Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 3, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051

Site Selection and Land Capability Evaluation for Pistachio Cultivation Development in Sistan and Baluchestan Province Using GIS and AHP

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

(Received: July 6-2026; Revised: September 8-2026; Accepted: September 21-2026)

1. Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yasouj University, Yasuj, Iran.
2. Department of Rural Development Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yasouj University, Yasuj, Iran.
*Corresponding Author, Email: asalehi@yu.ac.ir

Abstract

This research was conducted with the aim of site selection and land capability evaluation for the development of pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan province by integrating Geographic Information Systems (GIS), the Analytical Hierarchy Process (AHP), and remote sensing data (Landsat 8 satellite imagery within the Google Earth Engine platform). Eight criteria, including distance from water canals, roads, and population centers, land use, slope, elevation, slope aspect, and soil characteristics (salinity, texture, and pH), were weighted based on the opinions of 15 experts (inconsistency ratio = 0.03). The highest weights were assigned to distance from water canals (0.32), soil characteristics (0.25), and distance from roads (0.14). Information layers with a spatial resolution of 30 m were prepared in the GIS environment and integrated using the weighted overlay method. The final map showed that 13.8 percent of the province is in the highly suitable class, 23.0 percent in the moderately suitable class, 33.5 percent in the marginally suitable class, 27.5 percent in the unsuitable class, and 2.2 percent has absolute limitations. The findings indicated that 36.8 percent of the province has significant potential for the development of pistachio cultivation; however, the main limitation is access to water resources. 65.5 percent of the province is located in the unsuitable category in terms of distance from water canals. Therefore, the sustainable development of pistachio cultivation in the province requires precise planning with a focus on suitable areas and the sustainable management of water resources. The novelty of this research lies in applying Boolean masks to eliminate ecological errors and using cloud computing (GEE) for the temporal consistency of data. Furthermore, comparative analysis revealed that crop development in some areas (such as Zahedan) relies more on groundwater extraction than on inherent land potential; the model classifies these areas as "unsuitable," providing a preventive warning regarding long-term sustainability.

Keywords: Soil salinity, Remote sensing, Spatial analysis, Water resources management, Multi-criteria decision making

How to cite this article: Salehi, A., A. Karami, Z. Moshtagh and V. Aliyari. 2026. Site Selection and Land Capability Evaluation for Pistachio Cultivation Development in Sistan and Baluchestan Province Using GIS and AHP. *J. Water and Soil Sci.* 30(3): 159-178. DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051

Copyright © 2026 Salehi et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره سوم / پاییز ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۵۹ تا ۱۷۸
DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051

مکان‌یابی و ارزیابی توان اراضی برای توسعه کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از GIS و AHP

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۱۵ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۶/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۳۰)

۱. گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.
۲. گروه مدیریت توسعه روستایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: asalehi@yu.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف مکان‌یابی و ارزیابی توان اراضی برای توسعه کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و داده‌های سنجش از دور (تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 در بستر Google Earth Engine) انجام شد. هشت معیار شامل فاصله از کانال آب، جاده و مراکز جمعیتی، کاربری اراضی، شیب، ارتفاع، جهت شیب و ویژگی‌های خاک (شوری، بافت، اسیدیته) بر اساس نظر ۱۵ کارشناس وزن‌دهی شدند (شاخص ناسازگاری: ۰/۰۳). بیشترین وزن به فاصله از کانال آب (۰/۳۲)، خاک (۰/۲۵) و فاصله از جاده (۰/۱۴) اختصاص یافت. لایه‌های اطلاعاتی با قدرت تفکیک ۳۰ متر در محیط GIS تهیه و با روش همپوشانی وزنی تلفیق شدند. نقشه نهایی نشان داد که ۱۳/۸ درصد از مساحت استان در کلاس مستعد، ۲۳/۰ درصد در کلاس نسبتاً مستعد، ۳۳/۵ درصد در کلاس کمی مستعد، ۲۷/۵ درصد در کلاس نامستعد و ۲/۲ درصد دارای محدودیت مطلق قرار دارند. یافته‌ها نشان می‌دهد که ۳۶/۸ درصد مساحت استان پتانسیل قابل‌توجهی برای توسعه کشت پسته دارند؛ اما محدودیت اصلی دسترسی به منابع آبی است؛ به‌طوری که ۶۵/۵ درصد از مساحت استان از نظر فاصله از کانال‌های آبی در دسته نامستعد قرار دارند. بنابراین، توسعه پایدار کشت پسته در استان نیازمند برنامه‌ریزی دقیق با تمرکز بر مناطق مستعد و مدیریت پایدار منابع آبی است. نوآوری این پژوهش در اعمال ماسک‌های محدودکننده قطعی (Boolean Mask) برای حذف خطاهای اکولوژیکی و استفاده از پردازش ابری (GEE) برای هم‌زمانی زمانی داده‌هاست. همچنین، تحلیل تطبیقی نشان داد که توسعه کشت در برخی نواحی (مانند زاهدان) بیش از آنکه متکی بر پتانسیل ذاتی اراضی باشد، ناشی از برداشت از آب‌های زیرزمینی است که مدل با طبقه‌بندی این نواحی به‌عنوان "نامستعد"، هشداری پیشگیرانه درباره پایداری بلندمدت ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شوری خاک، سنجش از دور، تحلیل فضایی، مدیریت منابع آبی، تصمیم‌گیری چندمعیاره

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

مقدمه

انتخاب مکان مناسب برای توسعه باغ‌های پسته در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از ارکان بنیادین برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت منابع طبیعی و سیاست‌گذاری کشاورزی پایدار به‌شمار می‌رود (۱۵ و ۲۶). محدودیت منابع آب، شکنندگی اکولوژیکی و رقابت فزاینده بر سر بهره‌برداری از اراضی، ارزیابی علمی توان سرزمین و تعیین دقیق پهنه‌های مستعد کشت را به اولویتی اساسی در مدیریت زمین تبدیل کرده است. مکان‌یابی و ارزیابی توان اراضی به‌عنوان نخستین گام در برنامه‌ریزی فضایی، ابزاری کارآمد برای شناسایی محدودیت‌ها و ظرفیت‌های بالقوه است که نتایج آن در قالب نقشه‌های تناسب، از تخصیص نادرست اراضی و بهره‌برداری غیراصولی جلوگیری می‌کند (۱۵).

پسته به‌عنوان ارزشمندترین محصول باغی ایران و از مهم‌ترین اقلام صادراتی غیرنفتی، نقشی راهبردی در اقتصاد کشاورزی کشور ایفا کرده و سالانه صدها میلیون دلار ارزآوری دارد (۱۴ و ۲۶). در حال حاضر، بر اساس آخرین آمارهای رسمی وزارت جهاد کشاورزی (۱۴۰۳)، بیش از ۶۴۴ هزار هکتار از اراضی کشور زیر کشت باغات بارور پسته قرار دارد (۱۸) و توسعه آن در نواحی خشک، غالباً تنها گزینه اقتصادی پایدار محسوب می‌شود (۲۱).

در این راستا، مطالعات مکان‌یابی و ارزیابی توان اراضی نشان داده‌اند که توسعه منطقی باغات پسته نیازمند شناخت دقیق و تلفیقی معیارهای اقلیمی، فیزیکوشیمیایی خاک، توپوگرافی و منابع آب است (۷). در مناطق خشک، شوری خاک (EC) یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد پسته است که موجب کاهش معنی‌دار زیست‌توده و اختلال در جذب عناصر غذایی می‌شود (۶). علاوه بر ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و اسیدیته خاک (pH)، تأمین نیاز آبی پایدار نیز حیاتی است؛ به‌طوری‌که بروز تنش آبی شاخص‌های رشد و فتوسنتز را به‌شدت مختل می‌کند (۵). ازاین‌رو، در مدل‌های مکان‌یابی، لحاظ کردن فواصل از شبکه‌های تأمین آب و کانال‌های آبیاری (به‌عنوان یک معیار کلیدی محدودکننده) امری اجتناب‌ناپذیر است.

گسترش فناوری‌های مکانی، به‌ویژه سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، ارزیابی یکپارچه عوامل محیطی را تسهیل کرده است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در محیط GIS، به دلیل قابلیت وزن‌دهی علمی و سازگاری زیاد با الگوهای کشت واقعی، ابزاری کارآمد و قابل‌اعتماد در مکان‌یابی محصولات کشاورزی است (۲، ۳، ۱۵، ۱۷ و ۱۹). با این وجود، پویایی ویژگی‌های خاک پس از احداث باغات نیز نباید نادیده گرفته شود؛ چرا که فعالیت‌های مستمر کشاورزی می‌تواند منجر به تغییرات فیزیکوشیمیایی خاک از جمله کاهش pH و تجمع فلزات سنگین گردد (۹). ازاین‌رو، انتخاب اولیه اراضی بر اساس ظرفیت ذاتی آن‌ها، گامی کلیدی در کاهش مخاطرات زیست‌محیطی آینده است.

در سال‌های اخیر، سنجش از دور به‌عنوان ابزاری کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای پایش شوری خاک در مقیاس‌های وسیع مورد توجه ویژه قرار گرفته است (۱۶). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از باندهای مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR) و باند سبز در تصاویر ماهواره‌ای (مانند لندست ۸) و محاسبه شاخص‌های طیفی تخصصی، دقت زیادی در تفکیک پهنه‌های شور دارد. دلیل این امر آن است که پوسته‌های نمکی و کانی‌های تبخیری سطحی در باند سبز بازتابش طیفی بسیار زیادی دارند؛ درحالی‌که در باند SWIR1 دچار جذب می‌شوند. این تضاد طیفی، کنتراست لازم برای تفکیک پهنه‌های شور از سایر عوارض سطح زمین در مناطق خشک را با دقت زیاد فراهم می‌کند. با این وجود، با توجه به ادبیات به‌روز سنجش از دور و به‌منظور افزایش دقت تفکیک و انطباق بیشتر با شرایط بومی مناطق فراخشک ایران، در پژوهش حاضر از ترکیب بهینه‌تر باند قرمز (Band 4) و مادون قرمز نزدیک (Band 5) تحت عنوان شاخص شوری نرمال‌شده (NDSI) استفاده شده است (که فرمول و مبانی آن در بخش مواد و روش‌ها به تفصیل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

شرح داده خواهد شد). چالش اصلی در مطالعات کلان‌مقیاس، تلفیق این داده‌ها با معیارهای تصمیم‌گیری چندگانه برای دستیابی به یک مدل ارزیابی جامع و هم‌زمان از نظر زمانی است.

با وجود مطالعات متعدد در مکان‌یابی کشت پسته، مرور انتقادی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که بیشتر این پژوهش‌ها همچنان با چهار شکاف اساسی مواجه‌اند که این پژوهش درصدد پوشش آنهاست. نخست آنکه تمرکز مطالعات پیشین عمدتاً بر استان‌های مرکزی و شرقی کشور بوده و پهنه وسیع سیستان و بلوچستان با پتانسیل زیاد اقلیمی، از چرخه پژوهشی سیستماتیک مغفول مانده است. دوم، برخلاف پژوهش‌هایی که صرفاً بر معیارهای مجزا (تنها اقلیم یا تنها خاک) تمرکز داشته‌اند، این پژوهش مدلی جامع و تلفیقی از معیارهای فیزیکوشیمیایی خاک، توپوگرافی و دسترسی به منابع آب ارائه می‌دهد. سوم، درحالی‌که مطالعات پیشین اغلب از نقشه‌های خاک با مقیاس کوچک (۱:۲۵۰,۰۰۰) و قدیمی بهره گرفته‌اند، این پژوهش با استفاده از پردازش ابری (GEE)، شاخص طیفی شوری را با تفکیک مکانی ۳۰ متر و مربوط به سال ۲۰۲۳ استخراج و آن را با لایه پویای کاربری اراضی هم‌زمان‌سازی کرده است. چهارم، بسیاری از مطالعات فاقد اعمال ماسک‌های محدودکننده (Boolean Mask) هستند؛ حال آنکه این پژوهش با حذف سیستماتیک اراضی دارای منع قانونی یا اکولوژیکی شدید (مانند تالاب‌ها و نمک‌زارهای مطلق)، نتایجی کاملاً واقع‌گرایانه و عملیاتی تولید می‌کند.

