

تهیه نقشه پتانسیل نیروگاه‌های خورشیدی مبتنی بر مفهوم ریسک

مطالعه موردی: استان خراسان رضوی

سامان نادى زاده شورابه^۱

نجمه نيسانى سامانى^۲

يعقوب ابدالى^۳

تاريخ دريافت مقاله: ۹۷/۰۹/۱۰

تاريخ پذيرش مقاله: ۹۸/۰۶/۲۶

چکیده

انرژی خورشیدی از پاک‌ترین، قابل دسترس‌ترین و ارزان‌ترین انرژی‌های جهان است که استفاده از آن اثرات منفی کم‌تری بر محیط زیست می‌گذارد. تعیین مکان مناسب برای احداث و استفاده از تکنولوژی‌های خورشیدی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین هدف از این تحقیق، انتخاب مناطق بهینه احداث نیروگاه‌های خورشیدی با لحاظ کردن مفهوم ریسک در تصمیم‌گیری با استفاده از مدل OWA برای استان خراسان رضوی می‌باشد. مدل OWA قادر است تا میزان ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی گزینه‌های تصمیم‌گیران را در انتخاب گزینه نهایی لحاظ کند. در پژوهش حاضر، برای وزن‌دهی به معیارها از مدل وزن‌دهی AHP، جهت استخراج مکان‌های مناسب با درجات ریسک مختلف از مدل OWA و برای آنالیز حساسیت وزن معیارها از روش OAT استفاده شده است. نقشه‌های حاصل از مدل OWA در پنج کلاس خیلی نامناسب، نامناسب، متوسط، مناسب و خیلی مناسب طبقه‌بندی گردیدند به طوری که در $ORness=0$ و $ORness=1$ مساحت طبقه خیلی مناسب (۱-۸/۰) برای استان خراسان رضوی به ترتیب برابر با ۶ و ۸۲ درصد از مساحت کل منطقه می‌باشد. در استان خراسان رضوی، شهرستان‌های فردوس، گناباد و بردسکن دارای بیشترین مساحت از طبقه خیلی مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت معیارها نشان داد که تغییر وزن معیارهای شیب و گسل به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تأثیر بر مساحت طبقه خیلی مناسب جهت احداث نیروگاه‌های خورشیدی هستند.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه‌های خورشیدی، GIS-MCDA، ریسک، OWA، خراسان رضوی

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران Saman.nadizadeh@ut.ac.ir

۲- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) nneysani@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران Yaghob.Abdali@ut.ac.ir

۱- مقدمه

با وجود پروتکل کیوتو با محوریت تغییرات اقلیمی که در چارچوب کنوانسیون سازمان ملل متحد در دسامبر ۱۹۹۷ به تصویب رسید، مصرف سوخت‌های فسیلی افزایش یافته است (Protocol, 1997; Aydin et al., 2010; United Nations, 2015). با توجه به ذخایر محدود سوخت فسیلی و تأثیر منفی این منابع بر محیط زیست، دیگر نمی‌توان به این منابع متکی بود.

پتانسیل زیادی در بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد زیرا این منابع طبیعی، ارزان هستند و برای محیط زیست مضر نمی‌باشند. از جمله این انرژی‌ها، انرژی خورشیدی، باد، زمین گرمایی می‌باشد. از این میان فناوری فتوولتائیک خورشیدی (PV) یکی از سریع‌ترین فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در حال رشد در سراسر جهان است (Al Garni & Awasthi, 2017). انرژی خورشیدی یک فناوری مناسب و مفید به خصوص در مناطق خشک که پتانسیل انرژی خورشیدی بالایی دارند، می‌باشد (Moriarty & Honnery, 2012). نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک به دلیل اینکه پانل‌های خورشیدی مقرون به صرفه‌تر می‌باشند، استفاده بیشتری در میان انرژی‌های تجدیدپذیر دارند (Candelise et al., 2013; Hosenuzzaman et al., 2015).

اولین قدم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران در سال ۱۹۹۴ بود (Noorollahi et al., 2016). از آن زمان به بعد توجه به این نوع از انرژی در جامعه و دولت افزایش یافت. ایران با تولید سالانه ۸۵۰ میلیون تن گازهای گلخانه‌ای یکی از کشورهای بزرگ جهان در زمینه تولید گازهای گلخانه‌ای است و به همین دلیل انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش گازهای گلخانه‌ای داشته باشد، که باید در دستور کار برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران قرار گیرد (Noorollahi et al., 2016).

تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDA^۱) و GIS در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر به طور قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Noorollahi et al., 2007; Xu et al., 2015; Lenin & Kumar, 2015; Höfer et al., 2016; Liu et al., 2017).

ادغام GIS و MCDA به تصمیم‌گیر کمک می‌کند که توابع آنالیز تصمیم نظیر رتبه‌بندی گزینه‌ها را برای انتخاب پهنه مناسب انجام دهد. به طوری که GIS به عنوان یک ابزار قدرتمند و یکپارچه برای ذخیره سازی، دستکاری و تجزیه و تحلیل معیارهای انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه برای انتخاب مکان مناسب معیارهای زیادی می‌تواند تأثیر داشته باشند، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند انتخاب مکان مناسب را با در نظر گرفتن معیارهای کلیدی در فرآیند تصمیم‌گیری تسهیل کند (Kiavarz & Jelokhani-Niaraki, 2017; Yalcin & Gul, 2017; Aly et al., 2017).

از جمله تحقیقات صورت گرفته در جهان و ایران می‌توان به این موارد اشاره کرد: به عنوان نمونه در جهان، Tahri و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و MCDM (معیارهای توپوگرافی، اقلیمی، محیطی و اقتصادی) برای انتخاب مزارع خورشیدی در جنوب مراکش انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مناسب‌ترین مکان‌ها در زمین‌های مسطح هستند و جهت آنها به سمت جنوب می‌باشند. Noorollahi و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی با استفاده از GIS و FAHP^۲ به بررسی و ارزیابی مکان مناسب برای ایجاد مزارع خورشیدی پرداختند و نتیجه گرفتند که استان‌های فارس، یزد، اصفهان، سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی به عنوان مکان‌های خیلی مناسب برای استقرار صفحات خورشیدی می‌باشند. Al Garni و Awasthi (۲۰۱۷) در پژوهشی با به بکارگیری GIS-AHP به بررسی انتخاب مکان مناسب برای ایجاد نیروگاه‌های خورشیدی در عربستان پرداختند و نتیجه گرفتند که دلیل اینکه این کشور در منطقه خشک قرار دارد بیش از ۸۰ درصد منطقه برای ایجاد پانل‌های خورشیدی مناسب می‌باشد. جدول (۱) کاربرد روش‌های MCDA را در مطالعات مختلف برای انتخاب سایت منابع انرژی‌های تجدیدپذیر خلاصه می‌کند.

جدول ۱: روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

در مطالعات مختلف

روش‌های MCDA	منابع انرژی تجدیدپذیر	منطقه مورد مطالعه	رفرنس
۱	AHP	انرژی خورشیدی	جزیره موریس Doorga et al., 2019
۲	WLC	انرژی خورشیدی	لبنان Iaaly et al., 2019
۳	AHP	فتوولتائیک (PV) و انرژی خورشیدی	غرب آفریقا Yushchenko et al., 2018
۴	FuzzyLogic	انرژی خورشیدی	ایران Yousefi et al., 2018
۵	FAHP	فتوولتائیک (PV)	صربستان Doljak & Stanojeviæ, 2017
۶	AHP-Fuzzy TOPSIS	فتوولتائیک (PV)	هندوستان Sindhu et al., 2017
۷	Fuzzy ANP and VIKOR	فتوولتائیک (PV)	تایوان Lee et al., 2017
۸	ELECTRE-II	فتوولتائیک (PV)	تانزانیا Aly et al., 2017
۹	FAHP	فتوولتائیک (PV)	کره جنوبی Suh & Brownson, 2016
۱۰	ELECTRE	فتوولتائیک (PV) و انرژی خورشیدی	جنوب شرقی اسپانیا Sánchez-Lozano et al., 2014
۱۱	AHP	فتوولتائیک (PV) و انرژی خورشیدی	مصر Effat, 2013
۱۲	AHP-TOPSIS	فتوولتائیک (PV) و انرژی خورشیدی	کنیا، ترکیه Uyan, 2013
۱۳	AHP-Fuzzy	فتوولتائیک (PV) و انرژی خورشیدی	عمان Charabi&Gastli, 2011
۱۴	WLC	انرژی خورشیدی و بادی	کلرادو، آمریکا Janke, 2010

در ایران نیز موقری و طاوسی (۱۳۹۲) در پژوهشی با عنوان امکان سنجی و پهنه‌بندی مکان‌های مستعد استقرار پانل‌های خورشیدی با تکیه بر فراسنجهای اقلیمی در استان سیستان و بلوچستان، بهترین مکان برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی شهرستان سراوان و سیب سوران و پس از آن شهرهای خاش، ایرانشهر و بخش‌هایی از زهک و نیک‌شهر را معرفی نمودند. احمدی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با عنوان مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی در استان ایلام نتیجه گرفتند که سیستم اطلاعات جغرافیایی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مدل انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی داده‌های مکانی مناسب نیروگاه خورشیدی است. تقوایی و صبوچی (۱۳۹۶) در پژوهشی به انتخاب مکان مناسب برای ایجاد نیروگاه‌های خورشیدی پرداختند. نتیجه گرفتند که حدود ۱۷ درصد از مساحت استان در وضعیت بسیار مطلوب از لحاظ استقرار پانل‌های خورشیدی قرار دارد و بهترین مکان‌ها به ترتیب در شهرستان‌های ناین، میمه، گلپایگان و شهرضا قرار دارند.

گرچی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی-فازی به مکانیابی مناطق مستعد برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی در استان فارس پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که نواحی واقع در شمال و شمال شرقی استان دارای بیشترین استعداد و مناطق جنوبی دارای کمترین استعداد برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند.

