

## کاربرد روش میانگین هندسی در تلفیق لایه‌های اطلاعاتی ژئوشیمیایی برای تولید نقشه شاهد ژئوشیمی

میثم نیک‌فرجام<sup>۱</sup>، اردشیر هزارخانی<sup>۲</sup>، کاوه پازند<sup>۳</sup>

- ۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
- ۲- استاد، گروه مهندسی معدن، اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
- ۳- دکترا، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۰۸/۰۴، پذیرش ۱۳۹۷/۰۱/۲۲)

### چکیده

نقشه شاهد ژئوشیمی یکی از مهم‌ترین لایه‌های اطلاعاتی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی است. در این پژوهش برای رفع کاستی‌های نقشه‌های شاهد گسسته، از روش فازی پیوسته برای تهیه نقشه شاهد ژئوشیمی استفاده شد. ناحیه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورزقان است که در زون متالوژنی ارسباران واقع شده و میزبان کانسار مهم مس پورفیری-اسکارن سونگون است. از ۱۰۶۷ نمونه رسوب آبراه‌های که توسط سازمان زمین‌شناسی در ورقه ورزقان برداشت شده است به عنوان داده اولیه برای انجام مطالعات ژئوشیمی استفاده شد. به دلیل نوع نمونه‌برداری انجام شده در این ناحیه، ابتدا حوضه آبراه‌های بالادست برای هر کدام از نمونه‌ها ترسیم و مشخصات هر نمونه به حوضه بالادست مانند آن نسبت داده شد. با توجه به این که عناصری مانند مس، مولیبدن، نقره، سرب، روی، طلا و آرسنیک، به عنوان عناصر شاخص کانسارهای مس پورفیری مطرح‌اند، از عناصر یاد شده برای شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی مس پورفیری استفاده شد. برای فازی‌سازی نقشه هر یک از عناصر گفته شده، از تابع Large و لجستیک بهره گرفته شد. پس از فازی‌سازی، از روش میانگین هندسی برای تلفیق نقشه‌های فازی حاصل شده، استفاده شد. نقشه تلفیق یافته به کمک نمودارهای آهنگ پیش‌بینی-مساحت اشغال شده مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. بر اساس این اعتبارسنجی، مشاهده شد که تلفیق نقشه‌های فازی شده با تابع Large، نتایج بهتری ارائه می‌دهد. محل تقاطع منحنی در این نمودار نمایانگر این است که با اشغال ۲۰ درصد از مساحت این ناحیه، ۸۰ درصد از کانسارهای مس پورفیری شناخته شده، قابل شناسایی‌اند.

### کلمات کلیدی

نقشه شاهد ژئوشیمی، تابع Large، روش میانگین هندسی، تلفیق، ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورزقان.

## ۱- مقدمه

در سالیان اخیر محققان توجه ویژه‌ای به این موضوع کرده‌اند و روش‌های بهینه‌ای برای تهیه هر یک از لایه‌های اطلاعاتی برای نوع خاصی از کانسارها را ارائه داده‌اند. برای مثال می‌توان به پژوهشی که در مورد کانسارهای طلای کوه‌زایی در بخش طلاخیز سقز- سردشت که توسط الماسی و همکاران در سال ۲۰۱۷ انجام شده است، اشاره کرد [۳]. با توجه به موارد یاد شده و اهمیت جزییات روش‌های مورد استفاده در تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی، در این پژوهش با تمرکز بر دو تابع فازی‌ساز Large و لجستیک، عملکرد روش میانگین هندسی در تلفیق نقشه‌های شاهد ژئوشیمی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

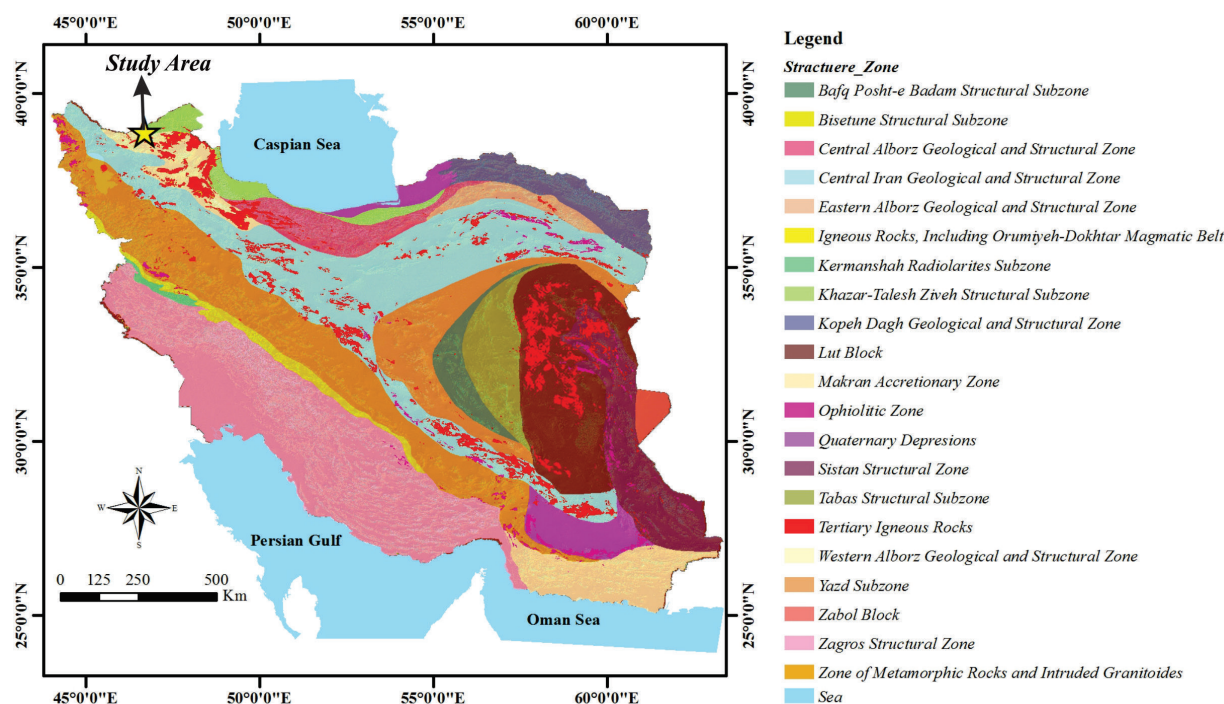
## ۲- زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه

