نواحی نـاممکن یـا نامسـاعد (از جملـه جنگل‌ها که قابلیت تغییر کاربری اراضی ندارند) برای کاشـت درخـت بادام نباید در نقشه نهایی حضور داشته باشند. لـذا، در تحلیـل نهـایی، این نواحی از گستره پیشنهاد برای توسعه کاشت و توسعه گونـه بـادام حذف شدند و نقشه نهایی مناطق مساعد بـرای کاشـت درخـت بـادام مشخص شد.

شکل ۱۲ ب، نقشه مکان‌یابی نواحی مساعد توسعه کاشت درخت بادام را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، استان فـارس از توانمندی مناسبی برای کاشت درخت بادام برخوردار است، به‌گونه‌ای‌که ۱۱۰۲۸/۹۳ کیلومترمربع (معادل ۹/۰۲ درصد) از مساحت استان بسیار مناسب، ۲۰۱۲۵/۹۷ کیلومترمربع (معادل ۱۶/۴۶ درصد) مناسب، ۲۶۴۴۷/۴۳ کیلومترمربع (معادل ۲۱/۶۳ درصد) نسـبتاً مناسـب بـرای کاشت بادام هستند. تناسب ۲۰۸۹۶/۲۹ کیلومترمربـع (۱۷/۰۹ درصـد) از استان فارس اندک بـوده و ۶۱۲۵/۸۳ کیلومترمربـع (۵/۰۱ درصـد) برای کاشت بادام نامناسـب مـی‌باشـد و کشـت بـادام در ۳۷۶۴۷/۵۵ کیلومترمربع از مساحت استان فارس ناممکن می‌باشد (جدول ۱۴).

جدول ۱۴- نواحی مساعد توسعه کاشت درخت بادام

Table 14- Suitable almond cultivation development areas in Fars province

ردیف	توصیف قابلیت Capability description	مساحت Area (km^2)	مساحت Area (%)
1	بسیار مناسب Highly suitable	11028.93	9.02
2	مناسب Suitable	20125.97	16.46
3	نسبتاً مناسب Moderately suitable	26447.43	21.63
4	تناسب کم Marginally suitable	20896.29	17.09
5	نامناسب Unsuitable	6125.83	5.01
6	ناممکن Impossible	37647.55	30.79



شکل ۱۲- الف) نقشه کاربری اراضی استان فارس، ب) نقشه نهایی برآورد سطح مناطق مساعد کاشت بادام در استان فارس

Fig. 12- A) land use map for Fars province, B) fin location map for estimating suitable almond cultivation areas in Fars province

نتیجه‌گیری

روش‌های مرسوم ارزیابی زمین دارای محدودیت‌هایی در تحلیل فضایی برای تناسب محصول هستند و گزینه‌های کاربری بهتر زمین را می‌توان با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پیاده‌سازی کرد. ارزیابی تناسب زمین یک روش مفید برای کمک به تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی کاربری زمین است (Tashayo et al., 2020).

یکی از راه‌های بسیار مهم برای شناخت قابلیت‌های مختلف اراضی، استفاده از پهنه‌بندی اراضی است (Nabati et al., 2023). تجزیه و تحلیل تناسب زمین، مناسب بودن زمین را ارزیابی می‌کند و در عین حال، عوامل محیطی و اجتماعی- اقتصادی را نیز در نظر می‌گیرد (Aghaloo & Sharifi, 2023). نتیجه این نوع پهنه‌بندی اراضی، افزایش کمّی و کیفی عملکرد محصول به‌دلیل شرایط آب‌وهوایی، خاک و سازگاری‌های توپوگرافی است (Nabati et al., 2023). استان فارس یکی از مناطق مستعد کشت بادام است که رتبه اول کشور را از نظر سطح زیرکشت بادام (رتبه اول سطح زیرکشت بادام دیم و رتبه ششم سطح زیرکشت بادام آبی) به خود اختصاص داده است. درحالی‌که استان فارس از نظر سطح زیرکشت و میزان تولید بادام رتبه اول کشور را داراست، از نظر عملکرد بادام دیم و آبی، وضعیت مناسبی ندارد و به‌ترتیب در رده‌های ۱۶ و ۱۰ کشور قرار دارد. به نظر می‌رسد که این استان از تمامی توانمندی خود استفاده ننموده و کشت درخت بادام در بسیاری از زمین‌های مستعد کشت، مغفول مانده است. لذا، تحقیق حاضر در جستجوی پاسخی علمی به این سؤال، توان استان فارس برای توسعه کاشت بادام به بوته آزمایش گذاشته شد و در محیط GIS، نواحی مستعد کاشت درخت بادام معرفی شد. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، استان فارس از توانمندی مساعدی برای کاشت درخت بادام برخوردار است. پهنه‌های بسیارمناسب برای کاشت بادام دیم ۱۱۰۲۸/۹۳ کیلومترمربع (۹/۰۲ درصد) از مساحت استان را دربرگرفته است. قابل ذکر است که پهنه‌هایی در منطقه با توان بسیار مناسب شناسایی شده‌اند که مناطق بسیار مطلوب استان بوده و با معیارهای منتخب در این تحقیق شامل ۱۴ معیار ارتفاع از سطح دریا، شیب اراضی، جهت شیب، کاربری اراضی، بافت خاک، دمای رشد جوانه، حداقل دما مرحله گل‌دهی، رطوبت نسبی مرحله گل‌دهی، دمای چرخه رشد، دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن، میانگین بارش سالیانه، دسترسی به جاده، دسترسی به منابع آبی و دسترسی به مراکز جمعیتی بیشترین تطابق را دارند و کاشت درخت بادام در این نواحی، بیشترین عملکرد را خواهد داشت. پهنه‌های مناسب و نسبتاً مناسب برای کاشت بادام نیز به‌ترتیب ۱۶/۴۶ و ۲۱/۶۳ درصد از مساحت منطقه را دربرمی‌گیرد. تناسب ۱۷/۰۹ درصد از منطقه برای کاشت بادام کم است و ۵/۰۱ درصد از مساحت استان فارس برای کاشت بادام دیم نامناسب است. همچنین ۳۰/۷۹ درصد از کل سطح استان فارس به‌دلیل نوع کاربری اراضی برای کاشت بادام پیشنهاد نمی‌شود. براساس یافته‌ها، مهم‌ترین معیارهای محدودکننده برای کاشت بادام شامل شرایط اقلیمی و توپوگرافی استان فارس است. بررسی نقشه‌های اقلیمی نشان داد که مناطق مناسب برای کاشت بادام دیم به‌طور قابل توجهی توسط بارش، حداقل دمای مرحله گل‌دهی، میانگین دمای تشکیل میوه و مرحله رسیدن محدود شده است. مهم‌ترین محدودکننده‌های توپوگرافی نیز شامل درصد شیب و ارتفاع است که منجر به کاهش عملکرد بادام دیم در استان فارس شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به کشاورزان و باغداران استان فارس کمک کند تا مناطق مستعد برای کاشت بادام را شناسایی نموده و با برنامه‌ریزی بهتر در این خصوص، توسعه کاشت بادام را بهبود بخشند. همچنین، مسئولین و سیاست‌گذاران مربوط به کشاورزی و توسعه روستایی می‌توانند براساس نتایج، برنامه‌ها و سیاست‌های مناسبی را برای توسعه کاشت بادام در استان فارس تدوین و اجرا نمایند. پیشنهاد می‌شود که محققان و دانشگاهیان مرتبط با کشاورزی و توسعه پایدار منابع طبیعی در استان فارس، تحقیقات و پژوهش‌های بیشتری را در زمینه توسعه کشت بادام در این منطقه انجام دهند و راهکارهای جدیدی را برای بهبود عملکرد کشت بادام ارائه کنند.

سپاسگزاری

نویسندگان پژوهش حاضر لازم می‌دانند که از همکاری سازمان هواشناسی کشور در تأمین داده‌های مورد نیاز این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

References

1. Abouei, M., Kamali Aliabad, K., Soluki, M., Fahmideh, l., & Imani, A. (2021). Identification of self-incompatibility alleles in some of Yazd province almond genotypes by using PCR method. *Iranian Journal of Horticultural Science, 51*(4), 797-808. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22059/ijhs.2019.283959.1670
2. Aghaloo, K., & Sharifi, A. (2023). A GIS-based agroecological model for sustainable agricultural production in arid and semi-arid areas: The case of Kerman Province, Iran. *Current Research in Environmental Sustainability, 6*, 1-18. https://doi.org/10.1016/j.crsust.2023.100230
3. Ahmadzadeh Chaleshtori, A., Panahpour, E., Iranipour, R., & Moezzi, A. (2020). The nutritional evaluation of Almond (mamaee SP.) gardens using diagnostic recommendation integrated system (DRIS) method in Saman area of Chaharmahal Va Bakhtiari Province. *Journal of Plant Production Research, 26*(4), 115-130. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22069/jopp.2019.15569.2398
4. Alemayehu, A. (2023). Land Suitability Analysis for Sustainable Production of Selected Cereals in Southeastern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science, 2023*(1), 1-12. https://doi.org/10.1155/2023/6688187
5. Alhajj Ali, S., Vivaldi, G. A., Garofalo, S. P., Costanza, L., & Camposeo, S. (2023). Land suitability analysis of six fruit tree species immune/resistant to Xylella fastidiosa as alternative crops in infected Olive-growing areas. *Agronomy, 13*(2), 1-16. . https://doi.org/10.3390/agronomy13020547
6. Bagheri Bodaghabadi, M., Ebrahimi Meiman, F., Mehnatkesh, A., & Mousavi, S. A. (2020). Evaluation of land suitability for horticultural use Case Study: Saman County, Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Geography and Environmental Planning, 31*(1), 53-72. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22108/gep.2020.119932.1224
7. Bijani, M., Hayati, D., Fallah Haghighi, N., & Valizadeh, N. (2022). Application of POET model to investigate agricultural water conflict in Iran. *Frontiers in Water, 4*, 1-19. https://doi.org/10.3389/frwa.2022.989542
8. Borji, A., Asgari, A., Khoshbakht, K., & Mirbahgeri, B. (2015). Site selection of areas appropriate for dry almond cultivation using GIS: A case study in Farub Roman drainage basin/Neyshabour. *Journal of Agroecology, 4*(2), 9-20. (In Persian with English abstract)
9. De Wit, S., & Haines, S. (2022). Climate change reception studies in anthropology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 13*(1), 1-21. https://doi.org/10.1002/wcc.742
10. Del Mar Esponda-Bernal, M., Echeverri-Sanchez, A. F., Aguirre-Gonzalez, E. F., & Andrade, R. S. (2024). A biophysical suitability model to identify best areas for the cultivation of potential cash crops: The case of basil in Valle del Cauca. *Agricultural Systems, 216*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103909
11. Doke, A. B., Zolekar, R. B., Patel, H., & Das, S. (2021). Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India. *Ecological Indicators, 127*, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107685
12. Eini, H., Sadeghi, S., & Hosseinzadeh, S. R. (2013). Zonation of topoclimatic potentials of rain-fed wheat cultivation in Kermanshah Province. *Journal of Geography and Regional Development, 10*(2), 21-45. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22067/geography.v0i0.23233
13. Everest, T. (2021). Suitable site selection for pistachio (*Pistacia vera*) by using GIS and multi-criteria decision analyses (a case study in Turkey). *Environment, Development and Sustainability, 23*(5), 7686-7705. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00941-5
14. Hudait, M., & Patel, P. P. (2022). Site suitability assessment for traditional betel vine cultivation and crop acreage expansion in Tamluk Subdivision of Eastern India using AHP-based multi-criteria decision making approach. *Computers and Electronics in Agriculture, 200*, 107220. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107220
15. Iran Meteorological Organization (http://www.irimo.ir/).
16. JafarNodeh, S., Soltani, A., Joolaei, R., & Zeinali, E. (2023). Estimation of the yield of some rainfed crops in the present irrigated lands of Iran. *Journal of Agroecology, 15*(2), 301-317. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22067/AGRY.2022.71149.1052
17. Jahanshahi Joz, M., & Parvazi, M. (2022). Feasibility of saffron cultivation using (GIS-AHP) in Zanjan Province. *Geographical Sciences (Applied Geography), 17*(34), 115-131. (In Persian)
18. Jozi, S. A., & Moradi Majd, N. (2020). Evaluation of ecological capability of Amygdalus scoparia habitat in South

Zagros region by using of MCDM method. *Environmental Researches*, *11*(21), 73-84. (In Persian with English abstract), DOR: 20.1001.1.20089597.1399.11.21.7.6

19. Kaboosi, K. (2020). Zoning of Golestan Province agricultural land for aainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) based on climatic- stochastical analysis. *Journal of Agroecology*, *12*(3), 487-505. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22067/JAG.V12I3.79025
20. Karami, A., & Feghhi, J. (2012). Investigation of Quantitative metrics to protect the landscape in land use by sustainable pattern (Case study: Kohgiluyeh and Boyer Ahmad). *Journal of Environmental Studies*, *37*(60), 79-88. (In Persian with English abstract), DOR:20.1001.1.10258620.1390.37.60.8.2
21. Karimi, V., Karami, E., Karami, S., & Keshavarz, M. (2021). Adaptation to climate change through agricultural paradigm shift. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(4), 5465-5485. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00825-8
22. Khalili, N., Arshad, M., Farajzadeh, Z., Kächele, H., & Müller, K. (2020). Effect of drought on smallholder education expenditures in rural Iran: Implications for policy. *Journal of environmental management*, *260*, 110136. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110136
23. Khalili, N., Arshad, M., Farajzadeh, Z., Kächele, H., & Müller, K. (2021a). Does drought affect smallholder health expenditures? Evidence from Fars Province, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(1), 765-788. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00608-1
24. Khalili, N., Arshad, M., Kächele, H., Farajzadeh, Z., & Müller, K. (2021b). Drought shocks and farm household consumption behaviour: Insights from Fars province of Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *66*, 102625. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102625
25. Khalili Torghabe, G. H., Tehranifar, A., Abedi, B., & Eskandari Torbaghan, M. (2022). Improvement of some growth and biochemical properties of almonds by the use of rhizospheric halophile, alkaliphile and haloalkaliphile bacteria in Khorasan Razavi almonds orchards. *Research in Pomology*, *6*(2), 62-80. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.30466/rip.2021.53296.1157
26. Khazaei, M., Etemad, V., Shirvani, A., & javanmiri Pour, M. (2021). Dust sequestration comparison on leaves of four tree species in two domains of the Chitgar Forest Park. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *34*(2), 384-393. (In Persian with English abstract), DOR:20.1001.1.23832592.1400.34.2.19.8
27. Kheyruri, Y., Shayesteh, A., & Sharafati, A. (2023). Quantification of the meteorological and hydrological droughts links over various regions of Iran using gridded datasets. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(32), 1-18. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27498-w
28. Maleksaeidi, H., & Keshavarz, M. (2019). What influences farmers' intentions to conserve on-farm biodiversity? An application of the theory of planned behavior in Fars province, Iran. *Global Ecology and Conservation*, *20*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00698
29. Ministry of Agricultural Jihad. (2022b). *Agricultural Statistics of 2021* (Vol. 2rd Volume): Prepared by Deputy of Statistics, Information and Communication Technology Center
30. Mirabbasi Najafabadi, Z., Movahedi, S., & Baratian, A. (2015). The effect of climate on Almond tree (*Prunus amygdalus*) phonology in Najafabad city. *Journal of Applied Climatology*, *2*(1), 37-52. (In Persian with English abstract)
31. Mitra, R., Sarkar, A., Hossain, G., Roy, D., Mandal, G., Das, J., & Mandal, D. K. (2023). Development of objective-based multi-criteria decision-making approach in crop suitability assessment for maize production using GIS *Advancement of GI-Science and Sustainable Agriculture: A Multi-dimensional Approach* (pp. 199-215). Cham: Springer Nature Switzerland., https://doi.org/10.1007/978-3-031-36825-7_13
32. Mohammadi, M. (2022). The effect of Mychorhizae Symbiosis on nutrient concentration in common Almond (Prunus dulcis Mill.) Rootstocks in drought stress condition. *Water and Soil*, *36*(1), 81-94. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22067/jsw.2022.73354.1110
33. Moradi, H., Esna-Ashari, M., & Ershadi, A. (2019). Evaluation of some physiological responses to drought stress in grafted and ungrafted almond rootstocks. *Iranian Journal of Horticultural Science*, *50*(2), 311-323. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.246776.1356
34. Mushtaq, R., Yadav, R. K., Fayaz Fayaz, A., Ahmed, P., & Singh, H. (2023). Multi-criteria land suitability assessment for mulberry-based agroforestry using AHP and GIS approach in Anantnag district of the Kashmir valley, India, to achieve sustainable agriculture. *Environment, Development and Sustainability*, *26*(11), 1-23.

https://doi.org/10.1007/s10668-023-03812-x

35. Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M. (2023). An integrated approach land suitability for agroecological zoning based on fuzzy inference system and GIS. *Environment, Development and Sustainability*, *25*(3), 2316-2338. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02127-7
36. Nouri, M., Homaee, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*, *288*, 1-20. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108480
37. Nungula, E. Z., Mugwe, J., Massawe, B. H., Seleiman, M. F., Ali, N., & Gitari, H. I. (2024). GIS-AHP based approach in land evaluation and suitability assessment for sunflower (*Helianthus annus*) production. *Cogent Food & Agriculture*, *10*(1), 1-22. https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2309831
38. Osei-Gyabaah, A. P., Antwi, M., Addo, S., & Osei, P. (2023). Land suitability analysis for cocoa (*Theobroma cacao*) production in the Sunyani municipality, Bono region, Ghana. *Smart Agricultural Technology*, *5*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100262
39. Otieno, M. A., Gitari, H. I., Maitra, S., & Nungula, E. Z. (2023). GIS-AHP technique land suitability assessment for capsicum (*Capsicum annuum* L.) production. *International Journal of Bioresource Science*, *10*(1), 19-30. https://doi.org/10.30954/2347-9655.01.2023.3
40. Quinta-Nova, L., & Ferreira, D. (2022). Present and future land suitability analysis for Almond and Pistachio crops in the Beira Baixa region using spatial multicriteria In V. J. P. D. Martinho (Ed.), *Impacts of Climate Change and Economic and Health Crises on the Agriculture and Food Sectors* (pp. 249-263): IGI Global, https://doi.org/10.4018/978-1-7998-9557-2.ch013
41. Rahimi, S., Gharaghani, A., & Eshghi, S. (2021). Diversity of Nut and seedling characteristics and its relationship to habitat climate in some Almond species. *Journal of Nuts*, *12*(2), 113-136. https://doi.org/10.22034/jon.2021.1923860.1107
42. Ramezani Etedali, H., GorginPaveh, F., & Tavakoli, A. (2022). Identifying potential rainfed fields for supplementary irrigation in Qazvin province. *Water Management in Agriculture*, *9*(1), 89-100. (In Persian with English abstract), DOR: 20.1001.1.24764531.1401.9.1.7.8
43. Sadiq, F. K., Ya'u, S. L., Aliyu, J., & Maniyunda, L. M. (2023). Evaluation of land suitability for soybean production using GIS-based multi-criteria approach in Kudan Local Government area of Kaduna State Nigeria. *Environmental and Sustainability Indicators*, *20*(2), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100297
44. Sharifzadeh, M., Aliyari, V., Aliyari, N., & Gholami Kalus, A. (2023). Investigating the impacts of drought on rural households of Kakan district in Boyer Ahmad County. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, *18*(Special Issue), 73-87. (In Persian with English abstract)
45. Solimani, M., Rahimi, D., & Yazdanpanah, H. (2021). Climate change adaptation strategy in agriculture (Rostam County). *Journal of Natural Environmental Hazards*, *10*(29), 19-32. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22111/JNEH.2020.32681.1598
46. Tashayo, B., Honarbakhsh, A., Akbari, M., & Eftekhari, M. (2020). Land suitability assessment for maize farming using a GIS-AHP method for a semi-arid region, Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *19*(5), 332-338. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.03.003
47. Tavakoli, A. R., Oweis, T. Y., Sepaskhah, A. R., Mahdavi Moghadam, M., & Farayedi, Y. (2021). Growing fruit trees with rainwater harvesting in arid environments: the case of almond in Northwest Iran. *Water Harvesting Research*, *4*(1), 54-67. https://doi.org/10.22077/jwhr.2020.3340.1034
48. Yazdanpanah, h. a., Kamali, g., Hejazi-Zadeh, z., & Ziaeian, p. (2006). Determination of climatic potential of east Azerbayjan Province for rainfed almond using GIS. *Geography and Development*, *4*(8), 193-204. (In Persian with English abstract), https://doi.org/10.22111/gdij.2006.3792
49. Zainaldeeni Meymand, A., Eskandari, M., Navidi, M., & Seyedjalali, S. J. (2019a). *Plant phenology for horticultural use in land suitability assessment*. Ministry of Agricultural Jihad, Institute of Soil and Water Research, Agricultural Research, Education and Extension Organization
50. Zamanialaei, M., Brown, M. E., McCarty, J. L., & Fain, J. J. (2023). Weather or not? The role of international sanctions and climate on food prices in Iran. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*, 1-16. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.998235

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 713-728

Structural Model of Factors Affecting the Use of Organic Fertilizers by Rice Farmers during Rice (*Oryza sativa*) Cultivation in Dezful County

Zahra Eskandari[1], Moslem Savari[2*] and Masoud Yazdanpanah[3]

1- Graduate M.Sc., Associate Professor & Professor Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran, respectively.
(*- Corresponding author's Email: Savari@asnrukh.ac.ir)

Received: 21-05-2024 Revised: 12-09-2024 Accepted: 22-09-2024 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Eskandari, Z., Savari, M., & Yazdanpanah, M. (2025). Structural model of factors affecting the use of organic fertilizers by rice (*Oryza sativa*) farmers during rice cultivation in Dezful County. *Journal of Agroecology*, *16*(4), 713-728. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.88035.1196

Introduction

Agriculture is an essential part of every country's economy and plays a decisive role in income, employment, and food security globally. Agricultural soils are critical for the efficient production of crops and safe food to meet the needs of a growing population. However, improving soil quality is a critical component of sustainable agriculture. Given the socio-economic and political pressure to improve soil fertility and increase agricultural productivity, widespread chemical fertilizer use, beginning in the 1950s and 1960s, led to increased food production at significant environmental cost. Chemical fertilizers and pesticides have improved short-term food production. However, soil degradation, greenhouse gas emission increases, and water pollution risks have emerged through their widespread use. Consequently, excessive use of chemical fertilizers negatively impacts human health throughout the food chain. For example, excessive use of phosphate fertilizers can lead to cadmium pollution, which, if ingested can lead to osteoporosis. Excessive use of nitrogen fertilizer leads to the accumulation of nitrites in plants; nitrites combine with amines, increasing the risk of cancers of the digestive system and methemoglobinemia in severe cases. Fertilizer use leads to surface runoff and groundwater pollution, contributing to eutrophication and, consequently the deterioration of natural ecosystems and reduction of genetic diversity. Rice is one of the main Iranian foods, but the excessive use of chemical inputs in the production of this product has reduced its quality and properties, previous research shows that it is possible to use organic fertilizers in rice cultivation. It can provide nutrients needed by the soil to produce this product. However, rice farmers do not have much desire to use it in rice cultivation. In line with this importance, the present study was conducted with the general aim of investigating the factors affecting the use of organic fertilizers by rice farmers during rice cultivation in Dezful county.

Materials and Methods

https://doi.org/10.22067/agry.2024.88035.1196

The statistical population of this research in 1401 is made up of 4700 rice farmers of Dezful County, and the sample size was estimated based on the table of Karjesi and Morgan using the cluster sampling method of 360 samples. Data collection was designed in the form of a questionnaire based on the Likert spectrum scale. The form and content validity of the questionnaire was confirmed by experts' opinion, and its reliability was confirmed through Cronbach's alpha and composite reliability

Results and Discussion

The results of the structural equation modelling research showed that the variables of self-efficacy (λ=0.257; P=0.000), action guide (λ=0.222; P=0.000), perceived intensity (λ=0.121; P=0.035) and perceived sensitivity (λ= 0.100; P= 0.046) and perceived benefits (λ= 0.319; P= 0.000) have a positive and significant effect on the use of organic fertilizers among rice farmers in Dezful County. This is despite the fact that the perceived obstacles variable did not have a significant effect in this section. In addition, it can be said that the variables of the health belief framework could explain 67% of the variance of the dependent variable of the research (the use of organic fertilizers in rice cultivation). In general, the results of this research can add new knowledge to the existing knowledge and provide new insights for policymakers in this field to promote and develop organic and safe products.

Conclusion

This study was conducted with the general aim of determining the factors affecting farmers' willingness to use organic fertilizers in rice cultivation. In this study, the health belief model was used to identify the factors. The results showed that this theory is very efficient in this field because it was able to explain 67% of the variance in farmers' behaviour in this field. In general, the results of this study can provide new insights for policymakers in this field in order to produce healthy products.

Keywords: Environmental protection, food safety, structural equation modelling, sustainable agriculture

نشریه بوم شناسی کشاورزی

Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ۷۲۸-۷۱۳

مدل ساختاری عوامل مؤثر روی به‌کارگیری شالی‌کاران از کودهای آلی به هنگام کشت برنج (*Oryza sativa*) در شهرستان دزفول

زهرا اسکندری[1]، مسلم سواری[2]* و مسعود یزدان پناه[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

چکیده

برنج یکی از اصلی‌ترین غذاهای ایرانی است، امّا استفاده بی‌رویه از نهاده‌های شیمیایی در تولید این محصول از کیفیت و خواص آن کاسته است، تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که استفاده از کودهای آلی در کشت برنج می‌تواند مواد مغذی مورد نیاز خاک برای تولید این محصول را فراهم کند، امّا شالی‌کاران تمایل چندانی به استفاده آن در کشت برنج ندارند. در راستای این مهم، پژوهش حاضر با هدف کلی بررسی عوامل مؤثر بر استفاده شالی‌کاران از کودهای آلی به هنگام کشت برنج در شهرستان دزفول انجام شد. جامعه آماری این پژوهش در سال ۱۴۰۱ را ۴۷۰۰ برنج‌کار شهرستان دزفول تشکیل می‌دهند که حجم نمونه برمبنای جدول کرجسی و مورگان، به‌روش نمونه‌گیری خوشه‌ای ۳۶۰ نمونه برآورد شد. گردآوری داده‌ها به صورت پرسش‌نامه برمبنای مقیاس طیف لیکرت طراحی شد. روایی شکلی و محتوایی پرسش‌نامه با نظر متخصصان و پایایی آن از طریق آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی تأیید شد. نتایج پژوهش مدل‌سازی معادله‌های ساختاری نشان داد که متغیرهای خودکارآمدی (λ= 0.257, P= 0.000)، راهنمای عمل (λ= 0.222, P= 0.000)، شدت درک شده (λ= 0.121, P= 0.035) و حساسیت درک شده (λ= 0.100; P= 0.046) و منافع درک شده (λ= 0.319, P= 0.000) اثر مثبت و معنی‌داری در به‌کارگیری کودهای آلی در میان شالی‌کاران شهرستان دزفول دارد، این در حالی است که متغیر موانع درک شده دارای اثر معنی‌داری در این بخش نبود. علاوه‌براین، می‌توان گفت که متغیرهای چارچوب اعتقاد سلامت توانست ۶۷ درصد از واریانس متغیر وابسته تحقیق (استفاده از کودهای آلی در کشت برنج) را تبیین نمایند.

