

## پهنه بندی پتانسیل خطر فرسایش بادی منطقه خضرآباد یزد

محمد حسن صادقی روش<sup>۱\*</sup>، حسن خسروی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان

۲- استادیار گروه بیابانزدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۵/۲۶

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۳/۶/۱۰

### چکیده

از آنجا که پدیده‌های واقعی همواره فازی، نادقیق و مبهم هستند. آنچه در ارزیابی این پدیده‌ها مهم به نظر می‌رسد امتیازدهی صحیح شاخص‌ها به منظور دستیابی به نتایج قابل استناد می‌باشد. فرسایش بادی نیز به عنوان یک پدیده واقعی واجد شاخص‌هایی هست که ساختار کیفی یا ساختار نامشخصی دارند که نمی‌توانند به دقت اندازه‌گیری شوند. در چنین مواردی به منظور دستیابی به ماتریس ارزشیابی می‌توان از اعداد فازی استفاده کرد، لذا در این پژوهش با کمک تئوری فازی و تلفیق آن با روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه اقدام به پهنه‌بندی ریسک فرسایش بادی شد. در ابتدا واحدهای کاری از روش ژئومرفولوژی تفکیک شد. سپس با توجه به وضعیت منطقه مطالعاتی، به بررسی نقش شش عامل مؤثر تغییرات ارتفاع، ژئومرفولوژی، حساسیت سنگ به فرسایش بادی، تیپ‌های خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی پرداخته شد. این شاخص‌ها به وسیله گروه خبرگان ارزیابی و اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری تعیین گردید. در نهایت، با تلفیق مفهوم فازی و روش تحلیلی سلسله مراتبی در قالب مجموعه مثلثی فازی، شاخص‌ها رتبه‌بندی و پهنه‌بندی شاخص‌های فرسایش بادی برای مدیریت ریسک در محیط Arc View ارائه شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که واحدهای اراضی کشاورزی (PAG)، اراضی رسی لخت (BCG)، دشت سرآپانداژ لخت (BEP) و تپه‌های ماسه‌ای لخت (BSD) به ترتیب با کمترین ارزش کمی ۰/۰۴۲۸، ۰/۰۳۹۶، ۰/۰۳۲۲ و ۰/۰۳ در معرض فرسایش بادی خیلی شدید قرار دارند. به طور کلی، بر اساس لایه نهایی نزدیک به ۲۱/۸۴ درصد از مساحت حوضه خضرآباد در معرض خطر فرسایش بادی قرار دارد.

**واژه‌های کلیدی:** پهنه‌بندی، فرسایش بادی، مدل تحلیلی سلسله مراتبی فازی، مناطق خشک.

## مقدمه

طبق تعریف، فرسایش بادی پدیده‌ای است که در نواحی خشک و نیمه‌خشک با بارندگی کم و دامنه نوسان زیاد، پوشش گیاهی ناچیز و بادهای قوی با فراوانی وقوع بالا و حاوی سنگریزه‌های سطحی مستعد برای بادبردگی ایجاد می‌شود. فرسایش بادی مسئله زیست‌محیطی مهمی است به طوری که هم اکنون اراضی تحت تاثیر فرسایش بادی به بیش از ۵/۰۵ میلیون کیلومتر مربع می‌رسد. این مقدار فرسایش با ۴۶/۴ درصد از اراضی تحت تخریب زمین به وسیله کلیه عوامل برابر است (دونگ و همکاران، ۲۰۰۰). بخش وسیعی از کشور را مناطق خشک و فراخشک فرا گرفته که به دلیل شرایط مختلف، از جمله خاک نارس و تراکم محدود پوشش گیاهی، زمینه برای وقوع فرسایش بادی بسیار مناسب است. بر مبنای این چارچوب، این پژوهش با هدف ارائه روشی نظام‌مند به منظور پهنه‌بندی پتانسیل خطر فرسایش بادی انجام شد. به منظور دستیابی به این هدف، روش تحلیلی سلسله مراتبی فازی، که نوعی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه جبرانی است، به منظور پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی مد نظر قرار گرفت. در زمینه ارزیابی ریسک فرسایش بادی تاکنون مدل‌ها و روش‌های مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مدل شفیل و وودروف (۱۹۵۴)، وودروف و سیدوی (۱۹۶۵)، اریفر (احمدی، ۱۳۸۴) اشاره کرد. در غالب این مدل‌ها، عامل حساسیت‌پذیری خاک نقش مهمی را ایفا می‌کند و از آنجا که عوامل گوناگونی نظیر دانه-بندی (بافت) خاک، چسبندگی ذرات و وزن مخصوص در پایداری آن نقش دارند، برآورد دقیق و کمی این عامل به صورت تجربی غیرممکن است. از سویی، وجود ضرائب مختلف و تجارب متفاوت کارشناسی در برآورد عوامل مذکور نیز از

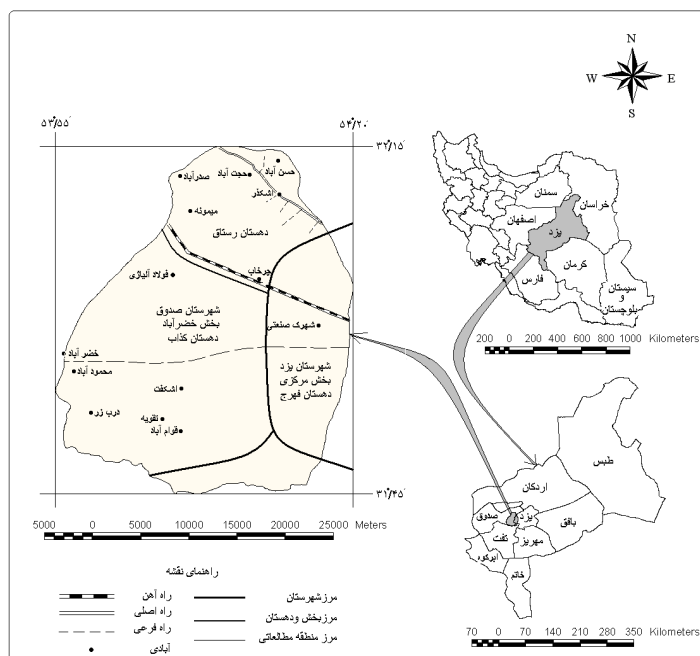
دقت نتایج می‌کاهد. همچنین، این مدل‌ها بر اساس عواملی پایه‌گذاری شده‌اند که بومی ایران نبوده و با شرایط محیطی ایران سازگاری ندارند. در بین مدل‌های مطرح، مدل اریفر مطابق با شرایط اکولوژیکی ایران ارائه شده است (اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۵ و ۱۳۷۶) و تحقیقات بعدی در زمینه فرسایش بادی بر مبنای این مدل شکل گرفته است (جعفری و همکاران، ۲۰۰۹؛ سپهر و همکاران، ۲۰۰۷؛ آذرکار و همکاران، ۲۰۰۶؛ زهتابیان و جوادی، ۱۳۸۶). مدل اخیر هر چند در ارائه عوامل مؤثر و امتیازدهی آنها شرایط منطقه‌ای ایران را در نظر گرفته، ولی از آنجا که شرایط محلی بسیار متنوعی در ایران حاکم است، نقص وزن‌دهی از روی جدول امتیازدهی یکسان برای تمامی نواحی همچنان پایدار بود. لذا صادقی روش در سال ۱۳۹۲ با ارائه مدل طبقه بندی رقومی اقدام به ارزیابی و برآورد شاخص‌های فرسایش به صورت بومی و محلی نمود (صادقی روش، ۱۳۹۲). از طرف دیگر روش‌های مذکور، واجد محدودیت نادیده انگاشتن قضاوت‌های فازی تصمیم‌گیران است. همچنین بعضی از شاخص‌ها ساختار کیفی یا ساختار نامشخصی دارند که نمی‌توانند به دقت اندازه‌گیری شوند. در چنین مواردی به منظور دستیابی به نتایج قابل اعتماد می‌باید از اعداد فازی استفاده کرد. بنابراین در این پژوهش سعی شد به منظور پهنه‌بندی پتانسیل خطر فرسایش بادی از روش تحلیلی سلسله مراتبی فازی استفاده شود.

