

تلفیق داده‌ها و تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تهیه نقشه ظرفیت‌سنجی منابع نفت و گاز (بررسی موردی: ناحیه سراچه، استان قم)

مریم همدانیان؛ پژوهشگاه صنعت نفت

عباس مالیان، ابوالفضل سلطانی؛ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

پذیرش ۹۷/۰۴/۲۵

دریافت ۹۶/۱۱/۰۳

چکیده

در این پژوهش با هدف کمک به کاهش ریسک اکتشافات زمین‌شناسی برای بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌های نفتی و گازی، روش مهندسی اطلاعات مکانی یعنی استفاده هم‌زمان از روش‌های دورکاوی، سامانه اطلاعات مکانی، تعیین موقعیت ماهواره‌ای و فتوگرامتری زمینی و هوایی به‌کار گرفته شد. این اطلاعات در دو بخش دورکاوی فضایی (تصاویر ماهواره‌ای) و هوایی و زمینی (فتوگرامتری) با دو جنبه کمی و کیفی بررسی شد. هم‌چنین در این تحقیق، تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و دگرسانی سنگ‌ها (هوازگی و آلتراسیون) با تحلیل اطلاعات هندسی و رادیومتری و اعمال شاخص هیدروکربنی و مدل ژئوبوتانی استفاده شد. تحلیل‌های فتوگرامتری شامل تفسیر عکس‌ها و ایجاد مدل سه بعدی از عکس‌های هوایی نیز با هدف استخراج مدل ساختاری و سنگ‌شناسی انجام شد. در پژوهش حاضر، منطقه سراچه استان قم که طبق شواهد زمین‌شناختی، غنی از مواد هیدروکربنی است بررسی شد. با این هدف، پردازش تصاویر چند طیفی سنجنده استر ماهواره ترا هم‌چنین روش‌های طبقه‌بندی نگاشت زاویه طیفی و سنجش واگرایی طیفی برای بررسی دگرسانی کانی‌ها و طبقه‌بندی سنگ‌ها استفاده شد و در نهایت، لایه‌های اطلاعاتی داده‌های زمینی، هوایی و ماهواره‌ای تلفیق شد و نتایج حاصل با موقعیت چاه‌های موجود و سایر داده‌ها اعتبارسنجی شد و براساس تصمیم‌گیری چندمعیاره، نقشه ظرفیت‌سنجی منابع نفت و گاز به‌دست آمد. بازبدهای میدانی، تفسیر عکس‌های فتوگرامتری و شواهد زمین‌شناسی به‌دست آمده حاکی از صحت نقشه ظرفیت‌سنجی منابع هیدروکربنی به‌روش دورکاوی و انطباق نتایج با مشاهدات میدانی در سطح اطمینان زیاد (بیش از ۷۵ درصد صحت) است.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت‌سنجی منابع نفت و گاز، دورکاوی، سراچه، تلفیق داده‌ها، تصمیم‌گیری چندمعیاره.

مقدمه

بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌های نفتی و گازی و برنامه‌ریزی برای استخراج آن‌ها نیازمند اکتشاف نظام‌مند و به‌کارگیری روش‌های نوین است. در این راستا به‌کارگیری روش مهندسی اطلاعات مکانی^۱ می‌تواند نقشی مؤثر در دستیابی به این اهداف داشته باشد. مطالعات تحت الارضی مربوط به اکتشافات نفت و گاز و مدل‌سازی مخازن هیدروکربنی همواره نیازمند نقشه‌های سطحی دگرسانی، سنگ‌شناسی و ساختمانی از منطقه است، که برای تهیه این

نقشه‌ها از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی و طیفی مختلف استفاده می‌شود. استخراج خطوط‌ها نیز به کمک فناوری فضایی انجام می‌گیرد. دورکاوی شامل دو بخش فضایی (تصاویر ماهواره‌ای^۱) و هوایی و زمینی (فتوگرامتری) است که خود دو جنبه کمی و کیفی دارد. مدل‌های بررسی شده در این پژوهش مدل دگرسانی، مدل سنگ‌شناسی و ساختاری است که به روش دورکاوی تحلیل می‌شوند. داده‌های دورکاوی فضایی دارای مؤلفه‌های هندسی و رادیومتری هستند. در مدل ساختاری^۱ از اطلاعات هندسی و رادیومتری و در مدل‌های دگرسانی، سنگ‌شناسی و شاخص هیدروکربنی و ژئوبوتانی از اطلاعات رادیومتری استفاده می‌شود. داده‌های فتوگرامتری هوایی و زمینی در این پژوهش برای ارتقاء کیفیت آشکارسازی، انجام بررسی‌های کیفی، ایجاد مدل سه‌بعدی و تحلیل مدل دگرسانی، سنگ‌شناسی و ساختاری استفاده شده است. در روش دورکاوی فضایی مدل دگرسانی، ساختاری و سنگ‌شناسی و ژئوبوتانی و شاخص هیدروکربنی با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای پردازش شده و طبقه‌بندی شده، تهیه شده است که هر مدل به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی منظور می‌شود. در نهایت اعتبارسنجی نتایج که با مشاهدات میدانی و سایر داده‌های موجود در منطقه انجام می‌شود، تأییدی بر صحت سایر لایه‌های اطلاعاتی خواهد بود. در مرحله آخر، تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط سامانه اطلاعات مکانی انجام می‌شود و لایه‌های اطلاعاتی ایجاد شده براساس وزن‌های نسبی اختصاص داده شده به هر یک، تلفیق می‌شوند. خروجی نهایی این پژوهش، نقشه پیشنهادی ظرفیت سنجی هیدروکربنی است که مناطق امید بخش از نظر وجود ذخائر هیدروکربنی را نشان می‌دهد.

در این پژوهش هر دو دسته اطلاعات کمی و کیفی دورکاوی تحلیل می‌شوند و اهداف زیر برای شناسایی و آشکارسازی مناطق امید بخش هیدروکربنی دنبال می‌شود:

ایجاد مدل دگرسانی با تحلیل اطلاعات رادیومتری تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی استر و بررسی دگرسانی کانی‌های رسی (تبدیل کلریت و گلاکونیت به ورمیکولیت، مونت موریلونیت و کائولینیت) و بسترهای حاوی اکسیدهای آهن (تبدیل هماتیت به لیمونیت) و گسترش نواحی کربناته.

بررسی سنگ‌شناسی منطقه بررسی شده با تحلیل اطلاعات کمی ماهواره‌ای و اطلاعات کیفی فتوگرامتری.

بررسی ساختاری منطقه بررسی شده با تحلیل اطلاعات هندسی و رادیومتری تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی استر و عکس‌های هوایی و زمینی و مدل سه‌بعدی فتوگرامتری.

ایجاد مدل شاخص هیدروکربنی با به‌کارگیری اطلاعات رادیومتری تصاویر ماهواره‌ای.

ایجاد مدل ژئوبوتانی و بررسی اثر مواد هیدروکربنی بر پوشش گیاهی منطقه.

بررسی و تحلیل سنگ‌شناسی منطقه و طبقه‌بندی طیفی تصاویر چندطیفی استر به دو روش نگاشت زاویه طیفی^۲

براساس کتابخانه سازمان نقشه‌برداری زمین‌شناسی آمریکا^۳، برای تحلیل کانی‌ها و سنجش واگرایی طیفی^۴

براساس کتابخانه طیفی آزمایشگاه پیشرانس جت^۵.

به‌کارگیری داده‌های جنبی و موقعیت چاه‌های حفاری شده منطقه بررسی شده برای اعتبارسنجی نتایج.

تصمیم‌گیری چندمعیاره، تلفیق داده‌ها در سامانه اطلاعات مکانی و تهیه نقشه ظرفیت سنجی معدنی

1. Structural Model
2. Spectral Angle Mapper (SAM)
3. United States Geological Survey (USGS)
4. Spectral Information Divergence (SID)
5. Jet Propulsion Laboratory (JPL)

با توجه به اهمیت کاهش ریسک اکتشاف منابع هیدروکربنی، طی دو دهه گذشته کوشش‌های زیادی در سطح جهان برای ارزیابی کارایی داده‌های دورکاوی در شناسایی ذخائر نفت و گاز انجام شده است. به‌عنوان نمونه، در تحقیقی که در سال ۲۰۰۱ مک کوی و همکاران انجام دادند، با به‌کارگیری داده‌های طیف‌سنجی شستشوی آهن از ماسه سنگ^۱ که به‌وسیله تراوش‌های نفتی ایجاد می‌شود در یال تاکدیس‌ها تشخیص داده شده است [۱]. شهریار و همکاران (۱۳۸۸) مدل‌سازی مخازن هیدروکربوری گستره جنوب باختری ایران را با استفاده از مطالعات سنجش از دور بررسی کرده‌اند [۲]. کروپنیک و کاهن (۲۰۱۷) فرضیه دگرسانی شیمیایی و کانی‌شناسی در صخره‌ها و خاک‌ها را به همراه پدیده زمین گیاهی که به ریزتراوش‌های هیدروکربنی در بالای بعضی میدان‌های نفتی مربوط بود با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای آزمایش کردند [۳]. در پژوهش لاموگلیا و روبرتو (۲۰۱۱) ریزتراوش‌های هیدروکربنی با استفاده از تحلیل آماری و پردازش رقومی تصاویر ای تی ام^۲ ماهواره لندست و تصاویر استر ماهواره ترا آشکارسازی شد و نتایج با داده‌های ژئوشیمیایی که از نمونه خاک‌های منطقه به‌دست آمده بود صحت سنجی شد [۴]. مشکل عمومی این پژوهش‌ها، فقدان جامعیت در تحلیل و بسنده کردن به یک نوع داده خاص ماهواره‌ای بوده است که در نتیجه اعتمادپذیری نقشه تولید شده را با تردید مواجه می‌سازد. در پژوهش حاضر، سعی بر آن است که با ترکیب داده‌های مختلف هوایی و فضایی و نیز در نظر گرفتن جنبه‌های هندسی و رادیومتری مرتبط با آشکارسازی مخازن هیدروکربنی به مدلی جامع‌تر و اطمینان‌پذیرتر برای تهیه نقشه مناطق امیدبخش نفت و گاز دست یافت.

