

مدلسازی رفتار عیار آهن کانسار آنومالی ۱۲A در منطقه بافق، ایران مرکزی

حسن مدنی^۱، حسین حسینی^۲، مرضیه شادمان خاکستر^۳، سعید سلطانی محمدی^۴

۱-۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

کانسار آهن آنومالی ۱۲A از جمله کانسارهای آهن، در محدوده بلوک بافق در ایران مرکزی است. برای بررسی رفتار عیار آهن از داده‌های حاصل از ۱۹ گمانه حفر شده در این منطقه استفاده شد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که داده‌های منطقه ترکیبی از سه جامعه است، اما از آنجا که جداسازی جوامع به صورت فیزیکی که بتواند دلایل زمین‌شناسی داشته باشد تقریباً غیر ممکن بود، داده‌های عیار آهن به صورت یک جامعه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مدل‌های طبیعی، لگاریتمی و لگاریتمی سه متغیره بررسی شد. مطالعات نشان داد که با تقریب کافی می‌توان رفتار عیار آهن را با مدل لگاریتمی سه متغیره مدلسازی کرد.

واژگان کلیدی: مدلسازی عیار، آهن، آنومالی ۱۲A، ایران مرکزی

مقدمه

شکل تابع توزیع و میزان انحراف آن از تابع نرمال و امکان تبدیل داده‌ها به توزیع نرمال، در فرآیند تخمین اهمیت زیادی دارد. هر چه تابع توزیع به نرمال نزدیکتر باشد، امکان بروز خطای سیستماتیک در فرآیند تخمین کاهش می‌یابد. بررسی آماری جامعه داده‌ها از این نظر که می‌توان آنها را به عنوان یک جامعه آماری در نظر گرفت یا این که داده‌ها خصلت چند جامعه‌ای دارند (با چند مد ظاهر می‌شوند) نیز حایز اهمیت است [۱]. بدین منظور، داده‌های اکتشافی با استفاده از فراوانی نماها و نمودارهای فراوانی تجمعی، بررسی و

بررسی آماری داده‌هایی که در تخمین ذخیره یک کانسار شرکت می‌کنند، مرحله‌ای کلیدی در روش‌های زمین آماری است [7]. شناخت ویژگی‌های آماری جامعه داده‌های خام، به خصوص ماهیت توزیع آنها، کمک زیادی به نحوه صحیح به کارگیری آنها و تجزیه و تحلیل مناسب نتایج حاصل از تحلیل می‌کند. شناخت پارامترهای آماری جامعه شامل میانگین، پراش، ضریب تغییرات و به خصوص چولگی که دلالت بر نرمال بودن یا غیر نرمال بودن تابع توزیع داده‌ها دارد، مفید خواهد بود. در بین همه این عوامل،

ضخامت ۹۰ متر را تشکیل می‌دهند. سنگ‌های گرانیت پرفیری بیشتر در بخش مرکزی ناحیه مورد مطالعه یافت شده‌اند. دیوریت‌ها نسبت به سنگ‌های گرانیت پرفیری گسترش کمتری دارند. این سنگ‌ها بیشتر به صورت توده‌های رگه‌ای کوچک در زون‌های گسلی مشاهده می‌شوند.

ساختمان زمین‌شناسی ناحیه با جابجایی‌های تکتونیکی متعدد وضعیت پیچیده‌ای یافته است که در میان آنها می‌توان گسل‌های با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی و گسل‌های با روند شرقی - غربی و تقریباً شرقی - غربی را ذکر کرد. این گسل‌ها با جابه‌جایی و به هم ریختگی ناحیه آنومالی شده و آن را به چندین بلوک تقسیم کرده‌اند.

