نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۲، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۱۵-۴۵

مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی با استفاده از مدل Fuzzy AHP-OWA و فنون GIS (مطالعه موردی: شهرستان اندیمشک)

مریم داودبهاروندی[۱]، نرگس منجزی[۲]، علی افروس[۳]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲ / ۰۱ / ۲۵

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲ / ۰۴ / ۲۵

کلمات کلیدی:
مکان‌یابی
نیروگاه خورشیدی
اندیمشک
OWA
AHP

چکیده

در این پژوهش باهدف شناسایی بهترین مکان‌های ساخت نیروگاه خورشیدی در شهرستان اندیمشک واقع در استان خوزستان، از روش Fuzzy AHP-OWA در محیط GIS استفاده شد. بدین منظور ۱۲ معیار که از جنبه‌های اقتصادی، محیطی و امنیتی دارای اهمیت بودند، توسط مدل AHP وزن دهی شدند، سپس در محیط GIS به‌صورت خطی فازی‌سازی شده و درنهایت با استفاده از رویکرد OWA و بکار بردن کمیت سنج‌های زبانی با همدیگر تلفیق شدند. بعد از تلفیق لایه‌ها و وزن‌ها، هفت سناریوی مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی با درجات ریسک‌پذیری (ORness) متنوع حاصل شد. نتایج نشان داد که هر چه ریسک‌پذیری کم‌تر شود، مکان‌های بالقوه و مناسب کم‌تری برای مکان‌یابی پیشنهاد می‌شود.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی دزفول rs-gis@mail.ir
۲. استادیار گروه علوم تجربی،واحد دزفول،دانشگاه آزاد اسلامی،دزفول،ایران
۳. استادیار گروه مهندسی آب،واحد دزفول،دانشگاه آزاد اسلامی،دزفول،ایران

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

۱. مقدمه

در ایران وجود زمینه مناسب اقلیمی و تابش آفتاب در بیشتر مناطق و در بیشتر فصول سال، همچنین وجود پستی‌وبلندی‌ها در مسیر نهرهای آب، داشتن مناطق واجد پتانسیل بالای باد و قابلیت‌های تولید انرژی زمین‌گرمایی، زمینه لازم و مناسبی را برای استفاده و گسترش انرژی‌های نو و پاک فراهم آورده است (Sadeqi, Dalalbashi Esfahani et al. 2013). مطالعات در زمینه انرژی خورشیدی در ایران از حدود ۳۵ سال قبل و به‌طور تقریباً هم‌زمان در دانشگاه شیراز و صنعتی شریف شروع شد. ازجمله طرح‌های مهم موردتوجه در این مراکز، طرح نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی در دانشگاه شیراز و طرح توسعه و ساخت سلول‌های فتوولتائیک در این مرکز بوده است (Taki and Mardani Najafabadi 2019). استان خوزستان به دلیل قرار گرفتن در عرض جغرافیایی پایین‌تر نسبت به بیش‌تر استان‌های ایران و داشتن تعداد روزهای آفتابی بیش‌تر مستعد استفاده از انرژی خورشیدی توسط سلول‌های فتوولتائیک است اما متأسفانه تاکنون اقدام جدی در این رابطه نشده است. یکی از دلایل مهم آن داشتن منابع سوخت‌های فسیلی ازجمله گاز است که توانسته است مانع ایجاد و توسعه نیروگاه‌های خورشیدی شود. یکی از جنبه‌های مهم برای دستیابی به این انرژی، شناسایی بهترین و مناسب‌ترین مکان‌های جغرافیایی برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی است (Nasehi, Saideh et al. 2017). برای شناسایی مناطق مستعد جهت احداث نیروگاه خورشیدی، استفاده از تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM4) و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند نتایج بهینه‌ای را ارائه نماید (Kiavarz and Jelokhani-Niaraki 2017, Shorabeh, Firozjaei et al. 2019). با مشخص شدن مناطق واجد شرایط برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌توان راه را برای توسعه پایدار با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر هموار نمود.

درزمینه مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی با استفاده از مدل‌ها و رویکردهای مختلف، پژوهش‌های فراوانی انجام‌شده است. بسیاری از پژوهشگران، علاقه‌مند به استفاده از فنون تصمیم‌گیری چند معیاره‌ای از قبیل AHP، TOPSIS، Fuzzy-TOPSIS، SAW، ELECTRE III (Chamchali and Ghazifard 2021, Mahmoudi, Aydi et al. 2021, Mortazavi Chamchali, Mohebbi Tafreshi et al. 2021, Sedghiyan, Ashouri et al. 2021, Sk Ajim, Parvin et al. 2021) در بستری از فناوری‌های جغرافیایی مانند سنجش‌ازدور و GIS هستند که یک نقشه خروجی و یک سناریو که عمدتاً WLC[5] است (Shao, Han et al. 2020) را به‌عنوان خروجی ارائه می‌کنند. اما روش‌های دیگری مانند OWA[6] (Malczewski, Jacek et al. 2015) و نسخه‌های اصلاح‌شده آن مانند IOWA[7](He, Dutta et al. 2021) نیز وجود دارند که کم‌تر موردتوجه قرارگرفته‌اند و می‌توانند خروجی‌هایی با سناریوهای مختلف، از سهل‌گیرانه‌ترین تا سخت‌گیرانه‌ترین حالت به همراه WLC داشته باشند. OWA یک روش ترکیبی خانوادگی یا چند معیاری است که توسط یاگر۸ در سال ۱۹۸۸ معرفی شد. تابع OWA یاگر مربوط به نقطه‌ای بین دو حالت شدید (از رضایت از همه معیارهای موردنظر تا رضایت از هر یک از معیارهای موردنظر) با ترکیب عملگرهای and و or است. ترکیب این دو عملگر به‌عنوان عملگر "orand" شناخته می‌شود (Malczewski, Jacek et al. 2015).

در پژوهش‌های متعددی از ابزارهای GIS-MCDA به‌ویژه مدل OWA برای نقشه‌برداری از پتانسیل‌های نیروگاه‌های خورشیدی و سایر مکان‌یابی‌ها استفاده‌شده است. در پژوهشی مدل OWA توسط Zarghami and Szidarovszky(۲۰۰۹) بازبینی و با اصلاح آن، مدل FSROWA معرفی شد. در مدل OWA از کمّی کننده‌های زبانی فازی برای به دست آوردن ارزیابی پارامترهای تصمیم‌گیر استفاده می‌شود و سپس، به دلیل عدم قطعیت آن، فرض می‌شود که ماهیت تصادفی دارد. رویکرد جدید FSROWA می‌تواند ویژگی‌های فازی و تصادفی را در OWA ترکیب کند. یک رویکرد ترکیبی برای ادغام OWA در TOPSIS برای مقابله با مشکلات تجزیه‌وتحلیل معیارهای

4 Multi-criteria Decision Making

5 Weighted Linear Combination

6 Ordered Weighted Averaging

7 Induced OWA

8 Yager

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

چندگانه (MCDA) توسط Chen et al., (۲۰۱۱) پیشنهاد شد. در ابتدا نقاط ایدئال و ضد ایدئال در TOPSIS مجدداً تعریف شدند و به‌گونه‌ای توسعه یافتند که تصمیم‌گیرنده یا تصمیم گیران بتوانند بیش از یک زوج از این نقاط را در اختیار داشته باشند. سپس، سه روش مختلف برای ادغام OWA درروش تجزیه‌وتحلیل TOPSIS طراحی شد. مقایسه نتایج تحقیق، استحکام رتبه‌بندی‌های حاصل از سناریوهای مختلف را نشان داد. همراهی رویکرد OWA با مدل‌های AHP و TOPSIS در برخی مطالعات غیر مکانی نیز کاربرد دارد، مانند پیشنهاد خرید کتاب‌های دارای رتبه برتر به مشتریان آنلاین (Sohail, Siddiqui et al. 2015) و رضایت کارکنان از سیستم مدیریت ایمنی و بهداشت حرفه‌ای معدن (Bao, Johansson et al. 2017). بهترین مکان‌ها برای استفاده هم‌زمان از انرژی‌های تجدید پذیر خورشیدی و بادی در غرب ترکیه با به‌کارگیری رویکرد OWA و GIS توسط Aydin et al., (۲۰۱۳) انتخاب شدند. این روش، مکان‌یابی هیبریدی پروژه‌های بهره‌برداری از انرژی‌های تجدید پذیر نامیده شد. در این روش هرچند محدوده‌های نسبتاً کم وسعت تری انتخاب می‌شود اما برای استفاده هم‌زمان چند نوع انرژی تجدید پذیر مناسب است. آسیب‌پذیری فیزیکی و عمدی ساختمان‌ها با استفاده از ۱۴ معیار آسیب‌پذیری و نیز رویکرد OWA برای شرایط مختلف خطر در محیط GIS توسط Ghajari et al., (۲۰۱۷) در منطقه ۶ شهر تهران در ایران بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که تنها حدود ۲۵ درصد از ساختمان‌های منطقه موردمطالعه دارای آسیب‌پذیری پایین در شرایط خطر متوسط هستند. مکان‌های مناسب جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی توسط نیروگاه‌های خورشیدی توسط Firozjaei et al. (۲۰۱۹) با استفاده از رویکرد OWA و فنون GIS برای کل کشور ایران با سطوح ریسک‌پذیری مختلف معرفی شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که استان‌های کرمان، یزد، فارس، خوزستان، سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و اصفهان ظرفیت‌های مناسبی برای بهره‌برداری از پروژه‌های انرژی خورشیدی دارند. ترکیب OWA-AHP توسط Mokarram et al. (۲۰۲۱) جهت انتخاب بهترین نواحی ساخت نیروگاه گازی در نواحی نیمه‌خشک (استان اصفهان)، استفاده گردید. درروش پیشنهادی، مدل AHP هر پارامتر متفاوت را وزن می‌کند، درحالی‌که OWA سطوح ریسک را در نظر می‌گیرد. نتایج این پژوهش ثابت کرد که روش AHP به‌اندازه کافی در این‌گونه مسائل در تصمیم‌گیری مؤثر است و درعین‌حال، روش OWA یک چارچوب تصمیم‌گیری را با توجه به سطوح مختلف ریسک آماده می‌کند.

پژوهش‌های دیگری با استفاده از رویکرد OWA و ترکیب آن با سایر مدل‌های وزن دهی انجام‌شده است که می‌توان به آن‌ها مراجعه شود (Ghasemkhani, Vayghan et al. 2020, Mohamadzadeh, Pourmoradian et al. 2020, Mokarram, Negahban et al. 2021, Ruiz-Morales, Espitia-Moreno et al. 2021, Zhang, Liu et al. 2021)؛ بنابراین، هدف از این پژوهش استفاده از رویکرد Fuzzy AHP- OWA و فنون سنجش‌ازدور و GIS برای شناسایی مکان‌های مناسب اجرای پروژه‌های نیروگاه‌های خورشیدی با سطوح ریسک‌پذیری مختلف در شهرستان اندیمشک واقع در استان خوزستان است. از نوآوری‌های و مزایای این پژوهش علاوه بر کاربرد رویکرد OWA همراه با کمیت‌سنج‌های زبانی برا مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در منطقه مورد مطالعه، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- استفاده از تصویر رادار ماهواره سنتینل-۱ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر سازمان فضایی اروپا برای تولید معیارهای تابش‌خورشیدی رسیده به زمین (بجای استفاده از داده‌های تابش خورشیدی حاصل از ایستگاه‌های سینوپتیک).

۲- استفاده از تصویر چندطیفی ماهواره سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر سازمان فضایی اروپا برای تولید نقشه کاربری/پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه.

۳- روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که کارایی مؤثر خود را در طبقه‌بندی کاربری/پوشش اراضی اثبات کرده است. در این پژوهش برای ایجاد نقشه کاربری پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه این روش یادگیری ماشین بکار برده شده است.

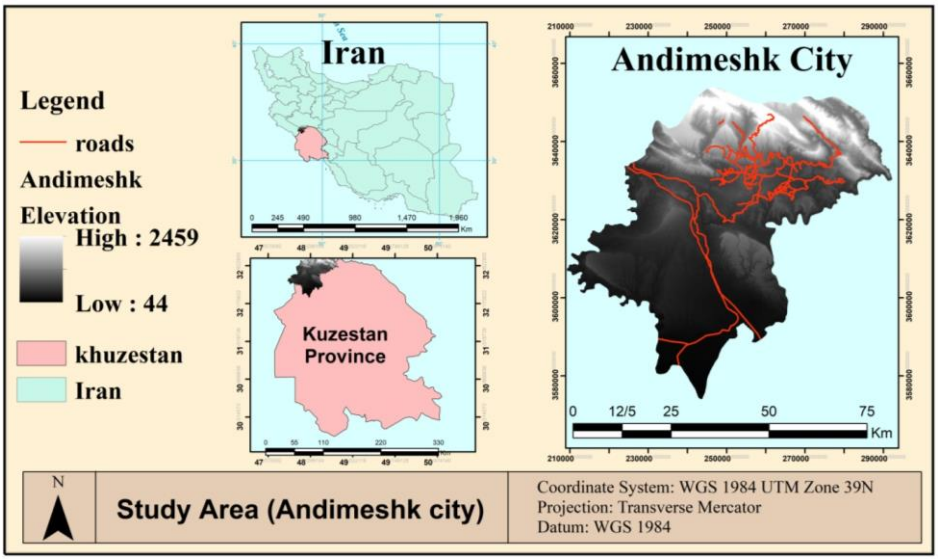
۴- در این پژوهش نقشه مکان‌یابی با استفاده از روش AHP و انواع سناریوهای OWA تهیه و با همدیگر مقایسه می‌شوند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه بنام شهرستان اندیمشک با مساحت ۳۱۱۵/۷۲ کیلومترمربع و محیط ۳۶۳/۰۵ کیلومتر در شمال استان خوزستان قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه در سیستم مختصات UTM بین ۳۵۷۴۰۶۴ m و ۳۶۵۳۹۱۳ m شمالی و نیز ۶۳/ ۲۹۲۲۲۸ m و ۰۵/ ۲۰۹۲۱۵ شرقی است (شکل ۱). طبق سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ شهرستان اندیمشک دارای ۴۸۶۳۶ خانوار و ۱۷۱۴۱۲ نفر جمعیت است که ۴۳۱۳۹ خانوار با جمعیت ۱۴۹۷۲۶ نفر ساکن شهری و مابقی در روستاها ساکن بوده و جمعیت روستایی را تشکیل می‌دهند.