واژه‌های کلیدی: حفظ محیط زیست، کشاورزی پایدار، سلامت غذایی، مدل‌سازی معادله ساختاری

مقدمه

افزایش رشد سریع جمعیت و فعالیت‌های انسانی، دو عامل اصلی آلودگی محیط‌زیست هستند (Adhikari et al., 2024). یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی، استفاده از کودهای مصنوعی در تولید محصولات زراعی جهت تکمیل عناصر غذایی خاک است (Savari & Gharechaee, 2020). تأثیر کودهای شیمیایی بر افزایش بهره‌وری محصول و تضمین مازاد مواد غذایی در گذشته به‌طور گسترده ثبت شده است (McArthur & McCord, 2017) بااین‌حال، کاربرد بیش از حد در مناطق خاصی در سراسر جهان به یک نگرانی برای پایداری محیط زیست تبدیل شده است (Ren et al., Cheng et al., 2019 ; 2021). بنابراین، استفاده نامتعادل از کود شیمیایی، پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های کشاورزی را تهدید می‌کند (Bora et al., 2022). استفاده بیش از حد و مداوم از کودهای شیمیایی بر محیط

۱-۲و۳-به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استاد گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران.

(*- نویسنده مسئول: Email: Savari@asnrukh.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/agry.2024.88035.1196

زیست و سلامت انسان تـأثیر منفـی مـی‌گـذارد (Wang & Zhao, 2019).

فلزات سنگین و کودهای شیمیایی مصنوعی به‌طور قابل تـوجهی منجر به خطر افتادن زمین‌های کشاورزی و تشدید خطرات زیاد بـرای توسعه کشاورزی پایدار می‌شود (Savari et al., 2013). قرار گـرفتن در معرض فلزات سـنگین ماننـد کـروم، کـادمیوم و نیکـل در محـیط می‌تواند منجر به بزرگ‌نمایی زیستی، ماندگاری و سـمیت در زنجیـره غذایی شود (Jalali & Karimi Mojahed, 2020). بنابراین، جهـان با فشار زیادی برای کاهش مصرف کـود در کشـاورزی مواجـه اسـت (Smith et al., 2016) شدت وابستگی به کـود بـه‌گونـه‌ای افـزایش یافته است که ممکن است آینده را از تولید غذای سـالم محـروم کنـد (Adhikari et al., 2024).

برنج در رژیم غذایی مردم ایران نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. بـا رشـد جمعیت و تغییر ذائقه مردم در گـرایش بـه بـرنج، میـزان مصـرف آن همچنان در حال فزونی می‌باشد و با این روند احتمال دارد که در سال-های آینده به‌عنوان منبع اصلی تأمین کالری مردم ایران مـورد توجـه قرار گیرد (Abbasian & Aminpanah, 2018). ازآن‌جا کـه کشـت برنج در ایران بیشتر به‌صورت سنتی است، به‌علت عدم درک صحیح از نیازمندی‌های آن، این روش کشت همـواره بـا چـالش‌هـای فراوانـی روبه‌رو است (Erfani et al., 2019). یکی از اسـتراتژی‌های کـاهش مصرف کود بدون به خطر انداختن تغذیه گیاه، استفاده از محرک‌هـای زیستی برای بهبـود جـذب عناصـر غـذایی اسـت (Halpern et al., 2015). کودهای بیولوژیکی آلی ماننـد کودهـای آلـی و ریزجانـداران به‌دلیل توانایی آن‌ها در کـاهش سـمیت گیـاهی و تحمـل تـنش بـه محصولات کمک می‌کند (Sible et al., 2021). کودهای آلی نسبت بـه کودهـای شـیمیایی در تنظـیم کیفیـت خـاک برتـری دارنـد و در سال‌های اخیر استفاده از کود آلی در تولید محصـولات زراعـی بیشـتر مورد توجه قـرار گرفتـه اسـت (Ren et al., 2021). بااین‌حـال، اگـر کودهای آلی به‌تنهایی استفاده شود، ممکن است نتواند نیازهای غذایی گیاهان زراعی را به‌دلیل آزاد شدن آهسته عناصر غذایی بـرآورد کنـد، در نهایت ممکن است بر عملکـرد محصـول اثرگـذار باشـد، بنـابراین کاربرد ترکیبی کودهای آلی و شیمیایی بـرای تولیـد پایـدار محصـول برنج ضروری اسـت (Zhai et al., 2024). مطالعـات متعـدد اسـتفاده همزمان از کودهای آلی و شـیمیایی بـر بهبـود عملکـرد محصـول را ضروری می‌دانند (Zhai et al., 2022;Liu et al., 2022;). اهمیـت استفاده از کودهای آلی برای کشاورزی از سال ۱۹۶۰ مورد توجه قـرار گرفته است (Adnan et al., 2020). این در حالی اسـت کـه بخـش شالی‌کاری در مقایسه با سـایر بخـش‌هـای کشـاورزی، در اسـتفاده از نوآوری‌های جدید و پایدارتر مانند کودهای آلی و سبز عقب مانـده‌تـر است (Adnan et al., 2020). تولید محصول برنج همواره به سه کود اساسی یعنی نیتروژن، فسفر و پتاس نیاز بیشتری دارد که این منابع در کودهای آلی به‌طور قابل توجهی یافـت می‌شـود (Othman, 2012)، امّا مطالعات نشان می‌دهد که در کشـورهای در حـال توسـعه بـه‌دلیل زودبـازده بـودن کودهـای شـیمیایی، همـواره تمایـل مسـاعدی در به‌کارگیری کودهای آلی ندارند (Adnan et al., 2020)، زیرا در ایـن کشورها همواره انگیزه اقتصادی بر سایر ملاحظات غلبه دارد (Wang et al., 2023).

یکی از راه‌های بررسی و مطالعه رفتار حفاظتی انسـان در ارتبـاط با محیط‌زیست و عوامل پیش‌بینی کننـده آن، کـاربرد روان‌شناسـی و مدل‌های اجتماعی- روان‌شناختی است (Savari et al., 2023). یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعه رفتارهای حفاظتی و عوامل پـیش‌بینـی کننده آن، استفاده از مدل‌ها و تئوری‌های اجتماعی- روانشناختی است (Savari et al., 2024). در سال‌های اخیر، الگوها و مدل‌های رفتاری گوناگونی به‌منظور بررسی فرآیند شکل‌گیری رفتار و عوامل تأثیرگـذار بر آن در حوزه‌های مختلف از جمله رفتارهای حفاظت از محیط‌زیست ارائـه شـده اسـت (Savari & Khaleghi, 2023). دهـه‌هاسـت کـه محققان در جستجو و شناسایی متغیرهایی هستند که بـر رفتـار تـأثیر مـی‌گذارنـد (Strydom, 2018). در ایـن زمینـه یکـی از مهم‌تـرین مدل‌ها، مدل اعتقاد بهداشتی است که توسط روان‌شناسـان آمریکـایی در دهه ۱۹۵۰ برای افزایش پذیرش روش‌های پیشـگیرانه ارائـه شـد (Mazengia et al., 2024).

مدل اعتقاد بهداشتی یک نظریه شـناخت اجتمـاعی در چـارچوب انتظار– ارزش است که به دنبال توضیح تصمیم‌گیری سـلامت اسـت (Taflinger & Sattler, 2024) این نظریه بـر ایـن موضـوع تمرکـز دارد که چگونه باورهای یک فرد رفتار وی را شکل می‌دهد، بنـابراین، ازآن‌جاکه باورها قابل انعطاف هسـتند، مـدل اعتقـاد بهداشـتی بـرای مداخله‌های مناسب در زمینه افزایش یا کاهش به‌کارگیری یک رفتـار سـلامت خـاص مناسـب اسـت (Champion & Skinner, 2008). ظرفیت پیش‌بینی سازه‌های این مدل بـه‌خوبی در مطالعـات قبلـی بـه اثبات رسیده است و در مطالعات بررسی رفتارهـای انسـانی در بخـش

کشاورزی بسیار موفق بوده است، به‌عنوان مثال می‌توان به رفتار حفاظت از آب کشاورزی (Nasiri et al., 2024)، سازگاری با خشکسالی (Savari et al., 2024)، استفاده از آفت‌کش‌ها (Khan, 2010) و کشت ارگانیک (Yazdanpanah et al., 2022) اشاره کرد.

مدل اعتقاد سلامت بر دو جنبه رفتار سلامت یعنی تهدید درک شده (درک مسئله توسط شخص) و ارزیابی رفتار (تعادل بین منافع و موانع) تمرکز دارد (Vassallo et al., 2009). مدل رفتارهای بهداشتی دارای شش سازه مانند حساسیت درک شده، شدت درک شده، فایده درک شده، موانع درک شده، انگیزه شخصی (خودکارآمدی) و راهنمایی برای عمل بود (Abraham, 2015). این مدل فرض می‌کند که احتمال انجام یک اقدام پیشگیرانه توسط یک فرد بستگی به ادراک فرد از قرار گرفتن در معرض خطر برای یک پیامد منفی معین (حساسیت درک شده) و باور او در مورد جدی بودن آن پیامد (شدت درک شده) دارد (Abraham, 2015; Carpenter, 2010). منافع درک شده بیانگر اعتقاد و درک افراد درباره مفید بودن اقدام جهت کاهش خطر و یا فواید حاصل از اقدام بهداشتی (به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج) است (Boazar et al., 2020; Ejeta et al., 2016; Vassallo et al., 2009). موانع درک شده، اشاره به باورهای مربوط به هزینه‌های روانی و ملموس یک اقدام بهداشتی توصیه شده (مانند استفاده از کودآلی در کشت برنج) است (Shahangian et al., 2022) که می‌تواند شامل ناتوانی یا محدودیت‌های فیزیکی، شناختی یا مالی در دسترسی به منابع کافی برای انجام برخی موارد خاص باشد (Yazdanpanah et al., 2022). بنابراین، حساسیت و منافع درک شده می‌توانند نیرویی را در جهت بروز رفتار ایجاد کنند، ولی نمی‌توانند اقدام مشخص را پیش‌بینی کنند مگر اینکه عملی بودن و مفید بودن آن درک شود (Ejeta et al., 2016). خودکارآمدی در سال به‌وسیله بندورا (۱۹۸۸) مطرح شد و به پیشنهاد روزنستاک و همکاران به مدل اعتقاد سلامت اضافه شد. بندورا خودکارآمدی را قضاوت فرد در مورد توانایی‌هایش در مورد انجام یک عمل مشخص می‌داند (Savari et al., 2025). براساس این تعریف، افرادی که دارای درجه بالاتر از خودکارآمدی هستند، احتمال قوی‌تری برای انجام رفتار دوستدارانه در محیط‌زیست را خواهند داشت (Keesstra et al., 2018). در نهایت، راهنمای عمل به‌عنوان مجموعه‌ای از محرک‌ها و تأثیرات اجتماعی تعریف می‌شود که با آگاه کردن او از پیامدهای منفی یک رفتار (مانند استفاده زیاد از کودهای شیمیایی)، میل فرد برای انجام اقداماتی برای بهبود سلامت خود را فعال می‌کند (Jeong et al., 2018) که نشانه‌های عمل منعکس‌کننده نشانه‌های داخلی و خارجی است (Orji et al., 2012) که آمادگی افراد برای اقدام را بسیج می‌کند (Shahangian et al., 2022). در این راستا، در این پژوهش مدل اعتقاد سلامت برای بررسی عوامل مؤثر روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج در میان شالی‌کاران شهرستان دزفول انجام شد. در نهایت، براساس مدل ارائه شده فرضیه‌های زیر ارائه می‌شود.

فرضیه (۱): شدت درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد.

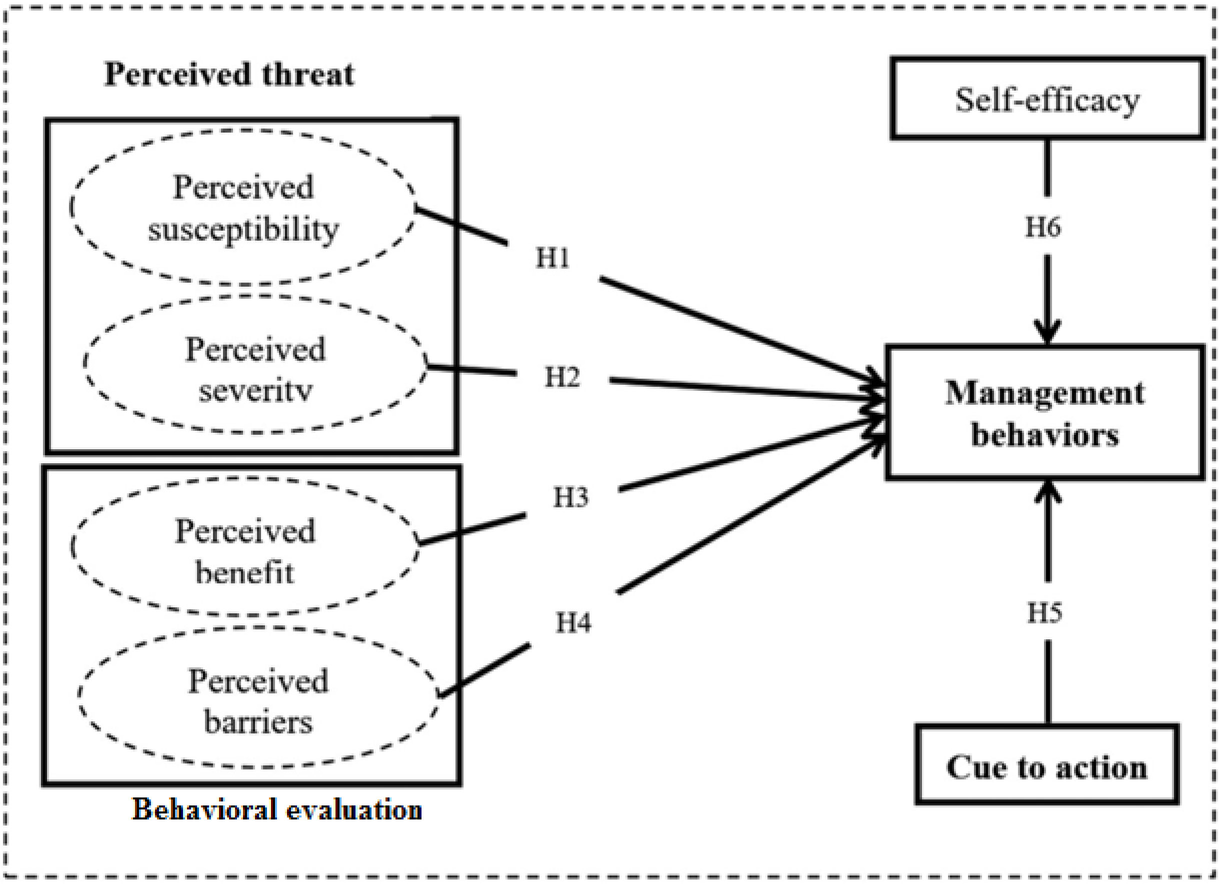
فرضیه (۲): حساسیت درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد.

فرضیه (۳): منافع درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد.

فرضیه (۴): موانع درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد.

فرضیه (۵): خودکارآمدی شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد.

فرضیه (۶): راهنمای عمل شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد.



شکل ۱- چارچوب مفهومی پژوهش (Rosenstock, 2005)

Fig. 1- The conceptual framework of the research (Rosenstock, 2005)

مواد و روش‌ها

جامعه آماری مورد استفاده در این پژوهش در سال ۱۴۰۱ را ۴۷۰۰ برنج‌کار شهرستان دزفول بودند که حجم نمونه براساس جدول کرجسی و مورگان، به‌روش نمونه‌گیری خوشه‌ای ۳۶۰ نمونه برآورد شد. جامعه مورد مطالعه به چهار بخش، شهیون، سردشت، مرکزی و چغامیش تقسیم شده است. بخش سردشت و شهیون به‌دلیل کوهستانی بودن و نبود شالی‌کار از جامعه مورد مطالعه حذف گردید و تعداد نمونه در دو بخش مرکزی و چغامیش با انتساب متناسب برای مطالعه انتخاب شدند. شهرستان دزفول یکی از شهرهای استان خوزستان است. این شهر که در ساحل رودخانه دز واقع شده است، از لحاظ وسعت و جمعیت، دومین شهر بزرگ استان و بزرگ‌ترین شهر در شمال خوزستان محسوب می‌شود. دزفول یکی از قطب‌های مهم کشاورزی ایران است. خاک حاصلخیز و آب کافی، شرایط مناسبی را برای کشت مرکبات، صیفی‌جات و گل و گیاه فراهم کرده است. کشاورزی در دزفول سابقه‌ای تاریخی دارد. بخش غیرکوهستانی دزفول پرآب‌ترین منطقه کشاورزی استان خوزستان محسوب می‌شود. این امر موجب رونق کشاورزی در این شهرستان شده و دزفول را به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی استان مطرح نموده است. شهرستان دزفول از خاک بسیار مرغوب، هوای مناسب و آب فراوان با شبکه‌های مدرن آبیاری، وجود مرکز تحقیقات کشاورزی صفی‌آباد با سابقه ۵۲ ساله و نیز دو شرکت بزرگ کشت و صنعت شهید بهشتی و شهید رجایی برخوردار است.

جامعه آماری تحقیق در این مرحله به دو دسته باسواد و کم‌سواد طبقه‌بندی شدند. افرادی که قادر به خواندن آیتم‌های پرسش‌نامه بودند، اقدام به پاسخ می‌نمودند، امّا افرادی که توان خواندن و یا درک سؤالات پرسش‌نامه را نداشتند برای این دسته از شالی‌کاران محقق آگاه به منطقه و فرهنگ آنان انتخاب شد تا بتواند آیتم‌های پرسش‌نامه را برای آنان بخواند و براساس پاسخ آنان گزینه مناسب را

انتخاب کند. ابزار اصلی تحقیق، پرسش‌نامه‌ای محقق‌ساخته و از پیش آزمون شده بود. طیف پرسش‌نامه به‌صورت لیکرت (۱- خیلی کم تا ۵- خیلی زیاد) بود. پرسش‌نامه مذکور شامل دو بخش بود، بخش اول، گویه مربوط به ویژگی‌های فردی، اجتماعی و اقتصادی، قسمت دوم آن شامل متغیرهایی برای سنجش تئوری اعتقاد به سلامت بود که برای سنجش این بخش خودکارآمدی هفت گویه (Keesstra et al., 2018)، شدت درک شده شش گویه (Shahangian et al., 2022)، حساسیت درک شده پنج گویه (Ejeta et al., 2016)، راهنمای عمل پنج گویه (Orji et al., 2012)، منافع درک شده سه گویه (Yazdanpanah et al., 2022; Ejeta et al., 2016)، موانع درک شده پنج گویه (Boazar et al., 2020; Vassallo et al., 2009) و رفتار چهار گویه (محقق‌ساخت) بود.

جهت تعیین روایی پرسش‌نامه از پانل متخصصان که شامل متخصصان رشته‌های ترویج و آموزش کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان و جهاد کشاورزی شهرستان دزفول بودند، استفاده شد و براساس نظرها و پیشنهادهای آنان اصلاحات لازم در پرسش‌نامه به عمل آمد. به‌منظور برآورد پایایی پرسش‌نامه از آزمون ضریب آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی استفاده گردید که مقدار آلفا برای تمامی بخش‌ها بیشتر از ۰/۷ و پایایی ترکیبی بیشتر از ۰/۶ بود. بنابراین، پرسش‌نامه از پایایی خوبی برای انجام تحقیق برخوردار بود. به‌منظور تحلیل داده‌ها در دو بخش توصیفی و استنباطی از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و Smart Pls استفاده شد. بدین منظور، در بخش آمار توصیفی از فراوانی، درصد، میانگین و انحراف معیار در بخش آمار استنباطی از مدل‌سازی معادله‌های ساختاری استفاده شد. مدل معادله‌های ساختاری (SEM) تحلیلی بر پایه چند متغیر از خانواده رگرسیون چند متغیری است. این تکنیک، این امکان را فراهم می کند که مجموعه‌ای از معادله‌های رگرسیون رابه‌طور همزمان مورد آزمون قرار داد (Hair et al., 2017). مدل‌سازی معادله ساختاری دیدگاهی است که در آن الگوهای فرضی از ارتباطات مستقیم و غیرمستقیم در میان یک مجموعه از متغیرهای مشاهده شده و پنهان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع، مدل معادله‌های ساختاری یک ساختار علی ویژه بین مجموعه‌ای از متغیرهای پنهان و متغیرهای مشاهده‌پذیر است. مدل‌سازی معادله‌های ساختاری شامل دو بخش اندازه‌گیری و ساختاری می‌باشد. در بخش مدل اندازه‌گیری سه مرحله (۱) تک بعدی بودن نشانگرها: براساس نتایج بارعاملی و مقادیر t مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، درصورتی‌که مقادیر بارعاملی ارائه شده برای نشانگرهای انتخابی (بالاتر از ۰/۵) و از لحاظ آماری در سطح خطای یک درصد ($P<0.01$) معنادار باشد، از نظر تک بعدی بودن مورد تأیید قرار می‌گیرد. (۲). روایی و پایایی: درصورتی‌که پایایی ترکیبی (CR) در تمام سازه‌های موجود در مدل پیشنهادی پژوهش بیشتر از ۰/۶۰، ضریب آلفای کرونباخ بالاتر از ۰/۷۰ و میانگین واریانس استخراج شده (AVE) بیشتر از ۰/۵۰ باشد، روایی و پایایی آن‌ها مورد تأیید قرار می‌گیرد. (۳) اعتبار همگرای سازه‌ها: درصورتی‌که جذر میانگین واریانس استخراجی بیشتر از همبستگی بین عامل‌ها باشد، از نظر این عامل مورد تأیید قرار می‌گیرد (Hair et al., 2017). پس از تأیید برازش مدل ساختاری می‌توان به آزمون فرضیات تحقیق پرداخت.

نتایج و بحث

نتایج بررسی حاضر نشان داد که میانگین سن پاسخگویان ۴۵/۹۵ با انحراف معیار ۱۲/۶۲۱ سال بود. علاوه‌براین، نتایج نشان داد که اکثریت پاسخگویان مرد بودند و میانگین تجربه شالی‌کاری ۸/۲۳ با انحراف معیار ۴/۹۴ سال بود. وضعیت تحصیلات پاسخگویان نشان داد که ۳۰/۴ درصد ابتدایی، ۳۳/۳ درصد سیکل، ۲۸/۶ درصد دیپلم و ۷/۷ درصد لیسانس بودند. میانگین تعداد اعضای خانواده کشاورزان ۵/۲۹ نفر با انحراف معیار ۳/۱۴ بود. علاوه‌براین، نتایج بیانگر این بود که ۳۹/۹ درصد از شالی‌کاران در دوره‌های آموزشی ترویجی شرکت کرده بودند و ۳۲/۲ درصد نیز در دوره‌های استفاده از کودهای آلی در کشت برنج شرکت داشتند.

مدل اندازه‌گیری

در این مرحله، همان‌طور که قبلاً گفته شده تک بعدی بودن نشانگر، بحث روایی و پایایی و روایی تشخیصی بررسی می‌شود که در ادامه، نتایج این بخش ارائه می‌شود.

تک بعدی بودن نشانگرها: براساس نتایج بارعاملی و مقادیر t موردارزیابی ارائه شده (جدول ۱) می‌توان گفت که تک بعدی بودن نشانگرهای انتخابی مورد تأیید قرار می‌گیرد. بنابراین، می‌توان اظهار کردکه نشانگرهای انتخابی برای سنجش سازه‌های پژوهش به‌درستی انتخاب شده‌اند وبه‌طور دقیق همان مؤلفه را می‌سنجد.

جدول ۱- بررسی برازش مدل اندازه‌گیری پژوهش

Table 1- The results of the fit of the measurement models

مولفه‌ها Constructs	نماد متغیرها در مدل Measurement item	بارعاملی Factor load	t	روایی و پایایی Reliability and validity
خودکارآمدی Self-efficacy	SE1	0.727	23.153	AVE: 0.565 CR: 0.857 Alpha: 0.810
	SE2	0.711	27.171	
	SE3	0.662	21.575	
	SE4	0.760	37.983	
	SE5	0.512	10.822	
	SE6	0.620	16.652	
	SE7	0.749	35.153	
حساسیت درک شده Perceived susceptibility	PS1	0.752	25.146	AVE: 0.541 CR: 0.854 alpha: 0.786
	PS2	0.760	36.292	
	PS3	0.803	33.684	
	PS4	0.721	28.074	
	PS5	0.631	20.079	
شدت درک شده Perceived severity	PSV1	0.719	26.772	AVE: 0.511 CR: 0.852 alpha: 0.793
	PSV2	0.729	35.097	
	PSV3	0.736	25.480	
	PSV4	0.629	17.006	
	PSV5	0.767	32.081	
	PSV6	0.608	18.984	
منافع درک شده Perceived benefits	PB1	0.669	17.542	AVE: 0.537 CR: 0.817 alpha: 0.766
	PB2	0.769	32.098	
	PB3	0.735	28.693	
موانع درک شده Perceived barriers	PBR1	0.759	21.132	AVE: 0.519 CR: 0.812 alpha: 0.756
	PBR2	0.598	11.337	
	PBR3	0.695	13.814	
	PBR4	0.685	13.046	
راهنمای عمل Caes to action	CA1	0.776	35.131	AVE: 0.620 CR: 0.853 alpha: 0.846
	CA2	0.842	59.522	
	CA3	0.815	49.020	
	CA4	0.705	26.658	
	CA5	0.719	39.452	
رفتار Behavior	Beh1	0.831	57.153	AVE: 0.619 CR: 0.865 alpha: 0.792
	Beh2	0.849	74.296	
	Beh3	0.617	17.621	
	Beh4	0.827	50.270	

روایی و پایایی: با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، می‌توان گفت که پایایی ترکیبی (CR[1]) در تمام سازه‌های موجود در مدل پیشنهادی پژوهش بیشتر از ۰/۶۰، ضریب آلفای کرونباخ بالاتر از ۰/۷۰ و میانگین واریانس استخراج شده (AVE[2]) بیشتر از ۰/۵۰ بود، بنابراین تمام متغیرهای نهفته مدل پیشنهادی پژوهش از پایایی و روایی مناسبی برخوردار بودند. این نتیجه به‌معنی این است که آیتم‌های انتخاب شده برای اندازه‌گیری سازه‌های پژوهش با دقت انتخاب شده و امکان تکرار آزمایش را فراهم می‌کند.

اعتبار همگرای سازه‌ها: براساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، مشاهده شد که به‌طور کلی، جذر AVE برای سازه‌های پژوهش (0.714<AVE<0.809) بزرگ‌تر از همبستگی بین آن‌ها (0.423<r<0.661) بود. این نتیجه نشان داد که روایی تشخیصی سازه‌های موجود در مدل پیشنهادی پژوهش تأیید شدند.

ارزیابی مدل ساختاری پژوهش: در بررسی برازش مدل ساختاری پژوهش از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود (جدول ۳). براساس مقادیر پیشنهادی شاخص‌های ارائه شده و میزان مقادیر

1- Combined reliability
2- Average variance extracted

گزارش شده می‌توان گفت که مدل از برازش مناسبی برخوردار است و می‌توان براساس آن، فرضیات تحقیق را آزمایش نمود.