ورقه یکصد هزارم ورزقان در تقسیم‌بندی زون‌های ساختاری کشور، در زون البرز غربی- آذربایجان قرار دارد (شکل ۱) که از حدود ۲۵ کیلومتری شرق اهر تا ۳۵ کیلومتری شرق جلفا امتداد دارد و شامل چهارگوش اهر و گوشه شمالی و شمال شرقی چهارگوش تبریز- پلدشت است. این محدوده به دلیل حضور فراوان معادن، کانسارها و اندیس‌های مس پورفیری به ویژه معدن مس سونگون، مس و آهن اسکارن (مانند معدن متروکه انجرد) و طلا، نقره و مس‌اپی‌ترمال (مانند اندیس‌های معدنی هیزه‌جان) به عنوان یک ایالت متالورژی مهم در شمال غرب ایران به شمار می‌رود [۴]. قسمت اعظم این ناحیه را سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و توده‌های گرانیتوئیدی الیگومیوسن تشکیل می‌دهد. به لحاظ چینه‌شناسی، قدمت واحدهای سنگی موجود در ناحیه مورد مطالعه مربوط به سنگ‌های دگرگونی قبل از کرتاسه است. واحدهای کرتاسه این ناحیه که عمدتاً به صورت واحدهای آتشفشانی- رسوبی، واحدهای رسوبی و واحدهای ولکانیک نمایان می‌شوند، در بخش‌های مرکزی و شمالی ناحیه، قابل مشاهده‌اند. واحدهای آتشفشانی و رسوبی پالئوسن با گسترش در بخش‌های میانی نقشه، قدیمی‌ترین واحدهای سنوزوئیک ورقه ورزقان‌اند. فعالیت آتشفشانی در ائوسن سبب مشاهده واحدهایی همچون آندزیت، داسیت و تراکیت در بخش‌هایی از مرکز و شمال ناحیه مورد مطالعه شده است. واحدهای دوره الیگوسن که عمدتاً گرانیت و گرانودیوریت، مونزونیت و دیوریت هستند، سبب کانی‌سازی‌های با ارزشی در اطراف این توده‌های نفوذی شده‌اند. از جمله مهم‌ترین کانی‌سازی‌های

امروزه از روش‌های متعددی برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف در تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی استفاده می‌شود. لایه‌های اطلاعاتی که در این نقشه‌ها مورد تلفیق قرار می‌گیرند، شامل نقشه‌های شاهد ژئوشیمی، ژئوفیزیک، دورسنجی و زمین‌شناسی است. از روش‌هایی که برای تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی استفاده می‌شود، می‌توان به روش‌های داده‌محور و دانش‌محور اشاره کرد. روش‌های دانش‌محور برای نواحی استفاده می‌شود که عملیات اکتشافی به خوبی در آن‌ها انجام نشده یا تعداد کانسارهای شناخته شده اندک است. در این روش، از نظر و تجربه کارشناس برای وزن‌دهی کمک گرفته می‌شود. در طرف مقابل، روش‌های داده‌محور برای مناطقی استفاده می‌شود که تعداد کانسارهای شناخته شده در آن ناحیه زیاد باشد [۱]. روش‌های فازی از جمله روش‌های دانش‌محور است که از نظر کارشناس در وزن‌دهی استفاده می‌کند [۲].

در این پژوهش از ۱۰۶۷ نمونه رسوب آبراه‌های که توسط سازمان زمین‌شناسی برداشت و ارائه شده است، استفاده شد. با توجه به ماهیت نمونه‌برداری انجام شده در این ناحیه، ابتدا حوضه‌های بالادست هر کدام از نمونه‌ها با استفاده از شبکه آبراه‌های و خطوط توپوگرافی ترسیم شدند و مشخصات هر نمونه به حوضه بالادست آن، نسبت داده شد.

تاکنون در مطالعات و پژوهش‌های مختلف از روش‌های متنوعی برای تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی استفاده و اعتبارسنجی آن‌ها انجام شده است. توجه به جزییات روش‌های مورد استفاده برای تهیه هر یک از لایه‌های اطلاعاتی، بسیار مهم است که باید مورد توجه قرار گیرد. به عنوان مثال در تهیه یک نقشه پتانسیل معدنی که با روش فازی تهیه شده است، توابع مختلف فازی‌ساز برای فازی کردن داده‌های هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی وجود دارد که هر تابع نیز پارامترهایی دارد که عدم انتخاب صحیح آن‌ها می‌تواند خروجی نادرستی را نتیجه دهد. علاوه بر این، روش‌های مختلفی نیز برای تلفیق هر کدام از نقشه‌های شاهد و لایه‌های اطلاعاتی وجود دارد که توسط محققان مختلف استفاده شده است. از این‌رو، در نظر گرفتن پیچیدگی‌های یاد شده در قالب نوع تابع فازی‌ساز و پارامترهای مختص آن و نیز نوع تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، از جمله موارد مهم است که در تولید یک نقشه پتانسیل معدنی بسیار تاثیرگذار است.



شکل ۱: موقعیت ناحیه مورد مطالعه در نقشه زون‌های ساختاری ایران (اصلاح پس از آقناباتی، ۱۳۸۳) [۱۵]

پورفیری شده است. زون‌بندی فلزی، به ویژه در بخش‌های عمیق سیستم‌های مس پورفیری به خوبی ثبت شده است. عناصر Cu، Mo و Au هسته‌های پتاسیک، کلریت-سریسیت و سریسیت سیستم‌های مس پورفیری را مشخص می‌کند. هسته‌های Cu، Mo و Au هاله‌هایی در مقیاس کیلومتری دارند که با مقادیر آنومالی‌هایی از عناصر Zn، Pb، As و Ag که شرایط دما پایین و هیدروترمال را نشان می‌دهند، معرفی می‌شوند [۵]. بنابراین با در نظر گرفتن عناصر Cu، Mo، Au، Zn، Pb و As به عنوان عناصر شاخص کانسارهای مس پورفیری، نقشه فازی پیوسته هر کدام از این عناصر ترسیم و سپس تلفیق شدند.

#### ۴- فرآیند فازی سازی

مجموعه‌های فازی در واقع گسترش یافته مجموعه‌های کلاسیک‌اند. مجموعه‌های کلاسیک، تنها اجازه عضویت کامل یا عدم عضویت را می‌دهند، در حالی که مجموعه‌های فازی اجازه عضویت جزئی را نیز می‌دهند. در یک مجموعه کلاسیک، عضویت یا عدم عضویت عنصر  $x$  در مجموعه  $A$ ، با یک تابع مشخصه  $\mu_A(x)$  توصیف می‌شود؛ جائیکه  $\mu_A(x) = 1$  است، اگر  $x \in A$  باشد و  $\mu_A(x) = 0$  است، اگر  $x \notin A$  باشد. تئوری

مس-مولیبدن پورفیری و نیز مس اسکارنی، می‌توان به کانسار سونگون [۵] در مرکز نقشه یکصد هزار ورزقان اشاره کرد. در زمان‌های الیگو-میوسن و پالئوسن نیز کنگلومرا و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی را می‌توان عمدتاً در بخش‌های جنوبی مشاهده کرد (شکل ۲).