در این پژوهش با بکارگیری مجموعه معیارهای مکانی و مدل OWA^۱ مناطق بهینه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی در ۵ سطح خیلی خوشبینانه، خوشبینانه، متوسط، بدبینانه و خیلی بدبینانه تعیین شده است. از خصوصیات بارز این پژوهش نسبت به دیگر مقالات در این زمینه لحاظ کردن مفهوم ریسک در تصمیم‌گیری برای تعیین مناطق بهینه احداث نیروگاه‌های خورشیدی با به کارگیری مدل OWA می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

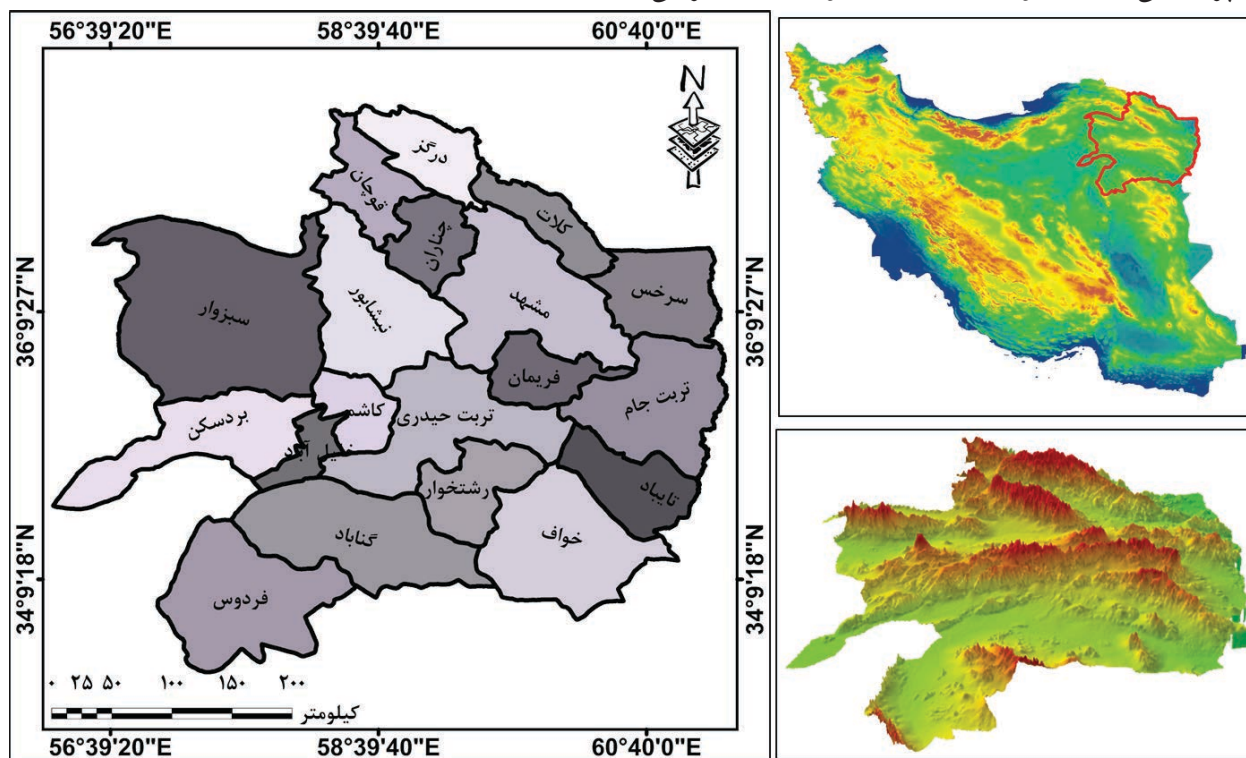
۲-۱- محدوده مورد مطالعه

از مناطق مجاور استان گلستان میزان بارندگی گاه به بیش از ۷۰۰ میلی‌متر در سال می‌رسد ولی در مناطق جنوبی، مرکزی و شرقی که بیش از ۸۵ درصد مساحت استان را شامل می‌شوند میزان بارندگی تقریباً معادل ۱۵۰ میلی‌متر است.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های اولیه مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل مدل ارتفاعی رقومی حاصل شده از داده‌های ماهواره‌ای Aster برای استخراج تابش ورودی سطح و شیب منطقه، استخراج میانگین دمای سطح زمین برای سال ۲۰۱۷ با استفاده از MOD11A1 سنجنده Terra، تهیه میانگین نقشه پوشش گیاهی برای سال ۲۰۱۷ با استفاده از MOD13A2 سنجنده Terra، نقشه پتانسیل گرد و غبار برای سال ۲۰۱۷ با استفاده از MOD04 سنجنده Terra، نقشه گسل ۱/۲۵۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی، آمار و اطلاعات بارش تهیه شده توسط سازمان هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری (www.chaharmahalmet.ir)، آمار و اطلاعات روزهای

استان خراسان رضوی از نظر موقعیت جغرافیایی در ۵۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (نگاره ۱). از شمال و شمال شرق به جمهوری ترکمنستان، از شرق به افغانستان، از غرب به استان‌های گلستان، سمنان و اصفهان و از جنوب به استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و یزد محدود می‌باشد. گستردگی استان و عواملی مانند وجود رشته‌کوه‌های مرتفع و مناطق کویری، دوری از دریا و وزش بادهای مختلف موجب گوناگونی آب و هوا در مناطق آن گردیده است. به طوری که شمال استان دارای آب و هوای معتدل و سرد کوهستانی، منطقه مرکزی دارای آب و هوای نیمه صحرایی ملایم، جنوب استان دارای آب و هوای خشک و نیمه صحرایی می‌باشد. در بیش از ۹۰ درصد استان توزیع مکانی و زمانی بارش‌ها و پراکندگی آن‌ها یکنواخت نیست به طوری که در برخی



نگاره ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر) تهیه نقشه پتانسیل نیروگاه‌های خورشیدی مبتنی بر ... / ۱۳۳

معیارهای مختلف کمی و کیفی در مسأله دارد (Saaty, 1986). در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بیشترین وزن به لایه‌ای تعلق می‌گیرد که بیشترین تأثیر را در تعیین هدف دارد. به عبارت دیگر معیار وزن‌دهی به هر واحد اطلاعاتی نیز براساس بیشترین نقشی است که آن عامل در داخل لایه ایفاء می‌کند (Malczewski, 1999). با توجه به تحقیقاتی که توسط Saaty و Vargas (۱۹۹۱) انجام گرفت یک دامنه برای مقایسه معیارها پیشنهاد شد که شامل مقادیر عددی ۱ تا ۹ می‌شود. هر کدام از این اعداد نشان دهنده درجه اهمیت هستند به طوری که مقدار ۱ نشان‌دهنده اهمیت برابر و مقدار ۹ نشان‌دهنده اهمیت فوق‌العاده قوی یک شاخص نسبت به شاخص دیگر است (جدول ۲).

جدول ۲: مقادیر اهمیت برای مقایسات زوجی (Saaty, 1980)

مقدار عددی	توضیح
۱	اهمیت برابر
۳	اهمیت متوسط
۵	اهمیت قوی
۷	اهمیت خیلی قوی
۹	اهمیت فوق‌العاده قوی
۲-۴-۶-۸	اهمیت بین فواصل

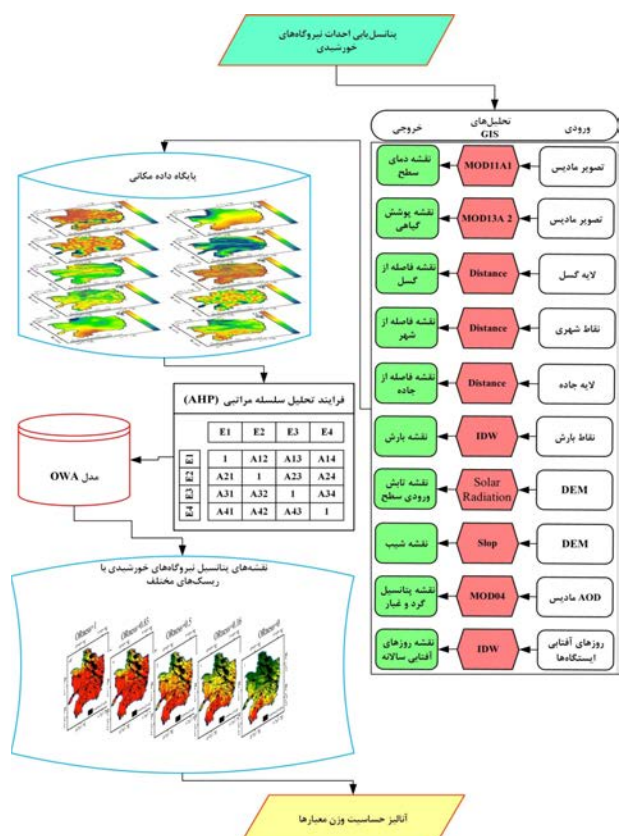
۲-۳-۲- میانگین‌گیری وزنی مرتب شده (OWA)

در یک مسأله تصمیم‌گیری، افراد ریسک‌پذیر بر روی خواص خوب یک گزینه و افراد ریسک‌گریز بر روی خواص بد یک گزینه تأکید می‌کنند و آن را ملاک انتخاب خود قرار می‌دهند. روش OWA قادر است تا میزان ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی افراد را محاسبه و آنرا در انتخاب گزینه نهایی وارد نماید (Jiang & Eastman, 2000). روش OWA برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ توسط Yager (۱۹۸۸) برای توصیف یک رده از روش‌های MCDA ارائه شد. توانایی روش OWA در این است که منجر به درجه‌بندی پیوسته سناریوهای بین عملگر اشتراک (ریسک‌ناپذیر) و عملگر اجتماع (ریسک‌پذیری) می‌شود (Gorsevski et al., 2012).

آفتابی توسط ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان رضوی، شیب فایل شبکه‌های راه‌ها تهیه شده توسط سازمان راه و شهرسازی، شیب فایل اقلیمی کشور تهیه شده توسط سازمان آب و هواشناسی، شیب فایل مناطق شهری تهیه شده توسط سازمان نقشه برداری می‌باشد.

۲-۳-۲- روش تحقیق

مراحل کلی پژوهش به صورت نگاره (۲) نشان داده شده است.