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه خضرآباد با وسعتی معادل ۷۸۲ کیلومتر مربع در ۱۰ کیلومتری غرب شهر یزد در موقعیت جغرافیایی ۵۵°، ۵۳° الی ۲۰°، ۵۴° طول شرقی و ۴۵°، ۳۱° الی ۱۵°، ۳۲°

را تپه‌ها و پهنه‌های ماسه‌ای شکل داده است. ارگ بزرگ اشکذر با وسعتی معادل ۸۹ کیلومتر مربع در شمال منطقه با انواع رخساره‌های تخریبی و فرسایشی به چشم می‌خورد که قلمرو وقوع طوفان‌های ماسه‌ای با فراوانی بیش از ۱۰ تکرار در سال با جهت غالب غربی و شمال‌غربی می‌باشد. سالانه در حدود ۱۲۰ تن گردوغبار بر شهر یزد فرو می‌ریزند. مجموع این ویژگی‌ها بیانگر غلبه کامل عملکرد فرسایش بادی در منطقه و لزوم شناخت و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی می‌باشد (صادقی روش، ۱۳۸۷).

عرض شمالی قرار گرفته، ارتفاع متوسط منطقه ۱۳۹۷ متر و ۸۴/۷۹ درصد منطقه (۶۶۳ کیلومتر مربع) شیبی کمتر از ۱۰ درصد دارد. بنابراین، قسمت اعظم منطقه را اراضی پست با شیب متوسط ۹/۴۱ درصد تشکیل می‌دهد. از نظر اقلیمی بر مبنای اقلیم‌نمای آمبرژه اقلیم منطقه مورد مطالعه در شرایط خشک و سرد بیابانی طبقه‌بندی می‌شود (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه ۱۲۱ میلی‌متر و جهت باد غالب شمال غربی با فراوانی وقوع ۱۶/۹۴ درصد و با حداکثر سرعت ۱۶/۳ کیلومتر در ساعت می‌باشد. حدود ۱۳۰ کیلومتر مربع (۱۶/۵ درصد) از اراضی منطقه



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه خوزستان

فرجی، ۱۳۸۱) تعداد محاسبات و پیچیدگی مراحل این روش باعث شد که چندان مورد استفاده قرار نگیرد. در سال ۱۹۹۶ چانگ روش تحلیلی توسعه‌ای را ارائه کرد که از اعداد مثلثی فازی در این روش استفاده کرد (زو و همکاران، ۱۹۹۹؛ چانگ، ۱۹۹۶). این روش با منطق قوی و

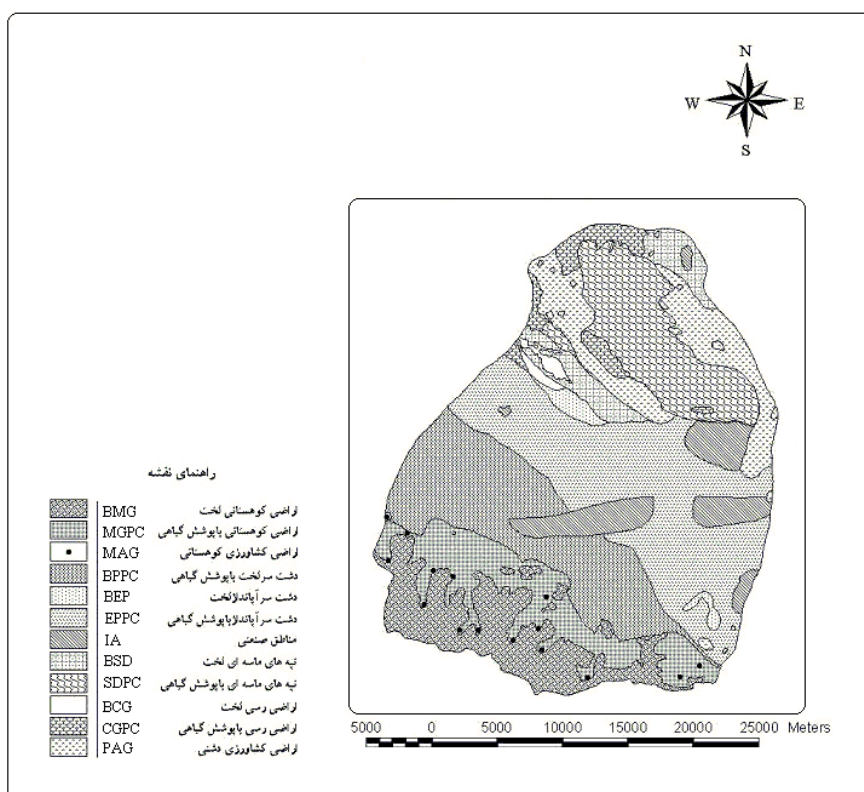
روش تحقیق: پژوهش حاضر بر مبنای مدل تحلیلی سلسله مراتبی فازی انجام و نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی تهیه شد. این روش اولین بار توسط لارهوون و پدریک در سال ۱۹۸۳ بر اساس روش حداقل مجذورات لگاریتمی ارائه شد. (زو و همکاران، ۱۹۹۹؛ لارهوون و پدریک، ۱۹۸۳؛ آذر و

تحلیلی سلسله مراتبی فازی در حوزه مسائل مربوط به پهنه بندی خطر فرسایش بادی چه در داخل ایران و چه در خارج از ایران به کار گرفته نشده است.

مدل تحلیلی سلسله مراتبی فازی طی مراحل ذیل به انجام رسید:

تعیین واحدهای کاری و شاخص های ارزیابی: به منظور ارزیابی فرسایش در ابتدا برای تعیین چارچوبی مناسب برای تهیه نقشه فرسایش، اقدام به تعیین و تفکیک واحدهای کاری از روش ژئومرفولوژی (احمدی، ۱۳۸۴) در سطح منطقه مطالعاتی شد (شکل ۲).

مستدلی که داشت به سرعت در حوزه های مختلف علوم توسعه یافت، از پژوهش های انجام شده در زمینه کاربرد مدل تحلیلی سلسله مراتبی فازی می توان به موارد ذیل اشاره کرد، ارزیابی طرح های مدیریت آب (سریدجویک و مدیروس، ۲۰۰۸)، مدیریت ایمنی در تولید (داگدویرن و یوگسل، ۲۰۰۸)، انتخاب سیستم های برنامه ریزی منابع (کبسی، ۲۰۰۹)، انتخاب پرسنل (داگدویرن و همکاران، ۲۰۰۹)، ارزیابی منابع انرژی (میکسنر، ۲۰۰۹) و ارزیابی راهبردهای بیابانزدایی (صادقی روش و همکاران، ۲۰۱۴). بررسی های گسترده در پژوهش حاضر حاکی از آن است که مدل