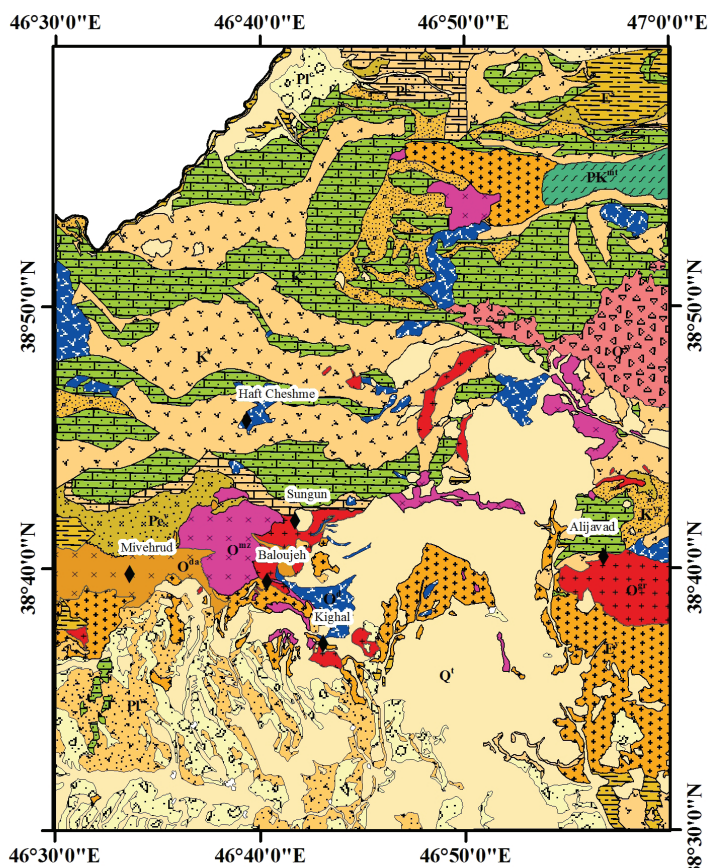
#### ۳- مدل توصیفی کانسارهای مس پورفیری

برای شناخت دقیق از پارامترهای موثر در کانی‌سازی و شکل‌گیری نوع کانسار مورد نظر، باید ابتدا مدل توصیفی کانسار هدف تعریف شود. سیستم‌های مس پورفیری در حجم‌های بزرگ (۱۰ تا بیش از ۱۰۰ کیلومتر مکعب) از سنگ‌های آلتزه شده، تعریف می‌شوند که روی استوک‌ها قرار گرفته‌اند. همچنین ممکن است شامل کانی‌سازی‌های اسکارن، جانشیننی کربنات‌ها، میزبان رسوبی و نیز اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا و متوسط، از فلزات پایه و گران‌بها باشد [۶]. مدل توصیفی کانسارهای مس پورفیری در قالب محیط زمین‌شناسی، تکتونیکی، دگرسانی‌ها و کانی‌سازی‌های رایج و نیز زون‌بندی فلزی مطرح می‌شود. در این پژوهش به دلیل اهمیت بخش ژئوشیمی و توزیع عناصر و زون‌بندی فلزی در این کانسارها، تنها اشاره مختصری به این دسته از مشخصات کانسارهای مس

**Simplified Geological Map Of  
Varzaghan 1:100,000 Sheet**

**Rock Units**

	$Q^1$	Quaternary sediments
	$Pl^v$	Pliocene Volcanic rocks
	$Pl^c$	Pliocene Conglomerates
	$OM^c$	Oligo-Miocene Conglomerates
	$O^{sy}$	Oligocene syenites
	$O^{mz}$	Oligocene monzonites
	$O^d$	Oligocene diorites
	$O^{gr}$	Oligocene granites
	$O^{dv}$	Oligocene Volcanic rocks
	$E^v$	Eocene Volcanic rocks
	$E^s$	Eocene Sedimentary rocks
	$Pe^s$	Paleocene Sedimentary rocks
	$Pe^v$	Paleocene Volcanic rocks
	$K^v$	Cretaceous Volcanic rocks
	$K^s$	Cretaceous Sedimentary rocks
	$K^{vs}$	Cretaceous Volcano-Sedimentary rocks
	$PK^{mt}$	Pre-Cretaceous metamorphics
		Cu Occurrence



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ساده شده ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ و رزقان [۱۳]

U می‌باشد. این متغیرها ریشه در زبان طبیعی دارند ولی متغیرهای فازی در عین نادقیق بودن بسیار قابل فهم هستند و در زبان ما انسان‌ها بسیار استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال اگر X نشان دهنده ارتفاع باشد، T(X) ممکن است به‌صورت مجموعه‌های کوتاه، متوسط یا بلند ذکر شود. یک تابع عضویت اساساً یک منحنی است که معین می‌کند که چگونه هر نقطه در فضای ورودی با یک مقدار عضویت (درجه عضویت)، بین ۰ و ۱ رسم می‌شود [۶].

**۴-۱- فازی سازی با تابع Large**

تابع Large اولین بار توسط سوکالاس و یوریگ<sup>۱</sup> (۱۹۹۷) ارائه شده‌است [۸]. عبارت تابع عضویت یاد شده به صورت رابطه ۲ است:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}} \quad (2)$$

مجموعه فازی با تعریف عضویت جزئی، این مفهوم را گسترش می‌دهد. یک مجموعه فازی A، از مجموعه U، با تابع عضویت  $\mu_A(x)$  مشخص می‌شود که مقادیری در بازه [۰-۱] را به خود اختصاص می‌دهد. مجموعه‌های فازی، احساسات رایج نظیر آرام، سریع، کوچک، بزرگ، سنگین، کم، متوسط، زیاد، بلند و غیره را ارائه می‌دهند. یک عنصر گرفته شده می‌تواند در یک زمان، عضو بیش از یک مجموعه فازی باشد. یک مجموعه فازی A، ممکن است به صورت مجموعه‌ای از زوج مرتب‌ها ارائه شود. هر جفت شامل یک عنصر عمومی X و درجه عضویتش  $\mu_A$  می‌باشد [۶].

