



کاربرد منطق فازی در اکتشاف کانسارهای سرب و روی کربناته با استفاده از

پردازش داده‌های رقومی ماهواره‌ای در استان اصفهان

مسعود عسکری^{*۱}، علی قاسمی^۲، سعید چراغی^۳، بهداد ناظم‌الرعا یا^۴

جواد عسکری^۵

۴ و ۳ و ۲ و ۱ عضو هیات علمی جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان

۵ عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی اصفهان

Email:ghasemi16@yahoo.com

چکیده

اکتشاف معادن فرایندی پیچیده و پرهزینه است و دانش فنی مربوط به آن بسیار گرانبهاست. تصاویر ماهواره‌ای حاوی اطلاعات بسیار زیادی در مورد جنس لایه سطحی زمین می‌باشند و می‌توانند در اکتشاف معادن سطح زمین بسیار سودمند باشند. علم سنجش از دور با استفاده از روشهای نوین پردازش اطلاعات توانسته است کاربردهای زیادی در زمینه‌هایی مانند زمین‌شناسی، جنگلها و مراتع، علوم زیست محیطی و شهرسازی پیدا کند. هدف این تحقیق طراحی سیستم هوشمندی براساس منطق فازی است که بتواند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مناطق امیدبخش کانسارهای تیپ کربناته را تشخیص دهد. خروجی سیستم تصویری است که در آن مناطقی که امکان وجود دولومیت در آنها زیاد است با رنگ سفید و مناطق دیگر سیاه هستند. ورودی سیستم هفت تصویر تک‌رنگ از منطقه موردنظر می‌باشد که توسط ماهواره Landsat TM در هفت باند فرکانسی تصویرداری شده است. برای آموزش سیستم هوشمند فازی، ابتدا منطقه‌ای که دولومیت در آن وجود داشته باشد و تصاویر ماهواره‌ای آن در دسترس باشند انتخاب می‌شود و سپس خروجی مطلوب سیستم ساخته می‌شود. با استفاده از این داده‌ها، شبکه عصبی فازی آموزش داده می‌شود تا شبکه عصبی فازی با قابلیت اکتشاف کانسارهای کربناته با میزبان دولومیتی حاصل شود. صحت عملکرد سیستم، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین‌شناسی مربوط به نقاط شناخته شده دیگری بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: کانسار، سرب، روی، دولومیت، دورسنجی، شبکه عصبی، اکتشاف

* اصفهان - دانشگاه صنعتی اصفهان - جهاد دانشگاهی - معاونت پژوهشی - گروه پژوهشی برق و کنترل



مقدمه

استان اصفهان با مساحتی حدود ۱۰۶۱۷۹ کیلومتر مربع بین نصف‌النهار ۳۰ درجه و ۲۶ دقیقه تا نصف‌النهار ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و نصف‌النهار ۴۹ درجه و ۳۲ دقیقه تا نصف‌النهار ۵۵ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این استان در بخش مرکزی فلات ایران واقع شده و از شمال به استانهای مرکزی، قم و سمنان، از جنوب به استان فارس، از مشرق به استانهای یزد و خراسان و از مغرب به استانهای لرستان، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد محدود می‌شود.

از نظر ریخت‌شناسی، سه واحد مهم زمین‌ریخت (ژئومورفولوژی) مانند کوه، تپه و دشت در استان دیده می‌شود. در مغرب رشته‌کوههای زاگرس با جهت شمال غرب - جنوب شرق از کوههای گلپایگان تا ارتفاعات دنا گسترش دارد. دره طولانی زاینده‌رود از غرب به شرق کشیده شده است. قسمت عمده جلگه استان در قالب دشت وسیعی است که از آبرفت زاینده‌رود بوجود آمده و با شیب ملایم به باتلاق گاوخونی در جنوب شرق اصفهان ختم می‌شود. کویر شمال شرق استان توسط کوههای جنوب کاشان، اردستان و نائین از حوضه گاوخونی جدا می‌شود. باتلاق گاوخونی گودترین منطقه استان است. نقاط ارتفاعی استان بین کمتر از پانصد متر تا بیشتر از ۴۰۰۰ متر متغیر می‌باشد. کوه دنا با ارتفاعی برابر ۴۲۸۷ متر بلندترین نقطه در قسمت جنوب غربی استان و نقاط ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر از سطح دریا عمدتاً در بخش‌های شرقی و شمال شرقی استان قرار دارد.

از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی ساختمانی در استان چهار واحد و یا زون ساختاری زاگرس مرتفع (رورانده)، سندانج - سیرجان، ارومیه - دختر و ایران مرکزی قابل تشخیص است. از نظر سنگ - چینه‌شناسی در گستره استان، مجموعه سنگها یا واحدهای سنگ - چینه‌ای مربوط به پرکامبرین و دوران چهارگانه زمین‌شناسی با لیتولوژی رسوبی، آذرین و دگرگونی وجود دارد که سنگهای ساختمانی و تزئینی نمونه‌ای از آنها می‌باشند.