۱. عوامل تجمع مواد هیدروکربنی

پنج عامل مهم برای تجمع اقتصادی نفت و گاز در زمین عبارتند از سنگ منشأ بالغ^۳، نفوذپذیری سنگ مخزن^۴، مهاجرت هیدروکربن بین سنگ منشأ و سنگ مخزن^۵، نفوذناپذیری پوش سنگ^۶ و عامل مانع حرکت یا تله نفتی^۷. وجود همه عوامل نام برده، شرط لازم پیدایش میدان‌های نفتی به‌شمار می‌آیند، ولی شرط کافی نیست، بلکه ساختمان‌های نفت‌گیر، جریان‌های هیدرودینامیک و به‌خصوص عامل زمان نقش بسیار مهمی در تجمع مواد هیدروکربنی ایفا می‌کند [۵].

۲. نقش گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها در تجمع نفت و گاز

سنگ‌های متراکم، سخت و همگن (یک‌نواخت در جنس) تحت تأثیر فشارهای وارده رفتار الاستیک دارند و شکسته می‌شوند (مانند ماسه سنگ‌ها). درزه‌ها و معابر ایجاد شده در آن‌ها مکان مناسبی برای عبور و یا جای‌گیری نفت و گاز هستند. سنگ‌های شکل‌پذیر (مخصوصاً سنگ‌های رسوبی مانند شیل، سیلت، نمک و گچ) در اثر فشارهای وارد از طرف زمین، رفتار تغییر شکل دارند و چین‌خورده می‌شوند. بنابراین، در حوضه‌های رسوب‌گذاری شده که بعداً تحت تأثیر نیروهای زمین قرار می‌گیرند، فرایندهای شکستگی (ناشی از کشش) و چین‌خوردگی (ناشی از فشارش) اتفاق می‌افتد و شرایط لازم برای مهاجرت و به تله افتادن ذخایر هیدروکربنی فراهم می‌شود. البته هر ساختار زمین‌شناسی

1. Bleaching
 2. Enhanced Thematic Mapper (ETM)
 3. Mature Source Rock
 4. Reservoir Rock
 5. Migration Pathway
 6. Cap Rock
 7. Oil Trap

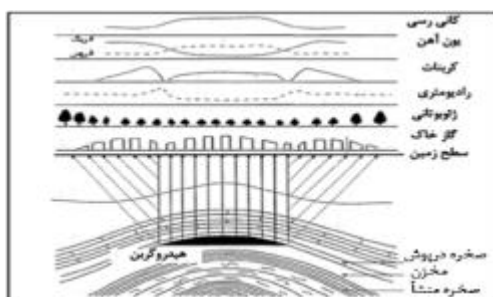
ممکن است حاوی چند وابستگی ساختمانی باشد. مثلاً در حوضه‌های رسوبی باید شرایط احیایی، حرارت کم (عدم فعالیت آذرین)، تخلخل زیاد سنگ مخزن و شرایط چگالی کم حاکمیت طولانی مدت داشته باشد تا ذخیره بتواند در مسیر حرکت به سمت بالا در ساختار مناسب زمین‌شناسی محصور بماند.

۳. اهمیت تاقدیس و گسل

به دلیل چگالی کم مواد هیدروکربنی، نفت و گاز طبیعی بیش‌تر در کلاهک‌های قسمت‌های فوقانی تاقدیس‌ها جمع می‌شوند و با شناسایی این ساختمان‌ها است که می‌توان امکان اکتشافات تاقدیسی را تقویت کرد. هم‌چنین بسیاری از مواد معدنی که به صورت رگه تشکیل می‌شوند معمولاً در امتداد گسل‌های موجود منطقه تشکیل می‌شوند. زیرا جریان آب‌های گرم اعماق به راحتی در سطوح گسلش حرکت می‌کنند و باعث برجای گذاشتن مواد معدنی در سنگ‌های اطراف گسل می‌شوند. البته در بسیاری موارد، در اثر وجود گسل‌های فرعی و شکستگی‌های سطحی، گسترش ماده معدنی در یک منطقه قطع می‌شود و برای پیدا کردن مجدد آن، آگاهی به مشخصات تکتونیکی منطقه، ضروری است.

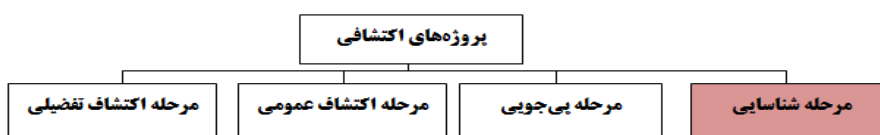
۴. اطلاعات و انواع تراوشات نفتی

۱. واکنش کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ نسبت به تغییرات شرایط فیزیکی و شیمیایی مغایر از شرایطی که در آن تشکیل شده‌اند را دگرسانی می‌نامند [۶]. نمای کلی مسیر نشت و دگرسانی سطح در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مرحله روش سنجش از دور ابزار مناسبی برای تشخیص ظهور در سطح را فراهم می‌سازد.



شکل ۱. نمود و تراوش هیدروکربنی در سطح [۷]

برای مطالعه، بررسی و محاسبه ذخایر هیدروکربنی و اجتناب از هزینه‌های غیرضروری لازم است تقدم و تأخر مراحل اکتشافی مدنظر قرار گیرد. مراحل اکتشاف براساس تقسیم‌بندی جهانی که به وسیله سازمان ملل انجام گرفته شامل چهار مرحله بدین شرح است: ۱. مرحله شناسایی، در این مرحله نقشه زمین‌شناسی یک صد هزارم به همراه اطلاعات ژئوفیزیک هوایی و اطلاعات ماهواره‌ها در کنار دیگر لایه‌های اطلاعاتی در سامانه اطلاعات مکانی تلفیق و مناطق امیدبخش برای انجام عملیات اکتشافی مراحل بعدی پس از کنترل با واقعیت‌های زمینی، تعیین می‌شود، ۲. مرحله پی‌جویی، شامل انجام عملیات اکتشافی در مناطق امیدبخش است که در مرحله شناسایی مشخص شده‌اند، ۳. مرحله اکتشاف عمومی، در این مرحله روی مناطق معدنی که در مرحله پی‌جویی ادامه عملیات اکتشافی بر آن پیشنهاد شده انجام می‌گیرد، ۴. مرحله اکتشاف تفصیلی، پس از اخذ نتیجه مطلوب از انجام مرحله اکتشاف عمومی و براساس برنامه پیشنهاد شده روی ناحیه‌های کانی‌سازی انجام می‌شود. جای‌گاه این پژوهش در مراحل انجام پروژه‌های اکتشافی در شکل ۲ مشخص شده است.



شکل ۲. نمودار مراحل اکتشاف و جای‌گاه این پژوهش در آن

معرفی منطقه و داده‌ها

در ایران مرکزی در حوضه قم، در دو میدان نفتی به نام‌های «البرز» و «سراچه» سازند آهکی قم سنگ مخزن است که تاکنون ۹ حلقه چاه اکتشافی در آن حفر شده است. ساختمان سراچه تاقدیسی است به ابعاد حدود ۲۵×۵ کیلومتر که در ۴۵ کیلومتری جنوب شرق شهر قم قرار دارد (شکل ۳). از چاه‌های شماره ۸، ۵، ۳ و ۲ برداشت صورت می‌گیرد و تولیدی محسوب می‌شوند و بقیه متروکه هستند. هیدروکربور مخزن سراچه شامل گاز به‌همراه مقدار چشم‌گیری میعانات گازی است. ذخیره خارج شده از میدان البرز در حدود ۲۰ میلیون بشکه بوده است. در فوران چاه شماره ۵ این میدان، برای مدت سه ماه، روزانه ۸۰،۰۰۰ بشکه نفت از این چاه فوران کرد. میدان گازی سراچه که در جنوب خاوری تاقدیس البرز قرار دارد، تاقدیسی با ذخیره گازی در حدود ۰/۳ تریلیون فوت مکعب است. از جمله مخازن طبیعی زیرزمینی برای ذخیره‌سازی گاز، ساختارهای نمکی است. ساختارهای نمکی، قابلیت بهره‌دهی (سرعت) بیش‌تری دارند، پوشش نمکی دیواره و سقف عالی دارند که ذاتاً غیرقابل نفوذ است و احتمال هرگونه تراوش و نشت را به حداقل می‌رساند. با توجه به هزینه سنگین اکتشاف نفت، نیاز به برنامه‌ریزی و به‌کارگیری روش‌های نوین برای یک اکتشاف نظام‌مند ضروری است. این پژوهش با به‌کارگیری روش‌های سنجش از دور در مرحله شناسایی اکتشاف سعی در ارائه یک روش مناسب برای تهیه نقشه ظرفیت‌سنجی هیدروکربنی دارد. با این هدف میدان گازی سراچه با وجود موقعیت چاه‌های حفاری شده تولیدی و متروکه برای معرفی این روش در نظر گرفته شده است. در این پژوهش داده‌های سنجنده چندطیفی استر با توان تفکیک طیفی بالا و با هدف تحلیل دگرسانی، سنگ‌شناسی، شاخص هیدروکربنی و ساختاری انتخاب شده است. سازند قم در تاقدیس سراچه از سنگ آهک، سنگ‌آهک رسی، مارن و سیلت سنگ تشکیل شده که حجم زیادی از گاز در این سازند کشف شده است [۸].