به‌منظور آزمون فرضیه‌ها در قالب مدل مفهومی پیشنهادی پژوهش از روش تحلیل مسیر (ارزیابی مدل‌ساختاری) استفاده شد. مدل مسیر پژوهش با نمایش بارهای عاملی استاندارد شده و معنی‌داری در (شکل ۲ و شکل ۳) ادامه ارائه شده است.

آزمون فرضیات تحقیق: در این مرحله، نتایج تأثیر نهایی متغیرها روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج ارائه شده است. به‌منظور بررسی معنی‌داری ضریب مسیر یا همان بتا از روش سرگیری بوت استراپینگ استفاده شد که برای این منظور از سرگیری در دو حالت ۱۰۰ و ۳۰۰ نمونه استفاده شد. نتایج نشان داد که در دو حالت، تغییری در معنی‌دار بودن پارامترها ایجاد نشد و نتایج از اعتبار محکمی برخوردار بود، زیرا معنی‌دار بودن روابط بین متغیرها از حجم نمونه تأثیر نپذیرفت و تنها تغییری که ایجاد کرد، در مقدار آماره t بود، لذا می‌توان در قالب مدل رگرسیونی، فرضیات را آزمون کرد. همچنین نتایج نشان داد که متغیرهای تحقیق قادرند که ۶۷ درصد از واریانس به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج را در میان شالی‌کاران تبیین کنند (جدول ۴).

بحث

نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان داد که شدت درک شده اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد (تأیید فرضیه ۱). در تبیین این یافته می‌توان گفت که شدت درک شده بیان‌کننده این است که مشکل مورد نظر را به‌عنوان یک مشکل جدی در سلامت خود مورد توجه قرار دهند و پیامد آن را در ابعاد مختلف سلامت جسمی، اجتماعی، روانی و اقتصادی خود درک کنند (Boazar et al., 2020) که مطالعات بوعذار و همکاران (Boazar et al., 2020) و هوانگ و همکاران (Huang et al., 2020) از این یافته حمایت می‌کنند.

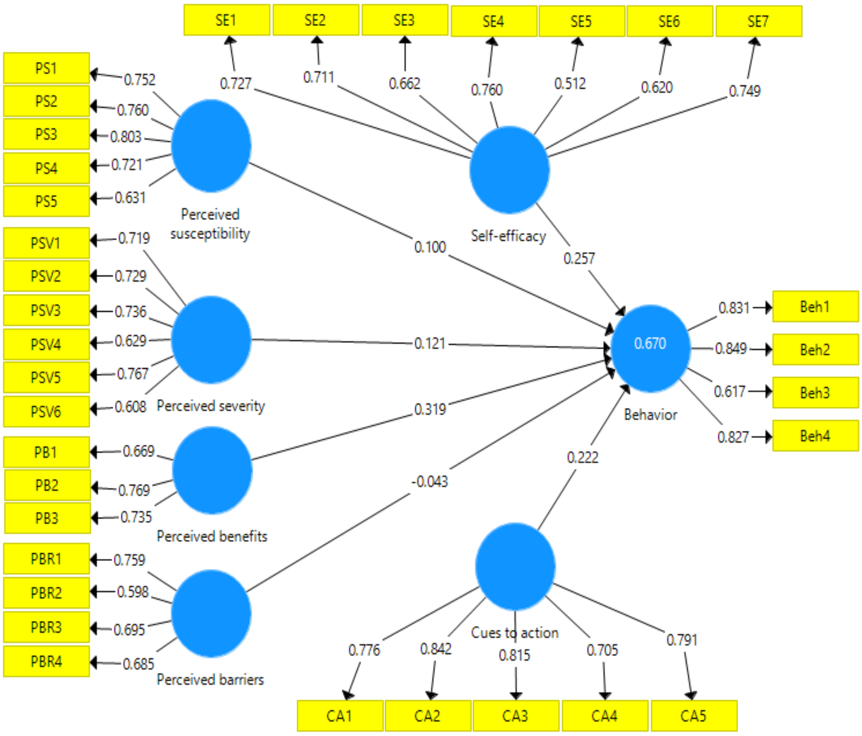
جدول ۲- بررسی اعتبار تشخیصی سازه‌های پژوهش
Table 2- Correlations with square roots of AVE

	1	2	3	4	5	6	7
خودکارآمدی Self-efficacy	0.809						
حساسیت درک شده Perceived susceptibility	0.648	0.735					
شدت درک شده Perceived severity	0.624	0.423	0.714				
منافع درک شده Perceived benefits	0.599	0.522	0.584	0.732			
موانع درک شده Perceived barriers	0.578	0.472	0.556	0.618	0.720		
راهنمای عمل Case to action	0.493	0.459	0.539	0.661	0.488	0.787	
رفتار Behavior	0.625	0.581	0.484	0.672	0.588	0.520	0.786

جدول ۳- ارزیابی شاخص‌های مدل ساختاری پژوهش
Table 3- The summary of goodness-of-fit indices for the measurement model

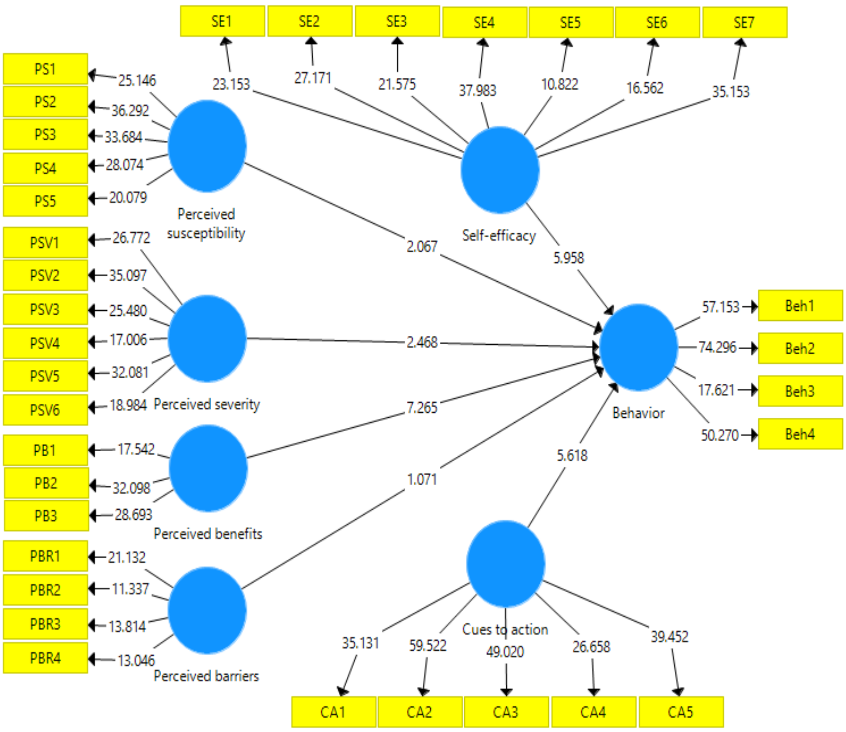
شاخص‌های برازش Fit index	SRMR	d_ULS	d_G	NFI	RMS-Theta
مقدار پیشنهادی Suggested value	<0.1	>0.05	>0.05	>0.90	**0.12**
مقدار تخمین Estimated value	0.09	0.638	0.529	0.99	0.08

RMS-Theta: Root mean square theta index, NFI: Normed Fit Index, d_G: Geodesic distance, d_ULS: Euclidean distance, SRMR: Root Mean Square Residual



شکل ۲- مدل در حالت استاندارد

Fig. 2- Model in standard mode



شکل ۳- مدل در حالت معنی‌داری

Fig. 3- Model in t-value

جدول ٤- نتایج بررسی فرضیات تحقیق
Table 4- The results of research structural models

فرضیات Hypothesis	بار عاملی Factors load	t	نتیجه فرضیه Result	R^2
شدت درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد. The perceived severity of rice farmers has a significant effect on the use of organic fertilizers in rice cultivation.	0.121	2.468	Confirm	0.67
حساسیت درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد. The perceived susceptibility of rice farmers has a significant effect on the use of organic fertilizers in rice cultivation	0.100	2.067	Confirm	
منافع درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد. The perceived benefits of rice farmers has a significant effect on the use of organic fertilizers in rice cultivation	0.319	7.265	Confirm	
موانع درک شده شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد. The perceived barriers of rice farmers has a significant effect on the use of organic fertilizers in rice cultivation	-0.043	1.071	Reject	
خودکارآمدی شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد. The self-efficacy of rice farmers has a significant effect on the use of organic fertilizers in rice cultivation	0.257	5.958	Confirm	
راهنمای عمل شالی‌کاران اثر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد. The cue to action of rice farmers has a significant effect on the use of organic fertilizers in rice cultivation	0.222	5.618	Confirm	

این یافته بیانگر این است که اگر شالی‌کاران به این اعتقاد داشته باشند و باور خود را در این راستا تغییر دهند که رفتارهای غیربهداشتی آنان در محیط کشاورزی (به‌طور مثال، استفاده از کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی) ممکن است در آینده برای اعضای خانواده خود مشکل‌آفرین باشد، احتمال به‌کارگیری رفتار سالم و حفاظتی در محیط افزایش پیدا می‌کند، زیرا استفاده از کودهای شیمیایی در بخش کشاورزی منجر به تولید فلزات سنگین خاک می‌شود و این فلزات وارد زنجیره غذایی انسان می‌شود (Habib et al., 2023). وجود فلزات سنگین در محیط زیست، خطرات بالقوه‌ای برای سلامتی انسان به همراه دارد، زیرا این فلزات جهش‌زا، سرطان‌زا و سمی هستند، به همین دلیل فلزات سنگین در محیطهای آبی و تجمع آن‌ها در آبزیان به‌طور بالقوه برای سلامتی انسان مضر هستند (Abdulla et al., 2020). بنابراین، درصورتی‌که شالی‌کاران به پیامدهای منفی رفتار خود یعنی استفاده زیاد از کودهای آلی در کشت برنج آگاه باشند، احتمالاً تمایل بیشتری به استفاده از کودهای آلی در کشت برنج دارند، زیرا باور خواهند داشت که استفاده از کودهای شیمیایی بر خود، خانواده و جامعه اثرات منفی در پی خواهد داشت.

نتیجه فرضیه ۲ تحقیق بیانگر اثر معنی‌دار حساسیت درک شده روی به‌کارگیری کودهای آلی بود. در تحلیل این یافته می‌توان گفت که حساسیت درک شده بیانگر این است که افراد مشکل را باور کنند (مانند تخریب محیطزیست)، واقعیت آن را بپذیرند و نسبت به تأثیر آن بر سلامت خود احساس خطر نمایند (Huang et al., 2020). علاوه‌براین، می‌توان گفت که در دهه‌های اخیر، تقاضای فزاینده‌ای برای توسعه پایدار کشاورزی در پاسخ به رفتارهای نامتعارف کشاورزی مشاهده می‌شود (Liu et al., 2021). با توجه به شرایط زیست‌محیطی، به‌کارگیری عملیات کشاورزی پایدار باعث حفظ محصول، تولید محصول سالم، توانمندسازی کشاورزان و کاهش هزینه تولید می‌شود (Duan et al., 2021). از سویی، تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات ایمن و باکیفیت، باعث به‌کارگیری عملیات مناسب کشاورزی، بیش از گذشته شده است (Mankeb et al., 2014). استفاده نکردن از کودهای آلی افزون بر مسئله‌های اقتصادی، آسیب و زیان‌های جبران‌ناپذیری را به محیطزیست و بوم‌سامانه‌ها وارد کرده و باعث به هم خوردن تعادل بوم‌شناختی در منابع مختلف مانند آب و خاک می‌شود (Savari & Gharechaee, 2020). کشاورزان و تولیدکنندگان زراعی به‌منظور تقویت زمین‌های کشاورزی، بهبود حاصلخیزی خاک و در پی آن، افزایش تولیدها از کودهای آلی استفاده می‌کنند (Adnan et al., 2020). امروزه حذف یا کم کردن مصرف کودهای شیمیایی مانند فسفات و نیترات و

جایگزینی آن‌ها توسط کودهای آلی و زیستی از اهمیت بالایی برخوردار است (Kabiri et al., 2017). بنابراین، افزایش این حساسیت‌ها کمک خواهد کرد که شالی‌کاران به‌سوی تولید محصولات سالم و عاری از کودهای شیمیایی نمایند.

منافع درک شده، متغیر بعدی اثرگذار روی به‌کارگیری کودهای آلی در میان شالی‌کاران بود (تأیید فرضیه ۳). اهمیت این متغیر بر رفتارهای حفاظتی و ایمن در تحقیقات انجام شده دیگر (Hamid et al., 2021) نیز ارائه شده است. این یافته بیانگر این است که هنگامی که شالی‌کاران فکر کنند که استفاده از کودهای آلی دارای فواید زیاد و هزینه‌های کمتری است، به احتمال بیشتری از کودهای آلی استفاده می‌کند و برعکس؛ همچنین هنگامی که شالی‌کار بپذیرد که استفاده از کودهای آلی تأثیر مثبتی بر عملکرد او و محیط زیست دارد و استفاده از کودهای آلی یک رفتار حفاظتی و ایمن در محیط زیست است، به یقین از کودهای آلی بیشتر استفاده خواهد کرد. محققان در این زمینه عنوان کردند که هنگامی که فرد از ضرورت نیاز کمک به دیگران آگاهی یابد، به احتمال بیشتری رفتار حفاظتی را به‌کار خواهد بست (Savari et al., 2024).

نتایج فرضیه ۴ تحقیق نشان داد که موانع درک شده اثر معنی‌داری بر روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج ندارد (رد فرضیه ۴). این نتیجه با تحقیقات به‌دست آمده از مطالعات نظری تحقیق هم‌خوانی ندارد. در تحلیل این یافته می‌توان گفت که ممکن است این نتیجه به‌دلیل جامعه آماری متفاوت به‌دست آمده باشد و یا بالا (پایین) بودن درک مسائل افراد از مسائل محیط زیستی همیشه بر نتایج تحقیق اثرگذار است (Maleksaeidi & Keshavarz, 2019). از طرف دیگر، می‌توان گفت که ممکن است از دیدگاه شالی‌کاران، استفاده از کودهای آلی در کشت برنج نیازمند آگاهی و تلاش زیادی نباشد و بر این باور باشند که آنان به‌راحتی بتوانند از آن استفاده کنند.

آخرین فرضیه (فرضیه ۵) پژوهش، اثر خودکارآمدی روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج بود. در تحلیل این یافته می‌توان گفت که خودکارآمدی به‌عنوان باور فرد به توانایی خود برای تکمیل یک کار خاص تعریف شده است. خودکارآمدی نقش مهمی در خودانگیختگی ایفا می‌کند، زیرا می‌تواند بر تصمیم‌گیری در مورد آنچه به انجام رفتار و میزان تلاش و پشتکار به نمایش گذاشته، در تلاش این رفتارها تأثیر بگذارد. اطلاعات و آگاهی، نقش مهمی در فعالیت‌های روزمره افراد جامعه دارد. این آگاهی‌ها، مسیر توسعه جامع را هموار می‌کنند و از مشکلات و نارسایی‌های محیطی به‌وجود آمده می‌کاهند (Kumar, 2013). در واقع، آگاهی‌ها و اطلاعات مستقیماً بر تمایلات افراد تأثیرگذار می‌گذارند. یکی از وظایف اساسی و ضروری جوامع برای دستیابی به حفاظت از رفتارهای زیست‌محیطی مناسب مثل استفاده از کودهای آلی در کشت برنج، بالا بردن سطح آگاهی و مورد توجه قرار دادن ارزش‌ها در میان افراد است (Güler, 2010). با توجه به اهمیت خودکارآمدی ادراک شده بر استفاده از کودهای آلی در کشت برنج، می‌توان کتابچه‌های راهنمای استفاده از کودهای آلی را به شالی‌کاران ارائه داد و سخنرانی‌ها و برنامه‌های آموزشی مناسب را نیز به‌کار گرفت (Savari et al., 2024). این اقدامات می‌تواند مهارت و دانش شالی‌کاران را در استفاده از کودهای آلی در کشت برنج تحت تأثیر قرار دهد.

نتایج بررسی فرضیه ۶ نشان داد که راهنمای عمل تأثیر معنی‌داری روی به‌کارگیری کودهای آلی در کشت برنج دارد. در تحلیل این یافته می‌توان گفت که راهنمای عمل به محرک‌هایی داخلی یا خارجی اشاره دارد که فرد را برای انجام یک عمل ترغیب می‌کند. محرک داخلی مانند گرایش‌ها و نیازها از درون بر فرد اثر می‌گذارد و محرک‌های خارجی مانند وسایل ارتباط جمعی و ارتباط بین فردی که بر فرد اثرگذار است (Boazar et al., 2020). بنابراین، فرد با راهنمایی که از محیط می‌گیرد، تشخیص می‌دهد که رفتاری که انجام می‌دهد، برای او چقدر مزایا دارد (Straub & Leahy, 2014). بنابراین، درصورتی‌که شالی‌کاران به این نتیجه برسند که استفاده از کودهای آلی در کشت برنج می‌تواند مزایای زیادی برجای بگذارد، قطعاً شالی‌کاران در این زمینه ترغیب خواهند شد که با کاهش استفاده از کودهای شیمیایی بتوانند از کودهای آلی بهره ببرند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف کلی عوامل مؤثر بر تمایل شالی‌کاران به استفاده از کودهای آلی در کشت برنج انجام شد. در این پژوهش از مدل اعتقاد سلامت برای شناسایی فاکتورها استفاده شد. نتایج نشان داد که این تئوری در این زمینه بسیار کارآمد است، زیرا توانست ۶۷ درصد از واریانس رفتار کشاورزان را در این زمینه تبیین نماید. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش می‌تواند بینش‌های جدیدی را برای سیاست‌گذاران این حوزه در راستای تولید محصولات سالم فراهم کند.

Reference

1. Abbasian, A., & Aminpanah, H. (2018). Effects of previous crop and rate of phosphorous fertilizer application on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Shiroudi. *Journal of Crop Ecophysiology*, *11*(44(4)), 889-904. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.303674.668635
2. Abdulla, S.M., Jamil, D.M., & Aziz, K.H.H. (2020). Investigation in heavy metal contents of drinking water and fish from Darbandikhan and Dokan Lakes in Sulaimaniyah province-Iraqi Kurdistan region. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *612*(1), 012023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/612/1/012023
3. Abraham, C., & Sheeran, P. (2015). The Health Belief Model. American Addiction Center. How long does alcohol stay in your system? 2021; available from: https://americanaddictioncenters.org/alcoholism-treatment/how-long-insystem.
4. Adhikari, A., Kwon, E.H., Khan, M.A., Shaffique, S., Kang, S.M., & Lee, I.J. (2024). Enhanced use of chemical fertilizers and mitigation of heavy metal toxicity using biochar and the soil fungus Bipolaris maydis AF7 in rice: Genomic and metabolomic perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *271*, 115938. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115938
5. Adnan, N., Nordin, S.M., & Anwar, A. (2020). Transition pathways for Malaysian paddy farmers to sustainable agricultural practices: An integrated exhibiting tactics to adopt Green fertilizer. *Land Use Policy*, *90*, 104255. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104255
6. Boazar, M., Abdeshahi, A., & Yazdanpanah, M. (2020). Changing rice cropping patterns among farmers as a preventive policy to protect water resources. *Journal of Environmental Planning and Management*, *63*(14), 2484-2500. https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1729705
7. Bora, K. (2022). Spatial patterns of fertilizer use and imbalances: Evidence from rice cultivation in India. *Environmental Challenges*, *7*, 100452. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100452
8. Carpenter, C.J. (2010). A meta-analysis of the effectiveness of health belief model variables in predicting behavior. *Health Communication*, *25*(8), 661-669. https://doi.org/10.1080/10410236.2010.521906
9. Champion, V.L., & Skinner, C.S. (2008). The health belief model. *Health Behavior and Health Education: Theory, Research, and Practice*, *4*, 45-65.
10. Cheng, S., Zheng, Z., & Henneberry, S. (2019). Farm size and use of inputs: Explanations for the inverse productivity relationship. *China Agricultural Economic Review*, *11*(2), 336-354. https://doi.org/10.1108/CAER-09-2018-0192
11. Duan, W., Peng, L., Zhang, H., Han, L., & Li, Y. (2021). Microbial biofertilizers increase fruit aroma content of *Fragaria× ananassa* by improving photosynthetic efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, *60*(6), 5323-5330. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.014
12. Ejeta, L.T., Ardalan, A., Paton, D., & Yaseri, M. (2016). Predictors of community preparedness for flood in Dire-Dawa town, Eastern Ethiopia: Applying adapted version of Health Belief Model. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *19*, 341-354. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.09.005
13. Erfani, R., Pirdashti, H., Nouri, M., & Abbasi, R. (2019). Comparison of paddy yield and soil qualitative characteristics among different agricultural systems in three regions of Mazandaran. *Applied Field Crops Research*, *32*(1), 101-122. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/aj.2018.122292.1309
14. Güler, T. (2010). Ekoloji temelli bir çevre eğitiminin öğretmenlerin çevre eğitimine karşı görüşlerine etkileri. *Eğitim ve Bilim, 34*(151), 23-41.
15. Habib, S.S., Batool, A.I., Rehman, M.F.U., & Naz, S. (2023). Evaluation and association of heavy metals in commonly used fish feed with metals concentration in some tissues of *O. niloticus* cultured in biofloc technology and earthen pond system. *Biological Trace Element Research*, *201*(6), 3006-3016. https://doi.org/10.1007/s12011-022-03379-0
16. Halpern, M., Bar-Tal, A., Ofek, M., Minz, D., Muller, T., & Yermiyahu, U. (2015). The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Advances in Agronomy*, *130*, 141-174. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.001
17. Hamid, F., Yazdanpanah, M., Baradaran, M., Khalilimoghadam, B., & Azadi, H. (2021). Factors affecting farmers' behavior in using nitrogen fertilizers: Society vs. farmers' valuation in southwest Iran. *Journal of Environmental Planning and Management*, *64*(10), 1886-1908. https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1851175

18. Hair Jr, J.F., Matthews, L.M., Matthews, R.L., & Sarstedt, M. (2017). PLS-SEM or CB-SEM: Updated guidelines on which method to use. *International Journal of Multivariate Data Analysis*, *1*(2), 107-123. https://doi.org/10.1504/IJMDA.2017.087624
19. Homauini, Z., Abolhasani, L., & Sabouhi, M. (2018). Environmental impact assessment of different varieties of rice (*Oryza sativa* L.) paddy in the Kordkoy. *Journal of Agroecology*, *10*(2), 580-602. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JAG.V10I2.63502
20. Huang, Y., Luo, X., Tang, L., & Yu, W. (2020). The power of habit: Does production experience lead to pesticide overuse?. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(20), 25287-25296. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08961-4
21. Jalali, M., & Karimi Mojahed, J. (2020). Assessment of the health risks of heavy metals in soils and vegetables from greenhouse production systems in Iran. *International Journal of Phytoremediation*, *22*(8), 834-848. https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1715917
22. Jeong, J.Y., & Ham, S. (2018). Application of the Health Belief Model to customers' use of menu labels in restaurants. *Appetite*, *123*, 208-215. https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.12.012
23. Kabiri, S., Degryse, F., Tran, D.N., da Silva, R.C., McLaughlin, M.J. & Losic, D. (2017). Graphene oxide: A new carrier for slow release of plant micronutrients. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *9*(49), 43325-43335. https://doi.org/10.1021/acsami.7b07890.
24. Keesstra, S., Mol, G., De Leeuw, J., Okx, J., Molenaar, C., De Cleen, M., & Visser, S. (2018). Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land, 7*(4), 133. https://doi.org/10.3390/land7040133
25. Khan, M. (2010). Using the health belief model to understand pesticide use decisions. *The Pakistan Development Review, 12*, 941-956. https://doi.org/10.30541/v49i4IIpp.941- 956.
26. Koupaie, E.H., & Eskicioglu, C. (2015). Health risk assessment of heavy metals through the consumption of food crops fertilized by biosolids: A probabilistic-based analysis. *Journal of Hazardous Materials*, *300*, 855-865. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.018
27. Kumar, S. (2013). Environmental awareness among rural folks of Hamirpur district, HP. *The International Journal of Engineering and Science*, *2*(1), 1-84.
28. Liu, W., Shao, X.F., Wu, C.H., & Qiao, P. (2021). A systematic literature review on applications of information and communication technologies and blockchain technologies for precision agriculture development. *Journal of Cleaner Production, 298*, 126763. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126763
29. Maleksaeidi, H., & Keshavarz, M. (2019). What influences farmers' intentions to conserve on-farm biodiversity? An application of the theory of planned behavior in Fars province, Iran. *Global Ecology and Conservation*, *20*, e00698. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00698
30. Mankeb, P., Limunggura, T., In-Go, A., & Chulilung, P. (2014). Adoption of Good Agricultural Practices by Durian Farmers in Koh Samui District, Surat Thani Province, Thailand.
31. Mazengia, E.M., Kassie, A., Zewdie, A., Tesfa, H., Aschale, A., & Demissie, G.D. (2024). Risky driving behavior among public transport vehicle drivers in Ethiopia using the health belief model. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *23*, 101011. https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.101011
32. McArthur, J.W., & McCord, G.C. (2017). Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *Journal of Development Economics*, *127*, 133-152. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2017.02.007
33. Nasiri, A.R., Shahangian, S.A., Kerachian, R., & Zobeidi, T. (2024). Exploring socio-psychological factors affecting farmers' intention to choose a low-water-demand cropping pattern for water resources conservation: Application of the health belief model. *Agricultural Water Management*, *295*, 108768. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108768
34. Othman, Z. (2012). Information and communication technology innovation as a tool for promoting sustainable agriculture: A case study of paddy farming in west Malaysia (Doctoral dissertation, University of Malaya).
35. Orji, R., Vassileva, J., & Mandryk, R. (2012). Towards an effective health interventions design: an extension of the health belief model. *Online Journal of Public Health Informatics*, *4*(3), e61050. https://doi.org/10.5210/ojphi.v4i3.4321
36. Ren, C., Jin, S., Wu, Y., Zhang, B., Kanter, D., Wu, B., Xi, X., Zhang, X., Chen, D., Hu, J., & Gu, B. (2021).