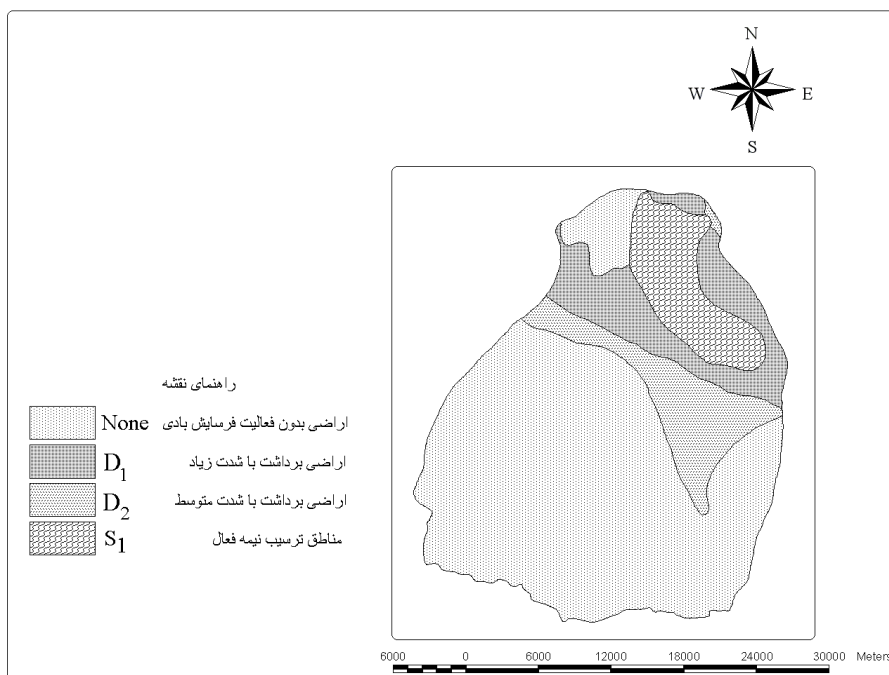
شکل ۲: واحدهای کاری منطقه خضرا باد

زمین، حساسیت سنگ به فرسایش بادی، تیپ-های خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی است. ارزش گذاری شاخص ها در مقیاسی واحد: بر اساس مطالعات انجام شده بر روی رخساره های فرسایش

سپس، بر اساس میزان تأثیر متغیرها در فرسایش، شش متغیر به عنوان متغیرهای اصلی فرسایش بادی در منطقه در نظر گرفته شد. متغیرهای مذکور شامل تغییرات ارتفاع، پستی و بلندی

میدانی، موقعیت جغرافیایی مناطق تحت تأثیر به صورت نقشه ۱/۵۰۰۰۰ ارائه شد ( شکل ۳).

بادی منطقه مطالعاتی (مرکز ملی بیابانزدایی، ۱۳۸۵) با استفاده از عکس‌های هوایی ۱/۴۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای ETM سال ۲۰۰۲ و بررسی‌های



شکل ۳: پراکندگی فعالیت فرسایش بادی بر مبنای پراکنش رخساره‌های فرسایشی در حوضه خضرآباد

ادامه با روی هم‌پوشانی دودویی نقشه پراکندگی حوضه‌های عملکردی فرسایش بادی و نقشه‌های موضوعی مذکور با استفاده از دستور Geoprocessing و تهیه نقشه‌های تلفیقی، نمودارهای مقایسه‌ای مساحت ناشی از فرسایش بادی به نسبت هر کدام از عوامل مؤثر در فرسایش شکل گرفت (شکل ۴) که این اشکال بیانگر پتانسیل فرسایش هر طبقه از نقشه‌های موضوعی در مقابل فرسایش می‌باشد (قهرودی تالی، ۱۳۸۳). بنابراین، بر اساس دامنه نوسان متغیرها و ارتباط آنها با ظهور رخساره‌های فرسایش بادی در منطقه، متغیرها به سطوح مختلف تقسیم و در مقیاس ۱ الی ۹ وزن دهی شد (جدول ۱).

از این لایه برای تحلیل متغیرهای مؤثر و وزن-دهی آنها استفاده شد. به منظور تفکیک و وزن-دهی متغیرها بر مبنای شرایط محلی، مدل رقومی ارتفاعی از داده‌های ارتفاعی نقشه‌های رقومی ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ تهیه شد. در ادامه بر مبنای نقشه مدل رقومی ارتفاعی در محیط Arc view، نقشه‌های منحنی میزان، هیپسومتریک، شیب، جهات جغرافیایی با توجه به هدف مطالعاتی شکل گرفت. سپس نقشه‌های موضوعی لیتولوژی، تیپ خاک، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و ژئومرفولوژی نیز از مرزبندی و آماربرداری عکس‌های هوایی ۱/۲۵۰۰۰ و تصاویر ETM سال ۲۰۰۲ (لیساند و کیفر، ۲۰۰۰) در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ شکل گرفتند. در

جدول ۱: امتیازدهی شاخص‌ها در مقیاس واحد

شدت فرسایش	آرام (۱ - ۳)	متوسط (۵ - ۳/۱)	شدید (۷ - ۵/۱)	بسیار شدید (۹ - ۷/۱)
	شاخص ارزیابی (متغیرها) (I)			
تغییرات ارتفاع	> ۱۴۰۰	۱۳۰۰ - ۱۴۰۰	۱۳۰۰ - ۱۲۰۰	< ۱۲۰۰
ژئومورفولوژی	منطقه کوهستانی و تپه ماهوری با پستی و بلندی زیاد و دشت سر لخت با پوشش خاکی ناچیز و رخنمون سنگی و فرسایش خندقی	اراضی با رسوبات منفصل درشت و متوسط همانند مخروط افکنه‌ها و بسترهای خشک‌رود با پستی و بلندی متوسط	تپه‌ها و پهنه‌های ماسه‌ای و اراضی کشاورزی دشت سر آپانداژ و نسبتاً هموار	اراضی هموار رسی و رسوبات آبرفتی جوان با آثار فرسایشی همانند کلوتک و یاردانگ
واحدهای سنگ شناسی	آهک، آندزیت، دایک، شیل سبز، ماسه سنگ، تراکیت، دولومیت، سیلت	آبرفت جدید	تپه‌های ماسه‌ای	تراسه‌های قدیمی
خاک	خاک‌های تیپ کوهستان (M) خاک‌های تیپ دشت - سر لخت (BP)	-	خاک‌های تیپ دشت سر آپانداژ با شیب کم (EP <sub>1</sub> )	خاک‌های تیپ دشت سر آپانداژ با شیب بسیار کم (EP <sub>2</sub> ) خاک‌های ماسه‌ای (C)
پوشش گیاهی	تیپ درمنه - بوه شور (A.Sa) تیپ طارون چرخه (C.La) تیپ درمنه - قلم (A.Fo)	تیپ درمنه - جارو (A.Sc) اراضی لخت تاغ کاری شده (Hal/B.L)	تپه‌های ماسه‌ای تاغ کاری شده (Hal/S.D)	تیپ درمنه - کوزینیا (A.Co)
کاربری اراضی	اراضی لخت کوهستانی و تپه ماهوری B(M&H) چراگاه فصلی (PL)	اراضی لخت و بایر (B) مناطق صنعتی (I) تپه‌های ماسه‌ای لخت (B(S.D))	اراضی کشاورزی آبی (A(I)) کشاورزی صنعتی (A(I), I)	تپه‌های ماسه‌ای با پوشش گیاهی (P(S.D)) اراضی مرتعی و کشاورزی آبی (PL, A(I))

توجه به جدول امتیازدهی شاخص‌ها (جدول ۱) در مقیاس ۱ الی ۹، مورد ارزیابی و توافق گروهی قرار گرفت (جدول ۲).