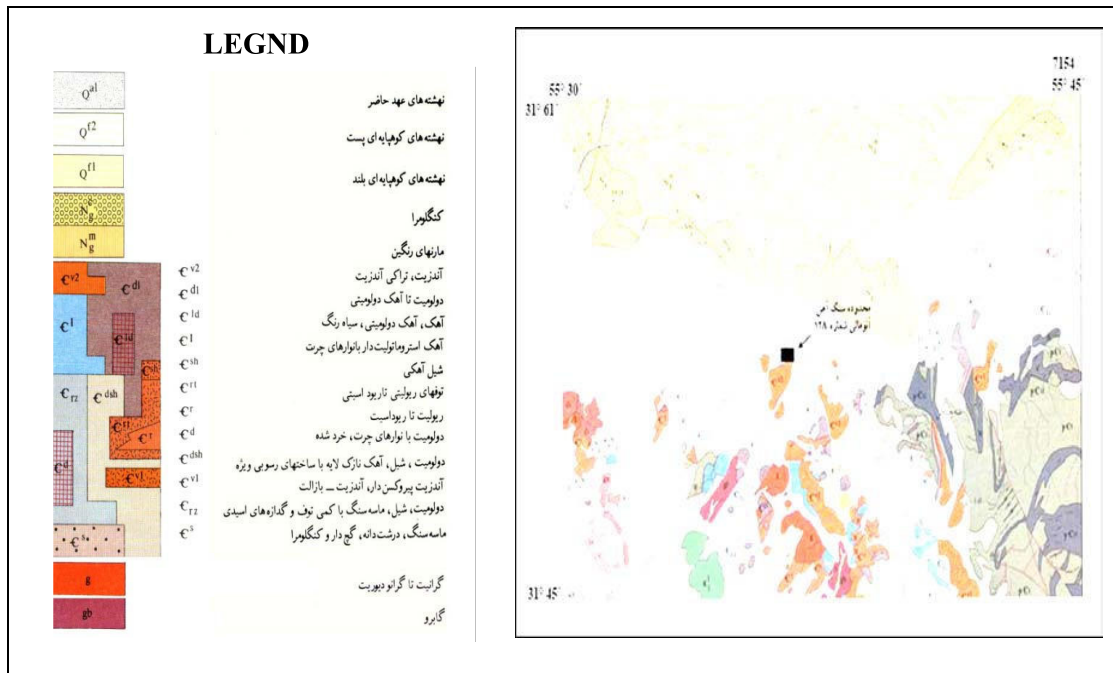
در ناحیه مورد بحث دو تیپ ژنتیکی از سنگ آهن را که شامل تیپ لایه‌ای متعلق به سری رسوبی آتشفشانی و تیپ متاسوماتیک است می‌توان تشخیص داد.

سنگ آهن نوع اول به صورت میان لایه‌های نازک و عدسی شکل در میان سنگ‌های سری کربناته آتشفشانی قرار دارند و فاقد ارزش اقتصادی‌اند. سنگ آهن نوع دوم، تیپ متاسوماتیت است که در بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی ناحیه مشاهده می‌شود. بخش‌های مرکزی و جنوبی به علت ابعاد کوچکشان فاقد ارزش اقتصادی هستند. بخش شرقی ارزش عملیاتی دارد و منطبق بر آنومالی مغناطیسی محلی بزرگ همراه با آنومالی گرانی است [۳].

تجزیه و تحلیل می‌شوند. این نمودارها امکان بررسی بیشتر داده‌ها و ارزیابی همگنی جامعه را فراهم می‌سازند [7].