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (1)$$

که در آن X را مقدار پشتیبان گوئیم اگر  $\mu_A(x)$  باشد. یک متغیر زبانی X در مجموعه U به وسیله  $\mu(x) = \{\mu_x^1, \mu_x^2, \dots, \mu_x^k\}$  و  $T(x) = \{T_x^1, T_x^2, \dots, T_x^k\}$  مشخص می‌شود. که در آن T(X) مجموعه‌ای از متغیر زبانی X است که هر  $T_x^i$  یک عدد فازی با تابع عضویت  $\mu_x^i$  در



که در آن:

$\mu(x)$ : مقدار عضویت فازی مانند متغیر  $x$

$f_1$ : مقدار گستردگی<sup>۲</sup> (به صورت منفی از ۱ تا ۹)

$f_2$ : مقدار میانی<sup>۳</sup> (جایی که مقدار عضویت برابر ۰٫۵ است).

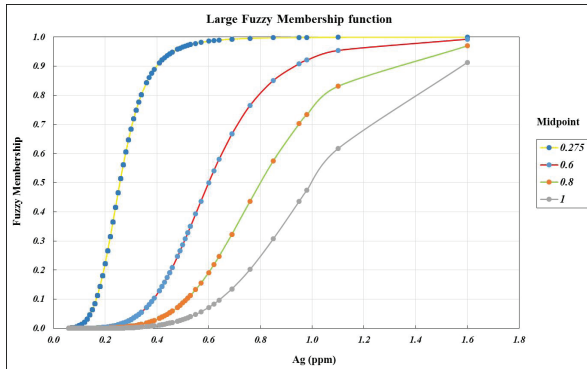
شکل تابع به وسیله این دو پارامتر کنترل می‌شود و در این پژوهش به عنوان میانگین به اضافه انحراف استاندارد مجموعه داده‌ها لحاظ شده است. به این فرآیند اختصاص وزن با استفاده از تابع عضویت گفته می‌شود و فرآیند فازی‌سازی اطلاق می‌شود [۸]. هدف از ارایه این روش استفاده از نظر کارشناس در انتقال داده‌ها به یک فضای مشخص برای تلفیق در مراحل بعد است.

تعیین مقادیر مناسب برای  $f_1$  و  $f_2$  مهم‌ترین مساله برای به نتیجه رسیدن در استفاده از این تابع است. برای این منظور و برای به دست آوردن مقدار مناسب برای  $f_2$  این تابع برای مقادیر میانگین عنصر نقره، مقدارهای ۰٫۶، ۰٫۸ و ۱ ترسیم شد. در همه این حالت‌ها مقدار  $f_1$  ثابت و برابر با ۵ در نظر گرفته شد تا نقش  $f_1$  مشخص شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار  $f_2$  از ۰٫۲۷۵ تا ۱، تعداد نمونه‌هایی که امتیاز فازی‌شان بیشتر از ۰٫۵ است، کاهش می‌یابد. از این‌رو هرچه این مقدار افزایش یابد، حد آستانه برای شناسایی آنومالی افزایش می‌یابد (شکل ۳). با توجه به اینکه در روش آمار کلاسیک، مقدار حد آستانه برای جداسازی مقادیر آنومال از زمینه برابر مقدار میانگین به اضافه یک انحراف استاندارد است [۹]. بنابراین برای شناسایی مقادیر آنومالی از این مقدار استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا داده‌های عناصر منتخب با استفاده از لگاریتم طبیعی نرمال شدند (شکل ۴) و سپس پارامترهای آماری آن‌ها محاسبه شد. در مرحله بعد با استفاده از رابطه‌های (۳ و ۴) این پارامترها که برای داده‌ها نرمال شده بودند (جدول ۱)، به پارامترهای آماری داده‌های اولیه تبدیل شدند. مقادیر محاسبه شده برای حد آستانه‌ای، آنومالی ممکن و احتمالی در جدول ۲ ارایه شده است.

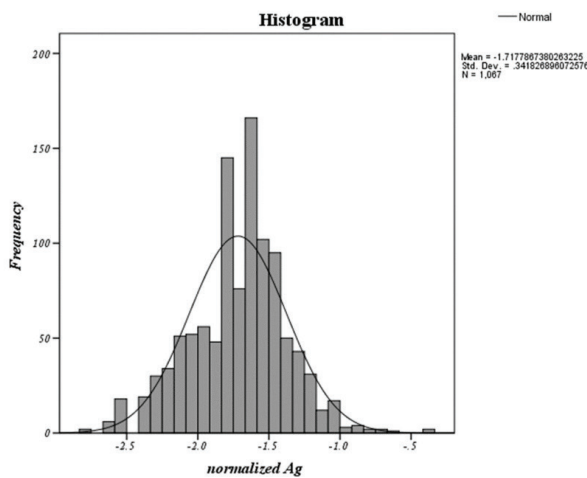
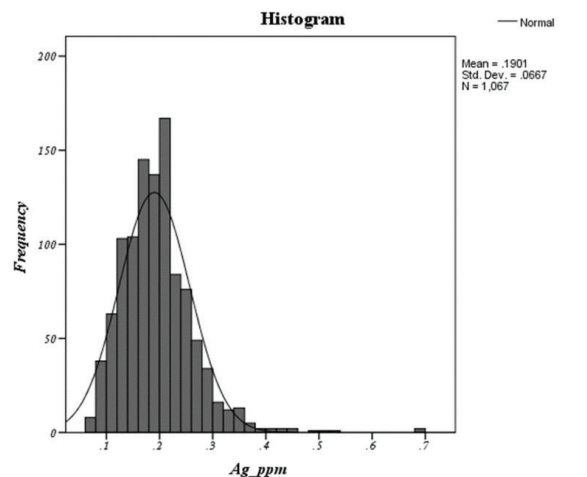
$$\bar{X} = e^{\left(\alpha + \frac{\beta^2}{2}\right)} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{X^2(e^{\beta^2} - 1)} \quad (4)$$

برای درک بیشتر نقش  $f_2$  در نقشه خروجی، مقادیر ۰٫۲۷۵ و ۱ برای  $f_2$  در عنصر نقره لحاظ شد و به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارایه شدند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در شکل ۵



شکل ۳: اشکال مختلف تابع Large با استفاده از مقادیر متغیر  $f_2$



شکل ۴: هیستوگرام‌های داده‌های خام (نمودار بالا) و نرمال یافته (نمودار پایین) عنصر نقره