بر اساس این ضرورت‌ها، پژوهش حاضر با هدف مکان‌یابی و ارزیابی توان توسعه کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و داده‌های سنجش از دور (تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 در بستر Google Earth Engine) انجام شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک چارچوب جامع مکان‌محور نهفته است که با استفاده از داده‌های نوین سنجش از دور مانند پایش شوری در بستر GEE و زیرساخت‌های آبیاری و اعمال فیلترهای محدودکننده قطعی، پهنه‌های بهینه را شناسایی می‌کند. نتایج این پژوهش علاوه بر حفظ منابع طبیعی و کاهش ریسک‌های اکولوژیک بلندمدت، مبنایی علمی و کاربردی برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان آمایش سرزمین و سرمایه‌گذاران به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی و ارتقای اقتصاد روستایی در استان سیستان و بلوچستان فراهم می‌آورد.

مواد و روش‌ها

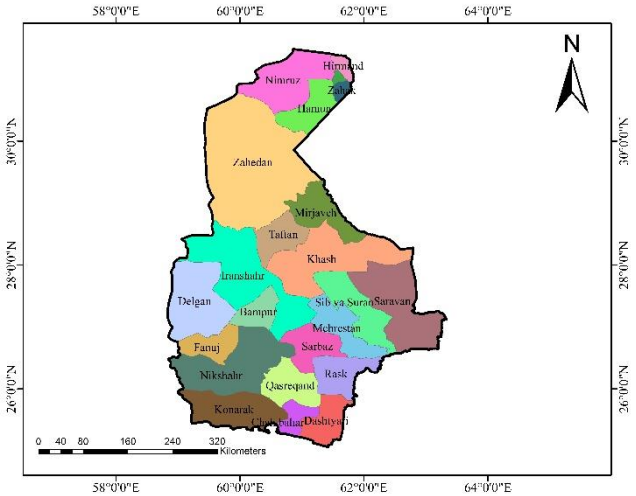
منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در استان سیستان و بلوچستان (شکل ۱) با وسعتی معادل ۱۸۷۵۰۲ کیلومترمربع، به‌عنوان یکی از پهناورترین استان‌های ایران، انجام شده است. گستردگی این استان موجب تنوع زیاد خرد اقلیمی و توپوگرافی شده است. بر اساس آمار سال ۱۴۰۲، این استان دارای ۶۸ بخش، ۲۶ شهرستان، ۵۵ شهر، ۱۴۵ دهستان و ۱۰۱۳۱ آبادی است که از این تعداد، ۷۳۵۳ آبادی دارای سکنه هستند (بیشترین تعداد آبادی مربوط به شهرستان زاهدان با ۱۹۱۳ آبادی و کمترین آن مربوط به شهرستان گلشن با ۷۶ آبادی است). داده‌های ۱۲ ایستگاه هواشناسی همدیدی فعال استان در سال ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه از ۱۸ درجه سلسیوس (ایستگاه زاهدان) تا ۲۸ درجه سلسیوس (ایستگاه راسک) متغیر است. همچنین، بیشترین میزان بارش سالانه در نیکشهر (۱۷۰ میلی‌متر) و کمترین آن در میرجاوه (۴۲ میلی‌متر) ثبت شده است. از لحاظ توپوگرافی نیز شهر خاش مرتفع‌ترین و شهر چابهار کم‌ارتفاع‌ترین شهرهای دارای ایستگاه هواشناسی استان محسوب می‌شوند (۲۳).

این تنوع محیطی در کنار محدودیت‌های شدید منابع آب و خاک، ضرورت اتخاذ رویکرد مکان‌محور و تحلیل‌های فضایی را در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی ایجاب می‌کند؛ چرا که نادیده گرفتن ساختار همبستگی فضایی داده‌ها می‌تواند منجر به خطاهای جدی در توسعه پایدار شود. از این رو، شناسایی مناطق مستعد برای کشت محصولات مقاومی مانند پسته (به‌ویژه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]



شکل ۱. نقشه استان سیستان و بلوچستان

Figure 1. Map of Sistan and Baluchestan Province

در مناطق مرکزی و مرتفع‌تر استان مانند خاش و زاهدان که پتانسیل اقلیمی بهتری دارند)، گامی اساسی در جهت افزایش بهره‌وری، درآمدزایی روستاییان، حفظ منابع طبیعی و ارتقای تاب‌آوری اقتصادی منطقه به‌شمار می‌رود.

این مطالعه با هدف شناسایی و پهنه‌بندی اراضی مستعد توسعه کشت پسته، بر مبنای تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی (MCDA) و تلفیق داده‌های فضایی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS 10.8) صورت پذیرفته است. انتخاب معیارهای ارزیابی بر اساس دو رویکرد علمی انجام شد:

اول، مرور سیستماتیک ادبیات موضوعی و بررسی پژوهش‌های مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که نشان داد معیارهای خاک، توپوگرافی و دسترسی به منابع آب، به‌طور مکرر به‌عنوان عوامل کلیدی تعیین‌کننده توان اراضی برای پسته شناسایی شده‌اند (۲ و ۱۵ و ۲۵). دوم، مشورت ساختاریافته با ۱۵ نفر از کارشناسان خبره (شامل متخصصان باغبانی، علوم خاک، آبیاری و برنامه‌ریزی منطقه‌ای استان) که از طریق پرسشنامه باز و جلسات گروه کانونی (Focus Group)، محدودیت‌های بومی و واقعیت‌های اجرایی منطقه را شناسایی کردند.

بر اساس این رویکرد، هشت معیار اصلی در چهار گروه به‌شرح زیر انتخاب شدند:

الف) معیارهای خاکی (یک معیار ترکیبی شامل ۶ زیرمعیار): شاخص شوری سطح خاک به‌دلیل حساسیت شدید پسته به تجمع املاح (۶)؛ بافت خاک (درصد رس، شن و سیلت) که بر نفوذپذیری، هوادهی و قابلیت نگهداری آب تأثیر مستقیم دارد؛ اسیدیته (pH) با توجه به محدوده بهینه ۷ تا ۸ برای پسته؛ و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به‌عنوان شاخص حاصلخیزی بالقوه خاک.

ب) معیارهای توپوگرافی (سه معیار): درصد شیب که عملیات مکانیزاسیون، فرسایش و راندمان آبیاری را تعیین می‌کند (حد بهینه برای پسته زیر ۸ درصد است)؛ ارتفاع از سطح دریا که با دمای محیط، احتمال سرمازدگی بهاره و تجمع ساعات سرما ارتباط مستقیم دارد (دامنه مطلوب ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ متر برای اقلیم استان)؛ و جهت شیب که توزیع تابش خورشیدی و رطوبت نسبی را کنترل می‌کند.

ج) معیارهای زیرساختی و دسترسی (سه معیار): فاصله از شبکه‌های آبیاری (کانال‌های آب) به‌عنوان حیاتی‌ترین عامل در اقلیم خشک استان که میانگین بارندگی سالانه آن کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر است؛ فاصله از جاده‌ها برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل نهاده و محصول؛ و فاصله از سکونتگاه‌ها برای تأمین نیروی کار و خدمات پشتیبانی.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

د) معیار کاربری اراضی (یک معیار): به‌منظور شناسایی اراضی قابل تبدیل به باغ (مانند مراتع ضعیف و اراضی بایر) و اعمال ماسک حذفی برای کاربری‌های دارای منع قانونی یا اکولوژیکی (مناطق مسکونی، تالاب‌ها، جنگل‌های حرا، پهنه‌های حفاظتی).

آماده‌سازی داده‌ها و تحلیل فضایی

متغیرهای خاک و شوری: به‌منظور استخراج نقشه شوری خاک محدوده مطالعاتی، از سامانه تحت وب گوگل ارث انجین (GEE) استفاده شد (۱۱). مرز استان سیستان و بلوچستان بر اساس پایگاه داده مرزهای جهانی فائو تعیین شد. بدین منظور، تصاویر سطح دو (Collection 2 Level-2) ماهواره لندست ۸ مربوط به بازه زمانی یک‌ساله ۲۰۲۳ میلادی (۱ ژانویه تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۳) از آرشیو USGS فراخوانی شدند. مشخصات این تصاویر به‌شرح زیر است: سنجنده OLI/TIRS، قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، قدرت تفکیک رادیومتریکی ۱۶ بیت، دارای تصحیح اتمسفری و ارائه‌شده در قالب مقادیر بازتابش سطحی (Surface Reflectance). ضرایب مقیاس ۰/۰۰۰۰۲۷۵ و ۰/۲- اعمال شد و پس از ماسک‌کردن ابر و سایه ابر با استفاده از باند کیفیت QA_PIXEL و اعمال فیلتر پوشش ابر کمتر از ۳۰ درصد، به‌منظور دستیابی به تصویری یکپارچه و فاقد نویز در کل استان، از تابع آماری میانه (Median Composite) استفاده شد. با توجه به وسعت استان و عدم امکان پوشش بدون ابر کل منطقه با یک تک‌صحنه، ۳۲۵ صحنه در ترکیب نهایی مشارکت داشتند و تاریخ میانه اخذ صحنه‌های مشارکت‌کننده در ترکیب، برابر با ۳۰ ژوئن ۲۰۲۳ (۹ تیر ۱۴۰۲) محاسبه و به‌عنوان تاریخ مرجع گزارش شد. به‌منظور پایش شوری سطح خاک، از شاخص شوری نرمال‌شده (Normalized Difference Salinity Index - NDSI) استفاده شد. این شاخص با بهره‌گیری از باند قرمز (Band 4) و مادون قرمز نزدیک (Band 5) سنجنده لندست ۸ بر اساس معادله ۱ محاسبه و لایه خروجی با قدرت تفکیک ۳۰ متر استخراج شد (۲۲).

$$\mathrm{NDSI} = \frac{\text{Band 4} - \text{Band 5}}{\text{Band 4} + \text{Band 5}} \qquad (۱)$$

دلیل انتخاب این ترکیب باندی آن است که خاک‌های شور و قلیایی، بازتاب طیفی متفاوتی در نواحی مرئی و مادون‌قرمز نسبت به خاک‌های غیرشور از خود نشان می‌دهند که کنتراست لازم برای تفکیک پهنه‌های شور را فراهم می‌کند. این فرمول در مطالعات معتبر، به‌ویژه پژوهش‌های انجام‌شده در دشت سیستان و مناطق خشک با استفاده از داده‌های لندست ۸، به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین شاخص‌های طیفی تأیید و استفاده شده است (۲۲). علاوه بر اعتبار فرمول در مطالعات پیشین، به‌منظور اطمینان از انطباق فضایی نقشه استخراج‌شده با واقعیت‌های جغرافیایی در مقیاس کلان استان، یک ارزیابی کیفی – مفهومی (Qualitative-Conceptual Validation) نیز انجام شد. بدین منظور، مقادیر شاخص در ۵ نقطه مرجع شناخته‌شده (شامل پهنه‌های نمک‌زار مطلق شمالی، دشت‌های شور مرکز و سبخاهای ساحلی جنوب) استخراج و بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده انطباق مکانی قابل‌توجهی با عوارض زمین‌شناسی قطعاً شور بود که صحت نسبی الگوی توزیع شوری در مقیاس استانی را تأیید می‌کند.