Fertilizer overuse in Chinese smallholders due to lack of fixed inputs. *Journal of Environmental Management*, *293*, 112913. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112913
37. Rosenstock, I.M. (2005). Why people use health services. *The Milbank Quarterly*, *83*(4). https://doi.org/10.1111/j.1468-0009.2005.00425.x
38. Savari, M., & G harechaee, H. (2020). Application of the extended theory of planned behavior to predict Iranian farmers' intention for safe use of chemical fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, *263*, 121512. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121512
39. Savari, M., Damaneh, H.E., & Damaneh, H.E. (2024). Managing the effects of drought through the use of risk reduction strategy in the agricultural sector of Iran. *Climate Risk Management*, 100619. https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100619
40. Savari, M., Damaneh, H.E., & Damaneh, H.E. (2024). Discover the determining factors of the use of mangrove forests conservation behaviors. *Journal for Nature Conservation*, 126768. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2024.126768
41. Savari, M., Sheheytavi, A., & Amghani, M.S. (2023). Factors underpinning Iranian farmers' intention to conserve biodiversity at the farm level. *Journal for Nature Conservation*, *73*, 126419. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126419
42. Savari, M., Ebrahimi-Maymand, R., & Mohammadi-Kanigolzar, F. (2013). The Factors influencing the application of organic farming operations by farmers in Iran. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics*, *5*(4), 179-187.
43. Savari, M., Khaleghi, B., & Sheheytavi, A. (2024). Iranian farmers' response to the drought crisis: How can the consequences of drought be reduced? *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *114*, 104910. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104910
44. Savari, M., Damaneh, H.E., & Damaneh, H.E. (2024). Conservation behaviors of local communities towards mangrove forests in Iran. *Global Ecology and Conservation*, e03311. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03311
45. Savari, M., & Khaleghi, B. (2023). The role of social capital in forest conservation: An approach to deal with deforestation. *Science of The Total Environment*, *896*, 165216. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165216
46. Shahangian, S.A., Tabesh, M., Yazdanpanah, M., Zobeidi, T., & Raoof, M.A. (2022). Promoting the adoption of residential water conservation behaviors as a preventive policy to sustainable urban water management. *Journal of Environmental Management*, *313*, 115005 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115005
47. Sible, C.N., Seebauer, J.R., & Below, F.E. (2021). Plant biostimulants: A categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. *Agronomy*, *11*(7), 1297. https://doi.org/10.3390/agronomy11071297
48. Şimşekoğlu, Ö., & Lajunen, T. (2008). Social psychology of seat belt use: A comparison of theory of planned behavior and health belief model. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *11*(3), 181-191. https://doi.org/10.1016/j.trf.2007.10.001
49. Smith P, House JI, Bustamante M, Sobocká J, Harper R, Pan G, West PC, Clark JM, Adhya T, Rumpel C, Paustian K, Kuikman P, Cotrufo MF, Elliott JA, McDowell R, Griffiths RI, Asakawa S, Bondeau A, Jain AK, Meersmans J, Pugh TA. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 22(3), 1008-1028. https://doi.org/10.1111/gcb.13068
50. Smith, P., House, J.I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P., Clark, J., Adhya, T., Rumpel, C.,
51. Straub, C.L., & Leahy, J.E. (2014). Application of a modified health belief model to the pro-environmental behavior of private well water testing. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *50*(6), 1515-1526. https://doi.org/10.1111/jawr.12217
52. Strydom, W.F. (2018). Applying the theory of planned behavior to recycling behavior in South Africa. *Recycling*, *3*(3), 43. https://doi.org/10.3390/recycling3030043
53. Taflinger, S., & Sattler, S. (2024). A situational test of the Health Belief Model: How perceived susceptibility mediates the effects of the environment on behavioral intentions. *Social Science and Medicine*, 116715. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2024.116715
54. Vassallo, M., Saba, A., Arvola, A., Dean, M., Messina, F., Winkelmann, M., & Shepherd, R. (2009). Willingness to use functional breads. Applying the Health Belief Model across four European countries. *Appetite*, *52*(2), 452-460. https://doi.org/10.1016/j.appet.2008.12.008

55. Wang, Y., & Zhao, G. (2019). Life cycle assessment of potential pollutant-induced human capital loss caused by different agricultural production systems in Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, *240*, 118141. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118141
56. Wang, Y., Yang, J., Liang, J., Qiang, Y., Fang, S., Gao, M., Fan, X., Zhang, B., & Feng, Y. (2018). Analysis of the environmental behavior of farmers for non-point source pollution control and management in a water source protection area in China. *Science of the Total Environment*, *633*, 1126-1135. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.273
57. Wang, Y., Zhou, S., & Jiang, G. (2023). Can the application of environmentally friendly fertilisers reduce agricultural labour input? Empirical evidence from peanut farmers in China. *Sustainability*, *15*(4), 2989. https://doi.org/10.3390/su15042989
58. Yazdanpanah, M., Moghadam, M.T., Zobeidi, T., Turetta, A.P.D., Eufemia, L., & Sieber, S. (2022). What factors contribute to conversion to organic farming? Consideration of the Health Belief Model in relation to the uptake of organic farming by Iranian farmers. *Journal of Environmental Planning and Management*, *65*(5), 907-929. https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1917348
59. Zhai, L., Zhang, L., Cui, Y., Zhai, L., Zheng, M., Yao, Y., Zhang, J., Hou, W., Wu, H., & Jia, X. (2024). Combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer alleviates the kernel position effect in summer maize by promoting post-silking nitrogen uptake and dry matter accumulation. *Journal of Integrative Agriculture*, *23*(4), 1179-1194. https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.05.003

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 729-744

Calibration and Verification of the AquaCrop Model in Simulating the Yield, Dry Matter and Water Productivity of Grain Corn (*Zea mays* L.) under Different Irrigation Methods and Nitrogen Fertilizer Levels

Zhaleh Zarei[1], Hassan Heidari[2]*, Saeid Jalali-Honarmand[2] and Ali Bafkar[3]

1 and 2- Ph.D. Graduated and Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agricultural Science and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively
3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding author's Email: heidari1383@gmail.com)

Received: 11-11-2021 Revised: 02-10-2021 Accepted: 04-01-2022 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Zarei, Z., Heidari, H., Jalali-Honarmand, S., & Bafkar, A. (2025). Calibration and verification of the AquaCrop model in simulating the yield, dry matter and water productivity of grain corn (*Zea mays* L.) under different irrigation methods and nitrogen fertilizer levels. *Journal of Agroecology*, *16*(4), 729-744. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/agry.2024.88850.1201

Introduction

The decrease in rainfall in recent decades and the occurrence of drought in Iran, which is one of the arid and semi-arid regions, as well as the significant wastage of water in the agricultural sector, have caused many researchers to look for new irrigation methods that lead to improving water consumption. Therefore, the importance of conducting this experiment is to reduce surface water evaporation, save water, and reduce leaching and use of nitrogen fertilizer in maize cultivation. Nowadays, due to the decrease in rainfall and the excessive water consumption in the agricultural sector, the importance of water resources management has received more attention from researchers. Therefore, simulation models an effective role in evaluating irrigation management methods to improve water consumption in the agricultural sector. This study aimed to assess the AquaCrop model in terms of simulating the yield and biomass of maize under two methods of irrigation (wick and surface) and nitrogen fertilization (topdressing and fertigation).

Materials and Methods

This experiment was carried out in 2020 and 2021 in the Faculty of Agriculture of Razi University. Experimental treatments included wick irrigation and surface irrigation (at three levels of 100, 70, and 50%) and two levels of nitrogen fertilizer, 100 and 50% of the plant's fertilizer requirement. The statistical design was factorial in the form of randomized complete blocks and was implemented in three replications. In the wick irrigation method, fertilizer was provided to the plant through tanks and in solution. In the surface irrigation method, fertilizer was topdressing on the soil surface. Nitrogen fertilizer was applied in three stages. In each watering, the amount of water used will be measured and recorded through the meter. At the end of the experiment, the data measured in the first and second years were used for calibration and validation, respectively. For both stages of calibration and validation of the model, the measured (observed) and simulated values of yield, biomass, canopy cover, and water productivity were compared and statistically analyzed. For

https://doi.org/10.22067/agry.2024.88850.1201

statistical evaluation, root mean square error (RMSE), efficiency coefficient of the Nash-Sutcliffe model (EF), and Wilmot agreement index (d) were used.

Results and Discussion

The results indicated that the root mean square error (RMSE) for simulating canopy cover development under various irrigation and fertilizer treatments ranged from 1.5% to 6.1% during the calibration stage (2020) and from 2% to 6.4% during the verification stage (2021). The model's efficiency factor (EF) for canopy cover simulation was between 0.91 and 0.99 during the calibration stage and between 0.93 and 0.99 during the validation stage. For biomass simulation, the RMSE values ranged from 1.07 to 2.1 tons/ha in the calibration stage and from 1.4 to 2.9 tons/ha in the validation stage. The model's EF for biomass simulation ranged from 0.87 to 0.98 in the calibration stage and from 0.92 to 0.99 in the validation stage. These results demonstrate the model's high accuracy and reliability in simulating both canopy cover and biomass development across different treatments. AquaCrop simulation results showed that the model was able to simulate water productivity better than yield and total biomass, so the coefficient of determination (R^2) related to water productivity, yield, and biomass of maize was obtained as 0.82, 0.52, and 0.54, respectively.

Conclusion

The simulation of yield, dry matter, and water productivity in the calibration and verification stage was lower than the actual value in all treatments. The most significant difference between the observed and simulated values of yield, biomass and water productivity was observed in the wick treatment (first and second year). According to the obtained results, it can be concluded that AquaCrop was chosen well and within the expectations for the studied area and the ability of AquaCrop in the field to provide a low irrigation model like the wick method is suitable and practical.

Keywords: Calibration, Irrigation management, Modeling, Urea fertilizer, Verification

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ۷٤٤-۷۲۹

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی میزان عملکرد، ماده خشک و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای (*Zea mays* L.) تحت روش‌های مختلف آبیاری و سطوح کود نیتروژنه

ژاله زارعی[۱]، حسن حیدری[۲]*، سعید جلالی هنرمند[۲] و علی بافکار[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

چکیده

هدف از این مطالعه، ارزیابی مدل AquaCrop از نظر شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده ذرت دانه‌ای تحت دو روش آبیاری (فتیله‌ای و سطحی) و کوددهی نیتروژن (کود سرک و کودآبیاری) بود. این آزمایش در دو سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری فتیله‌ای و آبیاری سطحی (در سه سطح ۱۰۰،۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و دو سطح کود نیتروژنه ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز کودی گیاه بود. نتایج نشان داد که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه‌سازی روند توسعه پوشش گیاهی در تیمارهای مختلف آبیاری و کودی در مرحله واسنجی (۱۳۹۹) بین ۱/۵ تا ۶/۱ درصد و در مرحله صحت‌سنجی (۱۴۰۰) بین ۲ و ۶/۴ درصد به‌دست آمد. مقدار ضریب کارآیی مدل (EF) در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، در مرحله واسنجی بین ۰/۹۱ و ۰/۹۹ و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۳ و ۰/۹۹ بود. مقدار RMSE در شبیه‌سازی ماده خشک برای مرحله واسنجی بین ۱/۰۷ تا ۲/۱ تن در هکتار و در مرحله صحت‌سنجی بین ۱/۴ تا ۲/۹ تن در هکتار به‌دست آمد. همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop نشان داد که این مدل توانست شبیه‌سازی بهره‌وری آب را بهتر از عملکرد دانه و ماده خشک کل انجام دهد، به‌طوری‌که ضریب تبیین (R^2) مربوط به بهره‌وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل ذرت به‌ترتیب برابر با ۰/۸۲، ۰/۵۲ و ۰/۵۴ به‌دست آمد. در مجموع، AquaCrop به‌خوبی برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد و توانایی AquaCrop در زمینه ارائه یک مدل کم‌آبیاری مانند روش فتیله‌ای مناسب است.

واژه‌های کلیدی: صحت‌سنجی، کالیبره، کود اوره، مدل‌سازی، مدیریت آبیاری

مقدمه

همه مناطق زراعی و به‌ویژه مناطق تحت آبیاری سنتی، نیاز به مدیریت مناسب منابع آب طبیعی (آب باران، آب‌های زیر زمینی و آب‌های سطحی) دارند که در آن، ابزارهای مفید و استراتژی‌های مدیریتی در پرداختن به چالش‌های فعلی برای برآوردن تقاضای فزاینده جهانی برای غذا، کلیدی هستند (López-Urrea et al., 2020). همچنین، سطوح بالای تنش آبی و افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها که عمدتاً ناشی از پویایی تغییرات اقلیمی است، باعث کاهش ذخیره منابع آب شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران شده است (Nazari et al., 2018). یکی از مناسب‌ترین راه‌ها برای کاهش مصرف آب در کشاورزی، تأمین مقدار دقیق آب آبیاری محصولات در مواقع مورد نیاز است تا بهره‌وری مصرف آب به حداکثر برسد (Rezaverdinejad et al., 2014). علاوه‌بر آب، نیتروژن نیز به‌عنوان اصلی‌ترین ماده مغذی مؤثر بر کیفیت و کمیت محصول در

۱ و ۲- به‌ترتیب فارغ‌التحصیل دکتری و دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: heidari1383@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/agry.2024.88850.1201

نظر گرفته می‌شود. بااین‌حال، مدیریت مناسب کود مستلزم آگاهی از تقاضای نیتروژن محصول در طول دوره رشد برای اطمینان از حداکثر تولید است (Rahimikhoob et al., 2021). آب عامل اصلی محدودکننده کارآیی کودهای نیتروژن در شرایط محدود آب است و تأمین آب کافی می‌تواند جذب آب و عناصر غذایی را افزایش دهد (Cui et al., 2023). پیچیدگی پاسخ‌های محصول به کمبود آب منجر به استفاده از توابع تولید تجربی به‌عنوان کاربردی‌ترین گزینه برای ارزیابی عملکرد محصول در ارتباط با آب شده است (Steduto et al., 2009). فائو رابطه بین عملکرد محصول و استفاده از آب را در اواخر دهه هفتاد مورد بررسی قرار داد و یک معادله ساده توسط دورنبوس و کسام[1] (۱۹۷۹) ارائه داد که در آن کاهش عملکرد نسبی به کاهش نسبی تبخیر و تعرق مربوط است (Steduto et al., 2012).

معادله (۱)
$$\left(1-\frac{Y}{Y_X}\right)=K_y\left(1-\frac{ET}{ET_X}\right)$$

که در آن، Y_X: حداکثر عملکرد، Y: عملکرد واقعی، ET_X: حداکثر تبخیر- تعرق، ET: تبخیر- تعرق واقعی و K_y: فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر- تعرق است.

ازاین‌رو برای کاهش تلفات آب و شست‌وشوی نیتروژن، به مدل-های شبیه‌سازی محصول مورد نیاز است که بتواند داده‌های مزرعه‌ای موجود، یعنی دما، باران/آبیاری، بافت خاک و عملکرد خشک را ترکیب کند (Dercas et al., 2022). مدل‌های شبیه‌سازی محصول، ابزارهای ارزشمندی برای کمّی کردن واکنش عملکرد محصول به آب و ابداع استراتژی‌هایی جهت بهبود مدیریت آب کشاورزی هستند (Foster et al., 2017)، ازاین‌رو برای پرداختن به امنیت غذایی و ارزیابی تولید محصول تحت تأثیر محیط و مدیریت، تعداد زیادی مدل شبیه‌سازی محصول توسعه داده شده است. این مدل‌ها اغلب به تعداد زیادی متغیر ورودی و مقادیر پارامتر نیاز دارند که به‌راحتی برای طیف متنوعی از محصولات و محیط‌ها در سراسر جهان در دسترس نیستند (Vanuytrecht et al., 2014). در میان این مدل‌ها، AquaCrop یک نوع مدل حرفه‌ای است که تعادل بهینه را بین دقت، استحکام و سادگی حفظ می‌کند و به تعداد نسبتاً کمی پارامتر نیاز دارد (Abedinpour et al., 2021; Steduto et al., 2009). در مقایسه با مدل‌های دیگر، مدل AquaCrop یک مدل مبتنی بر آب است که اثرات کمبود آب خاک را بر فرآیندهای رشد مختلف، به‌عنوان مثال، گسترش تاج‌پوشش، پیری تاج‌پوشش، هدایت روزنه‌ای، و شاخص برداشت به حساب می‌آورد (Zhang et al., 2022). اگرچه این مدل اغلب برای شبیه‌سازی محصولات مختلف و تعادل آب در مزرعه تحت تیمارهای مختلف آبیاری استفاده شده است، امّا مطالعاتی که AquaCrop را به کوددهی مرتبط می‌کند، نادر است (Dercas et al., 2022). امّا یک چیز وجود دارد که باید از آن آگاه بود این است که مدل AquaCrop در روش نیمه کمی برای ارزیابی تنش کود استفاده می‌شود. یعنی نمی‌تواند مستقیماً پاسخ محصول به کود را در پرتو تقاضای کود گیاهی و محتوای تغذیه خاک شبیه‌سازی کند. به طور خلاصه، تنش کود در این مدل ممکن است تجربی و نادرست باشد (Wu et al., 2022).

در یک آزمایش، سطوح مختلف آبیاری (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد) و نیتروژن (۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) برای گیاه ذرت دانه‌ای کالیبره و اعتبارسنجی شد. پس از اعتبارسنجی، خطای پیش‌بینی بین ۶ و ۱۰، ضریب تبیین بین ۰/۶۵ و ۰/۷۶ و ریشه میانگین مربع خطای نرمال شده بین ۱۰۶۲ و ۱۲۹۳ به‌ترتیب برای عملکرد دانه و زیست‌توده بود. بر این اساس، نتایج آزمایش نشان داد که مدل AquaCrop زیست‌توده بالای زمین را با دقت بیشتری نسبت به عملکرد دانه شبیه‌سازی می‌کند (Abedinpour, 2016). در بررسی دیگر، مدل AquaCrop از نظر توانایی آن در شبیه‌سازی عملکرد چغندرقند در شرایط آب کامل و کم‌آبی و دو سطح نیتروژن در یک محیط خشک در مرکز ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که مدل AquaCrop قادر به شبیه‌سازی دقیق زیست‌توده محصول، عملکرد ریشه و تاج‌پوشش، با میانگین خطای مربع ریشه نرمال شده (RMSE) کمتر از ۱۸ درصد برای شرایط بدون تنش آبی یا تنش خفیف آبی بود. بیشترین انحراف در شبیه-سازی عملکرد ریشه در تیمار تنش آبی بالا و سطح نیتروژن پایین بود. تاج‌پوشش تقریباً در تمام تیمارها به اندازه کافی خوب شبیه‌سازی شد، امّا روند مشابهی با عملکرد ریشه مشاهده شد (Alishiri et al., 2014). نتایج یک آزمایش مزرعه‌ای با سه سطح آبیاری غرقابی (آبیاری مداوم و با فواصل پنج و هشت روز) و سه سطح نیتروژن (۴۵، ۶۰ و ۷۵ کیلوگرم در هکتار) روی برنج نشان داد که آزمون آماری مدل برای زیست‌توده کل و خوشه، مقادیر ضریب تبیین (R^2) نسبتاً بالا (۰/۹۰ ≤) و مقادیر میانگین مجذور خطاهای ریشه مطلق و نرمال

1- Doorenbos and Kassam

شده (RMSEn) متوسط (۶-۳۶ درصد) را نشان داد، که تأیید می‌کند که مدل زیست‌توده کل و خوشه را به‌دقت شبیه‌سازی کرده است (Amiri, 2016). در یک آزمایش، پنج سطح نیتروژن (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از نیتروژن توصیه شده) و دو رقم سویا در شرایط دیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی تاج‌پوشش، ذخیره آب خاک، تبخیر و تعرق و عملکرد دانه سویای دیم با سطوح مختلف کود نیتروژن تحت توزیع زمانی بارش فصلی مناسب است. بنابراین، می‌تواند به‌عنوان ابزار مفیدی برای کشاورزان خرده‌مالک در پیش‌بینی بهره‌وری دانه سویا و بهینه‌سازی تخصیص منابع، استفاده از زمین و آب در سیستم‌های کشاورزی گرمسیری باشد (Adeboye et al., 2021). هدف تحقیق حاضر، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای برآورد میزان عملکرد، ماده خشک و بهره‌وری آب ذرت تحت روش‌های مختلف آبیاری و سطوح کود نیتروژنه بود.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش و تیمارها

آزمایشی جهت ارزیابی تأثیر آب و نیتروژن بر رشد ذرت دانه‌ای (رقم سینگل کراس ۷۰۴) در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی رازی کرمانشاه انجام شد. محل آزمایشی در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا واقع شده است. آزمایش به‌صورت مزرعه‌ای و در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ انجام شد. در این آزمایش، تیمارها شامل دو روش آبیاری فتیله‌ای و آبیاری سطحی با دو روش کوددهی نیتروژن بود. پژوهش به‌صورت طرح فاکتوریل با بلوک‌های کامل تصادفی و سه تکرار بود. آبیاری سطحی در سه سطح ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد براساس نیاز آبی ذرت و کود نیتروژن به‌صورت کود اوره و در دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی گیاه بود. قبل از اجرای طرح، از خاک مزرعه نمونه‌برداری انجام شد. سپس، براساس مقدار ماده آلی خاک و نیاز غذایی ذرت، میزان کود در سطح ۱۰۰ درصد تعیین شد و سطح ۵۰ درصد نیز از این مقدار محاسبه شد. فاصله بین بلوک‌ها ۱/۵ متر و فاصله بین هر پلات دو متر بود. در هر پلات پنج خط کاشت که فاصله بین ردیف‌های کاشت ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها در هر ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود، در نظر گرفته شد. در اوایل اردیبهشت، بذرهای ذرت در مزرعه کاشته شدند. پس از استقرار کامل گیاه، عملیات تنک کردن و وجین به‌صورت دستی صورت گرفت. نیاز آبی در آبیاری سطحی با استفاده از برنامه CROPWAT و از روش فائو- پنمن- مانتیث محاسبه گردید. این روش، تبخیر و تعرق گیاه را با توجه به معادله پیشنهادی فائو ۵۶ تعیین می‌کند که به شرح زیر است:

$$ETc = ETo \times Kc \qquad (۲)\ \text{معادله}$$

که در آن، ETc: تبخیر و تعرق گیاه، ETo: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب میلی‌متر در روز و Kc: ضریب گیاهی پایه است. مقادیر ضریب گیاهی در این نرم‌افزار برای دوره‌های ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی رشد به‌ترتیب ۰/۱۵، ۰/۶۵، ۱/۱۵ و ۰/۳۵ ارائه شده است.

در آبیاری سطحی، کود اوره در سه مرحله ۳۰ ، ۴۵ و۷۰ روز پس از سبز شدن گیاه ذرت و به‌صورت سرک اعمال شد. امّا در آبیاری فتیله‌ای، کود به‌صورت محلول در آب مورد استفاده قرار گرفت. جهت طراحی آبیاری فتیله‌ای از وسایل ساده و ارزان استفاده شد که شامل نخ به‌عنوان فتیله که از خرازی‌ها تهیه گردید. بشکه به‌عنوان مخزن آب و شلنگ آبیاری قطره‌ای جهت انتقال آب از مخزن به ناحیه ریشه استفاده شد. به کمک رابط هر قطعه شلنگ در محل فتیله‌ها به هم متصل شدند. دور آبیاری در آبیاری سطحی، هفته‌ای یک‌بار و در آبیاری فتیله‌ای، مخزن‌ها دو روز یک‌بار پر می‌شدند. نمایی از مزرعه و اعمال آبیاری فتیله‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.

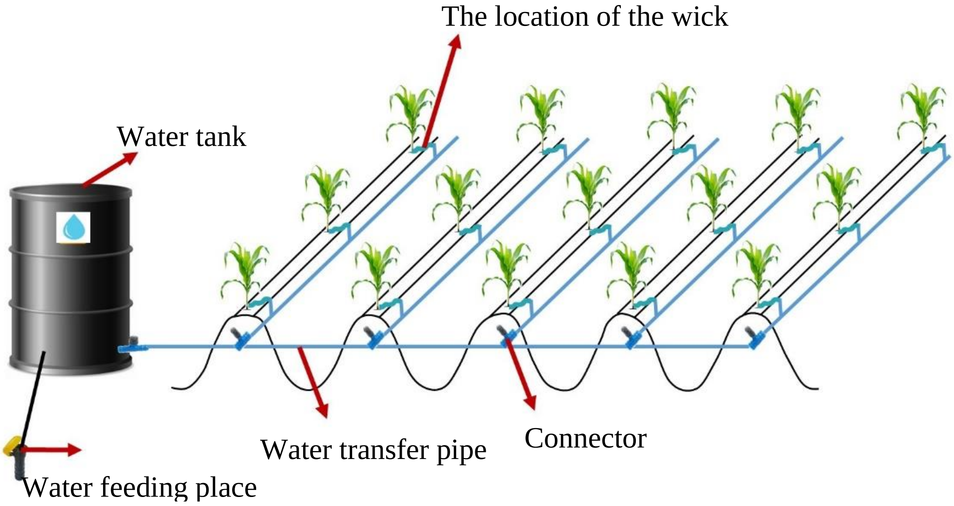
مدل AquaCrop

اگرچه AquaCrop مبتنی بر فرآیندهای بیوفیزیکی اولیه و پیچیده است، امّا از تعداد نسبتاً کمی از مشخصه‌های صریح و متغیرهای ورودی تا حد زیادی بصری استفاده می‌کند، که یا به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند یا به روش‌های ساده‌ای برای تعیین آن‌ها نیاز دارند (Raes et al., 2009). پارامترهای مورد استفاده در این مدل شامل:

مشخصه‌های گیاهی

یکی از اهداف واسنجی، تعیین برخی از مشخصه‌های گیاهی مدل می‌باشد که امکان اندازه‌گیری آن وجود ندارد. بنابراین، باید با دقت فایل مورد نظر تهیه و داده‌ها اندازه‌گیری گردد. با استفاده از فایل گیاهی پیش‌فرض مدل، پارامترهای اندازه‌گیری انجام شده در طول دوره کشت محصول از جمله تاریخ جوانه‌زنی، حداکثر پوشش گیاهی، تاریخ گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی و ... وارد مدل شده و فایل مورد

نظر جهت واسنجی آماده گردید.



شکل ۱- نمای از آبیاری فتیله‌ای در مزرعه

Fig. 1- View of wick irrigation in the field

جهت محاسبه پوشش تاج‌پوشش، یک مترمربع از هر کرت انتخاب و چهار شاخص در چهار طرف زمین قرار داده شد. سپس به کمک عکس هوایی و انجام ایمیج پراسسینگ در نرم‌افزار جی‌آی‌اس هر ۱۰ روز یک‌بار میزان پوشش گیاهی ثبت شد.

