DOI: 10.22059/ijswr.2021.316251.668859

تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۴، تیر ۱۴۰۰ (ص ۹۵۵-۹۴۳)

(علمی – پژوهشی)

Identification of Land Potential and Characterizing Limitations for Irrigated Wheat Cultivation in a Part of Qazvin Plain Land Using Fuzzy and AHP Techniques

MIR NASER NAVIDI[1*], JAVAD SEYEDMOHAMMADI[1], KAMBIZ BAZARGAN[1], AZAM KHOSRAVINEJAD[2], BAHAREH DELSOUZ KHAKI[1]

1. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
2. Researcher of Soil and Water Research Department, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Qazvin, Iran,

(Received: Jan. 2, 2021- Revised: Feb. 27, 2021- Accepted: March. 6, 2021)

ABSTRACT

Accurate assessment of land suitability for agricultural production plays an important role in reducing the effects of land degradation. The aim of this study was to apply fuzzy, AHP and GIS techniques to determine the degree of land suitability for wheat production in lands of about 61,000 ha located in Qazvin plain. By Investigating the land use maps, geology, topography, slope and satellite image of the region, the delineation of primary soil units was separated, then in the separated units, profiles were excavated and described, and soil horizons were sampled. Based on the characteristics of representative profiles in each map unit, land suitability assessment for wheat cultivation was performed using fuzzy method with AHP and square root method and land suitability map was prepared in GIS environment. According to the results of AHP-fuzzy method 48169.1 ha (78.2%) of the land are moderately suitable (S2), 9086 ha (14.7%) marginally suitable (S3) and 4346.3 ha (7.1%) currently unsuitable (N1). The most important limiting characteristics were slope, pH, ESP, drainage and soil salinity. The results showed that the fuzzy method integrated with AHP was able to evaluate accurately with high value of determination coefficient between land index and yield compared to the parametric method of the square root and the modified square root due to determining the appropriate limits of critical points, suitable weights for characteristics, use of fuzzy logic relations and principles and suitable membership functions. Therefore, the mentioned integrative method can be an accurate and effective method for better planning and management of land use for agricultural production.

Keywords: AHP, Fuzzy Sets, GIS, Land Suitability, Wheat.

*Corresponding author's Email: n.navidi@areeo.ac.ir

شناسایی استعداد اراضی و مشخص‌سازی محدودیت‌ها برای کشت آبی گندم در بخشی از اراضی دشت قزوین با استفاده از تکنیک‌های فازی و AHP

میرناصر نویدی*[۱]، جواد سیدمحمدی[۱]، کامبیز بازرگان[۱]، اعظم خسروی‌نژاد[۲]، بهاره دلسوز خاکی[۱]

۱. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۹- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶)

چکیده

ارزیابی دقیق تناسب اراضی برای تولید محصولات کشاورزی نقش مهمی در کاهش اثرات تخریب اراضی دارد. مطالعه حاضر با هدف بکارگیری تکنیک‌های فازی، AHP و GIS برای تعیین درجه تناسب اراضی جهت تولید گندم در اراضی به وسعت حدود ۶۱۰۰۰ هکتار واقع در دشت قزوین انجام شد. با بررسی نقشه‌های کاربری، زمین‌شناسی، توپوگرافی، شیب و تصویر ماهواره‌ای منطقه، محدوده واحدهای اولیه خاک تفکیک شد سپس در واحدهای تفکیک شده، خاکرخ‌ها حفر و تشریح شدند و نمونه‌برداری از افق‌های خاک انجام شد. براساس مشخصات خاکرخ‌های شاهد هر واحد نقشه، ارزیابی تناسب اراضی برای کشت گندم با استفاده از روش فازی با AHP و روش ریشه دوم انجام شد و نقشه تناسب اراضی در محیط GIS تهیه گردید. با توجه به نتایج، کاربرد روش فازی با AHP مشخص کرد که ۴۸۱۶۹/۱ هکتار، ۷۸/۲ درصد از اراضی دارای تناسب متوسط (S2)، ۹۰۸۶ هکتار، ۱۴/۷ درصد دارای تناسب بحرانی (S3) و ۴۳۴۶/۳ هکتار، ۷/۱ درصد نامناسب در حال حاضر (N1) می‌باشند. مهمترین خصوصیات محدودکننده، شیب، pH، ESP، زهکشی و شوری خاک بودند. نتایج مشخص کرد که روش تلفیقی فازی با AHP با ارزش ضریب تبیین بیشتر بین شاخص اراضی و عملکرد در مقایسه با روش پارامتریک ریشه دوم و ریشه دوم اصلاح شده، توانسته دقت ارزیابی را به دلیل تعیین حدود مناسب نقاط بحرانی، وزن‌های مناسب برای خصوصیات، استفاده از روابط و اصول منطق فازی و توابع عضویت مناسب افزایش دهد. بنابراین روش ذکر شده می‌تواند به عنوان روشی دقیق و مؤثر برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر کاربری اراضی برای تولیدات کشاورزی باشد.

واژه‌های کلیدی: AHP، مجموعه‌های فازی، GIS، تناسب اراضی، گندم.

مقدمه

سامانه‌های مدیریتی در تولیدات کشاورزی به دلیل پیشرفت در فنون کشاورزی، افزایش جمعیت و معرفی تنوع جدید با سود اقتصادی به سرعت در ایران توسعه یافته‌اند. اراضی قابل کشت در ایران محدود بوده و سبب ایجاد نگرانی عمیق برای مدیران کشاورزی است (McDowell *et al.*, 2018; Seyedmohammadi *et al.*, 2019). از این رو، انجام ارزیابی تناسب اراضی برای محصولات کشاورزی، به ویژه برای گندم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این اوصاف، با توجه به عوامل زیادی شامل موقعیت مکانی، آب و هوا، خصوصیات خاک و اثر متقابل آن‌ها، یک چالش جدی است که به طور همزمان باید ارزیابی شوند (Zhang *et al.*, 2015; Kazemi *et al.*, 2016; Ostovari *et al.*, 2019). بنابراین، لازم است که تلاش‌ها بر روی ارزیابی پتانسیل‌ها و محدودیت‌های اراضی برای تولید پایدار محصولات زراعی متمرکز شوند.

انتخاب یک الگوریتم دقیق و مناسب برای ارزیابی تناسب اراضی تأثیر زیادی در حال و آینده دارد. برای مدیریت مناسب کاربری اراضی روش‌هایی همانند ارزیابی تناسب اراضی با روش پارامتریک ریشه دوم توسعه یافته توسط Khiddir (1986)، چارچوب ارزیابی اراضی FAO (1976) و روش‌های سنتی مورد استفاده برای ارزیابی تناسب اراضی در سال‌های گذشته از جمله Seyedmohammadi and Esmaeelnejad (2014) و Rahimi *et al.* (2009) مواردی از این دست می‌باشند. در این روش‌ها، مشخصه‌های اراضی در برابر نیازهای زراعی مقایسه شده و رتبه‌بندی تناسب برای محصولات هدف با توجه به موقعیت مکانی، مشخصه‌های اقلیمی و خاک به‌دست می‌آید.