همچنین، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل درصد رس، شن، سیلت، اسیدیته (pH) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) از پایگاه داده جهانی SoilGrids استخراج شد. در این مطالعه افق عمقی ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری به‌عنوان لایه مرجع انتخاب شد. دلیل این انتخاب، تمرکز ریشه‌های موئین (تغذیه‌کننده) در این عمق تحت سیستم‌های آبیاری موضعی (قطره‌ای) است که الگوی الزامی و غالب توسعه باغات جدید در مناطق خشک استان است. علاوه بر این، در اراضی بیابانی، شناسایی محدودیت‌های فیزیکوشیمیایی (مانند تجمع املاح، بافت سنگین و لایه‌های سخت‌پان) در این افق، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت استقرار نهال در سال‌های اولیه رشد دارد.

متغیرهای توپوگرافی: نقشه‌های ارتفاع از سطح دریا، درصد شیب و جهت شیب با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی جهانی شاتل (SRTM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر (۸) در محیط GIS تهیه شدند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

متغیرهای زیرساختی و کاربری اراضی: برای متغیرهای زیرساختی، لایه‌های برداری مربوط به شبکه راه‌ها از پایگاه‌های داده مکانی عمومی استخراج شد (۱۰ و ۱۲). در خصوص کانال‌های آبیاری، با توجه به مقیاس کلان (استانی) مطالعه و عدم دسترسی آزاد به نقشه‌های رسمی و به‌روز شبکه‌های توزیع آب، از پایگاه‌های داده مکانی عمومی و مشارکتی (Crowdsourced) استفاده شد. ارزیابی‌های کیفیت‌سنجی در مطالعات پیشین تأیید می‌کنند که داده‌های این پایگاه در بازنمایی شبکه‌های خطی و زیرساخت‌های اصلی هیدروگرافی در مقیاس‌های منطقه‌ای، از جامعیت و دقت مکانی بسیار زیادی برخوردارند (۱۰ و ۱۲). سپس برای تهیه نقشه‌های حریم و دسترسی، فواصل با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی (Euclidean Distance) محاسبه شد. برای تهیه لایه کاربری اراضی و تضمین کامل هم‌زمانی زمانی (Temporal Consistency) با لایه شوری خاک (مربوط به سال ۲۰۲۳)، به‌جای استفاده از نقشه‌های قدیمی و فاقد دقت مکانی – زمانی لازم (مانند نقشه سال ۱۳۸۸ سازمان جنگل‌ها)، از یک رویکرد ترکیبی و پویا استفاده شد. در این روش، ابتدا از نقشه پایه جهانی ESA WorldCover 2021 (با قدرت تفکیک ۱۰ متر) به‌عنوان بستر اصلی استفاده شد. سپس، به‌منظور پل زدن این اختلاف زمانی کوتاه و انعکاس دقیق‌ترین وضعیت موجود در سال ۲۰۲۳، شاخص پوشش گیاهی بیشینه (NDVI-max) بهار ۱۴۰۲ (مشتق‌شده از تصاویر بازتابش سطحی لندست ۸ در بازه ۱ مارس تا ۳۱ مه ۲۰۲۳) به‌عنوان یک لایه به‌روزرسان دینامیک اعمال شد. بدین ترتیب، کلاس ناهمگن بایر/تنک در نقشه ۲۰۲۱، بر اساس پوشش گیاهی واقعی سال ۲۰۲۳ و با استفاده از یک آستانه آماری ($NDVI \geq 0.10$)، به دو کلاس مجزای مرتع تنک قابل تبدیل و بایر مطلق بازتخصیص (Reclassified) یافت. این نوآوری روش‌شناختی، نه‌تنها چالش عدم دسترسی به نقشه‌های رسمی به‌روز را مرتفع می‌سازد، بلکه هم‌زمانی لایه‌های ورودی مدل را به بیشینه ممکن رسانده و خطای ناشی از تغییرات کاربری در این بازه کوتاه را به طور کامل خنثی می‌کند. درنهایت، به‌منظور حفظ یکپارچگی مدل در تحلیل‌های فضایی، اندازه پیکسل‌ها (Cell Size) در تمامی لایه‌ها روی ۳۰ متر تنظیم شد.

اعمال محدودیت‌های قطعی (Boolean Mask)

به‌منظور جلوگیری از تداخل توسعه باغات پسته با کاربری‌های حساس و حذف اراضی فاقد قابلیت فیزیکی، یک لایه محدودیت قطعی (Boolean Mask) با ارزش باینری (۰: ممنوع، ۱: مجاز) تهیه و بر نقشه مکانی نهایی اعمال شد. این لایه از تلفیق سه منبع داده ساخته شد: (۱) کلاس‌های دارای منع غیرقابل‌تبدیل قانونی یا اکولوژیکی مشتق‌شده از لایه کاربری اراضی ESA WorldCover 2021 شامل مناطق شهری و زیرساختی، پهنه‌های آبی، تالاب‌ها، جنگل‌ها و مانگروها (حرا)، چمنزارهای کوهستانی حساس و پهنه‌های برفی؛ (۲) پهنه‌های نمک‌زار مطلق که با آستانه فیزیکی شاخص شوری نرمال‌شده (NDSI >۰/۰۰) به‌عنوان سطوح غیرخاکی تبخیری شناسایی و الحاق شدند؛ و (۳) مسیل‌ها و آبراهه‌های اصلی به‌عنوان خطر سیلاب فصلی که از تلفیق تحلیل هیدرولوژیک DEM ۳۰ متری (آستانه تجمع جریان معادل حوضه ۵/۴ کیلومترمربعی) و لایه هیدروگرافی مشارکتی استخراج شدند. گفتنی است که خاک‌های شور غیرمطلق، تپه‌های ماسه‌ای و اراضی صخره‌ای در این ماسک حذف نشدند؛ زیرا این متغیرها پیش‌تر به‌عنوان معیارهای اصلی (شوری و بافت خاک) در فرآیند هم‌پوشانی وزنی لحاظ شده‌اند و حذف مجدد آنها مصداق احتساب مضاعف (Double Counting) خواهد بود.

استانداردسازی و مدل‌سازی یکپارچه

در مرحله استانداردسازی لایه‌ها به منظور ورود به مدل، تمامی معیارها باید به یک مقیاس مفهومی مشترک و قابل قیاس (از ۱: نامناسب تا ۴: بسیار مستعد، معادل کلاس‌های N تا S1 در چارچوب فائو) تبدیل می‌شدند. با این حال، برای استخراج این مقیاس مشترک، با توجه به ماهیت داده‌ها دو رویکرد متفاوت اتخاذ شد:

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

برای متغیرهای توپوگرافی، زیرساختی و دسترسی، ارزش‌گذاری پیکسل‌ها (۱ تا ۴) به طور مستقیم بر اساس آستانه‌های مطلق مستخرج از ادبیات پژوهش و نظرات کارشناسان خبره صورت پذیرفت. اما در خصوص ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، به‌دلیل همگنی زیاد داده‌ها در پهنه‌های وسیع استان (وضوح کم واریانس مکانی در داده‌های SoilGrids)، استفاده از آستانه‌های مطلق کارشناسی منجر به یکپارچگی مطلق لایه‌ها و از بین رفتن حساسیت مدل می‌شد. ازاین‌رو برای جلوگیری از تقلیل واریانس مکانی، لایه‌های خاک با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی آماری نسبی چندک (Quantile) استانداردسازی شدند. در این روش، واریانس نسبی موجود در خاک منطقه، به چهار طبقه با مساحت‌های برابر تقسیم شده و سپس به مقیاس مشترک تناسب (۱ تا ۴) نگاشت (Map) شد تا امکان شناسایی مکان‌های بهینه محلی (Local Optimums) فراهم شود.

به منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها، از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد. داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های مقایسه زوجی در نرم‌افزار Expert Choice وارد شده و پس از تأیید ضریب ناسازگاری (CR<۰/۱)، اوزان نهایی استخراج شدند. به‌عنوان نمونه، اوزان استخراج‌شده برای ۶ زیرمعیار اصلی خاک به‌این‌شرح بود: شوری (۰/۲۸)، رس (۰/۲۴)، شن (۰/۱۸)، اسیدیته (۰/۱۴)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۱۰) و سیلت (۰/۰۶).

درنهایت، ادغام فضایی لایه‌های استانداردشده با وزن‌های تعیین‌شده، از طریق عملگر هم‌پوشانی وزنی (Weighted Overlay) مطابق معادله ۲ انجام گرفت:

$$S = \sum_{i=1}^{n} W_i \times X_i \qquad (۲)$$

که در این معادله، S ارزش نهایی توان اراضی، W_i وزن اختصاص‌یافته به معیار i ام و X_i ارزش استانداردشده و هم‌مقیاس (۱ تا ۴) برای هر پیکسل است. خروجی نهایی این فرآیند، نقشه پهنه‌بندی اراضی استان برای توسعه باغات پسته است که نواحی مختلف را در چهار طبقه شامل مستعد (بسیار مستعد)، نسبتاً مستعد، کمی مستعد و نامستعد تفکیک می‌کند. برای این منظور، از الگوریتم شکست طبیعی (Natural Breaks/Jenks) استفاده شد. این روش با کمینه‌سازی واریانس درون‌طبقه‌ای و بیشینه‌سازی واریانس بین‌طبقه‌ای (۱۳)، ساختار ذاتی و غیرنرمال توزیع داده‌ها (که در مطالعات مکان‌یابی اراضی معمولاً چندحالتی است) را به‌خوبی حفظ می‌کند. با توجه به توزیع پیچیده و غیرخطی شاخص ترکیبی توان اراضی در این پژوهش، روش شکست طبیعی به‌عنوان گزینه‌ای مؤثرتر در تشخیص خوشه‌های معنادار و طبیعی در داده‌های فضایی انتخاب شد (۲۷).

اعتبارسنجی مدل

به‌منظور ارزیابی کمی کارایی مدل پیشنهادی، از رویکرد تطبیقی (Comparative Validation) استفاده شد. بدین منظور، نتایج حاصل از پهنه‌بندی مدل با داده‌های رسمی سطح زیر کشت پسته در سال ۱۴۰۳ (اداره کل جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان) مقایسه شد. با استفاده از ابزار Tabulate Area در محیط ArcGIS، درصد مساحت هر شهرستان در طبقات مستعد (کلاس‌های ۳ و ۴) محاسبه و در سطح کشت واقعی آن شهرستان ضرب گردید تا تخمینی از سطح کشت واقع در پهنه‌های مستعد به دست آید. این روش، اگرچه جایگزین اعتبارسنجی نقطه‌ای (مانند ماتریس خطا) نیست، اما در مطالعات کلان‌مقیاس که دسترسی به داده‌های زمینی متراکم محدود است، به‌عنوان یک رویکرد معتبر برای سنجش انطباق مدل با واقعیت‌های میدانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۵).