زمین‌شناسی منطقه

آنومالی سنگ آهن شماره ۱۲A در محدوده بلوک بافق در ایران مرکزی قرار دارد. این بلوک به صورت بالافتادگی است که از کرمان تا بافق، ساغند و رباط پشت بادام ادامه دارد. روند این بلوک، شمال غربی و هم جهت با گسل کوه بنان (واقع در مرز شرقی بلوک) و گسل کوه دویران (در مرز غربی بلوک) است. طول جغرافیایی کانون آنومالی "۳۶، ۳۶، ۵۵" شرقی و عرض جغرافیایی آن "۳۰، ۵۲، ۳۱" شمالی است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آنومالی ۱۲A را نشان می‌دهد. محدوده آنومالی از مجموعه سنگهای رسوبی - آتشفشانی متعلق به اینفراکامبرین همراه با توده‌های کوچکی از سنگهای نفوذی گرانیت پرفیری و دیوریتی تشکیل یافته است. بخش شمالی کانسار به وسیله رسوبات کنگلومرایی و برش‌های کنگلومرایی متعلق به دوران سنوزوئیک و بخش‌های مرکزی، شرقی، غربی و جنوبی آن به وسیله رسوبات آبرفتی کواترنر پوشیده شده است. در بخش‌های مرکزی و غربی آن سنگهایی با منشأ آذرین گسترش پیدا کرده و به وسیله رسوبات آبرفتی پوشیده شده‌اند. در بخش شرقی ناحیه آنومالی، سنگ آهک‌های ماسه‌ای دگرگون شده و همچنین مرمرهای سیاه رنگی با بوی سولفید هیدروژن وجود دارد که میان‌لایه‌ها و افق‌هایی تا



شکل ۱- محدوده سنگ آهن آنومالی شماره ۱۲۸ در نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ [۲]

مطالعات آماری داده های اولیه

در این تحقیق برای بررسی رفتار عیار از نتایج حاصل از ۱۹ گمانه حفر شده در محدوده مورد نظر استفاده شد. از کل گمانه های موجود فقط ۱۰ گمانه ماده معدنی را قطع کرده و گمانه های دیگر فاقد مغزه حاوی ماده معدنی اند که مجموع طول مغزه های حاوی ماده معدنی حدود ۶۹۰ متر است. از این مغزه ها، ۲۵۵ نمونه با طول های مختلف به دست آمد که مقادیر V_2O_5 ، TiO_2 ، P ، S ، FeO ، Fe در آنها اندازه گیری شده است. به منظور شناسایی توزیع آنها در منطقه پارامترهای آماریشان محاسبه شد که نتایج در جدول ۱ درج شده است.

به منظور تعیین متغیر ناحیه ای، بررسی های آماری دو متغیره و چند متغیره انجام گرفت. نتایج نشان داد که هیچ یک از متغیرهای موجود به یکدیگر وابسته

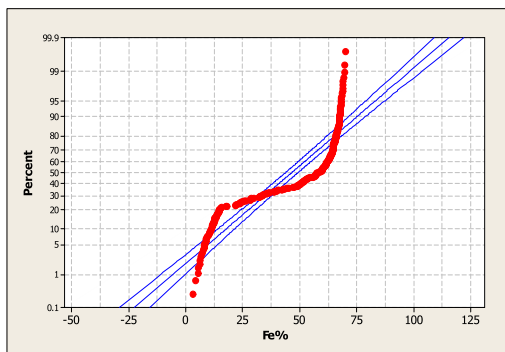
نیستند. به دلیل اهمیت عنصر آهن، این عنصر به عنوان متغیر ناحیه ای مورد نظر انتخاب و مطالعات بعدی بر روی آن انجام گرفت. فراوانی نما و نمودار فراوانی تجمعی عیار آهن به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

نکته مهمی که باید بررسی شود آن است که آیا عیار آهن خصلت یک جامعه ای دارد یا خیر؟ برای پاسخ به این سوال باید به این نکته توجه کرد، که اگر اختلاطی از دو یا چند جامعه آماری وجود داشته باشد، نمودار فراوانی تجمعی آنها به صورت خط مستقیم ظاهر نمی شود، بلکه به صورت منحنی شکل با یک یا چند نقطه عطف یا تغییر در جهت انحناء خواهد بود [۱].

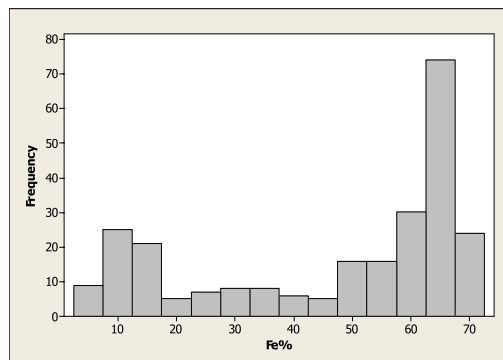
با توجه به نمودار فراوانی تجمعی عیار آهن در شکل ۲، مشاهده می شود که عیار آهن تنها از یک

جامعه تشکیل نشده بلکه مجموعه‌ای از سه جامعه تا ۵۰ درصد در جامعه دوم و بزرگتر از ۵۰ درصد در جامعه سوم قرار می‌گیرند.