تعیین وزن مشخصه‌های اقلیم، خاک و زمین‌نمای مؤثر بر

* نویسنده مسئول: n.navidi@areeo.ac.ir

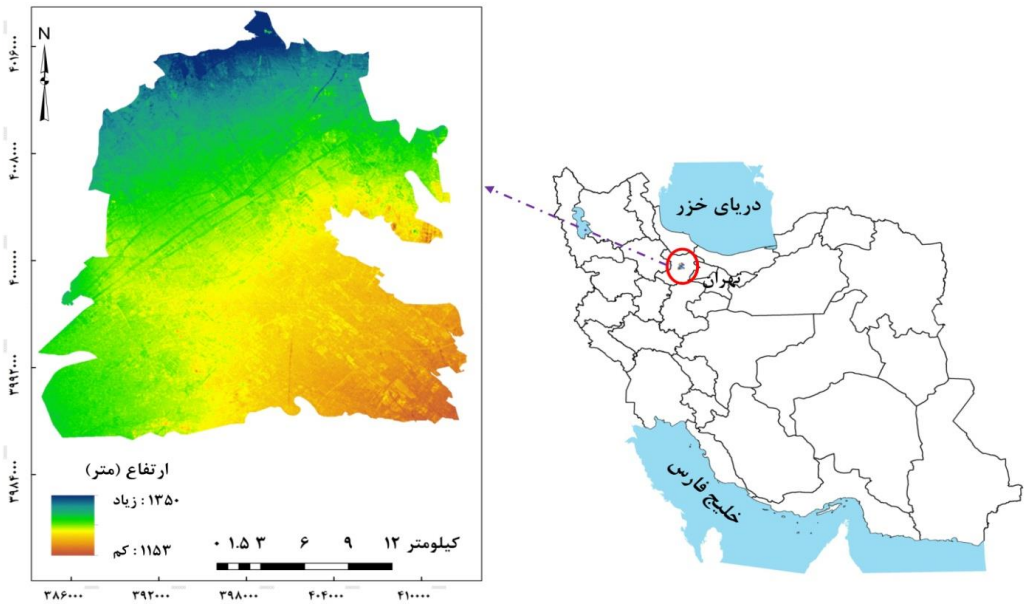
مناسب بودن اراضی، به دلیل اثرات متفاوت مشخصه‌ها بر تولید محصولات مختلف، یک گام بسیار مهم و ضروری در ارزیابی تناسب اراضی برای کشت محصولات است (Elsheikh *et al.*, 2013). روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که توسط Saaty (1980) توسعه یافته است، به عنوان یک روش قابل قبول برای کنترل چندگانه و ناهمگن مشخصه‌ها، در تلفیق با GIS استفاده شده است (Akinci *et al.*, 2013; Pilevar *et al.*, 2020; Amini *et al.*, 2020). AHP یک روش ساخت چند فاکتور در یک سلسله مراتب و تعیین اهمیت نسبی هر عامل است که برای تعیین وزن مشخصه‌های اراضی در مطالعاتی همانند Sarmadian and Keshavrzi (2001)، Hamzeh *et al.* (2014)، Zhang *et al.* (2015)، Kazemi *et al.* (2016)، Ostovari *et al.* (2019) و Seyedmohammadi *et al.* (2019) در ارزیابی تناسب اراضی استفاده شده است. تلفیق روش وزن‌دهی AHP با روش مجموعه‌های فازی به دلیل کنترل وزن مشخصه‌های اراضی و محاسبه ارزش تناسب اراضی می‌تواند روشی قوی برای افزایش دقت ارزیابی تناسب اراضی برای تولید یک محصول خاص مورد استفاده قرار گیرد.

گندم (*Triticum aestivum L*) از مهمترین غلات زراعی پرمصرف و استراتژیک بوده، که در طیف وسیعی از شرایط زیست‌محیطی در دنیا رشد می‌کند. بنابراین، باید با شرایط محلی از جمله مشخصه‌های آب و هوا، خاک و زمین‌نما با روش‌های جدید مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه با هدف ارزیابی دقیق تناسب اراضی برای محصول گندم و ارائه یک روش دقیق با ادغام روش اولویت‌بندی AHP، مجموعه‌های فازی و تکنیک GIS انجام شد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در اراضی دشت قزوین، ″۴۶′۴۲°۴۹ تا ″۴۲′۰۱°۵۰ طول شرقی و ″۰۹′۰۱°۳۶ تا ″۲۷′۱۸°۳۶ عرض شمالی، با مساحتی در حدود ۶۱۰۰۰ هکتار واقع شده است (شکل ۱). بالاترین و پایین‌ترین ارتفاع ۱۳۵۰ و ۱۱۵۳ متر از سطح آزاد دریا می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه از حدود ۲۱۰ تا بیش از ۵۵۰ میلی‌متر متغیر است. بررسی ماهانه از معتبرترین ایستگاه‌های استان نشان می‌دهد که ماه‌های جولای و آگوست گرم‌ترین ماه‌ها و ژانویه و فوریه سردترین ماه‌ها هستند. کمترین میانگین دما در سال در حدود ۲ درجه سلسیوس و بیشترین میانگین دمای سالانه ۱۸ درجه سلسیوس است. میانگین پتانسیل تبخیر و تعرق سالانه از حداقل ۱۳۳۰ میلی‌متر تا حداکثر ۱۵۸۷ میلی‌متر متغیر است. رژیم‌های رطوبتی خاک زریک و اریدیک ضعیف و رژیم‌های حرارتی شامل مزیک و ترمیک هستند. خاک‌های غالب منطقه مورد مطالعه شامل انتی‌سول‌ها، اینسپتی‌سول‌ها و آریدی‌سول‌ها می‌باشد. منطقه مورد مطالعه عمدتاً از رسوبات رودخانه، دریاچه و بادی از پلیستوسن تا به امروز تشکیل شده است (Ghorbani, 2013). محصولات زراعی غالب در منطقه مورد مطالعه شامل گندم، جو، ذرت، پنبه و حبوبات می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

نمونه‌برداری خاک، تجزیه آزمایشگاهی و مشخص‌سازی واحدهای نقشه

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 OLI/TIRS، نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع، توپوگرافی، زمین‌شناسی، شیب و کاربری اراضی، واحدهای فیزیوگرافی و اولیه خاک با توجه به اختلاف شیب از هم جدا شدند و سپس با مراجعه به منطقه مورد مطالعه و بررسی میدانی، مرز بین واحدهای اولیه خاک تا حدودی مشخص گردید. پروفیل‌های خاک در واحدهای خاک حفر شد. پس از تشریح پروفیل‌های خاک، ۲۱ پروفیل شاهد، نمونه‌های خاک از تمام افق‌های خاک گرفته شد. در این تحقیق از راهنمای تشریح خاک سرویس حفاظت خاک آمریکا (Soil Survey Staff, 2012) برای توصیف و نمونه‌برداری از خاک‌ها استفاده شده است. پس از آن، نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل و با استفاده از روش‌های استاندارد مورد تجزیه قرار گرفتند.

تجزیه‌ها شامل توزیع اندازه ذرات خاک توسط هیدرومتریک، درصد سدیم قابل تبادل (ESP) توسط استخراج استات آمونیوم و فتومترسنج شعله‌ای، هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از گل اشباع خاک، اسیدیته خاک (pH) با استفاده از نسبت ۲:۱ تعلیق خاک-آب، مقدار کربن آلی (OC) با استفاده از روش والکلی و بلک اصلاح شده، کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش کلسیمتری، گچ با استفاده از استون و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) در عصاره اگزالات سدیم بافر با pH 8.2 انجام شد (Soil Survey Staff, 2014a).

محدوده واحدهای طبقه‌بندی خاک (واحدهای نقشه) با استفاده از اطلاعات داده‌های خاک حاصل از تجزیه خاکرخ‌ها و اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای پردازش شده، مدل رقومی ارتفاع، توپوگرافی، شیب، زمین‌شناسی و نقشه‌های کاربری اراضی به‌طور دقیق مشخص شدند.

انتخاب خصوصیات مورد استفاده در روش‌ها

خصوصیات اقلیم شامل متوسط دما در مرحله گلدهی، سیکل رشد، رسیدگی و سبزینگی، زمین‌نما شامل شیب، سیل‌گیری و زهکشی و خاک شامل درصد سنگریزه، بافت خاک، عمق خاک، آهک، گچ، ظرفیت تبادل کاتیونی ظاهری، pH، کربن‌آلی، شوری و سدیمی بودن مورد بررسی قرار گرفته و مقادیرشان مشخص شد. لازم به توضیح است که مقادیر خصوصیات خاک با استفاده از ضرایب وزنی در بخش‌های مساوی عمق خاک به دست آمد. با استفاده از داده‌های اقلیمی ذکر شده در جدول (۱) و مقادیر نیازمندی‌های اقلیمی گندم (Sys *et al.*, 1993)، درجات خصوصیات اقلیمی تعیین شد که در جدول (۱) ذکر شده است. نهایتاً براساس درجات محاسبه شده مقدار شاخص اقلیم ۹۴/۲۷ و درجه اقلیم ۱۰۰ به دست آمد بنابراین خصوصیات اقلیمی محدودیتی برای رشد و توسعه گندم در منطقه مورد مطالعه ندارند.