نگاره ۲: فلوچارت مراحل پژوهش

۲-۳-۱- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

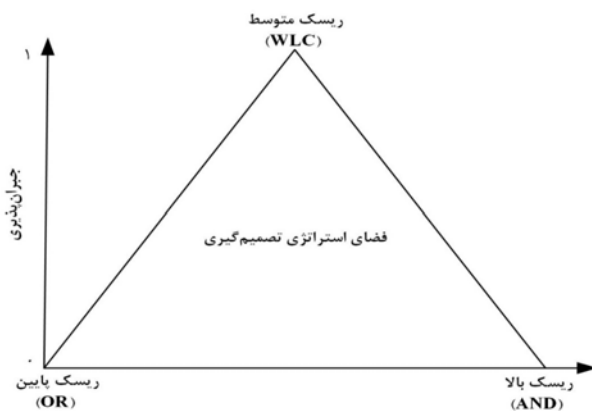
فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از جامع‌ترین روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره است (Saaty, 1980). زیرا امکان فرموله کردن مسائل پیچیده طبیعی را به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن

$$v_j = \left(\frac{\sum_{i=1}^j u_l}{\sum_{i=1}^n u_l} \right)^{\alpha} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{j-1} u_l}{\sum_{i=1}^n u_l} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

که در آن u_j وزن معیار z_j براساس مقدار مشخص شده معیار z_j می باشد. وزن معیار w_j به معیار z_j در همه ی موقعیت ها برای نشان دادن اهمیت نسبی معیار طبق ORness خروجی (درجه ریسک پذیری) تصمیم گیرنده ارجاع داده می شود. این وزن بازتاب دهنده مقادیر و علائق یک تصمیم است. درجه ORness یا ریسک پذیری موقعیت عملگر OWA را در بین AND (مینیم) و OR (ماکزیم) نشان می دهد. این درجه بیانگر میزان تأکید تصمیم گیر بر روی مقادیر بهتر و یا بدتر یک مجموعه از شاخص ها و یا همان ریسک پذیری یا ریسک گریزی تصمیم گیر است. درجه ORness به صورت رابطه ۳ محاسبه می شود (Rinner & Malczewski, 2002).

$$ORness = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n-j}{n-1} \right) \lambda_k, \quad 0 \leq ORness \leq 1 \quad (3)$$

هر چقدر مقدار ORness بیشتر باشد میزان ریسک پذیری تصمیم گیر بیشتر خواهد بود و هر چقدر مقدار ORness کمتر باشد میزان ریسک گریزی تصمیم گیر بیشتر خواهد بود (نگاره ۳). مزیت روش OWA این است که محقق می تواند به واسطه دوباره مرتب سازی و تغییر پارامترهای معیار، دامنه وسیعی از نقشه ها و راه حل های مختلف و سناریوهای پیش بینی را تولید کند.



نگاره ۳: فضای استراتژی تصمیم گیری در مدل OWA

(Malczewski, 2006)

تصمیم گیری های مکانی باید منجر به انتخاب یک (یا چند) گزینه مکانی بشوند. هر کدام از این گزینه ها ($i=1,2,\dots,m$)، با یک دسته مقادیر استانداردسازی شده (a_{ij}) توصیف می شوند ($a_{ij} \in [0.1]$ for $j=1,2,\dots,n$). مسئله ارزیابی چندمعیاره همچنین شامل مجموعه ای اولویت به عنوان وزن های معیار می شود: $w_j \in [0.1]$ برای $j=1,2,\dots,n$. با داشتن لایه های نقشه و وزن های معیار، عملگر ترکیبی OWA به محل سلول i مجموعه ای از وزن های ترتیبی $v= v_1, v_2, \dots, v_n$ اختصاص می دهد به طوری که برای هر $j=1,2,\dots,n$ ، $\sum_{j=1}^n v_j = 1$ و $v_j \in [0.1]$ عملگر ترکیبی OWA به صورت رابطه ۱ تعریف می شود (Malczewski, 2006):

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

که در آن $z_{i1} \geq z_{i2} \geq \dots \geq z_{in}$ ، با مرتب کردن مقادیر توصیفی $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ به دست می آید و u_j همان وزن معیار است که براساس ترتیب z_{ij} ها مرتب سازی شده است. همانطور که ملاحظه می شود در این روش از دو نوع وزن استفاده می شود: وزن های معیار و وزن های ترتیبی. وزن های معیار نشان دهنده اهمیت نسبی هر کدام از معیارهای ارزیابی هستند (لایه ها و نقشه ها) اما وزن های ترتیبی براساس موقعیت مکانی سلول های لایه ها و نقشه ها اختصاص دهی می شوند. بنابراین در یک نقشه همه سلول ها دارای یک وزن معیار مشترک هستند اما وزن ترتیبی آنها متفاوت خواهد بود (Gorsevski et al., 2012).

عملگر تجمیعی OWA بر مجموعه وزن ها تأکید دارد. به خاطر اینکه اکثر تصمیم سازی های بر مبنای GIS به مجموعه ای از وزن ها برای مرتبط سازی با معیارها نیاز دارد اما مسئله نادیده گرفته می شد، یا اگر یک رویکرد با عنوان اصلاح وزن معیار جهت ایجاد وزن نسبی برای گنجاندن وزن معیار به عملگر OWA به صورت رابطه ۲ پیشنهاد داد

(Jelokhani-Niaraki & Malczewski, 2015a, 2015b, 2015c)

$$AHP-OWAi = \sum_{q=1}^p vq \cdot ziq \quad \text{for all } i = 1, 2, \dots, m$$

And

$$vq = \left(\sum_{q=1}^p uq \right)^{\alpha_q} - \left(\sum_{q=1}^{p-1} uq \right)^{\alpha_q} \quad (5)$$

که در آن، Ziq با مرتب‌سازی دوباره مقادیر گزینه‌ها در سطح اهداف Siq به دست می‌آید و uq نیز وزن مرتب شده هدف q ام است. α_q نیز مشخصه متصل به کمیت سنج مفهومی مربوط به هدف کلی مسئله تصمیم‌گیری مکانی است (Borouhaki & Malczewski, 2008; Kiavarz & Jelokhani-Niaraki, 2017).

۲-۳-۴- محاسبه تابش ورودی سطح

نقشه تابش نشان دهنده پتانسیل انرژی خورشیدی یک منطقه خاص است و اطلاعات مفیدی را برای انتخاب مکان مناسب برای اجرای سیستم‌های خورشیدی فراهم می‌کند. یک نقشه تابش خورشیدی را می‌توان با استفاده از آمار ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی بدست آورد. ولی به دلیل عدم وجود این ایستگاه برای بسیاری از مناطق جهان، تهیه نقشه تابش ورودی سطح برای بسیاری مناطق با استفاده از این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی تابش ورودی سطح برای مناطق مختلف استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بوده که در چند سال گذشته به طور قابل ملاحظه‌ای استفاده شده است (Gastli & Charabi, 2010; Al Garni & Awasthi, 2017; Sadeghi & Karimi, 2017). توپوگرافی به عنوان یک عامل کلیدی تغییرات مکانی تابش را تعیین می‌کند. تغییر در ارتفاع، شیب، جهت و سایه‌ها که توسط ویژگی‌های توپوگرافی ایجاد می‌شود بر میزان تابش دریافت شده در مکان‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. این متغیر مکانی در زمان روز و سال تغییر می‌کند. ابزارهای تجزیه و تحلیل تابش ورودی سطح در ArcGIS Spatial Analyst امکان تهیه نقشه و تحلیل اثرات خورشید را برای یک منطقه جغرافیایی در دوره‌های زمانی مشخص فراهم می‌کند؛ که اثرات اتمسفر، عرض جغرافیایی و ارتفاع مکان، شیب و جهت، زاویه خورشید روزانه و فصلی و اثرات سایه‌ها که توسط توپوگرافی اطراف ایجاد می‌شود را محاسبه می‌کند (نگاره ۴).

۲-۳-۳- روش OWA - AHP

در این مقاله دو روش برای ارزیابی چندمعیاره در GIS معرفی شد: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و میانگین‌گیری وزنی مرتب شده. این دو روش در یک سطح اجرا نمی‌شوند. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یک ابزار کلی برای ایجاد مدل سلسله مراتبی مسایل تصمیم‌گیری مکانی، پردازش کلی فرآیند و ارزیابی هر کدام از فرآیندهاست. فرآیند ارزیابی در تحلیل سلسله مراتبی از یک ترکیب خطی وزن‌دار ساده برای محاسبه مقادیر هر کدام از سلول‌های رستری استفاده می‌کند. عملگر OWA نیز یک چارچوب کلی برای انجام پردازش‌هایی مانند AHP فراهم می‌آورد (Zabihi et al., 2019). ماهیت و ساختار این دو الگوریتم به گونه‌ای است که از ترکیب آن‌ها می‌توان برای ایجاد یک ابزار تصمیم‌گیری مکانی قدرتمند بهره برد (Yager & Kelman, 1999). برای رسیدن به این چارچوب فرض بر این است که دو مرحله اول AHP یعنی تشکیل ساختار سلسله مراتبی و وزن‌دهی نسبی اهداف با استفاده از مقایسه‌های دوبه‌دو برآورد شده است. از این مرحله به بعد مسئله با کمیت‌سنج‌های هدایت شده OWA پردازش می‌شود. مقادیر کلی مربوط به هر سلول i ام در دو مرحله قابل محاسبه خواهد بود؛ ابتدا مقادیر هر سلول با در نظر گرفتن هر کدام از اهداف با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$siq = \sum_{k=1}^l uk(q) \cdot zik(q) \quad (4)$$

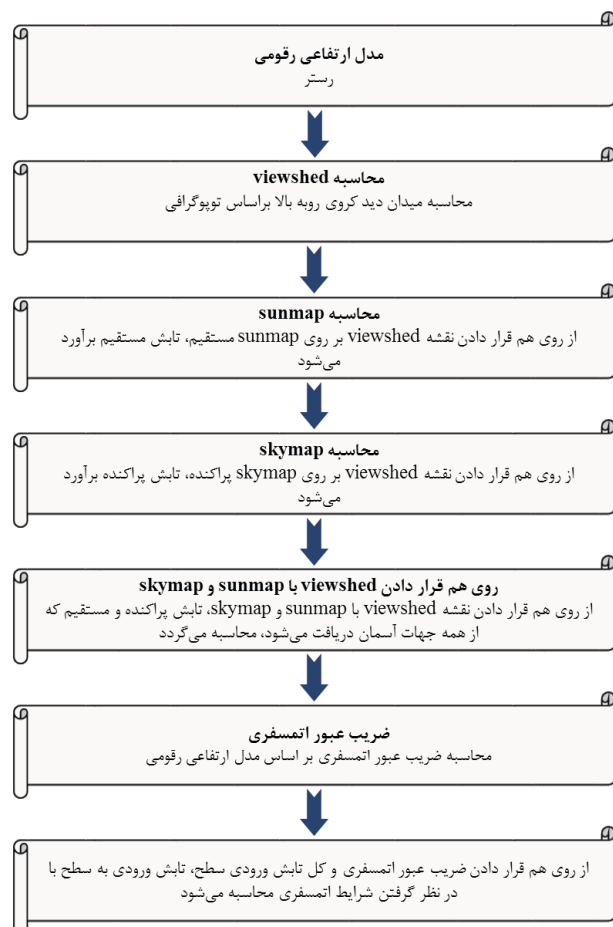
for all $i = 1, 2, \dots, m$ and $q = 1, 2, \dots, p$

$$uk(q) = \left(\sum_{k=1}^l uk(q) \right)^{\alpha_q} - \left(\sum_{k=1}^{l-1} uk(q) \right)^{\alpha_q}$$