شکل ۱. موقعیت منطقه موردمطالعه

۲. ۲. مواد و روش پژوهش

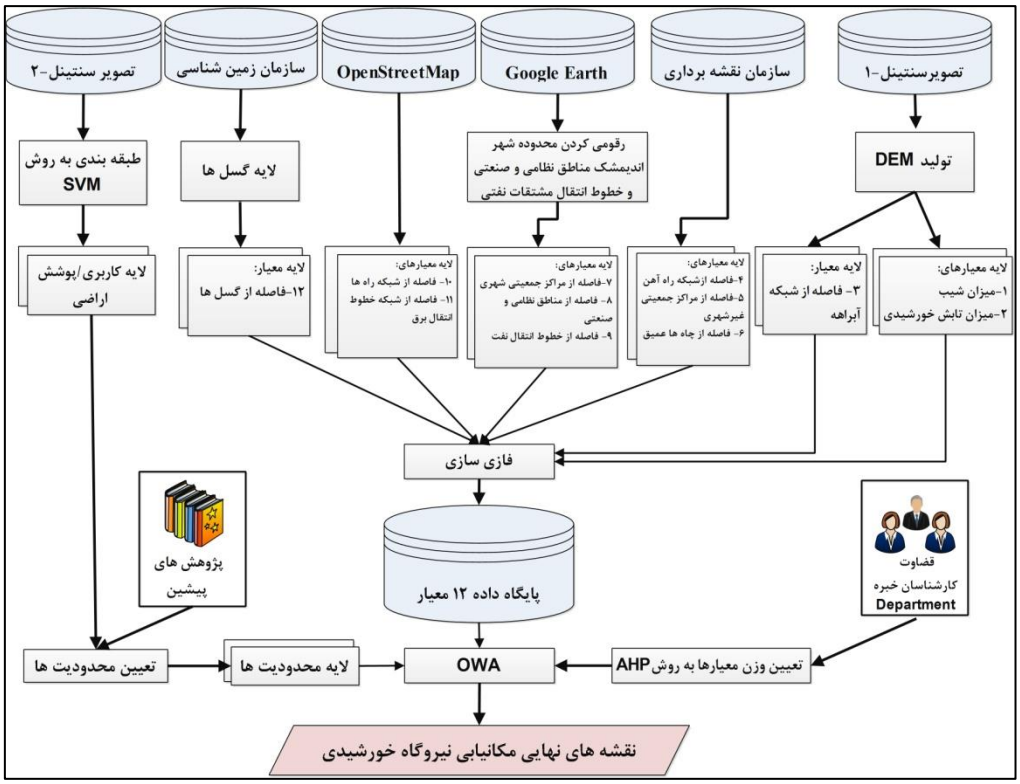
منابع داده مورداستفاده در این پژوهش شامل سازمان‌های نقشه‌برداری و زمین‌شناسی کشور جمهوری اسلامی ایران، Google Earth 7، OpenStreetMap و تصویر سنتینل-۱ و ۲ آژانس فضایی اروپا است.

مراحل انجام پژوهش در فلوچارت شکل (۲) و جدول (۲) آمده است. با استفاده از مدل رقومی ارتفاع حاصل از پردازش تصویر راداری ماهواره سنتینل-۱، لایه‌های شیب، تابش خورشیدی[9] رسیده به زمین و شبکه آبراهه استخراج می‌شوند. با به‌کارگیری نرم‌افزار Google Earth 7، محدوده شهر اندیمشک، مناطق نظامی و صنعتی و خطوط انتقال نفت، رقومی و به دنبال آن لایه‌های آن‌ها تهیه می‌شوند. برای تهیه لایه‌های راه‌ها و خطوط انتقال نیرو نیز از سایت OpenStreetMap استفاده می‌گردد. لایه گسل‌ها از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور دریافت شد. لایه کاربری/پوشش اراضی در تهیه لایه محدودیت‌ها کاربرد دارد که توسط طبقه‌بندی پیکسل- مبنا با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان[10] (SVM) بر روی تصویر ماهواره سنتینل-۲ تهیه می‌شود. لایه‌های با فرمت رستر مانند لایه‌های شیب و تابش خورشیدی، فازی می‌شوند (استانداردسازی لایه) اما لایه‌های برداری (مابقی لایه‌ها) ابتدا به لایه رستری فاصله اقلیدسی تبدیل‌شده و سپس فازی‌سازی خطی (از نوع کمینه‌سازی و بیشینه‌سازی) روی آن‌ها انجام می‌شود. با استفاده ازنظر کارشناسان خبره و مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، وزن هر لایه (معیار) محاسبه می‌شود. وزن هر ۱۲ معیار (لایه) محاسبه‌شده سپس در محیط نرم‌افزار

[9] Solar Radiation
[10] Support Vector Machine

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

MATLAB R2022a، مدل OWA اجرا و ۷ نقشه مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی از سهل‌گیرانه‌ترین حالت تا سخت گیرانه‌ترین آن به همراه WLC ایجاد می‌شوند. محدودیت‌ها و حریم‌های تمامی معیارها و نیز محدودیت‌های حاصل از نقشه کاربری/پوشش اراضی تهیه گردیده و درنهایت با کسر آن‌ها از نقشه‌های سناریوهای استخراج‌شده مکان‌یابی، نقشه‌های نهایی مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی حاصل می‌شود. به‌منظور قرارگیری سلول‌های لایه‌های مختلف رستری رودرروی همدیگر، در حین انجام تمامی تحلیل‌ها در نرم‌افزار ArcGIS 10.8.1، اندازه سلول ۱۰ متر و Snapping با استفاده از یکی از لایه‌های رستری انجام می‌شود.



شکل ۲. فلوچارت مواد و روش پژوهش

۲. ۳. مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP[11])

برای تعیین وزن هر لایه یا معیار از مدل AHP استفاده‌شده است. مدل AHP یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مهم است. مدل AHP در سال ۱۹۷۷ توسط ساعتی[12] ارائه و توسعه یافت، به همین دلیل به‌عنوان روش تصمیم‌گیری ساعتی نیز نامیده می‌شود (Saaty 1980, Sk Ajim, Parvin et al. 2021). AHP یک فن مقدار ویژه برای رویکرد مقایسه زوجی است. این مدل یک مقیاس عددی را ارائه می‌دهد که از ۱ تا ۹ برای کالیبره کردن عملکرد کمی و کیفی اولویت‌ها متغیر است در این راستا، مهم‌ترین روش ترکیب AHP و لایه‌های GIS، ترکیب خطی وزنی (WLC) است (Chandio, Matori et al. 2012).

در این مدل برای ایجاد یک ماتریس نسبت، مقایسه‌های دوبه‌دو توسط نظرات چندین کارشناس انجام‌شده سپس از مقادیر اختصاص‌یافته توسط هر کارشناس برای هر مقایسه دوبه‌دو، میانگین هندسی گرفته‌شده است. روش مورداستفاده این تحلیل دارای سه مرحله اصلی است: ایجاد ماتریس مقایسه‌ای دوبه‌دو[13]، محاسبه وزن‌های معیار[14] و تخمین نسبت پایندگی یا سازگاری[15].

[11] **Analytical Hierarchy process**
[12] Saaty
[13] Pairwise Comparison Matrix
[14] Criterion Weights Computation
[15] Consistency Ratio Estimation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۲. نوع داده، منبع، هدف و نرم‌افزار مورداستفاده جهت تحلیل

نوع داده	منبع	هدف	نرم‌افزار
تصویرSAR IW GRD سنتینل-۱ تاریخ تصویربرداری: ۲۰۲۲/۰۵/۰۴ و ۲۰۲۲/۰۵/۰۳	سازمان فضایی اروپا (esa)	تولید مدل رقومی ارتفاع تولید لایه شیب تولید لایه تابش خورشیدی تولید شبکه آبراهه	SNAP 8 ArcMap 10.8.1
تصویر نوع LA سنجنده MSI سنتینل-۲ تاریخ تصویربرداری: ۲۰۲۲/۰۴/۲۰	سازمان فضایی اروپا (esa)	تعیین لایه کاربری پوشش اراضی تعیین لایه محدودیت‌های مکان‌یابی	SNAP 8 ENVI 5.6 ArcMap 10.8.1
نقشه خطوط راه‌آهن (لایه خطی) نقشه مراکز جمعیتی (لایه نقطه‌ای) نقشه چاه‌های عمیق (لایه نقطه‌ای)	سازمان نقشه‌برداری کل کشور	تعیین لایه فاصله از خطوط راه‌آهن تعیین لایه فاصله از مراکز جمعیتی تعیین لایه فاصله از چاه‌های عمیق	ArcMap 10.8.1
نقشه محدوده شهر اندیمشک (لایه چندضلعی) نقشه محدوده مناطق نظامی و صنعتی (لایه چندضلعی) نقشه خطوط انتقال مشتقات نفتی (لایه خطی)	Google Earth 7	تعیین لایه فاصله از شهر اندیمشک تعیین لایه فاصله از مراکز نظامی و صنعتی تعیین لایه فاصله از خطوط انتقال مشتقات نفتی	Google Earth 7 ArcMap 10.8.1
نقشه شبکه راه‌ها نقشه خطوط انتقال برق	OpenStreetMap (OSM)	تعیین لایه فاصله از شبکه راه‌ها تعیین لایه فاصله از خطوط انتقال برق	ArcMap 10.8.1
نقشه گسل‌ها	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی	تعیین لایه فاصله از گسل‌ها	ArcMap 10.8.1
نظرات کارشناسی	کارشناسان خبره در زمینه مکان‌یابی مانند متخصصان سنجش‌ازدور و GIS، مهندسان عمران و نقشه‌برداری، مهندسان برق گرایش قدرت و ... www.superdecisions.com	تعیین وزن کارشناسی به روش AHP	Superdecisions 3.2

۲. ۳. ۱. ایجاد ماتریس مقایسه‌ای دوبه‌دو

وقتی چیزی را با توجه به یک ویژگی اندازه می‌گیریم، معمولاً مقیاس مشخصی برای آن منظور استفاده می‌کنیم. برای مقایسه دوبه‌دو معیارها از اولویت‌های نسبی که در جدول (۳) آمده است استفاده می‌شود. در ماتریس مقایسه‌ای دوبه‌دو، معیارها دوبه‌دو با همدیگر مقایسه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

می‌شوند. بدین گونه که معیار افقی نسبت به معیار عمودی آن مقایسه می‌شود (Saaty 1990, Malczewski, Jacek et al. 2015).

جدول ۳. اولویت‌های نسبی برای مقایسه دوبه‌دو

شدت اهمیت	تعریف
۱	اهمیت برابر
۲	اهمیت برابر تا اهمیت متوسط
۳	اهمیت متوسط
۴	اهمیت متوسط تا اهمیت قوی
۵	اهمیت قوی
۶	از اهمیت قوی تا اهمیت خیلی قوی
۷	اهمیت خیلی قوی
۸	از اهمیت خیلی قوی تا اهمیت فوق‌العاده قوی
۹	اهمیت فوق‌العاده قوی

۲. ۳. ۲. محاسبه وزن‌های معیارها

در این مرحله ابتدا ارزش‌های مربوط به هر ستون از ماتریس مقایسه دوبه‌دو باهم جمع می‌شود؛ سپس هر عنصر ماتریس بر مقدار کل ستون تقسیم می‌شود و در پایان میانگین عناصر مطرح در هر ردیف از ماتریس استانداردشده محاسبه می‌شود. این میانگین‌ها تخمینی از وزن‌های نسبی معیارهای (وزن‌های معیار) مورد مقایسه به دست می‌دهند.

۲. ۳. ۳. تخمین نسبت سازگاری[۱۶] (CR)

در این مرحله پایندگی[۱۷] مقایسه دودویی بررسی می‌شود. بدین‌صورت که وزن اولین معیار را در ارزش‌های اولین ستون ماتریس اولیه مقایسه دودویی، وزن دومین معیار را در ارزش‌های دومین ستون آن و به همین ترتیب وزن آخرین معیار را در آخرین ستون آن ضرب می‌کنیم. درنهایت مجموع ردیف‌های ماتریس حاصل، بردارهای مجموع وزنی[۱۸] را تولید می‌کند. با تقسیم بردارهای مجموع وزنی بر وزن‌های معیار، بردار سازگاری تعیین می‌شود. بعد از محاسبه بردار سازگاری، لازم است که ارزش‌ها در دو بعد دیگر یعنی میزان λ (لاندا) و شاخص سازگاری[۱۹] (CI) محاسبه شوند. ارزش مربوط به λ همان میانگین ارزش‌های بردار سازگاری است. محاسبه CI بر پایه مشاهداتی است که در آن‌ها مقدار λ برای ماتریس‌های مثبت دوسویه همواره بزرگ‌تر یا برابر تعداد معیارهای موردنظر (n) است. اگر ماتریس مقایسه‌ای دوبه‌دو استحکام و سازگاری داشته باشد، آنگاه λ با تعداد معیارها برابر خواهد شد و نیز λ-n را می‌توان میزانی از درجه عدم ثبات و سازگاری در نظر گرفت و می‌توان آن را به‌صورت رابطه (۱) استاندارد کرد. نسبت سازگاری[۲۰] (CR) را نیز می‌توان از رابطه (۲) محاسبه نمود.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n-1} \quad (۱)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (۲)$$

که در آن RI، نشان‌دهنده شاخص سازگاری تصادفی است (جدول ۴). این شاخص همان شاخص سازگاری از یک ماتریس مقایسه دوبه‌دو است که به‌صورت تصادفی ایجادشده است. نسبت سازگاری به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که اگر CR کوچک‌تر از 0.1 باشد. تمامی تحلیل‌های مربوط به مدل AHP با استفاده از نرم‌افزار superdecisions 3.2 انجام‌شده است.

[16] Consistency Ratio
[17] Consistency
[18] Weighted Sum Vector
[19] Consistency Index
[20] Consistency Ratio

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۴. شاخص‌های پایندگی تصادفی (RI) برای ۱۵ معیار در مدل AHP(Malczewski et al., 2015)

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
RI	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۸	۰/۹۰	۱/۱۲۰	۱/۲۴۰	۱/۳۲۰	۱/۴۱۰
n	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	
RI	۱/۴۵۰	۱/۴۹۰	۱/۵۱۰	۱/۴۸۰	۱/۵۶۰	۱/۵۷۰	۱/۵۹۰	

۲. ٤. رویکرد OWA

میانگین وزنی مرتب‌شـــده (OWA) مدل تعمیم‌یافته و توســـعه‌یافته‌ای از مدل WLC اســـت. این روش یکی از روش‌های ترکیبی چندمعیاره است که توسط Yager (1988) توسعه یافت و توسط Eastman (1997) برای کاربردهای GIS گسترش پیدا کرد. OWA برای ارزیابی سطوح مختلف خطرپذیری (ریسک) استفاده می‌شود (Malczewski 2006). OWA به‌عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری معرفی‌شده است که می‌تواند اولویت‌ها و ارزیابی‌های ذهنی تصمیم‌گیرنده را در نظر بگیرد (Mokarram, Shafie-khah et al. 2021).