مقادیر تعیین شده خصوصیات زمین‌نما و خاک با استفاده از نیازمندی‌های گندم ذکر شده در جدول (۲) به درجه تبدیل شدند. بررسی درجات به دست آمده برای خصوصیات مشخص کرد که خصوصیات اقلیم، سیل‌گیری، مقدار گچ و ظرفیت تبادل کاتیونی ظاهری خاک برای گندم در اراضی مورد مطالعه محدودیتی نداشته ولی خصوصیات شیب، زهکشی، درصد سنگریزه، بافت خاک، عمق خاک، آهک، pH، کربن‌آلی، شوری و سدیمی بودن خاک دارای محدودیت بودند بنابراین مشخصه‌های دارای محدودیت برای استفاده در روش‌های ارزیابی تناسب اراضی انتخاب شدند.

جدول ۱– خصوصیات اقلیمی و درجه‌های مربوطه

خصوصیات اقلیم	درجه سلسیوس	درجه
متوسط دما گلدهی	۲۰/۴۷	۹۶/۹۱
متوسط دما سیکل رشد	۱۵/۲۱	۹۵/۳۵
متوسط دما رسیدگی	۲۴/۴۴	۹۴/۲۷
متوسط دما سبزینگی	۱۲/۴۴	۹۴/۲۷

روش‌های ارزیابی تناسب اراضی

روش پارامتریک ریشه دوم: به‌طور کلی این روش شامل مراحل انتخاب خصوصیات اراضی، تعیین نیازهای محصولات و مطابقت نیازهای آن‌ها با خصوصیات اراضی می‌باشد (Sys *et al.*, 1991). خصوصیات مورد استفاده در این روش برای ارزیابی اراضی شامل اقلیم، زمین‌نما و خاک است. درجات به دست آمده برای خصوصیات انتخاب شده با استفاده از رابطه ۱ تلفیق شده و مقدار شاخص تناسب اراضی برای واحدهای مختلف محاسبه شد.

(رابطه ۱)

$$LSI = R_{\min} \times \sqrt{\frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \frac{C}{100} \cdots}$$

در رابطه ۱، LSI شاخص تناسب اراضی و A, B, C,... درجات اختصاص یافته برای مشخصه‌های مختلف و Rmin درجه مربوط به محدودکننده‌ترین عامل یا درجه حداقل است.

ریشه دوم اصلاح شده: شاخص‌های تناسب اراضی محاسبه شده به روش ریشه دوم (رابطه ۱)، با استفاده از رابطه‌های ۲ تا ۶، اصلاح شدند (Sys *et al.*, 1991) به این ترتیب که اگر چنانچه کمترین درجه تناسب مربوط به خصوصیات انتخاب شده، ۸۵ یا بیشتر باشد، از رابطه ۲، ۶۰ تا ۸۵ از رابطه ۳، ۴۰ تا ۶۰ از رابطه

۴، ۲۵ تا ۴۰ از رابطه ۵ و کمتر از ۲۵ از رابطه ۶ استفاده می‌گردد. در این رابطه‌ها CLSI[۱]، شاخص تناسب اراضی اصلاح شده و LSI[۲]، شاخص تناسب اراضی اصلاح نشده به روش ریشه دوم می‌باشد که از رابطه ۱ به دست آمده است.

$$CLSI = 75 + (LSI - 60)0.625$$ (رابطه ۲)

$$CLSI = 50 + (LSI - 24)0.410$$ (رابطه ۳)

$$CLSI = 25 + (LSI - 5)0.455$$ (رابطه ۴)

$$CLSI = LSI\,0.625$$ (رابطه ۵)

$$CLSI = LSI$$ (رابطه ۶)

جدول ۲- نیازمندی‌های پستی و بلندی و خاک برای کشت آبی محصول گندم.

کلاس تناسب	S1		S2	S3	N1	N2
سطح محدودیت	۰	۱	۲	۳	۴	
درجه‌بندی	۱۰۰	۹۵	۸۵	۶۰	۴۰	۲۵	۰
شیب (٪)[۱]	۲-۰	۵-۲	۸-۵	۱۶-۸	۲۵-۱۶	>۲۵
زهکشی	خوب	متوسط	ناقص	ضعیف با تهویه	ضعیف اما قابل زهکشی	ضعیف غیرقابل زهکشی
عمق خاک (سانتی‌متر)[۱]	>۹۰	۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۱۰-۳۰		<۱۰
بافت خاک	CL, SiCL, SCL, C<60s	L, Si, SiL, SC, SiC, C>60s	SL, C>60v	LS, Cm, SiCm	fS, LcS	cS
سنگریزه (٪)	۳-۰	۱۵-۳	۳۵-۱۵	۵۵-۳۵		>۵۵
آهک (٪)[۱]	۱۵-۳ ۳-۰	۳۰-۱۵	۴۰-۳۰	۵۰-۴۰	۶۰-۵۰	>۶۰
گچ (٪)[۱]	۳-۰	۵-۳	۱۰-۵	۱۵-۱۰	۲۰-۱۵	>۲۰
$pH_{(H2O)}$[۱]	۶/۵-۷	۶-۶/۵	۵/۶-۶	۵/۲-۵/۶	<۵/۲	
	۷/۵-۷	۸/۲-۷/۵	۸/۳-۸/۲	۸/۵-۸/۳	>۸/۵	
کربن آلی (٪)[۳]	>۰/۸	۰/۸-۰/۴	<۰/۴			
$EC(dS\ m^{-1})$[۱]	۴-۰	۸-۴	۱۲-۸	۱۶-۱۲	>۱۶	
ESP(%)[۱]	۴-۰	۸-۴	۱۶-۸	۲۴-۱۶	>۲۴	

جدول (۲) با استفاده از این منابع تدوین شده است: (Sys *et al.*, 1993; FAO, 2006; IIASA and FAO, 2012)

فازی تلفیق شده با AHP: برای تعیین کلاس‌های تناسب اراضی در واحدهای نقشه از تئوری مجموعه‌های فازی استفاده شد. در نظریه مجموعه‌های فازی، تابع عضویت میزان تناسب با یک کلاس را توصیف می‌کند. Zadeh (1965) پیشنهاد کرد که عضویت در یک مجموعه باید نه به عنوان ۰ (بدون عضو) یا ۱ (عضو) مانند تئوری مجموعه سنتی، بلکه به عنوان یک مقدار بین ۰ تا ۱ (نظریه مجموعه‌های فازی) اندازه‌گیری شود. ارزیابی یک خصوصیت شامل تعیین درجه عضویت خصوصیت برای هر یک از کلاس‌های تناسب است. نتیجه این ارزیابی، ماتریسی از مقادیر درجات عضویت خصوصیات در کلاس‌های تناسب در نظر گرفته می‌شود. خصوصیات تعریف نهایی مناسب بودن را به گونه دیگری تحت تأثیر قرار می‌دهند، بنابراین درجه اهمیت خصوصیات وزن‌دهی می‌شود. کلاس تناسب اراضی نهایی با ترکیبی از ماتریس وزن خصوصیات با ماتریس مقادیر عضویت فازی بدست می‌آید (Ruan, 1990).

برای هر خصوصیت و برای هر کلاس تناسب، توابع عضویت تعیین می‌شود. آن‌ها نشان‌دهنده درجه بستگی یک مقدار برای یک خصوصیت به یک کلاس تناسب است. اگر مقدار یک خصوصیت کاملاً متعلق به کلاس در نظر گرفته شده باشد، مقدار عضویت ۱ یا به طور کامل به کلاس تعلق نگرفته باشد مقدار عضویت صفر است و اگر تعلق مقدار یک خصوصیت به کلاس‌های متعدد در نظر گرفته شود مقدار عضویت می‌تواند از صفر تا ۱به دست آید. در این تحقیق، از توابع عضویت شامل S، Z و π شکل، به ترتیب رابطه‌های ۷، ۸ و ۹، برای تعیین مقادیر درجات عضویت فازی خصوصیات استفاده شد.

$$f(x;a,b) = \begin{cases} 0 & x \le a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \le x \le \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \le x \le b \\ 1 & x \ge b \end{cases}$$ (رابطه ۷)

$$f(x;a,b) = \begin{cases} 1 & x \le a \\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \le x \le \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \le x \le b \\ 0 & x \ge b \end{cases}$$ (رابطه ۸)

۱ Corrected Land Suitability Index

۲ Land Suitability Index

(رابطه ۹)

$$f(x;a,b,c,d)=\begin{cases}0 & x\le a\\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a\le x\le\frac{a+b}{2}\\ 1-2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2}\le x\le b\\ 1 & b\le x\le c\\ 1-2\left(\frac{x-c}{d-c}\right)^2 & c\le x\le\frac{c+d}{2}\\ 2\left(\frac{d-x}{d-c}\right)^2 & \frac{c+d}{2}\le x\le d\\ 0 & x\ge d\end{cases}$$