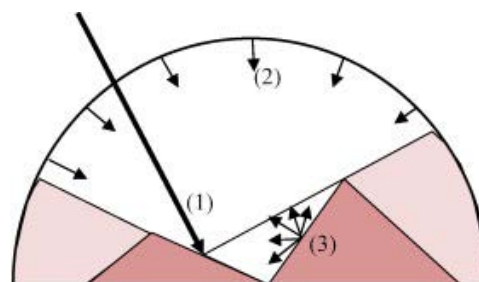
که در آن، $Zik(q)$ با مرتب‌سازی دوباره مقادیر معیارهای مربوط به هدف q ام، $xik(q)$ به دست می‌آید و $uk(q)$ نیز برابر است با وزن ترتیبی معیار k ام برای هدف q ام. α_q نیز مشخصه کمیت‌سنج مفهومی مربوط به هدف q ام است. با داشتن مقادیر هر کدام از سلول‌ها برای هر کدام از اهداف (Siq)، مقدار کلی سلول i ام را می‌توان از رابطه ۵ محاسبه کرد:

$$SR_a = SR \times \tau_{sw} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، SR_a کل تابش ورودی به سطح با در نظر گرفتن شرایط اتمسفری، SR کل تابش ورودی به سطح در شرایط اتمسفری صاف می‌باشند.



نگاره ۵: مراحل محاسبه تابش ورودی سطح با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی در محیط ArcGIS



نگاره ۴: سه منبع انرژی برای یک پیکسل: ۱- تابش مستقیم از خورشید ۲- تابش پراکنده از آسمان ۳- تابش پراکنده و مستقیم که از همسایه‌های اطراف منعکس می‌شود (Von Hoyningen-Huene et al., 1999)

منشاء تابش ورودی سطح خورشید می‌باشد که از فضا عبور می‌کند، با تغییرات توپوگرافی و ویژگی‌های سطح تغییر می‌کند و در سطح زمین به صورت تابش مستقیم، پراکنده و منعکس‌شده از مناطق همسایه ایجاد می‌شود. تابش ورودی سطح کل مجموع تابش مستقیم، پراکنده و منعکس‌شده از مناطق همسایه می‌باشد. ابزار تابش ورودی سطح در ArcGIS تابش منعکس‌شده از مناطق همسایه را محاسبه نمی‌کند (Gastli & Charabi, 2010). بنابراین تابش کل به عنوان مجموع تابش مستقیم و پراکنده محاسبه می‌شود. محاسبه تابش ورودی سطح شامل ۷ مرحله می‌باشد که در نگاره (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است در مرحله هفتم، ضریب عبور اتمسفری محاسبه و بر روی کل تابش ورودی به سطح اعمال شده است. با این عمل کل تابش ورودی به سطح با در نظر گرفتن شرایط اتمسفری محاسبه شده است. ضریب عبور اتمسفری بر اساس رابطه‌ای مبتنی بر ارتفاع به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Allen et al., 2002).

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (۶)$$

که τ_{sw} ضریب عبور اتمسفری و z ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر است. در نهایت کل تابش ورودی به سطح با در نظر گرفتن شرایط اتمسفری با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شده است.

۲-۳-۵- آنالیز حساسیت

یکی از مهمترین فاکتورها در اکثر روش‌های آنالیز حساسیت مربوط به مدلسازی چند معیاره مبتنی بر GIS، بررسی تأثیر تغییر وزن معیارها بر خروجی مدل MCDA می‌باشد (Delgado & Sendra, 2004). آنالیز حساسیت وزن معیارها به صورت عمومی با استفاده از روش یکبار در یک زمان

مربوط به زمان t ام، w_k وزن اولیه معیار k ام، w_{k*} وزن به دست آمده معیار k ام، w_t وزن لحاظ شده در زمان t ام، $v(a_{ik})$ و $v(a_{it})$ به ترتیب مقدار تابع برای k ام و t ام معیار و در این رابطه $k \neq t$ می‌باشد.

۳- نتایج

با توجه به نقشه‌های معیار در نظر گرفته شده، با بهره‌گیری از نظر ۳۰ نفر از متخصصان و کارشناسان در زمینه انرژی خورشیدی، سرمایه‌گذاری و مهندسی اطلاعات مکانی معیارها در سطوح مختلف نسبت به یکدیگر و با توجه به درجه اهمیت‌شان در هر سطح تصمیم‌گیری رتبه‌بندی شده

(OAT) بررسی می‌شود (Store & Kangas, 2001; Feick & Hall, 2004; Chen et al., 2011). در این روش حساسیت خروجی مدل به تغییرات وزن معیار خاص با تغییر وزن معیار بین ۰ تا ۱ و بررسی تأثیر آن بر خروجی مدل تعیین می‌شود. آنالیز حساسیت به روش OAT به وسیله رابطه ۸ محاسبه می‌شود (Chen et al., 2011):

$$V(A_i, w_t) = w_t v(a_{it}) + \sum_{k \neq t} w_{k*} v(a_{ik}) \quad (8)$$

$$w_{k*} = \frac{(1 - w_t) w_k}{\sum_{k \neq t} w_k},$$

در این رابطه، $V(A_i, w_t)$ مقدار کلی گزینه t ام با وزن

جدول ۳: معیارهای مورد استفاده برای پتانسیل‌یابی تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی

وزن	نوع معیار	توضیح معیار	معیارها
۰/۰۹	Minimize	هزینه احداث نیروگاه‌های خورشیدی در شیب‌های مختلف متفاوت است. مناطق دارای شیب کمتری مناسب‌تر می‌باشند زیرا ساخت و ساز در مناطق شیب‌دار هزینه‌های زیادی به همراه دارد. برای استخراج نقشه شیب از مدل ارتفاعی رقومی ماهواره Aster با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شده است (Noorollahi et al., 2016; Tahri et al., 2015; Uyan, 2013; Zoghi et al., 2017; Afshari Pour et al., 2017)	شیب
۰/۰۶	Minimize	نزدیکی نیروگاه‌های خورشیدی به مسیرهای حمل و نقل یک عامل اقتصادی محسوب می‌شود. در واقع، نزدیکی به جاده‌ها هزینه‌های اضافی برای ایجاد زیرساخت‌ها، رفت و آمد کارکنان، پشتیبانی از نیروگاه و همچنین آسیب به محیط زیست را کاهش می‌دهد. در این پژوهش فاصله کمتر از ۵۰۰ متر به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است (Charabi & Gastli, 2011; Sánchez-Lozano et al., 2014; Uyan, 2013; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018)	فاصله از جاده
۰/۰۸	Minimize	مکان‌های احداث نیروگاه‌های خورشیدی نباید به محیط زیست طبیعی (جنگل و مراتع) و محیط انسانی (کشاورزی و باغات) آسیب وارد کند. به همین دلیل در این پژوهش به مکان‌های دارای پوشش گیاهی زیاد کمترین ارزش و به مکان‌های دارای پوشش گیاهی کم بیشترین ارزش داده شد. پوشش گیاهی مناطق مورد مطالعه با استفاده از سنجنده ماهواره مادیس با قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر استخراج گردید (Gorsevski et al., 2013; Tahri et al., 2015; Mekonnen & Gorsevski, 2015; Doljak & Stanojević, 2017; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018)	NDVI
۰/۱۱	Maximize	یکی از مواردی که در تعیین اندازه پانل‌های مورد نیاز مؤثر است، بازده آن می‌باشد. بازده پانل‌ها به دمای آن بستگی دارد و دمای پانل‌ها ناشی از دمای محیط و شدت تابش خورشید می‌باشد. بنابراین در پژوهش حاضر مناطق با دمای بالا مناسب و مناطق با دمای پایین نامناسب در نظر گرفته شده است. دمای سطح منطقه مورد مطالعه با استفاده از سنجنده ماهواره مادیس با قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر استخراج گردید (Noorollahi et al., 2016; Sánchez-Lozano et al., 2014; Carrión et al., 2008; Afshari Pour et al., 2017)	دمای سطح زمین
۰/۲۲	Maximize	نقشه تابش ورودی سطح نشان دهنده پتانسیل انرژی خورشیدی در یک منطقه می‌باشد و اطلاعات مفیدی برای انتخاب محل نیروگاه‌های خورشیدی فراهم می‌کند. در این پژوهش از ماژول Solar Radiation در Arc GIS برای محاسبه تابش ورودی سطح استفاده شده است. ورودی این ماژول مدل ارتفاعی رقومی منطقه می‌باشد. این ماژول برای اینکه تابش ورودی سطح را محاسبه کند ابتدا شیب، سایه و جهت شیب را می‌سازد و در مرحله بعد تابش ورودی را محاسبه می‌کند، در نهایت با محاسبه ضریب عبور اتمسفری بر اساس مدل رقومی ارتفاع و اعمال بر تابش ورودی به سطح مرحله قبل، تابش ورودی به سطح با در نظر گرفتن شرایط اتمسفری محاسبه می‌شود (Charabi & Gastli, 2011; Alamdari et al., 2013; Sánchez-Lozano et al., 2014; Tahri et al., 2015; Aguayo, 2013; ESRI, 2016)	تابش ورودی سطح