تعیین ارزش هر شاخص در هر واحدکاری و تشکیل ماتریس داده‌ها: در ادامه از روش دلفی با تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری داده‌ها، ارزش هر شاخص در هر واحدکاری، از نظر اثر بر فرایند فرسایش با

جدول ۲: ماتریس داده‌های استاندارد (آذر و رجب‌زاده، ۱۳۸۱)

$I_N$	.....	$I_2$	$I_1$	شاخص $I_i$
				واحد کاری $TMU_i$
$P_{1N}$	.....	$P_{12}$	$P_{11}$	$TMU_1$
$P_{2N}$	.....	$P_{22}$	$P_{21}$	$TMU_2$
:	:	:	:	:
$P_{MN}$	.....	$P_{M2}$	$P_{M1}$	$TMU_M$

در این ماتریس  $M$  = تعداد واحد های کاری،  $N$  = تعداد شاخص ها  $I$  = عنوان شاخص و  $P_{ij}$  = مقدار وزنی نرمال که هر واحد کاری باتوجه به شاخص مربوطه کسب می کند، می باشد.

که در آن:  
 $E_{ij}$ : آنتروپی هر واحد کاری نسبت به هر شاخص  
 $P_{ij}$ : مقدار وزنی نرمال هر واحد کاری نسبت به هر شاخص  
 $\ln P_{ij}$ : لگاریتم نپرین مقدار وزنی نرمال هر واحد کاری نسبت به هر شاخص

تعیین اهمیت شاخص‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون: به منظور تعیین اهمیت شاخص‌ها پس از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری (جدول ۲) که یک ماتریس نرمالیزه است، آنتروپی واحدهای کاری نسبت به شاخص‌ها از رابطه ۱ محاسبه شده و ماتریس دو بعدی آن شکل می‌گیرد (جدول ۳).

$$E_{ij} = P_{ij} \times \ln P_{ij} ; \forall j \quad (۱) \text{ رابطه}$$

جدول ۳: ماتریس آنتروپی واحدهای کاری نسبت به شاخص‌ها

$I_n$	...	$I_2$	$I_1$	شاخص $I_i$
				واحد کاری $TMU_i$
$E_{1N}$	...	$E_{12}$	$E_{11}$	$TMU_1$
$E_{2N}$	...	$E_{22}$	$E_{21}$	$TMU_2$
:	:	:	:	:
$E_{MN}$	...	$E_{M2}$	$E_{M1}$	$TMU_m$

$K$ : ضریب ثابت  
 و  $K$  به عنوان مقدار ثابت از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.  
 رابطه ۳)  

$$K = \frac{1}{\ln M}$$

در ادامه آنتروپی شاخصها ( $E_j$ ) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m \left( P_{ij} \times \ln P_{ij} \right) \quad (۲) \text{ رابطه}$$

در این رابطه:  
 $K$ : ضریب ثابت

در این رابطه:  
 $E_j$ : آنتروپی هر شاخص

محاسبه ارزش  $\tilde{S}_k$  یا اعداد فازی مثلثی ترکیبی برای هر سطر ماتریس فازی از رابطه ۶ (رابطه ۶)

$$\tilde{S}_k = \sum_{j=1}^n M^{k_{kj}} \left[ \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} M^{k_{ij}} \right]^{-1}, \quad i=1,2,\dots,n_k$$

در این رابطه  $k$  بیانگر شماره سطر و  $i$  و  $j$  به ترتیب نشان دهنده واحدهای کاری یا شاخصها می باشد

محاسبه درجه بزرگی ارزش  $\tilde{S}_k$  هر سطر ماتریس فازی نسبت به هم از رابطه ۷ (رابطه ۷)

$$\begin{cases} \nu(\tilde{S}_{ij}^k \geq \tilde{S}_{ij}^k) = 1, & m_1 \geq m_2, \quad j=1,2,\dots,n_k, \quad j \neq i \\ \nu(\tilde{S}_{ij}^k \geq \tilde{S}_{ij}^k) = \frac{u_1 - l_2}{(u_1 - l_2) + (m_2 - m_1)} & \text{Otherwise, } j=1,2,\dots,n_k, \quad j \neq i \end{cases}$$

محاسبه درجه بزرگی هر عدد فازی مثلثی ترکیبی از  $K$  عدد فازی ترکیبی دیگر از رابطه ۸ (رابطه ۸)

$$P_{ih}^K(I_i^k \text{ or } TMU^k_i) = \min \nu(\tilde{S}_{ij}^k \geq \tilde{S}_{ij}^k), \quad i=1,2,\dots,n_k$$

در این رابطه  $TMU^k_i$  بیانگر واحد کاری یا شاخص ( $I_i^k$ ) نام از جدول ماتریس فازی  $k$ ام می باشد.

اعداد حاصل از این فرایند بیانگر اوزان غیر بهنجار شده ارجحیت شاخصها نسبت به هم و اولویت واحدهای کاری نسبت به هر شاخص می باشند.

نرمالیزه کردن اوزان نابهنجار شاخصها و واحدهای کاری از رابطه ۹ و دستیابی به ارجحیت و اولویت شاخصها و واحدهای کاری از نظر گروه (رابطه ۱۰).

$$P_{ih}^K = \frac{P_{ih}^K(I_i^k \text{ or } TMU^k_i)}{\sum_{i=1}^k P_{ih}^K(I_i^k \text{ or } TMU^k_i)} \quad i=1,2,\dots,n_k$$

رابطه ۱۰  $P_{ih}^K = P_{1h}^K, P_{2h}^K, \dots, P_{n_k h}^K$

InM: لگاریتم نپین تعداد واحد های کاری ( $M$ ) در ادامه، مقدار  $d_j$  (درجه انحراف) از رابطه ۴ محاسبه می شود که بیان می کند شاخص مربوطه ( $j$ ) چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم گیری در اختیار تصمیم گیرنده قرار می دهد. هر چه مقادیر اندازه گیری شده شاخصی به صفر نزدیک باشد، نشان دهنده آن است که گزینه های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. لذا نقش آن شاخص در تصمیم گیری باید به  $d_j = 1 - E_j; \forall j$  همان اندازه کاهش یابد.

رابطه ۴

سپس مقدار اوزان شاخصها از رابطه ۵ محاسبه می شود.  $W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}; \forall j$  (رابطه ۵)

بر مبنای این روش شاخصی که بیشترین وزن را دارد بیشترین نقش در تصمیم گیری را نیز دارد (آذر و رجب زاده، ۱۳۸۱).

تعیین ارزشهای فازی برای اوزان شاخصها و تشکیل ماتریس اعداد فازی: به منظور برآورد شدت فرسایش بادی در قالب تئوری فازی لازم است ارزشهای مطلق به صورت اعداد فازی بیان شوند از این رو در این مرحله با توجه به دامنه نوسان ارجحیت شاخصها نسبت به هم ( $W_j$ ) و اولویت هر شاخص در هر واحدکاری یا ماتریس تصمیم گیری (جدول ۲) اقدام به تعیین ارزشهای فازی به صورت مثلثی (TFN) شد (سپهر و همکاران، ۱۳۹۱) و سپس ماتریس اعداد فازی ارجحیت شاخصها و اولویت هر شاخص در هر واحدکاری شکل گرفت (جدول ۸ و ۹).



(TMU) نسبت به هر شاخص (I) که در سطوح بالاتر (K) از واحدهای کاری واقع شده به صورت رابطه ۱۲ نمایش داده می شود.

رابطه ۱۲)

$$TMU_{ij}^K = (TMU_{1h}^K, TMU_{2h}^K, \dots, TMU_{n_k h}^K)^T$$

تشکیل ماتریس تصمیم گیری فازی: بر مبنای شکل کلی ماتریس تصمیم گیری در مدل‌های تصمیم گیری چند شاخصه و با توجه به روابط ۱۱ و ۱۲ ماتریس تصمیم گیری فازی شکل گرفت (جدول ۴).