جامعه تشکیل نشده بلکه مجموعه‌ای از سه جامعه است. عیارهای کمتر از ۲۰ درصد در جامعه اول، ۲۲



شکل ۳- نمودار فراوانی تجمعی عیار آهن



شکل ۲- فراوانی‌نمای داده‌های خام آهن

جدول ۱- پارامترهای آماری داده‌های خام اولیه کمیت های اندازه‌گیری شده

کمیت اندازه‌گیری	تعداد داده	میانگین (درصد)	میانه (درصد)	واریانس (درصد)	انحراف معیار (درصد)	حداقل (درصد)	حداکثر (درصد)	چولگی	کشیدگی
Fe	۲۵۴	۴۶/۵۸۸	۵۷/۶۹۵	۴۹۶/۶۵۸	۲۲/۲۸۶	۳/۲۹۰	۶۹/۹۶۰	-۰/۶۹۸	-۱/۱۶۳
FeO	۲۵۴	۲۰/۶۰۶	۲۵/۶۷۵	۸۶/۲۲۹	۹/۲۸۶	۰/۷۰۰	۳۰/۳۰۰	-۰/۷۷۵	-۰/۹۹۰
S	۲۵۴	۰/۰۸۰۴	۰/۰۴۴	۰/۰۱۸۶	۰/۱۳۶	۰/۰۱۰	۱/۵۶۰	۶/۹۸۳	۶۲/۹۸۵
P	۲۵۴	۰/۰۹۹	۰/۰۵۱	۰/۰۳۵	۰/۱۸۷	۰/۰۱۱	۱/۸۵۴	۶/۰۲۴	۴۳/۵۲۵
TiO ₂	۲۵۴	۱/۰۵۸	۱/۰۸۰	۰/۳۲۲	۰/۵۶۷	۰/۰۰۰	۲/۵۴۰	۰/۰۳۰	-۰/۵۲۸
V ₂ O ₅	۲۵۴	۰/۲۴۴	۰/۲۵۰	۰/۰۲۲	۰/۱۴۹	۰/۰۰۰	۰/۵۴۲	۰/۰۲۰	-۱/۰۵۹
Fe/Feo	۲۵۴	۲/۳۳۷	۲/۲۹۰	۱/۱۸۰	۱/۰۵۷	۱/۰۲۰	۱۳/۳۷۰	۶/۵۱۹	۵۵/۳۲۵

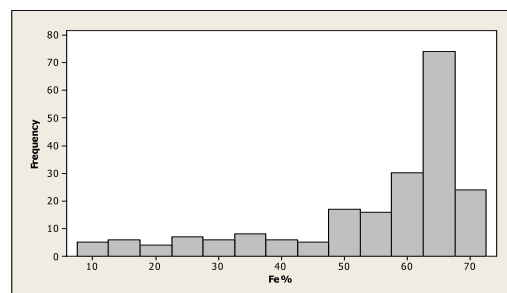
به دلیل اختلاط کامل داده‌های کم عیار و پرعیار در طول مغزه‌ها، جداسازی جوامع به صورت فیزیکی، که بتواند دلایل زمین‌شناسی نیز داشته باشد، تقریباً غیر ممکن است. از آنجا که طبق استانداردهای تعریف شده از سوی شرکت سنگ آهن مرکزی ایران، عیارهای کمتر از ۲۰ درصد جزو باطله محسوب می‌شوند بنابراین، ۴۷ داده نظیر این عیارها که در قسمت‌های ابتدا و انتهای کانسار قرار داشتند و در عین حال در محدوده کانسار قرار نمی‌گرفتند، از لیست داده‌ها حذف شدند. فراوانی نمای عیار آهن برای ۲۰۸ داده باقی مانده در شکل ۴ نشان داده شده است.