در این رابطه‌ها: x مقدار یک خصوصیت، a، b، c و d حدود مناسبی هستند، که مطابق با جدول نیازمندی‌ها (جدول ۱) برای خصوصیات تعیین می‌شوند. مقادیر عضویت تعیین شده در ماتریس R تنظیم می‌شوند. خصوصیات، تأثیر متفاوتی در تولید محصولات دارند. بدین منظور، وزن خصوصیات انتخاب شده (جدول ۳) طبق روش AHP در چهار مرحله شامل (۱) شکل‌گیری قضاوت‌ها، (۲) محاسبه رتبه‌های اختصاص یافته، (۳) تهیه ماتریس مقایسه زوجی (جدول ۳) و سرانجام، (۴) محاسبه وزن، تعیین شد (Saaty, 2008). در روش AHP همه معیارها و عوامل شناسایی شده، در ماتریس مقایسه دوبه‌دو که مبین اولویت‌های نسبی خصوصیات است، بیان می‌شوند. بنابراین مقادیر عددی مربوط به اولویت‌بندی، و یا اهمیت نسبی یک خصوصیت نسبت به دیگری، باید اختصاص‌دهی شده باشند. یک دامنه عددی بین ۱ تا ۹ برای مقایسه معیارها پیشنهاد شده است که در آن عدد ۱، نشان‌دهنده اهمیت برابر و مقدار ۹، نشان‌دهنده اهمیت بسیار زیاد یک خصوصیت نسبت به دیگری است (Saaty, 2008). در مرحله بعدی، مقادیر اولویت‌بندی اختصاص داده شده برای تعیین رتبه‌بندی عوامل مربوط که همان مرحله وزن‌دهی است، ترکیب و تلفیق می‌شوند. ابتدا بایستی بردار حاصل جمع وزن‌دار شده، تعیین شود. این کار از طریق وزن مربوط به اولین معیار در اولین ستون ماتریس اولیه مقایسه‌های جفت به جفت و سپس ضرب وزن مربوط به دومین معیار در دومین ستون و در ادامه ضرب وزن سومین معیار در سومین ستون انجام می‌شود و در نهایت مقادیر حاصل بر روی ردیف‌ها جمع می‌گردند. پس از محاسبات فوق آرایه سازگاری از طریق تقسیم آرایه حاصل جمع وزن‌دار شده بر وزن‌های معیار محاسبه شده قبلی، تعیین می‌شود. پس از محاسبه آرایه سازگاری، مقادیر مربوط به دو پارامتر و شاخص (کمیت عددی) می‌بایستی محاسبه گردند. آن‌ها عبارت ازکمیت لاندا و شاخص سازگاری هستند. کمیت لاندا عبارت از متوسط مقادیر آرایه سازگاری است. محاسبات مربوط به شاخص سازگاری، وابسته به مقدار محاسبه شده لاندا هستند. در شرایطی که ماتریس مقایسه‌های جفت به جفت، مثبت و متقابل باشد، کمیت لاندا همیشه برابر یا بزرگ‌تر از معیارهای ارزیابی (n) است. هرگاه ماتریس مقایسه‌های جفت به جفت سازگار باشد، آنگاه می‌توان λ_{max}-n را به عنوان سنجشی از درجه ناسازگاری در نظر گرفت (λ_{max} بزرگترین مقدار ویژه ماتریس وزن‌ها است).

(رابطه ۱۰) $$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$$

شاخص سازگاری (CI) سنجشی از اندازه و میزان انحراف از سازگاری به دست می‌دهد، علاوه بر آن نسبت سازگاری (CR) را نیز می‌توان محاسبه کرد:

(رابطه ۱۱) $$CR=\frac{CI}{RI}$$

RI یک شاخص تصادفی است (میانگین شاخص سازگاری ماتریس تصادفی CI) که وابسته به تعداد عناصر مورد مقایسه است. ارزیابی نسبت سازگاری بدین ترتیب است که هرگاه CR<۰/۱ باشد؛ سازگاری قابل قبول و معقولی در مقایسه‌های جفت به جفت وجود دارد. در غیر این صورت مقادیر اولیه ماتریس مقایسه‌های جفت به جفت می‌بایستی مورد تجدید نظر قرار گیرند. محاسبات روش AHP در محیط نرم‌افزار Expert choice اجرا شد.

جدول ۳- ماتریس مقایسه زوجی و مقادیر وزن خصوصیات با استفاده از روش AHP

خصوصیت	شیب	pH	سدیمی	زهکشی	شوری	کربن آلی	عمق، بافت، سنگریزه	آهک	وزن
شیب	۱	۱/۲	۱/۲	۲/۴	۴/۶	۵/۱	۹	۹	۰/۲۴۳
pH		۱	۱/۶	۱/۷	۴/۵	۵	۸/۹	۸/۹	۰/۲۲۴
سدیمی			۱	۱/۴	۴	۴	۸/۴	۸/۶	۰/۱۸۵
زهکشی				۱	۵	۶	۸/۲	۸/۳	۰/۱۷۹
شوری					۱	۳/۸	۸	۸/۱	۰/۰۸۵
کربن آلی						۱	۷/۸	۸	۰/۰۶۳
عمق، بافت، سنگریزه							۱	۱/۱	۰/۰۱۱
آهک								۱	۰/۰۱
نسبت سازگاری	۰/۰۶								

وزن‌های به دست آمده در ماتریس W قرار گرفتند. ماتریس ارزیابی تناسب E با ترکیب دو ماتریس W و R بر اساس رابطه ۱۲ تشکیل شد.

$$E = WoR \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

در این رابطه: o یک عملگر فازی است، این عملگر را می‌توان به عنوان یک T نرم مثلثی حداقل و یک T کونرم مثلثی را به جای حداکثر در نظر گرفت (Ruan, 1990). طبق این نرم‌ها، بهترین نتیجه برای ماتریس تناسب اراضی طبق رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ حاصل می‌شود.

$$e_j = min\left(a_1 + a_2 + ... + a_n, 1\right) \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$a_i = max\left(0, w_i + r_{ij} - 1\right) \qquad i = 1,2,...,n \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

در رابطه‌های ۱۳ و ۱۴، r اجزای ماتریس خصوصیات R برای خصوصیات i تحت کلاس تناسب j می‌باشد و w اجزای ماتریس اوزان W برای خصوصیات i و e اجزای ماتریس تناسب اراضی E برای کلاس‌های تناسب j (S1 تا N2). به منظور محاسبه شاخص تناسب اراضی، مجموع اجزای ماتریس تناسب اراضی (E) برابر با ۱ (استاندارد شده) تنظیم شده و سپس اجزای جدید (مقادیر نرمال شده) ماتریس به ترتیب در متوسط شاخص‌های حداکثر و حداقل کلاس‌های تناسب اراضی ضرب می شوند و نهایتاً طبق رابطه ۱۵ مقدار شاخص تناسب اراضی به دست می‌آید.

$$LSI = \sum\left[d\left(E_j\right) \times A_j\right] \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

در این رابطه LSI، شاخص تناسب اراضی، $d(E_j)$ مقدار نرمال شده (استاندارد شده) ماتریس تناسب اراضی (E) و A_j میانگین شاخص‌های حداکثر و حداقل کلاس‌های تناسب است.

در نهایت کلاس تناسب اراضی برای واحدهای مختلف با استفاده از جدول (۴) در روش‌های مختلف ارزیابی تناسب اراضی تعیین گردید.