جدول ۴: ماتریس تصمیم گیری فازی

TMU <sub>i</sub> <sup>k</sup>	Criterion				P <sub>i</sub> <sup>K</sup>
	I <sup>K-1</sup> <sub>1</sub>	I <sup>K-1</sup> <sub>2</sub>	...	I <sup>K-1</sup> <sub>N<sub>K-1</sub></sub>	
TMU <sup>1</sup>	a <sup>k</sup> <sub>11</sub>	a <sup>k</sup> <sub>12</sub>	...	a <sup>k</sup> <sub>1nk-1</sub>	P <sub>1</sub> <sup>K</sup>
TMU <sup>2</sup>	a <sup>k</sup> <sub>21</sub>	a <sup>k</sup> <sub>22</sub>	...	a <sup>k</sup> <sub>2nk-1</sub>	P <sub>2</sub> <sup>K</sup>
:	:	:	:	:	:
TMU <sup>k</sup>	a <sup>k</sup> <sub>nk1</sub>	a <sup>k</sup> <sub>nk2</sub>	...	a <sup>k</sup> <sub>nk nk-1</sub>	P <sub>n</sub> <sup>K</sup>

بر این مبنا واحد کاری که بیشترین ضریب اولویت را داشته باشد به عنوان بهترین واحد کاری ارزیابی می شود به عبارتی کمترین میزان پتانسیل فرسایش بادی بر مبنای مجموعه شاخص‌های موثر در فرایند فرسایش در این واحدها ارزیابی می شود و بالعکس (شکل ۴).

این رابطه بیانگر ارجحیت هر شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها در دستیابی به هدف "ارزیابی خطر فرسایش بادی" و اولویت هر واحد کاری ماتریس فازی I<sup>k</sup>م نسبت به هر شاخص است. بنابراین ارجحیت شاخصها نسبت به هدف را می توان به صورت رابطه ۱۱ نمایش داد.

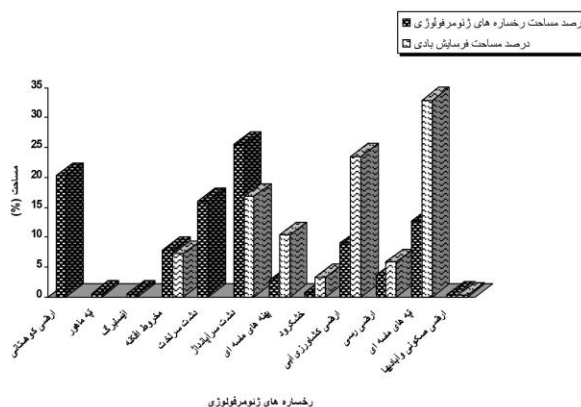
رابطه ۱۱)

$$I^{K-1} = (I^{K-1}_1, I^{K-1}_2, \dots, I^{K-1}_{n_{k-1}})$$

در این رابطه ارجحیت (وزن نسبی) هر شاخص (I) نسبت به هدف که در سطح بالاتر (K-1) قرار گرفته بیان می شود و اولویت هر واحد کاری

ادغام اوزان نسبی ارجحیت و اولویت شاخص‌ها و واحدهای کاری از روش میانگین موزون (رابطه ۱۱) و برآورد ضریب اولویت یا شدت فرسایش واحدهای کاری بر مبنای مجموعه شاخص‌ها از نظر گروه (P<sub>i</sub><sup>K</sup>) (رابطه ۱۳).

$$P_i^K = \sum_{j=1}^{n_{k-1}} TMU_{ij}^k I_j^{k-1} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$



شکل ۴: مقایسه‌ای مساحت طبقات رخساره های مرفولوژی با مساحت مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی

طبقه بندی ضرائب اولویت واحدهای کاری و تهیه نقشه پتانسیل فرسایش بادی: در نهایت با طبقه بندی ضریب اولویت واحدهای کاری ( $P_i^k$ ) (جدول ۶)، هر واحدکاری با توجه به شدت فرسایش محاسبه شده در یکی از طبقات قرار می گیرد. سپس بر روی نقشه واحدهای کاری، از تلفیق واحدهای دارای طبقات یکسان، نقشه های نهایی پتانسیل خطر فرسایش بادی در محیط Arc View بدست می آید (شکل ۵) (صادقی روش، ۱۳۸۷؛ صادقی روش، ۲۰۰۹).

### نتایج

پس از تهیه نقشه واحدهای کاری (شکل ۲)، تعیین شاخص های موثر و تهیه نقشه پراکندگی

حوضه های عملکردی فرسایش بادی (شکل ۳) مطابق روش پژوهش، نمودارهای مقایسه ای مساحت ناشی از فرسایش بادی به نسبت هر کدام از عوامل مؤثر در فرسایش شکل گرفت. به منظور اجتناب از طولانی شدن مقاله یک مورد از این نمودارها ارائه شده است (شکل ۴) که بیانگر پتانسیل فرسایش هر طبقه از نقشه های موضوعی در مقابل فرسایش است. بنابراین، بر اساس دامنه نوسان متغیرها و ارتباط آنها با ظهور رخساره های فرسایش بادی در منطقه، متغیرها به سطوح مختلف تقسیم و در مقیاس ۱ الی ۹ وزن دهی شد (جدول ۲). سپس با توجه به جدول ارزش گذاری شاخص ها در مقیاس واحد (جدول ۲)، ارزش هر شاخص در هر واحدکاری برآورد شد. (جدول ۵).

جدول ۵: ماتریس تصمیم گیری بر مبنای ارزش هر شاخص در هر واحد کاری

کاربری اراضی	پوشش گیاهی	خاک	واحدهای سنگ شناسی	ژئومرفولوژی	تغییرات ارتفاع	شاخص ( $I_i$ )
						واحدکاری (TMU)
۲	۴	۱	۱	۱	۱	(BMG)
۳	۲	۲	۵	۱	۲	(MGPC)
۴	۶	۳	۸	۲	۴	(BPPC)
۳	۳	۷	۹	۸	۷	(BEP)
۴	۸	۶	۹	۶	۶	(EPPC)
۶	۵	۸	۹	۷	۸	(PAG)
۸	۶	۸	۹	۹	۸	(CGPC)
۸	۴	۹	۹	۹	۸	(BCG)
۴	۲	۹	۷	۸	۹	(BSD)
۹	۷	۹	۷	۸	۸	(SDPC)
۵	۷	۶	۵	۶	۶	(IA)
۵	۲	۲	۳	۱	۲	(MAG)

در این جدول: (BMG): واحد کاری اراضی کوهستانی لخت، (MGPC): واحد کاری اراضی کوهستانی با پوشش گیاهی، (MAG): واحد کاری اراضی کشاورزی کوهستانی، (BPPC): واحد کاری دشت سر لخت با پوشش گیاهی، (BEP): واحد کاری دشت سرآپانداز لخت، (EPPC): واحد کاری دشت سر آپانداز با پوشش، (IA): واحد کاری نواحی صنعتی، (BSD): واحد کاری تپه های ماسه ای لخت، (SDPC): واحد کاری تپه های ماسه ای با پوشش، (BCG): واحد کاری اراضی رسی لخت، (CGPC): واحد کاری اراضی رسی با پوشش گیاهی، (PAG): واحد کاری اراضی کشاورزی دشتی، (BCG): واحد کاری اراضی رسی لخت، می باشد

مطابق ادبیات تحقیق به منظور انجام سایر فازهای مدل تحلیلی سلسله مراتبی فازی در راستای پهنه بندی پتانسیل خطر فرسایش بادی اوزان شاخص های مطرح در فرایند فرسایش بادی با دامنه نوسان ۰/۰۵ (جدول ۸) و ارزش هر شاخص در هر واحد کاری با دامنه نوسان ۰/۵ برآورد شد (جدول ۹).