به دلیل اختلاط کامل داده‌های کم عیار و پرعیار در طول مغزه‌ها، جداسازی جوامع به صورت فیزیکی، که بتواند دلایل زمین‌شناسی نیز داشته باشد، تقریباً غیر ممکن است. از آنجا که طبق استانداردهای تعریف شده از سوی شرکت سنگ آهن مرکزی ایران، عیارهای کمتر از ۲۰ درصد جزو باطله محسوب می‌شوند بنابراین، ۴۷ داده نظیر این عیارها که در

مطالعه مقادیر خارج از ردیف

یکی از عملیات پیش تخمینی، شناسایی مقادیر خارج از ردیف و تصمیم‌گیری درباره نحوه به کارگیری آنهاست [۱]. این مقادیر به طرز چشمگیری تفسیرها و تحلیل‌های آماری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. وجود مقادیر خارج از ردیف بالاتر از حد عادی در مجموعه داده‌ها، باعث بروز مشکلاتی در برازش مدل‌های ریاضی به توزیع عیار می‌شود و ممکن است یک رخداد کانی‌سازی را به کانساری اقتصادی تبدیل کند. گاه نیز وجود تعداد کمی از این مقادیر کافی است تا توسعه یک پروژه معدنی را تأیید کند [6]. برای تعیین مقادیر خارج از ردیف از دو روش استفاده می‌شود، در روش اول مقادیر خارج از ردیف را در صورت کم بودن تعداد حذف می‌کنند و در روش دوم این مقادیر را با مقادیر متعارف جایگزین می‌سازند [۱].

برای جایگزین کردن مقادیر خارج از ردیف با مقادیر متعارف روش‌های مختلفی وجود دارد که در این تحقیق از روش نمودار دورفل استفاده شد و نتایج حاصل از آن نشان داد که مقداری به عنوان خارج از ردیف برای عنصر آهن وجود ندارد.



شکل ۴- فراوانی‌نمای عیار آهن بعد از حذف داده‌های کم عیار خارج از محدوده کانسار

بررسی روندهای احتمالی

یکی از مسائلی که ممکن است تخمین‌های زمین آماری را دچار مشکل کند، وجود روند در داده‌هاست. بدین منظور در مورد متغیرهای مختلف باید آزمون‌های هندسی لازم انجام گیرد تا در صورت مشاهده روند در داده‌ها، قبل از تخمین حذف شود [۱]. یکی از ساده‌ترین روش‌ها در این راستا، رسم نمودار پراکندگی عیار در جهت‌های شمالی-جنوبی (Y)، شرقی-غربی (X) و عمقی (Z) ذخیره است [۸]. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نمودار پراکندگی عیار آهن را در جهت‌های یاد شده نشان می‌دهد. به طوری که دیده می‌شود، هیچ‌گونه روند بارزی در تغییرات عیار آهن وجود ندارد.

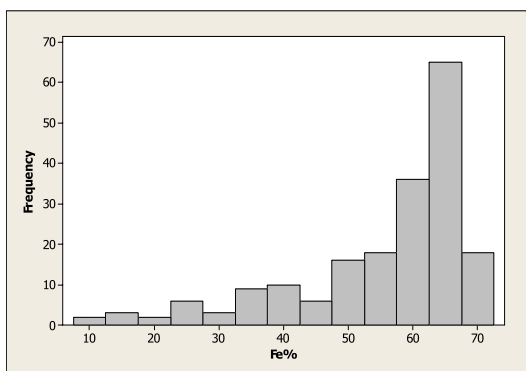
کامپوزیت کردن داده‌ها

خصوصیات آماری یک متغیر ناحیه‌ای تابع حجم و ابعاد نمونه‌هایی است که از جامعه گرفته می‌شود. در شرایط ایده‌آل، هدف از تجزیه و تحلیل ساختار یک متغیر ناحیه‌ای در یک کانسار، تشخیص خواص نقطه‌ای آن است زیرا در تخمین به روش زمین‌آماری از داده‌های نقطه‌ای استفاده می‌شود. این داده‌ها متعلق به نمونه‌ای به حجم V_0 هستند که در مرز آن قرار می‌گیرند. نظر به همگن سازی هر نمونه و سپس اندازه‌گیری کمیت مورد نظر، متغیر ناحیه‌ای ترکیب شده را اصطلاحاً کامپوزیت شده می‌نامند. در واقع کامپوزیت سازی موجب از بین رفتن تغییرپذیری در مقیاس کوچک می‌شود و این همان چیزی است که نوعی تعدیل یا منظم سازی را در پی دارد [۲].