روش

برای اکتشاف کانسارهای کربناته با میزبان با استفاده از داده‌های رقومی ماهواره‌ای در استان اصفهان در ابتدا لازم است کانسارهای اکتشاف شده و مورد بهره‌برداری را مطالعه نمود تا معیارهایی جهت اکتشاف اینگونه کانسارها تعیین شود. این نقاط اصطلاحاً نقاط شاهد نامیده می‌شوند.

داده‌های رقومی TM نقاط شاهد مربوط به Landsat 5 با شماره گذر و ردیف ۱۶۷-۳۷ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در ابتدا تصحیح‌های مختلف مانند تصحیح هندسی، تصحیح توپوگرافی، نسبت سایه به شیب انجام شده است و با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و مقایسه مکانی نقاط مشخص بر



روی نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر رقومی، این تصاویر زمین مرجع (Geocode) می‌شوند. با در دسترس بودن مختصات نقاط شاهد، محدوده هر کدام از این نقاط بر روی تصاویر ماهواره‌ای مشخص شده و ماتریس همبستگی بین داده‌های باندهای مختلف تعیین می‌شوند که میزان همبستگی داده‌ها را نشان می‌دهد. با ساخت ترکیب‌های رنگین دروغین و استفاده از نسبت‌های طیفی باندها معیارهایی برای شناسایی دولومیت ارائه می‌شود که نتایج این مطالعات در ادامه آمده است. لازم به ذکر است از آنجائیکه تصاویر سنجنده TM قابلیت تفکیک حداقل ۳۰ مترمربع را دارند بنابراین در این مطالعه سازندهای بزرگ مقیاس آهکی و دولومیتی در ارتباط با کانسارهای سرب و روی بررسی می‌شوند و از بررسی کانی‌هایی مانند سروزیت، مالاکیت، آزوریت و اسمیت‌زونیت که در کانسارهای کربناته وسعتی کمتر از یک متر مربع دارند صرف‌نظر شده است. تصاویری که ماهواره Landsat TM در اختیار قرار می‌دهد بصورت دو عدد فایل می‌باشد. یک فایل شامل اطلاعات مرتبط به مشخصات تصویر از جمله تعداد پیکسل‌های طولی و عرضی می‌باشد و فایل دیگر شامل شدت روشنایی پیکسل‌ها در هر باند است. برای انجام این طرح از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. علت انتخاب این نرم‌افزار قدرت پردازش تصویر و انجام محاسبات فازی آن می‌باشد. برای اینکه نرم‌افزار MATLAB بتواند اطلاعات تصاویر را بازخوانی کند باید فرمت اطلاعات تغییر کند و مطابق استاندارد MATLAB گردد.

کانسارهای سرب و روی کربناته بیشتر در دولومیت و به میزان کمتری در سنگ آهک پدید می‌آیند و تولیدکننده‌های اصلی سرب و روی و گاه فلوریت و باریت هستند. مهم‌ترین سیمای این ذخایر وجود یک توالی کربناتی ضخیم است، زیرا لایه‌های کربناتی نازک واقع در شیل‌ها بندرت دارای چنین ذخایر مهمی هستند. با مطالعه فسیل‌ها و سنگ میزبان آهکی و دولومیتی مشخص می‌شود که این ذخایر عمدتاً در آب‌های کم‌عمق محیط‌های نزدیک به ساحل دریا‌های گرم حاشیه حوضه‌های درون کراتونی تشکیل شده‌اند. اینگونه محیط‌ها در گذشته در راستای حاشیه‌های حوضه‌های دریایی گسترش یافته که در نواحی کراتونی پایدار تشکیل شده است. شمار اندکی از این گونه نهشته‌ها در پرکامبرین یافت می‌شوند ولی نهشته‌های مهم از این دسته در همه مجموعه‌های رسوبی تا کرتاسه بجز سیلورین یافت می‌شوند. مهم‌ترین معیارهای اکتشافی کانسارهای کربناته توالی‌های کربناتی در حاشیه حوضه‌های عمیق بزرگ، حضور توالی لایه‌های دولومیتی و مواد آلی و تبخیری، دگرشیبی و کارست و گسل‌های عمیق در درون لایه‌های کربناتی می‌باشد.

ویژگی‌های طیفی سازندهای آهکی و دولومیتی در مطالعات دورسنجی

در روش‌های سنجش از دور برای تفکیک نواحی مختلف می‌توان همانند روش‌های ژئوشیمیایی با استفاده از نسبت‌های طیفی مختلف رفلکتانس ناحیه دلخواه را تشدید یا تضعیف نمود. با توجه به اینکه کانسارهای سرب و روی کربناته در ارتباط با واحدهای سنگی شامل آهک، دولومیت، شیل و بخش‌های دولومیتی آتره شده



که احتمالاً حاوی دولومیت‌های آهن‌دار و اکسیدهای آهن هستند، بوده به همین منظور با توجه به جدول توزیع رفلکتانس طیفی شش باند TM برای دولومیت و کلسیت نسبت های مناسب جهت شناسایی این سازندها بصورت زیر می باشد.