۰/۱	Minimize	بارندگی را می‌توان مهمترین عاملی دانست که به طور مستقیم در چرخه هیدرولوژیکی دخالت دارد. بنابراین مناطق با بارش بالا در طول سال از یک طرف حکایت از بالا بودن رطوبت در منطقه دارد که خود مهمترین عامل جذب تابش موج کوتاه است. و از طرف دیگر نشان‌دهنده وجود ذرات معلق بالا در اتمسفر می‌باشد که هم در جذب و هم انعکاس تابش موج کوتاه نقش دارد. بالا بودن این دو عامل نشان دهنده افزایش شمار روزهای ابری در منطقه است (Movaqqari & Tavousi, 2013; Noorollahi et al., 2016; Ahmadi et al., 2016; Zoghi et al., 2017). روش درونیابی IDW به دست آمده است.	بارش
۰/۰۳	Minimize	نیروگاه‌های خورشیدی نباید در نزدیکی گسل‌ها ایجاد شوند. زیرا در صورت بروز لغزش یا رانش زمین می‌تواند خسارت زیادی به بار آورد. به همین دلیل در این پژوهش به مناطق با فاصله بیشتر وزن بیشتری داده شده است. فاصله کمتر از ۵۰۰ متر به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است (Tabatabaei and Amiri, 2015; Noorollahi et al., 2016; Afshari Pour et al., 2017).	فاصله از گسل
۰/۰۷	Minimize	احداث نیروگاه‌های خورشیدی در نزدیکی مناطق مسکونی شهری می‌تواند تأثیرات زیست محیطی منفی بر رشد و جمعیت شهری داشته باشد. بنابراین مزارع خورشیدی در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر مناطق شهری نباید احداث شوند. به همین دلیل در این پژوهش مناطق کمتر از ۵۰۰ متر به عنوان مناطق دارای محدودیت در نظر گرفته شده است (Noorollahi et al., 2016; Al Garni & Awasthi, 2017; Carrión et al., 2008; Uyan, 2013; Afshari Pour et al., 2017).	فاصله از شهر
۰/۱۶	Maximize	روزهای آفتابی مهمترین پارامتر اقلیمی است که نشان‌دهنده میزان انرژی دریافتی مناطق از خورشید است. این پارامتر با عرض جغرافیایی ارتباط مستقیم و با ابرناکی و گرد و غبار رابطه عکس دارد. از طرفی دیگر بالا بودن دمای محیط میزان انرژی دریافتی را افزایش و اتلاف انرژی را کاهش می‌دهد. نقشه روزهای آفتابی سالانه برای منطقه مورد مطالعه با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و با بکارگیری روش درونیابی IDW به دست آمده است (Carrión et al., 2008; Movaqqari & Tavousi, 2013; Sánchez-Lozano et al., 2014; Alamdari et al., 2013; Ahmadi et al., 2016; Sadeghi & Karimi, 2017; Zoghi et al., 2017).	روزهای آفتابی
۰/۰۸	Minimize	ذرات گرد و غبار یا هواویزها از ترکیبات مهم اتمسفری در نزدیک سطح زمین می‌باشند. ذرات گرد و غبار باعث جذب تابش مؤثر و تابش برگشتی می‌شوند و افزایش آنها باعث کاهش مقدار تابش کوتاه خورشیدی می‌شود. بنابراین مناطق دارای کمترین روزها همراه با طوفان‌های گرد و غبار دارای اهمیت بیشتری می‌باشند. نقشه گرد و غبار با استفاده از سنجنده ماهواره مادیس (MOD04) استخراج گردید (Mekhilef et al., 2012; Movaqqari & Tavousi, 2013; Noorollahi et al., 2016; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018). Taghvaei & Saboohi, 2017; Zoghi et al., 2017).	پتانسیل گرد و غبار

ORness و وزن معیارها می‌توان با استفاده از روش تحلیل تصمیم‌گیری براساس OWA برای ایجاد مجموعه‌ای از نقشه‌های پتانسیل احداث نیروگاه‌های انرژی خورشیدی اقدام کرد. نقشه‌های پتانسیل بر این اساس تهیه شده‌اند که وزن معیارها برای تمام ORness‌ها ثابت می‌باشد و فقط مقدار ORness تغییر می‌کند. مقادیر ORness‌ها از ۰ (ریسک‌گریز یا بدبینانه) تا ۱ (ریسک‌پذیر یا خوشبینانه) می‌باشند. نقشه‌های مربوط به ORness‌های مختلف بر اساس درجه مناسب بودن به ۵ طبقه خیلی نامناسب (۰/۲-۰)، نامناسب (۰/۴-۰/۲)، متوسط (۰/۶-۰/۴)، مناسب (۰/۸-۰/۶) و خیلی مناسب (۰/۱-۰/۸) طبقه‌بندی شده‌اند (نگاره ۷)

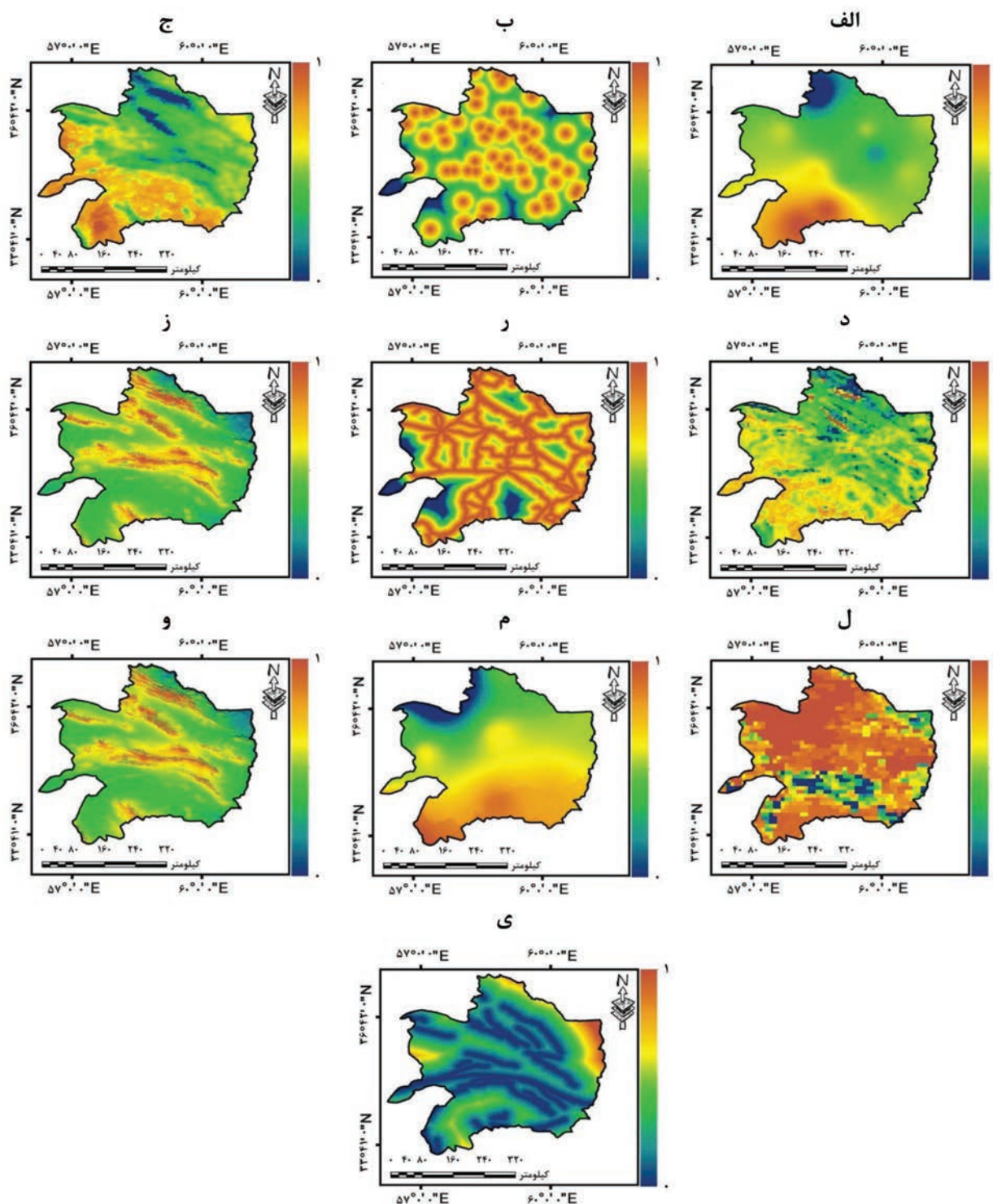
(Gorsevski et al., 2013; Kiavarz & Jelokhani-Niaraki, 2017) نادی‌زاده

و در نهایت با بهره‌گیری از مدل AHP وزن‌های نهایی برای معیارها در هر سطح محاسبه و نتایج آن به صورت جدول (۳) نشان داده شده است. وزن هر معیار نشان‌دهنده درجه اهمیت آن معیار در تصمیم‌گیری نهایی می‌باشد. با تغییر وزن معیار درجه اهمیت آن معیار در تصمیم‌گیری تغییر می‌کند. وزن معیار بین ۰ تا ۱ متغیر است. همچنین مجموع وزن معیارها ۱ می‌باشد.