مطالعات آماری داده‌ها پس از کامپوزیت کردن

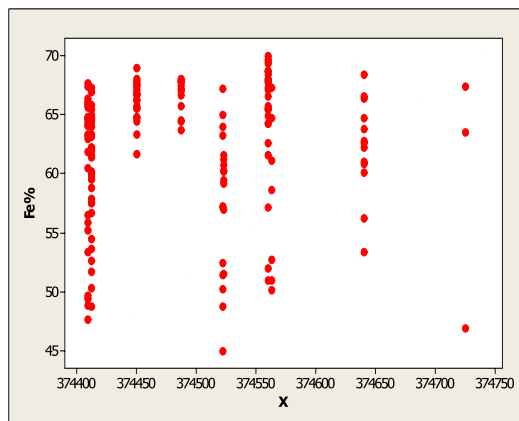
در اکثر محاسبات و تخمین‌های آماری، شرط نرمال بودن داده‌ها اساس کار را تشکیل می‌دهد، ولی در بسیاری موارد فرض نرمال بودن داده‌ها برقرار نیست. از این رو باید پیش از هر گونه پردازش آماری داده‌ها، توزیع داده‌ها را به صورت نرمال درآورد [۲]. بدین منظور می‌توان از انواع توابع تبدیل از جمله تبدیل لگاریتمی، لگاریتمی سه متغیره و کاکس و باکس استفاده کرد. بدیهی است که در پایان تخمین، نتایج تخمین باید به توزیع اولیه داده‌ها برگشت داده شود.

به منظور نرمال‌سازی داده‌ها ابتدا فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده عیار آهن مورد بررسی قرار گرفت. به طوری که در شکل ۸ دیده می‌شود، فراوانی‌نمای آهن گرایش به توزیع لگاریتمی دارد. با توجه به این نکته که فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده لگاریتمی نیز چنین خاصیتی دارد (شکل ۹). برای نرمال‌سازی از روش تبدیل لگاریتمی سه متغیره استفاده شد.

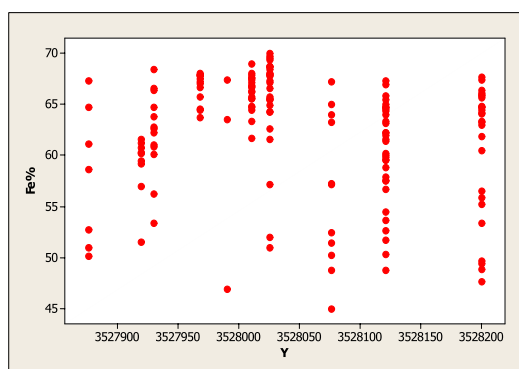


شکل ۸- فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده عیار آهن

با توجه به چولگی منفی فراوانی‌نمای لگاریتم طبیعی، از فرمول $Z = \ln(c - Fe)$ به منظور دستیابی به توزیع نرمال استفاده شد. در این فرمول، Z مقادیر تبدیل یافته عیار آهن و c مقدار ثابتی است [۵۱]. پس از آزمایش