نسبتهای طیفی برای جداسازی دولومیت :

الف - $R[R(5,2), R(7,5)]$

ب - $R[R(5,2), R(7,4)]$

ج - $R[R(5,2), R(7,3)]$

لازم به ذکر است که منظور از نسبت $R(7,5)$ یعنی نسبت باند ۷ به باند ۵ و منظور از نسبت آورده شده در الف نسبت $R(5,2)$ به $R(7,5)$ می باشد.

نسبتهای طیفی برای جداسازی آهک :

الف - $R[R(4,3), R(4,1)]$

ب - $R[R(4,3), R(3,2)]$

ج - $R[R(4,3), R(3,1)]$

در تصاویر مربوط به نسبتهای تفکیک دولومیت، روشن ترین منطقه مشخصه دولومیت و همچنین برای تصاویر مربوط به آهک روشن ترین منطقه مشخصه آهک می باشد.

یکی از روشهای مؤثر برای تفکیک و جداسازی واحدهای مختلف ساخت ترکیبهای رنگی کاذب می باشد. تصویر کاذب رنگی، ترکیب سه باند مختلف است که بصورت رنگهای قرمز، سبز و آبی با هم ترکیب می شوند. چنانچه باندهای ترکیبی در طول موج آبی، سبز و قرمز باشد تصویر حاصله با رنگ واقعی به دست خواهد آمد. در صورتی که باندهای ترکیبی متفاوت از آبی، سبز و قرمز باشد تصویر حاصله رنگ کاذب خواهد داشت.

مطالعات دورسنجی سازندهای کربناتی حاوی سرب و روی در استان اصفهان

برای مطالعات دورسنجی استان اصفهان ابتدا تصاویر ماهواره ای مربوط به ۱۰ نقطه که در آنجا کانسارهای سرب و روی کربناته تشکیل شده است انتخاب شدند. این ده نقطه عبارتند از: فسخود، انجیره - تیران، ویجین، خانه سرمه، ایرانکوه، سه، گوش خلات، طرق، نخلک و کهرویه. با مطالعه ویژگی های طیفی این نقاط و ساخت ترکیب های رنگی مختلف مشخص شد که ترکیب رنگی $R, G, B=7, 4, 1$ بخوبی مناطق آهکی و دولومیتی را تفکیک می کند همچنین استفاده از تصاویر نسبت باندها نیز قادر است مناطق آهکی و دولومیتی



را مشخص سازد) نسبت $R[R(5,2),R(7,4)]$ - برای مناطق آهکی و نسبت $R[R(5,2),R(7,4)] +$ برای مناطق دولومیتی مناسب می‌باشد).

مطالعات دورسنجی کانسار انجیره - تیران

این کانسار در هفت کیلومتری شمال غربی تیران قرار گرفته است. مختصات آن $۴۵^{\circ} ۳۰'$ عرض جغرافیایی و $۷۳^{\circ} ۵۱'$ طول جغرافیایی می‌باشد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی نجف‌آباد در منطقه تیران واحدهای زیر وجود دارد:

- شیل خاکستری با میان لایه‌های آهک اوریتولین دارمارنی (آبتین - آلبین کرتاسه)

- آهک خاکستری شامل آمونیت و اوریتولین (آبتین کرتاسه)

- تراس‌های قدیمی کواترنر

کانی‌سازی در داخل یک سری آهک، شیست و کالکوشیست که بصورت چین خوابیده مشخص می‌شود انجام گرفته است. با مطالعه تصویر این منطقه و ساخت ترکیب‌های رنگی مختلف مشخص شد ترکیب رنگی $R, G, B = 7, 4, 1$ برای مشخص کردن سازندهای آهکی و دولومیتی و نسبت $R[R(5,2),R(7,4)]$ - برای مناطق آهکی و نسبت $R[R(5,2),R(7,4)] +$ برای مناطق دولومیتی مناسب‌ترین نسبت‌ها هستند.

مطالعات دورسنجی کانسار ایرانکوه

این کانسار در ۲۲ کیلومتری جنوب اصفهان و شمال غربی ارتفاعات ایرانکوه قرار گرفته است. مختصات معدن ایرانکوه $۳۱^{\circ} ۳۷'$ و $۳۲^{\circ} ۳۶'$ می‌باشد.

با توجه به نقشه زمین‌شناسی اصفهان در منطقه ایرانکوه سازندهای زیر وجود دارد.

- دولومیت‌های ماسه‌ای، زرد و قهوه‌ای (کرتاسه پائین)

- آهک خاکستری شامل اوریتولین و آمونیت (کرتاسه پائین)

- مارن با میان لایه‌های آهک اوریتولین دار (کرتاسه پائین)

مطالعات طیفی در این کانسار نیز به نتایجی مشابه با آنچه در مورد کانسار انجیره - تیران ذکر شد منتهی می‌شود. مطالعه دیگر نقاط شاهد نیز نتایج بدست آمده را تایید می‌کنند.