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های تناسب و کلاس متناظر آن‌ها

شاخص اراضی	کلاس تناسب
۷۵-۱۰۰	S1 (تناسب زیاد)
۵۰-۷۴/۹۹	S2 (تناسب متوسط)
۲۵-۴۹/۹۹	S3 (تناسب بحرانی)
۱۲/۵-۲۴/۹۹	N1 (نامناسب در حال حاضر)
۰-۱۲/۴۹	N2 (نامناسب دائمی)

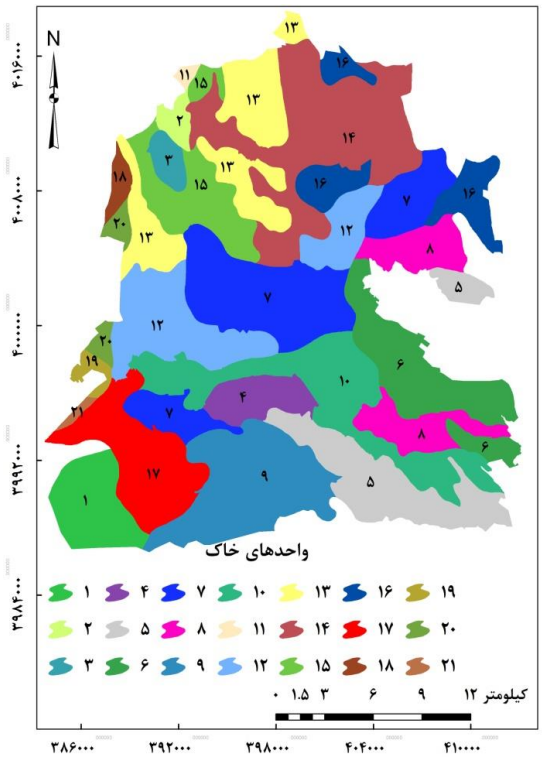
ارزیابی دقت روش‌های ارزیابی

برای ارزیابی دقت روش‌های مختلف، از ضریب تبیین بین مقادیر عملکرد مشاهده شده و شاخص تناسب اراضی استفاده شد. عملکرد استفاده شده، متوسط عملکرد ۵ ساله زارعین در واحدهای مختلف بود.

نتایج و بحث

خاک‌های شناسایی شده و واحدهای نقشه خاک

بین ارزیابی اراضی و نقشه‌برداری خاک یک رابطه قوی و اساسی وجود دارد. از آنجا که کشاورزی و زراعت از مهم‌ترین کاربردها در ارزیابی است، خاک کانون اصلی مطالعه در این کاربری‌ها است. از طرف دیگر، پارامترهای دیگر مانند اقلیم دامنه تنوع بیشتری دارند. ولی الگوی تغییرپذیری اراضی بیشتر توسط خاک کنترل می‌شود، بنابراین از نقشه واحدهای خاک به عنوان اساس ارزیابی محدودیت‌ها استفاده می‌شود. به طور کلی، ۲۱ واحد نقشه خاک با توجه به تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاع، توپوگرافی، شیب، نقشه‌های کاربری اراضی و نتایج تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه‌های خاک در منطقه، مورد مطالعه قرار گرفت که توزیع واحدهای خاک در شکل (۲) ارائه شده است. اسامی خاک‌های شناسایی شده بر اساس کلید رده‌بندی خاک آمریکا (Soil Survey Staff, 2014b) و رده‌بندی جهانی خاک (WRB, 2015) در جدول (۵) آورده شده است.



شکل ۲- نقشه واحدهای خاک منطقه مورد مطالعه

جدول ۵- اسامی خاک‌های منطقه مورد مطالعه بر طبق کلید رده‌بندی خاک آمریکا و رده‌بندی جهانی (WRB)

واحدهای خاک	کلید رده‌بندی آمریکا	رده‌بندی WRB
۱	Clayey, mixed, semiactive, thermic Xeric Haplocalcids	Haplic Calcisols
۲ و ۳	Loamy, mixed, active, mesic Typic Calcixerepts	Haplic Calcisols
۴ و ۵	Clayey, mixed, active, thermic Xeric Natrargids	Calcaric Solonetz
۶	Fine, mixed, superactive, thermic Xeric Natrargids	Calcic Solonetz
۷ و ۸	Clayey, mixed, superactive, thermic Xeric Haplocalcids	Haplic Calcisols
۹ و ۱۰	Fine-loamy, mixed, active, thermic Xeric Haplocalcids	Haplic Calcisols
۱۱	Coarse-loamy, mixed, active, mesic Typic Calcixerepts	Haplic Calcisols
۱۲	Loamy, mixed, superactive, mesic Typic Haplocambids	Haplic Cambisols
۱۳	Coarse-loamy, mixed, active, mesic Typic Xerorthents	Eutric Regosols
۱۴	Fine-loamy, mixed, superactive, mesic Calcic Haploxerepts	Calcaric Cambisols
۱۵	Loamy, mixed, superactive, mesic Calcic Haploxerepts	Calcaric Cambisols
۱۶	Loamy, mixed, active, mesic Typic Xerorthents	Eutric Regosols
۱۷	Loamy, mixed, active, thermic Xeric Haplocalcids	Haplic Calcisols
۱۸،۱۹،۲۰ و ۲۱	Fine-loamy, mixed, active, mesic Calcic Haploxerepts	Calcaric Cambisols

اجرای روش‌های ارزیابی و تفسیر محدودیت‌ها

فرایند ارزیابی تناسب اراضی واحدهای نقشه برای کشت گندم آبی با استفاده از روش‌های مورد بررسی انجام شد که نتایج شامل شاخص‌های تناسب اراضی و کلاس‌های تناسب در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج مشخص کرد (شکل ۳) که طبق روش ریشه دوم ۲۰۱۹۱ هکتار (۳۲/۸ درصد) از اراضی دارای تناسب متوسط (S2)، ۲۰۶۳۹/۸ هکتار (۳۳/۵ درصد) دارای تناسب بحرانی (S3)، ۱۴۹۵۷/۸ هکتار (۲۴/۳ درصد) نامناسب در حال حاضر (N1) و ۵۸۱۲/۸ هکتار (۹/۴ درصد) نامناسب دائمی (N2)، بر اساس روش ریشه دوم اصلاح شده ۴۰۸۳۰/۸ هکتار (۶۶/۳ درصد) از اراضی دارای تناسب متوسط (S2)، ۷۳۳۸/۳ هکتار (۱۱/۹ درصد) نامناسب در حال حاضر (N1) و ۱۳۴۳۲/۳ هکتار (۲۱/۸ درصد) نامناسب دائمی (N2) برای کشت آبی گندم هستند. همچنین کاربرد روش فازی تلفیق شده با AHP برای ارزیابی کیفی تناسب اراضی برای کشت آبی گندم نشان داد که ۴۸۱۶۹/۱ هکتار (۷۸/۲ درصد) از اراضی دارای تناسب متوسط (S2)، ۹۰۸۶ هکتار (۱۴/۷ درصد) دارای تناسب بحرانی (S3) و ۴۳۴۶/۳ هکتار (۷/۱ درصد) نامناسب در حال حاضر (N1) می‌باشند.

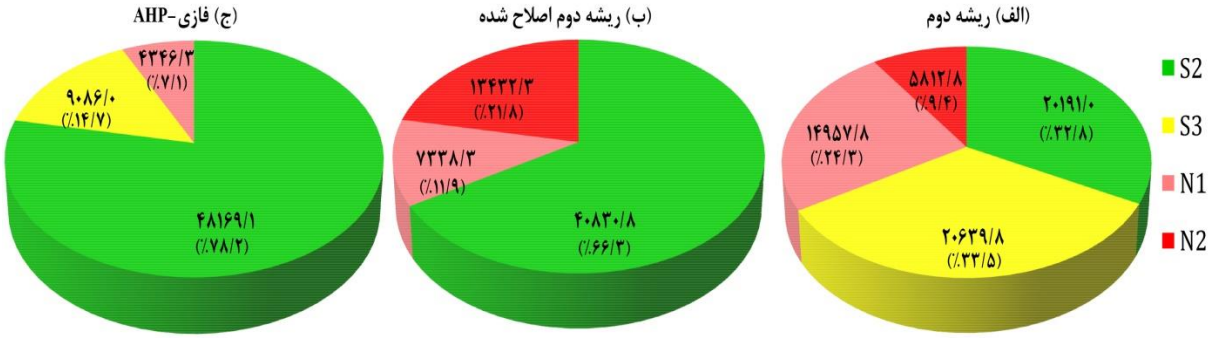
شیب، pH، درصد سدیم تبادلی، زهکشی و شوری مهمترین خصوصیات محدودکننده رشد و توسعه گندم در سطح منطقه بوده و بررسی مقادیر ویژگی‌ها نشان داد که مهمترین عامل محدودیت در همه واحدهای خاک منطقه مورد مطالعه مقدار شیب می‌باشد، برای اینکه مقدار شیب در واحدهای خاک مورد بررسی و با توجه به جدول نیازمندی‌ها (جدول ۲) عمدتاً دارای درجه محدودیت بیشتر بوده و مقدار متوسط درجه اختصاص یافته به آن از همه خصوصیات کمتر می‌باشد، از طرف دیگر مقدار آهک خاک در واحدهای خاک مورد مطالعه غالباً دارای محدودیت کمتر بوده و بیشترین مقدار درجه را بر اساس جدول (۲) به خود اختصاص داده است و به همین دلیل خصوصیت شیب که دارای بیشترین محدودیت بوده، وزن بیشتر و آهک خاک کمترین وزن را گرفته است (جدول ۳). مقدار متوسط شیب در منطقه حدود ۶ درصد بود. عامل شیب بیشتر فعالیت‌های کشاورزی، روش‌های آبیاری و میزان فرسایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Fu *et al.*, 2011). ارتفاع بیشتر دما و فعالیت میکروبیولوژیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش ارتفاع احتمال وقوع یخبندان و دمای سردتر در نتیجه، سیکل رشد گیاه را افزایش می‌دهد. برای مراحل رشد گیاه بخصوص کاشت و گل‌دهی گندم مضر است (Pilevar *et al.*, 2020). محدودیتی از نظر خصوصیات اقلیمی برای گندم در منطقه وجود نداشت. زهکشی یکی دیگر از خصوصیات محدودکننده در اراضی مورد مطالعه است که بیشترین محدودیت را در واحدهای خاک ۳، ۷ و ۸ باعث شده است.