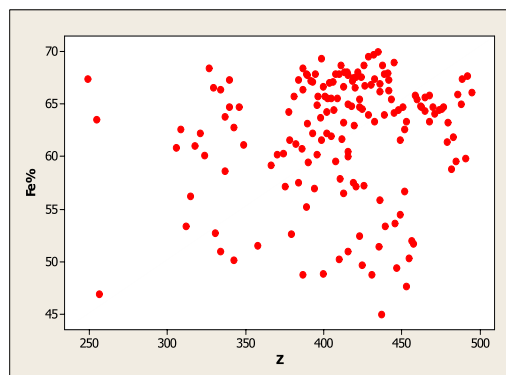


شکل ۵- توزیع عیار آهن در راستای شرقی-غربی



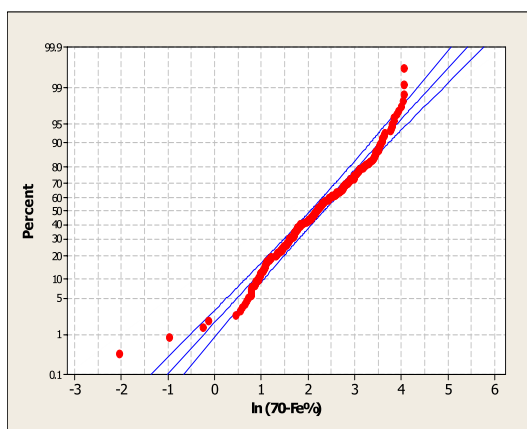
شکل ۶- توزیع عیار آهن در راستای شمالی-جنوبی

در این تحقیق طول ۶۵ درصد مغزه‌ها معادل ۳ متر بود، از این رو طول کامپوزیت‌ها ۳ متر در نظر گرفته شد.



شکل ۷- توزیع عیار آهن در راستای عمق

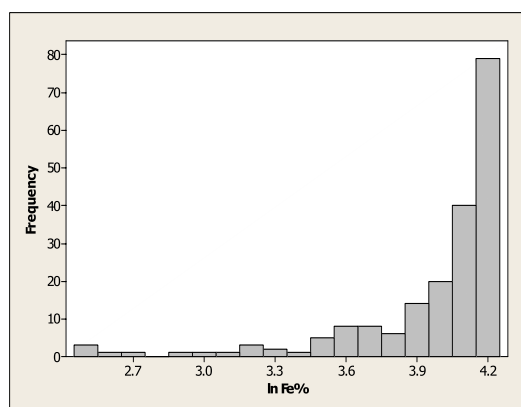
میانگین و میانه این توزیع و همچنین مقدار چولگی کم آن (-0.41) این توزیع را می‌توان نرمال فرض کرد. شکل ۱۱ نمودار فراوانی تجمعی را برای مقادیر تبدیل یافته نشان می‌دهد. به طوری که دیده می‌شود این نمودار تقریباً به خط نرمال برازش شده است، بنابراین می‌توان توزیع به دست آمده از این تبدیل را با تقریب کافی نرمال فرض کرد.



شکل ۱۱- نمودار فراوانی تجمعی داده‌های کامپوزیت شده و تبدیل یافته عیار آهن به روش لگاریتم سه متغیره

مقادیر مختلف، مقدار ثابت $C = 70$ به عنوان مناسب‌ترین مقدار پارامتر تبدیل لگاریتمی سه متغیره انتخاب شد.

در جدول ۲ پارامترهای آماری توزیع داده‌های کامپوزیت شده عیار آهن پس از تبدیل لگاریتمی سه متغیره نشان داده شده است. شکل ۱۰ نیز فراوانی‌نمای داده‌های تبدیل یافته به روش لگاریتم سه متغیره را نشان می‌دهد.



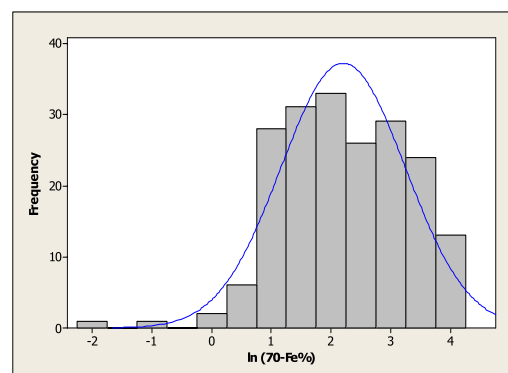
شکل ۹- فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده لگاریتمی آهن

نتیجه‌گیری

نمودار فراوانی تجمعی داده‌های عیار آهن نشان داد که داده‌های منطقه خصلت چند جامعه‌ای دارند، اما از آنجا که جداسازی جوامع به صورت فیزیکی که بتواند دلایل زمین‌شناسی نیز داشته باشد تقریباً غیر ممکن بود، لذا داده‌های عیار آهن به صورت یک جامعه مورد بررسی قرار گرفت.