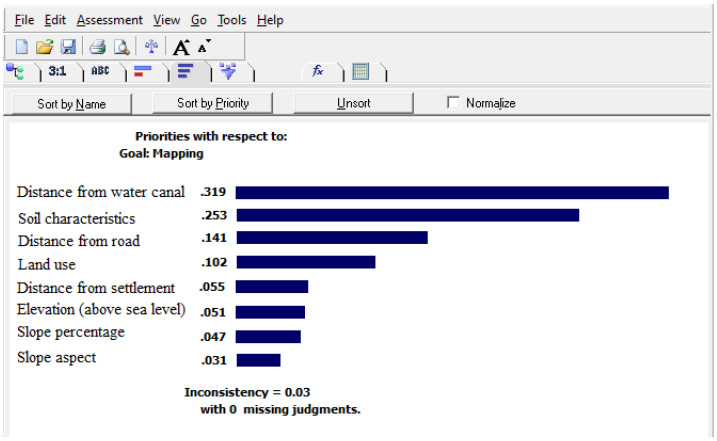
نتایج

تحلیل سلسله‌مراتبی(AHP)

شکل ۲ نتایج حاصل از وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) نشان می‌دهد. بر اساس یافته‌ها، معیار فاصله از کانال آب با وزن ۰/۳۲ بیشترین میزان اهمیت را به خود اختصاص داده است. این موضوع نقش حیاتی و تعیین‌کننده دسترسی به منابع آبی پایدار را برای موفقیت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]



شکل ۲. نتایج حاصل از وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی

Figure 2. Results of weighting criteria and sub-criteria using Analytic Hierarchy Process

توسعه کشت پسته، به‌ویژه در شرایط اقلیمی منطقه، مورد تأیید قرار می‌دهد. پس از آن، معیار خاک با وزن ۰/۲۵ در رتبه دوم اهمیت قرار گرفته است که بیانگر نقش کلیدی خصوصیات کیفی خاک در توان اراضی برای این محصول است. همچنین، معیار فاصله از جاده با کسب وزن ۰/۱۴ در جایگاه سوم قرار دارد و بر لزوم دسترسی مناسب به شبکه حمل‌ونقل به منظور تسهیل امور لجستیک و بازاریابی تأکید می‌کند. سایر معیارهای مؤثر در این ارزیابی به ترتیب اهمیت شامل کاربری اراضی (با وزن ۰/۱۰)، فاصله از سکونتگاه (با وزن ۰/۰۶)، ارتفاع از سطح دریا (با وزن ۰/۰۵)، درصد شیب (با وزن ۰/۰۵) و جهت شیب (با وزن ۰/۰۳) هستند.

گفتنی است که ضریب ناسازگاری (Inconsistency Ratio) در این تحلیل برابر با ۰/۰۳ محاسبه شده است؛ از آنجا که این مقدار کمتر از آستانه مجاز (۰/۱) است، سازگاری و اعتبار قضاوت‌های اعمال‌شده در مدل کاملاً تأیید می‌شود. در مجموع، این توزیع وزنی حاکی از آن است که در برنامه‌ریزی‌های مکانی برای کشت پسته در این منطقه، اولویت نخست باید بر مبنای دو عامل کلیدی دسترسی به منابع آبی و کیفیت خاک قرار گیرد؛ چراکه این دو معیار به تنهایی ۵۷ درصد (مجموع وزن ۰/۵۷) از اهمیت کل مدل را تبیین می‌کنند.

نتایج ارزیابی مساحتی مناطق مستعد کشت پسته (تلفیق معیارها)

تحلیل فضایی و ارزیابی مساحت طبقات مختلف توان اراضی برای توسعه کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان (مساحت کل تقریبی ۱۸۷۵۰۲ کیلومترمربع) بر اساس معیارهای هشت‌گانه، نتایج قابل‌توجهی را به همراه داشته است. توزیع مساحت‌ها و درصدهای مربوط به هر معیار در جدول ۱ به‌صورت یکپارچه ارائه شده است (نقشه‌های پهنه‌بندی مربوطه در شکل‌های ۳ تا ۶ قابل مشاهده می‌باشند). بر اساس ماهیت معیارها، نتایج در سه بخش اصلی مورد بحث قرار می‌گیرند:

تناسب ویژگی‌های توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت شیب)

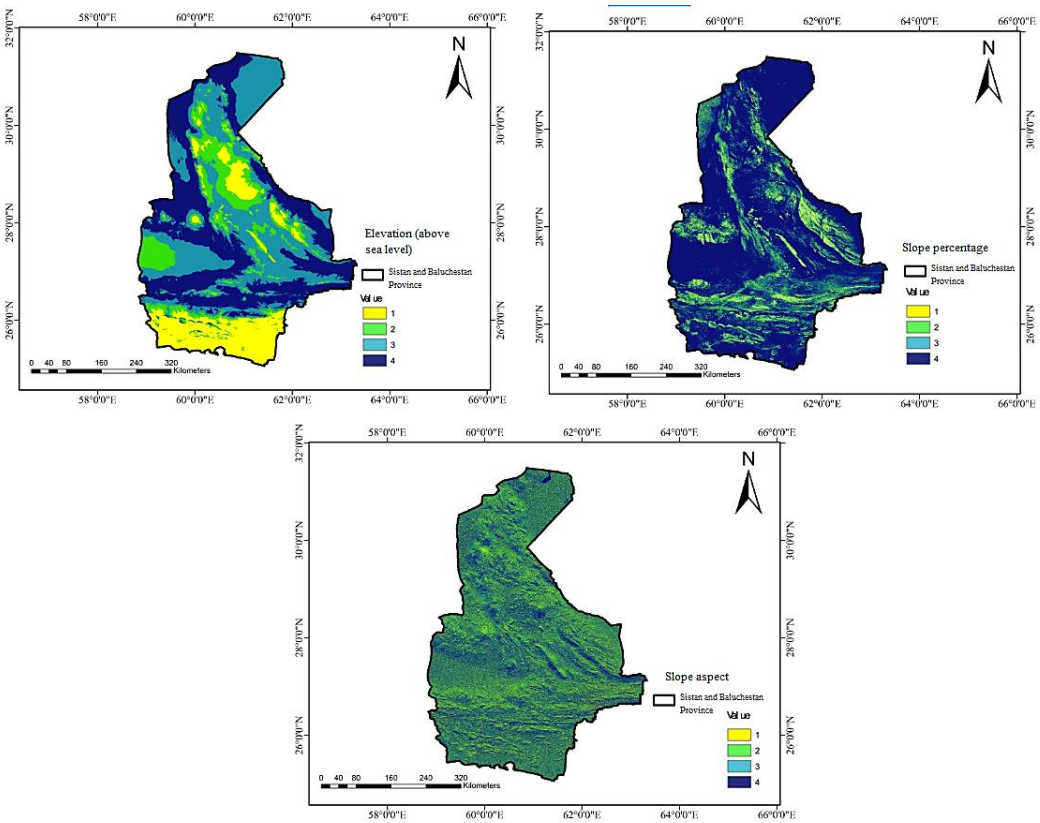
بررسی شرایط فیزیکی زمین نشان می‌دهد که استان سیستان و بلوچستان از منظر شیب دارای پتانسیل فوق‌العاده‌ای است؛ به‌طوری که ۷۲/۰ درصد مساحت استان (معادل ۱۳۴۹۴۴ کیلومترمربع) در طبقه مستعد (شیب صفر تا ۸ درصد) قرار دارد. این اراضی مسطح که عمدتاً شامل دشت سیستان و نواحی دشتی بلوچستان مرکزی هستند، امکان بهره‌گیری از سیستم‌های آبیاری نوین و مکانیزاسیون را فراهم می‌کنند. از نظر جهت شیب، دامنه‌های رو به جنوب، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی با کسب وسعت ۷۶۳۹۷ کیلومترمربع (۴۰/۷ درصد) بیشترین سهم

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

جدول ۱: مساحت طبقات مختلف مناطق مستعد کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان از نظر ویژگی‌های توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت شیب)

Table 1. Area of different land suitability classes for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province based on topographic characteristics (elevation, slope, and aspect)

Criterion	Suitability Class	Range / Condition	Area (km²)	Percentage (%)
Elevation	Highly suitable (S1)	600 to 1200 m a.s.l.	62,693	33.4
	Moderately suitable (S2)	400 to 600 m and 1200 to 1500 m a.s.l.	68,380	36.5
	Marginally suitable (S3)	300 to 400 m and 1500 to 1800 m a.s.l.	26,911	14.4
	Unsuitable (N)	Less than 300 m and more than 1800 m a.s.l.	29,518	15.7
Slope	Highly suitable (S1)	0–8%	134,944	72.0
	Moderately suitable (S2)	8–15%	27,062	14.4
	Marginally suitable (S3)	15–25%	17,197	9.2
	Unsuitable (N)	More than 25%	8,298	4.4
Aspect	Highly suitable (S1)	South, South-East, South-West	76,397	40.7
	Moderately suitable (S2)	East, West	45,200	24.1
	Marginally suitable (S3)	North-East, North-West	45,501	24.3
	Unsuitable (N)	North	20,404	10.9

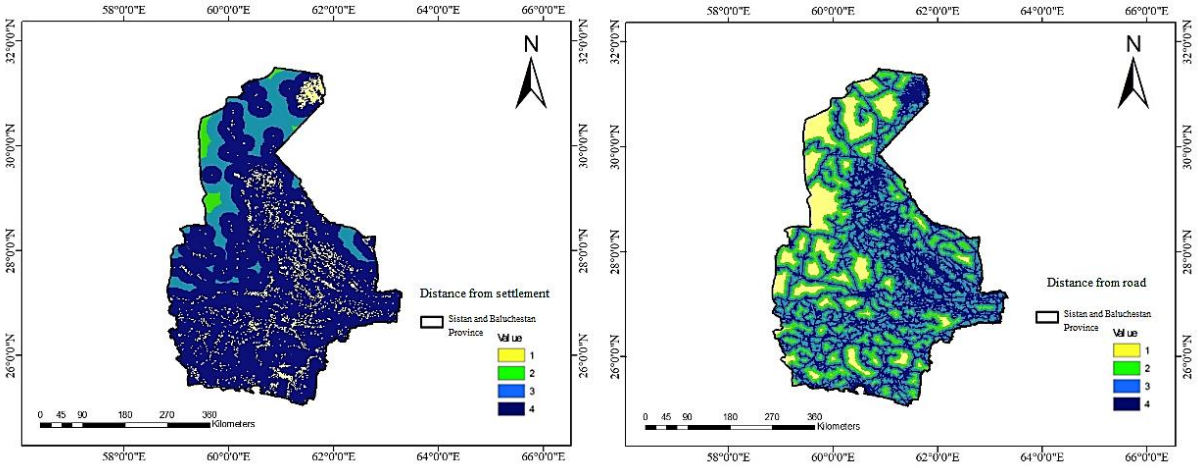


شکل ۳. طبقات مختلف مناطق مستعد کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان از نظر ویژگی‌های توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت شیب)

Figure 3. Different land suitability classes for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province based on topographic characteristics (elevation, slope, and aspect)