۲. ٤. ۱. تعریف OWA

در این رویکرد، یک سلول (رستر) یا یک چندضلعی به‌عنوان یک گزینه فرض می‌شود. هر گزینه (i = 1, 2,...,m) توسط مجموعه‌ای از مقادیر معیار (لایه) استانداردشده ($a_{ij} \in [0,1], j = 1,2, \dots, n$) توصیف می‌شود. یک مسئله ارزیابی چندمعیاره، ترجیحات کارشناسان را نیز در برمی‌گیرد که معمولاً به‌عنوان وزن معیار ($w_j \in [0,1], j = 1,2, \dots, n \ \& \ \sum_{j=1}^{n} w_j = 1$) تعریف می‌شوند. با توجه به داده‌های ورودی (لایه‌های معیارها و وزن‌های آن‌ها)، عملگر ترکیبی OWA با مکان i–ام (برای مثال رستر یا نقطه) مجموعه‌ای از وزن‌های رتبه‌ای (v = v1, v2, …, vn) مرتبط می‌شود به‌طوری‌که $v_j \in [0,1], \ j = 1,2, \dots, n \ \& \ \sum_{j=1}^{n} v_j = 1$ و به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{u_j v_j}{\sum_{i=1}^{n} u_j v_j} \right) z_{ij} \qquad (۳)$$

که در آن $z_{i1} \geq z_{i2} \geq \cdots \geq z_{in}$، توالی به‌دست‌آمده توسط مرتب کردن مجدد مقادیر پیکسل‌های $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ و u_j وزن معیار است که مطابق باارزش پیکسل، دوباره مرتب‌شده است. در حقیقت، در رویکرد OWA دو نوع وزن به نام‌های وزن‌های معیار[21] و وزن رتبه‌ای[22] وجود دارد. وزن‌های معیار، اهمیت نسبی هر معیار را نشان می‌دهند و در آن، همه پیکسل‌ها یا مکان‌های روی یک معیار دارای وزنی برابر w_j هستند. وزن‌های رتبه‌ای مربوط به مقادیر هر معیار از مکانی به مکان دیگر (از پیکسلی به پیکسل دیگر) متفاوت هستند. این وزن‌ها بدون اینکه در نظر بگیرند که این مقدار از کدام معیار می‌آید، به‌صورت نزولی به ارزش پیکسل واقع در مکان iام اختصا امداده می‌شوند.

با مجموعه‌های مختلف وزن‌های رتبه‌ای، می‌توان طیف وسیعی از اپراتورهای OWA از AND تا WLC و OR را اجرا کرد. اپراتورهای AND و OR در رویکرد OWA، بولین نیستند بلکه فازی بوده و به ترتیب به عملگرهای MIN و MAX شباهت دارند. بدین‌صورت که در AND، به کم‌ترین ارزش پیکسل‌ها، رتبه ۱ و به مابقی آن‌ها رتبه صفر داده می‌شود، در OR، به بیش‌ترین ارزش پیکسل‌ها ارزش ۱ و به مابقی آن‌ها رتبه صفر داده می‌شود؛ در WLC، رتبه داده‌شده به پیکسل‌ها برابر است و می‌توان با تقسیم ۱ بر تعداد معیارها (n) رتبه هر گزینه را محاسبه نمود (1/n). رتبه‌های بین حالت‌های AND، OR و WLC مطابق با نظر کارشناسی به پیکسل‌ها داده

[21] criterion weights
[22] order weights

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

می‌شود. برای همگرا کردن نظرات کارشناسی دردادن این رتبه‌ها می‌توان از کمیت سنج‌های زبانی[۲۳] استفاده کرد که در ادامه شرح داده می‌شود.

۲. ٤. ۲. کمیت سنج‌های زبانی در رویکرد OWA

وقتی تعداد زیادی معیار داشته باشیم، ترکیب OWA آن‌ها مطابق نظر تصمیم گیران دشوار است. جایگاه عملگرهای AND، OR و WLC مشخص است اما روش‌های رتبه‌بندی پیکسل‌ها در حالت‌های بینابین باعث ایجاد سردرگمی می‌شود. برای رفع این مشکل از عبارت‌های زبانی استفاده می‌کنیم که اصطلاحاً کمیت سنج‌های زبانی نامیده می‌شوند. کمیت سنج‌های مورداستفاده به‌صورت نسبی هستند مانند must، many، a few، almost all، about half، about 60%. کمیت سنج‌های زبانی نیز می‌توانند بسیار متنوع باشند. در این پژوهش از کمیت سنج‌های یکنواخت افزایشی منظم[۲۴] (TIM) استفاده می‌شود (Yager 1996). برای شناسایی کمیت سنج زبانی، مطابق رابطه (۴) یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها را برای تعریف یک زیرمجموعه پارامتری در یک بازه واحد به کار می‌گیریم.

$$Q(p)= p^{\alpha}, \quad \alpha>0 \qquad (۴)$$

که در آن Q(p) درجه عضویت کمیت سنج زبانی و دارای مقادیر فازی [0-1] است؛ α را می‌توان از جدول (۵) پیدا کرد و مربوط به نوع کمیت سنج زبانی است و p وزن کارشناسی هر معیار است که توسط مدل AHP محاسبه‌شده است. با مشخص کردن کمیت سنج زبانی و به دنبال آن مشخص شدن α، با استفاده از وزن کارشناسی (p) و شکل (۳)، می‌توان درجه عضویت کمیت سنج فازی را به دست آورد.

جبران‌کنندگی[۲۵] در حالت‌های AND و OR وجود ندارد و برابر صفر است؛ یعنی اینکه در این حالت‌ها، لایه‌های دیگر نمی‌توانند ارزش یک پیکسل با مقدار صفر را جبران کنند؛ اما در حالت WLC جبران‌کنندگی کامل وجود دارد و این در صورتی است که مقدار α برابر با ۱ در نظر گرفته شود، درنتیجه فقط وزن‌های حاصل از مدل AHP تأثیرگذار هستند. مقدار جبران‌کنندگی هر حالت را می‌توان از رابطه (۵) محاسبه کرد. در رویکرد OWA، درجه ریسک‌پذیری (ORness) و جبران‌کنندگی (tradeoff) به تعداد معیارها (n) بستگی دارد. این دو بعد فضای استراتژی تصمیم را تشکیل می‌دهند. مطابق شکل (۴) اگر دو معیار استفاده شود، فضای تصمیم در این ابعاد، مثلثی است. هرچه تعداد معیارها بیش‌تر شود، فضای تصمیم به‌تدریج از مثلثی به مستطیل تغییر شکل می‌دهد (Malczewski, Jacek et al. 2015).

$$tradeoff = 1 - \left[\frac{n\sum(w_r-\frac{1}{n})^2}{n-1}\right]^{0.5}, \ 0 \le \text{tradeoff} \le 1 \qquad (۵)$$

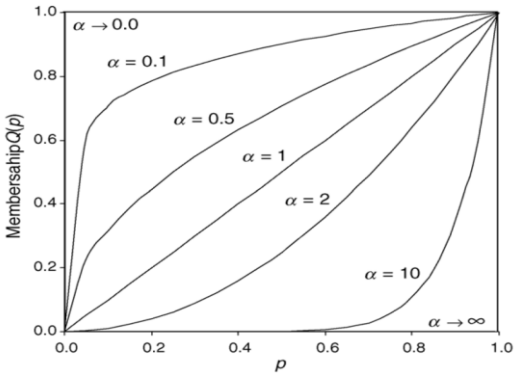
که در آن w_r وزن رتبه‌ای و n تعداد معیارها است.

[23] Linguistic quantifier
[24] Regular Increasing Monotone (RIM)
[25] tradeoff

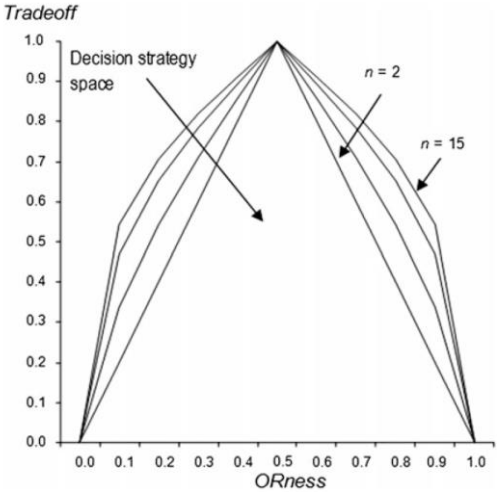
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۵. برخی از خصوصیات کمیت سنج‌های یکنواخت افزایشی منظم (RIM) برای مقادیر انتخاب‌شده پارامتر α (Malczewski, 2006)

α	Quantifier (Q)	OWA weights (vj)	ORness	Tradeoff	GIS combination procedure
$\alpha \rightarrow 0$	At least one	$v_1=1$; $v_j=0$, for all other weights	1.0	0.0	OWA (OR, MAX)
$\alpha= 0.1$	At least a few	a	a	a	OWA
$\alpha= 0.5$	A few	a	a	a	OWA
$\alpha= 1$	Half (identity)	$v_j=1/n$, for all j	0.5	1.0	OWA (WLC)
$\alpha= 2$	Most	a	a	a	OWA
$\alpha= 10$	Almost all	a	a	a	OWA
$\alpha \rightarrow \infty$	All	$V_n=1$; $v_j=0$, for all other weights	0.0	0.0	OWA (AND, MIN)



شکل ۳. مجموعه‌ای از کمیت سنج‌های منظم افزایشی (غیر کاهشی) یکنواخت (RIM) (Malczewski, 2006)



شکل ۴. رابطه بین اندازه‌های جبران‌کنندگی و ریسک‌پذیری برای تعدادی از معیارها (n=2, 5, 10 and 15) (Malczewski et al, 2015)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

۲. ٤. ۳. عملگرهای OWA

بعد از مرتب کردن مقدار پیکسل‌ها از زیاد به کم، وزن کارشناسی (w_j) مربوط به هر پیکسل به آن اختصاص داده می‌شود. سپس برای ایجاد وزن‌های رتبه‌ای (v_j)، مجموع وزن‌های کارشناسی مرتب‌شده (u_k) که برابر است با ۱، به توان α (استخراج‌شده از جدول ۵) می‌رسد (رابطه (۶)). درنهایت با استفاده از رابطه (۷) می‌توان وزن نهایی هر پیکسل با مقدار Z_{ij} را با استفاده از رویکرد OWA محاسبه کرد (Malczewski 2006).

$$v_j = \left(\sum_{k=1}^{j} u_k\right)^{\alpha} - \left(\sum_{k=1}^{j-1} u_k\right)^{\alpha} \quad (۶)$$

$$OWA_i = \sum_{j=1}^{n}\left(\sum_{k=1}^{j} u_k\right)^{\alpha} - \left(\sum_{k=1}^{j-1} u_k\right)^{\alpha} Z_{ij} \quad (۷)$$

در رابطه بالا مقدار α به‌جای صفر، عددی نزدیک به صفر مانند ۰.۰۰۱ و به‌جای بی‌نهایت یک عدد بزرگ مانند ۱۰۰۰ قرار داده می‌شود. مقدار α مربوط به درجه ریسک‌پذیری (ORness) مطابق با رابطه (۸) است. درجه ریسک‌پذیری موقعیت عملگر OWA را از ارزش‌های AND (کمینه) تا OR (بیشینه) نشان می‌دهد. درجه ریسک‌پذیری از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. مقادیر بالای ORness بدین معنی است که تصمیم گیر تمایل به پذیرش ریسک دارد و مقادیر کم آن دوری از ریسک را نشان می‌دهد. در این پژوهش، مهم‌ترین مزیت رویکرد OWA این است که تصمیم گیران را به ایجاد انواع سناریوهای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی قادر می‌سازد (Rinner and Malczewski 2002, Shorabeh, Firozjaei et al. 2019). کلیه تحلیل‌های رویکرد OWA در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2022a انجام‌گرفته است.

$$\text{ORness} = \frac{1}{\alpha+1} \qquad \alpha \geq 0 \quad (۸)$$

$$\text{ORness} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(n-1)\, v_i, \quad 0 \leq \text{ORness} \leq 1 \quad (۹)$$

۲. ۵. تصاویر ماهواره‌ای و روش طبقه‌بندی

۲. ۵. ۱. تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱

در این پژوهش به‌منظور تهیه لایه‌های شیب، میزان تابش خورشیدی و شبکه آبراهه‌ها از مدل رقومی ارتفاع باقدرت تفکیک ۱۰ متر حاصل از پردازش سطح ۱ تصویر راداری از نوع GRD[26] ماهواره سنتینل-۱ سازمان فضایی اروپا استفاده‌شده است. سطح ۱ محصولات IW GRD[۲۷] این ماهواره شامل داده‌های SAR[28] است که به‌صورت چند منظر[۲۹] بوده و برد زمینی[۳۰] آن‌ها با استفاده از مدل بیضوی زمین[۳۱]، تصویرسازی شده است. مراحل پیش‌پردازش این تصویر راداری و تبدیل آن به مدل رقومی ارتفاع در محیط نرم‌افزاری SNAP 8 انجام می‌شود. از دو تصویر صعودی[۳۲] و نزولی[۳۳] سنتینل- 1A به تاریخ‌های ۲۰۲۲/۰۵/۰۴ و ۲۰۲۲/۰۵/۰۳ که منطقه موردمطالعه را پوشش می‌دهند استفاده می‌شود. مدل رقومی ارتفاع ساخته‌شده از تصویر به تاریخ ۲۰۲۲/۰۵/۰۴ (DEM1) به‌عنوان مدل

[26] Ground Range Detected
[27] Interferometric Wide Swath (IW)Ground Range Detected
[28] Synthetic Aperture RADAR
[29] multi-looked
[30] ground range
[31] Earth ellipsoid model
[32] Ascending
[33] Descending

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

رقومی ارتفاع اصلی در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از مدل رقومی ارتفاع حاصل از تصویر رادار به تاریخ ۲۰۲۲/۰۵/۰۳ (DEM2) در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.8.1 مقادیر NoData و داده‌های کوچک‌تر و مساوی صفر حذف و جایگزین گردید (رابطه ۱۰).

