

اکتشافات زمین‌شناختی و ژئوشیمیایی شیل‌های نفتی (نفت‌های نامتعارف) قالی کوه لرستان

علی شکاری فرد^۱، دانشگاه تهران^۲، منوچهر دریابنده، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران^۳، مهرباب رشیدی، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران^۴، محمود حاجیان، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران^۵، سیدعلی قریشی، دانشگاه تهران^۶

چکیده

در بخش اول این تحقیق جایگاه چینه‌شناسی، وضعیت ساختاری و برای اولین بار با تهیه نقشه‌های زمین‌شناختی ۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰، گسترش جغرافیایی شیل‌های نفتی قالی کوه (لرستان) بررسی و تعیین گردید. در ادامه با انجام عملیات اکتشافی زیرسطحی (حفر ترانشه و گمانه‌های عمیق) و با استفاده از مدل‌سازی ساختاری سه بعدی حجم زمین‌شناختی شیل نفتی محاسبه شد. در بخش دوم، خصوصیات ژئوشیمی نفت ماده آلی شیل‌های نفتی قالی کوه، و ارزیابی اولیه از میزان نفت‌دهی این منابع مورد بررسی قرار گرفت. میانگین میزان کل کربن آلی (TOC) برای شیل‌های نفتی سازند سرگلو (ژوراسیک میانی)، حدود ۱۲٫۸ و برای سازند گرو (کرتاسه آغازین) حدود ۱۵٫۶ درصد وزنی است. میزان نفت‌دهی نمونه‌های انتخابی شیل نفتی قالی کوه به طور میانگین ۸٫۶ درصدوزنی معادل با ۸۳ لیتر برتن است. نفت شیل استحصال قالی کوه با کیفیت عالی در گروه نفت‌های سبک تا فوق سبک قرار دارند. داده‌ها و نتایج اکتشافات ژئوشیمیایی اولیه بیانگر رخداد منابع منحصر به فرد شیل نفتی در ناحیه قالی کوه است که این ضرورت بررسی جامع با استفاده از فناوری‌های تخصصی و نوین جهت اکتشاف این منابع را نشان می‌دهد. براساس محاسبات انجام گرفته و با در نظر گرفتن میانگین نفت‌دهی و گرانروی، میزان نفت شیل درجا در ناحیه قالی کوه بیش از ۲٫۴ میلیارد بشکه برآورد می‌گردد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۳/۲۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۵/۲۱

واژگان کلیدی:

شیل نفتی، اکتشاف زمین‌شناختی، ژئوشیمی آلی، قالی کوه، لرستان، ایران

مقدمه

مورد مطالعه به چشم می‌خورد. عملکرد افق‌های گسسته زیرین (شامل سازندهای پالئوزوئیک زیرین و تریاس) و میانی (ژوراسیک و کرتاسه) در توسعه و شدت چین خوردگی‌ها و شکل‌گیری گسل‌ها اثر بخش بوده‌اند. گسل‌های دورود و راندگی اصلی زاگرس در مجاورت ناحیه قالی کوه قرار داشته و این امر به پیچیدگی‌های ساختاری ناحیه افزوده است.

شیل نفتی، نوعی سنگ رسوبی غنی از کروژن است که طی فرآیند پیرولیز در سطح زمین و درون زمین می‌تواند حجم قابل توجهی ترکیبات هیدروکربنی به فرم مایع (نفت شیل) و گاز تولید نماید. امروزه با توجه به افزایش تقاضای انرژی و کاهش ذخایر نفت متعارف در جهان، منابع نامتعارف نفت (شیل نفتی و نفت شیل) به‌عنوان یک منبع انرژی جدید مورد توجه قرار دارد و برخی کشورها مانند آمریکا، استونی، چین، برزیل، استرالیا، صربستان در حال تولید اقتصادی و تجاری از این منابع هستند. بدون تردید شناسایی و ارزیابی این ذخایر می‌تواند در آینده نقش مهمی در رونق اقتصادی و افزایش تولید نفت کشور داشته باشد.