جدول ۱: پارامترهای آماری داده‌های نرمال شده با استفاده از تبدیل لگاریتمی

	Ag	As	Au	Cu	Mo	Pb	Zn
Mean	-1.72	2.45	-5.48	3.86	0.28	2.88	4.66
Median	-1.71	2.39	-5.74	3.79	0.18	2.98	4.61
Mode	-1.71	2.96	-6.27	4.20	-0.11	3.33	4.70
Std. Deviation	0.34	0.75	0.97	0.50	0.56	0.99	0.25
Variance	.117	.570	.940	.252	.313	.978	.063
Skewness	-.165	-.037	1.457	.476	.879	-2.078	.519
Kurtosis	.500	2.105	1.496	2.370	1.333	8.709	2.548
Minimum	-2.81	-2.82	-6.81	0.73	-2.30	-3.41	3.40
Maximum	-0.37	4.88	-2.31	5.69	2.56	5.47	6.11

جدول ۲: تبدیل داده‌های نرمال شده به داده‌های اولیه و تعیین حدود جوامع ژئوشیمیایی

	Ag	As	Au	Cu	Mo	Pb	Zn
M	0.19	15.36	0.0067	53.8	1.54	29	109
S	0.07	13.45	0.0083	29	0.93	37	28
M+S	0.26	28.81	0.0150	83	2.48	66	137
M+2S	0.32	42.26	0.0233	111	3.41	103	165
M+3S	0.39	55.71	0.0317	140	4.35	141	193

جدول ۳: متغیرهای تابع Large برای عناصر مختلف

عنصر	تابع فازی سازی	$f_1$	$f_2$
نقره	Large	۵	۰/۲۵۷
آرسنیک	Large	۵	۲۸/۸۱
طلا	Large	۵	۰/۰۱۵
مس	Large	۵	۸۳
مولیبدن	Large	۵	۲/۴۸
سرب	Large	۵	۶۶
روی	Large	۵	۱۳۷

شکل ۸ ارائه شد.

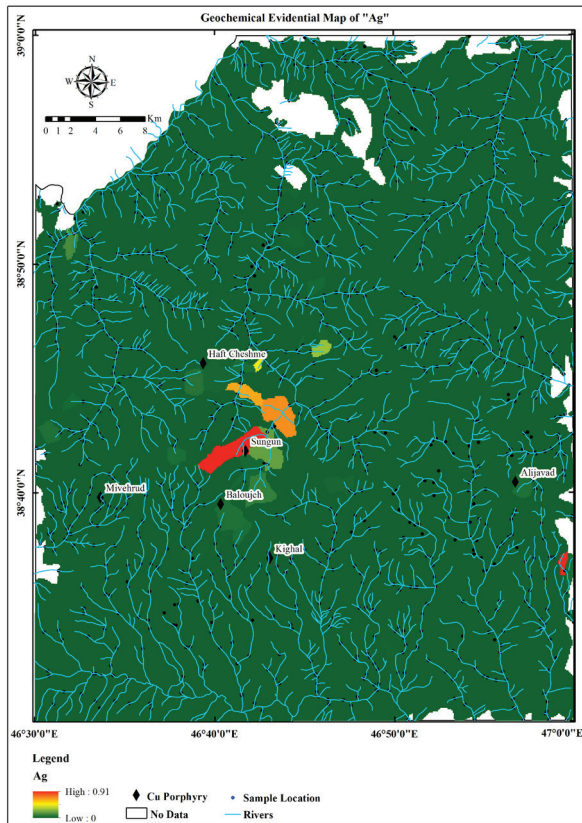
#### ۴-۲- فازی سازی با تابع لجستیک

در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، هدف، طبقه‌بندی مناطقی با

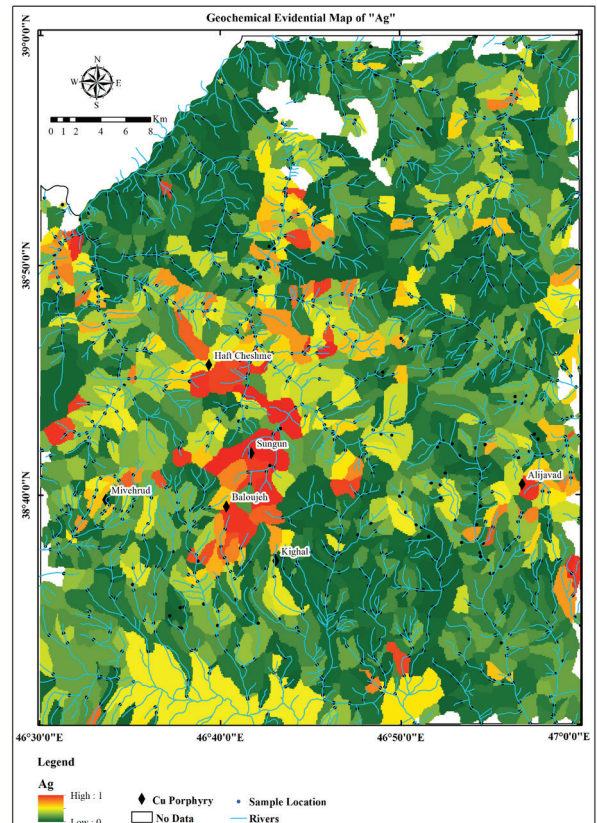
که مقدار  $f_2$  کمتری دارد نمونه‌های بیشتری پس از حد آستانه قرار می‌گیرند و در نتیجه مقادیری که بین زمینه و آنومالی قرار دارند به خوبی نمایش داده می‌شود. در شکل ۶ نیز که مقدار  $f_2$  آن بیشتر است، داده‌هایی که پس از حد آستانه قرار می‌گیرند، کمترند و در نتیجه مقادیری که بین مقدار زمینه و آنومالی قرار می‌گیرند، محدودتر می‌شوند.

برای تعیین مقدار مناسب برای  $f_1$ ، به‌عنوان مثال برای عنصر نقره با در نظر گرفتن یک مقدار  $f_2$  که نحوه به دست آوردن آن توضیح داده شد،  $f_1$ های مختلفی از ۱ تا ۹ برای تابع لحاظ شده و ترسیم شد (شکل ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار  $f_1$  از ۱ تا ۳ تغییر قابل توجهی از خود نشان می‌دهد و پس از آن تغییرات کاهش می‌یابد تا اینکه پس از ۵ می‌توان گفت تغییرات ناچیز است، بنابراین در ادامه برای تهیه نقشه‌ها با استفاده از تابع Large، از مقدار ۵ برای  $f_1$  استفاده شد. جدول ۳ پارامترهای  $f_1$  و  $f_2$  استفاده شده برای عناصر مختلف را ارائه می‌دهد.