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی میدان گازی سراچه [۹]

داده های به کار رفته در این پژوهش عبارتند از:

۱. تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۰۲ سجنده استر و سجنده ای تی ام لندست به شماره ردیف ۱۶۵ و شماره گذر ۳۶ مربوط به منطقه قم تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور.
 ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ (برگه آران مربوط به سال ۱۳۷۱) و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (استان قم مربوط به سال ۱۳۷۰) تهیه شده از سازمان زمین‌شناسی کشور.
 ۳. عکس‌های فتوگرامتری هوایی ۱:۴۰۰۰۰ میدان گازی سراچه مربوط به سال ۱۳۷۷ تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور.
 ۴. مدل ارتفاعی رقومی منطقه^۱ تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور.
 ۵. عکس‌های فتوگرامتری زمینی منطقه مربوط به سال ۱۳۹۵ تهیه شده به وسیله نگارندگان.
 ۶. موقعیت مکانی چاه‌های نفت و گاز موجود در منطقه سراچه تهیه شده از شرکت ملی نفت ایران و بازدیدهای میدانی نگارندگان.
 ۷. گزارش های فنی گردآوری شده از شرکت ملی نفت ایران درباره موضوع.
- نرم‌افزارهای به کار رفته در این پژوهش عبارتند از:
- نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب^۲ برای محاسبه ضریب شاخص بهینه.
- نرم‌افزار انوی^۳ با هدف پردازش تصاویر ماهواره‌ای.
- نرم‌افزار کروس‌تاک^۴ برای انجام تصحیح کروس‌تاک مربوط به خطای نشت پرتو در منطقه فروسرخ کوتاه موج^۵ استر.
- نرم‌افزار آرک جی آی اس^۶ به منظور تلفیق^۷ داده‌ها و تحلیل مکانی و استخراج نقشه ظرفیت‌سنجی هیدروکربنی.
- نرم‌افزار رولای سی دی دلبیو^۸ برای پردازش تصاویر فتوگرامتری زمینی.

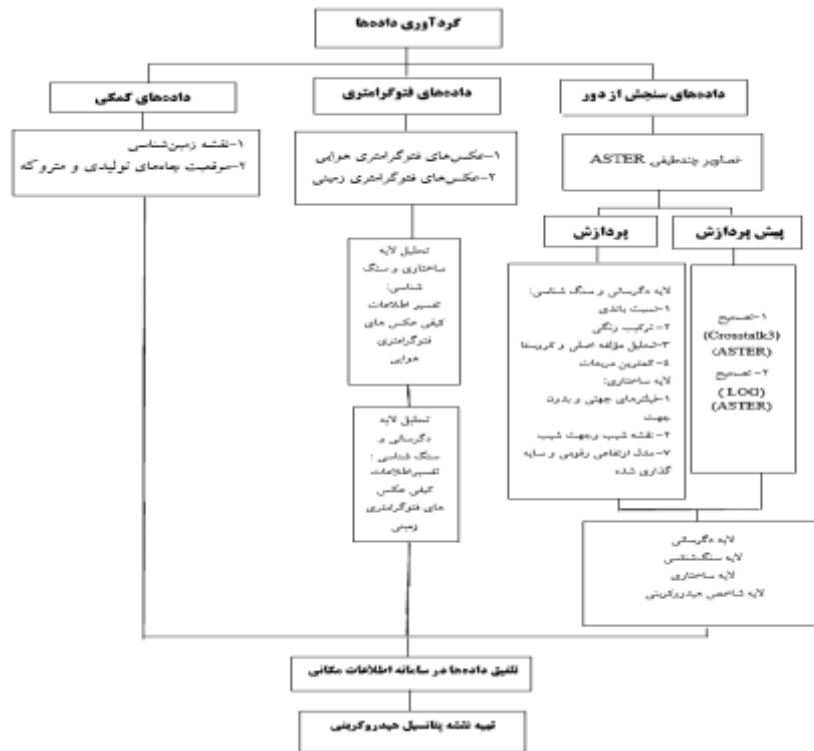
روال‌ها و پیاده‌سازی‌ها

دورکاوی شامل دو بخش فضایی (تصاویر ماهواره‌ای) و هوایی و زمینی (فتوگرامتری) است. در بخش اول ابتدا با تحلیل مدل دگرسانی، سنگ‌شناسی، شاخص هیدروکربنی، ژئوتوانی و ساختاری لایه‌های اطلاعاتی مدل‌های مذکور استخراج می‌شود و در بخش دوم برای کاهش ابهام و افزایش اعتمادپذیری لایه‌های اطلاعاتی استخراج شده بخش اول از عکس‌های هوایی و زمینی فتوگرامتری بهره گرفته شده است. قبل از شروع به پردازش‌ها، پیش‌پردازش‌هایی روی تصاویر استر و ای تی ام انجام شد. چرخه کار تهیه نقشه ظرفیت هیدروکربنی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۱. پیش پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

تصاویر ماهواره‌ای حسب مورد باید تحت تصحیحات هندسی و رادیومتری قرار گیرند. تصحیحات رادیومتری شامل تصحیح کروس‌تاک و تصحیح اثر جو است. در پژوهش حاضر به دلیل این‌که اطلاعات مربوط به تصویر شامل مختصات،

1. Digital Elevation Model (DEM)
2. MATLAB
3. ENVI
4. Crosstalk
5. Short Wavelength Infrared (SWIR)
6. ArcGIS
7. Fusion
8. Rollei CDW



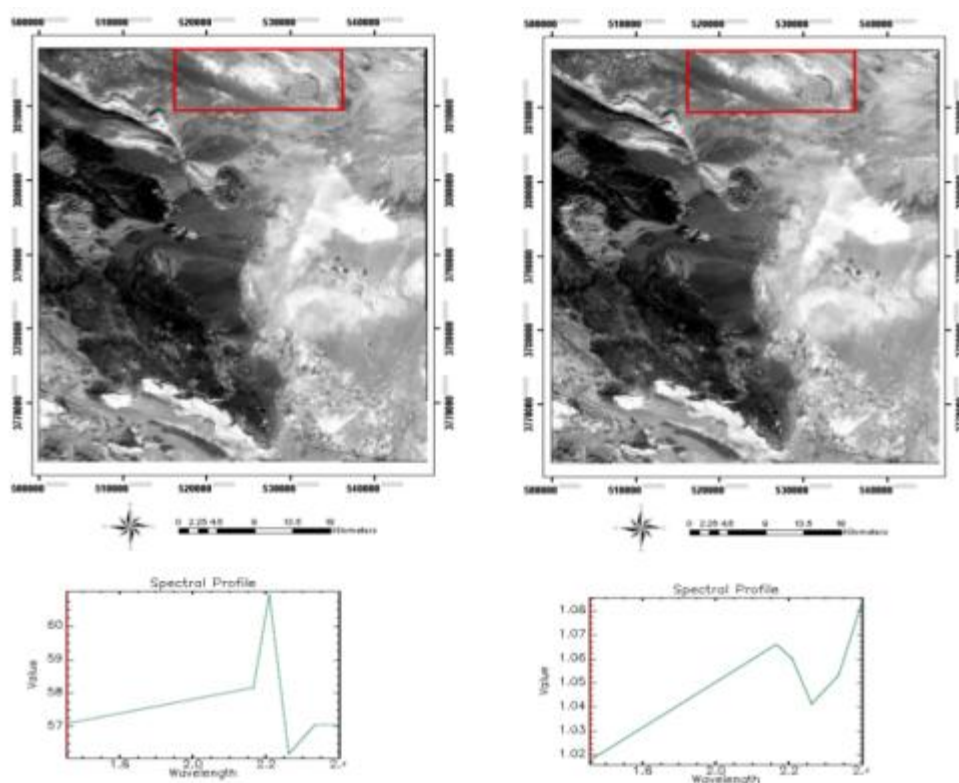
شکل ۴. روند کار تهیه نقشه ظرفیت هیدروکربنی

زاویه سمت^۱ سنجنده و زاویه ارتفاعی^۲ خورشید، ارتفاع منطقه و شرایط آب و هوایی منطقه و تاریخ دقیق تصویربرداری تصویربرداری و میزان گرد و غبار و بخار هوا مربوط به منطقه در دسترس نیست، از روش مانده‌های لگاریتمی^۳ که از اطلاعات آماری خود تصویر برای بهنجارسازی^۴ استفاده شد و داده‌های تابش نسبت به میانگین هندسی مکانی به‌هنجارسازی شدند. مطابق شکل ۵، با استفاده از لگاریتم میانگین هندسی طیفی تأثیرات توپوگرافی و با استفاده از میانگین هندسی مکانی تأثیرات مربوط به تابش خورشید و خطای دستگاهی حذف شد [۱۰].

۲. پردازش و تولید لایه‌های اطلاعاتی منطقه

پردازش‌های مربوط به دگرسانی به سه روش نسبت بانندی، تحلیل مؤلفه اصلی و روش کم‌ترین مربعات روی تصاویر اعمال شد و سپس تصاویر ترکیب رنگی برای ارائه بهتر این نتایج به کار رفته است. وجود کانی‌های رسی، بسترهای غنی آهنی و کربنات‌ها و تغییرات این کانی‌ها در سطح به‌عنوان یکی از لایه‌های لازم برای معرفی مناطق امیدبخش هیدروکربنی است. پردازش‌های مربوط به سنگ‌شناسی شامل ترکیب‌های رنگی پژوهش‌های پیشین و روش ضریب شاخص بهینه است. روش ضریب شاخص بهینه روشی است که بهترین ترکیب رنگی را برای تفکیک سنگ‌های رسوبی منطقه معرفی می‌کند. تعیین شاخص هیدروکربنی نیز با تعمیم باندهای محدود ماده مادون قرمز کوتاه سنجنده‌های فراترینی به سنجنده چند طیفی استر انجام می‌شود. پردازش‌های مربوط به ساختار و شکستگی‌ها نیز روش‌های استفاده از فیلترهای جهتی و بدون جهت، شیب و جهت شیب، روش تبدیل کسر نوفه کمینه^۵ است.