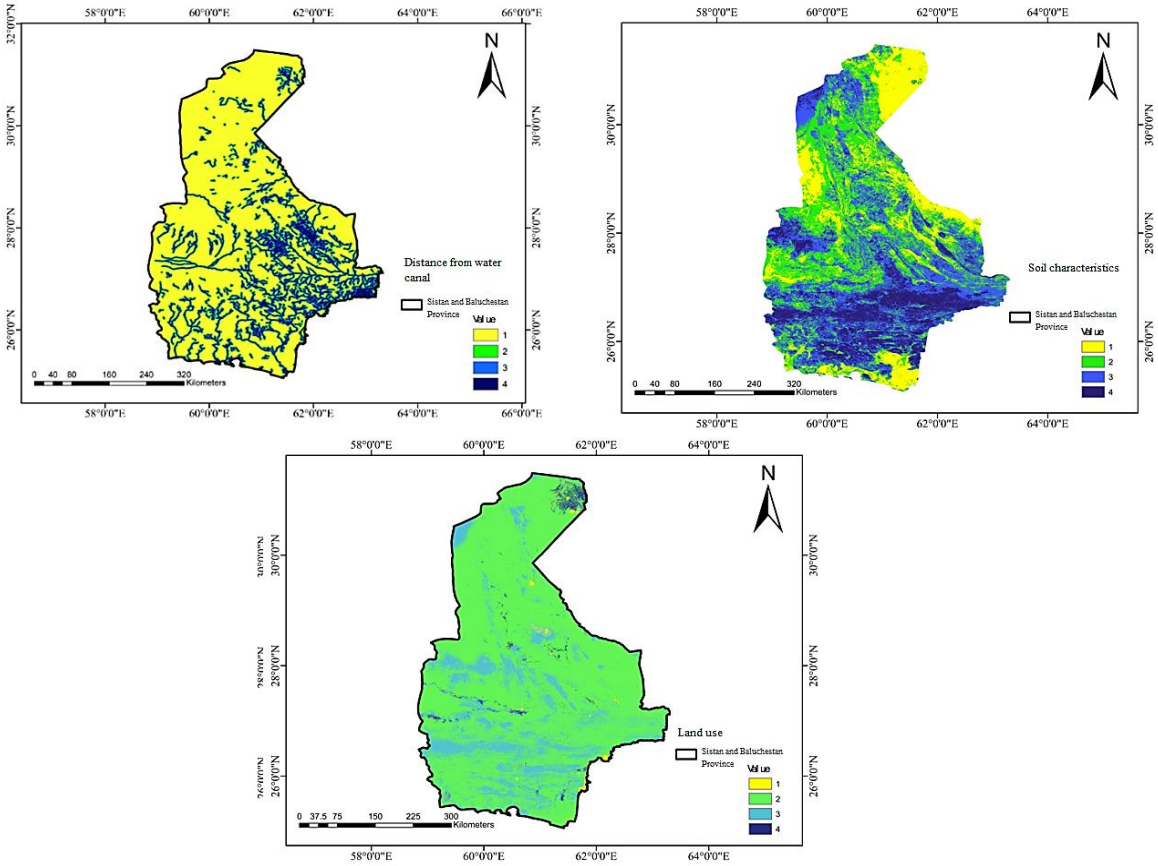
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]



شکل ۴. طبقات مختلف مناطق مستعد کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان از نظر تناسب زیرساختی و دسترسی (مراکز جمعیتی و شبکه جاده‌ای)

Figure 4. Different land suitability classes for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province based on infrastructure and accessibility suitability (population centers and road network)

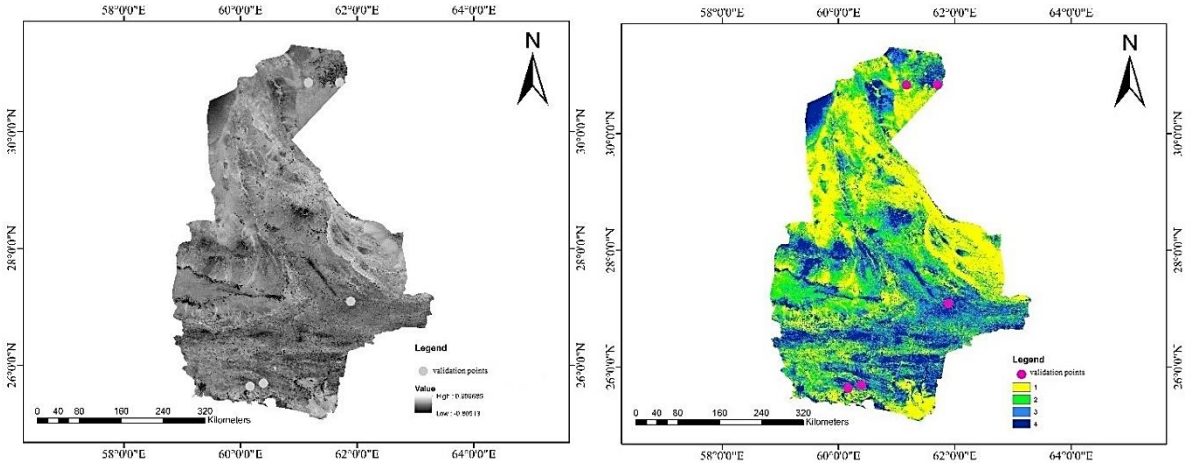


شکل ۵. طبقات مختلف مناطق مستعد کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان از نظر محدودیت‌های منابع پایه و محیطی (آب، خاک و کاربری اراضی)

Figure 5. Different land suitability classes for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province based on basic resource and environmental limitations (water, soil, and land use)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]



شکل ۶. توزیع فضایی طبقات شوری خاک در استان سیستان و بلوچستان، استخراج‌شده از شاخص شوری نرمال‌شده (NDSI) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (سال ۲۰۲۳). پنل سمت راست: نقشه طبقه‌بندی‌شده؛ پنل سمت چپ: مقادیر پیوسته شاخص NDSI. نقاط صورتی نشان‌دهنده نقاط شاهد مورد استفاده هستند.

Figure 6. Spatial distribution of soil salinity classes in Sistan and Baluchestan province, derived from Normalized Difference Salinity Index (NDSI) using Landsat 8 imagery (2023). Right panel: Reclassified map; Left panel: Continuous NDSI values. Pink dots represent validation points.

را در طبقه مستعد به خود اختصاص داده‌اند که با توجه به اقلیم منطقه، دریافت حداکثری تابش خورشید و کاهش خطر سرمازدگی را برای باغات پسته تضمین می‌کنند. با این حال، تحلیل ارتفاع از سطح دریا توزیع متعادل‌تری را نشان می‌دهد؛ بیشترین مساحت به پهنه‌های نسبتاً مستعد (۳۶/۵ درصد) و سپس مناطق مستعد (۳۳/۴ درصد، واقع در ارتفاع ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ متری) اختصاص دارد که اهمیت مناطق کوهستانی و نیمه‌کوهستانی استان را برای فرار از تنش‌های حرارتی دشت‌های پست برجسته می‌کند. در مجموع، شرایط توپوگرافیک استان برای توسعه باغات پسته بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود.

تناسب زیرساختی و دسترسی (مراکز جمعیتی و شبکه جاده‌ای)

توسعه موفق کشاورزی تجاری نیازمند دسترسی مناسب به نیروی کار، لجستیک و بازار است. نتایج نشان می‌دهد (جدول ۲) که استان از نظر پراکندگی سکونتگاه‌ها وضعیت بسیار مطلوبی دارد؛ حدود ۷۹/۱ درصد از اراضی (۱۴۸۲۲۱کیلومترمربع) در شعاع ۱ تا ۲۰ کیلومتری از مراکز جمعیتی (طبقه مستعد) واقع شده‌اند که امکان بازاریابی و تأمین نیروی کار را به‌خوبی فراهم می‌کند. از منظر دسترسی به شبکه ارتباطی و جاده‌ها، بیشتر مساحت استان (۳۷/۵ درصد) در طبقه نسبتاً مستعد (فاصله ۲ تا ۵ کیلومتری) و پس از آن در طبقه مستعد (۳۲/۶ درصد) قرار دارد. این ارقام بیانگر پراکندگی نسبتاً مطلوب شبکه‌های جاده‌ای در پهنه استان است؛ اگرچه همچنان توسعه زیرساخت‌ها در نواحی کوهستانی دورافتاده (۱۱/۷ درصد اراضی نامستعد) یک چالش محسوب می‌شود.

محدودیت‌های منابع پایه و محیطی (آب، خاک و کاربری اراضی)

برخلاف وضعیت مطلوب توپوگرافی و لجستیک، محدودیت‌های اصلی توسعه کشت پسته در سیستان و بلوچستان به منابع پایه بازمی‌گردد. حیاتی‌ترین عامل یعنی فاصله از شبکه‌های آبیاری (کانال آب)، شدیدترین تنگنا را نشان می‌دهد؛ به‌طوری که ۶۵/۵ درصد از اراضی استان (۱۲۲۸۰۰ کیلومترمربع) در فاصله بیش از ۲۵۰۰ متری از منابع آبی قرار داشته و کاملاً نامستعد هستند. تنها ۱۳/۹ درصد اراضی از نظر دسترسی به آب در وضعیت مستعد قرار دارند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

جدول ۲. مساحت طبقات مختلف مناطق مستعد کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان از نظر معیار تناسب زیرساختی و دسترسی (مراکز جمعیتی و شبکه جاده‌ای)

Table 2. Area of different land suitability classes for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province based on infrastructure and accessibility criteria (population centers and road network)

Criterion	Suitability Class	Range (m)	Area (km²)	Percentage (%)
Distance to population centers	Highly suitable (S1)	1,000–20,000	148,221	79.1
	Moderately suitable (S2)	20,000–40,000	21,231	11.3
	Marginally suitable (S3)	40,000–60,000	3,084	1.6
	Unsuitable (N)	<1,000 and >60,000	14,966	8.0
Distance from roads	Highly suitable (S1)	0–2,000	61,105	32.6
	Moderately suitable (S2)	2,000–5,000	70,291	37.5
	Marginally suitable (S3)	5,000–10,000	34,186	18.2
	Unsuitable (N)	>10,000	21,921	11.7

در زمینه ویژگی‌های خاک، طبقات نسبتاً مستعد (۲۷/۱ درصد با محدودیت‌های جزئی و قابل اصلاح) و کمی مستعد (۳۴/۵ درصد نیازمند اصلاحات اساسی) غالب هستند. مناطق کاملاً مستعد (فاقد محدودیت) ۱۶/۵ درصد مساحت را شامل می‌شوند، در حالی که ۲۱/۹ درصد دارای محدودیت بازدارنده (شوری مفرط یا نمک‌زار) هستند.

درنهایت، بررسی کاربری اراضی نشان می‌دهد که تنها ۱/۳ درصد (۲۴۳۸ کیلومترمربع) از اراضی در کلاس مستعد (اراضی کشاورزی فعال) قرار دارند. بخش عمده‌ای از استان شامل ۷۷/۹ درصد (۱۴۶۰۶۴ کیلومترمربع) در شرایط کمی مستعد (اراضی بایر واقعی) و ۱۹/۷ درصد (۳۶۹۳۸ کیلومترمربع) در شرایط نسبتاً مستعد (بوته‌زارها و مراتع تنک قابل تبدیل) قرار دارند. همچنین ۱/۱ درصد (۲۰۶۲ کیلومترمربع) به دلیل کاربری‌های دارای منع قانونی یا اکولوژیکی (شهری، پهنه‌های آبی، تالاب‌ها، جنگل‌ها و غیره) در کلاس نامستعد قرار گرفته‌اند.