در ادامه بر مبنای ماتریس تصمیم گیری (جدول ۵) و از رابطه ۱، "ماتریس آنتروپی واحد های کاری نسبت به هر شاخص" برآورد شد (جدول ۶). و به دنبال آن آنتروپی شاخص های موثر در فرسایش بادی ( $E_j$ ) از رابطه ۲ محاسبه شد و با محاسبه درجه انحراف ( $d_j$ ) و اوزان شاخص ها ( $W_j$ ) از روابط ۴ و ۵ اهمیت شاخص های مطرح در فرایند فرسایش مطابق جدول ۷ برآورد شد.

جدول ۶: ماتریس آنتروپی واحد های کاری نسبت به هر شاخص

شاخص ( $I_i$ )	تغییرات ارتفاع	ژئومرفولوژی	واحدهای سنگ شناسی	خاک	پوشش گیاهی	کاربری اراضی
(BMG)	۰	۰	۰	۰	۵/۵۴۵۲	۱/۳۸۶۳
(MGPC)	۱/۳۸۶۳	۰	۸/۰۴۷۲	۱/۳۸۶۳	۱/۳۸۶۳	۳/۲۹۵۸
(BPPC)	۵/۵۴۵۲	۱/۳۸۶۳	۱۶/۶۳۵۵	۳/۲۹۵۸	۱۰/۷۵۰۵	۵/۵۴۵۲
(BEP)	۱۳/۶۲۱۴	۱۶/۶۳۵۵	۱۹/۷۷۵۰	۱۳/۶۲۱۴	۳/۲۹۵۸	۳/۲۹۵۸
(EPPC)	۱۰/۷۵۰۵	۱۰/۷۵۰۵	۱۹/۷۷۵۰	۱۰/۷۵۰۵	۱۶/۶۳۵۵	۵/۵۴۵۲
(PAG)	۱۶/۶۳۵۵	۱۳/۶۲۱۴	۱۹/۷۷۵۰	۱۶/۶۳۵۵	۸/۰۴۷۲	۱۰/۷۵۰۵
(CGPC)	۱۶/۶۳۵۵	۱۹/۷۷۵۰	۱۹/۷۷۵۰	۱۶/۶۳۵۵	۱۰/۷۵۰۵	۱۶/۶۳۵۵
(BCG)	۱۶/۶۳۵۵	۱۹/۷۷۵۰	۱۹/۷۷۵۰	۱۹/۷۷۵۰	۵/۵۴۵۲	۱۶/۶۳۵۵
(BSD)	۱۹/۷۷۵۰	۱۶/۶۳۵۵	۱۳/۶۲۱۴	۱۹/۷۷۵۰	۱/۳۸۶۳	۵/۵۴۵۲
(SDPC)	۱۶/۶۳۵۵	۱۶/۶۳۵۵	۱۳/۶۲۱۴	۱۹/۷۷۵۰	۱۳/۶۲۱۴	۱۹/۷۷۵۰
(IA)	۱۰/۷۵۰۵	۱۰/۷۵۰۵	۸/۰۴۷۲	۱۰/۷۵۰۵	۱۳/۶۲۱۴	۸/۰۴۷۲
(MAG)	۱/۳۸۶۳	۰	۳/۲۹۵۸	۱/۳۸۶۳	۱/۳۸۶۳	۸/۰۴۷۲
مجموع	۱۳۹/۷۵۷۲	۱۲۵/۹۶۵۲	۱۶۲/۱۴۳۵	۱۳۳/۷۸۶۸	۹۰/۵۸۵۳	۱۰۴/۵۰۴۴

جدول ۷: برآورد آنتروپی، درجه انحراف و اوزان شاخص های مطرح در فرایند فرسایش بادی

شاخص ( $I_i$ )	تغییرات ارتفاع	ژئومرفولوژی	واحدهای سنگ شناسی	خاک	پوشش گیاهی	کاربری اراضی
$E_j$	-۵۲/۲۱۸۱	-۵۰/۶۹۲۱	-۶۵/۲۵۱۲	-۵۳/۸۳۹۷	-۳۶/۴۵۴۲	-۴۲/۰۵۵۶
$d_j$	-۵۳/۲۱۸۱	-۵۱/۶۹۲۱	-۶۶/۲۵۱۲	-۵۴/۸۳۹۷	-۳۷/۴۵۴۲	-۴۳/۰۵۵۶
$W_j$	۰/۱۷۳۶	۰/۱۶۸۶	۰/۲۱۶۱	۰/۱۷۸۹	۰/۱۲۱۲	۰/۱۴۰۵

جدول ۸: اعداد فازی اوزان شاخص‌های مطرح در فرایند فرسایش بادی با دامنه نوسان ۰/۰۵

شاخص (I <sub>i</sub> )	تغییرات ارتفاع (H)	ژئومرفولوژی (GE)	واحدهای سنگ شناسی (LI)	خاک (S)	پوشش گیاهی (PC)	کاربری اراضی (LU)	مجموع
W <sub>j</sub>	۰/۱۷۴، ۰/۲۲۴ ۰/۱۲۴،	۰/۱۶۹، ۰/۲۱۹ ۰/۱۱۹	۰/۲۱۶، ۰/۲۶۶ ۰/۱۶۶	۰/۱۷۹، ۰/۲۲۹ ۰/۱۲۹	۰/۱۲۱، ۰/۱۷۱ ۰/۰۷۱	۰/۱۴، ۰/۱۹ ۰/۰۹	۱/۲۹۹ ۰/۹۹۹ ۰/۶۹۹

جدول ۹: اعداد فازی (مرزهای فازی مثلثی) برای ارزش هر شاخص در هر واحد کاری با دامنه نوسان ۰/۵

شاخص (I <sub>i</sub> )	تغییرات ارتفاع	ژئومرفولوژی	واحدهای سنگ شناسی	خاک	پوشش گیاهی	کاربری اراضی
(BMG)	۰/۵، ۱، ۱/۵	۰/۵، ۱، ۱/۵	۰/۵، ۱، ۱/۵	۰/۵، ۱، ۱/۵	۳/۵، ۴، ۴/۵	۱/۵، ۲، ۲/۵
(MGPC)	۱/۵، ۲، ۲/۵	۰/۵، ۱، ۱/۵	۴/۵، ۵، ۵/۵	۱/۵، ۲، ۲/۵	۱/۵، ۲، ۲/۵	۲/۵، ۳، ۳/۵
(BPPC)	۳/۵، ۴، ۴/۵	۱/۵، ۲، ۲/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵	۲/۵، ۳، ۳/۵	۵/۵، ۶، ۶/۵	۳/۵، ۴، ۴/۵
(BEP)	۶/۵، ۷، ۷/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۶/۵، ۷، ۷/۵	۲/۵، ۳، ۳/۵	۲/۵، ۳، ۳/۵
(EPPC)	۵/۵، ۶، ۶/۵	۵/۵، ۶، ۶/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۵/۵، ۶، ۶/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵	۳/۵، ۴، ۴/۵
(PAG)	۷/۵، ۸، ۸/۵	۶/۵، ۷، ۷/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵	۴/۵، ۵، ۵/۵	۵/۵، ۶، ۶/۵
(CGPC)	۷/۵، ۸، ۸/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵	۵/۵، ۶، ۶/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵
(BCG)	۷/۵، ۸، ۸/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۳/۵، ۴، ۴/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵
(BSD)	۸/۵، ۹، ۹/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵	۶/۵، ۷، ۷/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۱/۵، ۲، ۲/۵	۳/۵، ۴، ۴/۵
(SDPC)	۷/۵، ۸، ۸/۵	۷/۵، ۸، ۸/۵	۶/۵، ۷، ۷/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵	۶/۵، ۷، ۷/۵	۸/۵، ۹، ۹/۵
(IA)	۵/۵، ۶، ۶/۵	۵/۵، ۶، ۶/۵	۴/۵، ۵، ۵/۵	۵/۵، ۶، ۶/۵	۶/۵، ۷، ۷/۵	۴/۵، ۵، ۵/۵
(MAG)	۱/۵، ۲، ۲/۵	۰/۵، ۱، ۱/۵	۲/۵، ۳، ۳/۵	۱/۵، ۲، ۲/۵	۱/۵، ۲، ۲/۵	۴/۵، ۵، ۵/۵
مجموع	۶۳، ۶۹، ۷۵	۶۰، ۶۶، ۷۲	۷۵، ۸۱، ۸۷	۶۴، ۶۰، ۷۶	۵۰، ۵۶، ۶۲	۵۵، ۶۱، ۶۷