منطق فازی

منطق فازی به دلیل طبیعت مبهم داده‌های زمین‌شناسی، ابزار مناسبی برای پردازش این نوع داده می‌باشد. مزیت اصلی بکارگیری منطق فازی توانایی آن در استفاده از اطلاعات کیفی و کمی می‌باشد. در [۱] برخی کاربردهای منطق فازی در زمین‌شناسی بررسی شده است. در [۲] برای استفاده از داده‌های مبهم و کیفی که از مخازن نفتی بدست می‌آیند از منطق فازی استفاده شده است و در [۳] کاربرد منطق فازی در بیان و حل معادلات فیزیکی مطرح در زمین‌شناسی، بررسی شده است. در [۴] از C - میانگین فازی (fuzzy C-mean)



برای دسته‌بندی سنگها استفاده شده است. در [۵] یک تخمینگر فازی برای تخمین وضعیت لایه‌های داخلی زمین طراحی شده است.

سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اطلاعات بسیار مفیدی در مورد جنس سنگهای لایه سطحی زمین در اختیار ما قرار می‌دهد و می‌توان از این اطلاعات بعنوان ابزار کمکی برای اکتشاف معادن استفاده کرد. در سالهای اخیر از روشهای مختلفی برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و استخراج اطلاعات مورد نیاز استفاده شده است [۶ و ۷]. در [۸] از روش مولفه‌های اصلی (Principal Components) برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تشخیص جنس سنگهای لایه سطحی زمین استفاده گردیده است. در این روش از همبستگی بین تصاویر در باندهای مختلف استفاده می‌شود.

در این مقاله نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی تشکیلات کربناته و اکتشاف معادن حاوی سنگ دولومیت با استفاده از شبکه عصبی فازی ارائه شده است. ابتدا از تصاویر یکی از مناطقی که معادن شناخته شده‌ای دارد برای آموزش شبکه عصبی فازی استفاده شده است و سپس عملکرد شبکه آموزش یافته، با استفاده از تصاویر مناطق شناخته شده دیگری آزمایش گردیده است.

تهیه داده‌های آموزشی

برای آموزش شبکه لازم است تصویر مطلوب خروجی برای یک منطقه در دسترس باشد. این تصویر به همراه تصاویر ماهواره‌ای داده‌های آموزشی را تشکیل می‌دهند. منطقه ایرانکوه واقع در جنوب غربی اصفهان به دلیل وجود سنگهای دولومیتی و در دسترس بودن تصاویر ماهواره‌ای، به عنوان منطقه شاهد در نظر گرفته شده است. تصویر مطلوب خروجی برای این ناحیه، تصویری است سیاه‌سفید که در آن هرچه جنس سنگها شباهت بیشتری به دولومیت داشته باشد رنگ روشنتری دارند. به عبارت دیگر وجود دولومیت را می‌توان بعنوان یک مجموعه فازی در نظر گرفت که مقدار تابع عضویت هر نقطه متناسب با شباهت آن نقطه به سنگهای دولومیتی از نظر میزان بازتابش نور می‌باشد.

تصویر مطلوب

با توجه به اینکه جنس سنگهای این منطقه کاملاً شناخته شده‌اند، می‌توان با اعمال یک تابع ریاضی روی ارزش عددی هر پیکسل در تصاویر مربوط به باندهای مختلف، تصویر مطلوب را ایجاد کرد. شدت نور بازتابش شده علاوه بر جنس سنگ به شدت نور خورشید در هنگام تصویربرداری نیز وابسته است. برای حذف این وابستگی از نسبت ارزش عددی تصاویر باندهای مختلف در هر پیکسل استفاده می‌شود. بدین منظور تصاویر تمام باندها را به باند ۱ نرمالیزه می‌کنیم.

$$P_i(x, y) = d_i(x, y) / (Md_1(x, y)) \quad i = 2, 3, \dots, 7 \quad (1)$$

که $d_i(x, y)$ ارزش عددی پیکسل با مختصات (x, y) در باند i ام می‌باشد. $d_i(x, y)$ عددی صحیح بین صفر و ۲۵۵ است. عدد M بگونه‌ای انتخاب می‌شود که

$$\max_{x, y} P_i(x, y) = 1 \quad i = 2, 3, \dots, 7 \quad (2)$$

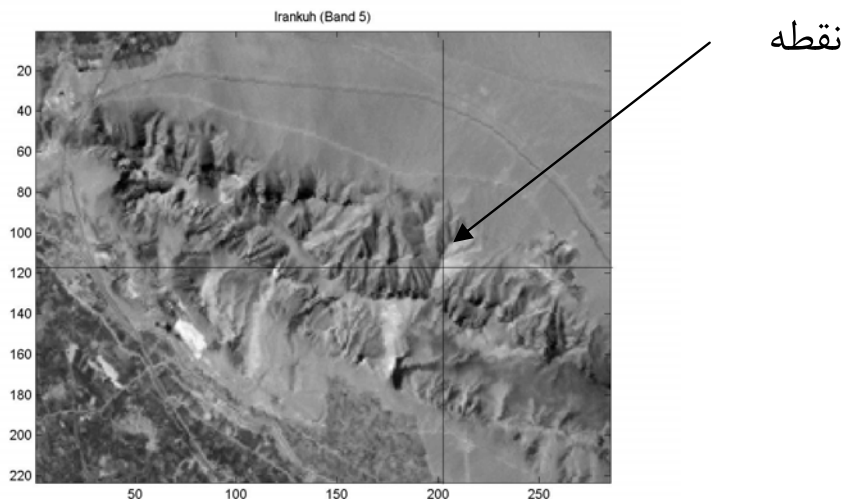
برای محاسبه میزان شباهت از یک پیکسل، که از دولومیت بودن منطقه متناظر با آن در سطح زمین اطمینان داریم، بعنوان نقطه مرجع استفاده می‌کنیم. شکل ۱ تصویر باند ۵ مربوط به منطقه ایرانکوه و نقطه مرجع را نشان می‌دهد. باند ششم در طول موج امواج مادون قرمز قرار دارد. بنابراین میزان بازتابش در این باند به حرارت سطح زمین وابسته است. از اینرو از باند ششم جهت پردازش، استفاده نمی‌کنیم و لذا خطا یا عدم شباهت بصورت