پس از تعیین شدن متغیرهای تابع مورد نظر، نقشه‌های ژئوشیمیایی هر عنصر تهیه و برای نمونه تعدادی از آن‌ها در



شکل ۶: نقشه شاهد ژئوشیمیایی عنصر نقره با استفاده از تابع  $(f_2=1 - f_1=5)$  Large



شکل ۵: نقشه شاهد ژئوشیمیایی عنصر نقره با استفاده از تابع  $(f_2=0.275 - f_1=5)$  Large

دادند که تابع لجستیک سیگموئیدی می‌تواند برای انتقال داده‌های یک لایه شاهد استفاده شود [۱۱]. بنابراین داده‌ها در نقشه شاهد وزن‌دار، بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرند. از این‌رو توابع مختلفی وجود دارند که می‌توانند داده‌ها را بر اساس مقدار کمینه و بیشینه‌شان به فضای لجستیکی منتقل کند. در این پژوهش از تابع لجستیکی استفاده شده به وسیله یوسفی و کارانزا در سال ۲۰۱۵، برای انتقال مجموعه مقادیر شاهد به یک فضای یکسان به کار گرفته شده است [۱۰].

$$F_{Ev} = \frac{1}{1 + e^{-s(Ev-i)}} \quad (5)$$

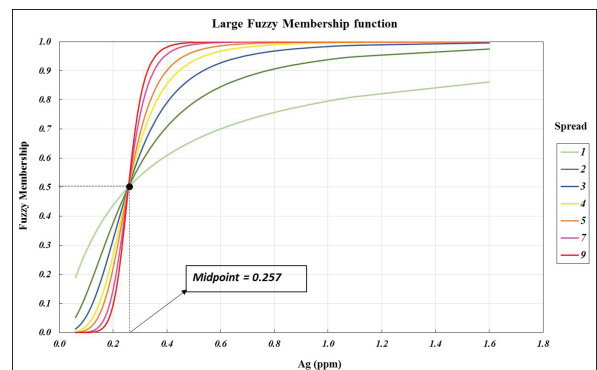
که در آن:

$F_{Ev}$ : یک امتیاز فازی بین ۰ و ۱ و یک وزن فازی در فضای لجستیک

i: نقطه عطف

s: شیب تابع لجستیکی

EV: مقادیر شاهد هر پیکسل در نقشه ورودی است.



شکل ۷: تغییرات نمودار تابع Large به ازای مقادیر مختلف  $f_1$

اولویت بالای اکتشافی برای اکتشافات بیشتر، مناطقی با الویت بسیار اندک و کلاس‌هایی بین این دو است، بنابراین در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مشکل طبقه‌بندی مناطق و در نتیجه مشکل مدل نهایی که می‌تواند به صورت طبقه‌بندی شده ارائه شود، وجود دارد [۱۰]. یوسفی و کارانزا در سال ۲۰۱۵ نشان



### ۵- تعیین شیب و نقطه عطف تابع لجستیک

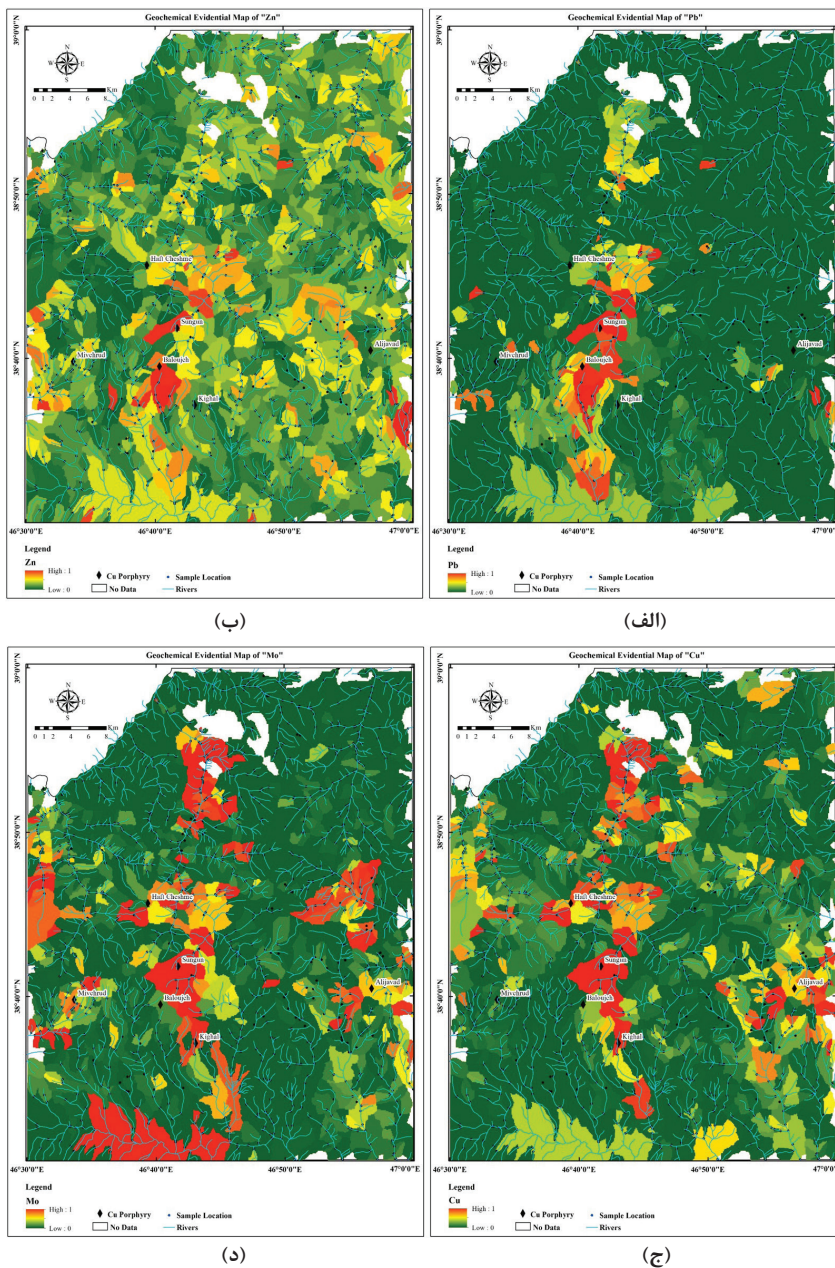
برای فازی سازی، معمولاً به مقدار بیشینه یا بالاترین کلاس از مقادیر شاهد را امتیازی نزدیک به ۱ (همچون ۰٫۹۹) می‌دهند و کمترین مقدار نیز با اختصاص امتیازی نزدیک به صفر (۰٫۰۱) به آن در نظر گرفته می‌شود. بر اساس روش پیشنهاد شده، مقادیر مناسب برای شیب و نقطه عطف تابع لجستیکی، از حل دستگاه دو معادله و دو مجهول ارایه شده در رابطه ۶ حاصل می‌شود.