پهنه‌بندی شوری خاک (یکی از زیرمعیارهای لایه خاک):

اگرچه شوری یکی از شش زیرمعیار لایه خاک (در کنار رس، شن، اسیدیته، CEC و سیلت) است و در جدول ۳ به صورت یکپارچه با سایر ویژگی‌های خاک ارائه شده، اما به دلیل اهمیت حیاتی شوری در کشت پسته و نوآوری روش‌شناختی در استخراج این لایه، نقشه پهنه‌بندی شوری به صورت جداگانه در شکل ۶ ارائه شده است.

بر اساس تحلیل فضایی، بیشترین تراکم و شدت شوری در حاشیه تالاب‌های خشک‌شده هامون (شمال استان)، کفه‌های نمکی دشت سیستان و نواحی پست جنوبی (مانند حوضه جازموریان و سواحل مکران) متمرکز است. این الگوی توزیع فضایی با واقعیت‌های اکولوژیکی و ژئومورفولوژیکی منطقه انطباق کامل دارد.

بررسی انطباق مقادیر شاخص NDSI در نقاط شاهد منتخب (شامل پهنه‌های نمک‌زار مطلق شمالی، دشت‌های شور مرکز و سبخاهای ساحلی جنوب) نشان داد که الگوی توزیع فضایی لایه شوری، انطباق مکانی قابل‌توجهی با عوارض زمین‌شناسی قطعاً شور دارد و صحت نسبی این لایه را در مقیاس استانی تأیید می‌کند.

این لایه شوری (با وزن ۰/۲۸ در مدل AHP) به‌عنوان مهم‌ترین زیرمعیار لایه خاک، در تلفیق نهایی نقشه توان اراضی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج پهنه‌بندی شوری (جدول ۴) نشان داد که ۳۴ درصد از مساحت استان در کلاس نامستعد (شوری زیاد) و ۲۶/۱ درصد در کلاس کمی مستعد (شوری متوسط) قرار دارند. این یافته با واقعیت‌های ژئومورفولوژیک منطقه کاملاً همخوانی دارد؛ چرا که استان دارای پهنه‌های وسیع نمک‌زار (هامون، جازموریان) و سبخاهای شور ساحلی (مکران) است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

جدول ۳. مساحت طبقات مختلف مناطق مستعد کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان از نظر محدودیت‌های منابع پایه و محیطی (آب، خاک و کاربری اراضی)

Table 3. Area of different land suitability classes for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province based on basic resource and environmental limitations (water, soil, and land use)

Criterion	Suitability Class	Range / Condition	Area (km²)	Percentage (%)
Distance from water canals	Highly suitable (S1)	0–800 m	26,009	13.9
	Moderately suitable (S2)	800–1,500 m	17,725	9.4
	Marginally suitable (S3)	1,500–2,500 m	20,968	11.2
	Unsuitable (N)	More than 2,500 m	122,800	65.5
Soil characteristics	Highly suitable (S1)	No limitations (suitable texture, low salinity)	30937	16.5
	Moderately suitable (S2)	Minor and correctable limitations	50813	27.1
	Marginally suitable (S3)	Requires major improvements (moderate salinity, poor texture)	64688	34.5
	Unsuitable (N)	Severe limitations (extreme salinity, salt marsh)	41062	21.9
Land use	Highly suitable (S1)	Active cropland	2,438	1.3
	Moderately suitable (S2)	Shrubland and sparse rangeland (convertible; NDVI ≥ 0.10)	36,938	19.7
	Marginally suitable (S3)	True bare land (NDVI < 0.10)	146,064	77.9
	Unsuitable (N)	Urban areas, water bodies, wetlands, forests, mangroves, alpine grasslands, and snow-covered areas	2,062	1.1

جدول ۴. مساحت طبقات مختلف مناطق مستعد کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان از نظر معیار شوری خاک

Table 4. Area of different land suitability classes for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province based on soil salinity criterion

Suitability Class		Area (km²)	Percentage of Total Province (%)
Highly suitable (S1)	Very low salinity	38063	20.3
Moderately suitable (S2)	Low salinity	36,750	19.6
Marginally suitable (S3)	Moderate salinity	48,938	26.1
Unsuitable (N)	High to very high salinity	63,751	34.0

به منظور دستیابی به نقشه نهایی و کاربردی به منظور توسعه کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان، علاوه بر تلفیق هشت معیار اصلی با بهره‌گیری از اوزان مستخرج از مدل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، لایه محدودیت‌های قطعی (Boolean Mask) نیز در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) اعمال شد. این لایه با ترکیب سه منبع داده هم‌زمان ساخته شد: (۱) کلاس‌های اراضیِ دارای منع غیرقابل‌تبدیلِ قانونی یا اکولوژیکی مشتق‌شده از لایه کاربری اراضی ESA WorldCover 2021 شامل مناطق شهری و زیرساختی، پهنه‌های آبی، تالاب‌ها و اراضی تالابی، جنگل‌ها و مانگروها (حرا)، چمنزارهای کوهستانی حساس و پهنه‌های برفی، به‌همراه پیکسل‌های حاشیه‌ای و بدون‌داده (به‌صورت محافظه‌کارانه)؛ (۲) پهنه‌های نمک‌زار مطلق و هامادها که با طبقه‌بندی شکست طبیعی (Jenks) بر لایه شاخص شوری نرمال‌شده (NDSI) سال

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

۲۰۲۳ (آستانه: NDSI > ۰/۰) به‌عنوان سطوح غیرخاکی تبخیری شناسایی و الحاق شدند؛ و (۳) مسیل‌ها و آبراهه‌های اصلی به‌عنوان خطر سیلاب فصلی که از تلفیق تحلیل هیدرولوژیک ۳۰DEM متری (آستانه تجمع جریان معادل حوضه ۴/۵ کیلومترمربعی) و لایه هیدروگرافی مشارکتی OSM استخراج گردیدند. گفتنی است که این ماسک صرفاً سطوح غیرخاکی، خطرات سیلاب و موانع قانونی را حذف می‌کند و از اعمال ماسک برای خاک‌های شور، تپه‌های ماسه‌ای و اراضی صخره‌ای خودداری شد؛ زیرا این متغیرها پیش‌تر به‌عنوان معیارهای اصلی (شوری و بافت خاک) در فرآیند هم‌پوشانی وزنی لحاظ شده‌اند و حذف مجدد آنها مصداق بارز احتساب مضاعف (Double Counting) و خطای روش‌شناختی در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است؛ در عوض، این پهنه‌ها به‌طور خودکار کمترین امتیاز را کسب کرده و در کلاس‌های پایین قرار گرفته‌اند. پس از اعمال لایه باینری محدودیت‌ها بر نقشه مکان‌یابی اولیه، پهنه‌بندی اراضی استان بر اساس میزان توان برای کشت پسته در پنج طبقه تفکیک شد. نتایج نشان می‌دهد که مناطق دارای محدودیت مطلق (کلاس صفر) با مساحت ۴۰۸۴ کیلومترمربع، ۲/۲ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرند که به دلایل اکولوژیکی یا موانع قانونی، امکان توسعه باغات پسته در آنها وجود ندارد. از سوی دیگر، اراضی نامستعد (کلاس ۱) با مساحت ۵۱۶۰۳ کیلومترمربع (۲۷/۵ درصد) فاقد موانع قانونی هستند؛ اما به دلیل محدودیت‌های بسیار شدید در معیارهای ارزیابی مانند شوری زیاد خاک، فاصله زیاد از منابع آب و شیب تند، احداث باغ در آنها فاقد توجیه فنی و اقتصادی ارزیابی می‌شود.

بر اساس یافته‌های پژوهش (جدول ۵)، بیشترین سهم از مساحت استان به اراضی کمی مستعد با مساحت ۶۲۷۷۵ کیلومترمربع (۳۳/۵ درصد) اختصاص یافته است. توسعه کشت پسته در این اراضی با محدودیت‌های قابل‌توجهی همراه بوده و نیازمند تمهیدات اصلاحی سنگین مانند اصلاح خاک و تامین آب با صرف هزینه‌های زیاد خواهد بود. در مقابل، اراضی نسبتاً مستعد منطبق بر ۴۳۱۵۵ کیلومترمربع (۲۳/۰ درصد) از مساحت کل، شرایط متوسط و مطلوبی را ارائه می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که محدودیت‌های موجود در این پهنه‌ها عمدتاً جزئی بوده و با اعمال مدیریت صحیح زراعی و هزینه‌های متعارف قابل رفع هستند. درنهایت، اراضی کاملاً مستعد با مساحت ۲۵۸۸۳ کیلومترمربع، حدود ۱۳/۸ درصد از اراضی استان را به خود اختصاص داده‌اند. این پهنه‌ها بهترین و بهینه‌ترین شرایط را از منظر تامین نیازهای اکولوژیک، خاکی و زیرساختی گیاه پسته دارا بوده و به دلیل فقدان هرگونه محدودیت جدی، پیشنهاد می‌شود به عنوان هسته‌های اصلی و در اولویت برنامه‌های توسعه باغات پسته استان قرار گیرند.

گفتنی است که میان درصد خاک‌های نامستعد در لایه خاک (۲۱/۹ درصد) و درصد مناطق دارای محدودیت مطلق در نقشه نهایی (۲/۲ درصد) تفاوت مفهومی وجود دارد. لایه خاک نامستعد در فرآیند هم‌پوشانی وزنی AHP شرکت می‌کند و با کسب کمترین امتیاز (۱)، در کاهش ارزش نهایی پیکسل‌ها نقش دارد، اما به‌طور مستقیم حذف نمی‌شود تا از احتساب مضاعف (Double Counting) جلوگیری شود. در مقابل، لایه محدودیت مطلق (Boolean Mask) شامل مجموعه‌ای از عوارض غیرخاکی و دارای منع قانونی است (مانند مناطق شهری، پهنه‌های آبی، تالاب‌ها، جنگل‌های حرا، چمنزارهای کوهستانی، پهنه‌های برفی، مسیل‌های اصلی و تنها پهنه‌های نمک‌زار مطلق که با آستانه NDSI > ۰/۰۰) که به‌طور کامل از چرخه ارزیابی حذف می‌شوند. بنابراین، این دو عدد مربوط به دو لایه مجزا با ماهیت متفاوت هستند و مقایسه مستقیم آنها صحیح نیست.

بحث

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی توان اراضی برای توسعه کشت پسته در استان سیستان و بلوچستان با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد. پس از اعمال لایه باینری محدودیت‌ها بر نقشه توان اولیه، پهنه‌بندی اراضی استان بر اساس توان اراضی برای کشت پسته در پنج طبقه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

جدول ۵. پهنه‌بندی مناطق مساعد کشت پسته استان سیستان و بلوچستان

Table 5. Zoning of suitable areas for pistachio cultivation in Sistan and Baluchestan Province

Suitability Class	Area (km²)	Percentage of Total Province (%)
Highly suitable (S1)	25,883	13.8
Moderately suitable (S2)	43,155	23.0
Marginally suitable (S3)	62,775	33.5
Unsuitable (N)	51,603	27.5
Absolute limitation (N_0)	4,084	2.2

تفکیک شد. نتایج نشان می‌دهد که مناطق دارای محدودیت مطلق (کلاس صفر) با مساحت ۴۰۸۴ کیلومترمربع، حدود ۲/۲ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرند که به دلایل اکولوژیکی یا موانع قانونی، امکان توسعه باغات پسته در آنها وجود ندارد. از سوی دیگر، اراضی نامستعد (کلاس ۱) با مساحت ۵۱۶۰۳ کیلومترمربع (۲۷/۵ درصد) فاقد موانع قانونی هستند، اما به دلیل محدودیت‌های بسیار شدید در معیارهای ارزیابی مانند شوری زیاد خاک، فاصله زیاد از منابع آب و شیب تند، احداث باغ در آنها فاقد توجیه فنی و اقتصادی ارزیابی می‌شود.