پس از تعیین جدول و مرزهای فازی مثلثی، ارزش  $\tilde{S}_k$  که خود یک عدد فازی مثلثی ترکیبی است، برای شاخص‌ها نسبت به هم و واحدهای کاری نسبت به هر شاخص از رابطه ۶ محاسبه شد و در ادامه ارزش هر عدد فازی مثلثی ترکیبی ( $\tilde{S}_k$ ) نسبت به هم از رابطه ۷ مورد مقایسه قرار گرفت و درجه بزرگی آنها نسبت به هم برآورد شد. و به دنبال آن درجه بزرگی هر عدد فازی مثلثی ترکیبی از K عدد مثلثی فازی ترکیبی از رابطه ۸

برآورد شد. بدین ترتیب پس از برآورد اوزان نابهنجار سایر واحدهای کاری نسبت به سایر شاخص‌ها، این اوزان از رابطه ۹ بهنجار شد و ارجحیت و اولویت شاخص‌ها و واحدهای کاری از نظر گروه حاصل شد. در نهایت با برآورد کلیه اوزان بهنجار شده شاخص‌ها نسبت به هم و واحد های کاری نسبت به هر شاخص، در قالب کلی ماتریس تصمیم‌گیری در محیط فازی (جدول ۲)، ماتریس تصمیم‌گیری فازی شدت فرسایش بادی واحدهای کاری از نظر گروه (جدول ۱۰) شکل

نتایج حاصل از نقشه پهنه بندی پتانسیل خطر فرسایش بادی نشانگر آن است که واحدهای دشت سرآبناژ لخت (BEP)، اراضی رسی لخت (BCG) و با پوشش گیاهی (CGPC)، تپه‌های ماسه‌ای لخت (BSD) و اراضی کشاورزی (PAG) در میان سایر واحدهای کاری واجد بیشترین پتانسیل رخداد فرسایش بادی می‌باشند.

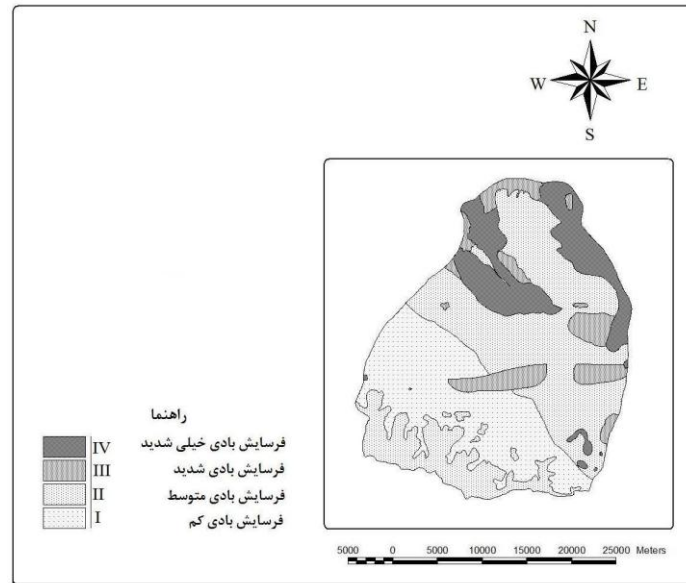
گرفت. با توجه به الگوریتم کار مدل تحلیلی سلسله مراتبی فازی در این مرحله ضریب الویت حاصل شده در طبقات شدت دسته بندی شدند (جدول ۱۱) و در نهایت بر روی نقشه واحدهای- کاری، از تلفیق واحدهای دارای طبقات یکسان، نقشه های نهایی پتانسیل خطر فرسایش بادی در محیط Arc View به دست آمد (شکل ۵).

جدول ۱۰: ماتریس تصمیم گیری فازی شدت فرسایش بادی واحدهای کاری از نظر گروه

طبقات شدت	Pi	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	خاک	واحدهای سنگ شناسی	ژئومرفولوژی	تغییرات ارتفاع	شاخص (I <sub>i</sub> )
								واحدکاری (TMU)
متوسط	۰/۰۱۷۵	۰/۲۶۹۷	۰/۰۹۴۵	۰/۳۴۹۱	۱/۷۴۲۹	۰/۳۶۶۲	۰/۴۲۲۷	(BMG)
کم	۰/۰۵۴۲	۰/۱۹۷۹	۰/۲۴۳۲	۰/۱۸۹۸	۰/۴۶۱۹	۰/۳۶۶۲	۰/۳۵۲۳	(MGPC)
کم	۰/۰۸۹۶	۰/۱۳۳۹	۰/۰۲۵۳	۰/۲۰۴۲	۰/۲۶۴۶	۰/۲۸۵۳	۰/۱۸۲۸	(BPPC)
خیلی شدید	۰/۰۳۹۶	۰/۱۹۷۸	۰/۳۷۸۱	۰/۱۸۹۸	۰/۴۷۳۳	۰/۰۶۷۵	۰/۰۲۱۹	(BEP)
متوسط	۰/۰۰۴۳	۰/۱۳۳۹	۰/۱۲۴۲	۰/۱۴۳۱	۰/۴۷۳۳	۰/۰۳۰۴	۰/۰۴۰۴	(EPPC)
خیلی شدید	۰/۰۴۲۸	۰/۰۲۷۸	۰/۰۳۱۸	۰/۰۶۰۸	۰/۴۷۳۳	۰/۰۲۰۶	۰/۰۷۹۹	(PAG)
شدید	۰/۰۱۸۵	۰/۰۶۹	۰/۰۲۵۲	۰/۰۶۰۸	۰/۴۷۳۳	۰/۱۱۰۹	۰/۰۷۹۹	(CGPC)
خیلی شدید	۰/۰۳۲۲	۰/۰۶۹	۰/۰۹۴۷	۰/۱۰۲۳	۰/۴۷۳۳	۰/۱۱۰۹	۰/۰۷۹۹	(BCG)
خیلی شدید	۰/۰۳۰۰	۰/۱۳۳۹	۰/۲۴۳۲	۰/۱۰۲۳	۰/۰۴۰۳	۰/۰۶۷۵	۰/۱۳۳۵	(BSD)
متوسط	۰/۰۰۷۵	۰/۱۰۹۸	۰/۰۷۷۱	۰/۰۵۴۲	۰/۰۴۰۳	۰/۰۶۷۵	۰/۰۷۹۹	(SDPC)
شدید	۰/۰۱۸۸	۰/۰۷۶۴	۰/۰۷۷۱	۰/۰۳۱۹	۰/۴۶۱۹	۰/۰۳۰۴	۰/۰۴۰۴	(IA)
کم	۰/۰۳۳۹	۰/۰۷۶۴	۰/۲۴۳۲	۰/۲۷۲۴	۱/۰۴۴۹	۰/۳۶۶۲	۰/۴۰۶۵	(MAG)