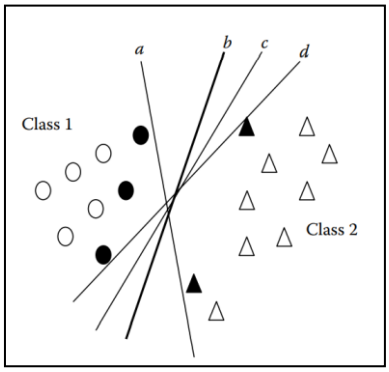
con(DEM1<=0,DEM2,DEM1) (۱۰)

۲. ۵. ۲. تصویر چند طیفی سنتینل-2A

جهت تهیه لایه کاربری/پوشش اراضی و به دنبال آن تهیه لایه محدودیت‌های مطرح‌شده در مکان‌یابی، از طبقه‌بندی پیکسل- مبنای تصویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-2A با تاریخ تصویربرداری ۲۰۲۲/۰۴/۲۰ در محیط نرم‌افزاری ENVI 5.6 استفاده‌شده است. الگوریتمی که در این نوع طبقه‌بندی بکار می‌رود، ماشین بردار پشتیبان نام دارد. در این پژوهش از باندهای ۱۰ متری (۸، ۴، ۳ و ۲) تصویر نوع 2A استفاده‌شده است.

۲. ۵. ۳. طبقه‌بندی پیکسل- مبنا به روش ماشین بردار پشتیبان (SVM)

این روش یک طبقه‌بندی خوب از داده‌های پیچیده و زیاد ارائه می‌دهد و از نظریه یادگیری آماری استخراج‌شده است. این نوع طبقه‌بندی در اصل یک طبقه‌بندی کننده باینری[۳۴] (دوتایی) خطی است که برچسب‌های ۱+ و ۱- را برچسب‌گذاری می‌کند (شکل ۵). هسته عملیاتی SVM، از یک ابر صفحه جداکننده بر اساس ویژگی‌های نمونه‌های آموزشی، به‌طور خاص در فضای عارضه ساخته‌شده است. این ابر صفحه جداکننده وابسته به حالتی است که حاشیه جدایی میان نمونه‌های کلاس ۱+ و کلاس ۱- بیشینه شود (Mather and Tso 2016).



شکل ۵. ابر صفحه b دو کلاس را با حاشیه‌های بیشینه جدا می‌کند (Mather & Tso, 2016)

۲. ٦. لایه‌های (معیارهای) مورداستفاده در مکان‌یابی

۲. ٦. ۱. لایه معیار میزان شیب (درجه)

نسبت تغییرات ارتفاع به فواصل افقی، شیب نامیده می‌شود و هر چه شیب بیش‌تر باشد هزینه ساخت بالاتر می‌رود، بنابراین در این پژوهش شیب‌های کم‌تر از ۲ درجه اولویت بالایی برای مکان‌یابی دارند.

۳. ٦. ۲. لایه معیار میزان تابش خورشیدی

نقشه تابش خورشیدی نشان‌دهنده پتانسیل انرژی خورشیدی یک منطقه است و اطلاعات مفیدی برای انتخاب مکان مناسب برای ایجاد نیروگاه‌های خورشیدی ارائه می‌دهد. در این تحقیق از ماژول تابش خورشیدی در ArcGIS برای محاسبه شدت تابش خورشیدی با

[34] Binary

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

استفاده از DEM به‌عنوان ورودی استفاده‌شده است. این ماژول شاخص‌های شیب، جهت شیب و سایه را برای محاسبه شدت تابش خورشیدی ترکیب می‌کند (Charabi and Gastli 2011, Shorabeh, Firozjaei et al. 2019). هر چه میزان تابش خورشیدی رسیده به یک مترمربع از سطح زمین در طول یک سال ($KWh/m^2/year$) بیش‌تر باشد ازنظر کارشناسان اهمیت بیش‌تری نیز دارد.

۳. ٦. ۳. لایه معیار فاصله از شبکه آبراهه

توپوگرافی نسبتاً خشن منطقه و وجود آبراهه‌های متعدد و پرشیب، خطر وجود سیلاب‌های شدید را گوشزد می‌کند. داشتن فاصله مناسب از شبکه زهکشی و آبراهه‌های فصلی برای در امان ماندن نیروگاه از سیلاب و تخریب، اهمیت فوق‌العاده دارد، لذا هرچه فاصله از آبراهه‌ها و شبکه‌های زهکشی بیش‌تر باشد مکان‌یابی مناسب‌تر است. برای آبراهه‌ها حریم ۵ متر در نظر گرفته‌شده است.

۳. ٦. ٤. لایه معیار فاصله از شبکه راه‌آهن

خطوط راه‌آهن دارای حریم خاص خود هستند و مکان‌یابی در این حریم‌ها نباید صورت گیرد، اما از این نظر که هر چه نیروگاه خورشیدی به این خطوط نزدیک‌تر باشد، ممکن است در آینده از آن‌ها در تجهیز، تدارکات، پشتیبانی و نگهداری این اماکن استفاده شود، اهمیت زیادی دارند. برای خط راه‌آهن حریم ۲۰۰ متر در نظر گرفته‌شده است.

۳. ٦. ٥. لایه معیار فاصله از مراکز جمعیتی غیرشهری

مراکز جمعیتی غیرشهری شامل روستاها و تمامی معادن و سدهای آبخیزداری و کشاورزی است که در نزدیکی آن‌ها بنانهاده شده‌اند. یکی از اهداف و مهم‌ترین هدف نیروگاه‌های خورشیدی تأمین برق موردنیاز ساکنین روستاها و معادن محلی و نیز به خدمت گرفتن این برق برای تأسیسات کشاورزی و آبیاری است و هر چه نیروگاه خورشیدی به این اماکن نزدیک‌تر باشد بهره‌وری بیش‌تری به همراه خواهد داشت. مراکز جمعیتی غیرشهری جهت پیش‌بینی توسعه آتی آن‌ها حریم ۱۰۰۰ متری در نظر گرفته‌شده است.

۳. ٦. ٦. لایه معیار فاصله از چاه‌ها (چاه‌های عمیق)

چاه‌های عمیق بیش‌تر در اراضی کشاورزی واقع در بخش جنوبی منطقه موردمطالعه و در بین زمین‌های حاصلخیز کشاورزی دایر شده‌اند. با توجه به اینکه این چاه‌ها برای استخراج آب از برق استفاده می‌کنند و بیش‌تر آن‌ها دارای خانه‌های ویلایی هستند و نیاز به برق‌دارند، لذا هر چه نیروگاه خورشیدی به آن‌ها نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر خواهد بود. حداقل حریم ۱۰۰ متر برای چاه‌ها در نظر گرفته‌شده است.

۳. ٦. ۷. لایه معیار فاصله از مراکز جمعیتی شهری

نزدیکی نیروگاه به مراکز بار مصرف مشخصه مهمی است و توجه به پراکندگی مکانی مصرف‌کننده‌ها ضروری است، زیرا هدف از نزدیکی نیروگاه‌ها به مراکز مصرف، کاستن از هزینه انتقال نیرو به آن مراکز و کاهش اتلاف انرژی است (Nohegar, Kamangar et al. 2016). محدوده شهر اندیمشک بیش‌تر جمعیت منطقه موردمطالعه را در خود جای‌داده است، لذا نزدیک بودن نیروگاه خورشیدی به آن از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌این‌علت که نیروگاه‌ها می‌توانند توسعه شهر را محدود کنند (Al Garni and Awasthi 2017) با در نظر گرفتن توسعه آتی شهر اندیمشک، حریم ۱۰۰۰ متری برای آن انتخاب‌شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

۳. ٦. ۸. لایه معیار فاصله از مناطق صنعتی و نظامی

شهرک‌های صنعتی و مناطق نظامی مانند پادگان‌ها از مهم‌ترین عوامل مصرف بار به‌حساب می‌آیند، لذا ضرورت دارد که مراکز تولید انرژی به آن‌ها نزدیک باشند؛ اما به علت تولید آلودگی‌های احتمالی برخی کارخانه‌ها در شهرک‌های صنعتی و یا داشتن خطر انفجار مواد منفجره تسلیحاتی در مناطق نظامی، باید حریم و فاصله مناسبی را (۱۰۰۰ متر) برای آن‌ها در نظر گرفت.

۳. ٦. ۹. لایه معیار فاصله از خطوط انتقال نفت

نیروگاه‌های خورشیدی نیازی به انواع مشتقات سوخت‌های فسیلی ندارند و هر چه دورتر از این تأسیسات قرار گیرند مناسب‌تر است. رعایت حداقل حریم ۱۰۰ متر برای این خطوط امری ضروری است.

۳. ٦. ۱۰. لایه معیار فاصله از راه‌ها

نقشه راه‌ها و جاده‌ها در احداث نیروگاه خورشیدی از جنبه‌های مختلف اهمیت دارد، نزدیکی نیروگاه به راه‌ها موجب کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل تجهیزات نیروگاه، رفت‌وآمد کارکنان و پشتیبانی از نیروگاه می‌شود (Van Hoesen and Letendre 2010, Nohegar, Kamangar et al. 2016). لذا هرچقدر نیروگاه خورشیدی به راه‌ها نزدیک‌تر باشد با حفظ حریم ۲۰۰ متری برای آن مناسب‌تر خواهد بود.

۳. ٦. ۱۱. لایه معیار فاصله از شبکه خطوط انتقال برق

برق تولیدی هر نیروگاه برای توزیع در شبکه نیاز به خطوط انتقال نیرو دارد. فاصله نیروگاه از خطوط برق شبکه که بتواند خروجی نیروگاه را قبول کند بسیار اهمیت دارد؛ زیرا که افزایش این خطوط علاوه بر بالا بردن هزینه پروژه، باعث تلفات برق تولیدشده در شبکه نیز می‌شود (Nohegar, Kamangar et al. 2016). برای تهیه این لایه از داده‌های OpenStreetMap استفاده‌شده است. با در نظر گرفتن توسعه خطوط انتقال نیرو در آینده، حریم ۵۰۰ متر برای این لایه در نظر گرفته‌شده است.

۳. ٦. ۱۲. لایه معیار فاصله از گسل‌ها

نیروگاه‌های خورشیدی نباید در مجاورت گسل استقرار یابند، جایی که گسل‌ها در صورت لغزش گل یا زمین‌لغزش آسیب‌ها و خسارت‌های زیادی به تأسیسات نیروگاه وارد می‌کنند (Noorollahi, Fadai et al. 2016, Shorabeh, Firozjaei et al. 2019). با توجه به اینکه بیش‌تر این زمین‌لرزه‌ها در نزدیکی گسل‌ها رخ می‌دهد، بنابراین با حفظ حریم ۱۰۰۰ متری هر چه فاصله از گسل بیش‌تر باشد، بهینه‌تر است.

۳. ۷. فازی‌سازی خطی

به‌منظور فازی‌سازی خطی لایه‌های شیب و فواصل اقلیدسی مراکز جمعیتی، چاه‌ها، محدوده شهر اندیمشک، نظامی و صنعتی، راه‌ها، خطوط انتقال نیرو از رابطه (۱۱) استفاده‌شده است. جهت فازی‌سازی خطی لایه‌های تابش خورشیدی و فواصل اقلیدسی آبراهه‌ها، خط راه‌آهن، خطوط انتقال نفت و گسل‌ها نیز رابطه (۱۲) بکار برده شده است (Vafaei, Ribeiro et al. 2016, Shorabeh, Firozjaei et al. 2019).

$$v_{is} = \frac{X_{smax} - X_i}{X_{smax} - X_{smin}} \quad (۱۱)$$

$$v_{is} = \frac{X_i - X_{smin}}{X_{smax} - X_{smin}} \quad (۱۲)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

که در این روابط، v_{is} مقدار فازی شده خطی پیکسل i ام برای معیار (لایه) s ام است. X_i، مقدار i ام برای معیار (لایه) s ام، X_{smax} و X_{smin} به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه معیار s ام است. روابط (۱۱) و (۱۲) به ترتیب برای کمینه‌سازی[35] خطی و بیشینه‌سازی[36] خطی ارزش‌های هر معیار به کار می‌رود. تمامی عملیات تعیین فواصل اقلیدسی و فرایندهای فازی‌سازی خطی لایه‌ها (جدول ۶) در نرم‌افزار ArcMap 10.8.1 انجام‌شده است.

جدول ۶. روش فازی‌سازی هرکدام از معیارها

نام معیار (لایه)	نوع فازی‌سازی	توصیف
میزان شیب	کمینه‌سازی خطی	هر چه شیب بیشتر، ارزش سلول کم‌تر
میزان تابش خورشیدی	بیشینه‌سازی خطی	هر چه تابش خورشیدی بیشتر، ارزش سلول بیش‌تر
فاصله از شبکه آبراهه	بیشینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول بیش‌تر
فاصله از شبکه راه‌آهن	بیشینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول بیش‌تر
فاصله از مراکز جمعیتی غیرشهری	کمینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول کم‌تر
فاصله از چاه‌ها	کمینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول کم‌تر
فاصله از مراکز جمعیتی شهری	کمینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول کم‌تر
فاصله از مناطق صنعتی و نظامی	کمینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول کم‌تر
فاصله از خطوط انتقال نفت	بیشینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول بیش‌تر
فاصله از راه‌ها	کمینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول کم‌تر
فاصله از شبکه خطوط انتقال برق	کمینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول کم‌تر
گسل‌ها	بیشینه‌سازی خطی	هر چه فاصله بیشتر، ارزش سلول بیش‌تر

۳. ۸. لایه محدودیت‌ها و حریم‌ها

با استفاده از طبقه‌بندی پیکسل – مبنا به روش ماشین بردار پشتیبان بر روی تصویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲، نقشه کاربری/پوشش اراضی منطقه موردمطالعه ایجاد می‌شود. محدودیت‌های کاربری/ پوشش اراضی شامل پهنه‌های آبی، جنگلی و ساخته‌شده (سازه‌های شهری و روستایی و جاده‌ها) می‌شوند. با بررسی پژوهش‌های پیشین، حریم‌ها و محدودیت‌های هر معیار استخراج‌شده و همه آن‌ها به همراه محدودیت‌های حاصل از نقشه کاربری/پوشش اراضی به شکل برداری با همدیگر ادغام می‌شوند. جدول (۷) تمامی محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده را نشان می‌دهد.