داده‌های خاک

داده‌های مربوط به خاک عبارتند از: هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، محتوای آب حجمی در اشباع (SAT)، ظرفیت مزرعه (F_C) و نقطه پژمردگی دائمی (PWP). این داده‌ها از بافت خاک محل آزمایش محاسبه و به برنامه وارد شد (جدول ۱). برای این منظور از هر پلات، نمونه‌های خاک دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فولادی با قطر و ارتفاع پنج سانتی‌متر و نمونه دست‌خورده خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر برداشت شد. سپس، نمونه‌ها در هوای آزمایشگاه خشک و از الک دو میلی‌متر عبور داده شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله بافت خاک به‌روش هیدرومتری و مقدار رطوبت جرمی در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحات فشاری به‌ترتیب با اعمال ۰/۳۳ و ۱۵ بار انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات خاک محل آزمایش (عمق ۳۰-۰ سانتی متر)

Table 1- General properties of the soil of the experimental site (depth of 0–30 cm)

خصوصیات خاک Soil properties	2020	2021
شن Sand (%)	14.40	19.40
رس Clay (%)	44.00	37.20
سیلت Silt (%)	41.60	43.40
ظرفیت زراعی Field capacity (%)	40.90	39.40
هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity ($mm.h^{-1}$)	5.00	16.14
نقطه اشباع Saturation (%)	50.0	58.2
نقطه پژمردگی Wilting point (%)	26.30	23.80

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش طی دور رشد ذرت در سال ۱۳۹۹ و ۱٤۰۰
Table 2- Meteorological information of the experiment site during the maize growth period in 2020 and 2021

سال Year	ماه Month	دما Tempecure (°C) حداکثر Max	متوسط Avg.	حداقل Min	رطوبت Humidity (%) حداکثر Max	متوسط Avg.	حداقل Min	بارندگی Precipitation (mm)
2020	اردیبهشت May	33.5	17.7	3.7	75	47	20	40.1
	خرداد June	37.6	25.1	9.8	39	22	4	0
	تیر July	42.7	21.7	13.1	31	18	6	0
	مرداد August	42.2	29.6	14.3	31	18	4	0
	شهریور September	37.8	19.0	11.5	29	16	4	0
2020	اردیبهشت May	36.3	21.3	5.5	50	30	9	8.0
	خرداد June	42.3	25.9	9.8	31	17	3	0
	تیر July	41.3	30.4	15.3	22	13	3	0
	مرداد August	42.6	29.5	15.8	28	16	5	0
	شهریور September	39.7	26.5	10.4	25	14	3	0

داده‌های اقلیمی

داده‌های آب‌وهوایی در مدل AquaCrop عبارتند از: بیشینه و کمینه دمای روزانه (T) برحسب درجه‌سانتی‌گراد، بارندگی (R)، تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_O) و متوسط غلظت سالیانه دی‌اکسیدکربن CO_2. آمار مربوط به داده‌های آب‌وهوایی از ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی واقع در محل مطالعه جمع‌آوری شد (جدول ۲). در نهایت، برای غلظت دی‌اکسید کربن از اطلاعات موجود در رصدخانه Manaloa در هاوایی استفاده شد.

ارزیابی مدل

در نهایت، برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل، مقادیر اندازه‌گیری (واقعی) و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، ماده خشک، پوشش گیاهی و بهره‌وری آب مقایسه و تحلیل آماری گردید. برای ارزیابی آماری، از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[1])، ضریب کارآیی مدل نش- ساتکلیف[2] (EF[3]) و شاخص توافق ویلموت[4] (d) استفاده شد (Willmott, 1982). RMSE، ریشه میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد که هرچه میانگین مربعات اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده کمتر باشد، این شاخص به صفر نزدیک‌تر و هرچه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده اختلاف بیشتری باشد، این شاخص از صفر بزرگ‌تر می‌باشد و به‌سمت مقادیر بزرگ میل می‌کند:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2}{n}} \quad \text{معادله (۳)}$$

ضریب کارآیی مدل نش-ساتکلیف (EF) اندازه نسبی واریانس شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس مشاهدات تعیین می‌کند و نشان می‌دهد که داده‌های مشاهده‌شده در مقابل شبیه‌سازی‌شده چه میزان با خط ۱:۱ مطابقت دارند. محدوده EF از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است که در آن عدد ۱ تطابق کامل بین مقادیر شبیه‌سازی شده

1- Root Mean Square Error
2- Nash-Sutcliffe
3- Model Efficiency
4- Index of Agreement

و مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقادیر EF و d با معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2} \quad (۴) \text{ معادله}$$

$$d=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i-\overline{O}|+|O_i-\overline{O}|)^2} \quad (۵) \text{ معادله}$$

مقدار d از صفر تا یک متغیر است و با نزدیک شدن d به یک، عملکرد مدل بهبود می‌یابد. EF برای تبیین کمیت قدرت پیش‌بینی مدل استفاده شد، در حالی‌که RMSE نشان‌دهنده خطا در پیش‌بینی مدل است. در معادله‌های بالا، S_i و O_i: به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی) و شبیه‌سازی شده است. $\overline{O}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده هستند و n: تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

پوشش گیاهی[1] (CC)

پارامترهای آماری ارزیابی مدل AquaCrop برای هر یک از تیمارها در جدول ۳ ارائه شده است. براساس این نتایج، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه‌سازی روند توسعه پوشش گیاهی در تیمارهای مختلف آبیاری و کودی در مرحله واسنجی (۱۳۹۹) بین ۱/۵ تا ۶/۱ درصد و در مرحله صحت‌سنجی (۱۴۰۰) بین ۲ و ۶/۴ درصد به‌دست آمد. همچنین مقدار شاخص توافق ویلموت (d) در این شبیه‌سازی در تیمارهای مختلف در مرحله واسنجی بین ۰/۹۷ و ۱، و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۸ و ۱ به‌دست آمد. مقدار ضریب کارآیی مدل (EF) در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، در مرحله واسنجی بین ۰/۹۱ و ۰/۹۹ و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۳ و ۰/۹۹ بود (جدول ۳). براساس نتایج به‌دست آمده، AquaCrop به‌خوبی می‌تواند روند توسعه CC را تحت تمام تیمارها همان‌طور که در مقادیر d و EF بالا و RMSE پایین (کمتر از ۱۰ درصد) نشان داده شده است، ثبت کند. علاوه‌براین، دقت شبیه‌سازی تیمار سطحی۱۰۰-کود۵۰ (سال اول) و سطحی۵۰-کود۵۰ (سال دوم) بهتر از سایر تیمارها بود. امّا در هر دو سال، دقت شبیه‌سازی بقیه تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان نداد. در پژوهش‌های مشابه، گزارش شده است که d بالا و RMSE پایین برای همه تیمارها نشان می‌دهد که این مدل در شبیه‌سازی توسعه تاج‌پوشش در محیط‌های مختلف آبی قوی است (Greaves & Wang, 2016).

مقایسه روند توسعه پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و واقعی در تیمارهای مختلف آبیاری و کود طی مراحل واسنجی (۱۳۹۹) و صحت‌سنجی (۱۴۰۰) در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، در تمام تیمارها، ابتدا پوشش گیاهی روندی افزایشی داشته و به بیشترین مقدار خود رسید و پس از آن، تا چند روز تقریباً ثابت ماند و سپس، تا انتهای فصل رشد روندی کاهشی داشت. سطح زیر منحنی-ها، مبین درصد پوشش سبز است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، اعمال تنش کودی (۵۰ درصد) به علت کاهش رشد و تولید برگ‌ها و افزایش پیری آن‌ها، باعث کاهش روند توسعه پوشش گیاهی شده است که نتایج شبیه‌سازی با مدل AquaCrop نیز نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی روند توسعه پوشش گیاهی توسط مدل نیز تحت تنش کودی کاهش یافته است. در مطالعات مشابهی بیان شده است که مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل رضایت‌بخش بود، زیرا مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده پوشش گیاهی به‌خوبی مطابقت داشتند (Pawar et al., 2017). در بررسی دیگر بیان شده است که یک همبستگی قوی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده واسنجی و اعتبارسنجی وجود داشت (Shirazi et al., 2021).

ماده خشک

مقایسه رشد ماده خشک واقعی و شبیه‌سازی شده برای تیمارهای مختلف آبیاری و کود نیتروژن، طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، در شکل ۳ ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، در تمام تیمارها ابتدا ماده خشک رشد آهسته داشت، امّا با گذشت چند روز، تجمع ماده خشک با شیب بیشتری افزایش یافت و پس از آن، تجمع ماده خشک ثابت ماند. این واقعیت که تجمع ماده خشک شبیه‌سازی شده با تجمع ماده خشک اندازه‌گیری شده مطابقت دارد، از این رویکرد پشتیبانی می‌کند و الگوریتم مورد استفاده برای تجمع ماده خشک را تأیید می‌کند (Heng et al., 2009).

مقدار RMSE برای مرحله واسنجی بین ۱/۰۷ تا ۲/۱ تن در هکتار و در مرحله صحت‌سنجی بین ۱/۴ تا ۲/۹ تن در هکتار به‌دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت (d) در این شبیه‌سازی در تیمارهای مختلف طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

1- Crop cover

بین ۰/۹۶ و ۱ به‌دست آمد. ضریب کارآیی مدل (EF) در شبیه‌سازی ماده خشک ذرت در مرحله واسنجی بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۸ و در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ بود (جدول ۳). براساس این نتایج، می‌توان بیان کرد که توسعه واقعی و شبیه‌سازی شده ماده خشک در تمام تیمارها با مقادیر d و EF بالا و مقادیر پایین RMSE مطابقت بالایی داشت. گزارش شده است که مدل AquaCrop باتوجه به مقادیر بالای d، R^2 و E بالا و RMSE پایین، قادر به شبیه‌سازی قابل قبولی از ماده خشک تحت تیمارهای آبیاری بهینه است (Abedinpour, 2021).

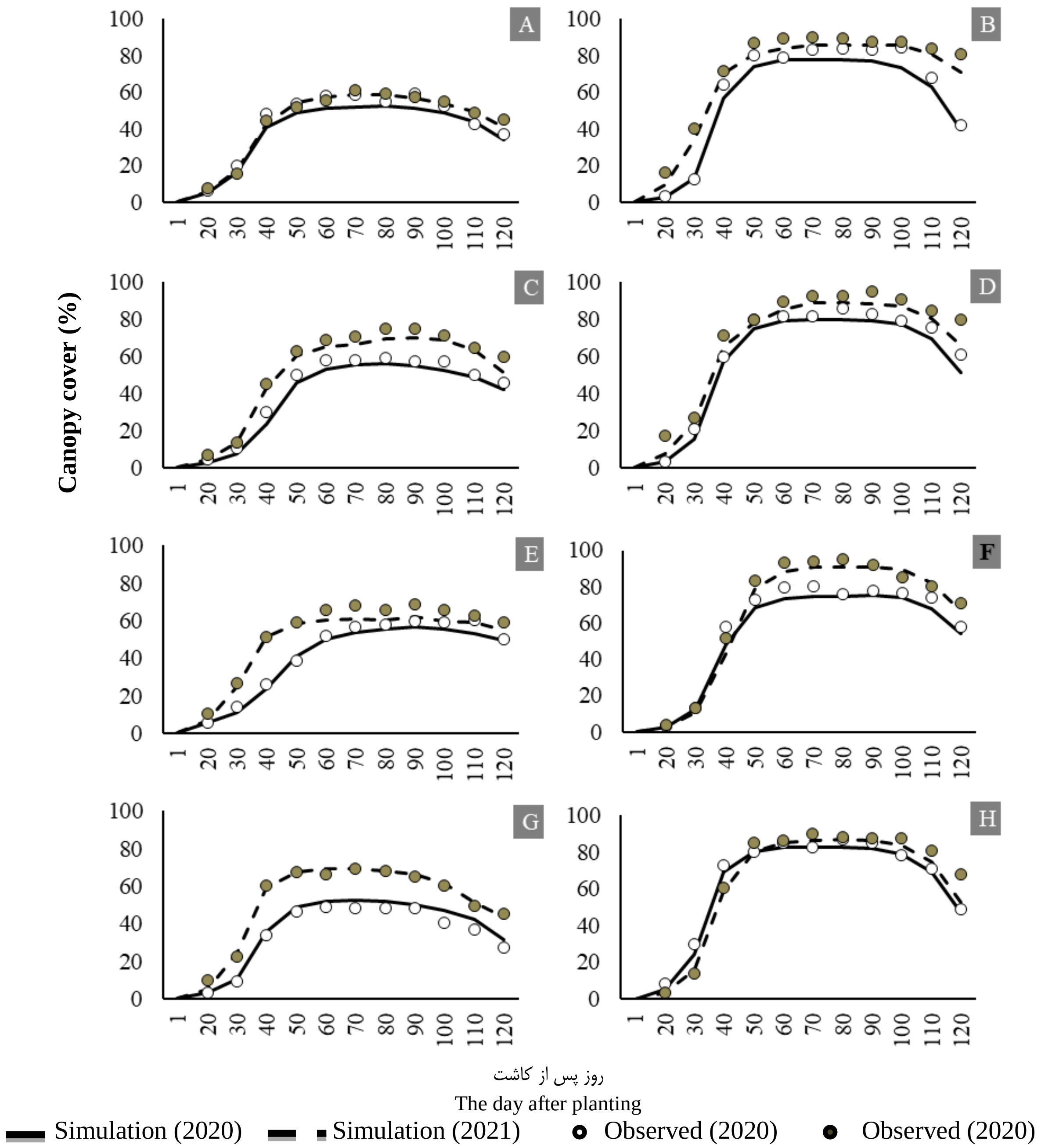
جدول ۳- شاخص‌های آماری پوشش گیاهی و ماده خشک شبیه‌سازی شده توسط AquaCrop تحت تیمارهای مختلف آبیاری و کود در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Table 3- Statistical indices of crop cover and dry matter simulated by AquaCrop under different irrigation and fertilizer treatments in 2020 and 2021

سال Year	تیمار Treatment	پوشش گیاه Cover crop			ماده خشک Biomass		
		RMSE[1] (%)	EF[2]	d[3]	RMSE (ton.ha^{-1})	EF	d
واسنجی (۱۳۹۹) Calibration (2020)	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	3.0	0.99	1.0	1.07	0.97	0.99
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	3.6	0.94	0.99	2.1	0.87	0.96
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{100}$	6.1	0.96	0.99	1.1	0.98	1.0
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{50}$	1.5	0.99	1.0	1.4	0.97	0.99
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{100}$	4.8	0.97	0.99	1.2	0.98	0.99
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{50}$	3.8	0.96	0.99	1.1	0.97	0.99
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{100}$	5.6	0.99	1.0	2.0	0.96	0.99
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{50}$	5.1	0.91	0.97	1.5	0.94	0.99
صحت‌سنجی (۱۴۰۰) Validated (2021)	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	5.6	0.96	0.99	2.2	0.97	0.99
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	2.1	0.97	0.99	2.9	0.92	0.98
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{100}$	4.2	0.98	1.1	1.4	0.99	1.0
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$- fertiliter$_{50}$	4.7	0.93	0.98	2.0	0.97	0.99
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{100}$	6.4	0.94	0.99	2.0	0.96	0.99
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$- fertiliter$_{50}$	4.1	0.97	0.99	2.3	0.96	0.99
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{100}$	5.2	0.95	0.99	2.2	0.96	0.99
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$- fertiliter$_{50}$	2.0	0.99	1.0	2.1	0.93	0.98

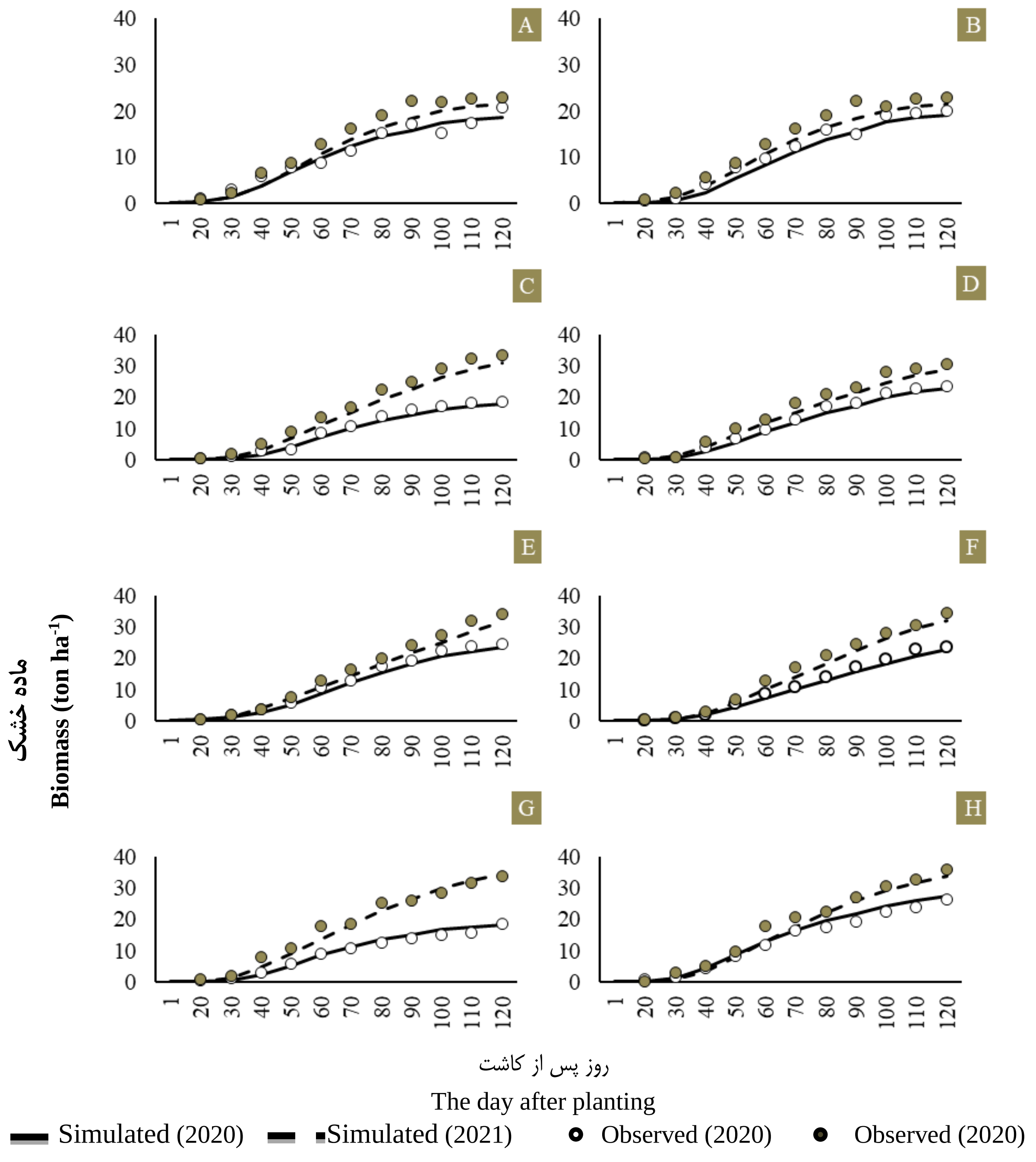
۱: ریشه میانگین مربعات خطا، ۲: کارایی مدل، ۳: شاخص توافق

1: Root Mean Square Error, 2: Model Efficiency, 3: Index of Agreement



شکل ۲- مقایسه رشد پوشش گیاهی واقعی و شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای سطحی ۵۰-کود۵۰ (A)، سطحی ۵۰-کود۱۰۰ (B)، سطحی ۷۰-کود۵۰ (C)، سطحی ۷۰-کود۱۰۰ (D)، سطحی ۱۰۰-کود۵۰ (E)، سطحی ۱۰۰-کود۱۰۰ (F)، فتیله-کود ۵۰ (G)، فتیله-کود ۱۰۰ (H) طی دو فصل رشد (۱۳۹۹ و ۱۴۰۰)

Fig. 2- Comparison of observed and simulated canopy cover under the treatments of surface$_{50}$-fertilizer$_{50}$ (A), surface$_{50}$-fertilizer$_{100}$ (B), surface$_{70}$-fertilizer$_{50}$ (C), surface$_{70}$-fertilizer$_{100}$ (D), surface$_{100}$-fertilizer$_{50}$ (E), Surface$_{100}$-fertilizer$_{100}$ (F), wick-fertilizer$_{50}$ (G), wick-fertilizer$_{100}$ (H) during two growing seasons (2020 and 2021)



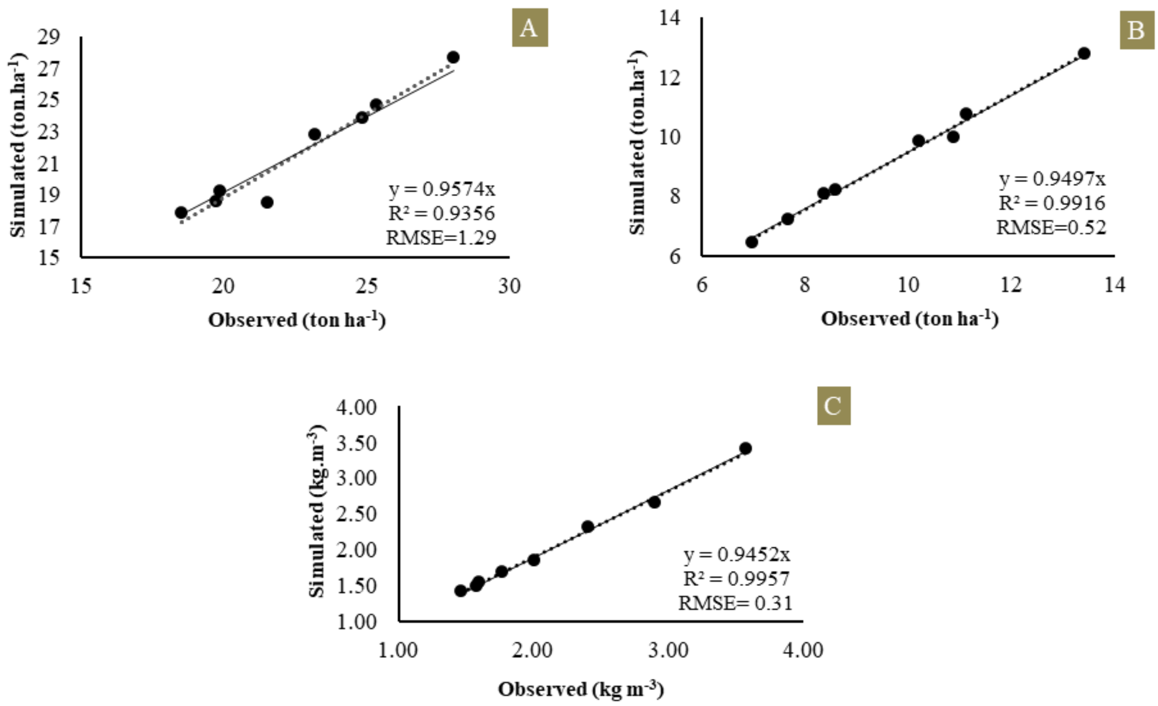
شکل ۳- مقایسه توسعه ماده خشک واقعی و شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای سطحی ۵۰-کود۵۰ (A)، سطحی ۵۰-کود۱۰۰ (B)، سطحی ۷۰-کود۵۰ (C)، سطحی ۷۰-کود۱۰۰ (D)، سطحی ۱۰۰-کود۵۰ (E)، سطحی ۱۰۰-کود۱۰۰ (F)، فتیله-کود ۵۰ (G)، فتیله-کود ۱۰۰ (H) طی دو فصل رشد (۱۳۹۹ و ۱٤۰۰)

Fig. 3- Comparison of observed and simulated biomass development under the treatments of surface50-fertilizer50 (A), surface50-fertilizer100 (B), surface70-fertilizer50 (C), surface70-fertilizer100 (D), surface100-fertilizer50 (E), Surface100-fertilizer100 (F), wick-fertilizer50 (G), wick-fertilizer100 (H) during two growing seasons (2020 and 2021)

عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب

مقایسه بین عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و واقعی توسط مدل AquaCrop طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی طی دو سال آزمایش در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. با

توجه به این شکل، AquaCrop توانسته است که بهره‌وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل را به‌خوبی شبیه‌سازی کند، به‌طوری‌که ضریب تبیین (R^2) به‌منظور واسنجی مربوط به بهره-وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل ذرت به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۰/۹۳ به‌دست آمد (شکل ۴). در مرحله صحت‌سنجی، مقدار R^2 برای بهره‌وری آب، عملکرد دانه و ماده خشک کل ذرت به‌ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۰/۹۷ و ۰/۹۶ بود (شکل ۵). گزارش شده است که مقادیر مناسب آمارها، برای مجموعه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی عملکرد استفاده شود (Abedinpour, 2021).



شکل ٤- رابطه بین ماده خشک کل (A)، عملکرد دانه (B) و بهره‌وری آب (C) واقعی و شبیه‌سازی شده به‌منظور واسنجی AquaCrop (سال ۱۳۹۹)

Fig. 4- Relationship between observed and simulated total biomass (A), seed yield (B) and water productivity (C) for AquaCrop calibration (2020 year)

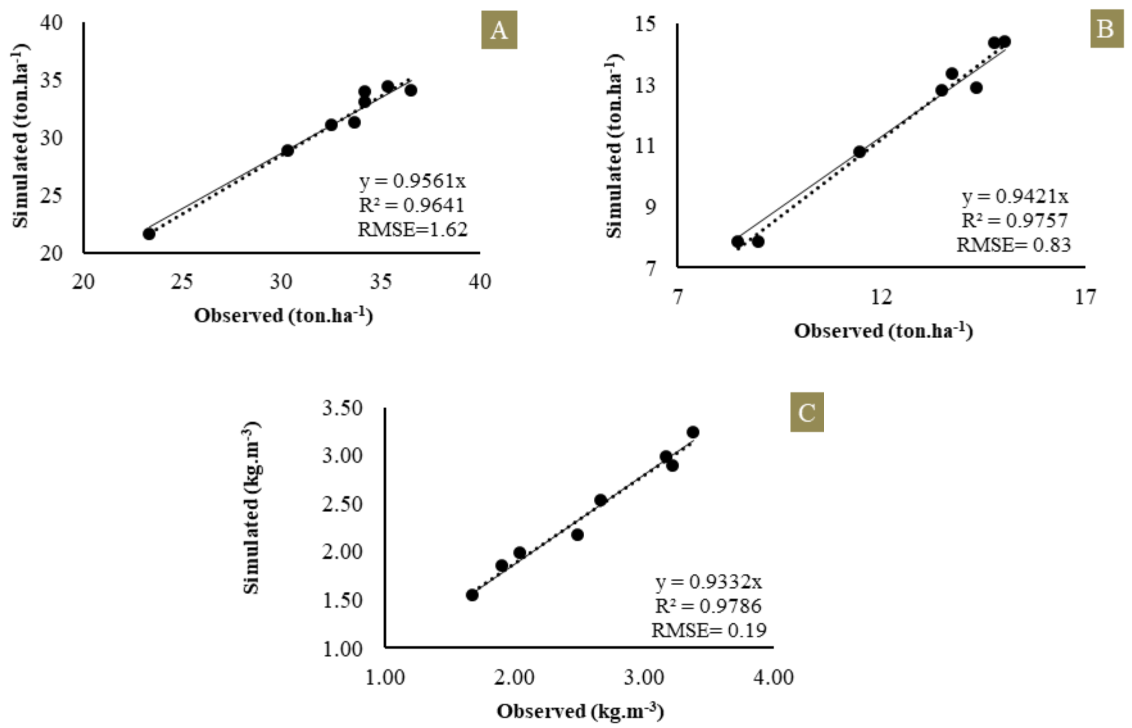
نتایج مشخصه‌های آماری مربوط به شبیه‌سازی عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب با استفاده از مدل AquaCrop، در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقدار RMSE برای عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب به‌ترتیب برابر با ۰/۵۲، ۱/۲۹ و ۰/۳۱ در مرحله واسنجی و ۰/۸۳، ۱/۶۳ و ۰/۱۹ در مرحله صحت‌سنجی بود. با توجه به اینکه مقدار RMSE برای هر سه صفت پایین بود، این امر نشان می‌دهد که شبیه‌سازی به‌خوبی انجام گرفته است. در تحقیقات مشابه نشان داده شده است که مدل AquaCrop به‌وضوح قادر به شبیه‌سازی عملکرد دانه در محدوده قابل قبولی است (Umesh et al., 2022). همچنین بیان شده است که زیست‌توده کل شبیه‌سازی شده به‌شدت با داده‌های مشاهده شده همبستگی دارد (Amiri, 2016).