این منابع برای اولین در ایران در منطقه قالی کوه الیگودرز بر روی سازندهای سرگلو (ژوراسیک) و گرو (کرتاسه زیرین) و سازندهای

الیگودرز زمین‌شناختی ناحیه زاگرس به واسطه دربرداشتن ذخایر نفت و گاز زیاد، از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان نفت بوده است اما بخش‌هایی از آن به‌ویژه زاگرس مرتفع و منطقه قالی کوه در استان لرستان به دلیل عاری بودن از چنین ذخایری هیچگاه کانون توجه نبوده است. در سال‌های اخیر مطالعات اولیه حاکی از رخداد منابع شیل نفتی است که مطالعه و شناخت آن به عنوان منبعی برای تولید نفت خام مورد توجه ویژه قرار گرفته است. ناحیه قالی کوه در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب غرب شهر الیگودرز و ۳۸۰ کیلومتری جنوب غرب تهران در بخش زاگرس مرتفع قرار دارد.

از نظر چینه‌شناسی در ناحیه قالی کوه توالی کاملی از سازندهای پالئوزوئیک زیرین تا کرتاسه رخنمون دارند که به ترتیب شامل سازندهای زاگون، لالون، میلا، ایللیک، فراقون، دالان، خانه‌کت، نیریز، سورمه، سرگلو، نجمه، برش انحلالی معادل گوتنیا و گرو است که گاهی توسط سازند بختیاری پوشیده می‌شوند. شیل‌های نفتی قالی کوه درون واحدهای سنگی سرگلو و گرو (ژوراسیک-کرتاسه) قرار دارد. به دلیل قرارگیری قالی کوه در زون ساختاری زاگرس مرتفع چین خوردگی‌های شدید همراه با گسلش در ناحیه

زمین‌شناختی (برداشت‌های زمینی و هلیکوپتری)، چینه‌شناسی، پردازش و تعبیر و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی مناسب، تهیه نقشه‌های زمین‌شناختی، حفرترانشه‌های متعدد سطحی، حفاری گمانه‌های عمیق و محاسبه حجم شیل‌های نفتی اشاره کرد.

به منظور ارزیابی خصوصیات ژئوشیمیایی و پتروگرافی ماده آلی و تا حدودی میزان نفت‌دهی شیل‌های نفتی، آنالیزهای متداول ژئوشیمی نفت شامل پیرولیز راک-اول، آنالیز لکو، پتروگرافی کروژن، آنالیز میکروسکوپی کروژن (پالینوفاسیس)، انعکاس ویتربینیت، آنالیز عنصری کروژن و آنالیزهای تکمیلی شامل آنالیز برش فیشر استاندارد، آنالیز عنصری، آنالیز تعیین خواص فیزیکی از نفت‌های استحصالی (نفت شیل)، آنالیز کانی شناسی و شیمیایی، آنالیز کروماتوگرافی گازی (GC)، کروماتوگرافی گازی-طیف سنجی جرمی (GC-MS)، آنالیز پیرولیز-کروماتوگرافی گازی (PY-GC)، آنالیز ایزوتوپی کربن و آنالیزهای حرارتی بر روی چند نمونه از شیل نفتی در ناحیه قالی‌کوه انجام گرفت.

۱- روش‌ها و یافته‌ها

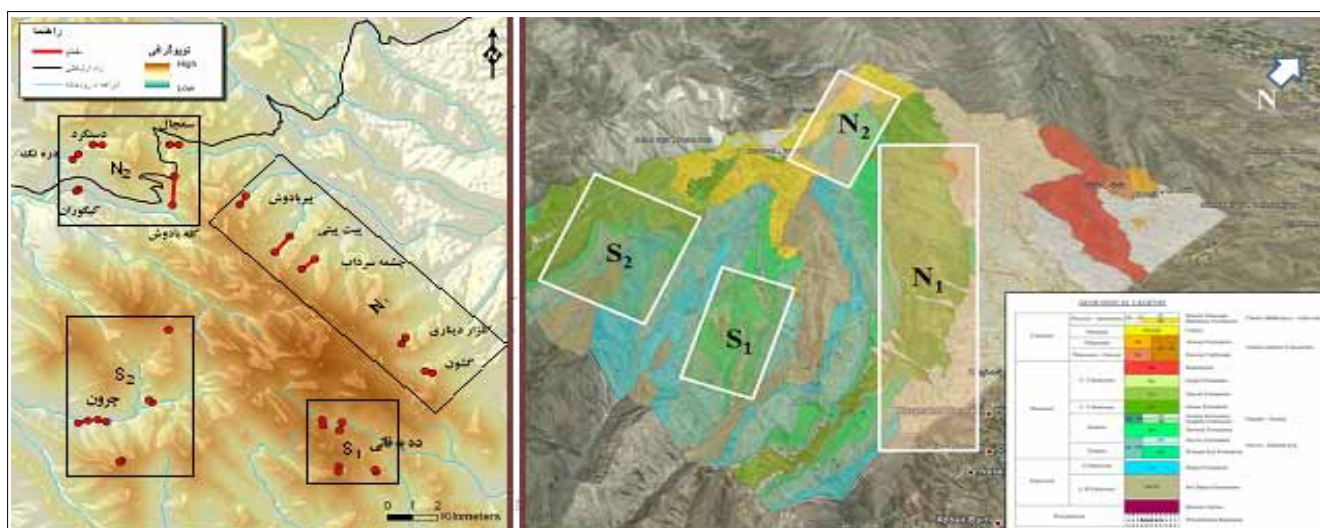
۱-۱- مطالعات زمین‌شناختی به منظور تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس

با توجه به رخنمون شیل‌های نفتی در منطقه قالی‌کوه در اولین گام، انجام عملیات پی‌جویی اکتشافی در سه فاز جهت شناسایی شیل نفتی انجام گردید. در فاز اول ابتدا با تهیه نقشه زمین‌شناختی ۱:۵۰,۰۰۰ توزیع و پراکندگی و جایگاه چینه شناسی افق‌های شیل نفتی در محدوده مورد مطالعه شناسایی گردید. در فاز دوم از

مجاور آن‌ها مورد بررسی مقدماتی قرار گرفت. در سال ۱۹۷۶ گزارشی تحت عنوان "مطالعات اولیه شیل‌های نفتی نواحی شمالی رشته کوه زاگرس" توسط بزرگ‌نیا در نواحی شمالی زاگرس تهیه شده است. در سال ۱۹۷۷ مطالعات دیگری توسط راسک در سه منطقه اشتران‌کوه، قالی‌کوه و زردکوه انجام شد. عندلیب در سال ۱۹۷۷ در خصوص ویژگی‌های ژئوشیمیایی این ذخایر مطالعاتی را به انجام رساند که نتایج حاصل در قالب گزارش "مطالعات ژئوشیمیایی و پتروگرافی سنگ‌های کروژنی (شیل نفتی) قالی‌کوه-زاگرس" تهیه و تنظیم شده است. همچنین شرکت بریتیش پترولیوم نیز مطالعات زمین‌شناختی در منطقه قالی‌کوه را به انجام رسانده که نتایج آن در قالب نقشه زمین‌شناختی در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ ارائه گردیده است.

به منظور تکمیل مطالعات زمین‌شناختی اکتشافی و تعیین حجم این ذخایر و بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی مواد آلی و نفت‌دهی شیل‌های نفتی، قرارداد پژوهشی بین مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران با دانشگاه تهران منعقد شد که طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ به انجام رسید.

از اهداف مطالعات زمین‌شناختی این پروژه می‌توان به پی‌جویی چکشی و اکتشافات نیمه تفصیلی شیل‌های نفتی قالی‌کوه، شناسایی دقیق افق‌های شیل نفتی (تهیه نقشه‌های زمین‌شناختی ۱:۵۰,۰۰۰ و ۱:۱۰,۰۰۰) و همچنین تخمین و ارزیابی ذخیره شیل‌های نفتی با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی را نام برد. فعالیت‌های گسترده‌ای به منظور بررسی ذخایر شیل نفتی این منطقه انجام شده است که از آن جمله می‌توان به عملیات



شکل ۱ | نقشه زمین‌شناختی و محدوده‌های انتخابی جهت انجام مطالعات اکتشافی تفصیلی (N₁, N₂, S₁, S₂) در ناحیه قالی‌کوه لرستان

گردد. به همین منظور نقشه ۱:۵۰,۰۰۰ با نام قالی کوه تهیه گردید. با تهیه و پردازش تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی مناسب ابتدا نقشه پایه تهیه و مرزهای سازندها بر روی آن تفکیک گردید. سپس با انجام عملیات صحرایی (زمینی و هلیکوپتری) نقشه زمین‌شناختی مورد تدقیق قرار گرفته است. در این عملیات از تمامی مرزهای مشکوک بازدید شده و مورد نمونه‌برداری سنگی جهت انجام مطالعات دیرینه‌شناسی و پتروگرافی قرار گرفتند.