$$\left\{ \begin{aligned} F_{Ev(\min)} &= \frac{1}{1 + e^{-s(Ev(\min)-i)}} \\ F_{Ev(\max)} &= \frac{1}{1 + e^{-s(Ev(\max)-i)}} \end{aligned} \right. \quad (۶)$$

که در آن:

$F_{Ev(\min)}$ : کمترین امتیاز فازی از مقادیر شاهد (معادل با ۰٫۰۱)

$F_{Ev(\max)}$ : بیشترین امتیاز فازی از مقادیر شاهد (معادل با ۰٫۹۹)



شکل ۸: نقشه‌های پیوسته فازی شده برای عناصر سرب (الف)، روی (ب)، مس (ج)، مولیبدن (د)



$$G_A[X] = G_A \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_A(x_{11}) & G_A(x_{12}) & \dots & G_A(x_{1n}) \\ G_A(x_{21}) & G_A(x_{22}) & \dots & G_A(x_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_A(x_{n1}) & G_A(x_{n2}) & \dots & G_A(x_{nn}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

برای ناحیه مورد مطالعه رابطه میانگین هندسی به این صورت رابطه ۱۰ محاسبه شد.

$$G_{A_{Cu-Porphbyry}}(F_{Ag}, F_{As}, F_{Au}, F_{Cu}, F_{Mo}, F_{Pb}, F_{Zn}) = \sqrt[7]{F_{Ag} F_{As} F_{Au} F_{Cu} F_{Mo} F_{Pb} F_{Zn}} \quad (10)$$

که در آن  $(F_{Ag}, F_{As}, F_{Au}, F_{Cu}, F_{Mo}, F_{Pb}, F_{Zn})$  به ترتیب بیانگر مقادیر وزن فازی برای هر یک از عناصر نقره، آرسنیک، طلا، مس، مولیبدن، سرب و روی در هر پیکسل از تصویر رستری است. این مقادیر با استفاده از توابع لجستیکی و Large که در بخش فازی‌سازی با روش‌های پیوسته مطرح شدند، حاصل شده‌اند [۹]. پس از محاسبه مقادیر میانگین هندسی برای هر یک از پیکسل‌ها، نقشه تلفیق یافته ترسیم شد (شکل ۹). همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر پر پتانسیل در نقشه تلفیق یافته با اوزان تابع Large، اغلب منطبق بر کانسارهای مس پورفیری شناخته شده در ناحیه مورد مطالعه است (شکل ۹).

#### ۷- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نقشه تلفیق یافته، از نمودار آهنگ پیش‌بینی- مساحت اشغال شده [۱۳] استفاده شد. در این نمودار، محل تقاطع منحنی‌ها، بیانگر این است که نقشه حاصل از فازی‌سازی با تابع Large، با ۲۰ درصد از مساحت اشغال شده ناحیه مورد مطالعه، توان پیش‌بینی ۸۰ درصد از کانسارهای شناخته شده وجود دارد (شکل ۱۰). همچنین، نقشه حاصل از فازی‌سازی با تابع لجستیک، ۳۰ درصد از مساحت اشغال شده می‌تواند ۷۰ درصد از کانسارهای شناخته شده را پیش‌بینی کند. از این‌رو می‌توان عنوان کرد که روش میانگین هندسی برای تلفیق نقشه‌های فازی‌سازی شده با تابع Large جواب بهتری

Ev(min): مقادیر شاهد کمینه متناظر در مجموعه داده‌های

ورودی

Ev(max): نیز مقادیر شاهد بیشینه متناظر در مجموعه

داده‌های ورودی است.

بنابراین دو معادله با دو مجهول شیب و نقطه عطف وجود دارد. با حل این معادله مقدار مناسب برای این دو متغیر حاصل می‌شود. با اختصاص ۰٫۰۱ و ۰٫۹۹ به ترتیب برای کمترین و بیشترین امتیاز فازی، مقادیر  $i$  و  $s$  محاسبه می‌شوند (رابطه ۷).

$$s = \frac{9.2}{Ev_{\max} - Ev_{\min}} \quad (7)$$

$$i = \frac{Ev_{\max} - Ev_{\min}}{2}$$

با استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه هر عنصر، مقادیر شیب و نقطه عطف تابع لجستیکی فازی‌سازی حاصل شد. از این‌رو با جایگزین کردن این مقادیر در رابطه ۵، مقدار فازی هر عنصر برای هر پیکسل به دست آمد.

#### ۶- تلفیق با استفاده از میانگین هندسی

میانگین هندسی به صورت ریشه  $n$ ام از ضرب  $n$  مقدار تعریف می‌شود. میانگین هندسی  $(G_A)$  مجموعه داده‌های  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$  توسط ونگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۷) به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود [۱۲].

$$G_A(v_1, v_2, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n v_i = \sqrt[n]{v_1 v_2 \dots v_n} \quad (8)$$

در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، پارامترهای معادله ارایه شده در رابطه ۸ برای یک سلول واحد و یا هر پیکسل اعمال می‌شود. به این صورت که  $v_1 = f_1$  مقدار فازی مربوط به یک معیار اکتشافی (به عنوان مثال مقدار فازی عنصر آرسنیک) در هر سلول واحد،  $v_2 = f_2$  مقدار فازی مربوط به یک معیار اکتشافی دیگر (در اینجا عنصر دیگر) و به همین صورت مقدار فازی برای  $n$  معیار اکتشافی لحاظ می‌شود. بنابراین  $f_i$  وزن فازی مربوط به شاخص  $i$ ام در هر سلول است که با روش میانگین هندسی محاسبه شده است. بنابراین ناحیه مورد مطالعه باید به عنوان ماتریسی از پیکسل‌ها در تصویر رستری در نظر گرفته شود، تا مقدار میانگین هندسی به صورت رابطه ۹ محاسبه شود [۱۳].