ارزیابی نتایج به‌دست آمده از مدل AquaCrop بر عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی عملکرد دانه، ماده خشک کل و بهره‌وری آب مربوط به تیمارهای آبیاری فتیله‌ای-کود۵۰ و آبیاری سطحی۵۰-کود ۵۰ بود. در تحقیقات مشابه گزارش شده است که بیشترین انحراف برای عملکرد دانه در مورد تیمار دیم شبیه‌سازی شد. آن‌ها این احتمال را دادند که رشد تاج‌پوشش تحت تنش شدید آب تسریع می‌شود و

سیستم ریشه زیرزمینی ممکن است محدود و از اسـتخراج بیشـتر آب ذخیره شده در خاک جلوگیری کرده و در نتیجه، جذب آب آن محدود گردد (Iqbal et al., 2014). در یک بررسی گزارش شد کـه بهتـرین شبیه‌سازی در تیمارهایی بود که کم‌تـرین تـنش در آن اتفـاق افتـاده اسـت. بنـابراین، هرچـه تـنش افـزایش یابـد، مقـادیر شـبیه‌سـازی و مشاهدات اختلاف بیشتری پیدا خواهنـد کـرد (Azizi Mobaser et al., 2022). به نظر می‌رسد که در روش‌های آبیاری کامـل، هرگونـه کمبود آب ناشی از بارش جبران می‌شود، که این مدل را قادر می‌سازد تا نتایج را با اطمینان معقول اندازه‌گیری کند. بنـابراین، ایـن مـدل در روش‌های آبیاری کامل عملکرد نسـبتاً خـوبی دارد (Shirazi et al., 2021). عابدین¬پـور (Abedinpour, 2020) مـدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکـرد سـویا و بهـره‌وری آب در سـطوح مختلـف آبیاری و تاریخ کاشت در شمال شرق ایران مـورد ارزیـابی قـرار داد و بیان کرد که نتایج واسـنجی مـدل AquaCrop بـرای بهـره‌وری آب تحت تیمـار آبیـاری کامـل بهتـر از تیمارهـای کـم آبیـاری در تمـام تاریخ‌های کاشت بود.

نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی و ماده خشـک ذرت تحت دو روش آبیاری فتیله‌ای و سطحی و نرخ‌های مختلف کود نیتروژن کالیبره و اعتبارسنجی شد. به‌طور کلی، این مدل، دقت قابـل قبولی در شبیه‌سازی مـاده خشـک محصـول تحـت سـطوح مختلـف آبیاری و کود نیتروژن نشان داد (RRMSE: 1.07-2.9). علاوه‌براین، دقت شبیه‌سازی تیمار سطحی۱۰۰-کود۵۰ (سال اول) و سطحی۵۰-کود۵۰ (سال دوم) برای پوشش گیاهی بهتر از سایر تیمارها بود. امّا با مقایسه تیمارهای مختلف آبیاری، دقت شبیه‌سازی در آبیاری فتیلـه‌ای نسبت به سایر تیمارها پایین‌تر بود. همچنین، دقت این مدل در شبیه-سازی، ابتدا در بهره‌وری آب و سپس، عملکرد دانه بهتر از ماده خشک کل بود که می‌تواند ناشی از خطا در اندازه‌گیـری باشـد. شـبیه‌سـازی عملکرد دانه، ماده خشک و بهره‌وری آب در هر دو مرحله واسـنجی و صحت‌سنجی در تمامی تیمارها کمتر از مقدار واقعی بود.



شکل ۵- رابطه بین ماده خشک کل (A)، عملکرد دانه (B) و بهره‌وری آب (C) واقعی و شبیه‌سازی شده به‌منظور صحت‌سنجی AquaCrop (سال ۱۴۰۰)

Fig. 5- Relationship between observed and simulated total biomass (A), seed yield (B) and water productivity (C) for AquaCrop validation model (2021 year)

جدول ٤- عملکرد دانه، ماده خشک و بهره‌وری آب واقعی و شبیه‌سازی شده توسط AquaCrop تحت تیمارهای آبیاری و کود در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Table 4- Observed and simulated yield, biomass and water productivity by AquaCrop under irrigation and fertilizer treatments in 2020 and 2021

سال Year	تیمار Treatment	عملکرد دانه Yield ($t.ha^{-1}$)		ماده خشک Biomass ($ton.ha^{-1}$)		بهره‌وری آب water productivity ($kg.m^{-3}$)	
		واقعی Observed	شبیه‌سازی Simulated	واقعی Observed	شبیه‌سازی Simulated	واقعی Observed	شبیه‌سازی Simulated
2020	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	13.42	12.78	28.05	27.64	3.57	3.40
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	10.89	9.98	19.71	18.57	2.90	2.66
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{100}$	11.12	10.78	24.83	23.84	1.60	1.55
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{50}$	10.22	9.84	25.36	24.66	1.47	1.42
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{100}$	8.60	8.22	23.20	22.78	1.77	1.70
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{50}$	7.68	7.24	18.52	17.85	1.58	1.49
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{100}$	8.37	8.07	19.88	19.23	2.41	2.32
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{50}$	6.98	6.43	21.50	18.43	2.01	1.85
2021	فتیله-کود ۱۰۰ Wick-fertiliter$_{100}$	15.02	14.41	36.53	34.05	3.38	3.24
	فتیله-کود ۵۰ Wick-fertiliter$_{50}$	14.33	12.87	34.17	33.11	3.22	2.89
	سطحی۱۰۰-کود۱۰۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{100}$	14.78	14.35	34.17	34.00	2.05	1.99
	سطحی۱۰۰-کود۵۰ Surface$_{100}$-fertiliter$_{50}$	13.75	13.36	35.33	34.46	1.90	1.85
	سطحی۷۰-کود۱۰۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{100}$	13.50	12.78	30.33	28.83	2.67	2.53
	سطحی۷۰-کود۵۰ Surface$_{70}$-fertiliter$_{50}$	8.50	7.82	33.67	31.26	1.68	1.55
	سطحی۵۰-کود۱۰۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{100}$	11.48	10.79	32.50	31.08	3.18	2.99
	سطحی۵۰-کود۵۰ Surface$_{50}$-fertiliter$_{50}$	8.99	7.85	23.33	21.62	2.49	2.17

بیشترین اختلاف مقادیر واقعی و شبیه‌سازی عملکـرد دانـه، مـاده خشک کل و بهره‌وری آب در تیمارهـای فتیلـه‌ای (سـال اول و دوم) مشاهده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت کـه AquaCrop به‌خوبی و در حد انتظارات بـرای منطقـه مـورد مطالعـه انتخاب شد و توانایی AquaCrop در زمینه ارائه یک مدل کم‌آبیـاری مانند روش فتیله‌ای مناسب و کاربردی است. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود که واسنجی و صحت‌سـنجی مـدل AquaCrop و تهیـه فایـل‌هـای گیاهی برای مقایسه آبیاری فتیله‌ای با سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نیز استفاده شود.

References

1. Abedinpour, M. (2016). Testing of AquaCrop model for maize under different water and nitrogen managements. *Journal of Agroecology and Natural Resource Management, 3*(1), 6-9.
2. Abedinpour, M. (2020). Evaluation of AquaCrop model in soybean cultivation under different planting dates and deficit irrigation treatments. *Iran Agricultural Research, 39*(2), 37-46. https://doi.org/10.22099/IAR.2020.36152.1391
3. Abedinpour, M. (2021). The comparison of DSSAT-CERES and AquaCrop models for wheat under water–nitrogen interactions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52*(17), 2002-2017. https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1908323
4. Adeboye, O.B., Schultz, B., Adeboye, A.P., Adekalu, K.O., & Osunbitan, J.A. (2021). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture, 8*(3), 419–436. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.002
5. Alishiri, R., Paknejad, F., & Aghayari, F. (2014). Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by aqua crop. *International Journal of Biosciences, 4*(4), 1-9. https://doi.org/10.12692/ijb/4.4.1-9
6. Amiri, E. (2016). Calibration and testing of the Aquacrop model for rice under water and nitrogen management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 47*(3), 387-403. https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123719
7. Azizi Mobaser, J.A., Ramazani Moghadam, J., & Asghari, A. (2022). Evaluating the efficiency of AquaCrop model for corn plant underwater and fertilizer management (Case study: Shush city). *Advanced Technologies in Water Efficiency, 2*(1), 67-84. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22126/ATWE.2022.7483.1014
8. Cui, Z., Effah, Z., Yan, B., Gao, Y., Wu, B., Wang, Y., Xu, P., Wang, H., Zhao, B., & Wang, Y. (2023). Water and nitrogen coupling increased the water-nitrogen use efficiency of oilseed flax. *Plants, 12*, 51. https://doi.org/10.3390/plants12010051
9. Dercas, N., Dalezios, N.R., Stamatiadis, S., Evangelou, E., Glampedakis, A., Mantonanakis, G., & Tserlikakis, N. (2022). AquaCrop simulation of winter wheat under different N management practices. *Hydrology, 9*(4), 1-20. https://doi.org/10.3390/hydrology9040056
10. Foster, T., Brozović, N., Butler, A.P., Neale, C.M.U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., & Hsiao, T.C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management, 181*, 18-22. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015
11. Greaves, G.E., & Wang, Y.M., (2016). Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water, 8*(12), 1-18. https://doi.org/10.3390/w8120557
12. Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal, 101*(3), 488-498. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs
13. Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., & del Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management, 135*, 61-72. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.012
14. López-Urrea, R., Domínguez, A., Pardo, J.J., Montoya, F., García-Vila, M., & Martínez-Romero, A. (2020). Parameterization and comparison of the Aquacrop and Mopeco models for a high-yielding barley cultivar under different irrigation levels. *Agricultural Water Management, 230*, 1-14.
15. Nazari, B., Liaghat, A., Akbari, M.R., & Keshavarz, M. (2018). Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural Water Management, 208*, 7–18. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.003
16. Pawar, G.S., Kale, M.U., & Lokhande, J.N. (2017). Response of AquaCrop model to different irrigation schedules for irrigated cabbage. *Agricultural Research, 6*(1), 73–81. https://doi.org/10.1007/s40003-016-0238-2
17. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield

response to water: ii. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, *101*(3), 438-447. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s

18. Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2021). Simulating crop response to nitrogen-deficiency stress using the critical nitrogen concentration concept and the AquaCrop. *Scientia Horticulturae*, *285*(110194), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110194
19. Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., & Shahidi, A. (2014). Evaluation and comparison of aqua crop and FAO models for yield prediction of winter wheat under environmental stresses. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, (JBES) 4*(6), 438-449.
20. Shirazi, S.Z., Mei, X., Liu, B., & Liu, Y. (2021). Assessment of the AquaCrop model under different irrigation scenarios in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, *257*, 1-17. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107120
21. Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm
22. Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Howell, T.A., Evett, S.R., Rojas-Lara, B.A., Farahani, H.J., Izzi, G., Oweis, T.Y., Wani, S.P., Hoogeveen, J., & Geerts, S. (2009). Concepts and applications of crop: The Fao crop water productivity model. Crop Modeling and Decision Support, Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 175–191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0_19
23. Umesh, B., Reddy, K.S., Polisgowdar, B.S., Maruthi, V., Satishkumar, U., Ayyanagoudar, M.S., Rao, S., & Veeresh, H. (2022). Assessment of climate change impact on maize (*Zea mays* L.) through aqua crop model in semi-arid alfisol of southern Telangana. *Agricultural Water Management*, *274*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107950
24. Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Vila, M.G., & Moreno, P.M. (2014). Aqua Crop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, *62*, 351-360. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005
25. Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *63*(1), 1309–1313. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2
26. Wu, H., Yue, Q., Guo, P., Xu, X., & Huang, X. (2022). Improving the Aqua Crop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation-optimization of irrigation and fertilizer schedules. *Agricultural Water Management*, *266*, 107599. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107599
27. Zhang, C., Xie, Z., Wang, Q., Tang, M., Feng, S., & Cai, H. (2022). Aqua Crop modelling to explore optimal irrigation of winter wheat for improving grain yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, *266*, 107580. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107580

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 4, 2025, p. 745-762

Evaluation of Yield and Yield Components of Different Ecotypes of Black Seed (*Nigella sativa* L.) to Planting Date in Gorgan

Mohammad Sadeq Ashrafi[1], Farshid Ghaderi-Far[2]*, Elias Soltani[3], Ebrahim Zeinali[4] and Asieh Siahmarguee[4]

1, 2 and 4- M.Sc. Graduate, Professor and Associate, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively
3- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran
(*- Corresponding author's Email: farshidghaderifar@gau.ac.ir)

Received: 07-08-2024 Revised: 27-10-2024 Accepted: 09-11-2024 Available Online: 22-01-2025	**How to cite this article:** Ashrafi, M.S., Ghaderi-Far, F., Soltani, E., Zeinali, E., & Siahmarguee, A. (2025). Evaluation of yield and yield components of different ecotypes of black seed (*Nigella sativa* L.) to planting date in Gorgan. *Journal of Agroecology, 16*(4), 745-762. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/ /AGRY.2024.89219.1206

Introduction

The use of medicinal plants has been done since ancient times and may even be considered the origin of modern medicine. Medicinal plants are a source of biomolecules with therapeutic potential and lead to development of new drugs. Black Seed (*Nigella sativa* L.), often referred to as a "miracle herb," is a medicinal plant that has been used worldwide for centuries in the treatment and prevention of diseases such as cancer and diabetes. Additionally, it has been valued as a spice and flavouring agent in products like bread and sweets .

Various factors influence the growth and yield of black seed per unit area, with the planting date being particularly significant. The timing of planting affects environmental conditions during the plant's growth stages, influencing the rates of vegetative and reproductive growth and ultimately impacting yield. Therefore, selecting the appropriate planting time is crucial for the successful cultivation of any crop, including black seed. The aim of this research is to determine the most suitable planting date of black seed for this plant and the response of different ecotypes of this medicinal plant to the planting date in the weather conditions of Gorgan city.

Materials and Methods

In order to evaluate different ecotypes of black seed in response to planting dates in Gorgan, a field experiment with four planting dates was carried out in the cropping year of 2020-2021 at the research farm of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. The experiment was carried out in the form of split plots based on completely randomized block statistical design with three replication, in which four planting dates were 18th December, 17th January, 16th February and 18th March as the main plot and thirteen ecotypes (Such as Tafaresh, Gardmiran, Razan, Hamedan, Arak, Esfahan, Semirom, Eqlid, Ashkazar, Zabol,

https://doi.org/10.22067/ /AGRY.2024.89219.1206

Bajestan, Sarayan and Khaf) with three replication were considered as sub-plot. In this research, the attributes of plant height, number of branches per plant, number of follicles per plant, number of grains per follicle, weight of 1000 grains and grain yield were measured. After harvesting, measurements were taken and then the data were analyzed with SAS 9.4 statistical software and means comparison was done with LSD's test in significance at 5% probability level. Graphs were prepared using Excel software.

Results and Discussion

The results showed that the interaction effects of planting date and ecotype on plant height, number of branches per plant, number of capsules per plant, number of grains per capsule and 1000-grain weight were significant. However, the main effects of planting date and ecotype on grain yield were significant, and the interaction effects were not significant. With the delay in planting, all measured traits decreased. The highest grain yield was obtained from the first planting date (December 18) with 1245 kg per ha. The highest grain yield was obtained from Khaf (1245 $kg.ha^{-1}$), Sarayan (1179 $kg.ha^{-1}$), Bajestan (1156 $kg.ha^{-1}$), Zabol (1141 $kg.ha^{-1}$) and Esfahan (1117 $kg.ha^{-1}$) ecotypes. In contrast, the lowest grain yield was obtained from the fourth (March 18) planting date with 694 $kg.ha^{-1}$. The lowest grain yield was obtained from Arak and Gardmiran ecotypes with 903 and 890 kg.ha, respectively. With the delay in planting, the grain yield of high-yield ecotypes decreased linearly (8-9 kg.ha for each day of delay in planting), with the difference that the decrease in grain yield in the Bajestan ecotype (5.8 kg.ha for each day of delay in planting) was less than other ecotypes, which indicates the high adaptability of this ecotype to the planting date and environmental conditions of Gorgan. Also, there is a positive and significant correlation between grain yield and traits of plant height (0.73**), number of branches per plant (0.56**), number of follicles per plant (0.83**), number of grains per follicle (0.84**) and 1000- grain weight (0.55**).

Conclusion

In general, the results of this research showed that planting date and ecotype have a significant effect on black seed yield, and it is recommended to plant high-yield ecotypes in December to obtain higher grain yield in Gorgan and additional tests should be done in this area for final confirmation.

Keywords: Environmental conditions, Medicinal plant, Neglected plants

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ۷٦۲-۷٤٥

ارزیابی عملکرد و اجزاء عملکرد اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) به تاریخ کاشت در گرگان

محمدصادق اشرفی[۱]، فرشید قادری‌فر[۲]*، الیاس سلطانی[۳]، ابراهیم زینلی[٤] و آسیه سیاهمرگویی[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

چکیده

به‌منظور ارزیابی اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) در پاسخ به تاریخ کاشت، آزمایش مزرعه‌ای با چهار تاریخ کاشت در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در شهرستان گرگان به اجرا در آمد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار صورت گرفت که در آن چهار تاریخ کاشت ۲۸ آذرماه، ۲۸ دی‌ماه، ۲۸ بهمن‌ماه و ۲۸ اسفندماه به‌عنوان فاکتور اصلی و ۱۳ اکوتیپ (جمع‌آوری شده از نقاط مختلف ایران) به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند. در این تحقیق، صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه در بوته، تعداد فولیکول در بوته، تعداد دانه در فولیکول، وزن هزار دانه و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با تأخیر در کاشت، کلیه صفات اندازه‌گیری شده کاهش یافت. بیشترین عملکرد دانه از تاریخ کاشت اول (۱۲۴۵ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد. همچنین از اکوتیپ‌های خواف، سرایان، بجستان، زابل و اصفهان بیشترین عملکرد دانه به‌دست آمد. با تأخیر در کاشت، عملکرد دانه اکوتیپ‌های پرعملکرد به‌صورت خطی کاهش یافت (۹-۸ کیلوگرم در هکتار به‌ازای هر روز تأخیر در کاشت)، با این تفاوت که کاهش عملکرد دانه در اکوتیپ بجستان (۵/۸ کیلوگرم در هکتار به‌ازای هر روز تأخیر در کاشت) کمتر از سایر اکوتیپ-ها بود که بیانگر سازگاری بالای این اکوتیپ به تاریخ کاشت و شرایط محیطی گرگان می‌باشد. همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه با صفات ارتفاع بوته (۰/۷۳)، تعداد شاخه در بوته (۰/۵۶)، تعداد فولیکول در بوته (۰/۸۳)، تعداد دانه در فولیکول (۰/۸۴) و وزن هزار دانه (۰/۵۵) وجود داشت. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که تاریخ کاشت و اکوتیپ تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه سیاهدانه دارند و ازاین‌رو، توصیه می‌شود که برای حصول عملکرد دانه بالاتر در گرگان، اکوتیپ‌های پرعملکرد در آذرماه کاشت شود و برای تأیید نهایی آزمایشات تکمیلی در این منطقه صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: شرایط محیطی، گیاهان فراموش شده، گیاه دارویی

مقدمه

امروزه گیاهان دارویی به‌عنوان منبع ارزشمندی از ترکیبات طبیعی برای استفاده در تولید داروهای ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی در نظر گرفته می‌شوند (Ketabchi & Papari Moghadamfard, 2021). تمایل به مصرف گیاهان دارویی امروزه با افزایش چشم‌گیری مواجه شده است (Gerami et al., 2024). برای رفع نیاز فزاینده به داروهای گیاهی، بایستی اقدامات لازم در خصوص کاشت و اهلی سازی این گیاهان انجام پذیرد. تأمین مواد اولیه برای صنایع داروسازی، نیاز به افزایش تولید محصول در واحد سطح دارد که عملی

۱، ۲ و ۴- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استاد و دانشیار، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳- دانشیار، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: farshidghaderifar@gau.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2024.89219.1206

ترین و اقتصادی‌ترین روش دستیابی به این مهم، افزایش کارآیی نهاده‌های مورد استفاده در زراعت گیاهان دارویی می‌باشد (Moosazadeh, 2011).

سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) از خانواده آلاله (Ranunculaceae) به‌عنوان یکی از گیاهان دارویی می‌باشد که دانه‌ها، بخش دارویی این گیاه را تشکیل می‌دهند (Abbasnezhad, 2015; Khan, 1999). خواص دارویی متعددی از قبیل شیرآوری، ضد نفخ، مسهل و ضد انگل، ضد صرع و ضد ویروس، ضد باکتری، ضد سرطان، مسکن و کاهنده قند خون و محرک ایمنی برای این گیاه داوریی ذکر شده است (Khorsandi et al., 2014). این گیاه در گذشته برای اقشار کم‌درآمد و ضعیف جامعه از اهمیت زیادی برخوردار بوده و همچنین بخشی از سطح زیر کشت محصولات زراعی را به‌خود اختصاص می‌داد. در ادامه به‌دلیل کاهش تنوع زیستی کشاورزی و رواج تک‌کشتی در ایران در راستای توجه بیش از حد به چند محصول مانند گندم (*Triticum aestivum* L.) و کلزا (*Brassica napus* L.) از کشت سیاهدانه و دیگر گونه‌ها که می‌توانند نقش بسزایی در تأمین امنیت غذایی[1] داشته باشند، چشم‌پوشی شد. به تعبیری دیگر، این گیاه را می‌توان جزء گیاهان بسیار قدیمی به‌عنوان گیاهان فراموش شده در نظر گرفت که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان و کشاورزان قرار گرفته است و ازاین‌رو، تحقیقات در جنبه‌های زراعی و اکولوژیکی به‌منظور افزایش عملکرد و بهبود خصوصیات کمّی و کیفی دانه‌های سیاهدانه در حال انجام می‌باشد. یکی از جنبه‌های زراعی مهم برای حصول عملکرد بالا در هر گیاه، تعیین تاریخ کاشت مناسب می‌باشد، به‌طوری‌که در تاریخ کاشت و شرایط محیطی مناسب، مراحل رویشی و زایشی گیاهان با شرایط مطلوب محیطی منطبق شده و موجب افزایش تولید می‌گردد (Vatandoost & Madandoust, 2021).

تحقیقات مختلفی در زمینه اثرات تاریخ کاشت بر عملکرد سیاهدانه صورت گرفته است. در پژوهشی که در شهر قاینات انجام شد، مشاهده شد که اثر تاریخ کاشت بر صفات عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک، ارتفاع بوته، وزن هزاردانه، شاخص برداشت، تعداد فولیکول در بوته و تعداد دانه در فولیکول سیاهدانه تأثیر معنی‌داری داشت. در این پژوهش بیان شد که کاشت زودهنگام سیاهدانه به‌دلیل پایین بودن دمای خاک و صدمات ناشی از یخبندان موجب استقرار ضعیف گیاه در بهار می‌گردد و تأخیر در کاشت به‌علت کوتاه شدن دوره رشد گیاه و احتمال برخورد دوره گل‌دهی با درجه حرارت بالا منجر به کاهش عملکرد سیاهدانه می‌گردد (Rezvani Moghaddam & Ahmadzadeh Motlagh, 2007). در بررسی دیگری که پژوهشگران روی تاریخ کاشت گیاه سیاهدانه در مشهد انجام دادند، بیان کردند که تفاوت در فصل کاشت، تأثیر معنی‌داری در عملکرد و اجزاء عملکرد این گیاه دارد (Safaei et al., 2017). نتایج حاصل از پژوهشی که روی گیاه سیاهدانه به‌منظور بررسی اثر تاریخ کاشت بر عملکرد و اجزاء عملکرد این گیاه انجام شد، بیانگر این بود که تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر صفات ذکر شده علی‌الخصوص عملکرد دانه دارد، به‌طوری‌که با تأخیر در کاشت، کاهش معنی‌داری در صفاتی همچون عملکرد دانه، تعداد فولیکول، تعداد دانه در فولیکول و وزن هزار دانه مشاهده شد (Rezvani et al., 2021). در رابطه با تأثیر تاریخ کاشت بر عملکرد گیاه سیاهدانه، پژوهشی روی این گیاه در مرکز تحقیقات ملی بذر گیاهان ادویه‌ای هندوستان (ICAR[2]) انجام شد و از نتایج این بررسی تأثیرپذیری عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه سیاهدانه از تاریخ کاشت‌های متفاوت استنتاج شد (Kant et al., 2018). آن‌ها نیز مانند دیگر پژوهشگران به این نتیجه که با کاشت تأخیری، به‌دلیل کاهش طول دوره رشد و هم‌زمانی مرحله زایشی، به‌ویژه گرده‌افشانی و پرشدن دانه با درجه حرارت بالا، عملکرد و اجزاء عملکرد نیز کاهش می‌یابند، دست یافتند. در مطالعه‌ای دیگر که روی تاریخ کاشت‌های متفاوت گیاه سیاهدانه در چهار تاریخ کاشت (۵ نوامبر، ۲۰ نوامبر، ۵ دسامبر، ۲۰ دسامبر) در بنگلادش انجام شد، مشاهده شد که تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد فولیکول در بوته، تعداد دانه در فولیکول، وزن هزاردانه و عملکرد دانه دارد (Masud, 2021). همچنین در پژوهشی که در کردستان عراق روی تاریخ کاشت دو گونه سیاهدانه در دو فصل پاییز (۲ نوامبر، ۲۱ نوامبر، ۱۱ دسامبر، ۳۱ دسامبر و ۲۰ ژانویه) و بهار (۱ مارس، ۲۰ مارس، ۱۰ آوریل و ۱ می) صورت گرفت، نشان داده شد که صفاتی همچون تعداد گل در بوته، تعداد فولیکول در بوته، تعداد دانه در فولیکول، وزن هزاردانه و عملکرد دانه در هر دو فصل متغیر و تحت تأثیر تاریخ کاشت قرار گرفتند. به‌طوری‌که تمامی صفات در کشت پاییزه، بیشترین مقدار را ثبت کردند (Al-Zubaidy et al.,

---

1- Food security

2- Indian Council of Agricultural Research

2020).

در طی چند سال اخیر، کاشت سیاهدانه مورد استقبال کشاورزان استان گلستان قرار گرفته است، امّا آمار دقیقی از سطح زیر کاشت این گیاه وجود ندارد و براساس آمار غیررسمی خبرگزاری‌ها، در چند ساله گذشته حدود ۱۰۰۰ هکتار از زمین‌های کشاورزی استان زیر کشت این گیاه رفته است. امّا اطلاعات چندانی در زمینه تاریخ کاشت این گیاه در استان وجود ندارد. همچنین کشاورزان به رقم اصلاح شده یا اکوتیپ با پتانسیل عملکرد بالا دسترسی ندارند و اکثراً از بذرهای بدون شناسنامه مشخص و با عملکرد پایین و نامناسب برای برداشت مکانیکی استفاده می‌کنند. ازاین‌رو، استفاده از یک اکوتیپ یا رقم با خصوصیات زراعی مطلوب و عملکرد بالا در افزایش سودآوری کشاورزان حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت این موضوع، هدف از این پژوهش، تعیین مناسب‌ترین تاریخ کاشت برای این گیاه و واکنش اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی سیاهدانه به تاریخ کاشت در شرایط آب‌وهوایی شهر گرگان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی واکنش اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت در گرگان، آزمایش مزرعه‌ای در مزرعه آموزشی شماره یک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان واقع در کیلومتر ۴ جاده قدیم گرگان- کردکوی در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی انجام شد. ارتفاع منطقه از سطح دریا حدود ۱۲ متر با وضعیت آب‌وهوایی معتدل و نیمه‌مرطوب (مدیترانه‌ای) با متوسط بارندگی ۶۰۷ میلی‌متر در سال و متوسط کمینه و بیشینه دما به‌ترتیب ۳/۴ و ۳۳/۲ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱). بافت خاک مزرعه لوم رسی سیلتی می-باشد.