برای تشخیص و تصحیح مقادیر خارج از ردیف، از روش نمودار دورفل استفاده شد و نتایج حاصل از آن نشان داد که مقداری به عنوان خارج از ردیف برای عنصر آهن وجود ندارد.

به منظور بررسی روندهای احتمالی، نمودار پراکنندگی عیار، در جهت‌های شمالی جنوبی (Y)، شرقی غربی



شکل ۱۰- فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده تبدیل یافته عیار آهن به روش لگاریتم سه متغیره

به طوری که دیده می‌شود، فراوانی‌نمای داده‌های تبدیل یافته به روش لگاریتم سه متغیره به منحنی نرمال تقریباً مماس است و با توجه به اختلاف ناچیز

(X) و عمقی (Z) رسم شد. نتایج نشان داد که هیچگونه روند بارزی در تغییرات عیار آهن به چشم نمی‌خورد. از آنجا که داده‌های موجود، مربوط به نمونه‌هایی با طول یکسان نبودند، از این رو به منظور همگن‌سازی، کامپوزیت‌هایی به طول ۳ متر تهیه شد.

به منظور نرمال‌سازی داده‌ها، مدل‌های طبیعی، لگاریتمی و لگاریتمی سه متغیره بررسی شد تا مشخص شود جامعه عیار آهن به کدامیک از مدل‌ها گرایش دارد. مطالعات نشان داد که این داده‌ها با تقریب خوبی از مدل لگاریتمی سه متغیره تبعیت می‌کنند.

جدول ۲- مقایسه پارامترهای آماری توزیع‌های طبیعی، لگاریتم طبیعی و لگاریتم سه متغیره داده‌های کامپوزیت شده عیار آهن

نوع توزیع	میانگین (درصد)	میانه (درصد)	واریانس (درصد)	انحراف معیار (درصد)	چولگی	کشیدگی
طبیعی	۵۵/۵۴۴	۶۱/۱۲۲	۱۹۱/۰۳۲	۱۳/۸۲۱	-۱/۴۱	۱/۲۹
لگاریتم طبیعی	۳/۹۷	۴/۱۱۳	۰/۱۲۲	۰/۳۴۹	-۲/۳۴	۵/۹
لگاریتم سه متغیره	۲/۲۰۲	۲/۱۸۳	۱/۰۸۴	۱/۰۴۱	-۰/۴۱	۰/۵۷

منابع

- ۱- حسنی پاک، علی، (۱۳۸۰)؛ تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷ ص.
- ۲- حسنی پاک، علی، (۱۳۷۷)؛ زمین آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ ص.
- ۳- سهیلی، منوچهر، مهدوی، م.، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ اسفوردی (۱۳۷۰).
- ۴- گزارش مطالعه پتانسیل‌ها و آنومالی‌های آهن ایران مرکزی (۱۳۸۳)، شرکت مهندسی مشاور معدنکاو، جلد اول، ۳۸۵ ص.
- ۵- مدنی، حسن (۱۳۷۳)؛ مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر - واحد تفرش، ۶۵۹ ص.
- 6- Felipe Costa, J., (2003), Reducing the Impact of Outliers in Ore Reserves Estimation, J.of International Association for Mathematical Geology, vol. 35, PP. 323-345.
- 7- Rambert, F., (2003), Introduction to Mining Geostatistics, Franklin Roosevelt publishers; PP. 1-4.
- 8- Reedman, J.H.; Phill, M., (1987); Techniques in Mineral Exploration, newyork, Brayn & son, 533 pages.