[35] Minimize
[36] Maximize

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۷. حریم‌ها و محدودیت‌های هر معیار

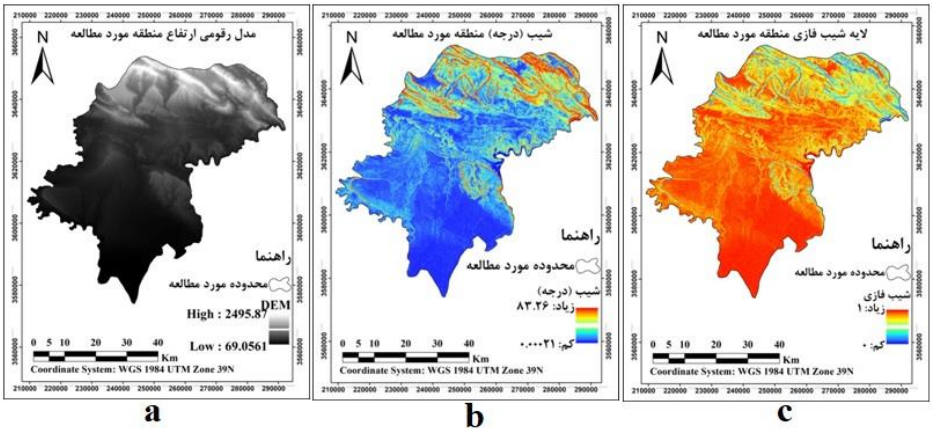
شماره	نام معیار	محدودیت	یکا (واحد)
۱	میزان شیب	بیش‌تر از ۱۰ درجه	درجه
۲	میزان تابش خورشیدی	۱۱۱۸۸۷۴-۲۵۵۹۶۳	$KWh/m^2/year$
۳	فاصله از شبکه آبراهه	۵	متر
۴	فاصله از شبکه راه‌آهن	۲۰۰	متر
۵	فاصله از مراکز جمعیتی غیرشهری	۱۰۰۰	متر
۶	فاصله از چاه‌ها	۱۰۰	متر
۷	فاصله از مراکز جمعیتی شهری	۱۰۰۰	متر
۸	فاصله از مناطق صنعتی و نظامی	۱۰۰۰	متر
۹	فاصله از خطوط انتقال نفت	۱۰۰	متر
۱۰	فاصله از راه‌ها	۲۰۰	متر
۱۱	فاصله از شبکه خطوط انتقال برق	۵۰۰	متر
۱۲	گسل‌ها	۱۰۰۰	متر

٤. نتایج و یافته‌ها

٤. ١. معیارهای (لایه‌های) مورداستفاده

٤. ١. ١. معیار شیب (درجه)

با استفاده از فازی خطی از نوع کمینه‌سازی، لایه فازی شده شیب در بازه صفرتا یک ایجاد شد (شکل ۶). به‌عبارت‌دیگر هر چه شیب بیشتر، ارزش سلول‌های لایه شیب کم‌تر می‌شود.

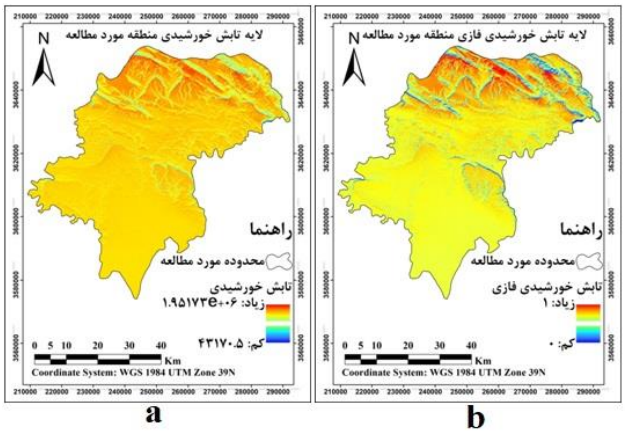


شکل ۶. **a** مدل رقومی ارتفاع منطقه موردمطالعه، **b** لایه شیب برحسب درجه و **c** به شیب فازی شده خطی

٤. ١. ٢. میزان تابش خورشیدی

هر چه میزان تابش نور خورشید رسیده به سطح زمین بیش‌تر باشد، مطمئناً انرژی الکتریکی بیش‌تری نیز توسط سلول‌های فتوولتائیک یا نیروگاه‌های خورشیدی تولید می‌شود. یکای این مقادیر وات‌ساعت بر مترمربع (Wh/m^2) است. تابش نور خورشید برای یک سال منطقه موردمطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع محاسبه‌شده است. (شکل ۷).

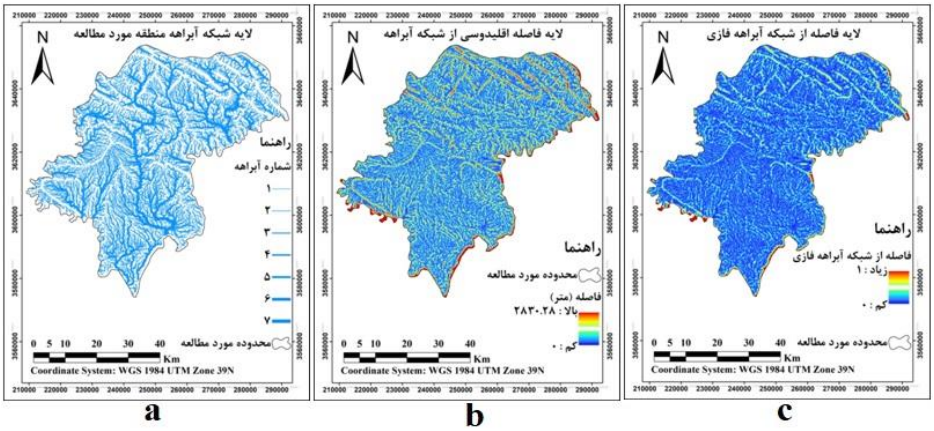
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۷. **a** لایه تابش خورشیدی برحسب واتساعت بر مترمربع (**W.h/m²**) و **b** لایه تابش خورشیدی فازی شده خطی

۳-۱-٤. فاصله از شبکه آبراهه

برای ایجاد شبکه آبراهه از مدل رقومی ارتفاع حاصل از تصاویر سنتینل-1A و ابزارهای مربوط به آن در نرم‌افزار ArcMap 10.8.1 به روش استرالر[۳۷] استفاده شد (شکل ۸).



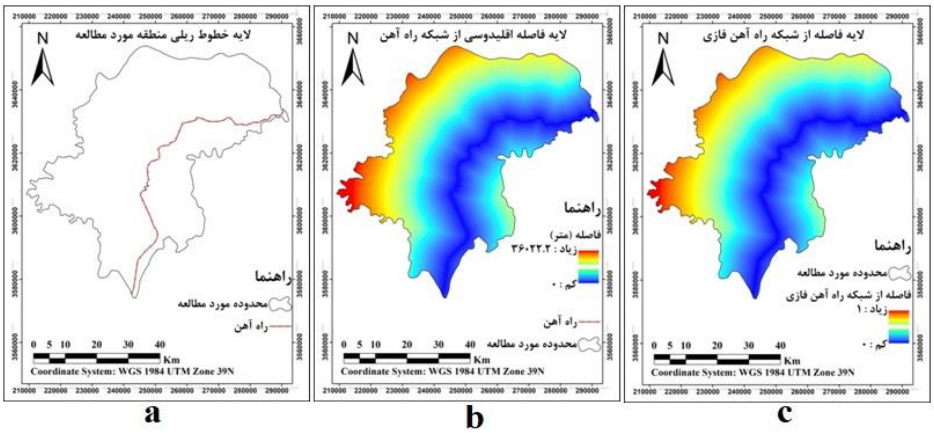
شکل ۸. **a** لایه شبکه آبراهه، **b** فاصله اقلیدسی شبکه آبراهه برحسب متر و **c** فاصله از شبکه آبراهه فازی شده خطی

٤. ۱. ٤. فاصله از شبکه راه‌آهن

در نیروگاه‌های خورشیدی استفاده چندانی از شبکه ریلی کشور نمی‌شود، لذا هر چه فاصله از این عارضه بیش‌تر باشد، مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود (شکل ۹).

[37] Strahler

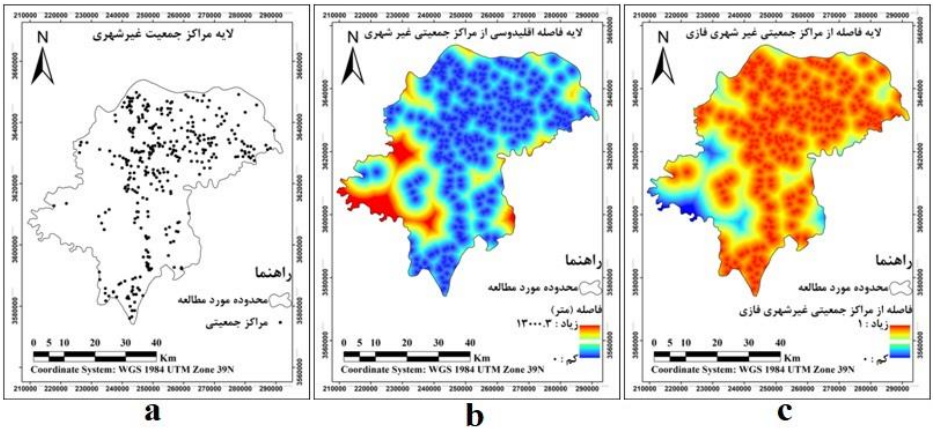
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۹. **a** لایه خطوط ریلی، **b** لایه فاصله اقلیدسی از شبکه راه‌آهن برحسب متر و **c** لایه فاصله از شبکه راه‌آهن فازی شده خطی

٤. ١. ٥. فاصله از مراکز جمعیتی غیرشهری

هر چه فاصله نیروگاه‌های خورشیدی از مراکز جمعیتی غیرشهری مانند روستاها و شهرک‌ها کم‌تر باشد، هزینه انتقال انرژی به آن‌ها کاهش‌یافته و مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود. (شکل ۱۰).

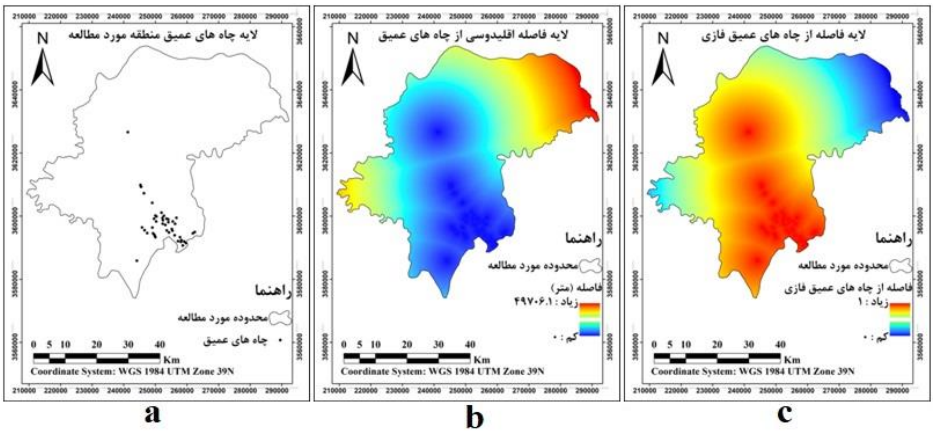


شکل ۱۰. **a** لایه مراکز جمعیتی غیرشهری، **b** لایه فاصله اقلیدسی و**c** لایه فاصله از مراکز جمعیتی غیرشهری فازی شده خطی

٤. ١. ٦. فاصله از چاه‌ها

تمامی چاه‌های عمیق موجود در منطقه موردمطالعه انرژی الکتریکی مصرف کرده و تقریباً در تمامی آن‌ها ویلا باغ‌هایی احداث گردیده است. هر چه فاصله نیروگاه‌های خورشیدی از چاه‌ها کم‌تر باشد، هزینه انتقال انرژی به آن‌ها کاهش‌یافته و مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود. (شکل ۱۱).

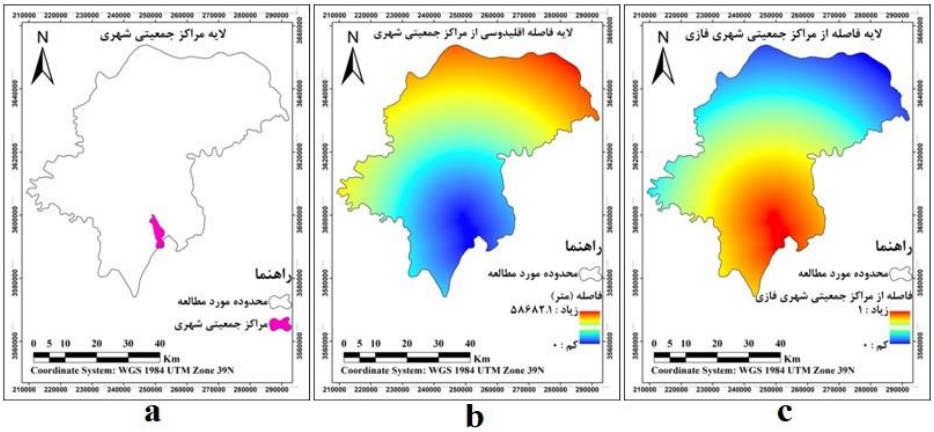
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۱۱. لایه چاه‌های عمیق، b لایه فاصله اقلیدسی و c لایه فاصله از چاه‌های عمیق فازی شده خطی

٤. ١. ٧. فاصله از مراکز جمعیتی شهری (محدوده شهر اندیمشک)

هر چه فاصله نیروگاه‌های خورشیدی از مراکز جمعیتی شهری مانند شهر اندیمشک (بیش‌ترین جمعیت شهرنشین را در منطقه موردمطالعه به خود اختصاص داده است) کم‌تر باشد، هزینه انتقال انرژی به آن‌ها کاهش‌یافته و مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود (شکل ۱۲).