1. Azimuth Angle
 2. Elevation Angle
 3. Log Residuals
 4. Normalization
 5. Minimum Noise Fraction (MNF)



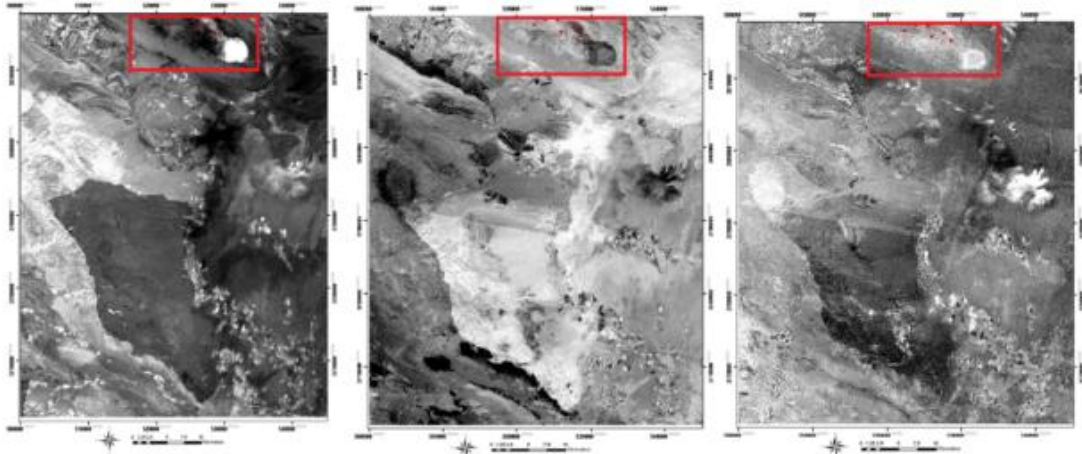
شکل ۵. تصویر ماهواره‌ای سراچه. چپ) قبل از اعمال تصحیح مانده‌های لگاریتمی به همراه نیمرخ طیفی آن، راست) بعد از اعمال تصحیح مانده‌های لگاریتمی همراه نیمرخ بازتاب طیفی آن

۲-۱. لایه کانی‌های رسی منطقه

به دلیل این که رس‌ها بیشترین بازتاب را در باند ۴ (دامنه طول موجی ۱/۶ تا ۱/۷ میکرومتر) و بیشترین جذب را در باند ۸ (دامنه طول موجی ۲/۲۹۵ تا ۲/۳۶۵ میکرومتر) تصویر استر دارند، چنان که در تصویر نسبت باندی ۴ به ۸ مشاهده می‌شود مناطق روشن وجود رس را نشان می‌دهد (شکل ۶). تصویر نتیجه روش کروستا [۱۱] با مقدار منفی مؤلفه اصلی باند ۴ است که در آن مناطق تیره نشان دهنده وجود رس در منطقه‌اند (جدول ۱). تصویر روش کمترین مربعات با باند مدل ۴ به خوبی دو تصویر نسبت باندی و تحلیل مؤلفه اصلی این مناطق را نشان نمی‌دهد اما مناطق روشن وجود رس را نشان می‌دهد. مناطق روشن که چاه‌های حفاری شده در آنجا قرار دارند، آبرفت‌های جوان هستند که در اثر حرکت و جابه‌جا شدن و یا شسته شدن کفه‌های رسی به سمت آن‌ها در آنجا قرار گرفته‌اند، بنابراین این مناطق به رنگ روشن نشان داده شده‌اند [۳].

جدول ۱. روش کروستا با باندهای ۸-۴-۳-۱

مؤلفه اصلی	باند ۱	باند ۳	باند ۴	باند ۸
۱	0.521758	0.5276630	0.416810	0.525018
۳	0.493070	0.411211	-0.208422	-0.737799
۴	-0.695618	0.697453	0.130101	-0.112910
۸	0.027660	0.257046	-0.875159	0.408973



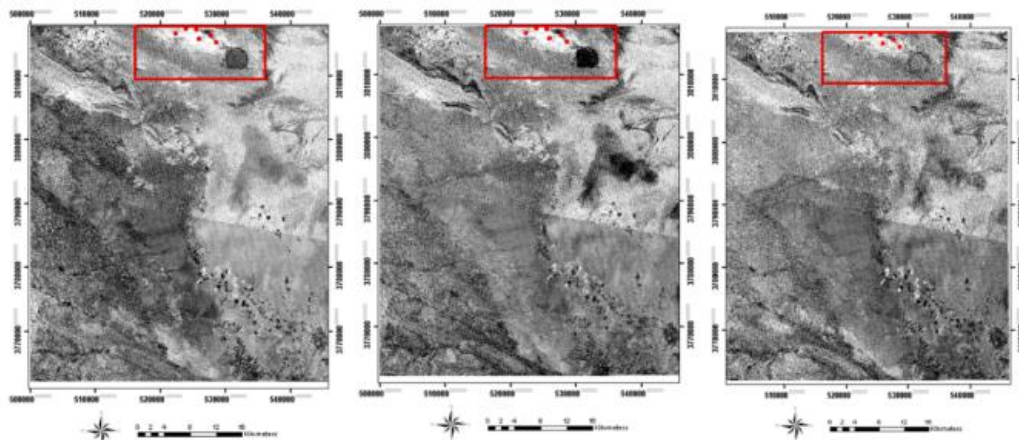
شکل ۶. چپ) نسبت بانندی ۴ به ۸ کانی‌های رسی (مناطق روشن نشان‌دهنده رس است)، وسط) تصویرتحلیل مؤلفه اصلی مقدار منفی در بانندی ۴ (مناطق تیره نشان‌دهنده رس است)، راست) تصویر کم‌ترین مربعات با باند مدل ۴ (مناطق روشن نشان‌دهنده رس است)

۲-۲. لایه دگرسانی بسترهای غنی از آهن در منطقه

با بررسی منحنی رفتار طیفی کانی‌های حاوی اکسید آهن مشخص می‌شود که این مواد در باند ۲ (دامنه طول موجی ۰/۶۲ تا ۰/۶۹ میکرومتر) بازتاب بالا و در باند ۱ (دامنه طول موجی ۰/۵۲ تا ۰/۶۰ میکرومتر) جذب بالا دارند، از این‌رو، نسبت بانندی ۲ به ۱ برای شناسایی این مناطق به کار برده شد. روش کروستا نیز با انتخاب باندهای ۱-۲-۳-۴ و با مقدار مؤلفه اصلی در باند ۴ نشان‌دهنده بسترهای غنی آهنی در منطقه است که مناطق روشن در این تصویر مناطق مد نظر است (جدول ۲). روش کم‌ترین مربعات با باند مدل ۲ انجام شد و مناطق روشن در این تصویر با وضوح کم‌تر نشان‌دهنده بسترهای غنی آهنی در محدوده بررسی شده بود (شکل ۷) [۳].

جدول ۲. روش کروستا با باندهای ۱-۲-۳-۴

مؤلفه اصلی	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴
۱	0.51971	0.56160	0.51102	0.39161
۲	0.46606	0.44329	-0.64519	-0.41232
۳	-0.06399	0.00384	-0.56797	0.82055
۴	-0.71316	0.69862	0.00171	-0.05769



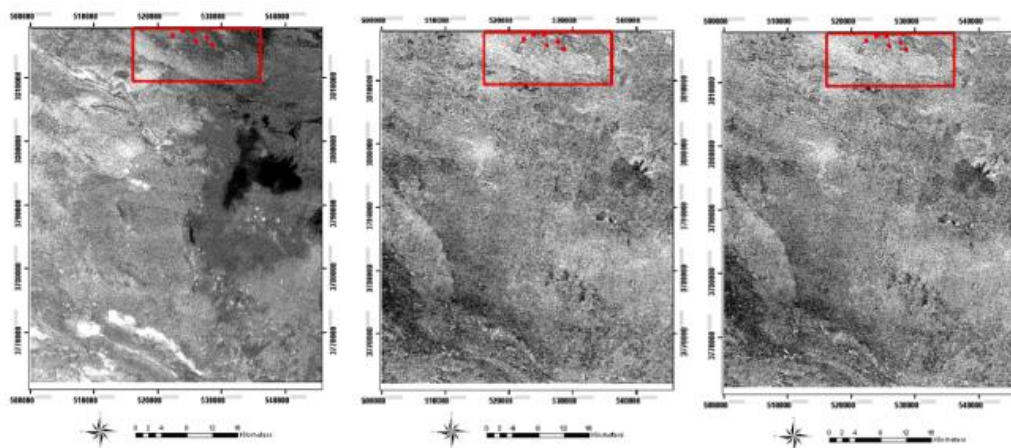
شکل ۷. چپ) تصویرنسبت بانندی ۲ به ۱ (مناطق روشن بسترهای غنی آهن است)، وسط) تصویرکروستا با باندهای ۱-۲-۳-۴ با مقدار مؤلفه اصلی در باند ۴ (مناطق روشن بسترهای غنی آهن است)، راست) تصویر روش کم‌ترین مربعات با باند مدل ۲ (مناطق روشن بسترهای غنی آهن است).

۲-۳. لایه دگرسانی بسترهای کربناته منطقه

کانی‌های کربناته براساس امضای طیفی خود در باندهای ۷ و ۹ دارای بازتاب بالا و در باند ۸ دارای جذب بالا هستند. به همین دلیل برای شناسایی این مناطق با استفاده از روش نسبت باندهای $(7+9)/8$ استفاده شد. در این مرحله، تحلیل مؤلفه اصلی روی شش باند ناحیه فروسرخ کوتاه موج سنجنده استر انجام شد و مقدار مؤلفه اصلی باند ۵، متناظر با حضور کربنات در منطقه است (جدول ۳). هر سه روش با وضوح خیلی کم مناطق حاوی کربنات و کانی‌های مربوط به آن را ارائه می‌دهند (شکل ۸) [۴].