$$e(x, y) = \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 6}}^7 (P_i(x_{ref}, y_{ref}) - P_i(x, y))^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

و تابع عضویت مجموعه دولومیت بصورت

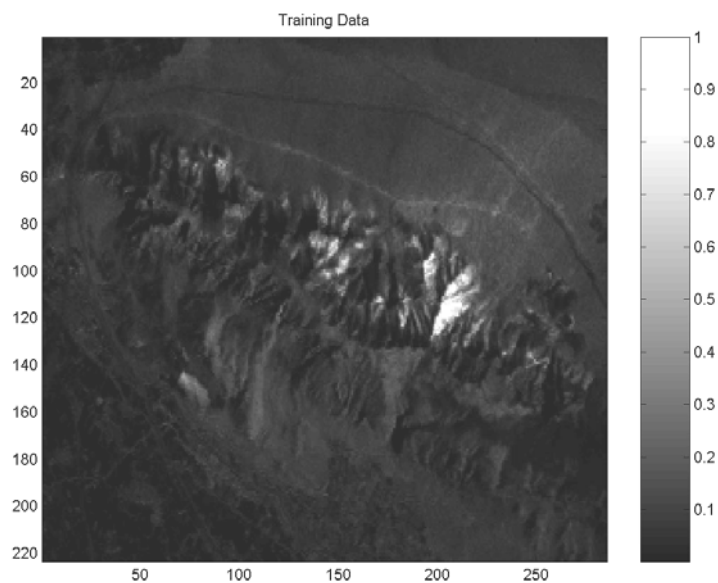
$$\mu(e(x, y)) = 2 / (1 + \exp(\lambda e(x, y))) \quad (4)$$

تعریف می‌شوند. اگر شدت روشنایی هر پیکسل از تصویر، متناسب با مقدار عضویت آن در مجموعه دولومیت تعریف گردد، به تصویر مطلوب می‌رسیم. شکل ۲ تصویر بدست آمده بازای $\lambda = 6$ را نشان می‌دهد. با تغییر

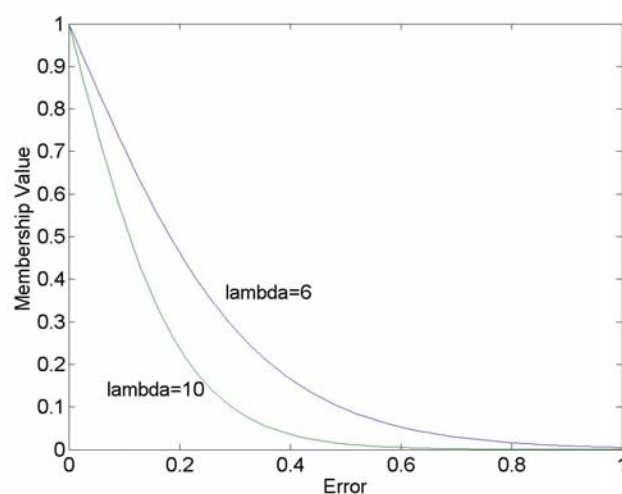


شکل ۱: منطقه ایرانکوه و نقطه مرجع

λ می‌توان حساسیت تصویر را تغییر داد. شکل ۳ تابع عضویت μ را برای دو مقدار $\lambda = 6$ و $\lambda = 10$ نشان می‌دهد. با افزایش λ عرض تابع عضویت کاهش می‌یابد. بنابراین حساسیت تصویر افزایش می‌یابد و نقاط خاکستری‌رنگ، تیره‌تر می‌شوند.



شکل ۲: تصویر مرجع به ازای $\lambda = 6$



شکل ۳: تابع عضویت مجموعه دولومیت برای $\lambda = 6$ و $\lambda = 10$



داده‌های ورودی

نسبت بازتابش باند i بر باند j در پیکسل (x, y) را بصورت $r_{i,j}(x, y)$ نمایش می‌دهیم.

$$r_{i,j}(x, y) = \frac{d_i(x, y)}{d_j(x, y)} \quad (5)$$

بنا به دلایلی که گفته شد از باند ۶ استفاده نمی‌کنیم و از باند یک برای نرمالیزه کردن باندها استفاده می‌کنیم. بنابراین برای هر پیکسل پنج داده قابل تجزیه تحلیل می‌باشند که عبارتند از:

$$r_{i,1}(x, y) \quad i = 2, 3, 4, 5, 7 \quad (6)$$

بررسی تفاوت بین شدت نور بازتابش شده از سطح سنگ دولومیت و شدت نور بازتابش شده از سایر سنگها، در باندهای مختلف، نشان می‌دهد که این تفاوت در باندهای ۷ و ۵ بیشتر از سایر باندها می‌باشد. لذا می‌توان تنها با در نظر گرفتن داده‌های $r_{5,1}(x, y)$ و $r_{7,1}(x, y)$ به نتایج مطلوبی رسید. بنابراین شبکه عصبی فازی دارای دو ورودی می‌باشد.