مقدار آهک در منطقه مورد مطالعه از ۶ تا ۳۱ درصد (متوسط ۱۶ درصد)، شوری ۰/۴ تا ۱۸ دسی زیمنس بر متر (متوسط ۴ دسی زیمنس بر متر) و قلیائیت صفر تا ۷۰ درصد با متوسط ۱۴/۵ درصد متغیر بود. بنابراین، خاک‌های مورد مطالعه تحت تأثیر مواد آهکی و شور و سدیمی قرار دارند. خاک‌های اشباع شده با کلسیم عمدتاً دارای ساختمان با دانه‌بندی و خاکدانه‌های پایدار هستند (Ostovari *et al.*, 2016). از طرف دیگر، خاک‌های اشباع شده از کلسیم مشکل قابل توجهی در تغذیه گیاه ایجاد می‌کنند به دلیل اینکه در این خاک‌ها، خصوصیت pH توسط آبکافت کربنات کنترل شده و pH بیشتر از ۷ ایجاد می‌شود (Sposito, 2016). تجزیه و تحلیل خاک‌های منطقه نشان داد که

pH از ۷/۷ تا ۸/۴ با میانگین ۸/۲ است این مشخصه باعث کاهش استعداد اراضی برای رشد و توسعه گندم در واحدهای ۲ تا ۶ و ۱۷ تا ۲۱ شده است. شوری خاک عمدتاً در واحدهای ۴ و ۵ باعث کاهش تناسب اراضی برای کشت گندم آبی شده است. شوری می‌تواند بر جذب عناصر غذایی، فعالیت میکروبیولوژیکی، رشد محصولات و عملکرد اکثر محصولات به ویژه گندم تأثیر بگذارد (Weil and Brady, 2016). تنش شوری، بر اساس سه مکانیزم مهم (۱) جلوگیری از جذب آب برای توسعه سلول، (۲) عدم تعادل در جذب کاتیون‌ها برای عملکرد طبیعی سلول مانند یون‌های Mg^{2+} و K^{+} و (۳)، جذب Na^{+} و Cl^{-} به روش غیرتنظیمی توسط گیاه، چرخه عمر محصول را کاهش می‌دهد (Boyer *et al.*, 2008). سدیم تبادلی خاک بیشترین محدودیت را در واحدهای خاک ۴، ۵، ۶ و تا حدودی در ۸ و ۱۰ ایجاد کرده است. این خصوصیت به دلیل آبکافت می‌تواند تعادل تغذیه‌ای را بهم بریزد و همچنین به دلیل بهم ریختن ساختار فیزیکی خاک باعث کاهش نفوذپذیری در خاک می‌شود (Sparks, 2003).

جدول ۶- مقادیر شاخص اراضی و کلاس تناسب متناظر در واحدهای مختلف اراضی

واحد اراضی	ریشه دوم		ریشه دوم اصلاح شده		فازی-AHP	
	شاخص اراضی	کلاس تناسب	شاخص اراضی	کلاس تناسب	شاخص اراضی	کلاس تناسب
۱	۶۶/۴۲	S2	۶۷/۳۹	S2	۷۲/۵۳	S2
۲	۴۲/۰۲	S3	۵۷/۳۹	S2	۵۹/۲۷	S2
۳	۱۸/۲۳	N1	۱۱/۳۹	N2	۴۳/۳۶	S3
۴	۱۰/۹۲	N2	۶/۸۳	N2	۳۶/۴۱	S3
۵	۸/۵۲	N2	۵/۳۲	N2	۲۲/۹۷	N1
۶	۱۳/۰۷	N1	۸/۱۷	N2	۳۲/۲۰	S3
۷	۲۴/۰۸	N1	۱۵/۰۵	N1	۵۱/۵۳	S2
۸	۱۷/۵۳	N1	۱۰/۹۶	N2	۴۱/۵۰	S3
۹	۴۸/۹۲	S3	۶۰/۲۲	S2	۵۹/۶۲	S2
۱۰	۴۲/۴۴	S3	۵۷/۵۶	S2	۶۳/۷۲	S2
۱۱	۵۱/۱۶	S2	۶۱/۱۴	S2	۷۲/۶۸	S2
۱۲	۶۲/۲۶	S2	۶۵/۶۹	S2	۶۷/۷۴	S2
۱۳	۴۹/۱۶	S3	۶۰/۳۲	S2	۶۸/۶۰	S2
۱۴	۵۵/۸۱	S2	۶۳/۰۴	S2	۶۸/۳۴	S2
۱۵	۶۱/۳۸	S2	۶۵/۳۲	S2	۷۰/۵۰	S2
۱۶	۵۳/۰۱	S2	۶۱/۸۹	S2	۶۹/۶۰	S2
۱۷	۴۸/۶۹	S3	۶۰/۱۲	S2	۷۰/۱۲	S2
۱۸	۴۲/۳۵	S3	۵۷/۵۲	S2	۶۴/۹۳	S2
۱۹	۴۰/۳۱	S3	۵۶/۶۹	S2	۶۹/۶۱	S2
۲۰	۴۱/۶۷	S3	۵۷/۲۴	S2	۶۴/۶۴	S2
۲۱	۳۶/۶۶	S3	۵۵/۱۹	S2	۶۹/۹۰	S2



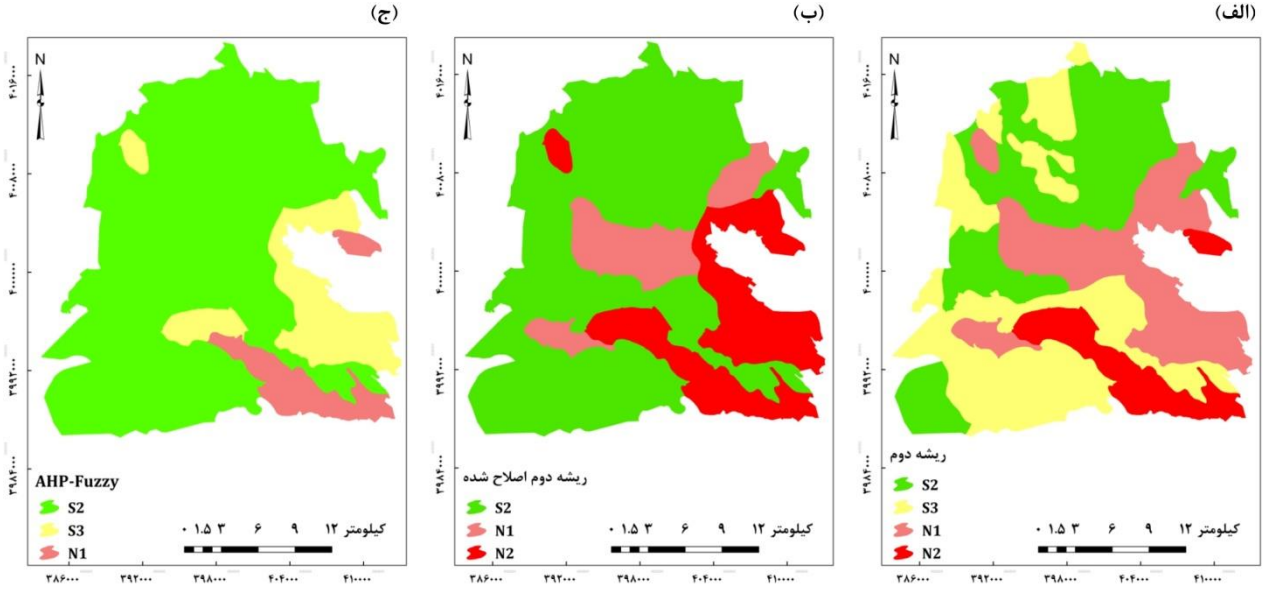
شکل ۳- وسعت اراضی واقع شده در کلاس‌های تناسب اراضی در روش‌های مختلف بر حسب هکتار و درصد