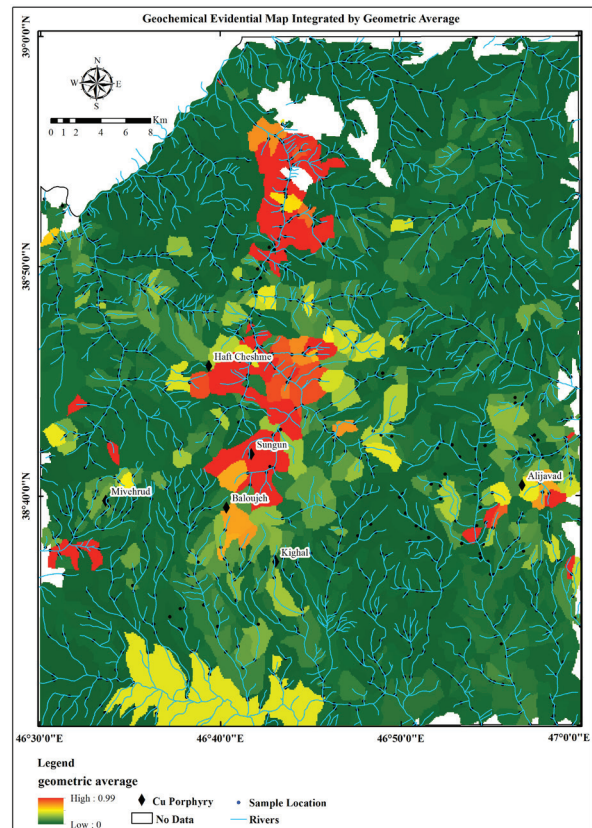
## ۸- نتیجه گیری

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد روش میانگین هندسی، از دو روش فازی سازی با توابع Large و لجستیک، برای فازی سازی داده های ژئوشیمی استفاده شد. بر این اساس تغییراتی در نحوه انتخاب پارامترهای توابع فازی سازی اعمال و نتایج مطلوبی حاصل شد. با توجه به این که مقدار  $f_2$  برای تابع Large، اغلب برابر میانگین داده های ورودی لحاظ می شود، در این پژوهش با در نظر گرفتن مقادیر میانگین به اضافه انحراف استاندارد که حد آستانه مقادیر آنومالی از زمینه است، نتایج قابل قبولی به دست آمد. در ادامه با به کارگیری تابع لجستیک، نقشه های فازی شده عناصر شاخص کنسارهای مس پورفیری حاصل شد و با به کارگیری روش میانگین هندسی برای تلفیق نقشه های هر دو روش فازی سازی و اعتبارسنجی با روش آهنگ پیش بینی - مساحت اشغال شده، مشاهده شد که روش میانگین هندسی نتایج بهتری برای فازی سازی با تابع Large و در نظر گرفتن  $f_2 = \bar{X} + S$  ارائه می کند. اعتبارسنجی نقشه فازی شده با تابع Large، نشان می دهد که این روش با آهنگ پیش بینی ۸۰ درصد و مساحت اشغال شده ۲۰ درصد، توان اکتشاف کنسارهای مس پورفیری را در این ناحیه دارد. از این رو با اعمال روش یاد شده برای تهیه نقشه های شاهد ژئوشیمی، می توان اعتبار نقشه های پتانسیل معدنی کنسارهای مس پورفیری را تا حد زیادی بهبود بخشید.

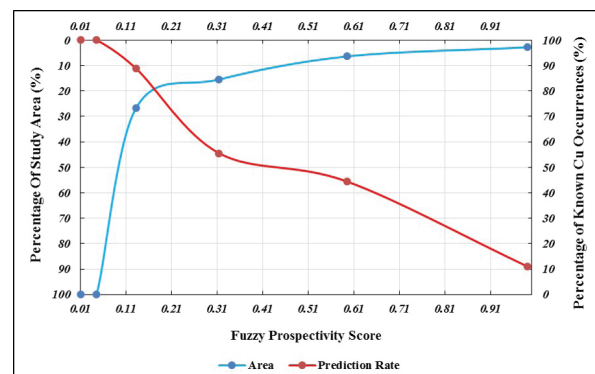
## ۹- مراجع

- [1] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". Computers & Geosciences, 74: 97-109.
- [۲] یوسفی، م؛ کامکار روحانی، ا؛ ۱۳۸۹؛ "اصول روش های مدل سازی پتانسیل معدنی (در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی)". جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، جلد اول، ص ۸۰-۴۱.
- [3] Almasi, A., Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2017). "Prospectivity analysis of orogenic gold deposits in Saqez-Sardasht Goldfield, Zagros Orogen, Iran". Ore Geology Reviews, 91: 1066-1080.
- [4] Jamali, H., and Mehrabi, B. (2014). "Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt". Ore Geology Reviews, 487-501.
- [5] Hezarkhani, A., and Williams-Jones, A. E. (1998).

ارایه می دهد، بنابراین در مورد مناطقی که کنسار شناخته شده ای وجود ندارد، می توان با احتمال نسبتاً بالایی این مناطق را نیز مستعد تلقی کرد و برای اکتشاف در مقیاس بزرگ تر معرفی کرد.



شکل ۹: نقشه شاهد ژئوشیمی کنسارهای مس پورفیری، فازی شده با تابع Large و تلفیق یافته به روش میانگین هندسی



شکل ۱۰: نمودار مساحت اشغال شده - نرخ پیش بینی، نقشه های فازی شده با تابع Large و تلفیق یافته به روش میانگین هندسی

- 83: 72-79.
- [12] Wang, Y. M., Chin, K. S., and Yang, J. B. (2007). "Measuring the performances of decision making units using geometric average efficiency". *Journal of the Operational Research Society*, 58: 929-937.
- [13] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling". *Computers and Geosciences*, 79: 69-81.
- [۱۴] مهرپرتو، م؛ امینی فضل، آ؛ رادفر، ج؛ ۱۳۷۱؛ "نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورزقان". سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- [۱۵] آقاباتی، ع؛ ۱۳۸۳؛ "نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور". زمین‌شناسی ایران.
- "Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran; evidence from fluid inclusions and stable isotopes". *Economic Geology*, 93: 651-670.
- [6] Sillitoe, R. H. (2010). "Porphyry copper systems". *Economic Geology*, 105: 3-41.
- [7] Chiang, W., Lee, J. (1995). "Fuzzy logic for the application to complex systems". World scientific publishing, 20-75.
- [8] Tsoukalas, L. H., and Uhrig, R. E. (1997). "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering". John Wiley & Sons, New York, NY, p. 606.
- [۹] حسنی پاک، ع. ا، شرف الدین، م؛ ۱۳۹۰؛ "تحلیل داده‌های اکتشافی". انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ص ۱۶۰-۷۰.
- [10] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015a). "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". *Computers & Geosciences*, 74: 97-109.
- [11] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015b). "Geometric average of spatial evidence data layers: A GIS-based multi-criteria decisionmaking approach to mineral prospectivity mapping". *Computers and Geosciences*,

<sup>۱</sup> Tsoukalas& Uhrig

<sup>۲</sup> Spread

<sup>۳</sup> Midpoint

<sup>۴</sup> Wang