شبکه عصبی فازی

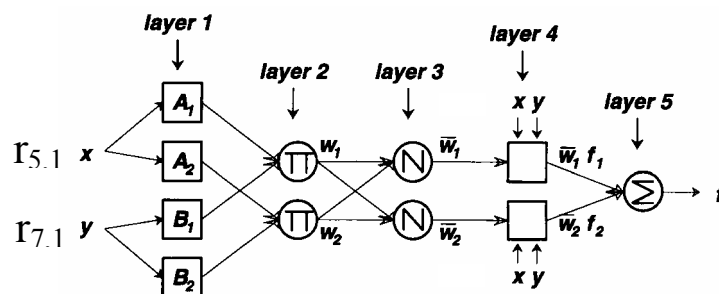
شبکه عصبی فازی (ANFIS) (Adaptive Neuro-fuzzy Inference System) یک سیستم هوشمند مناسب برای تخمین توابع غیرخطی است [9,10]. بنابراین برای تخمین رابطه بین شدت نور بازتابیده شده در هر پیکسل و وجود دولومیت، ابزار مناسبی می‌باشد. شکل ۴ ساختار شبکه عصبی فازی را با دو ورودی $r_{5,1}(x, y)$ و $r_{7,1}(x, y)$ و یک خروجی f و قوانین اگر آنگاه زیر نشان می‌دهد.

$$\text{Rule } 1 : \text{ If } r_{5,1}(x, y) \text{ is } A_1 \text{ and } r_{7,1}(x, y) \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 = a_1 r_{5,1}(x, y) + b_1 r_{7,1}(x, y) + c_1$$

$$\text{Rule } 2 : \text{ If } r_{5,1}(x, y) \text{ is } A_2 \text{ and } r_{7,1}(x, y) \text{ is } B_2 \text{ then } f_2 = a_2 r_{5,1}(x, y) + b_2 r_{7,1}(x, y) + c_2$$

همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود شبکه عصبی فازی شامل پنج لایه می‌باشد. در لایه ۱ مقدار توابع عضویت متناظر با ورودیها محاسبه می‌شود. در لایه ۲ عمل AND فازی استفاده شده است. یعنی:

$$w_i = \mu_{A_i}(r_{5,1}(x, y)) \times \mu_{B_i}(r_{7,1}(x, y)) \quad i = 1, 2 \quad (7)$$



شکل ۴: ساختار شبکه عصبی فازی

خروجی لایه ۳ بصورت

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

می‌باشد. لایه ۴ یک لایه افقی است و خروجی آن بصورت

$$\bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (a_i r_{5,1}(x, y) + b_i r_{7,1}(x, y) + c_i) \quad (9)$$

است. در لایه ۵ مجموع خروجیهای لایه قبل محاسبه می‌گردد. لایه‌های فوق یک شبکه افقی را تشکیل می‌دهند که عملکردی مشابه مدل فازی سوگینو دارند [11]. برای بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به توابع عضویت در لایه ۱ و ضرایب a_i , b_i , c_i در لایه ۴ از الگوریتم آموزش هیبرید استفاده شده است. الگوریتم آموزش هیبرید (Hibrid Learning Rule) ترکیبی از تخمینگر مجذور خطا (Least Square Estimator) (LSE) و پس انتشار (BP) (Back Propagation) می‌باشد. در الگوریتم هیبرید، خروجی تا لایه ۴ محاسبه می‌شود و پارامترهای a_i , b_i , c_i در این لایه با استفاده از روش LSE تعیین می‌گردند و سپس با استفاده از پارامترهای بهینه شده خروجی محاسبه می‌شود. اختلاف بین این خروجی و خروجی مطلوب، سیگنال خطا را مشخص می‌کند. پارامترهای مربوط به توابع عضویت در لایه ۱، با استفاده از سیگنال خطا و تکنیک BP بهینه می‌گردند. با تکرار این روند، پارامترها به مقدار مطلوب نزدیکتر می‌شوند و خطای سیستم کاهش می‌یابد.

طبق بررسی‌های انجام شده اگر برای هر ورودی، ۲ تابع عضویت (Small, Large) در نظر گرفته شود، سیستم آموزش یافته دقت لازم را بدست نمی‌آورد. بنابراین برای هر ورودی از سه تابع عضویت (Small, Medium, Large) استفاده شد و در نتیجه ۹ عدد قانون فازی بدست آمد. افزایش تعداد توابع عضویت و نیز افزایش تعداد ورودیها تأثیر زیادی بر افزایش حجم محاسبات لازم برای آموزش و همچنین حجم محاسبات لازم برای محاسبه تصویر خروجی توسط شبکه آموزش یافته می‌گذارد.