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی در طول فصل رشد سیاهدانه

Table 1- Meteorological information during the growing season of black seed

	دی January	بهمن February	اسفند March	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July
کمینه دما $T_{Minimum}$ (°C)	2.58	1.75	4.81	4.15	11.48	16.73	20.71
بیشینه دما $T_{Maximum}$ (°C)	15.81	19.33	14.61	18.51	25.77	30.71	33.45
میزان بارندگی Precipitation (mm)	27.9	37.4	65.1	74.7	46.2	10.2	22.3
درصد رطوبت نسبی Relative humidity (%)	74.05	75.69	80.99	84.42	76.35	64.62	62.48

بذرهای ۱۳ اکوتیپ مختلف سیاهدانه از مناطق مختلف ایران جمع‌آوری و در دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان پاکدشت دانشگاه تهران کشت شد (جدول ۲). ازاین‌رو، بذرهای اکوتیپ‌ها از دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان تهیه و برای کاشت در این طرح استفاده شد.

به‌منظور آماده‌سازی بستر کشت، ابتدا توسط گاوآهن برگردان‌دار شخم و سپس دو مرتبه عمودبرهم دیسک زده شد. جهت تسطیح زمین در مرحله آخر یک ماله به انتهای دیسک متصل گردید. قبل از عملیات دیسک، کودهای مورد نیاز (۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم کود اوره) به‌صورت دستی به خاک اضافه شد. همچنین کود اوره به‌صورت سرک به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله گل‌دهی همراه با آبیاری به خاک اضافه شد (Rezvani Moghaddam et al., 2014). آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده (اسپلیت پلات[1]) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ اجرا گردید. در این آزمایش، تاریخ کاشت در چهار سطح (۲۸ آذر ماه، ۲۸ دی ماه، ۲۸ بهمن ماه و ۲۵ اسفند ماه ۱۳۹۹) به‌عنوان فاکتور اصلی و اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در ۱۳ سطح به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. کاشت اکوتیپ‌های مختلف به‌صورت دستی در تاریخ کاشت‌های مورد نظر انجام شد. در هر تکرار، ۱۳ جمعیت به‌صورت چهار خط دو متری با

1- Split-plot

فاصله بین ردیف ۲۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف پنج سانتی‌متر کشت شد. برای اطمینان از تراکم مطلوب (۱۰۰ بوته در متر مربع)، بذرها در ردیف‌های کاشت با تراکم بذر بالا کاشت شدند. سپس بعد از سبز شدن، عملیات تنک نهایی برای حصول تراکم مطلوب انجام شد. برای مقابله با علف‌های هرز در طول فصل رشد، وجین دستی انجام شد.

جدول ۲- اسامی اکوتیپ‌های سیاهدانه مورد مطالعه

Table 2- Names of studied black seed ecotypes

نام اکوتیپ	Ecotypes name
تفرش	Tafresh
گردمیران	Gardmiran
رزن	Razan
همدان	Hamedan
اراک	Arak
اصفهان	Esfahan
سمیرم	Semirom
اقلید	Eqlid
اشکذر	Ashkezar
زابل	Zabol
بجستان	Bajestan
سرایان	Sarayan
خواف	Khaf

آبیاری زمین نیز به‌صورت غرقابی در دو مرحله در طی فصل رشد صورت گرفت. زمان برداشت گیاه سیاهدانه براساس ظهور علائم رسیدگی در گیاه انجام گرفت. علایم رسیدگی سیاهدانه شامل زرد شدن و خشک شدن بوته‌ها و ریزش برگ‌ها، قهوه‌ای شدن فولیکول و سیاه و سفت شدن بذور در فولیکول بود. برای اندازه‌گیری اجزاء عملکرد اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در هر تاریخ کاشت، ابتدا ۱۰ بوته از هر تکرار برداشت شده و صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد فولیکول در بوته، تعداد دانه موجود در هر فولیکول و وزن هزار دانه اندازه‌گیری و ثبت گردید. لازم به ذکر است که تاریخ برداشت با توجه به تاریخ کاشت و اکوتیپ متفاوت بود که در تاریخ کاشت اول، دوم، سوم و چهارم به‌ترتیب ۲۰۴-۱۹۲، ۱۸۳-۱۶۸، ۱۵۳-۱۴۰ و ۱۳۰-۱۲۰ روز از کاشت تا برداشت بین اکوتیپ‌ها متغیر بود. به‌منظور ارزیابی عملکرد دانه، در هر کرت پس از حذف نیم متر از ابتدا و انتهای کرت و حذف دو خط کناری، به‌دلیل از بین بردن اثرات حاشیه، عملکرد دانه‌های دو ردیف میانی به‌طول یک متر از هر کرت برداشت و توزین شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها، برازش مدل‌های رگرسیون خطی و نمودار جعبه‌ای[1] با نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام شد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

تعداد شاخه در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تاریخ کاشت، اکوتیپ و اثرات متقابل تاریخ کاشت و اکوتیپ بر تعداد شاخه در بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). در تاریخ کاشت اول و دوم، بیشترین تعداد شاخه در بوته در اکوتیپ‌های زابل و بجستان مشاهده شد. درحالی‌که در تاریخ کاشت سوم، اختلاف آماری بین اکوتیپ‌ها مشاهده نشد و در تاریخ کاشت چهارم، بیشترین تعداد شاخه در اکوتیپ‌های گردمیران و رزن مشاهده شد. با نزدیک شدن به تاریخ کاشت چهارم به‌دلیل همزمانی دوره رشدی گیاه با دمای بالا، فرصت رشد رویشی از گیاه کاسته شده و در نهایت، بدون تکمیل اندام‌های رویشی همانند شاخه-ها در مقایسه با تاریخ کاشت مطلوب، گیاه وارد فاز زایشی می‌شود. در پژوهشی روی گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* willd) مشاهده شد که کاهش سهم اندام رویشی گیاه با تأخیر در کاشت، دلیل کاهش تعداد شاخه‌ها است. همچنین در این پژوهش بیان شد که اختلاف در صفات رویشی از اختلاف و تفاوت‌های ژنتیکی اکوتیپ‌های مختلف حاصل می‌شود (Fazeli et al., 2021). در پژوهشی که روی گیاه سیاهدانه صورت گرفت، مشاهده شد که بین اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در تعداد شاخه‌های جانبی تنوع وجود دارد. همچنین با توجه به اینکه شرایط محیطی مطالعه برای همه اکوتیپ‌ها برابر بود، بیان شد که تفاوت‌های موجود در اکوتیپ‌ها در اثر تفاوت ژنتیکی آن‌ها ایجاد شده است (Mohebodini et al., 2019). همچنین در پژوهشی که روی گیاه بادرشبویه (*Dracocephalum moldavica* L.) انجام شد، مشاهده شد که تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر تعداد شاخه جانبی دارد. براساس نتایج این پژوهش بیان شد که در تاریخ کاشت‌های زودتر با توجه به مصادف شدن دوره رشدی گیاه با دمای مطلوب‌تر، فرصت بیشتری برای رشد و توسعه وجود داشته است، امّا در تاریخ کاشت‌های دیرتر به‌علت وجود دمای بالا با کاهش رشد و توسعه گیاه، از میزان شاخه‌های جانبی گیاه کاسته است (Zeynali

---

5- Box-plot

(Charkandi et al., 2021).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مرفولوژیک، اجزاء عملکرد و عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت‌های مختلف

Table 3- Analysis of variance (mean of squares) for morphological traits, yield components and seed yield of black seed ecotypes in response to different planting dates

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares					
		تعداد شاخه در بوته No. of branches per plant	ارتفاع در زمان رسیدگی برداشت Plant height	تعداد فولیکول در بوته No. of follicle per plant	تعداد دانه در فولیکول No. of grain in the follicle	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain yield
تکرار Replication	2	0.04ns	5.46ns	0.17ns	20.51**	0.0228**	72220.4ns
تاریخ کاشت Planting date (D)	3	44.45**	3992.07**	30.46**	11503.87**	0.64**	2869369.9**
خطای ۱ Error 1	6	0.03	5.89	0.17	16.63	0.08	80638.2
اکوتیپ Ecotype (E)	12	0.49**	49.00**	0.95**	118.06**	0.41**	176840.4**
E × D	36	1.025**	39.12**	0.87**	60.81**	0.05**	27496.3ns
خطای ۲ Error 2	96	0.10	7.60	0.26	1.72	0.0006	25991.8
ضریب تغییرات C.V (%)	-	7.08	4.22	9.65	1.92	1.17	15.54

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

*, ** and ns: are significant at 0.05 and 0.01 probability levels and non significant, respectively

ارتفاع بوته

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد کـه بـین اکوتیـپ‌ها و تاریخ کاشت‌ها و همچنین اثر متقابل اکوتیپ و تاریخ کاشت در ارتفاع بوته در زمان رسیدگی اختلاف معنی‌دار وجود داشت (جدول ۳). نتـایج نشان داد که با تأخیر در کاشت، میزان ارتفاع بوته در زمـان رسـیدگی در اکوتیپ‌ها کاهش یافت. بیشترین مقدار کاهش ارتفاع برای اکوتیپ اشکذر بود و کمترین مقدار کاهش ارتفاع برای اکوتیپ‌های سـمیرم و تفرش به ثبت رسید. همچنین در تمام تاریخ کشت‌هـا، اخـتلاف بـین اکوتیپ‌ها از نظر ارتفاع در زمان رسیدگی معنی‌دار بود (جدول ۵)، به‌طوری‌که در تاریخ کاشـت اول، بیشـترین ارتفـاع در زمـان رسـیدگی متعلق به اکوتیپ زابل و در تاریخ کاشت دوم و سوم، بیشترین ارتفـاع در زمان رسیدگی متعلق به اکوتیپ تفـرش بـود. همچنـین در تـاریخ کاشت چهارم، اکوتیپ‌های اراک و اشکذر بیشترین ارتفاع را در زمـان رسیدگی برداشت داشتند. با نزدیـک شـدن بـه زمـان تـاریخ کاشـت چهارم، به‌دلیل کاهش طول دوره رشدی گیـاه سـیاهدانه و همزمـانی این دوره با گرمای هوا و ورود به فاز زایشی سبب کاهش ارتفاع بوتـه در زمان گل‌دهی شد. همچنین ویژگی ژنتیکی برخی از اکوتیپ‌هـا در معنـی‌دار شـدن ایـن صـفت تـأثیر بسـزایی دارد. بـه عبـارت دیگـر، اکوتیپ‌هایی از قبیل تفرش، گردمیران و سمیرم با تـأخیر در کاشـت، ارتفاع بوته آن‌ها تغییر چندانی نکرد و دارای ارتفاع بوته ثـابتی بودنـد. در مطالعه‌ای اعلام شد که با تأخیر در کاشت از ۱۵ اکتبر تا ۳۰ نوامبر با کوتاه‌تر شدن دوره رشد به‌طور قابـل تـوجهی ارتفـاع بوتـه کـاهش یافت (Mahmood et al., 2012). نتایج حاصل از مطالعه‌ای که روی سیاهدانه در مناطق گرمسیری و مرطوب هند صورت گرفت، نشان داد که تاریخ کاشت‌های مختلف تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع این گیاه داشت (Giridhar et al., 2017). در رابطه با تأثیر اکوتیپ بر ارتفـاع بوتـه، نتایج حاصل از این تحقیق با یافته‌های پژوهشی که در اتیوپی و ایران روی ارقام مختلف سیاهدانه انجام شد، همسـو بـود. در ایـن پـژوهش بیان شد که بین این ارقام از لحاظ ارتفـاع گیـاه اخـتلاف معنـی‌داری وجـود داشـت (Assefa et al., 2015; Saydi et al., 2022). همچنین در مطالعه‌ای که روی ۳۰ اکوتیپ از سیاهدانه صورت گرفتـه بود، مشاهده شد که بین اکوتیپ‌های مختلف از سیاهدانه و همچنـین

تاریخ کاشت‌های مختلف از نظر ارتفاع بوته در زمان برداشت اختلاف معنی‌دار وجود دارد (Golkar & Nourbakhsh, 2019).

تعداد فولیکول در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تاریخ کاشت و اکوتیپ بر تعداد فولیکول در بوته معنی‌دار بود، همچنین اثر متقابل اکوتیپ و تاریخ کاشت نیز بر تعداد فولیکول در بوته تأثیر معنی‌دار داشت (جدول ۳). نتایج بیانگر این است که با تأخیر در کاشت، تعداد فولیکول در بوته در همه اکوتیپ‌ها کاهش یافت. تعداد فولیکول در بوته بین اکوتیپ‌های مختلف در تاریخ کاشت‌های مختلف متفاوت بود (جدول ۶). در تاریخ کاشت اول، اکوتیپ زابل بیشترین تعداد فولیکول در بوته را به خود اختصاص داد. در تاریخ کاشت دوم، اکوتیپ تفرش بیشترین تعداد فولیکول در بوته را داشت و همچنین در تاریخ کاشت-های سوم و چهارم، بیشترین تعداد فولیکول در بوته از اکوتیپ‌های بجستان، سرایان و خواف به‌دست آمد. با نزدیک شدن به تاریخ کاشت چهارم، به‌دلیل کوتاه شدن طول دوره رشد و محدود شدن رشد رویشی و تولید شاخه‌های جانبی کمتر و به‌دنبال آن تولید تعداد گل کمتر در فاز زایشی، تعداد فولیکول در هر بوته نیز تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش پیدا می‌کند. این پدیده در اکوتیپ‌های دیررس‌تر مشهودتر بود.

جدول ٤- مقایسه میانگین تعداد شاخه جانبی در بوته اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت

Table 4- Mean comparison of the average number of branches per plant of different black seed ecotypes in response to planting date

اکوتیپ Ecotype	تاریخ کاشت اول First planting date	تاریخ کاشت دوم Second planting date	تاریخ کاشت سوم Third planting date	تاریخ کاشت چهارم Fourth planting date
تفرش Tafresh	7.00	6.33	6.33	4.33
گردمیران Gardmiran	6.00	6.00	6.67	5.33
رزن Razan	7.00	6.00	6.67	5.33
همدان Hamedan	6.33	7.00	6.67	5.00
اراک Arak	6.33	6.00	6.67	5.00
اصفهان Esfahan	7.00	7.00	6.67	4.33
سمیرم Semirom	7.00	7.00	6.67	4.00
اقلید Eqlid	6.00	7.00	6.33	3.33
اشکذر Ashkezar	7.00	7.00	6.33	3.67
زابل Zabol	8.00	7.00	6.00	4.33
بجستان Bajestan	8.00	7.00	6.00	4.67
سرایان Sarayan	6.67	7.00	6.00	4.67
خواف Khaf	7.00	6.00	6.33	4.33
LSD (0.05)	0.001^{**}	0.27^{**}	0.878^{ns}	1.01^{**}

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

*, ** and ns: are significant at 0.05 and 0.01 probability levels and non significant, respectively

در نتایج حاصل از مطالعه‌ای که روی تاریخ کاشت‌های مختلف سیاهدانه صورت گرفت، مشاهده شد که تاریخ کاشت تأثیر بسزایی بر تعداد فولیکول در بوته دارد (Kazerani et al., 2005). در پژوهشی که با بررسی سه تاریخ کاشت نیمه اول و دوم اسفند و نیمه اول فروردین در سیاهدانه انجام شد، گزارش شد که دو تاریخ کاشت اول به‌دلیل استفاده از بارندگی و استقرار بهتر گیاه در خاک، بیشترین تعداد فولیکول در بوته را داشتند. همچنین بیان شد که سیاهدانه، گیاهی گل انتهایی و رشد محدود است و گل و میوه فقط در انتهای هر شاخه تشکیل می‌شود و تعداد فولیکول در بوته از تعداد شاخه‌های گل دهنده تبعیت می‌کند و احتمالاً تأخیر در کاشت باعث کاهش تعداد شاخه‌های گل‌دهنده و از طرفی، برخورد مرحله گل‌دهی سیاهدانه با هوای گرم شده است که این موضوع باعث ریزش گل‌ها و کاهش تعداد فولیکول در گیاه گردید که با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق همسو می‌باشد (Javadi, 2008).

تعداد دانه در فولیکول

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده این است که اثرات اصلی تاریخ کاشت و اکوتیپ و همچنین اثر متقابل اکوتیپ و تاریخ کاشت بر تعداد بذر در فولیکول تأثیر معنی‌داری دارد (جدول ۳). همان‌طور که در نتایج نشان داده شد، این تأثیر به‌صورت کاهشی است. همچنین در همه تاریخ کاشت‌ها، بین اکوتیپ‌ها در تعداد دانه در فولیکول اختلاف معنی‌دار وجود داشت (جدول ۷)، به‌طوری‌که بیشترین تعداد دانه در تاریخ کاشت اول و دوم در اکوتیپ اصفهان، در تاریخ کاشت سوم در اکوتیپ رزن و در تاریخ کاشت چهارم در اکوتیپ‌های اراک و بجستان مشاهده شد. کاهش تعداد دانه در فولیکول در تاریخ کاشت‌های انتهایی به‌دلیل خلأ رشد گیاه در طول دوره رشد و کم بودن سطح سبز گیاه می‌باشد. پرشدن دانه از انتقال مجدد مواد ذخیره شده در برگ‌ها تبعیت می‌کند. بنابراین، هر چه طول دوره رشد کمتر باشد، تعداد شاخ فرعی و برگ در بوته کمتر و به دنبال آن انتقال کمتر و در نهایت، کاهش تعداد دانه در فولیکول رخ می‌دهد.

در این رابطه، محققان مطالعاتی را انجام دادند و بیان داشتند که تأخیر در زمان کاشت با کوتاه شدن طول دوره رشد سبب تأثیر منفی بر محتوای نسبی آب برگ و رنگیزه‌های فتوسنتزی شده است. کاشت دیرهنگام باعث کوتاه شدن دوره رشد رویشی می‌شود و گیاه زودتر از آن وارد مرحله زایشی شده است. بنابراین احتمالاً همزمان شدن مراحل انتهایی رشد با تنش دمایی آخر فصل سبب کاهش شدید دانه در فولیکول می‌شود. همچنین پژوهشگران دیگری نیز در مطالعات خود اظهار داشتند که با تأخیر در کاشت، کاهش محسوسی در تعداد دانه در فولیکول حادث می‌شود. (Bahramifar & Baziar, 2022; Mahmood et al., 2012; Majumder et al., 2012

وزن هزاردانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که وزن هزاردانه تحت تأثیر معنی‌دار اثرات اصلی اکوتیپ، تاریخ کاشت و اثر متقابل اکوتیپ و تاریخ کاشت قرار گرفت (جدول ۳). همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده، روند کاهش در وزن هزاردانه از تاریخ کاشت اول الی تاریخ کاشت چهارم بین اکوتیپ‌ها قابل شهود است (جدول ۸). به این ترتیب که در تاریخ کاشت اول و چهارم اکوتیپ خواف، در تاریخ کاشت دوم اکوتیپ اشکذر و در تاریخ کاشت سوم اکوتیپ بجستان، بیشترین وزن هزاردانه را به خود اختصاص دادند.کاهش در وزن هزاردانه همانند دیگر صفات اجزاء عملکرد دانه به‌دلیل کاهش طول دوره رشد و همچنین عدم تکمیل اندام‌های فتوسنتزکننده و به دنبال آن خلأ در انتقال مجدد طی پرشدن دانه رخ می‌دهد. به این ترتیب، کاهش وزن هزاردانه با نزدیک شدن به تاریخ کاشت چهارم قابل شهود است. در این خصوص، تحقیقات مختلفی صورت گرفت که نشان داد، وزن هزار دانه تحت تأثیر معنی‌دار اکوتیپ و تاریخ کاشت قرار گرفت و با نتایج حاصل از این تحقیق برابر بود. در نتایج حاصل از مطالعه‌ای بیان شد که صفت وزن هزاردانه تحت تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت قرار گرفت. برای توجیه این نتیجه این‌طور بیان شد که ممکن است در تاریخ کاشت مطلوب به‌دلیل مساعد بودن عوامل محیطی در طول دوره رشد، گیاه قادر است تا علاوه‌بر رشد رویشی بیشتر، تولید محصولات فتوسنتزی بیشتر و ذخیره در منبع (source) و در نهایت، تقسیم و انتقال بهتر و بیشتر به مخزن (sink) را داشته باشد که با یافته‌های حاصل از این تحقیق برابری می‌کند (Waliullah et al., 2021). در همین راستا، در پژوهشی که روی گیاه سیاهدانه انجام شد، مشاهده گردید که تاریخ کاشت تأخیری به سبب کاهش دوره طول رشد و خلاء در انتقال مواد به دانه تأثیر بسزایی در کاهش وزن هزاردانه دارد (MASUD, 2021). در مطالعه-

ای که روی ۱۰ رقم سیاهدانه صورت گرفت، مشاهده شد که بین ارقام مختلف سیاهدانه از نظر وزن هزاردانه اختلاف معنی‌داری وجود دارد که با نتایج به‌دست آمده از این تحقیق هم‌خوانی دارد (Prakhova, 2022).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که عملکرد تحت تأثیر معنی‌دار اکوتیپ و تاریخ کاشت قرار گرفت، امّا اثر متقابل اکوتیپ و تاریخ کاشت بر عملکرد معنی‌دار نبود (جدول ۳). با تأخیر در کاشت، عملکرد دانه در همه اکوتیپ‌ها به‌صورت خطی کاهش یافت. میانگین عملکرد دانه در تاریخ کاشت اول، دوم، سوم و چهارم به‌ترتیب ۱۳۵۵، ۱۰۲۰، ۱۰۸۰ و ۶۹۴ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۱- الف). همچنین بیشترین عملکرد دانه از اکوتیپ خواف با ۱۲۴۵ کیلوگرم در هکتار حاصل شد (شکل ۱- ب). همچنین اکوتیپ‌های سرایان، بجستان، زابل و اصفهان به‌ترتیب با عملکرد دانه ۱۱۷۹، ۱۱۵۶، ۱۱۴۱ و ۱۱۱۷ کیلوگرم در هکتار بعد از اکوتیپ خواف دارای بالاترین عملکرد دانه بودند. کمترین عملکرد دانه به‌ترتیب از اکوتیپ‌های اراک و گردمیران با عملکرد ۹۰۳ و ۸۹۰ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد.

جدول ۵- مقایسه میانگین ارتفاع بوته (سانتی‌متر) در زمان رسیدگی برداشت اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت

Table 5- Mean comparison of the average plant height (cm) at the time of harvest of different black seed ecotypes in response to planting date

اکوتیپ Ecotype	تاریخ کاشت اول First planting date	تاریخ کاشت دوم Second planting date	تاریخ کاشت سوم Third planting date	تاریخ کاشت چهارم Fourth planting date
تفرش Tafresh	67.00	62.33	54.00	52.33
گردمیران Gardmiran	70.67	61.33	48.33	54.67
رزن Razan	71.67	56.00	49.67	50.33
همدان Hamedan	69.00	54.67	43.67	53.33
اراک Arak	70.33	57.67	43.00	57.67
اصفهان Esfahan	67.33	52.00	45.00	43.67
سمیرم Semirom	68.67	59.67	54.00	52.67
اقلید Eqlid	70.33	54.00	47.00	46.00
اشکذر Ashkezar	72.67	49.00	43.33	57.67
زابل Zabol	75.67	55.00	49.33	48.67
بجستان Bajestan	75.00	49.33	48.33	49.67
سرایان Sarayan	70.67	52.67	46.67	53.00
خواف Khaf	69.67	50.67	45.00	52.33
LSD (%5)	3.658**	1.615**	1.674**	7.124**

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

*, ** and ns: are significant at 0.05 and 0.01 probability levels and non significant, respectively

برای درک بهتر واکنش عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت، معادله رگرسیون خطی ساده به داده‌های

عملکرد دانه در مقابل تاریخ کاشت برازش داده شد (شکل ۲). همان طور که مشاهده می‌شود، با تأخیر در کاشت در کلیه اکوتیپ‌ها، عملکرد دانه به‌صورت خطی کاهش یافت که شیب کاهش عملکرد بین اکوتیپ‌ها متفاوت بود. بیشترین کاهش عملکرد دانه به‌ازای هر روز تأخیر در کاشت در اکوتیپ‌های سرایان، خواف، زابل و اصفهان با ۸-۹ کیلوگرم در هکتار به‌ازای هر روز تأخیر در کاشت مشاهده شد. کمترین کاهش عملکرد در پاسخ به تاریخ کاشت در اکوتیپ اشکذر با ۳/۹ کیلوگرم در هکتار به‌ازای هر روز تأخیر در کاشت مشاهده شد. کاهش عملکرد سایر اکوتیپ‌ها نیز با حدود ۴-۶ کیلوگرم در هکتار کاهش عملکرد دانه به‌ازای هر روز تأخیر در کاشت بود. نکته قابل توجه این است که اکوتیپ‌های مورد استفاده در این مطالعه که دارای عملکرد دانه بالایی بودند (به‌استثنای بجستان) به تاریخ کاشت حساس‌تر بوده و کاهش عملکرد بیشتری در پاسخ به تاریخ کاشت نسبت به سایر اکوتیپ‌ها داشتند. امّا اکوتیپ بجستان با اینکه عملکرد دانه بالایی دارند، نسبت به اکوتیپ‌های پرعملکرد، حساسیت کمتری به تاریخ کاشت داشت و به‌ازای هر روز تأخیر در کاشت، کاهش عملکرد کمتری در آن مشاهده می‌شود، ازاین‌رو می‌توان بیان داشت که در بین اکوتیپ‌های پرعملکرد سیاهدانه، اکوتیپ بجستان علاوه‌بر عملکرد دانه بالاتر، سازگاری بیشتری به تاریخ کاشت داشته و کاهش عملکرد دانه کمتری دارد و می‌توان این اکوتیپ را به‌عنوان اکوتیپ برتر برای کاشت در این منطقه انتخاب کرد که برای تأیید آن نیاز به آزمایش‌های تکمیلی در مطالعات آتی دارد.