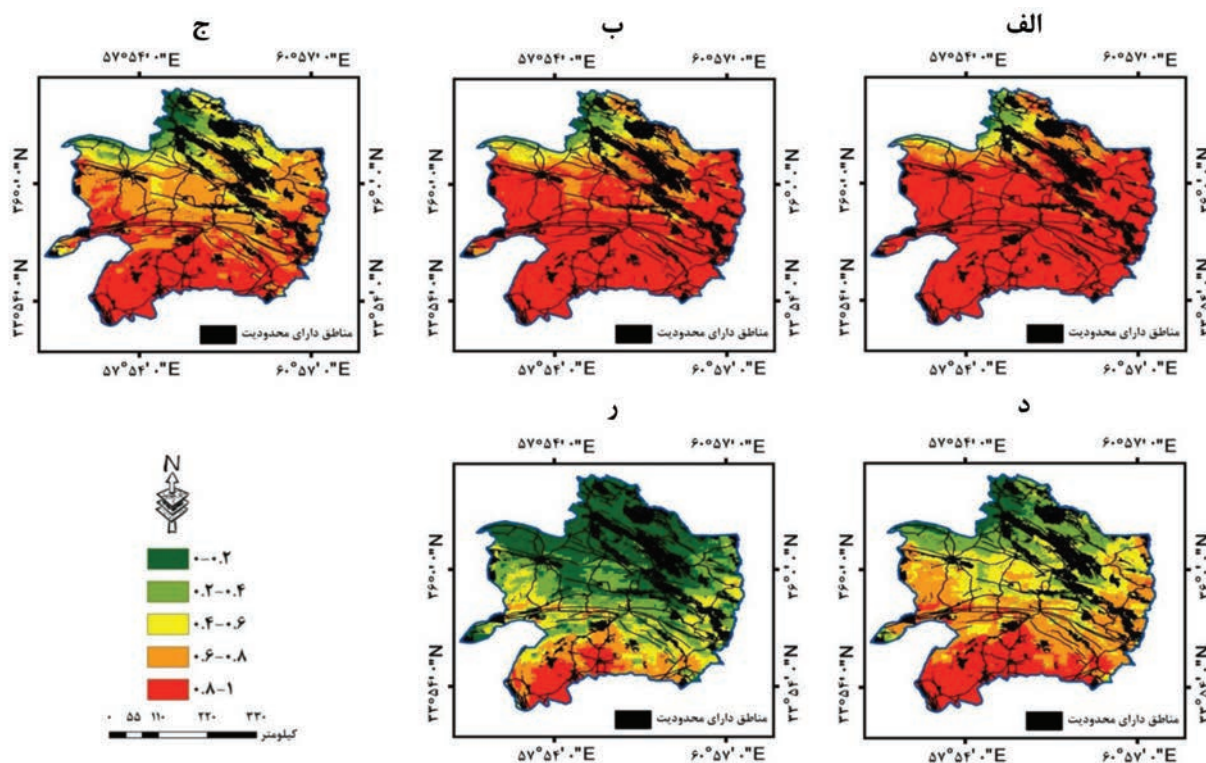
با توجه به داده‌های اولیه مورد استفاده در پژوهش و وزن نهایی به دست آمده برای معیارهای مختلف، نقشه هر یک از معیارها به دست آمده که به صورت نگاره (۶) نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر معیارهای استاندارد شده، مقادیر

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سمیرا)
تهیه نقشه پتانسیل نیروگاه‌های خورشیدی مبتنی بر ... / ۱۳۹



نگاره ۶: نقشه معیارهای مورد استفاده برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی: الف) بارش؛ ب) فاصله از شهر؛ ج) دمای سطح زمین؛ د) NDVI؛ ر) فاصله از جاده؛ ز) تابش ورودی سطح؛ ل) پتانسیل گرد و غبار؛ م) روزهای آفتابی سالانه؛ و) شیب؛ ی) فاصله از گسل



نگاره ۷: نقشه‌های مکان‌های مناسب استان خراسان برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی برای مقادیر انتخاب شده ORness:
الف) بسیار خوشبینانه ($ORness = 1$)؛ ب) خوشبینانه ($ORness = 0.83$)؛ ج) متوسط ($ORness = 0.5$)؛
د) بدبینانه ($ORness = 0.16$)؛ ر) خیلی بدبینانه ($ORness = 0$).

مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی قرار می‌گیرد. درصد مساحت هر یک از طبقات در ORness‌های مختلف برای محدوده مورد مطالعه محاسبه و به صورت جدول (۴) نشان داده شده است.

با توجه به جدول (۴) هر چه مقدار ORness کمتر می‌شود مناطق مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی محدودتر می‌شوند به طوری که در $ORness = 1$ مناطق خیلی مناسب بیشترین مساحت از مناطق استان‌های مختلف را در برمی‌گیرند اما در $ORness = 0$ مناطق خیلی مناسب کمترین مساحت از استان‌ها را شامل می‌شود.

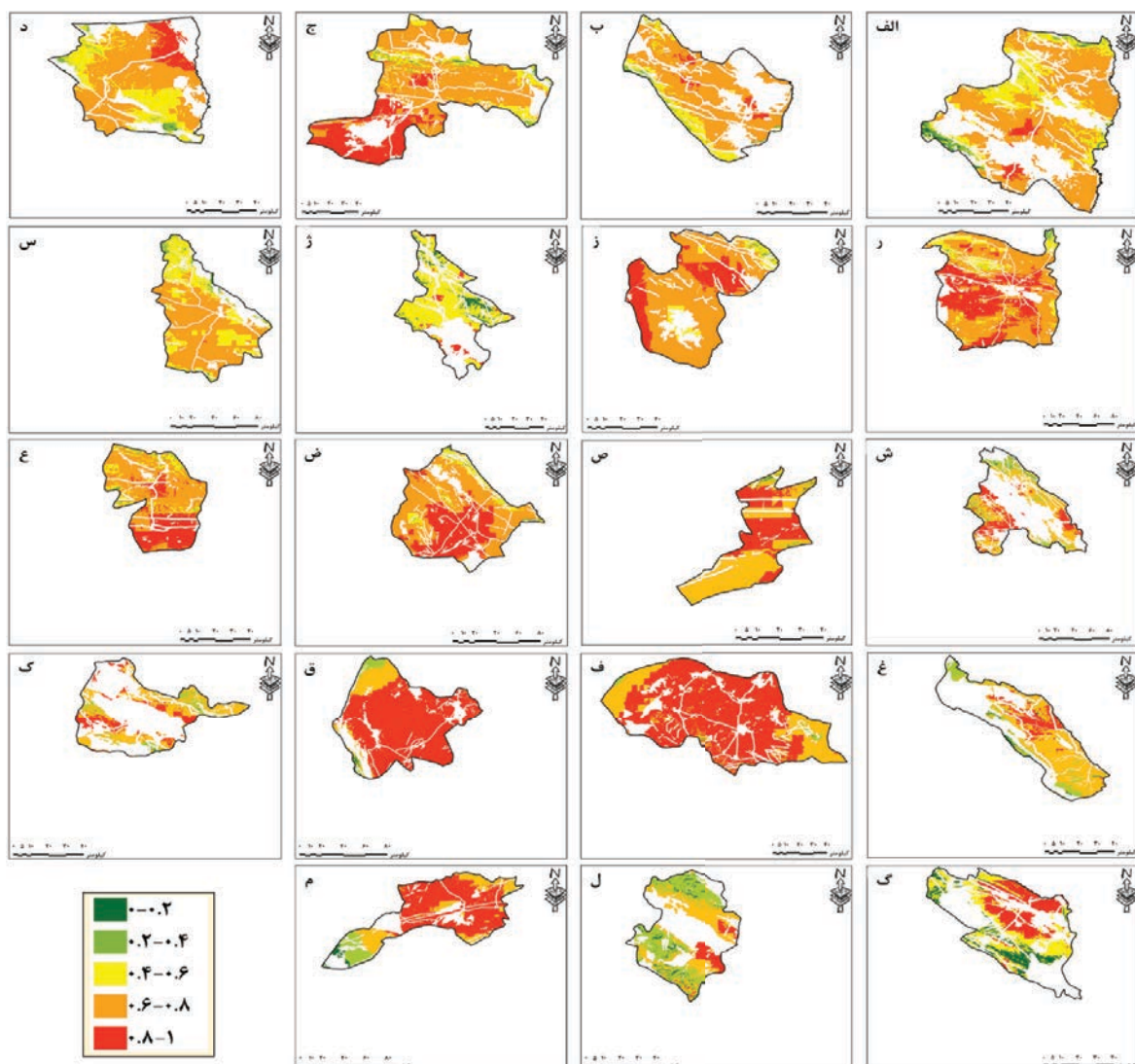
مکان‌های خیلی مناسب جهت احداث نیروگاه‌های خورشیدی در استان خراسان رضوی می‌توان پیشنهاد داده شوند. برای انجام این کار درصد مساحت هر یک از طبقات در $ORness = 0.5$ در هر شهرستان محاسبه گردیده است.

شورابه و همکاران، ۱۳۹۶).

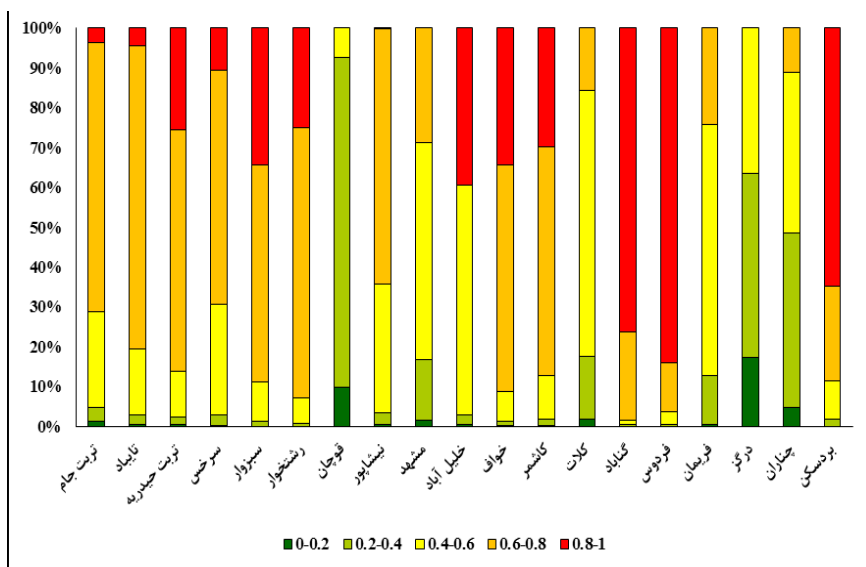
براساس نگاره (۷) قسمت‌های شمالی استان خراسان دارای آب و هوای معتدل و سرد کوهستانی می‌باشد این باعث می‌شود تعداد روزهای ابری و بارانی بیشتر و همچنین پوشش گیاهی این منطقه بالا باشد در نتیجه در تمام ORness‌ها این مناطق جزء مناطق نامناسب و خیلی نامناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند. همچنین در این مناطق به دلیل شیب زیاد، میزان تابش ورودی سطح بالا می‌باشد اما به دلیل اینکه معیار شیب به عنوان یک عامل محدود کننده محسوب می‌شود این مناطق جزء مناطق خیلی مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی قرار نگرفته‌اند. در مناطق جنوبی به دلیل بارش و میزان پوشش گیاهی کم و دمای سطح بالا به نسبت مناطق شمالی مساحت قابل توجه‌ای از این مناطق در طبقه‌ای خیلی