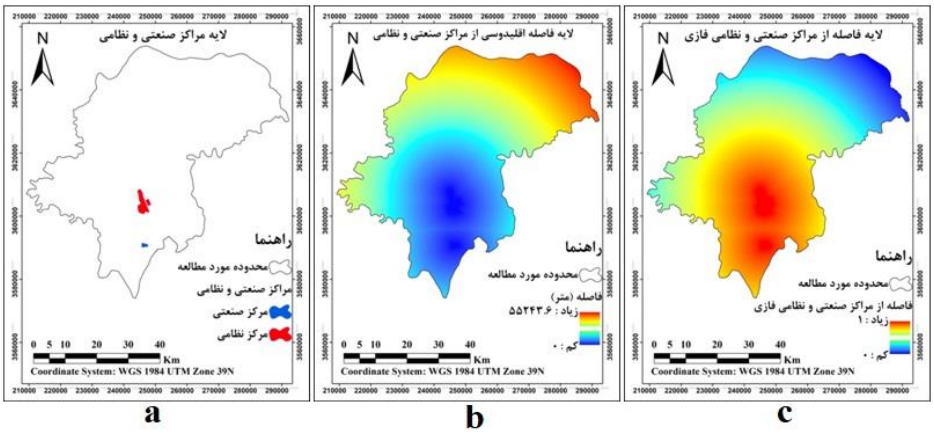


شکل ۱۲. **a** لایه مراکز جمعیتی شهری (محدوده شهر اندیمشک)، **b** لایه فاصله اقلیدسی و **c** لایه فاصله از مراکز جمعیتی شهری فازی شده خطی

٨-١-٤. فاصله از مناطق صنعتی و نظامی

هر چه فاصله نیروگاه‌های خورشیدی از مراکز جمعیتی نظامی و صنعتی (به دلیل نیازمند بودن به انرژی الکتریکی) کم‌تر باشد، هزینه انتقال انرژی به آن‌ها کاهش‌یافته و مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود. به دلایل امنیتی نقشه تمامی مراکز و پادگان‌های نظامی آورده نشده است و فقط محدوده تقریبی یکی از پادگان‌های نظامی آورده شده است (شکل ۱۳).

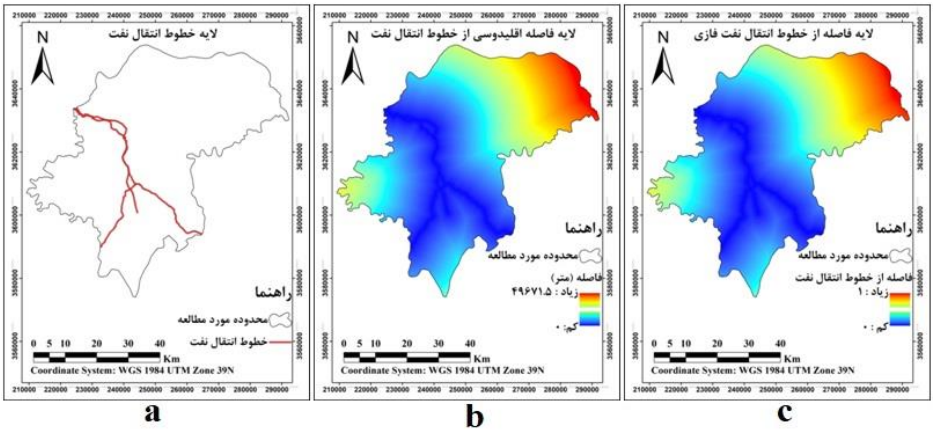
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۱۳. **a** لایه مراکز صنعتی و نظامی، **b** لایه فاصله اقلیدسی و**c** لایه فاصله از مراکز صنعتی و نظامی فازی شده خطی

٤. ١. ٩. فاصله از خطوط انتقال نفت

خطوط انتقال نفت و مشتقات آن علاوه بر اینکه دارای حریم‌های قانونی مربوط به خود است، از انرژی الکتریکی نیز استفاده نمی‌کنند؛ بنابراین بعدازاینکه لایه فاصله اقلیدسی برای این خطوط محاسبه شد، به روش بیشینه‌سازی خطی، فازی می‌شوند (شکل ۱۴).

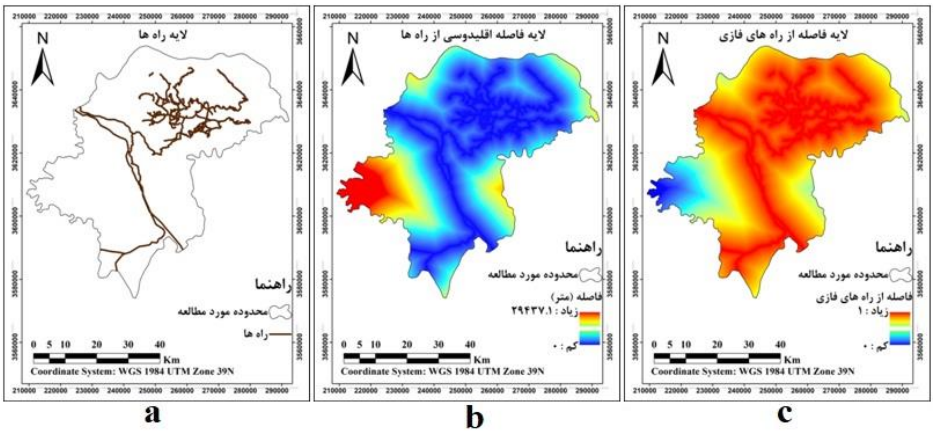


شکل ۱۴. a لایه خطوط انتقال نفت، b لایه فاصله اقلیدسی و c لایه فاصله از خطوط انتقال نفت فازی شده خطی

٤. ١. ١٠. فاصله از راه‌ها

راه‌های ارتباطی از این نظر که هم‌محل تجمع مراکز جمعیتی شـهری و غیری شـهری هسـتند و هم قابلیت دسـترسـی به امکانات و تدارکات را فراهم می‌کنند دارای اهمیت هسـتند؛ بنابراین هر چه فاصـله نیروگاه‌های خورشـیدی از راه‌های مواصـلاتی کم‌تر باشـد، هزینه فراهم نمودن تدارکات و دسترسی کارکنان کاهش‌یافته و مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود (شکل ۱۵).

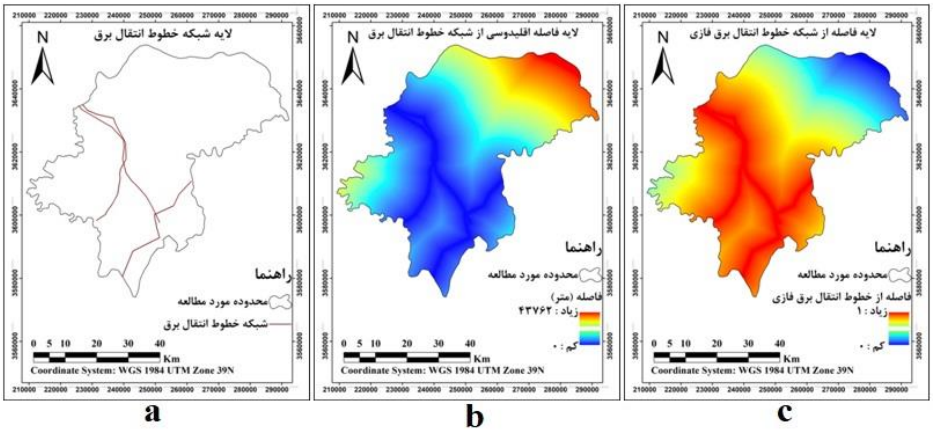
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۱۵. **a** لایه راه‌ها، **b** لایه فاصله اقلیدسی و **c** لایه فاصله از راه‌ها فازی شده خطی

٤. ١. ١١. فاصله از شبکه خطوط انتقال برق

اهمیت این لایه ازاین‌جهت است که انرژی الکتریکی تولیدشده توسط نیروگاه‌های انرژی خورشیدی باید با کم‌ترین فاصله و هزینه وارد آن‌ها شود؛ بنابراین هر چه فاصله نیروگاه‌های خورشیدی از شبکه خطوط انتقال برق کم‌تر باشد، هزینه انتقال انرژی الکتریکی به شبکه برق سراسر کاهش‌یافته و مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود (شکل ۱۶).

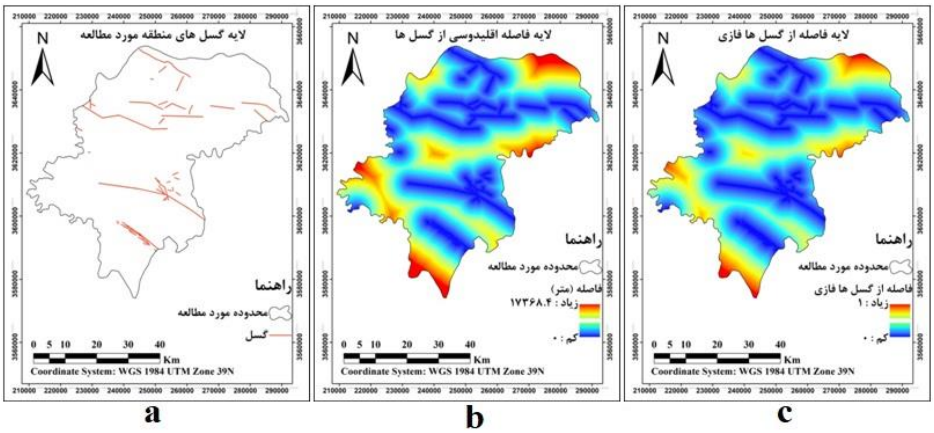


شکل ۱۶. لایه شبکه خطوط انتقال برق، **b** لایه فاصله اقلیدسی و **c** لایه فاصله از شبکه خطوط انتقال برق فازی شده خطی

٤. ١. ١٢. گسل‌ها

گسل و فواصل نزدیک به آن مستعد رخ دادن زمین‌لرزه‌های با شدت متفاوت است و هرگونه ساخت‌وساز در نزدیک آن باعث ایجاد توسعه ناپایدار می‌شود. لذا هر چه فاصله از این عارضه بیش‌تر باشد، مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در آن مناطق مناسب‌تر خواهد بود (شکل ۱۷).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۱۷. **a** لایه گسل‌ها، **b** لایه فاصله اقلیدسی و **c** لایه فاصله از گسل‌ها فازی شده خطی

٤. ۲. محاسبه وزن‌های کارشناسی توسط مدل AHP

جدول (۸) وزن معیار (وزن نسبی)، بردار مجموع وزنی و بردار سازگاری را در مدل AHP نشان می‌دهد. مطابق این جدول، مراکز جمعیتی بیش‌ترین درصد وزنی را به خود اختصاص داده است. میانگین ارزش بردارهای سازگاری (λ)، شاخص سازگاری (CI) و نسبت سازگاری (CR) به ترتیب ۱۳/۲۹، ۰/۱۱۷۴ و ۰/۰۷۳ محاسبه گردید. با توجه به مقدار CR به‌دست‌آمده که کم‌تر از ۰/۱ است، سازگاری در مقایسه‌های دوبه‌دو دارای سطح قابل‌قبولی بوده است و نیاز به تجدیدنظر در ارزش‌های موجود در ماتریس مقایسه‌ای دوبه‌دو نبود.

٤. ۳. ایجاد نقشه کاربری/ پوشش اراضی

به‌منظور استخراج محدودیت‌هایی از قبیل پوشش جنگلی، کاربری‌های شهری و حمل‌ونقل (مناطق ساخته‌شده و جاده‌ها) و نیز مناطق آبی مانند دریاچه سدها و رودخانه‌ها از طبقه‌بندی پیکسل پایه به روش ماشین بردار پشتیبان تصویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. کاربری/پوشش‌های اراضی آیش، کشاورزی، بایر، جنگلی، ساخته‌شده و نیز نواحی آبی در منطقه موردمطالعه تشخیص داده شد (شکل ۱۸ و جدول ۹) و از بین آن‌ها اراضی با کاربری/پوشش جنگلی، ساخته‌شده و آبی به‌عنوان محدودیت استخراج گردید. بیش‌ترین و کم‌ترین پوشش اراضی به ترتیب مربوط به اراضی بایر (143150.5 هکتار) و آیش (۵۷۸۹ هکتار) است.

۴. ۳. ۱. تعیین لایه حریم‌ها و محدودیت‌ها

با استفاده از حریم‌های ذکرشده در جدول (۷) برای هر معیار با استفاده از پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده، نظر کارشناسی مؤلفان و همچنین نقشه کاربری پوشش اراضی، لایه حریم‌ها و محدودیت‌ها ایجاد شد. برای ایجاد لایه حریم‌ها و محدودیت‌ها، اراضی با کاربری/پوشش جنگلی، ساخته‌شده و آبی به‌عنوان محدودیت، از نقشه کاربری /پوشش اراضی انتخاب و با لایه حریم‌ها و محدودیت‌های هر معیار ادغام گردیدند (شکل ۱۹).

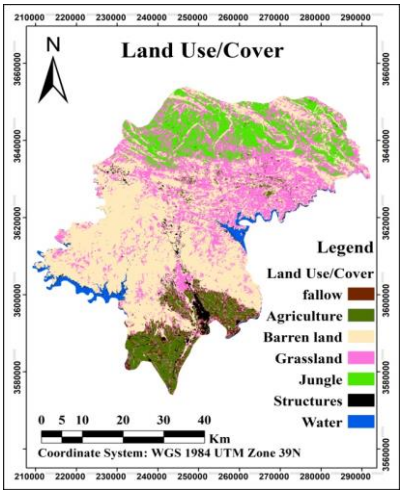
٤-٤. تهیه انواع نقشه‌های مکان‌یابی

بعد از محاسبه لایه‌های فواصل اقلیدسی و فازی در نرم‌افزار ArcMap 10.8.1 و همچنین محاسبه وزن هر معیار توسط مدل AHP جهت انجام محاسبات مدل OWA با درجات ریسک‌پذیری متنوع از نرم‌افزارMATLAB R2022a استفاده شد. شکل (۲۰) نقشه‌های مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی را به روش Fuzzy AHP-OWA برای α ها و درجات مختلف ریسک‌پذیری نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۸. وزن معیار و درصد آن، بردار مجموع وزنی و بردار سازگاری در مدل **AHP**

معیار	نوع فازی-سازی	وزن نسبی	درصدوزن نسبی	بردارمجموع وزنی	بردار سازگاری (λ)
میزان شیب	Minimize	۰/۱۱	۱۱	۱/۵۴	۱۳/۴۰۶
میزان تابش خورشیدی	Maximize	۰/۱۸	۱۸	۲/۴۶	۱۳/۸۵۵
فاصله از شبکه آبراهه	Maximize	۰/۰۳	۳	۰/۳۳	۱۲/۸۴۷
فاصله از شبکه راه‌آهن	Maximize	۰/۰۱	۱	۰/۱۵	۱۲/۶۹۳
فاصله از مراکز جمعیتی غیرشهری	Minimize	۰/۱۹	۱۹	۲/۷۱	۱۴/۱۷۶
فاصله از چاه‌ها	Minimize	۰/۰۲	۲	۰/۲۹	۱۲/۷۸۳
فاصله از مراکز جمعیتی شهری	Minimize	۰/۱۵	۱۵	۲/۱۲	۱۴/۱۱۰
فاصله از مناطق صنعتی و نظامی	Minimize	۰/۱۳	۱۳	۱/۸۳	۱۴/۲۶۹
فاصله از خطوط انتقال نفت	Maximize	۰/۰۱	۱	۰/۱۶	۱۲/۶۶۱
فاصله از راه‌ها	Minimize	۰/۱۱	۱۱	۱/۴۴	۱۳/۶۶۱
فاصله از شبکه خطوط انتقال برق	Minimize	۰/۰۴	۴	۰/۴۹	۱۲/۶۱۷
گسل‌ها	Maximize	۰/۰۲	۲	۰/۲۷	۱۲/۴۲۳