جدول ۳. روش تحلیل مؤلفه اصلی با شش باند محدوده SWIR

مؤلفه اصلی	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷	باند ۸	باند ۹
۱	-0.33393	-0.41339	-0.41288	-0.414228	-0.44489	-0.42140
۲	0.80272	0.10524	0.10414	-0.04318	-0.27981	-0.50354
۳	-0.15121	-0.04901	-0.16131	0.32806	0.63239	-0.66420
۴	-0.46383	0.60747	0.42659	0.05321	-0.33972	-0.34000
۵	-0.03032	-0.17659	-0.20822	0.84456	-0.45655	0.05297
۶	-0.07211	-0.64453	0.75320	0.05247	-0.00355	-0.09641

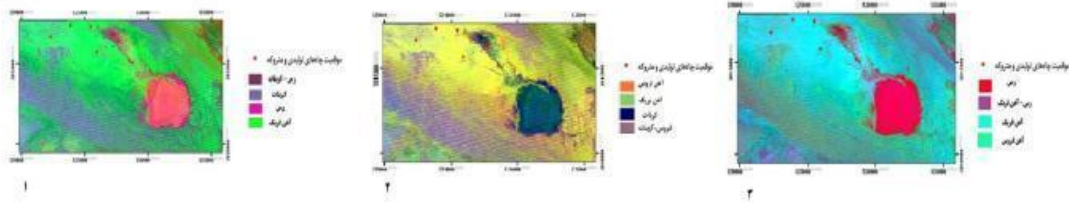


شکل ۸. چپ) تصویر نسبت باندهای $(7+9)/8$ که در آن مناطق روشن نشان‌دهنده کربنات است، وسط) تصویر تحلیل مؤلفه اصلی با مقدار مؤلفه اصلی باند ۵ که در آن مناطق روشن نشان‌گر کربنات است، راست) تصویر کم‌ترین مربعات با باندهای مدل ۷ و ۹ که در آن مناطق روشن بسترهای کربناته است.

۲-۴. لایه تصاویر مرکب

به‌منظور تفکیک مناسب‌تر، کانی‌های رسی در باند قرمز، بسترهای غنی آهنی در باند سبز و کربنات در باند آبی قرار داده شدند. در میدان گازی سراچه موقعیت چاه‌ها در محدوده‌ای قرار دارد که شامل هر سه دگرسانی است، این موقعیت در مرز بین رنگ سبز و بنفش قرار دارد. مناطق بنفش شامل کربنات و رس است (شکل ۹-۱). باند قرمز نشان‌دهنده آهن فروس و باند سبز آهن فریک و باند آبی کربنات است (شکل ۹-۲). در این شکل موقعیت میدان گازی سراچه در منطقه‌ای است که مرز بین رنگ سبز روشن و آبی تیره قرار دارد. سبز وجود آهن فریک و رنگ آبی تیره آهن فریک است. دگرسانی بسترهای غنی آهنی مرز بین آهن فریک و فروس با کاهش آهن فروس است. در شکل (۹-۹)

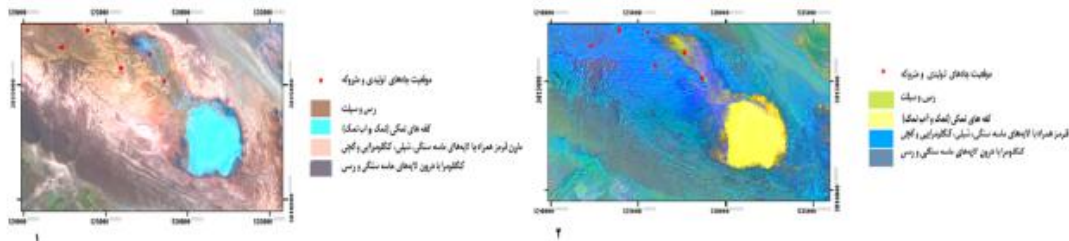
۳) باند قرمز نشان‌گر رس، باند سبز نشان‌گر آهن فروس و باند آبی نشان‌گر آهن فریک است. موقعیت میدان گازی در محدوده‌ای است که آهن فریک و رس قرار دارد و به رنگ آبی روشن و بنفش است [۱۲].



شکل ۹: تصویر مرکب منطقه بررسی شده (۱) $(\frac{4}{8}-\frac{2}{1}-\frac{7+9}{8})$ ، (۲) $(\frac{4}{8}-\frac{2}{1}-\frac{7+9}{8})$ ، (۳) $(\frac{4}{8}-\frac{2}{1}-\frac{7+9}{8})$ ، (۴) $(\frac{4}{8}-\frac{2}{1}-\frac{7+9}{8})$ ، (۵) $(\frac{4}{8}-\frac{2}{1}-\frac{7+9}{8})$.

۲-۵. لایه سنگ‌شناسی منطقه

سنگ‌های موجود در پوسته زمین در سه گروه عمده آذرین دگرگونی و رسوبی (شیمیایی و تخریبی) جای دارند. از این میان سنگ‌های رسوبی در تشکیل سنگ منشأ، سنگ مخزن و سنگ پوشش برای تله‌های نفتی نقش دارند. سنگ‌های رسوبی عمدتاً شامل ماسه سنگ، سنگ آهک، شیل، کربنات و تبخیری‌ها هستند. در پژوهش حاضر، ترکیب رنگی ۱-۳-۷ و $\frac{4}{8}-\frac{3}{4}-\frac{2}{1}$ برای تصاویر استر در نظر گرفته شد و سنگ‌های رسوبی در سطح میدان گازی سراج تحلیل شد [۱۳]. در (شکل ۱۰-۱)، بستر سنگ‌های رسوبی (مارن، ماسه سنگ و سیلت) به رنگ قهوه‌ای و وجود نمک و آب نمک در سطح نیز در میان کفه‌های رسی به رنگ آبی روشن است، ماسه سنگ و کنگلومرا به رنگ صورتی نمایش داده شده است. در (شکل ۱۰-۲)، نیز سنگ‌های رسی و کفه‌های رسی در سطح به رنگ بنفش هستند و این به دلیل وجود آهن در میان کفه‌های رسی است و نمک و آب نمک در لابلاهای کفه‌های رسی به رنگ زرد است و کنگلومرا و ماسه سنگ به رنگ سبز تیره نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: تصویر مرکب منطقه بررسی شده، (۱) $(\frac{4}{8}-\frac{3}{4}-\frac{2}{1})$ ، (۲) $(\frac{4}{8}-\frac{3}{4}-\frac{2}{1})$ ، (۳) $(\frac{4}{8}-\frac{3}{4}-\frac{2}{1})$ ، (۴) $(\frac{4}{8}-\frac{3}{4}-\frac{2}{1})$ ، (۵) $(\frac{4}{8}-\frac{3}{4}-\frac{2}{1})$.

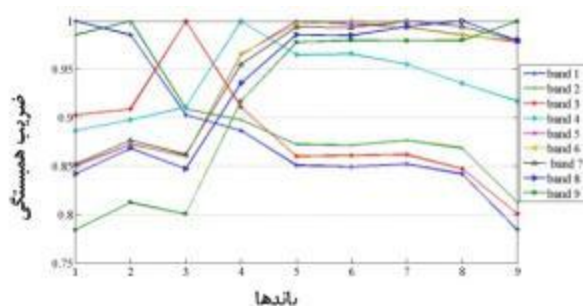
به‌منظور تفکیک سنگ‌های منطقه بررسی شده از روش ضریب شاخص بهینه^۱ استفاده شد. بهترین ترکیب باندهای طیفی واحد برای جداسازی سنگ با استفاده از الگوریتم ضریب شاخص بهینه و با توجه به معادله (۱) تعیین می‌شود.

$$OIF = \frac{\sum_{k=0}^3 S_k}{\sum_{j=1}^3 r_j} \quad (1)$$

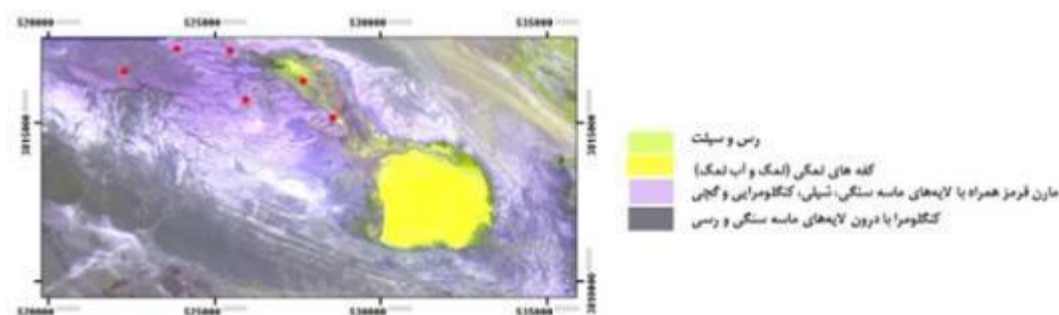
در معادله (۱)، r_j ضریب هم‌بستگی دو باند از ترکیب سه باند و S_k انحراف معیار مربوط به تک تک باندهای استفاده شده است. هر سه باند ترکیبی با واریانس بالا بین باندها و ضریب هم‌بستگی پایین بین باندها مقدار ضریب شاخص بالا را نشان می‌دهد [۱۴]. در کل، بزرگ‌ترین ضریب شاخص شامل بیش‌ترین اطلاعات تصویری با کم‌ترین مقدار افزونگی است. بزرگ‌ترین ضریب شاخص بهینه شامل بیش‌ترین اطلاعات تصویری با کم‌ترین مقدار افزونگی خواهد بود. چنان‌که

1. Optimum Index Factor (OIF)

در نمودار (شکل ۱۱) مشخص شده است، باندهای ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ کمترین همبستگی را با باند ۳ دارند. بنابراین بهترین ترکیب رنگی برای تفسیر سنگ‌شناسی سطحی با کمترین همبستگی بین باندها و بیشترین مقدار ضریب شاخص بهینه با این باندها ساخته شده است. از طرفی به دلیل این‌که پوشش گیاهی بیشترین بازتاب را در باند ۳ دارد، ترکیب‌های رنگی که باند ۳ در آن است، در نظر گرفته نشده و بهترین ترکیب رنگی ۱-۲-۹ به جای ۲-۳-۹ انتخاب شده است. در (شکل ۱۲)، به دلیل یک‌سان بودن بازتاب پوشش گیاهی با کانی‌های رسی بهترین ترکیب رنگی برای تفسیر سنگ‌شناسی بدون در نظر گرفتن باند ۳ ترکیب رنگی ۲-۱-۹ در نظر گرفته شده است. تفسیر سنگ‌شناسی به این صورت است که کفه‌های نمکی شامل نمک و آب‌نمک به رنگ زرد و وجود رس و سیلت در میان این کفه‌ها به رنگ سبز روشن مایل به زرد است. وجود مارن قرمز همراه با لایه‌های ماسه سنگی، شیلی، کنگلومرایبی و گچی به رنگ بنفش روشن و کنگلومرا با درون لایه‌های ماسه سنگی و رسی به رنگ بنفش تیره مایل به خاکستری است.