جدول ٦- مقایسه میانگین تعداد فولیکول در بوته اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت

Table 6- Mean comparison of the average number of follicle per plant of different black seed ecotypes in response to planting date

اکوتیپ Ecotype	تاریخ کاشت اول First planting date	تاریخ کاشت دوم Second planting date	تاریخ کاشت سوم Third planting date	تاریخ کاشت چهارم Fourth planting date
تفرش Tafresh	6.67	6.67	5.67	4.00
گردمیران Gardmiran	6.33	5.67	5.00	5.00
رزن Razan	6.00	5.67	5.33	5.00
همدان Hamedan	5.67	5.67	6.00	5.00
اراک Arak	6.00	5.33	5.67	5.00
اصفهان Esfahan	6.67	5.67	5.00	4.00
سمیرم Semirom	6.67	5.67	5.33	4.00
اقلید Eqlid	6.00	5.67	6.00	3.00
اشکذر Ashkezar	6.33	5.33	6.00	4.00
زابل Zabol	8.00	5.33	6.00	4.00
بجستان Bajestan	7.33	5.33	6.00	5.00
سرایان Sarayan	7.00	5.67	6.00	5.00
خواف Khaf	7.33	6.33	6.00	5.00
LSD (%5)	1.374*	1.013ns	0.562**	0.002**

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

*, ** and ns: are significant at 0.05 and 0.01 probability levels and non significant, respectively

جدول ۷- مقایسه میانگین تعداد دانه در فولیکول اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت

Table 7- Mean comparison of the average number of grains in the follicle of different black seed ecotypes in response to planting date

اکوتیپ Ecotype	تاریخ کاشت اول First planting date	تاریخ کاشت دوم Second planting date	تاریخ کاشت سوم Third planting date	تاریخ کاشت چهارم Fourth planting date
تفرش Tafresh	74.00	57.67	54.33	23.67
گردمیران Gardmiran	77.00	47.67	56.33	33.67
رزن Razan	72.33	52.33	63.33	31.67
همدان Hamedan	68.67	48.67	52.67	29.67
اراک Arak	75.33	48.00	46.00	37.67
اصفهان Esfahan	82.00	62.33	63.00	35.67
سمیرم Semirom	78.33	57.67	55.33	34.67
اقلید Eqlid	68.33	48.67	47.00	28.67
اشکذر Ashkezar	73.00	53.00	52.00	36.67
زابل Zabol	71.33	56.67	50.33	24.67
بجستان Bajestan	75.33	56.67	44.33	37.67
سرایان Sarayan	81.00	53.67	46.33	33.67
خواف Khaf	73.33	53.33	45.33	35.67
LSD (%5)	1.853**	2.638**	1.843**	0.001**

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

*, ** and ns: are significant at 0.05 and 0.01 probability levels and non significant, respectively

با تأخیر در کاشت، عملکرد به موازات کـاهش در اجـزاء عملکـرد کاهش می‌یابد. همان طور که هر یـک از عـواملی همچـون کـاهش طول دوره رشد، کاهش رشد و پیکره رویشی گیاه، همزمانی گـل‌دهی و گرده‌افشـانی بـا دمـای بـالای هـوا و خـلأ در انتقـال مجـدد مـواد فتوسنتزی طی پر شدن دانه سبب کـاهش اجـزاء عملکـرد مـی‌شـود، برآیند این عوامل موجب کاهش در عملکـرد دانـه نیـز مـی‌گـردد. در پژوهشی که در مزرعه تحقیقات کشاورزی دانشگاه هارینپور پاکسـتان روی گیاه سیاهدانه انجام شد، مشاهده گردید که عملکرد دانـه تحـت تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت قـرار دارنـد. پژوهشـگران در ایـن بررسـی اظهار داشتند که در کاشت با تأخیر به‌دلیل کاهش طـول دوره رشـد و همچنین همزمانی مرحله زایشی با شرایط نامطلوب هوایی، کاهش در عملکـرد و اجـزاء عملکـرد مشـهود اسـت (Mehmood, 2018). در پژوهشی که در شرایط آب‌وهوایی شهرستان فسا روی گیاه سـیاهدانه انجام شد، نشان داده شد که بین تاریخ کاشـت‌هـای مختلـف از نظـر عملکرد تفاوت معنی‌دار وجود دارد. در این رابطه بیان شد کـه کاشـت دیرهنگام باعث کوتاه شدن دوره رشد رویشی می‌شود و گیاه زودتـر از آن وارد مرحله زایشی شده است. بنـابراین احتمـالاً بـه‌دلیل همزمـان شدن مراحل انتهایی رشد با تنش دمـایی آخـر فصـل سـبب کـاهش شـدید عملکـرد مـی‌شـود (Bahramifar & Baziar, 2022). نتـایج پژوهش دیگر که روی ۲۰ اکوتیپ از سیاهدانه انجام شد، نشان دهنده این بود که با تأخیر در کشت، کاهش چشمگیری در عملکرد مشاهده-شد. گزارش‌ها حاکی از آن است کـه بـین اکوتیـپ‌هـای سـیاهدانه از لحاظ عملکرد دانه اختلاف وجود دارد (Shahbazi, 2019).

جدول ۸- مقایسه میانگین وزن هزار دانه (گرم) اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت

Table 8- Mean comparison of the average 1000 grain weight (grams) of different black seed ecotypes in response to planting date

اکوتیپ Ecotype	تاریخ کاشت اول First planting date	تاریخ کاشت دوم Second planting date	تاریخ کاشت سوم Third planting date	تاریخ کاشت چهارم Fourth planting date
تفرش Tafresh	2.229	1.921	1.921	1.938
گردمیران Gardmiran	2.165	2.091	1.853	1.952
رزن Razan	2.094	2.117	1.892	1.990
همدان Hamedan	2.164	1.903	1.853	1.748
اراک Arak	2.277	1.835	1.714	1.750
اصفهان Esfahan	2.469	2.328	2.155	2.052
سمیرم Semirom	2.234	1.825	1.665	1.608
اقلید Eqlid	2.147	1.835	1.605	1.856
اشکذر Ashkezar	2.435	2.355	2.106	2.001
زابل Zabol	2.204	1.988	1.928	1.910
بجستان Bajestan	2.195	2.192	2.169	2.071
سرایان Sarayan	2.005	2.313	2.095	2.015
خواف Khaf	2.583	2.178	2.125	2.084
LSD (%5)	0.072*	0.029*	0.013*	0.002*

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

*, ** and ns: are significant at 0.05 and 0.01 probability levels and non significant, respectively

در پژوهشی در شهر مشهد نشان داده شد که اکوتیپ‌های مختلف تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه دارند (Javadi Hedayatabad et al., 2014).

در مطالعه دیگری که روی ۲۸ اکوتیپ سیاهدانه در خراسان صورت گرفت مشاهده شد که اکوتیپ‌های مختلف تفاوت معنی‌داری در عملکرد دانه دارند (Faravani et al., 2006). در پژوهشی دیگر که در دو شهر اسپارتا[1] و اسکی‌شهیر[2] ترکیه روی پنج جمعیت بومی سیاهدانه صورت گرفت، مشاهده شد که عملکرد دانه تحت تأثیر معنی‌دار جمعیت قرار گرفت، به‌طوری‌که بیشترین عملکرد را جمعیت اوساک در هر دو منطقه و هر دوسال به ثبت رساند (Kara et al., 2015).

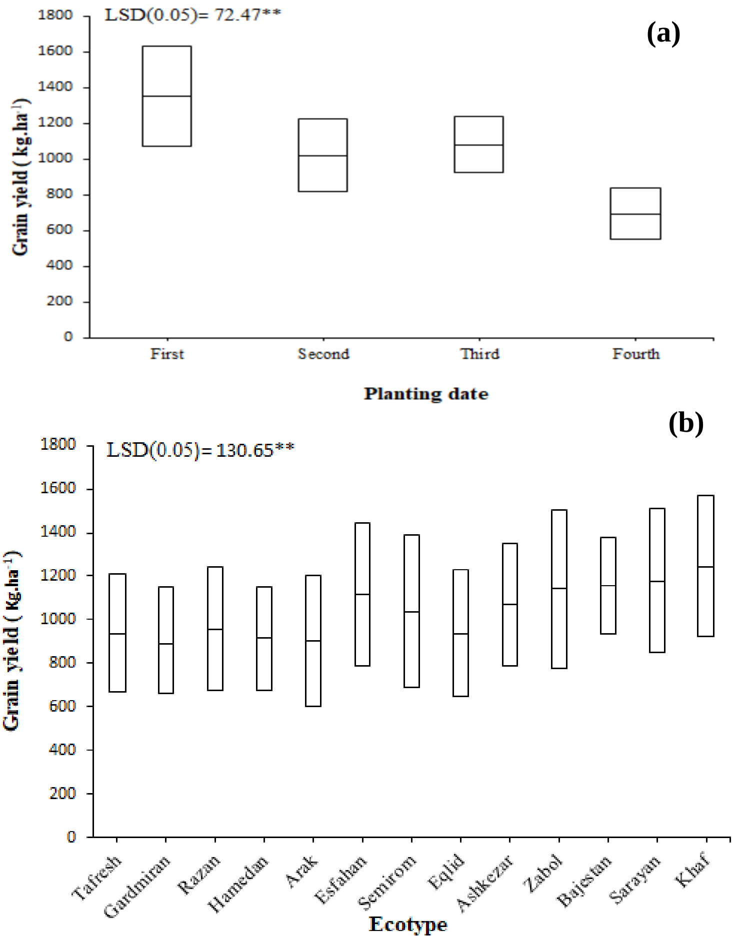
همبستگی صفات

عملکرد دانه در سیاهدانه با تعداد شاخه در بوته (۰/۷۴)، ارتفاع بوته در زمان رسیدگی برداشت (۰/۵۷)، تعداد فولیکول در بوته (۰/۸۳)، تعداد دانه فولیکول (۰/۸۴) و وزن هزار دانه (۰/۵۵) همبستگی مثبت و معنی‌نشان داد (جدول ۹). به عبارت دیگر، با افزایش این صفات، عملکرد دانه در اکوتیپ‌های سیاهدانه افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان بیان داشت که علت افزایش عملکرد دانه در تاریخ کاشت‌های مطلوب و اکوتیپ‌های پرعملکرد به‌دلیل ارتفاع و تعداد شاخه بیشتر و به دنبال آن تعداد فولیکول، تعداد دانه در فولیکول و وزن هزار دانه بیشتر می‌باشد. ازاین‌رو، این صفات از صفات

1- Isparta,Turkey

2- Iski Chahir,Turkey

تأثیرگذار بر عملکرد دانه در گیاه سیاهدانه می‌باشد که می‌توانند در تحقیقات آینده مدنظر اصلاح‌گران این گیاه قرار گیرد.



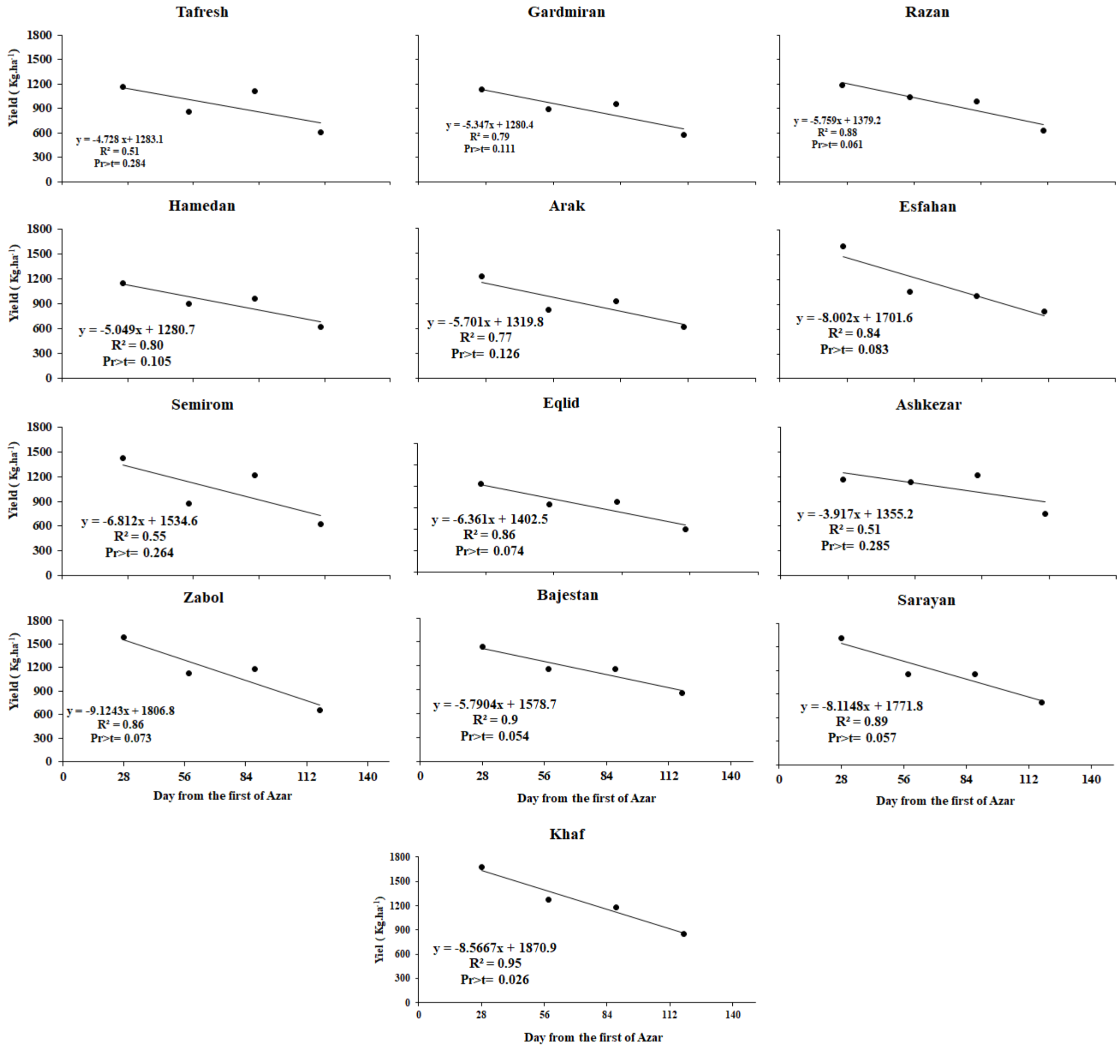
شکل ۱- مقایسه میانگین عملکرد سیاهدانه در پاسخ به تاریخ کاشت (a) و اکوتیپ (b) در شرایط اقلیمی گرگان

Fig. 1- Mean comparison of average yield of black seed in response to planting date (a) and ecotypes (b) In the climatic conditions of Gorgan

جدول ۹- همبستگی صفات اندازه‌گیری شده با عملکرد دانه اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه

Table 9- Correlation of measured traits with seed yield of different black seed ecotypes

	تعداد شاخه در بوته No. of branches per plant	ارتفاع بوته در زمان رسیدگی برداشت Height at harvesting	تعداد فولیکول در بوته No. of follicleper plant	تعداد دانه فولیکول No. of grain in the follicle	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain yield
تعداد شاخه در بوته No. of branches per plant	1					
ارتفاع بوته در زمان رسیدگی برداشت Height at harvesting	0.518 **	1				
تعداد فولیکول در بوته No. of follicleper plant	0.805 **	0.668 **	1			
تعداد دانه در فولیکول No. of grain in the follicle	0.776 **	0.736 **	0.79 **	1		
وزن هزار دانه 1000-grain weight	0.323*	0.325*	0.38 **	0.438 **	1	
عملکرد دانه Grain yield	0.734 **	0.567 **	0.833 **	0.841 **	0.553 **	1



شکل ۲- برازش مدل رگرسیون خطی به داده‌های عملکرد دانه در پاسخ به تاریخ کاشت در اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه

Fig. 2- Fitting the linear regression model to the grain yield data in response to planting date in different black seed ecotypes

محور ایکس زمان براساس روز از اول آذر می‌باشد.R^2، ضریب تبیین معادله و Pr>t سطح احتمال معنی‌داری را نشان می‌دهد.

x-axis is time based on days from the first of Azar. R^2, the coefficient of explanation of the equation and Pr>t indicates a significant probability level.

در مطالعه‌ای که روی گیاه سیاهدانه صورت گرفت، گزارش شد که ارتفاع بوته، تعداد فولیکول در بوته و تعداد دانه در فولیکول همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه داشتند (Akbarinia et al., 2005). در پژوهشی دیگر که در گیاه سیاهدانه صورت گرفت نشان داده شد که عملکرد دانه با تعداد دانه در فولیکول، وزن فولیکول، ارتفاع گیاه و وزن زیست‌توده دارای همبستگی بالا و مثبتی است (Ghorbanzadeh Neghab & Zare Mehrjerdi, 2018).

نتیجه‌گیری

از مجموع یافته‌های این تحقیق مشخص می‌شود که عملکرد دانه سیاهدانه تحت تأثیر مثبت اکوتیپ و تاریخ کاشت‌های مختلف می‌باشد. انتخاب تاریخ کاشت مناسب در ابتدا بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه تأثیرگذار بوده و در ادامه، با فراهم‌سازی مدت زمان مناسب برای طول دوره رشد گیاه و رشد رویشی کامل و همچنین عدم همزمانی گل‌دهی و گرده‌افشانی گیاه با شرایط محیطی نامناسب، تأثیر بسزایی در عملکرد و کیفیت دانه خواهد داشت. همچنین انتخاب اکوتیپ‌های مناسب و سازگار با شرایط محیطی منطقه به‌دلیل

خصوصیات ژنتیکی و طول دوره رشد متناسب با شرایط محیطی مورد نظر می‌تواند در حصول عملکرد بالای دانه تأثیرگذار باشد. ازاین‌رو، در برنامه به‌زراعی تولید گیاه دارویی سیاهدانه می‌توان تاریخ کاشت مطلوب و اکوتیپ متناسب با منطقه مورد تحقیق را توصیه نمود که در این تحقیق با توجه به نتایج، اکوتیپ‌های مختلف در تاریخ کاشت آذرماه بیشترین عملکرد را داشتند. همچنین می‌توان برای حصول عملکرد دانه بالاتر در این منطقه از اکوتیپ‌هایی پرعملکرد از قبیل بجستان، سرایان، زابل، اصفهان و خواف استفاده کرد که برای تأیید نهایی آن نیاز به تکرار آزمایش در چندین سال می‌باشد.

References

1. Abbasnezhad, A. (2015). Physiological effects of *Nigella sativa* seed on different body systems: A review study [review]. *Internal Medicine Today*, *21*(4), 71-81.
2. Akbarinia, A., Khosravifard, M., Rezaii, M.B., & Sharifi Ashoorabadi, E. (2005). Comparison of fall and spring cultivation on seed yield of some medicinal plant under irrigation and no-irrigation conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *21*(3), 319-334. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2005.115088
3. Al-Zubaidy, A.M., Ghafoor, B.S., & Rasul, A.A. (2020). The performance of two species of black cumin (*Nigella sativa* L.) and (*Nigella arvensis* L.) under different sowing dates in spring and autumn at Hallabja Governorate/Iraqi Kurdistan region. *Ibn AL-Haitham Journal for Pure and Applied Sciences*, *33*(3), 1-10. https://doi.org/10.30526/33.3.2465
4. Assefa, E., Alemayehu, A., & Mamo, T. (2015). Adaptability study of black cumin (*Nigella sativa* L.) varieties in the mid and high land areas of Kaffa zone, South West Ethiopia. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, *4*(1), 14-17. https://doi.org/10.11648/j.aff.20150401.13
5. Bahramifar, A., & Baziar, M.R. (2022). Improving the nutrient content, physiological indices and grain yield of black seed (*Nigella sativa* L.) with the application of vermicomposting at different planting dates. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *20*(2), 163-178. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.72537.1088
6. Faravani, M., Razavi, A.R., & Farsi, M. (2006). Study of variation in some agronomic and anatomic characters of *Nigella sativa* landraces in Khorasan. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *22*(3), 193-197. (In Persian with English abstract). https://ijmapr.areeo.ac.ir/article_101941_4115f2973f2ad5ff55d317a3ab38a5cf.pdf
7. Fazeli ,F., Akbari, G., Akbari, G.A., Naderi Arefi, A., & Benakashani, F. (2021). Response of different quinoa (*Chenopodium quinoa*) genotypes to planting date in terms of morphological traits, yield and yield components in Garmsar region. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *52*(2), 41-49. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.303866.654725
8. Gerami, M., Akbari Nodehi, D., Amiri, M., & Darvakh, E. (2024). Effects of calcium nano-particle on some physiologic and biochemical characteristics of *Ocimum basilicum* L. under salinity stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *40*(2), 415-400. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2024.131551
9. Ghorbanzadeh Neghab, M., & Zare Mehrjerdi, M. (2018). The study of genetic diversity, correlation between traits and path analysis in black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes. *Journal of Plant Production Research*, *25*(3), 1-12. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/jopp.2018.12268.2111
10. Giridhar, K., Reddy, G.S., Kumari, S.S., Kumari, A.L., & Sivasankar, A. (2017). Influence of sowing window and plant density on growth, phenology, yield and quality of *Nigella sativa* L. in coastal humid tropic. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(9), 499-512. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.609.060
11. Golkar, P., & Nourbakhsh, V. (2019). Analysis of genetic diversity and population structure in *Nigella sativa* L. using agronomic traits and molecular markers (SRAP and SCoT). *Industrial Crops and Products*, *130*, 170-178. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.074
12. Javadi, H. (2008). Effect of planting dates and nitrogen rates on yield and yieldcomponents of black cumin (*Nigella Sativa* L.) *Iranian Journal of Field Crop Research*, *6*(1), 59-66. (In Persian with English abstract).

https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1176
13. Javadi Hedayatabad, F., Nezami, A., Kafi, M., & Shabahang, J. (2014). Response of black seed ecotypes yeild (*Nigella sativa* L.) to planting dates in Mashhad conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12*(4), 632-640. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v12i4.45146
14. Kant, V., Meena, S., Meena, N., & Lal, G. (2018). Influence of different dates of sowing, fertilizer level and weedicides on growth and yield of nigella (*Nigella sativa* L.) under semi-arid conditions. *International Journal of Current Micribiology and Applied Sciences*, *7*(9), 1156-1167. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.709.137
15. Kara, N., Katar, D., & Baydar, H. (2015). Yield and quality of black cumin (*Nigella sativa* L.) populations: The effect of ecological conditions. *Turkish Journal of Field Crops*, *20*(1), 9-14. https://doi.org/10.17557/.23190
16. Kazerani, N., Abadi, L.S., Naeini, F.S., & Dashti, P. (2005). Effect of sowing date and sowing method on yield and yield components of medicinal plant of black cumin. National Conference of Medicinal Plants Sustainable Development. Mashhad, Iran. p. 175-176.
17. Ketabchi, S., & Papari Moghadamfard, M. (2021). Medicinal plants effective in the prevention and control of coronaviruses [Review paper]. *Complementary Medicine Journal*, *10*(4), 296-307. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.32598/cmja.10.4.1014.1
18. Khan, M.A. (1999). Chemical composition and medicinal properties of *Nigella sativa* Linn. *Journal of Inflammopharmacology*, *7*, 15-35. https://doi.org/10.1007/s10787-999-0023-y
19. Khorsandi, T., Nezami, A., Kafi, M., & Goldani, M. (2014). Effects of late spring forst on black seed (*Nigella sativa* L.) under controlled conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12*(4), 665-676. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v12i4.45150
20. Mahmood, T., Idress, M., Muhammad, N., Aslam, M., Akram, H.M., Sattar, A., & Ghaffar, A. (2012). Effect of sowing dates and method of sowing on the yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). National seminar on role of agronomy in national food security. Conference paper. Pakistan Society of Agronomy str. p.72-79.
21. Majumder, C., Pariari, A., Khan, S., & Singh, L. (2012). Determination of optimum date of sowing of black cumin (*Nigella sativa* L.) for gangetic alluvial plains of West Bengal. Proceedings of State level Seminar on Production and Management of Spices in West Bengal. https://sites.google.com/site/bckvspices/home/abs20121/abstract-16
22. Masud, A.A. (2021). Effect of date of sowing and spacing on growth and seed yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). A Thesis Submitted to the Institute of Seed Technology Sher-e-Bangla Agricultural University.
23. Mehmood, A. (2018). Sowing time and nitrogen application methods impact on production traits of kalonji (*Nigella sativa* L.). *Journal of Pure and Applied Biology*, *7*(2), 476-485. https://doi.org/10.19045/BSPAB.2018.70060
24. Mohebodini, M., Mehri, N., & Fathi, R. (2019). Evaluation of genotype and environment effects on agro-morphological traits in black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes. *Journal of Crop Breeding*, *11*(30), 108-117. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.29252/jcb.11.30.108
25. Moosazadeh, M., & Baradaran, R. (2011). Effect of density and time of urea foliar application on oil yield and essences percentage of black cumin (*Nigella Sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, *9*(3), 422-427. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v9i3.11977
26. Prakhova, T.Y. (2022). Ecological aspects of the productivity of nigella varieties under the conditions of the Middle Volga region. *Journal of Russian Agricultural Sciences*, *48*(3), 169-173. https://doi.org/10.3103/S1068367422030090
27. Rezvani, H., Azimi Atarkale, R., Tazikeh, N., & Shahsavani, E. (2021). The effect of planting date and plant density on black cumin yield and yield components (*Nigella sativa* L.) in *Gorgan* Congress of Medicinal Plants; Mechanization and Processing. https://civilica.com/doc/1486647
28. Rezvani Moghaddam, P., & Ahmadzadeh Motlagh, M. (2007). Effect of sowing date and plant density on yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa*) inIslamabad-Ghayein. *Journal of Pajouhesh and Sazandegi*, *76*, 62-68. (In Persian with English abstract)
29. Rezvani Moghaddam, P., Seyedi, S.M., & Azad, M. (2014). Effect of organic, chemical and biological sources of nitrogen on nitrogen use efficiency in black seed (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, *30*, 260-274. (In Persian with English abstract)
30. Safaei, Z., Azizi, M., Davarynejad, G., & Aroiee, H. (2017). The effect of planting seasons on quantitative and qualitative characteristics of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Medicinal Plants and By-products*, *6*(1),

27-33. https://doi.org/10.22092/jmpb.2017.113147

31. Saydi, Z., Abbasi, N., Zarea, M., & Zarei, B. (2022). Effects of nitroxin biofertilizer on morpho-physiological characteristics of black seed (*Nigella sativa* L.) ecotypes under drought stress. *Journal of Agroecology*, *14(3)*, 485-507. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/agry.2021.20298.0
32. Shahbazi, E. (2019). Genotype selection and stability analysis for seed yield of *Nigella sativa* using parametric and non-parametric statistics. *Scientia Horticulturae*, *253*, 172-179. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.047
33. Vatandoost, M., & Madandoust, M. (2021). Improving the quantitative and qualitative yield of *Dracocephalum moldavica* L. with vermicompost in different planting dates. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *19*(3), 249-260. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2021.68798.1022
34. Waliullah, M., Hossain, M.M., & Rahman, M.H. (2021). Influence of sowing dates and sowing methods on growth and seed yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Tropical Crop Science*, *8*(2), 124-133. https://doi.org/10.29244/JTCS.8.02.124-133
35. Zeynali charkandi, Z., Roshdi, M., & Yousefzadeh, S. (2021). Changes in essential oil content and plant yield of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) affected by sowing date and nitrogenfertilizer in Khoy region. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, *3*(1), 25-38. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22034/csrar.2021.276139.1090

Contents

Journal of Agroecology (Quarterly)

Vol. 16 No. 4 2025

Published by: Ferdowsi University of Mashhad

Editor in charge: Prof. Behnam Kamkar

Editor in chief: Prof. Parviz Rezvani Moghaddam

Internal manager: Dr. Surur Khorramdel

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad Press
Address: Journal of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad,
P.O. Box: 91775-1163, Mashhad, Iran
Tel: +98-51– 38804654
Fax: +98–51–38787430
Email: agroecology@um.ac.ir
Web site: http://agry.um.ac.ir

Ferdowsi University of Mashhad

Vol. 16 No. 4

Winter 2025

Journal of Agroecology (Quarterly)

ISSN: 2008-7713

Contents