جدول ۱۱: طبقه بندی واحدهای کاری از لحاظ شدت فرسایش بادی

علائم	شدت فرسایش بادی (EI)	طبقات شدت (CLASS)	
I	> ۰/۰۲۵	low	کم (ناچیز)
II	۰/۰۲۵ - ۰	moderate	متوسط
III	۰ - ۰/۰۲۵	intense	شدید
IV	< - ۰/۰۲۵	very intense	خیلی شدید



شکل ۵: پهنه بندی پتانسیل خطر فرسایش بادی در حوضه خضراًباد

### بحث و نتیجه گیری

باشند یا طبقات امتیازدهی نمی‌توانند به صورت واقعی بیانگر عملکرد شاخص‌ها در فرسایش باشند. در عین حال در مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی با لحاظ قضاوت‌های فازی تصمیم‌گیران در فرایند تصمیم‌گیری و همچنین اولویت بندی شاخص‌های موثر در فرایند فرسایش بادی بر مبنای مدل آنتروپی شانون و ارائه پهنه‌بندی بر مبنای این اولویت‌بندی، نتایج حاصله از دقت بالاتری برخوردار است. نتایج حاصله از کاربرد مدل سلسله مراتبی فازی نشان داد که واحدهای اراضی کشاورزی (PAG)، اراضی رسی لخت (BCG)، دشت سرآپانداژ لخت (BEP) و تپه‌های ماسه‌ای لخت (BSD) به ترتیب با کمترین ارزش کمی ۰/۰۴۲۸، ۰/۰۳۹۶، ۰/۰۳۲۲ و ۰/۰۳ در معرض فرسایش بادی خیلی شدید قرار دارند. به طور کلی، بر اساس لایه نهایی ۱۳/۴۵ درصد از مساحت حوضه خضراًباد در معرض خطر زیاد (خیلی شدید) فرسایش بادی قرار دارد و با

ارزیابی خطر فرسایش بادی امروزه نقش مهمی را در مدیریت پایدار منابع طبیعی ایفا می‌کند. از این رو، به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی از مدل تحلیلی سلسله مراتبی فازی استفاده شد. در این مدل، همانند مدل طبقه‌بندی رقومی (صادقی‌روش، ۱۳۹۲) انتخاب شاخص‌ها و طبقه‌بندی آنها در مقیاس واحد در ارتباط با معنی دار بودن پراکندگی رخساره فرسایش بادی که بیانگر مناطق تحت تأثیر است، در مقایسه با توزیع شاخص‌های موثر برآورد می‌شود. از این رو شاخص‌ها به صورت کاملاً محلی انتخاب و در واحدهای یکسان طبقه‌بندی شده و سپس با مطالعات میدانی ارزش هر شاخص در هر واحدکاری تعیین می‌شود. بنابراین، نتایج حاصله از این مدل دارای ضریب اطمینان بیشتری است، در حالی که در مدل‌های دیگر از جمله اریفر از آنجا که شاخص‌ها و طبقه‌بندی آنها به صورت پیش فرض تعیین شده لذا به نظر می‌رسد در بعضی مکانها یا شاخص‌ها در فرسایش نمی‌توانند موثر

- ۲۱/۸۴ درصد منطقه را تهدید می کند.
- سپهر، ع.، اختصاصی، م. ر. و المدرسی، س. ع.، ۱۳۹۱. ایجاد سامانه شاخص‌های بیابانزایی بر اساس DPSIR (بهره گیری از روش فازی - تاپسیس)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. سال ۲۳، پیاپی ۴۵، شماره ۱، ص ۵۰-۳۳.
- صادقی روش، م. ح.، ۱۳۸۷. بررسی عوامل تأثیرگذار بیابانزایی در تخریب محیط زیست، رساله دکتری رشته -محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات تهران. دانشگاه آزاد، ۳۹۵ص.
- صادقی روش، م. ح.، ۱۳۹۲. کاربرد مدل طبقه بندی رقومی به منظور پهنه بندی پتانسیل خطر فرسایش بادی، مطالعه موردی: منطقه خضرآباد یزد، مجله پژوهشهای خاک (علوم خاک و آب)، جلد ۲۷ شماره ۴، ص ۶۰۳-۵۹۳.
- قهرودی تالی، م.، ۱۳۸۳. کاربرد Arc View در ژئومرفولوژی. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تربیت معلم، ۲۷۴ص.
- مرکز ملی بیابانزایی، ۱۳۸۵. مطالعات شناسائی کانونهای بحرانی فرسایش بادی و تعیین اولویت های اجرایی استان یزد- شهرستان صدوق. گزارش طرح تحقیقاتی، انتشارات جهاد کشاورزی استان یزد، ۱۳۵ص.
- Azarkar, S. M., Ahmadi, H., Khorasani, N. and Karami, M., 2006. Investigating the relationship between wind erosion and value of animal habitats in desert areas, Environment Science and Technology, v. 2(4), p. 387-393.
- Cebeci, U., 2009. Fuzzy AHP- based decision support system for selecting ERP system in textile industry by using balanced scorecard, journal of Expert System with Applications, v. 36, p. 8900-8909.
- Chang, D. Y., 1996. Application of the extent analysis method on fuzzy AHP, European journal of operational research, v. 95(3), p. 649-655.
- Cheepil, W. S., and Woodruff, N. P., 1954. Estimation of wind erodibility of field surfaces, journal of Soil and Water Conservation, v. 9(6), p. 256-265.
- Dagdeviren, M., Yavuz, S. and Kilinc, N., 2009. Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment, journal of Expert Systems with Applications, v. 36, p. 8143-8151.
- Dagdeviren, M. and Yuksel, I., 2008. Developing an Analytical Hierarchy Process (AHP) model for behavior-based management, journal of

- Information Sciences, v.178, p. 1717-1733.
- Dong, Z., Wang, X. and Liu, L., 2000. Wind erosion in arid and semi-arid China: an overview, *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 55(2), p. 439-444.
- Jafari, M., Nasri, M., Shameli, M. H., Jafari, M. and Jafari. M., 2009. Management of saxaul-plot (*Haloxylon* sp.) lands in desert areas using GIS technique and field assessments (case study: Aran and Bidgol region, Iran), *Journal of Human and Social Sciences*, v. 4(7), p. 524-532.
- Larrhoven, V. and Padrycz, W., 1983. A fuzzy extension of saaty's priority theory, *Journal of fuzzy sets and systems*, v. 11(3), p. 229-241.
- Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., 2000. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, 724 pages.
- Sadeghi Ravesh, M. H., Ahmadi, H., Zehtabian, G. R. and Rehayi Khoram, M., 2009. Development of the Numerical Taxonomy Model to Assess Desertification: An example of modeling intensity in central Iran, *Journal of Philipp Agric Scientist*, v. 92(2), p. 213-227.
- Sadeghi Ravesh, M. H., Khosravi, H. and Ghasemian, S., 2014. Application of fuzzy analytical hierarchy process for assessment of combating-desertification alternatives in central Iran, *Journal of Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-014-1345-7.
- Sepehr, A., Hassanli, A. M., Ekhtesasi, M. R. and Jamali, J. B., 2007. Quantitative assessment of desertification in South of Iran using MEDALUS method, *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, v. 134(2), p. 243-254.
- Sredjevic, B. and Medeiros, Y. D. P., 2008. Fuzzy AHP Assessment of Water Management Plans, *Journal of Water Resources Management*. v. 22, p. 877-894.
- Woodruff, N. P. and Siddoway, F. H., 1965. A wind erosion equation, *Soil Science Society of America Journal*, v. 29(5), p. 602-608.
- Zhu, K. J., Jing, Y. and Chang, D.Y., 1999. Theory and Methodology, A discussion on extent analysis method and applications of fuzzy AHP, *Journal of European journal of operational research*, v. 116, p. 450-456.