شکل ۱۱. همبستگی بین باندهای استر در تصویر منطقه بررسی شده



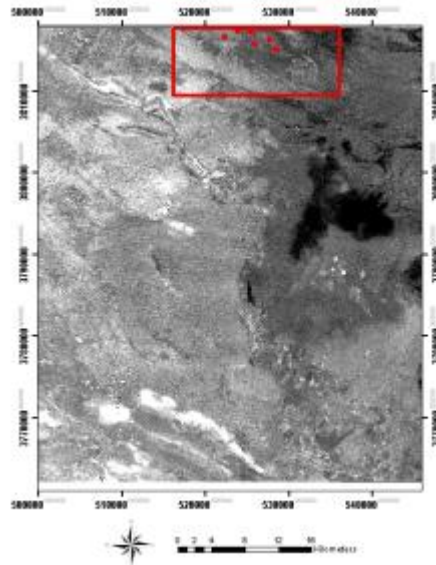
شکل ۱۲. تصویر ترکیب رنگی باندهای ۱-۲-۹ استر

۲-۶. لایه شاخص هیدروکربنی منطقه

شاخص هیدروکربنی برای نمایش احتمالی مناطق امیدبخش هیدروکربنی براساس اطلاعات رادیومتری تصاویر استر، وجود مواد هیدروکربنی را با استفاده از رابطه (۲) مشخص می‌کند و نتیجه اعمال آن بر تصویر ماهواره‌ای منطقه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است [۱۵].

$$HI = \frac{(B_7 + B_9)}{2B_8} \quad (2)$$

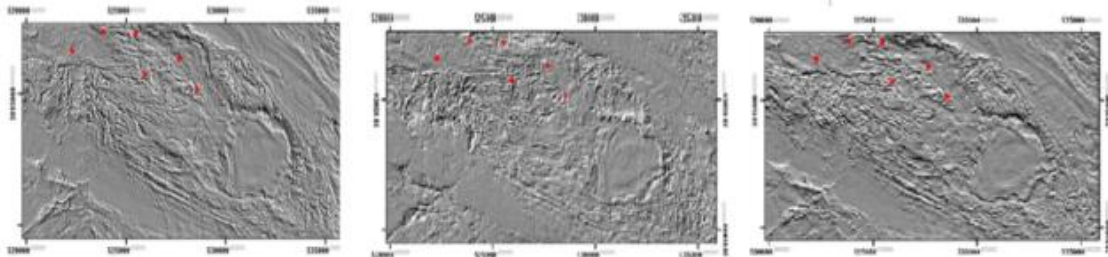
در این رابطه، B_i معرف بازتاب طیفی در باند شماره i سنجنده استر است.



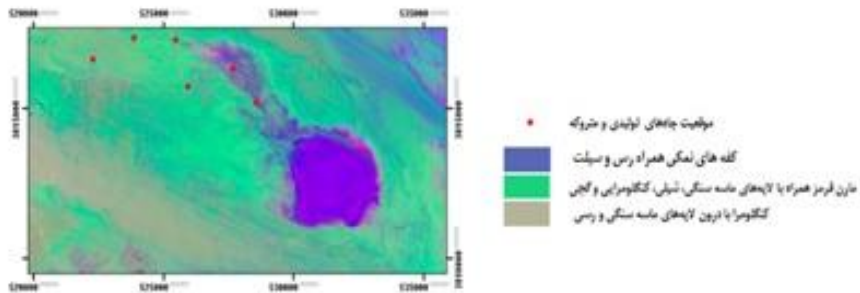
شکل ۱۳. نتیجه اعمال شاخص هیدروکربنی

۲-۷. لایه ساختاری منطقه

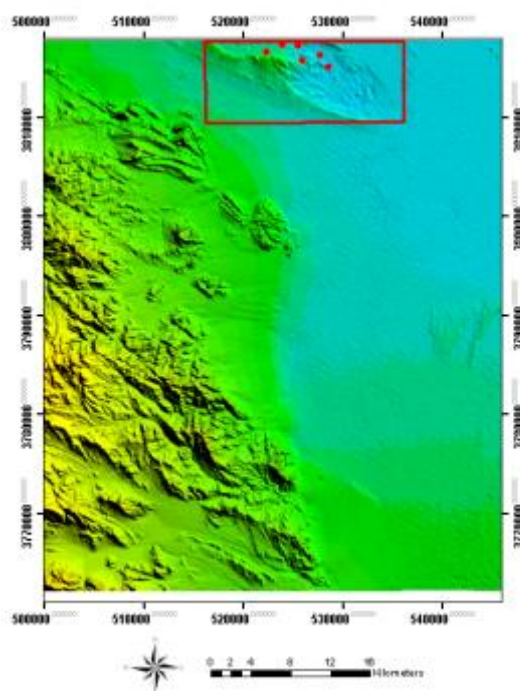
در اختیار بودن اطلاعات ساختاری منطقه، سهمی مؤثری در ارتقاء سطح اعتمادپذیری نقشه مناطق امیدبخش تولیدشده دارد. به این منظور، با اعمال فیلترهای پردازش تصویر [۱۶] بر مدل ارتفاع رقومی، خطوط شکست و گسل‌ها در تصاویر بارزتر شدند. این اطلاعات سپس در نرم‌افزار rcAGIS پردازش شد و لایه‌های اطلاعاتی شیب و جهت شیب استخراج شد [۱۷]. همچنین با اعمال روش MNF [۱۸] روی تصاویر استر، تصویر ترکیب رنگی مورد نیاز به دست آمد (شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶). براساس خروجی‌های حاصل، نقشه گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه تولید شد (شکل ۱۷) [۲۰].



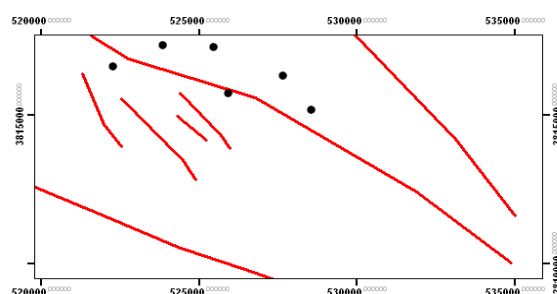
شکل ۱۴. نتیجه اعمال فیلتر روی تصویر ماهواره‌ای ETM منطقه بررسی شده، چپ) فیلتر بدون جهت لاپلاسی، وسط) تصویر بعد از اعمال فیلتر قطری ۴۵ درجه، راست) تصویر بعد از اعمال فیلتر جهتی N-S



شکل ۱۵. تصویر ترکیب سه باند اولیه روش MNF



شکل ۱۶. مدل ارتفاع رقومی میدان گازی سراچه



شکل ۱۷. گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه استخراج شده از تلفیق اطلاعات هندسی و رادیومتری تصویر ماهواره‌ای

بررسی‌های میدانی

به‌منظور ارزیابی میدانی وضعیت زمین‌شناختی منطقه سراچه، اکیپ مطالعاتی شامل متخصصان نقشه‌برداری و زمین‌شناسی رهسپار منطقه شدند. طی این عملیات، با استفاده از دوربین فتوگرامتری برد کوتاه رولای دی ۷ و گیرنده تعیین موقعیت ماهواره‌ای گارمین^۱ نسبت به عکس‌برداری از سازندهای منطقه و بررسی قسمت‌هایی از طاقدیس بزرگ منطقه که در تصاویر ماهواره‌ای قابل تشخیص نیست، اقدام شد (شکل ۱۸). براساس بررسی‌های صحرائی و تعیین ژنز حوزه رسوبی قم و هم‌چنین پژوهش‌های اکتشافی در این منطقه می‌توان گفت که سنگ مخزن نفت و گاز، آهک معروف قم و کربنات‌های متخلخل مناسب و عملکرد نیروهای دیاپیری ناشی از حرکت ذخیره هیدروکربنی و نیز نمک‌ها مخصوصاً لایه‌های ضخیم ژیبس و انیدرید به‌سمت بالا توانسته است مهاجرت هیدروکربور را به زیر لایه‌های ناتراوا به‌ویژه ژیبس و مارن به‌عنوان پوش سنگ را باعث شود. البته حرکات تکتونیکی هم‌زمان که موجب تشکیل طاقدیس بزرگ سراچه در راستای محوری شمال غربی- جنوب شرقی شده است، باعث به‌وجود آمدن تله‌های نفت و گاز

1. Garmin

در راستای محوری تاقدیس (N120°) آن شده است. از آن جاکه راستای محور تاقدیس و روند گسل‌های کششی ایجاد شده با مسیر چاه‌های حفاری شده در یک راستا است، بنابراین عوامل زمین‌شناسی لازم برای تجمع اقتصادی نفت و گاز در حوزه سراج به‌طور کامل به‌وقوع پیوسته است و بلوغ کامل زمین‌شناسی منطقه راه را برای اکتشاف تاقدیسی نفت و گاز هموار ساخته است.