جدول ۴: درصد مساحت هر یک از طبقات در ORness‌های مختلف

استان خراسان رضوی					
کلاس‌ها	۰-۰/۲	۰/۲-۰/۴	۰/۴-۰/۶	۰/۶-۰/۸	۰/۸-۱
ORness=0	۳۹	۲۷	۱۸	۱۰	۶
ORness=0.16	۶	۲۲	۲۳	۳۲	۱۷
ORness=0.5	۳	۶	۱۷	۴۰	۳۴
ORness=0.83	۱	۴	۷	۱۷	۷۱
ORness=1	۰/۵	۲/۵	۴	۱۱	۸۲

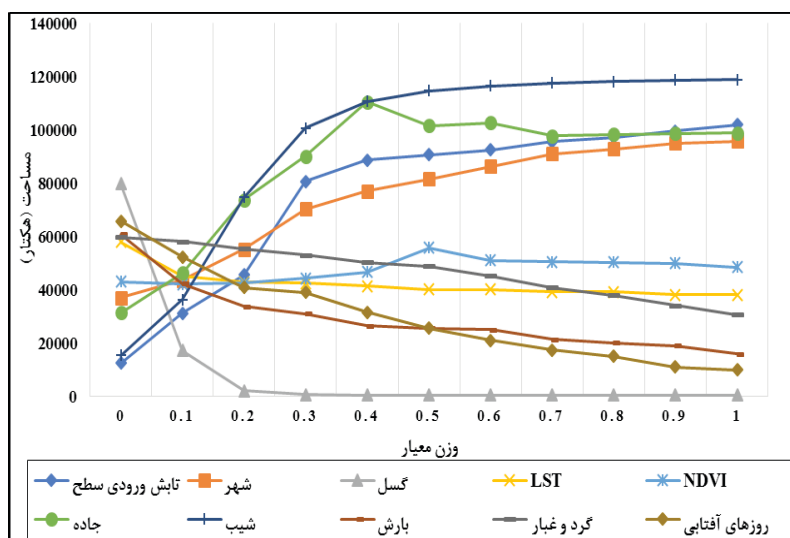


نگاره ۸: نقشه طبقات مختلف در هر یک از شهرستان‌ها در $ORness = 0.5$ (الف تربت جام؛ ب تایباد؛ ج تربت حیدریه؛ د سرخس؛ ر سبزوار؛ ز رشتخوار؛ ژ قوچان؛ س نیشابور؛ ش مشهد؛ ص خلیل آباد؛ ض خواف؛ ع کاشمر؛ غ کلات؛ ف گناباد؛ ق فردوس؛ ک فریمان؛ گ درگز؛ ل چناران؛ م بردسکن



نگاره ۹: درصد مساحت طبقات مختلف در هر یک از شهرستان‌ها در $ORness = 0.5$

نگاره ۱۰: نمودار تجزیه و تحلیل حساسیت معیارها در $ORness = 0.5$ برای طبقه خیلی مناسب (۸-۱/۰).



هدف از تحلیل حساسیت در مقاله حاضر این است که تعیین شود برای منطقه مورد مطالعه تغییر وزن کدام یک از معیارها بیشتر روی نتیجه نهایی (طبقه خیلی مناسب) تأثیر می‌گذارد. در این روش وزن معیار مشخص بین ۰ تا ۱ تغییر کرده و وزن هر یک از معیارهای دیگر بر اساس رابطه ۸ آپدیت می‌شود. سپس مساحت طبقه خیلی مناسب محاسبه می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- ۱- درجه اهمیت معیارهای مختلف مشخص می‌شود
- ۲- می‌توان از نتایج آن به این موضوع پی برد که خطا در تعیین وزن کدام یک از معیارها تأثیر بیشتری بر نتیجه نهایی می‌گذارد.

نگاره (۸) و (۹) به ترتیب نقشه و درصد مساحت طبقات مختلف در هر یک از شهرستان‌ها در $ORness = 0.5$ را نشان می‌دهد. نتایج بررسی نشان داد شهرستان‌های مناطق جنوبی و جنوب غربی استان دارای بیشترین مساحت از طبقه خیلی مناسب می‌باشند و شهرستان‌های مناطق شمالی دارای کمترین مساحت از طبقه خیلی مناسب می‌باشند. برای ارزیابی تأثیرگذاری هر یک از معیارهای مورد استفاده در پژوهش حاضر بر مساحت مناطق خیلی مناسب (Gorsevski et al., 2013) (۰.۱-۰.۸) مربوط به $ORness = 0.5$ از تحلیل حساسیت به روش One-At-a-Time (OAT) استفاده شده است.

شورابه و همکاران، ۱۳۹۶)، زمین لغزش (Feizizadeh & Blaschke, 2015; Ahmed et al., 2012)، منابع زیرزمینی (Sabzevari & Delavar, 2017)، زمین‌گرایی (Kiavarz & Jelokhani-Niaraki, 2017) و انرژی بادی (Gorsevski et al., 2013) نیز نشان داده شد که با افزایش مقدار ORness مناطق مستعد افزایش یافته است. بررسی درصد مساحت هریک از طبقات در شهرستان‌ها نشان داد که شهرستان‌های فردوس، بردسکن و گاباد دارای بیشترین مساحت از طبقه خیلی مناسب (۸-۰/۱) می‌باشند این در حالی است که شهرهای درگز، قوچان، مشهد و کلات هیچ مساحتی از طبقه خیلی مناسب را به خود اختصاص نداده‌اند. مهمترین علت آن، قرارگیری این مناطق در عرض‌های جغرافیایی بالاست که باعث شرایط اقلیمی نامناسب در این مناطق شده است.

در نهایت نتایج حاصل از آنالیز حساسیت معیارها نشان داد که با افزایش وزن معیارهای شیب، جاده و تابش ورودی سطح مساحت طبقه خیلی مناسب افزایش می‌یابد. به عبارتی انتخاب مکان مناسب به این معیارها حساسیت بسیار بالایی دارد. تغییر وزن معیار دمای سطح بر مقدار مساحت طبقه خیلی مناسب تأثیر چندانی ندارد. همچنین در این استان تغییر وزن معیار تابش ورودی سطح و بارش بین مقادیر ۰ تا ۰/۵ سبب تغییر زیاد در مساحت طبقه خیلی مناسب می‌شود و از ۰/۵ تا ۱ تأثیر چندانی بر مساحت این طبقه نخواهد داشت. در صورتی که در مطالعه Suuronen و همکاران (۲۰۱۷) تغییر وزن معیار فاصله از جاده و دما و Gorsevski و همکاران (۲۰۱۳) معیار کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل بکار گرفته شده در آن مطالعه داشته است.

Malczewski و Rinner (۲۰۱۶) برای لحاظ کردن عدم قطعیت در نتایج مربوط به مدل‌های GIS مبنا رویکرد MCDA Fuzzy را پیشنهاد دادند. در نتیجه، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده برای تهیه دقیق‌تر نقشه‌های مناطق بهینه تأسیس نیروگاه خورشیدی، مدل‌هایی با قابلیت ترکیب مفاهیم ریسک و عدم اطمینان بر اساس منطق OWA وفازی توسعه داده شود.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت معیارهای مختلف برای منطقه مورد مطالعه به صورت نگاره (۱۰) نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده در نگاره (۱۰) بیانگر این است که تعیین مناطق مناسب برای استان خراسان رضوی به معیارهای شیب، جاده و تابش ورودی سطح بیشترین حساسیت را دارند و تغییر وزن هر یک از معیارهای فوق تأثیر بسیار بر مساحت طبقه خیلی مناسب دارد. به همین دلیل در این استان تعیین دقیق وزن این سه معیار از اهمیت بالایی برخوردار است. در این استان تغییر وزن معیار گسل بین مقادیر ۰ تا ۰/۲ سبب تغییر زیاد در مساحت طبقه خیلی مناسب می‌شود ولی افزایش وزن این معیار از ۰/۲ تا ۱ تأثیر چندانی بر مساحت این طبقه نمی‌گذارد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نگرانی‌های در خصوص آلودگی‌های محیط زیستی و پایان‌پذیر بودن انرژی‌های تجدیدناپذیر کشورها را بر آن داشته که با مسائل مربوط به انرژی برخوردی متفاوتی نمایند، که در این میان جایگزینی انرژی‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی به منظور کاهش و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کنترل عرضه و تقاضای انرژی و کاهش انتشار گازهای آلاینده مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین هدف از این پژوهش، تعیین مناطق بهینه احداث نیروگاه‌های خورشیدی با به کارگیری مدل OWA می‌باشد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که قسمت‌های شمالی استان خراسان رضوی در تمام ORness‌ها جزء مناطق نامناسب و خیلی نامناسب ولی مناطق جنوبی دارای مساحت قابل توجهی از طبقه خیلی مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند. مساحت طبقه خیلی مناسب در $1 =$ ORness برابر ۸۲ درصد می‌باشد در حالی مساحت همین طبقه در $0 =$ ORness معادل ۶ درصد می‌باشد.

در مطالعات دیگری در ارتباط با مدل OWA در زمینه‌هایی از جمله پسماند (Rahnama et al., 2012; نادى زاده

8. Aguayo, P. 2013. Solar energy potential analysis at building scale using LiDAR and satellite data (Master's thesis, University of Waterloo). 148 pp.
9. Ahmed, B. 2015. Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*, 12(6), 1077-1095.
10. Al Garni, H. Z., and Awasthi, A. 2017. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225-1240.
11. Alamdari, P., Nematollahi, O., and Alemrajabi, A. A. 2013. Solar energy potentials in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 778-788.
12. Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., and Bastiaanssen, W. 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual-Idaho Implementation, version, 1, 97.
13. Aly, A., Jensen, S. S., and Pedersen, A. B. 2017. Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. *Renewable Energy*, 113, 159-175.
14. Aydin, N. Y., Kentel, E., and Duzgun, S. 2010. GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 364-373.
15. Boroushaki, S., and Malczewski, J. 2008. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Computers & Geosciences*, 34(4), 399-410.
16. Candelise, C., Winkler, M., and Gross, R. J. 2013. The dynamics of solar PV costs and prices as a challenge for technology forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 96-107.
17. Carrión, J. A., Estrella, A. E., Dols, F. A., Toro, M. Z., Rodríguez, M., and Ridao, A. R. 2008. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2358-2380.