بر اساس یافته‌های پژوهش، بیشترین سهم از مساحت استان به اراضی کمی مستعد (کلاس ۲) با مساحت ۶۲۷۷۵ کیلومترمربع (۳۳/۵ درصد) اختصاص یافته است. توسعه کشت پسته در این اراضی با محدودیت‌های قابل‌توجهی همراه بوده و نیازمند تمهیدات اصلاحی سنگین مانند اصلاح خاک و تامین آب با صرف هزینه‌های زیاد خواهد بود. در مقابل، اراضی نسبتاً مستعد (کلاس ۳) منطبق بر ۴۳۱۵۵ کیلومترمربع (۲۳/۰ درصد) از مساحت کل، شرایط متوسط و مطلوبی را ارائه می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که محدودیت‌های موجود در این پهنه‌ها عمدتاً جزئی بوده و با اعمال مدیریت صحیح زراعی و هزینه‌های متعارف قابل رفع هستند. درنهایت، اراضی کاملاً مستعد (کلاس ۴) با مساحت ۲۵۸۸۳ کیلومترمربع، حدود ۱۳/۸۰ درصد از اراضی استان را به خود اختصاص داده‌اند.

در مجموع، نتایج نشان داد که حدود ۳۶/۸ درصد (معادل ۶۹۰۳۸ کیلومترمربع) از مساحت استان (شامل کلاس‌های مستعد و نسبتاً مستعد) پتانسیل قابل‌توجهی برای توسعه کشت پسته دارند. این یافته نشان می‌دهد که با وجود پتانسیل‌های موجود، محدودیت‌های اکولوژیکی و زیرساختی، توسعه کشت پسته را در بیش از نیمی از مساحت استان با چالش مواجه می‌کند.

نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که معیار فاصله از کانال آب با وزن ۰/۳۲ بیشترین اهمیت را در تعیین مناطق مستعد دارد و پس از آن، معیارهای ویژگی‌های تلفیقی خاک (۰/۲۵) و فاصله از جاده (۰/۱۴) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این ترتیب اولویت با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی قابل‌توجهی دارد. مطالعات انجام‌شده در شهر آیسک نیز نشان داد که پارامترهای آب و خاک مهم‌ترین عوامل محدودکننده در کشت پسته هستند. ارزیابی‌ها در استان آذربایجان شرقی حاکی از آن است که معیار بارش و دما در رتبه اول اهمیت قرار دارند (۳).

در این پژوهش، پارامترهای اقلیمی و فنولوژیک نه به‌صورت لایه‌های کلان و مستقل، بلکه از طریق شاخص‌های توپوکلیماتیک (Topoclimatic) و با در نظر گرفتن واقعیت‌های جغرافیایی استان در مدل لحاظ شده‌اند. اگرچه بخش وسیعی از استان را دشت‌های کم‌ارتفاع تشکیل می‌دهد، اما وجود تنوع توپوگرافی (از دشت سیستان تا ارتفاعات تفتان، بارز و سراوان) خرد اقلیم‌های (Microclimates) متفاوتی را ایجاد کرده است. در این چارچوب، لایه‌های ارتفاع از سطح دریا و جهت شیب به‌عنوان شاخص‌های کارآمد برای مدیریت ریسک‌های فنولوژیک نظیر تنش‌های حرارتی شدید و تبخیر – تعرق زیاد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

در نواحی پست و همچنین شناسایی پهنه‌های مساعدتر در نواحی نیمه‌مرتفع به کار گرفته شدند. از سوی دیگر، در اقلیم فراخشک این استان، معیار فاصله از کانال آب به‌عنوان یک عامل غالب (Overriding Factor) عمل می‌کند؛ به این معنا که حتی در صورت وجود تناسب دمایی، فقدان دسترسی پایدار به آب، امکان توسعه کشت را سلب می‌کند. بنابراین، مدل طراحی‌شده با تلفیق متغیرهای توپوگرافی (برای تفکیک ریزاقلیم‌ها) و دسترسی به آب، چارچوبی واقع‌گرایانه برای ارزیابی توان اراضی ارائه می‌دهد.

بررسی‌ها در استان ماردین ترکیه نیز نشان داد که ترکیب داده‌های هواشناسی، توپوگرافی، خاک و عوامل اقتصادی می‌تواند مناطق مستعد کشت پسته را با دقت زیاد شناسایی کند و این موضوع نقش تعیین‌کننده دسترسی به منابع آبی در مناطق خشک را بیش از پیش تأیید می‌کند (۱۴). مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری در دشت مختاران نشان داد که روش AHP به دلیل انطباق بهتر با الگوهای کشت واقعی، دقت بیشتری دارد (۷). یافته‌های پژوهش حاضر نیز این نتیجه را تأیید می‌کند؛ چرا که پهنه‌های مستعد شناسایی‌شده با الگوی فعلی کشت پسته در استان (به‌ویژه در مناطق خاش، زاهدان و ایرانشهر) همخوانی قابل‌توجهی دارند.

در مقایسه با سایر مناطق کشور، نتایج کاربرد مدل‌ها در شهرستان دامغان نشان داد که ۹۱/۴ درصد اراضی در کلاس‌های بسیار مناسب و مناسب قرار دارند (۲۰). این درصد بیشتر از یافته پژوهش حاضر (۳۷/۶ درصد مجموع مستعد و نسبتاً مستعد) است که می‌تواند به تفاوت در شرایط اقلیمی، نوع معیارهای انتخابی و روش وزن‌دهی نسبت داده شود. همچنین ارزیابی‌ها در استان زنجان نشان داد که مدل AHP نسبت به منطق بولی دقت بیشتری داشته و نتایج واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهد (۱۷).

یافته‌های تحلیل تک‌معیاره‌ها الگوهای منطقی و قابل‌تفسیری را نشان می‌دهند. از نظر توپوگرافی، ۷۲ درصد استان از نظر شیب (۸-۰ درصد) و بیش از ۴۰ درصد از نظر جهات شیب (جهات جنوبی) در کلاس مستعد قرار دارند که نشان‌دهنده پتانسیل زیاد استان از نظر شرایط فیزیکی زمین است. این یافته با مطالعات انجام‌شده در ترکیه مبنی بر پتانسیل زیاد مناطق دشتی و نیمه‌دشتی برای کشت پسته همخوانی دارد (۲۵).

از نظر دسترسی به بازار، بیش از ۷۹ درصد استان در فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتری از مراکز جمعیتی قرار دارند که نشان‌دهنده ظرفیت مناسب برای بازاریابی محصول است. اما چالش اساسی در دسترسی به منابع آبی مشهود است؛ به‌طوری که ۶۵/۵ درصد از مساحت استان از نظر فاصله از کانال‌های آبی در کلاس نامستعد قرار گرفته‌اند. این یافته با نتایج ارزیابی‌ها در جنوب غرب الجزایر همخوانی دارد که نشان دادند محدودیت منابع آبی مهم‌ترین عامل محدودکننده در توزیع پسته است (۴). در این راستا و برای غلبه بر این محدودیت، بهره‌گیری از زیرساخت‌های نوین مانند سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی که موجب افزایش چشمگیر بهره‌وری آب و بهبود جذب عناصر در پسته می‌شود (۲۴)، در پهنه‌های مستعد استان ضروری است.

از نظر ویژگی‌های خاک، ۱۶/۵ درصد از مساحت استان در کلاس مستعد و ۲۷/۱ درصد در کلاس نسبتاً مستعد قرار دارند که نشان می‌دهد بخش قابل‌توجهی از اراضی استان دارای شرایط خاکی متوسطی هستند که با مدیریت صحیح (اصلاح بافت، کنترل شوری و تغذیه مناسب) قابل بهبود هستند. لزوم توجه به کنترل شوری در این اراضی با یافته‌های پیشین مبنی بر تأثیر مخرب شوری بر کاهش زیست‌توده و اختلال در جذب عناصر غذایی نهال‌های پسته (۶) همخوانی دارد و وزن زیاد اختصاص‌یافته به لایه خاک در این مدل را توجیه می‌کند. افزون بر این، ضرورت ارزیابی و مدیریت دقیق خاک با نتایج پژوهش‌هایی که اثبات کردند فعالیت‌های مستمر کشاورزی در باغات پسته می‌تواند موجب تغییرات فیزیکوشیمیایی و افزایش دسترس‌پذیری فلزات سنگین شود (۹)، مطابقت دارد. این یافته با مطالعاتی که شوری و بافت خاک را از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در کشت پسته معرفی کرده‌اند (۲) نیز همخوانی دارد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