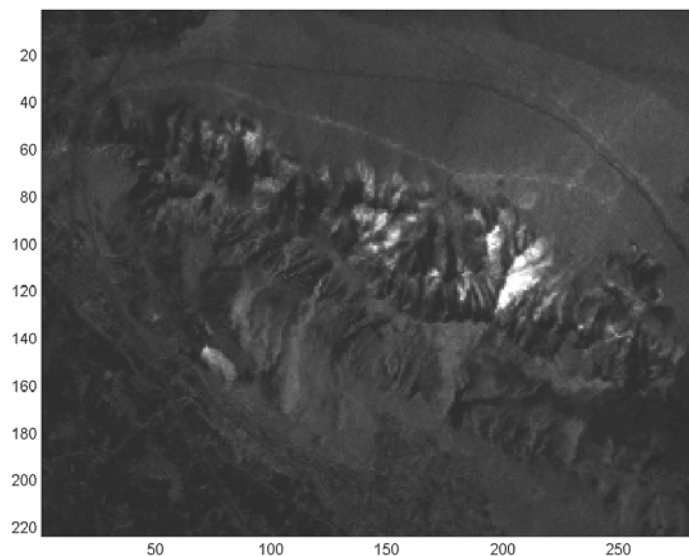


شبکه آموزش یافته

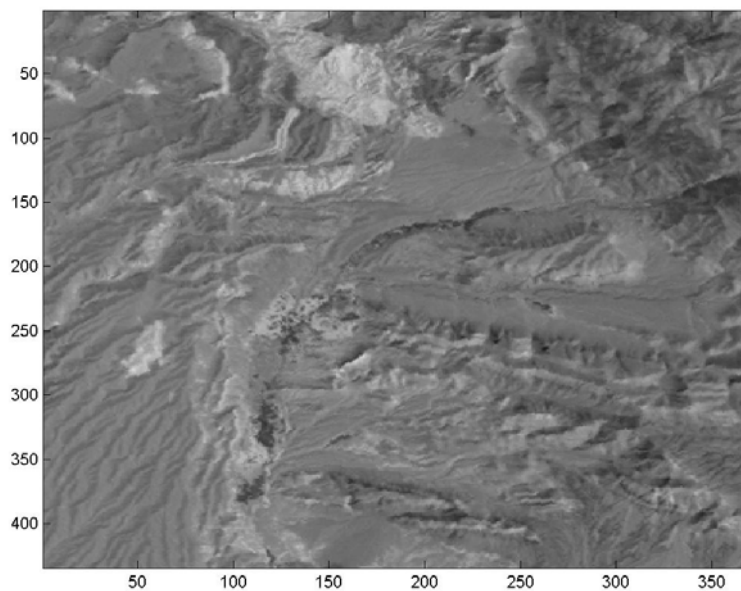
خروجی شبکه عصبی فازی آموزش یافته، بازای داده‌های آموزشی در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود شبکه عصبی فازی توانسته است تصویری مشابه تصویر مطلوب (شکل ۲) ایجاد کند.

به منظور اطمینان از صحت عملکرد سیستم، از مناطق دیگری که دارای ذخایر دولومیت کشف شده می‌باشند استفاده شده است. شبکه عصبی فازی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مربوط به این مناطق، نقاطی که جنس سنگها از نوع دولومیت می‌باشد را مشخص کرده است. شکل ۶ تصویر باند ۱ منطقه سه واقع در شمال اصفهان و شکل ۷ خروجی شبکه عصبی فازی را برای این منطقه نشان می‌دهد.

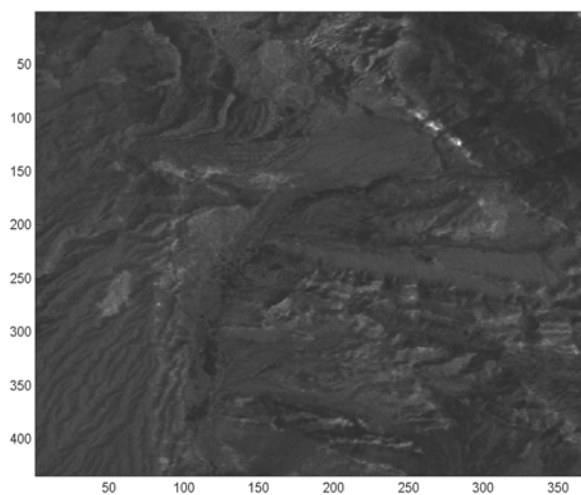
نقشه‌های زمین‌شناسی وجود کانسار دولومیت را در نقاطی که کاملاً روشن هستند تأیید می‌کنند. شکل ۸ تصویر باند ۱ منطقه وجین واقع در غرب اصفهان و شکل ۹ خروجی شبکه عصبی فازی مربوط به آن منطقه را نشان می‌دهد. در این مورد نیز نقشه‌های زمین‌شناسی تأییدکننده عملکرد سیستم می‌باشند.