منابع و مآخذ

۱. احمدی، ه.، مرشدی، ج.، عظیمی، ف. ۱۳۹۵. مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از داده‌های اقلیمی و سامانه اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: استان ایلام). نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۱): ۵۷-۴۱.
۲. تقوایی، م.، صبحی، ع. ۱۳۹۶. پهنه‌بندی و مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی در استان اصفهان. نشریه پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، ۸(۲۸): ۶۱-۸۲.
۳. طباطبایی، ط.، امیری، ف. ۱۳۹۴. مکانیابی نیروگاه‌های بادی براساس ارزیابی چندمعیاره مکانی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: استان بوشهر). نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۱): ۱۶-۱.
۴. گرجی، م.، خشنود، س.، عمرانی، ح.، هاشمی، م. ۱۳۹۵. مکانیابی مناطق مستعد نیروگاه خورشیدی تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: استان فارس). نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۱): ۶۶-۸۵.
۵. موقری، ع.، طاوسی، ت. ۱۳۹۲. امکان‌سنجی و پهنه‌بندی مکان‌های مستعد جهت استقرار پنل‌های خورشیدی با تکیه بر فراسنج‌های اقلیمی در استان سیستان و بلوچستان. مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاستگذاری انرژی، ۱(۱): ۹۹-۱۱۴.
۶. نادى‌زاده شورابه، س.، نیسانی سامانی، ن.، جلوخانی نیارکی، م. ۱۳۹۶. تعیین مناطق بهینه دفن پسماند با تأکید بر روند گسترش شهری براساس تلفیق مدل فرآیند سلسله مراتبی و میانگین وزنی مرتب شده، نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۰(۴): ۹۴۹-۹۶۹.
7. Afshari Pour, S., Hamzeh, S., and Neysani Samany, N. 2017. Site Selection of Solar Power Plant using GIS-Fuzzy DEMATEL Model: A Case Study of Bam and Jiroft Cities of Kerman Province in Iran. *Journal of Solar Energy Research*, 2(4), 323-328.

- maps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 790-797.
29. Gorsevski, P. V., Cathcart, S. C., Mirzaei, G., Jamali, M. M., Ye, X., and Gomezdelcampo, E. 2013. A group-based spatial decision support system for wind farm site selection in Northwest Ohio. *Energy Policy*, 55, 374-385.
30. Gorsevski, P. V., Donevska, K. R., Mitrovski, C. D., and Frizado, J. P. 2012. Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: a case study using ordered weighted average. *Waste management*, 32(2), 287-296.
31. Höfer, T., Sunak, Y., Siddique, H., and Madlener, R. 2016. Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen. *Applied energy*, 163, 222-243.
32. Hosenuzzaman, M., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A.B.M.A., and Nahar, A. 2015. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 284-297.
33. Janke, J. R. 2010. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35(10), 2228-2234.
34. Jelokhani-Niaraki, M., and Malczewski, J. 2015a. A group multicriteria spatial decision support system for parking site selection problem: A case study. *Land Use Policy*, 42, 492-508.
35. Jelokhani-Niaraki, M., and Malczewski, J. 2015b. Decision complexity and consensus in Web-based spatial decision making: A case study of site selection problem using GIS and multicriteria analysis. *Cities*, 45, 60-70.
36. Jelokhani-Niaraki, M., and Malczewski, J. 2015c. The decision task complexity and information acquisition strategies in GIS-MCDA. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(2), 327-344.
37. Jiang, H., and Eastman, J. R. 2000. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173-184.
38. Kiavarz, M., and Jelokhani-Niaraki, M. 2017. Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1154-1165.
19. Charabi, Y., and Gastli, A. 2011. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554-2561.
20. Chen, H., Wood, M. D., Linstead, C., and Maltby, E. 2011. Uncertainty analysis in a GIS-based multi-criteria analysis tool for river catchment management. *Environmental modelling & software*, 26(4), 395-405.
21. Delgado, M. G., and Sendra, J. B. 2004. Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: a review. *Human and Ecological Risk Assessment*, 10(6), 1173-1187.
22. Doljak, D., and Stanojević, G. 2017. Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia. *Energy*, 127, 291-300.
23. Doorga, J. R., Rughooputh, S. D., & Boojhawon, R. 2019. Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable energy*, 133, 1201-1219.
24. Effat, H. A. 2013. Selection of potential sites for solar energy farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and multicriteria analysis. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2(1), 205-220.
25. ESRI. 2016. Modeling solar radiation. <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/toolreference/spatial-analyst/modeling-solar-radiation.htm>.
26. Feick, R., and Hall, B. 2004. A method for examining the spatial dimension of multi-criteria weight sensitivity. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8), 815-840.
27. Feizizadeh, B., and Blaschke, T. 2012. Comparing GIS-Multicriteria Decision Analysis for landslide susceptibility mapping for the lake basin, Iran. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International. 5390-5393 pp.
28. Gastli, A., and Charabi, Y. 2010. Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation

- analytic hierarchy process (FAHP)—a case study of Iran. *Energies*, 9(8), 643.
49. Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., and Tanaka, T. 2007. GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan. *Computers & geosciences*, 33(8), 1008-1021.
50. Protocol, K. 1997. United Nations framework convention on climate change. Kyoto Protocol, Kyoto, 19.
51. Rahnema, M. R., Aghajani, H., and Fattahi, M. 2012. Integrating Ordered Weighted Average (OWA) techniques with geographic information Systems for landfill site selection (Case study: Metropolis of Mashhad). *Geography and Environmental Hazards* 3. 13-15.
52. Rinner, C., and Malczewski, J. 2002. Web-enabled spatial decision analysis using Ordered Weighted Averaging (OWA). *Journal of Geographical Systems*, 4(4), 385-403.
53. Saaty, T. L. 1980. *The Analytical Hierarchy Process, Planning, Priority. Resource Allocation*. RWS Publications, USA.
54. Saaty, T. L. 1986. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. *Management science*, 32(7), 841-855.
55. Saaty, T. L., and Vargas, G. L. 1991. *Prediction, projection and forecasting*. Kluwer.
56. Sabzevari, A. R., and Delavar, M. R. 2017. GIS-BASED SITE SELECTION FOR UNDERGROUND NATURAL RESOURCES USING FUZZY AHP-OWA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42, 463-468.
57. Sadeghi, M., and Karimi, M. 2017. GIS-BASED SOLAR AND WIND TURBINE SITE SELECTION USING MULTI-CRITERIA ANALYSIS: CASE STUDY TEHRAN, IRAN. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 469-476.
58. Sánchez-Lozano, J. M., Antunes, C. H., García-Cascales, M. S., and Dias, L. C. 2014. GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A case study in Japan's Akita and Iwate provinces. *Geothermics*, 70, 295-304.
39. Iaaly, A., Jadayel, O., Karame, N., & Khayat, N. 2019. Solar Power Plant Site Location Suitability Analysis Using GIS Weighted Average Raster Overlay [Lebanon]. In *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications* (pp. 37-40). Springer, Cham.
40. Lee, A., Kang, H. Y., & Liou, Y. J. 2017. A hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection. *Sustainability*, 9(2), 184.
41. Lenin, D., and Kumar, S. J. 2015. GIS based multicriterion site suitability analysis for solar power generation plants in India. *The International Journal of Science and Technoledge*, 3(3), 197.
42. Liu, J., Xu, F., and Lin, S. 2017. Site selection of photovoltaic power plants in a value chain based on grey cumulative prospect theory for sustainability: A case study in Northwest China. *Journal of cleaner production*, 148, 386-397.
43. Malczewski, J. 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
44. 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.
45. Malczewski, J., and Rinner, C. 2016. *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. Springer.
46. Mekonnen, A. D., and Gorsevski, P. V. 2015. A web-based participatory GIS (PGIS) for offshore wind farm suitability within Lake Erie, Ohio. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 162-177.
47. Moriarty, P., and Honnery, D. 2012. What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 244-252.
48. Noorollahi, E., Fadai, D., Akbarpour Shirazi, M., and Ghodsipour, S. H. 2016. Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy

69. Yager, R. R, Kelman A. 1999. An extension of the analytical hierarchy process using OWA operators. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 7(4), 401-417.
70. Yalcin, M., and Gul, F. K. 2017. A GIS-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (Afyonkarahisar). *Geothermics*, 67, 18-28.
71. Yousefi, H., Hafeznia, H., & Yousefi-Sahzabi, A. 2018. Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-Based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran. *Energies*, 11(7), 1648.
72. Yushchenko, A., De Bono, A., Chatenoux, B., Patel, M. K., & Ray, N. 2018. GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2088-2103.
73. Zabihi, H., Alizadeh, M., Kibet Langat, P., Karami, M., Shahabi, H., Ahmad, A., ... & Lee, S. 2019. GIS Multi-Criteria Analysis by Ordered Weighted Averaging (OWA): Toward an Integrated Citrus Management Strategy. *Sustainability*, 11(4), 1009.
74. Zoghi, M., Ehsani, A. H., Sadat, M., javad Amiri, M., and Karimi, S. 2017. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 986-996.
- Southeast of Spain. *Renewable Energy*, 66, 478-494.
59. Sindhu, S., Nehra, V., & Luthra, S. 2017. Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 496-511.
60. Store, R., and Kangas, J. 2001. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and urban planning*, 55(2), 79-93.
61. Suh, J., & Brownson, J. 2016. Solar farm suitability using geographic information system fuzzy sets and analytic hierarchy processes: Case study of ulleung island, Korea. *Energies*, 9(8), 648.
62. Suuronen, A., Lensu, A., Kuitunen, M., Andrade-Alvear, R., Celis, N. G., Miranda, M., Perez, M., and Kukkonen, J. V. 2017. Optimization of photovoltaic solar power plant locations in northern Chile. *Environmental Earth Sciences*, 76(24), 824.
63. Tahri, M., Hakdaoui, M., and Maanan, M. 2015. The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1354-1362.
64. United Nations. 2015. In: 21st Conference of the parties of the UNFCCC in Paris. Retrieved in 2017 from <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/No%20Volume/54113/Part/I-54113-0800000280458f37.pdf>
65. Uyan, M. 2013. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11-17.
66. Von Hoyningen-Huene, W., Schmidt, T., Schienbein, S., Kee, C. A., and Tick, L. J. 1999. Climate-relevant aerosol parameters of South-East-Asian forest fire haze. *Atmospheric Environment*, 33(19), 3183-3190.
67. Xu, J., Song, X., Wu, Y., and Zeng, Z. 2015. GIS-modelling based coal-fired power plant site identification and selection. *Applied energy*, 159, 520-539.
68. Yager, R. R. 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, vol. 18, 183-190.