با توجه به وسعت بسیار زیاد منطقه مطالعاتی (بیش از ۱۸۷,۰۰۰ کیلومترمربع) و ماهیت کلان این پژوهش، نتایج حاصل بیشتر جنبه غربالگری استراتژیک داشته و به‌عنوان یک نقشه راه عمل می‌کند؛ ازاین‌رو برای اجرای پروژه‌های عملیاتی، مطالعات تفصیلی در مقیاس دشت ضروری است. در این مدل، با توجه به واقعیت‌های اقلیم خشک استان، تمرکز آگاهانه بر محدودکننده‌های قطعی و بومی قرار گرفت و با اعمال ماسک محدودیت‌های قطعی (شامل ۲/۲ درصد مساحت استان)، از تداخل توسعه با کاربری‌های حساس جلوگیری شد. اگرچه اعتبارسنجی آماری نقطه‌ای (مانند محاسبه R^2 با داده‌های میدانی EC) به دلیل وسعت بسیار زیاد منطقه مطالعاتی و محدودیت‌های لجستیکی در این پژوهش میسر نبود، اما اعتبار لایه شوری از سه طریق علمی تضمین شده است: اول، استفاده از شاخص شوری نرمال‌شده (Normalized Difference Salinity Index - NDSI) مبتنی بر فیزیک بازتابش امواج (باند قرمز (Band 4) و مادون قرمز نزدیک (Band 5) ماهواره لندست ۸) است که به‌طور خاص برای شناسایی پوسته‌های نمکی و کانی‌های تبخیری در مناطق خشک طراحی شده و در ادبیات معتبر سنجش از دور تأیید شده است (۲۲). دوم، به‌منظور سنجش انطباق خروجی مدل با واقعیت، از رویکرد اعتبارسنجی کیفی – مفاهیمی (Qualitative-Conceptual Validation) با استفاده از ۵ نقطه مرجع شناخته‌شده در شمال (هامون هیرمند و هامون صابری)، مرکز – جنوب (دشت بمپور) و جنوب (سبخاهای ساحلی مکران) استان استفاده شد. استخراج مقادیر شاخص NDSI در این نقاط (بر اساس میانگین ۳۲۵ تصویر لندست ۸ در سال ۲۰۲۳ با تاریخ میانه ۳۰ ژوئن ۲۰۲۳) نشان‌دهنده انطباق مکانی قابل‌توجهی با عوارض زمین‌شناسی قطعاً شور بود که صحت نسبی الگوی توزیع شوری در مقیاس استانی را تأیید می‌کند. سوم، به‌جای تکیه بر مقادیر مطلق پایگاه داده جهانی SoilGrids که ممکن است در مقیاس محلی دارای سوگیری سیستماتیک باشند، از روش استانداردسازی نسبی چندک (Quantile) استفاده شد. این رویکرد، تمرکز مدل AHP را از دقت مطلق عددی به شناسایی الگوی نسبی و مقایسه‌ای شوری در سطح استان معطوف می‌کند که برای غربالگری استراتژیک و اولویت‌بندی اراضی در مقیاس کلان، کاملاً کفایت می‌کند. با این حال، به‌عنوان محدودیت ذاتی پژوهش تأکید می‌گردد که برای اجرای پروژه‌های عملیاتی در مقیاس دشت، اعتبارسنجی میدانی و کالیبراسیون محلی این شاخص‌ها با داده‌های EC ضروری است. با استفاده از ابزار Tabulate Area در محیط ArcGIS، درصد مساحت هر شهرستان در طبقات مستعد (کلاس‌های ۳ و ۴) محاسبه و با سطح کشت واقعی آن شهرستان مقایسه شد. نتایج نشان داد که حدود ۲۶/۴ درصد از کل سطح کشت پسته استان (معادل ۲۹۶۹ هکتار از ۱۱۲۶۱ هکتار) در پهنه‌های مستعد شناسایی‌شده توسط مدل قرار دارند. این درصد نشان‌دهنده تمایز مفهومی آشکار میان پتانسیل اکولوژیکی ذاتی و الگوی کشت واقعی است: نخست، شهرستان‌های خاش (۴۰/۱ درصد اراضی مستعد، ۳۳۱۳ هکتار کشت) و تفتان (۳۷/۳ درصد مستعد، ۳۲۵۰ هکتار کشت) همخوانی قابل توجهی با پیش‌بینی‌های مدل دارند. این دو شهرستان در مجموع ۵۸/۳ درصد از کل سطح زیر کشت استان را تشکیل می‌دهند و ۸۵/۵ درصد از کشت واقع در پهنه‌های مستعد مدل در این دو شهرستان متمرکز است. دوم، واگرایی معناداری در شهرستان زاهدان دیده شد؛ این شهرستان با وجود دارا بودن بیشترین سطح زیر کشت استان (۴,۲۵۰ هکتار)، تنها ۸/۳ درصد اراضی آن در مدل به‌عنوان مستعد شناسایی شد. این واگرایی نه‌تنها ضعف مدل نیست، بلکه هشداری اکولوژیک است که نشان می‌دهد توسعه پسته در زاهدان عمدتاً متکی بر برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی (چاه‌های عمیق) است، نه پتانسیل ذاتی اراضی. مدل با طبقه‌بندی این مناطق به‌عنوان نامستعد یا کمی مستعد، نسبت به خطرات بلندمدت فرونشست و شور شدن سفره‌های آب زیرزمینی هشدار می‌دهد. سوم، در نقطه مقابل، مدل مناطقی مانند سرباز (۸۳/۸ درصد مستعد)، مهرستان (۷۸/۷ درصد)، سیب و سوران (۶۸/۲ درصد) و زابل (۶۲/۶ درصد مستعد) را با پتانسیل اکولوژیک بسیار زیاد اما

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

فاقد کشت فعلی (یا کشت بسیار ناچیز) شناسایی کرده است. این مناطق به‌عنوان ذخایر استراتژیک توسعه آینده با رویکرد پایدار معرفی می‌شوند که با تأمین زیرساخت‌های آبی پایدار (مانند انتقال آب یا مدیریت یکپارچه دشت و سرمایه‌گذاری هدفمند، قابلیت تبدیل به قطب‌های تولید پسته را دارند.

این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی به‌درستی پتانسیل اکولوژیکی ذاتی را از الگوی کشت واقعی مبتنی بر سرمایه‌گذاری تفکیک کرده و بدین ترتیب هشداری پیشگیرانه درباره پایداری بلندمدت کشت پسته در مناطقی مانند زاهدان ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس یافته‌های پژوهش، استان سیستان و بلوچستان با وجود محدودیت‌های جدی در دسترسی به منابع آبی، پتانسیل قابل‌توجهی برای توسعه کشت پسته دارد. حدود ۳۶/۸ درصد مساحت استان (۲۵۸۸۳ کیلومترمربع در کلاس مستعد و ۴۳۱۵۵ کیلومترمربع در کلاس نسبتاً مستعد) دارای شرایط مناسب برای توسعه کشت پسته هستند. معیارهای فاصله از کانال آب (۰/۳۲)، ویژگی‌های خاک (۰/۲۵) و فاصله از جاده (۰/۱۴) مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در شناسایی مناطق مستعد هستند. توسعه پایدار کشت پسته در استان نیازمند رویکردی یکپارچه شامل مدیریت پایدار منابع آبی (توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار)، بهسازی شبکه جاده‌ای، بهبود ویژگی‌های خاک و ارائه حمایت‌های تخصصی (توسعه ارقام مقاوم و پایش ماهواره‌ای) است. بر این اساس پیشنهاد می‌شود در برنامه‌ریزی‌های آتی، تمرکز توسعه بر مناطق مستعد شناسایی‌شده قرار گیرد. در پایان، با توجه به ماهیت کلان‌مقیاس پژوهش حاضر، برای پژوهش‌های آینده توصیه می‌شود که مطالعات در مقیاس خرد (دشت)، معیارهای اقلیمی مستقیم و دقیق‌تر (مانند ساعات سرما، دمای حداقل مطلق و داده‌های ایستگاهی درون‌یابی‌شده) را به مدل اضافه کنند. همچنین بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری فازی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بیشتر (مانند Sentinel-2) برای ارزیابی دقیق‌تر خاک و بررسی اثرات تغییر اقلیم، می‌تواند ارزیابی توان اراضی را از حالت غربالگری استراتژیک به برنامه‌ریزی کاملاً عملیاتی ارتقا دهد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از کارشناسان محترم سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان که در ارائه دیدگاه‌های تخصصی، تعیین آستانه‌های طبقه‌بندی و تکمیل پرسشنامه‌های خبرگی برای وزن‌دهی معیارها در این پژوهش همکاری صمیمانه داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

1. Allbed, A., L. Kumar and Y. Y. Aldakheel. 2014. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma* 230: 1-8.
2. Amin, H., M. Mokarram and A. R. Zarei. 2023. Using the fuzzy-AHP technique for evaluating the land ecological potential for pistachio cultivation with an emphasis on climatic variables. *Arabian Journal of Geosciences* 16(4): 227.
3. Arabi, M., H. Sadrnia and M. Yaghoobzade. 2023. Locating areas prone to pistachio cultivation in Ayask using geographic information system. *Journal of Aquifer and Qanat* 4(1): 30-38 (in Farsi).
4. Bendouina, N., L. Guerine and K. Hadjadj. 2025. Mapping and distribution of the Atlas pistachio (Pistacia atlantica Desf.) in the provinces of Naâma and El Bayadh (South-West Algeria). *Biharean Biologist* 19(1): 1-13.
5. Besharat, N., A. Tajabadi Pour and V. Mozafari. 2014. Effect of Phosphorus and Water Stress on Growth, some Water Relations and Plant Nutrient Concentration of Pistachio Seedlings in Greenhouse Conditions. *Journal of Water and Soil Science* 18(67): 339-354 (in Farsi).

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]

6. Eskandari, S. and V. Mozafari. 2012. Effect of Soil Copper and Salinity on Growth and Chemical Composition of Two Pistachio Cultivars. *Journal of Water and Soil Science* 16(60): 199-213 (in Farsi).
7. Fall-Soleiman, S., M. Hajipour and H. Sadeghi. 2014. Comparison of efficiency of AHP and TOPSIS multi-criteria decision-making methods for determine potential areas for pistachio cultivation in Mokhtaran Plain, Birjand County, within a Geographic Information System environment. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences* 13(31): 133-155 (in Farsi).
8. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... and D. Alsdorf. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics* 45(2).
9. Ghaneiardakani, J., S. A. Mazhari and F. Ayati. 2025. Environmental Assessment of Agricultural Activities on the Geochemistry of Surface Soils in the Pistachio Orchards of Southern Mehriz. *Journal of Water and Soil Science* 29(2): 107-124 (in Farsi).
10. Girres, JF., and Touya, G. 2010. Quality assessment of the French OpenStreetMap dataset. *Transactions in GIS* 14(4): 435-459.
11. Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau and R. Moore. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27.
12. Haklay, M. 2010. How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design* 37(4): 682-703.
13. Jenks, G. F. and F. C. Caspall. 1971. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers* 61(2): 217-244.
14. Maghsoudi, H. and V. A. Asadi. 2020. Yield Mapping in a pistachio orchard with evaluation of a designed measurement system for manual harvesting (A case study: Manzel-Abad district of Shahr-e Babak). *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery* 9(1): 57-67 (in Farsi).
15. Mercan, Ç. and V. Acibuca. 2023. Land suitability assessment for pistachio cultivation using GIS and multi-criteria decision-making: A case study of Mardin, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 195(11): 1-22.
16. Metternicht, G. I. and J. A. Zinck. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment* 85(1): 1-20.
17. Mirmousavi, S. H. and M. Mirian. 2014. Study and Zoning of Geographic Characteristics of Pistachio Cultivation in the Zanjan Province. *Journal of Geography and Planning* 18(49): 295-315 (in Farsi).
18. Ministry of Agriculture Jihad, Center for Statistics, Information and Communication Technology, Deputy of Statistics. 2024. *Agricultural statistics yearbook: Report on Horticultural, Mushroom, and Greenhouse Crops* (Vol. 3) (in Farsi).
19. Mirzadeh, N., B. Faizizadeh, H. Amiri and V. Dehghani. 2023. Application of GIS and Multi-Criteria Decision Making Method for investigating the feasibility of Pistachio Cultivation (Case Study: East Azerbaijan Province). *Management of Natural Ecosystems* 2(4): 38-51 (in Farsi).
20. Pourtaheri, M., A. Ahmadabadi and M. Rahbari. 2016. Feasibility Prone Areas of pistachio Cultivation in the City of Damghan (Using: the Vikor Approach). *Regional Planning* 5(20): 97-110 (in Farsi).
21. Radiom, S. 2022. Determination of sensor locations for monitoring of orchards parameters using remote sensing and GIS. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 10(37): 53-67 (in Farsi).
22. Saadat, S., L. Esmaeelnejad, H. Rezaei and R. Mirkhani. 2024. Monitoring soil salinity of the Sistan plain using field data and remote sensing. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 55(8): 1297-1309 (in Farsi).
23. Statistical Center of Iran. 2023. Statistical Yearbook of Sistan and Baluchestan Province - 2023. Available online at: https://www.amar.org.ir/. Accessed 28 June 2025 (in Farsi).
24. Tavakoli, A. and M. Basirat. 2023. Effect of Arranger of Conductor Tubes of Adjusted Subsurface Drip Irrigation (SSDIadj) on Potassium Absorption and Pistachio Yield at Damghan Region. *Journal of Water and Soil Science* 27(2): 179-193 (in Farsi).
25. Unal, E., A. Mermer and H. M. Dogan. 2004. Determining major orchard (pistachio, olive, vineyard) areas in Gaziantep Province using remote sensing techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34: 1-6.
26. Yarahmadi, J., A. Amini and G. Rostamizad. 2023. Accuracy Assessment of Pistachio Climate Suitability Map Based on ROC Curve. *Environment and Water Engineering* 9(1): 127-140 (in Farsi).
27. Zhu, Y., L. Sun, Q. Luo, H. Chen and Y. Yang. 2023. Spatial optimization of cotton cultivation in Xinjiang: A climate change perspective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 124: 103523.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.47176/jwss.30.3.75051]