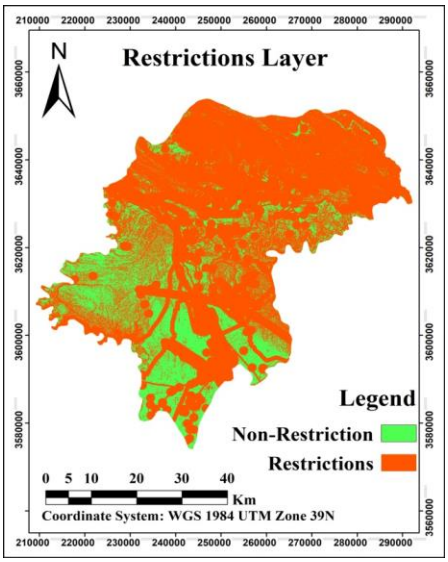


شکل ۱۸. نقشه کاربری/پوشش اراضی منطقه موردمطالعه استخراج‌شده از تصویر سنتینل-۲

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۹. مساحت (هکتار) هر کاربری/پوشش اراضی به همراه درصد آن

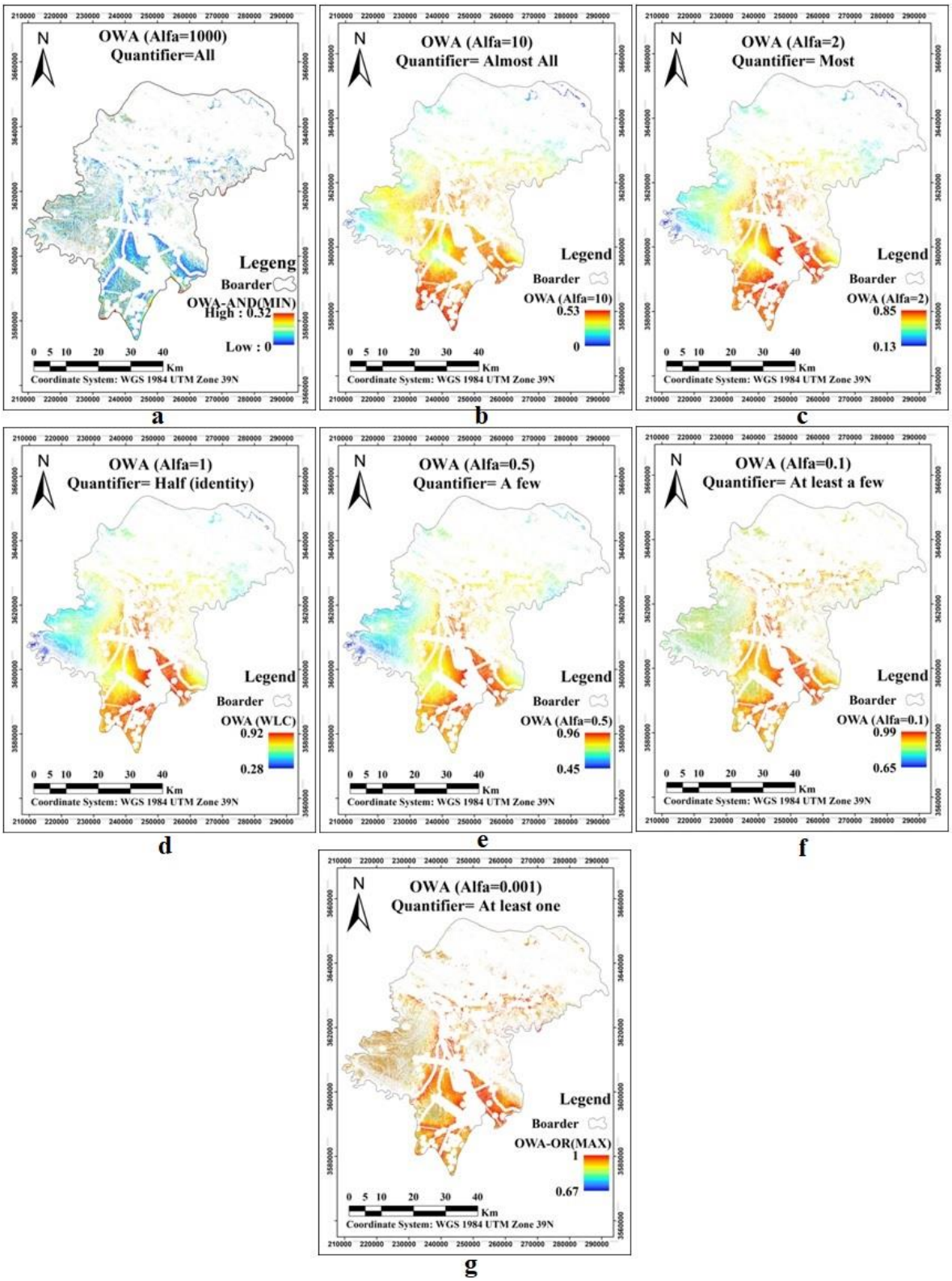
کاربری/پوشش	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
آیش	5789	1.86
کشاورزی	22471.3	7.21
بایر	143150.5	45.94
مرتع	87564.8	28.10
جنگل	38904.9	12.49
ساخته‌شده	6050.4	1.94
آب	7641.4	2.45



شکل ۱۹. لایه محدودیت‌ها و حریم‌ها

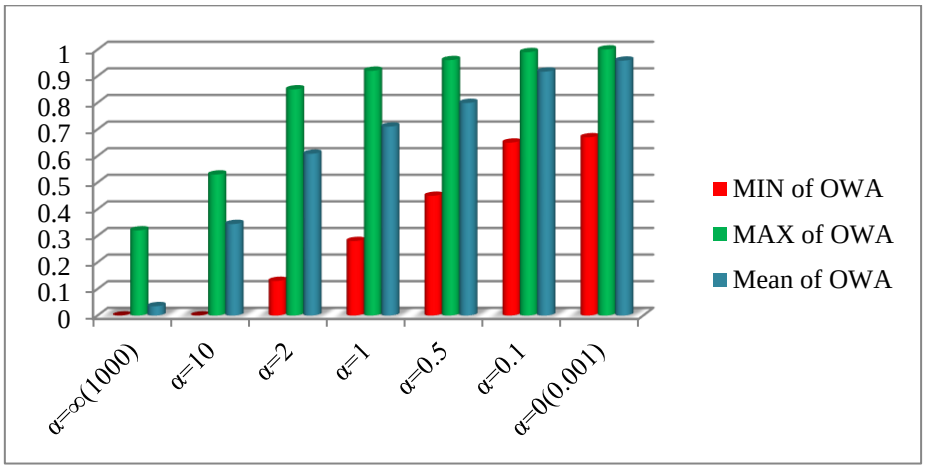
حریم‌ها و محدودیت‌ها از نقشه‌های مختلف مکان‌یابی کسر گردیده است. همان‌طور که در این نقشه‌ها دیده می‌شود هنگامی‌که ریسک‌پذیری کم است (α=1000 or ∞)، مناطق کم‌تری هم به‌عنوان مناطق مستعد ساخت نیروگاه خورشیدی معرفی می‌شوند. هر چه ریسک‌پذیری افزایش یابد (α به سمت صفر میل کند)، این مناطق مستعد زیادتر شده درنتیجه کمینه، بیشینه و میانگین ارزش‌های هر لایه از سناریوهای مکان‌یابی محاسبه‌شده نیز بیش‌تر می‌شود. بدین معنی که با افزایش ریسک‌پذیری بسیاری از نواحی منطقه موردمطالعه مستعد ساخت نیروگاه خورشیدی تشخیص داده می‌شوند. در ضمن هر چه مقدار آلفا بیش‌تر شود، مساحت‌های دارای اولویت بالاتر (به سمت چارک اول)، کاهش می‌یابد (شکل ۲۱ و جدول ۱۰).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۲۰. نقشه‌های مکان‌یابی تولیدشده با استفاده از کمیت سنج‌های زبانی مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

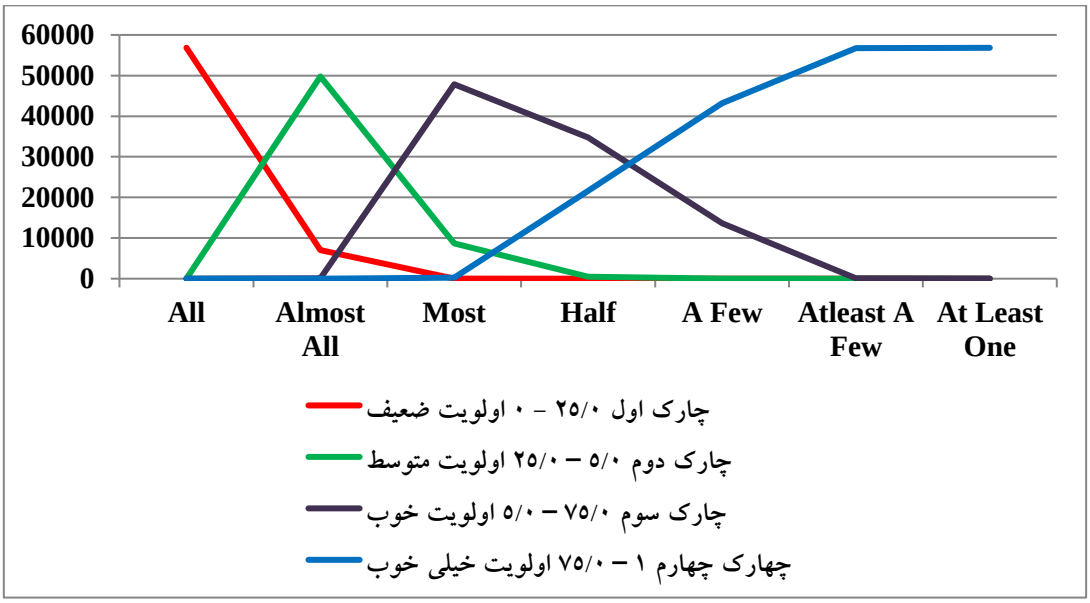


شکل ۲۱. کمینه، بیشینه و میانگین ارزش‌های هر لایه از نقشه‌های مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی

جدول ۱۰. مقایسه مساحت چارک‌های (اولویت‌های) نقشه‌های مکان‌یابی تولیدشده (برحسب هکتار)

انواع نقشه‌های مکان‌یابی با:		چارک اول	چارک دوم	چارک سوم	چارک چهارم
		۰ - ۰/۲۵	۰/۲۵ — ۰/۵	۰/۵ — ۰/۷۵	۰/۷۵ — ۱
کمیت سنج زبانی	α	اولویت ضعیف	اولویت متوسط	اولویت خوب	اولویت خیلی خوب
All	۱۰۰۰	۵۶۸۴۵/۷۹	۲/۱۲	۰	۰
Almost All	۱۰	۷۰۰۹/۵۹	۴۹۷۸۳/۴۶	۵۴/۸۶	۰
Most	۲	۴۱/۳۱	۸۶۸۱/۷۱	۴۷۸۵۳/۲۳	۲۷۱/۶۶
Half	۱	۰	۵۱۸/۴۲	۳۴۷۶۳/۵۸	۲۱۵۶۵/۹۱
A Few	۰/۵	۰	۰/۲۵	۱۳۶۴۹/۷۵	۴۳۱۹۷/۹۱
Atleast A Few	۰/۱	۰	۰	۷۶/۴۰	۵۶۷۷۱۵۱/۵۱
At Least One	۰/۰۰۱	۰	۰	۱۸/۳۷	۵۶۸۲۹۵۴/۵۴

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۲۲. مقایسه هرکدام از چهار اولویت کلاس‌های مکان‌یابی (هکتار)

٤. ٥. رابطه همبستگی بین هر یک از نقشه‌های مکان‌یابی با معیارهای دخیل در مکان‌یابی

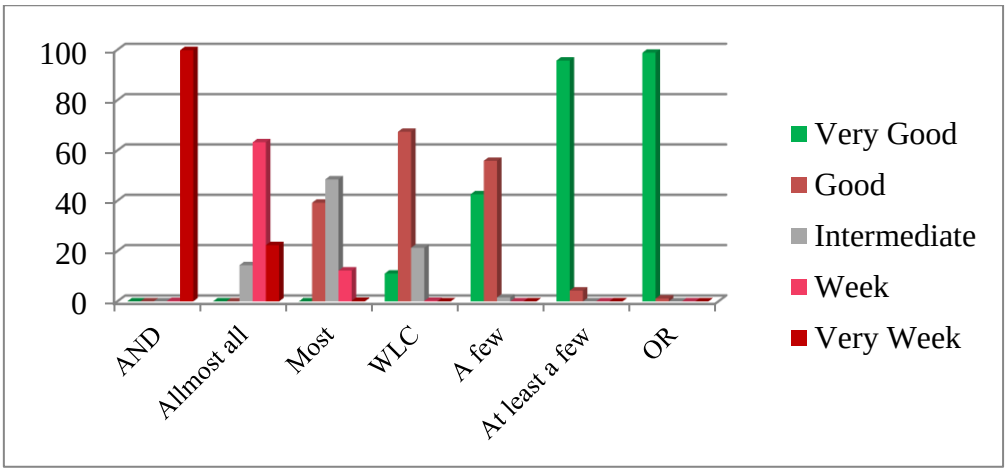
بعد از محاسبه سناریوهای مختلف مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی با استفاده از کمیت سنج‌های زبانی در رویکرد OWA، رابطه همبستگی آن‌ها با معیارهای فازی شده خطی به‌کاربرده شده در مکان‌یابی در نرم‌افزار Arcmap10.8.1 محاسبه گردید (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. رابطه همبستگی سناریوهای مختلف مکان‌یابی با معیارهای فازی شده خطی