مقایسه روش‌های ارزیابی

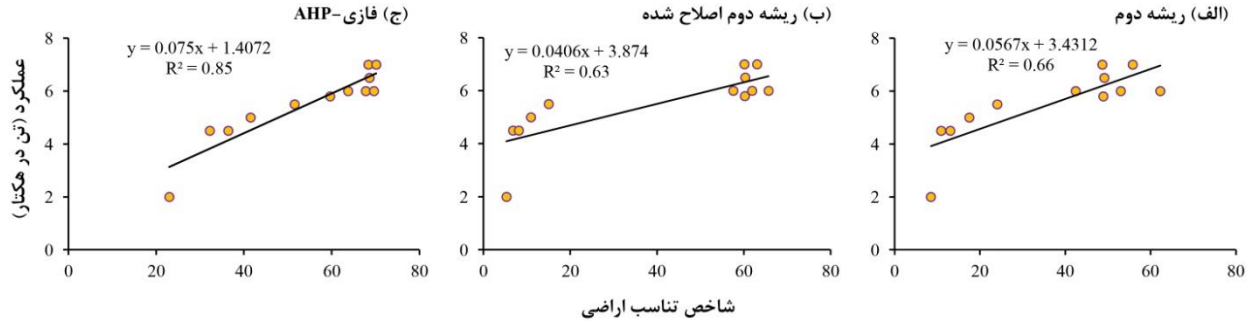
رعایت تناسب اراضی گامی مطمئن در عملکرد زیاد همراه با حفظ خاک برای استفاده آیندگان و افزایش پتانسیل خاک می‌باشد. نقشه‌های تناسب اراضی یکی از ابزارهای تحقق این امر مهم هستند. این نقشه‌ها امکان پهنه‌بندی دقیق اراضی مستعد و غیرمستعد برای کشت محصول را در مقیاس ناحیه‌ای فراهم می‌آورند. آنچه مسلم است نتایج هر سه روش با هم متفاوت بوده بنابراین بررسی دقت روش‌ها و انتخاب روش مناسب و دقیق ضروری است. نقشه‌های تناسب تهیه شده برای کشت آبی گندم با سه روش مورد استفاده در شکل (۴) ارائه شده است. مقایسه نقشه‌های فوق و نتایج ارائه شده در جدول (۶) نشان می‌دهد که روش ریشه دوم اصلاح شده نسبت به روش ریشه دوم باعث افزایش مقادیر شاخص اراضی کلاس‌های مناسب (S2 و S3) و کاهش مقادیر شاخص در کلاس‌های نامناسب (N1 و N2) شده است (شکل ۴- الف و ب). روش تلفیقی فازی با فرایند تحلیل سلسله مراتبی باعث افزایش مقدار شاخص اراضی در همه واحدها شده و در بیشتر واحدها کلاس‌های تناسب را ترقی داده است. بررسی رابطه بین شاخص‌های اراضی محاسبه شده در برخی واحدهای نقشه با مقدار متوسط عملکرد گندم آبی در این واحدها مشخص کرد (شکل ۵) که روش ریشه دوم اصلاح شده نسبت به روش ریشه دوم دارای دقت کمتری است که یکی از مهمترین دلایل آن، زیاد کردن مقادیر شاخص در کلاس‌های مناسب و کاهش دادن مقدار شاخص در کلاس‌های نامناسب است به طوری که کلاس تناسب S3 را دیگر در بین کلاس‌ها نداریم (شکل ۴- ب) و این نتیجه غالباً یک حالت مبالغه‌آمیز را نشان می‌دهد و شاید همین مساله یکی از دلایل کافی برای عدم استفاده از این روش در اکثر مطالعات ارزیابی تناسب اراضی توسط محققین و پژوهشگران در دنیا است. دقت روش تلفیقی فازی با AHP از هر دو روش دیگر بیشتر می‌باشد (شکل ۵- ج). بررسی مقادیر ویژگی‌ها در واحدهای اراضی نشان داد که کلاس‌های تناسب تعیین شده با استفاده از روش تلفیقی فازی نسبت به دو روش دیگر با واقعیت منطقه تطابق بیشتری دارند. به عنوان مثال در برخی واحدهای اراضی (جدول ۶) روش تلفیقی فازی با AHP کلاس تناسب اراضی را ارتقاء داده به طوری که تناسب برخی واحدها از بحرانی به متوسط تغییر کرده است، لذا دقت در مقادیر اندازه‌گیری شده خصوصیات در این واحدها و مقایسه آن‌ها با جدول نیازمندی‌ها (جدول ۲) و همچنین بررسی‌های میدانی خاک‌های منطقه و عملکرد محصول مشخص کرد که این واحدها محدودیتی در حد تناسب کلاس S2 برای رشد گندم دارند و نتایج روش تلفیقی فازی با AHP قابل قبول است.

با توجه به این نکته که، برآورد صحیح اهمیت و رتبه خصوصیات اراضی در واحدهای نقشه و تعیین دقیق کلاس‌های تناسب در فرآیند ارزیابی، شرط اصلی ارائه راهکارها، برنامه پایش و مدیریت کاربردی و اصولی اراضی خواهد بود، افزایش اطمینان نسبت به روایی نتایج حاصل از کاربرد روش تحلیل و طبقه‌بندی درست واحدها یکی از مهم‌ترین موضوعات در فرآیند ارزیابی است. از طرف دیگر، یکی از مزایای افزایش اطمینان از صحت نتایج کاربرد روش ارزیابی، کمک به ایجاد تفاهم در تصمیم‌گیری و کاهش تعارضات در مرحله تصمیم‌گیری در زمینه امکان‌پذیری اجرای طرح تناسب مورد نظر از دیدگاه کشاورزی و محیط‌زیست است. بنابراین نتایج به‌دست آمده از کاربرد روش فازی در این تحقیق در تلفیق با روش مقایسه زوجی به دلیل کاربرد روابط و اصول فازی، دارا بودن امکان تعیین وزن خصوصیات، انعطاف‌پذیری بالای روش نسبت به روش‌های پارامتریک و تطابق بیشتر با واقعیت و شرایط جاری منطقه مورد مطالعه می‌تواند در تحقق موارد مطرح شده موثر باشد.