شکل ۵: خروجی شبکه عصبی فازی بازای داده‌های آموزشی

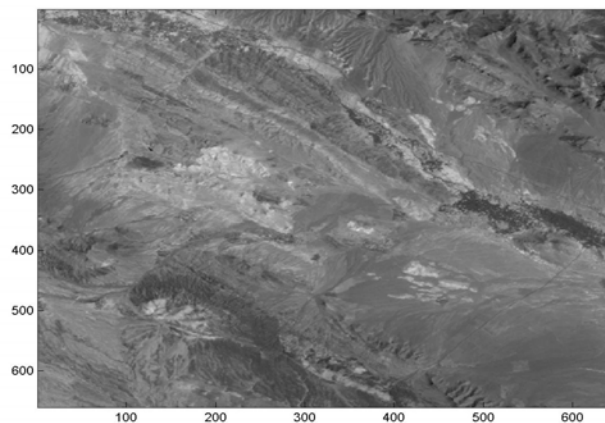


شکل ۶: تصویر باند ۱ منطقه سُه

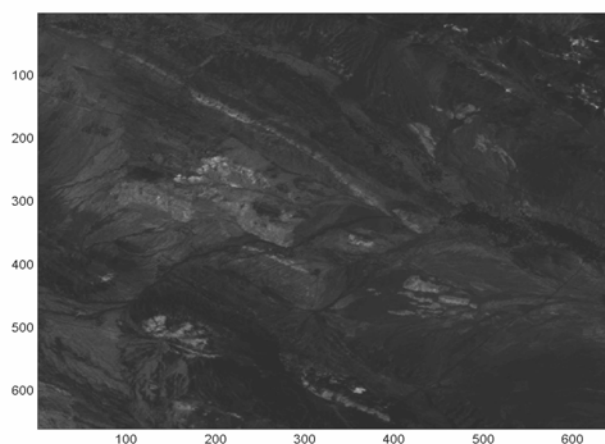


شکل ۷: خروجی شبکه عصبی فازی مربوط به منطقه سُه

شش منطقه شناخته دیگر نیز توسط شبکه عصبی فازی مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج رضایتبخشی بدست آمد.



شکل ۸ : تصویر باند ۱ منطقه وجین



شکل ۹ : تصویر ایجاد شده توسط شبکه عصبی فازی مربوط به منطقه وجین

نتیجه گیری

ارتباط بین تصاویر ماهواره‌ای سطح زمین در طول موجهای مختلف و وجود کانسارهای کربناته مانند دولومیت یک ارتباط غیرخطی است. شبکه عصبی فازی دارای قابلیت خوبی در تخمین اینگونه توابع می‌باشد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از تصاویر و نقشه‌های زمین‌شناسی یک منطقه شناخته شده، شبکه عصبی فازی آموزش یافت و سپس برای شناسایی مناطق دیگر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از پردازش تصاویر مناطق شناخته شده دیگر با استفاده از این شبکه آموزش یافته، بیانگر صحت عملکرد آن می‌باشد. تصویر بدست آمده بعنوان یک لایه در نرم‌افزارهای GIS قابل استفاده است.



تقدیر و تشکر

بدینوسیله از معاونت پژوهش و فناوری جهاد دانشگاهی که در انجام این تحقیق صمیمانه همکاری نمودند تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Bezdek, J.C., (1981), *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithm*, Plenum Press, New York.
- [2] Nordlund, U., (1996), "Formalizing Geological Knowledge-With an Example of Modeling Stratigraphy using Fuzzy Logic," *Journal of Sedimentary Research*, 66, 689-698.
- [3] Cuddy, S., (1997), "The Application of Mathematics of Fuzzy Logic to Petrophysics," *SPWLA Annual Logging Symposium*, paper S.
- [4] Fang, J.H., and Chen, H.C., (1997), "Fuzzy Modelling and the Prediction of Porosity and Permeability from the Compositional and Textural Attributes of Sandstone," *Journal of Petroleum Geology*, 20, 185-204.
- [5] Huang, Y., Gedeon, T.D., and Wong, P.M., (1999), "A Practical Fuzzy Interpolator for Prediction of Reservoir Permeability," *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Seoul.
- [6] Benz, U.C., (2004), "Multi-reasoning, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol 58, pp 239-258.
- [7] Al-Rawi, K.R., Gonzalo, C., and Martinez, E., (2000), "Supervised ART-II' neural network for Landsat TM image classification", *Remote Sensing in the 21st Century*, ISBN 90 5809 096 5
- [8] Crosta, A.P., (2003), "Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis.", *Int. J. Remote Sensing*, Vol 24, No. 21.
- [9] Jang, J.S.R., and Sun, C.T., (1995), "Neuro-fuzzy Modeling and Control", *Proceedings of the IEEE*, Vol 83 No. 3, pp 377-406.
- [10] Jang, J.S.R., (1992), "Self-learning fuzzy controllers based on temporal backpropagation", *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol 3, No 5.
- [11] Sugeno, M., and Yasukawa, T., (1993), "A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol 1.