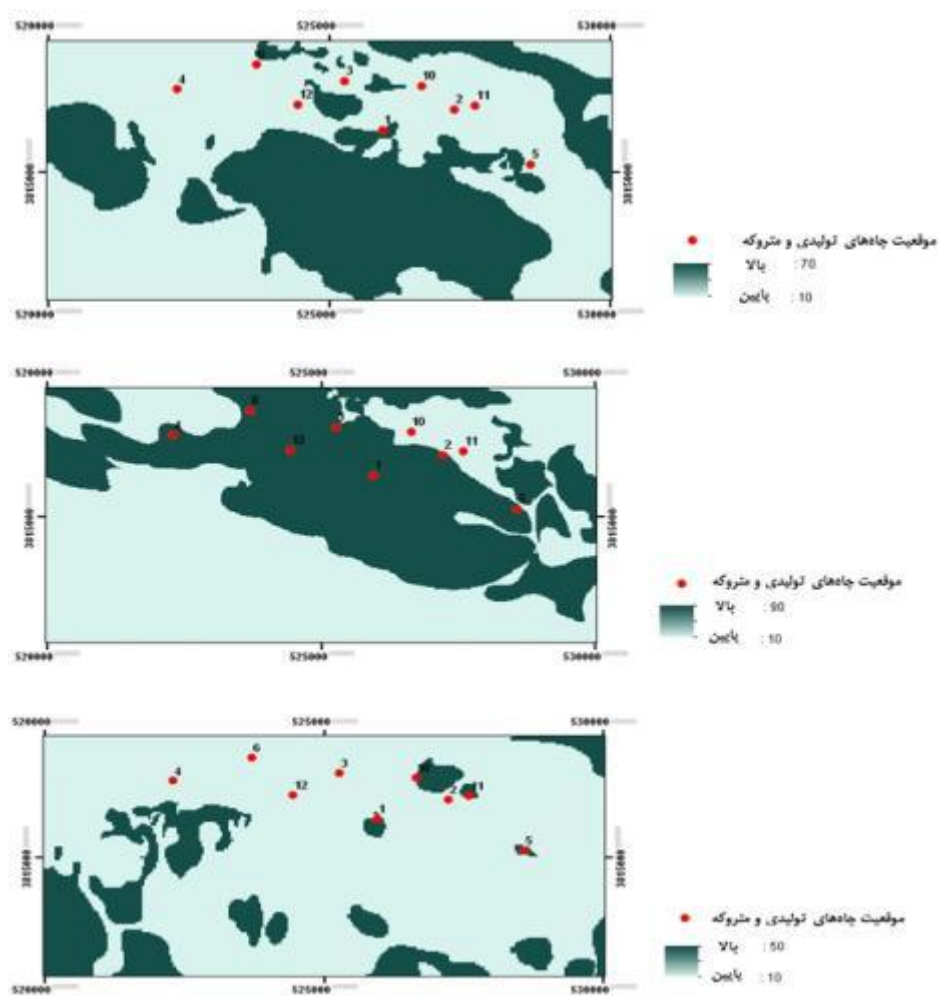


شکل ۱۸. ۱) فتوگرامتری زمینی و تعیین موقعیت ماهواره‌ای عوارض زمین‌شناختی سراج، ۲) آبرفت‌های منطقه سراج که حاصل فرسایش آنتی‌کلین بزرگ منطقه سراج‌اند، ۳) گسترش لایه‌های ضخیم گچ متبلور (ورقه‌ای)، آنهیدرید و سنگ‌های مارنی-آهکی (مجموعه پوش سنگ‌ها) در شمال آنتی‌کلین سراج، ۴) لایه‌بندی قائم در محور آنتی‌کلین سراج (نگاه رو به سمت شمال شرقی) جنس سنگ‌ها عمدتاً شیل‌های ماسه‌ای است، ۵) لایه‌بندی عمودی در محور آنتی‌کلین سراج همراه با خردشدگی ناشی از فشارهای چندجانبه بر سنگ‌های آهکی هسته آنتی‌کلین (منبع: نگارندگان)

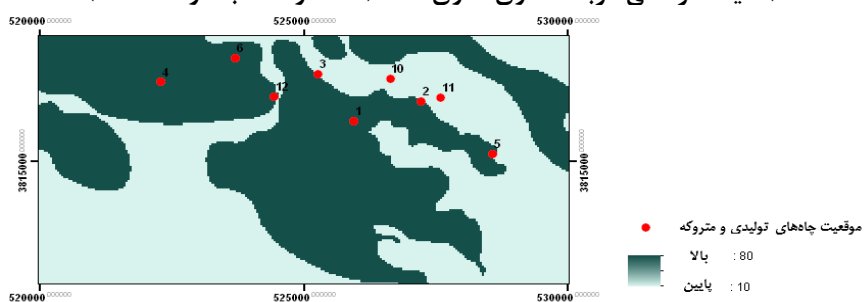
تحلیل در سامانه اطلاعات مکانی

بعد از استخراج لایه‌های اطلاعاتی مربوط به دگرسانی، سنگ‌شناسی، شاخص هیدروکربنی و ساختاری، این لایه‌ها به‌منظور انجام تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ فازی سازی^۲ می‌شوند و سپس با توجه به شبکه استنتاج فازی با هم تلفیق می‌شوند [۲۱]. در این مرحله، لایه‌های دگرسانی، شاخص هیدروکربنی، سنگ‌شناسی و ساختاری فازی سازی شدند (شکل‌های ۱۹ تا ۲۱).

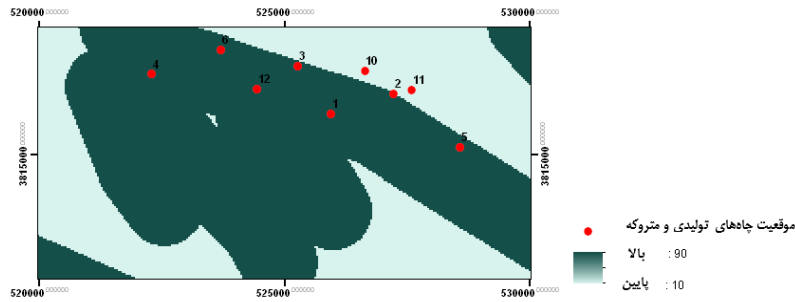
1. Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
2. Fuzzification



شکل ۱۹. ۱) لایه دگرسانی رسی فازی سازی شده، ۲) لایه دگرسانی بسترهای غنی از آهنی فازی سازی شده، ۳) لایه دگرسانی کربناته فازی سازی شده (اعداد راهنما به درصد است).



شکل ۲۰. لایه سنگ‌شناسی فازی سازی شده (اعداد راهنما به درصد است).



شکل ۲۱. لایه ساختاری فازی سازی شده (اعداد راهنما به درصد است).

پس از فازی سازی لایه‌های دگرسانی، سنگ‌شناسی و ساختاری، تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از شبکه استنتاج فازی و عملگرهای مختلف انجام شد (شکل ۲۲). استفاده از تابع عضویت AND برای تلفیق لایه‌های دگرسانی به این دلیل بود که وجود تنها یکی از دگرسانی‌ها با توجه به وزن‌های اختصاص داده شده به آن‌ها برای ارائه نقشه احتمالی هیدروکربنی کافی است از این‌رو، با توجه به وزن‌های داده شده به این لایه‌ها، تابع فازی آن به صورت رابطه (۳) تعریف شد:

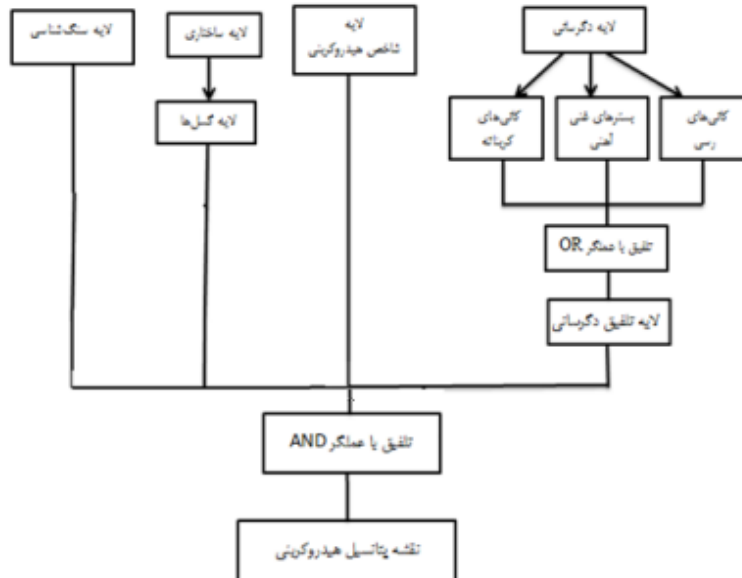
$$f_{AND} = \text{Min} (f_{CL}, f_{IR}, f_{CA}) \quad (3)$$

که در آن f_{CA} و f_{IR}, f_{CL} به ترتیب تابع مربوط به کانی‌های رسی، بسترهای غنی آهنی و کربنات‌ها هستند. سپس، استفاده از تابع عضویت OR برای تلفیق لایه‌های دگرسانی، سنگ‌شناسی و ساختاری برای استخراج نقشه مناطق امیدبخش هیدروکربنی از رابطه (۴) استفاده شد:

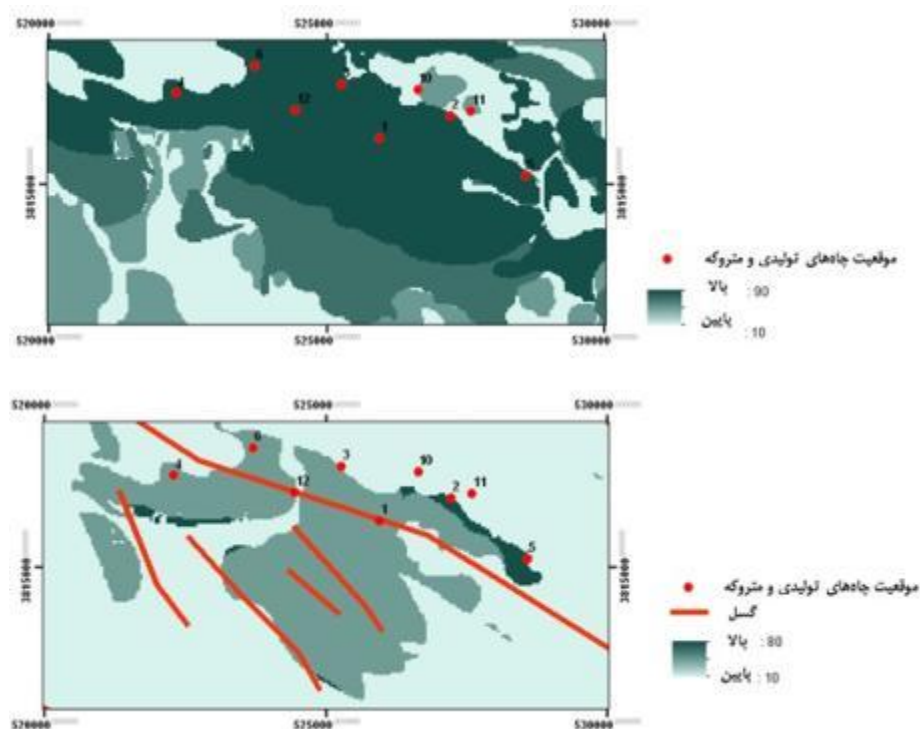
$$f_{OR} = \text{Max} (f_{AND}, f_{LI}, f_{ST}, f_{CI}) \quad (4)$$

که در آن f_{ST} و f_{CI}, f_{LI}, f_{AND} به ترتیب تابع مربوط به نتیجه تابع دگرسانی‌ها، سنگ‌شناسی و ساختاری و شاخص هیدروکربنی هستند.