برخی از تحقیقات انجام شده توسط Sarmadian and Keshavarzi (2011)، Hamzeh *et al.* (2014)، Zhang *et al.* (2015)، Seyedmohammadi *et al.* (2019)، Pilevar *et al.* (2020) و Amini *et al.* (2020) نشان‌دهنده دقت بیشتر روش فازی تلفیقی با AHP نسبت به روش پارمتریک در ارزیابی تناسب اراضی است. در پژوهش‌های ذکر شده انتخاب توابع عضویت مناسب، تعیین مناسب حدود بحرانی و اوزان مناسب برای خصوصیات باعث افزایش دقت روش فازی نسبت به پارامتریک شده است و یکی از مهمترین مزایای این روش در نظر گرفتن ماهیت پیوسته برای خصوصیات اراضی است که با واقعیت تطابق دارد. بنابراین بررسی روش فازی تلفیقی با AHP و کاربرد آن در مطالعه موردی ارزیابی تناسب اراضی به خوبی مؤید توانایی این روش در تعیین اهمیت و رتبه تناسب واحدهای اراضی بوده و پیشنهاد می‌شود که این روش، به عنوان روش ارزیابی تناسب اراضی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۴- نقشه‌های تناسب اراضی برای کشت آبی گندم با روش‌های مختلف



شکل ۵- رابطه بین شاخص اراضی با عملکرد گندم آبی در برخی واحدها در روش‌های مختلف ارزیابی

نتیجه‌گیری

ارزیابی تناسب اراضی می‌تواند به تعیین انواع محدودیت‌های به کارگیری اراضی و انتخاب انواع بالقوه استفاده از اراضی کمک نماید. در مطالعه حاضر، کاربرد مجموعه‌های فازی با AHP و مقایسه آن با روش ریشه دوم و ریشه دوم اصلاح شده در ارزیابی تناسب اراضی برای تولید گندم بر اساس خصوصیات اقلیم، خاک و اراضی مورد بررسی قرار گرفت. روش فازی تلفیقی با AHP با توجه به مقدار ضریب تبیین بین شاخص اراضی و عملکرد مشاهده شده نسبت به روش پارامتریک دقیق‌تر بود. طبق نتایج روش فازی ۷۸/۲ درصد از اراضی دارای تناسب متوسط، ۱۴/۷ درصد دارای تناسب بحرانی و ۷/۱ درصد نامناسب در حال حاضر می‌باشند. محدودکننده‌ترین خصوصیات در اراضی مورد بررسی برای کشت آبی گندم به ترتیب شیب، pH، ESP، زهکشی و شوری خاک هستند. نتایج این رویکرد می‌تواند با شناسایی محدودکننده‌ترین عوامل، بینشی از برنامه‌ریزی مدیریت مکانی در تولید محصولات کشاورزی فراهم کرده و به عنوان راهنمای برنامه‌ریزی بهتر کاربری اراضی استفاده شود.

سپاس‌گزاری

مقاله حاضر از داده‌های طرح تحقیقاتی ملی با عنوان "تعیین تناسب اراضی برای محصولات زراعی و باغی در دشت‌های آبی کشور" به شماره مصوب ۹۴۵۲-۱۰-۱۰-۰۱۴ که با حمایت مالی معاونت امور زراعت وزارت جهادکشاورزی در موسسه تحقیقات خاک و آب انجام شده، استخراج گردیده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Akinci, H., Ozalp, A.Y. and Turgut, B. (2013). Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 71-82.

Amini, Sh., Rohani, A., Aghkhani, M.H., Abbaspour-Fard, M.H. and Asgharipour, M.R. (2020). Assessment of land suitability and agricultural production sustainability using a combined approach (Fuzzy-AHP-GIS): A case study of Mazandaran province, Iran. *Information*

Processing in Agriculture, 7(3), 384-402.

Boyer, J.S., James, R.A., Munns, R., Condon, T.A.G. and Passioura, J.B. (2008). Osmotic adjustment leads to anomalously low estimates of relative water content in wheat and barley. *Functional Plant Biology*, 35(11), 1172-1182.

Elsheikh, R., Mohamed Shariff, A.R.B., Amiri, F., Ahmad, N.B., Balasundram, S.K. and Soom, M.A.M. (2013). Agriculture land suitability evaluator (ALSE): a decision and planning support tool for tropical and subtropical crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 98-110.

FAO. (1976). A framework for land evaluation. Publication Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. https://www.mpl.ird.fr/crea/taller-colombia/FAO/AGLL/pdfdocs/framele.pdf

FAO. (2006). Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, Rome, Italy. 333p. https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/pdf/Allen_FAO1998.pdf

Fu, Z., Li, Z., Zai, C., Shi, Z., Xu, Q. and Wang, X. (2011). Soil thickness effect on hydrological and erosion characteristics under sloping lands: a hydropedological perspective. *Geoderma*, 167-168, 41-53.

Ghorbani, M. (2013). *The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources*. Springer Science and Business Media. 572p. doi:10.1007/978-94-007-5625-0

Hamzeh, S., Mokarram, M. and Alavipanah, S.K. (2014). Combination of Fuzzy and AHP methods to assess land suitability for barley: Case Study of semi arid lands in the southwest of Iran. *Desert*, 19,173-181

IIASA and FAO. 2012. *Global agroecological zones*. Version 3, IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy. 196p. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gaez/docs/GAEZ_Model_Documentation.pdf

Kazemi, H., Sadeghi, S. and Akinci, H. (2016). Developing a land evaluation model for faba bean cultivation using geographic information system and multi-criteria analysis (A case study: Gonbad-Kavous region, Iran). *Ecological Indicators*, 63, 37-47.

Khiddir, SM. (1986). A Statistical Approach in the Use of Parametric Systems Applied to FAO Framework for Land Evaluation (Dissertation). State University of Ghent, Belgium.

McDowell, R.W., Snelder, T., Harris, S., Lilburne, L., Larned, S.T., Scarsbrook, M., Holgate, B., Phillips, J., Taylor, K. and Curtis, A. (2018). The land use suitability concept: Introduction and an application of the concept to inform sustainable productivity within environmental constraints. *Ecological Indicators*, 91, 212-219.

Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H.A., Naderi, M., Dematte, J.A.M. and Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology* 273, 385-395.

Ostovari, Y., Honarbakhsh, A., Sangoony, H., Zolfaghari, F., Malekie, K. and Ingram, B. (2019). GIS and multi-criteria decision-making analysis assessment of land suitability for rapeseed farming in calcareous soils of semi-arid regions. *Ecological Indicators*, 103, 479-487.

Pilevar, A.R., Matinfar, H.R., Sohrabi, A. and Sarmadian, F. (2020). Integrated fuzzy, AHP and GIS techniques for land suitability assessment in semi-arid regions for wheat and maize farming. *Ecological Indicators*, 110, 105887.

Rahimi Lake, H., Taghizadeh Mehrjardi, R., Akbarzade, A. and Ramezanpour, H. (2009). Qualitative and quantitative land suitability for olive (Olea Europaea L.) production in Roodbar region, Iran. *Agricultural Journal*, 4, 52-62.

Ruan, D. (1990). A critical study of widely used fuzzy implication operators and their influence on the inference rules in fuzzy expert systems. PhD Thesis, State University of Gent, Belgium, 155p.

Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill International, New York, NY, USA.

Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Serv. Sci. 1, 83-98.

Sarmadian, F. and Keshavarzi, A. (2011). An Investigation of Fuzzy Set Theory's Efficiency in Land Suitability Assessment for Irrigated Wheat in Qazvin Province, Using Analytic Hierarchy Process (AHP) and Multivariate Regression Methods. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 42(2),199-207. (In Farsi)

Seyedmohammadi, J. and Esmaeelnejad, L. (2014).Qualitative and Quantitative Land Suitability Evaluation for Rice Production in Central Areas of Guilan Province. *Water and Soil Science*, 24(1), 165-181. (Infarsi)

Seyedmohammadi, J., Sarmadian, F., Jafarzadeh, A.A. and McDowell, R.W. (2019). Development of a model using matter element, AHP and GIS techniques to assess the suitability of land for agriculture. *Geoderma*, 352, 80-95.

Soil survey staff. (2012). *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Version 3, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Soil Survey Staff. (2014a). *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Soil Survey Staff. (2014b). *Keys to Soil Taxonomy*. 12th edition, United States Department of Agriculture, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service.

Sparks, D.L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*. 2nd

edition, Academic Press, 352p.

Sposito, C. (2016). *The Chemistry of Soils*. 3rd edition, Oxford University Press, 272p.

Sys, C., Van Ranst, E. and Debaveye, D.J. (1991). Land Evaluation, Part I: principles in land evaluation and crop production calculation, General Administration for Development Cooperation. Brussels, Belgium, Agric. Pub., 265p.

Sys, C., Van Ranst, E., Debaveye, J. and Beernaert, F. (1993). Land Evaluation. Part III: Crop requirements. Agricultural Publications, No 7. General Administration for Development Cooperation, Brussels, Belgium.

Weil, R.R. and Brady, N.C. (2016). *The nature and properties of soils*. 15th edition, Pearson Education Limited, 1104p.

WRB. (2015). World Reference Base for soil resources 2014, update 2015 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In: World Soil Resources Reports. vol. 106 FAO, Rome.

Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. Information and Controls, 8, 338-353.

Zhang, J., Su, Y., Wu, J. and Liang, H. (2015). GIS based land suitability assessment for tobacco production using AHP and fuzzy set in Shandong province of China. Computers and Electronics in Agriculture, 114, 202-211.