معیارها / α	α=1000	α=10	α=2	α=1	α=0.5	α=0.1	α=0.001
میزان شیب	-۰/۱۹	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۳۶	۰/۲۴
میزان تابش خورشیدی	۰/۰۰	-۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۰۷
فاصله از شبکه آبراهه	۰/۶۶	-۰/۰۴	-۰/۱۲	-۰/۱۳	-۰/۱۳	-۰/۰۶	-۰/۰۱
فاصله از شبکه راه‌آهن	۰/۱۸	-۰/۴۱	-۰/۴۹	-۰/۵۴	-۰/۵۷	-۰/۴۶	-۰/۳۴
فاصله از مراکز جمعیتی غیرشهری	-۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۲	۰/۳۳	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۳۴
فاصله از چاه‌ها	-۰/۱۶	۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۴۴	۰/۲۳
فاصله از مراکز جمعیتی شهری	-۰/۱۵	۰/۸۹	۰/۹	۰/۸۳	۰/۷۲	۰/۴۱	۰/۲۲
فاصله از مناطق صنعتی و نظامی	-۰/۱۶	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۴	۰/۲
فاصله از خطوط انتقال نفت	۰/۱۵	-۰/۷۶	-۰/۷۹	-۰/۷۳	-۰/۶۳	-۰/۳۴	-۰/۱۶
فاصله از راه‌ها	-۰/۱۳	۰/۱	۰/۲۴	۰/۳۷	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۳۶
فاصله از شبکه خطوط انتقال برق	-۰/۱۲	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۷۶	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۱۷
گسل‌ها	۰/۱۸	۰/۱۱	-۰/۰۴	-۰/۰۹	-۰/۱۳	-۰/۱۳	-۰/۱۱

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

از میان تمامی روابط همبستگی محاسبه‌شده، معیارهای فاصله از مناطق صنعتی و نظامی، فاصله از مراکز جمعیتی شهری و فاصله از چاه‌ها به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۹۲، ۰/۹۰ و ۰/۸۸ دارای بالاترین ضریب همبستگی با نقشه مکان‌یابی (آلفا برابر با ۲) هستند. با تقسیم ارزش‌های صفرتا یک سناریوهای مکان‌یابی به ۵ قسمت مساوی، کلاس‌های تناسب اراضی تهیه شدند (شکل ۲۳). جدول (۱۲) کلاس‌ها و درصد هرکدام از آن‌ها را برای هر سناریوی مکان‌یابی نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که در حالتی که از سناریوی AND با آلفای بی‌نهایت استفاده می‌شود، بیش‌ترین مساحت به کلاس خیلی ضعیف و در حالتی که از سناریوی OR با آلفای صفر استفاده می‌شود، بیش‌ترین مساحت مربوط به کلاس خیلی خوب است. می‌توان نتیجه گرفت که هر چه کمیت سنج زبانی به سمت استفاده از آلفای صفر میل می‌کند، درصد مساحت‌های مناسب برای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی بیش‌تر می‌شود به‌عبارت‌دیگر تعیین مکان این اراضی سهل‌گیرانه تر انجام می‌شود.



شکل ۲۳. نمودار درصد مساحت هر کلاس تناسب اراضی در هر سناریوی مکان‌یابی

جدول ۱۲. درصد مساحت هر کلاس تناسب اراضی در هر سناریوی مکان‌یابی با کمیت سنج‌های مختلف

	Very Good	Good	Intermediate	Week	Very Week
AND	۰	۰	۰	۰/۱۴	۹۹/۸۶
Allmost all	۰	۰	۱۴/۳۸	۶۳/۲۷	۲۲/۳۵
Most	۰	۳۹/۲۲	۴۸/۴۹	۱۲/۲۷	۰/۲
WLC	۱۱/۰۷	۶۷/۴۱	۲۱/۳۱	۰/۲۱	۰
A few	۴۲/۵۸	۵۵/۸۶	۱/۵۶	۰	۰
At least a few	۹۵/۷	۴/۳	۰	۰	۰
OR	۹۸/۸۵	۱/۱۵	۰	۰	۰

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر یکی از کاربردهای مهم سامانه‌های پشتیبان تصمیم با استفاده از مدل Fuzzy AHP-OWA در محیط GIS جهت تولید سناریوهای مختلف مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در شهرستان اندیمشک، استان خوزستان، ایران است. بدین منظور ۱۲ معیار که ازنظر کارشناسان خبره و پژوهش‌های پیشین بااهمیت بودند انتخاب شدند. فواصل اقلیدسی نسبت به لایه‌های برداری محاسبه شد. برای فازی‌سازی از روش کمینه و بیشینه استفاده گردید. وزن‌های کارشناسی از طریق مدل AHP و وزن‌های رتبه‌ای مدل OWA از طریق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

کمیت سنج‌های زبانی محاسبه شد. درنهایت با تلفیق لایه‌ها و وزن‌های به‌دست‌آمده، هفت سناریو مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در منطقه موردمطالعه با درجات ریسک‌پذیری متنوع ایجاد گردید. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش ریسک‌پذیری، مکان‌های مستعد کم‌تری نیز برای ساخت نیروگاه خورشیدی پیشنهاد شده و کمینه، بیشینه و میانگین مقادیر پیکسل‌های هر سناریوی مکان‌یابی نیز به‌تدریج کاهش می‌یابد؛ بنابراین در این پژوهش استراتژی‌های متنوعی برای تصمیم گیران عرضه می‌شود. باوجودی که شهرستان اندیمشک دارای مناطق بالقوه و مناسب برای استفاده از انرژی خورشیدی است اما در این زمینه هیچ‌گونه سرمایه‌گذاری نمی‌شود. یکی از علت‌های مهم این امر این است که استان خوزستان و منطقه موردمطالعه دارای ذخایر عظیمی از سوخت‌های فسیلی است که نیاز کشور ایران و سایر کشورهای جهان را تأمین می‌کند و مسئولان محلی و ملّی سعی در استفاده هر چه بیشتر این انرژی‌دارند که خود می‌تواند با مفهوم توسعه پایدار در تضاد باشد. در این پژوهش پیشنهادهایی مطرح است که در ادامه ذکر خواهند شد. در این پژوهش جهت تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی منطقه موردمطالعه تنها از یک تصویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ در زمان اوج پوشش گیاهی استفاده‌شده است که بهتر آن است از طبقه‌بندی توسط سری زمانی تصاویر سنتینل-۱ و ۲ در بستر Google Earth Engine استفاده شود. با توجه به اینکه بارندگی‌ها به‌ویژه در فصل زمستان، پیشنهاد می‌شود که میانگین بارندگی در فصل‌های پاییز، زمستان و بهار را در منطقه موردمطالعه محاسبه نموده و آن را به‌عنوان یکی از معیارهای مهم در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی دخالت داد. در این پژوهش از روش فازی‌سازی خطی برای معیارها استفاده‌شده است؛ اما می‌توان با توجه به ماهیت معیار و هدف پژوهش از سایر روش‌ها و توابع فازی مانند S، مثلث، ذوزنقه و ... استفاده کرد. با توجه به اینکه در منطقه موردمطالعه به‌ویژه در نواحی کوهستانی که دارای روستاهای پراکنده است، مناطقی با شیب‌های زیاد وجود دارد که می‌تواند مستعد ساخت نیروگاه خورشیدی باشد، لذا می‌توان مقدار شیب (برحسب درجه یا درصد) را در این مناطق بیش‌تر در نظر گرفت و شیب‌های زیاد را از محدودیت‌های مکان‌یابی حذف نمود.

سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد و دفاع شده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول استخراج‌شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از کارکنان گروه سنجش‌ازدور دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول و هیئت‌داوران پایان‌نامه که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

منابع

[1] Al Garni, H. Z. and A. Awasthi (2017). "Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia." Applied Energy **206**: 1225-1240.
[2] Aydin, N. Y., et al. (2013). "GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey." Energy Conversion and Management **70**: 90-106.
[3] Bao, J., et al. (2017). "Comprehensive Evaluation on Employee Satisfaction of Mine Occupational Health and Safety Management System Based on Improved AHP and 2-Tuple Linguistic Information." Sustainability **9**(1): 133.
[4] Chamchali, M. M. and A. Ghazifard (2021). "A comparison of fuzzy logic and TOPSIS methods for landfill site selection according to field visits, engineering geology approach and geotechnical experiments (case study: Rudbar County, Iran)." Waste Management & Research **39**(2): 325-350.
[5] Chandio, I., et al. (2012). "GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: A review." Arabian Journal of Geosciences **6**.
[6] Charabi, Y. and A. Gastli (2011). "PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation." Renewable Energy **36**(9): 2554-2561.
[7] Chen, Y., et al. (2011). "An OWA-TOPSIS method for multiple criteria decision analysis." Expert Systems with Applications **38**(5): 5205-5211.
[8] Eastman, J. R. (1997). Idrisi for Windows, Version 2.0: Tutorial Exercises, Graduate School of Geography-Clark University, Worcester.
[9] Firozjaei, M. K., et al. (2019). "An integrated GIS-based Ordered Weighted Averaging analysis for solar energy evaluation in Iran: Current conditions and future planning." Renewable Energy **136**: 1130-1146.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[10] Ghajari, Y. E., et al. (2017). "Spatial Modelling of Urban Physical Vulnerability to Explosion Hazards Using GIS and Fuzzy MCDA." Sustainability **9**(7): 1274.
[11] Ghasemkhani, N., et al. (2020). "Urban Development Modeling Using Integrated Fuzzy Systems, Ordered Weighted Averaging (OWA), and Geospatial Techniques." Sustainability **12**(3): 809.
[12] He, W., et al. (2021). "Induced OWA Operator for Group Decision Making Dealing with Extended Comparative Linguistic Expressions with Symbolic Translation." Mathematics **9**(1): 20.
[13] Kiavarz, M. and M. Jelokhani-Niaraki (2017). "Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A case study in Japan's Akita and Iwate provinces." Geothermics **70**: 295-304.
[14] Mahmoudi, M., et al. (2021). "Site selection for artificial recharge with treated wastewater with the integration of multi-criteria evaluation and ELECTRE III." Environmental Science and Pollution Research **28**(34): 46748-46763.
[15] Malczewski, et al. (2015). Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science, Springer, Berlin, Heidelberg.
[16] Malczewski, J. (2006). "Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation **8**(4): 270-277.
[17] Mather, P. and B. Tso (2016). Classification Methods for Remotely Sensed Data, CRC Press.
[18] Mohamadzadeh, P., et al. (2020). "A GIS-Based Approach for Spatially-Explicit Sustainable Development Assessments in East Azerbaijan Province, Iran." Sustainability **12**(24): 10413.
[19] Mokarram, M., et al. (2021). "Using GIS-based order weight average (OWA) methods to predict suitable locations for the artificial recharge of groundwater." Environmental Earth Sciences **80**(12): 428.
[20] Mokarram, M., et al. (2021). "Risk-based multi-criteria decision analysis of gas power plants placement in semi-arid regions." Energy Reports **7**: 3362-3372.
[21] Mortazavi Chamchali, M., et al. (2021). "Utilizing GIS linked to AHP for landfill site selection in Rudbar County of Iran." GeoJournal **86**(1): 163-183.
[22] Nasehi, et al. (2017). "Locate solar power plant with fuzzy logic and AHP (Case study Hormozgan Province)." journal of New Technologies in Energy Systems Quchan University of Advanced Technology **3**(1): 1-9.
[23] Nohegar, A., et al. (2016). "LOCATING SUSTAINABLE ENERGY POWER PLANT THROUGH TOPSIS DECISION MAKING PROCEDURE." ENVIRONMENTAL BASED TERRITORIAL PLANNING (AMAYESH) **9**(33): 25-44.
[24] Noorollahi, E., et al. (2016). "Land Suitability Analysis for Solar Farms Exploitation Using GIS and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)—A Case Study of Iran." Energies **9**(8): 643.
[25] Rinner, C. and J. Malczewski (2002). "Web-Enabled Spatial Decision Analysis Using Ordered Weighted Averaging (OWA)." Geography Publications and Research **4**.
[26] Ruiz-Morales, B., et al. (2021). "Sustainable Development Goals Analysis with Ordered Weighted Average Operators." Sustainability **13**(9): 5240.
[27] Saaty, T., L (1980). The Analytic Hierarchy Process. New York, McGraw-Hill International.
[28] Saaty, T., L (1990). "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process." European Journal of Operational Research **4**: 9-26.
[29] Sadeqi, Z., et al. (2013). "Prioritize the Factors Affecting the Location of Renewable Energy Plants (Solar and Wind Energy) in Kerman Province Using GIS and Multi-Criteria Decision-Making Techniques." Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research **0**(2): 93-110.
[30] Sedghiyan, D., et al. (2021). "Prioritization of renewable energy resources in five climate zones in Iran using AHP, hybrid AHP-TOPSIS and AHP-SAW methods." Sustainable Energy Technologies and Assessments **44**: 101045.
[31] Shao, M., et al. (2020). "A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection." Renewable Energy **157**: 377-403.
[32] Shorabeh, S. N., et al. (2019). "A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: A case study in Iran." Renewable Energy **143**: 958-973.
[33] Sk Ajim, A., et al. (2021). "Sanitary landfill site selection by integrating AHP and FTOPSIS with GIS: a case study of Memari Municipality, India." Environmental Science and Pollution Research **28**(6): 7528-7550.
[34] Sohail, S. S., et al. (2015). "OWA based Book Recommendation Technique." Procedia Computer Science **62**: 126-133.
[35] Taki, M. and M. Mardani Najafabadi (2019). "Technical and economic evaluation of solar power plant (photovoltaic) grid-connected (Case study: 1 MW power plant in Ahvaz city)." Journal of Renewable and New Energy **6**(1): 91-102.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[36] Vafaei, N., et al. (2016). Normalization Techniques for Multi-Criteria Decision Making: Analytical Hierarchy Process Case Study, Cham, Springer International Publishing.
[37] Van Hoesen, J. and S. Letendre (2010). "Evaluating potential renewable energy resources in Poultney, Vermont: A GIS-based approach to supporting rural community energy planning." Renewable Energy **35**(9): 2114-2122.
[38] Yager, R. R. (1988). "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics **18**(1): 183-190.
[39] Yager, R. R. (1996). "Quantifier guided aggregation using OWA operators." International Journal of Intelligent Systems **11**.
[40] Zarghami, M. and F. Szidarovszky (2009). "Revising the OWA operator for multi criteria decision making problems under uncertainty." European Journal of Operational Research **198**(1): 259-265.
[41] Zhang, P., et al. (2021). "An improved OWA-Fuzzy AHP decision model for multi-attribute decision making problem." Journal of Intelligent & Fuzzy Systems **40**: 9655-9668.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]