در نهایت، تلفیق لایه‌های تولید شده، نقشه ظرفیت‌سنجی هیدروکربنی منطقه سراج استخراج شد (شکل ۲۳).



شکل ۲۲. شبکه استنتاج فازی پیاده‌سازی شده در تحقیق حاضر



شکل ۲۳. ۱) تصویر نتیجه تلفیق لایه‌های دگرسانی با عملگر جمع (لایه تلفیق دگرسانی)، ۲) تلفیق لایه دگرسانی، ساختاری، سنگ‌شناسی و شاخص هیدروکربنی با عملگر ضرب (نقشه ظرفیت‌سنجی هیدروکربنی). اعداد راهنما به درصد است.

نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های انجام شده در میدان گازی سراچه طی پژوهش حاضر، این میدان دارای مشخصاتی کلی است که احتمال وجود مواد هیدروکربنی برمبنای این مشخصات تأیید می‌شود:

۱. وجود یک ساختار تله‌ای در بخش‌های محوری ساختمان تاقدیسی و گسل خوردگی آنتی‌کلین بزرگ سراچه همراه با علائم تکتونیکی سطحی و نیمرخ مقاطع سنگ‌های زیرین حاکی از شکل‌گیری ذخایر هیدروکربنی در منطقه سراچه از مهم‌ترین آثار و شواهد زمین‌شناسی این میدان گازی مهم است.
۲. ایجاد مدل دگرسانی با تحلیل داده‌های طیفی تصاویر ماهواره‌ای استر و بررسی دگرسانی کانی‌های رسی (تبدیل کلریت و گلاکونیت به ورمیکولیت، مونت موریلونیت و کائولینیت) و بسترهای حاوی اکسیدهای آهن (تبدیل هماتیت به لیمونیت) و گسترش کربناسیون در منطقه بررسی شده تطابق دارند.
۳. از دیدگاه سنگ‌شناسی و عملکرد تکتونیکی در منطقه سراچه، وجود آهک متخلخل، مارن و شیل‌های هیدروکربن دار به‌عنوان سنگ‌های دربرگیرنده ذخیره در بخش‌های مرکزی آنتی‌کلین و حضور توالی‌هایی از سنگ‌های تبخیری مانند گچ، انیدرید و نمک‌ها همراه با تناوبی از ماسه سنگ و سیلت در منتهی‌الیه بخش‌های فوقانی یال شمالی آن به‌عنوان پوش سنگ تلقی می‌شوند. به‌دلیل داشتن خاصیت شکل‌پذیری در لایه‌های پوش سنگ، شدت چین‌خوردگی بیش‌تر در آن‌ها چشم‌گیر است به‌طوری‌که لایه‌های پوش سنگ در جنوب قم دیواره‌هایی به‌صورت عمودی از خود نشان می‌دهند. بعد از اتمام چین‌خوردگی، عملکرد نیروهای کششی با ایجاد گسل‌هایی

به موازات محور آنتی‌کلین (در راستای شمال غربی- جنوب شرقی) مانع مهاجرت ذخیره شده‌اند. محور چین‌خوردگی ($N120^0$) با گسل‌های کششی (نرمال) ایجاد شده در منطقه و با مسیر چاه‌های حفاری شده موازی است.

۴. وجود چاه‌های تولیدی در این میدان و قرارگیری این چاه‌ها در محدوده ارائه شده در نقشه ظرفیت‌سنجی هیدروکربنی خروجی پردازش تصاویر ماهواره‌ای حاکی از صحت عملکرد روش پیشنهادی است.

۵. بازدیدهای میدانی و تفسیر عکس‌های فتوگرامتری شواهد و دلایل فوق حاکی از صحت نتایج به دست آمده در نقشه ظرفیت‌سنجی منابع هیدروکربنی به روش دورکاوی و انطباق نتایج با شواهد میدانی در سطح اطمینان بالا (بیش از ۷۵ درصد صحت) است. سرعت، دقت، سهولت، هزینه کم و کارآمدی روش‌های دورکاوی در بهبود شناسایی میدان‌ها و ذخائر هیدروکربنی و کاهش ریسک اکتشاف در کشور ایران که دارای ذخائر فراوان نفت و گاز است اهمیت بسیار دارد.

برای ادامه تحقیق حاضر، پیشنهادهای زیر مطرح می‌شود:

۱. به‌کارگیری محدوده طیفی حرارتی برای تحلیل دگرسانی مواد هیدروکربنی.
۲. به‌کارگیری اطلاعات طیف‌سنجی زمینی و آزمایشگاهی برای بهبود طبقه‌بندی طیفی.
۳. استفاده از جنبه کمی و متریک فتوگرامتری زمینی در مناطقی که قابلیت دسترسی به آن‌ها مشکل است و تشکیل مدل سه‌بعدی از آن برای تفسیر ساختاری علاوه بر تفسیر دگرسانی و سنگ‌شناسی.
۴. اعمال شاخص هیدروکربنی روی تصاویر فراطیفی و استفاده از آن به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی برای تلفیق در سامانه اطلاعات مکانی.

منابع

1. McCoy R. M., Blake J. G., Andrews K.L., "Detecting hydrocarbon micro-seepage using hydrocarbon absorption bands of reflectance spectra of surface soils", Oil and Gas Journal, Vol. 99 (2001) 40-45.
۲. سهراب شهریاری، مهران عزیززاده، سیاوش شایان و احمد سجادیان، "کارایی مطالعات سنجش از دور در مدلسازی مخازن هیدروکربوری گستره جنوب باختری ایران: مطالعه موردی از سازند آسماری" (۱۳۸۸).
3. Diana Krupnik, Shuhab D. Khan, "Hydrocarbon micro-seepage-related geobotanical analysis in and around oil fields", The Leading Edge, 36(1) (2017) 12-23.
4. Talita Lammoglia, Carlos Roberto, "Spectroscopic characterization of oils yielded from Brazilian offshore basins: Potential applications of remote sensing", Remote Sensing of Environment, 115(10) (2011) 2525-2535.
۵. مطیعی، همایون، "زمین‌شناسی نفت"، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۸).
6. Cosmas Pittia Kujjo, "Application of Remote Sensing for Gold Exploration in the Nuba Mountains", Sudan, M.Sc. Thesis, Green State University, USA, (2010).
۷. مریم همدانیان، "آشکارسازی مناطق امیدبخش از نظر وجود منابع هیدروکربنی با ترکیب تصاویر ماهواره‌ای و دله‌های فتوگرامتری هوایی و زمینی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تفرش (۱۳۹۲).

۸. زمانی پ، حسینی ح، "نقشه زمین‌شناسی قم ۱:۱۰۰۰۰۰"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۸).
۹. بهمن بهلولی، روح‌الله حق‌زاده، علی حسینی، "تعیین پارامترهای پتروفیزیکی سنگ مخزن در میدان سراجیه قم"، مجله علوم دانشگاه تهران (۱۳۸۸).
۱۰. همدانیان مریم، مالیان عباس، آقاجانی حمید، "آشکارسازی مناطق امیدبخش از نظر وجود منابع هیدروکربنی با تلفیق دورکاوی و داده‌های زمینی (بررسی موردی: استان قم)"، دومین کنفرانس بین‌المللی مدل‌ها و سنجنده‌ها در فتوگرامتری و سنجنده‌ها (SMPR)، دانشگاه تهران (۱۳۹۲).
11. Kayadibi Onder, "Evaluation of imaging Spectroscopy and atmospherical Evaluation of imaging Spectroscopy and atmospherical correction of multispectral images (ASTER and LANDSAT 7 ETM+)", IEEE (2011).
۱۲. مالمیریان حمید، "پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای"، تالیف: تامس لیل‌سند، انتشارات سازمان جغرافیایی وزارت دفاع و نیروهای مسلح (۱۳۸۰).
13. Pena A., Abdelsalam M., "Orbital remote sensing for geological mapping in southern Tunisia: Implication for oil and gas exploration", Journal of African Earth Sciences, 44, (2006) 203-219.
14. Ianwei R., Mohamed A. G., "Optimum Index Factor (OIF) for ASTER data: Examples from the Neoproterozoic ALLAQI suture", Egypt, Department of Geosciences, University of Texax at Dalas.
15. Andreoli G., Bulgarelli B., Hosgood B., Tarchi D., "Hyper-Spectral Analysis of Oil and Oil-Impacted Soils for Remote Sensing Purposes", Institute for the Protection and Security of the Citizen, European Commission Joint Research Center (2007).
16. Gonzalez Rafael C., Woods Richard E., "Digital Image Processing", (2002).
17. <http://www.GISTech.ir>, Accessed December (2016).
18. Green A., Berman M., Switzer P., Craig M. D., "Transformation for ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (1988).
۱۹. طاهرکیا ح، "اصول و کاربرد سنجش از دور"، جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران (۱۳۷۵).
20. Prost G. L., "Interpretation of Remote Sensing Images for Petroleum Industry: Exploitation and Environmental Monitoring", Gordon and Breach Science Publishers, Inc. New York, (1994).
۲۱. امیری مقصود، دارستانی فراهانی احمد، "تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه"، نشر دانشگاهی کیان (۱۳۹۲).