پس از تهیه و مطالعه مقاطع نازک و بررسی‌های سنگ‌شناسی و میکرو پالئونتولوژی نمونه‌های برداشت شده، نتایج آن بر روی نقشه پایه پیاده‌سازی و در نهایت با رعایت کلیه استانداردهای نقشه‌های شرکت ملی نفت ایران، نقشه ۱:۵۰,۰۰۰ ناحیه قالی کوه تهیه شد.

در حین تهیه نقشه زمین‌شناختی تعداد ۲ برش چینه‌شناسی با هدف تعیین شناخت توالی چینه‌شناسی، شناسایی تعداد و ضخامت لایه‌های شیل نفتی، بررسی‌های سنگ‌شناسی و مرز بالا و پایین طبقات، بررسی محیط رسوبی، تطابق چینه‌ای و بررسی تغییرات ضخامتی واحدهای شیل نفتی در مقاطع گشون (شرق ناحیه) و گله بادوش (غرب ناحیه) از سازند خانه کت تا بخش‌های ابتدایی سازند گرو برداشت شدند (شکل - ۳).

پس از انجام مطالعات اولیه در ناحیه قالی کوه (وسعت ۵۰۰ کیلومتر مربع) و تهیه نقشه ۱:۵۰,۰۰۰ با هدف شناسایی جایگاه زمین‌شناختی شیل‌های نفتی، محدوده‌هایی که دارای بیشترین پتانسیل شیل نفتی بوده مورد ارزیابی قرار گرفتند. این محدوده‌ها با نام‌های N1, N2, S1, S2 جهت مطالعات تکمیلی تر در بخش اکتشافات نیمه تفصیلی در ساختار قالی کوه نامگذاری شدند.

محدوده‌های N1 و N2 در بخش شمالی و محدوده‌های S1 و S2

محدوده‌هایی که دارای بالاترین تعداد رخنمون شیل نفتی بودند، نقشه‌های زمین‌شناختی ۱:۱۰,۰۰۰ تهیه و جهت ادامه عملیات اکتشافات نیمه تفصیلی، عملیات اکتشافی سطح الارضی (حفر ترانشه و چاهک) و تحت الارضی (حفر گمانه عمیق اکتشافی) انجام گرفت.

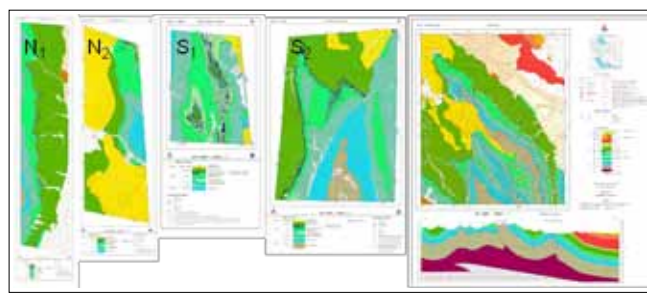
به منظور شناسایی دقیق افق‌های شیل نفتی در مجموع تعداد ۱۷ برش چینه‌شناسی برداشت شد. شیل‌های نفتی منطقه مورد مطالعه، محدود در افق چینه‌ای در سازندهای سرگلو (۵-۵۱ متر) و گرو (۳-۱۷ متر) مورد شناسایی قرار گرفته‌اند.

در حین انجام فاز دوم اکتشافات نیمه تفصیلی تعداد ۵۲ ترانشه سطحی به طول ۲۱۹۵ متر در ۹ ناحیه و ۳ گمانه اکتشافی به عمق مجموع ۲۲۳ متر در نواحی گله بادوش و سم چال حفر گردیدند. در مجموع تعداد ۳۷۶ نمونه از شیل نفتی در ترانشه‌ها و تعداد ۳۸ نمونه از مغزه مورد برداشت قرار گرفته‌اند. در ادامه یک برگ نقشه زمین‌شناختی به مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ و چهار برگ نقشه زمین‌شناختی به مقیاس ۱:۱۰,۰۰۰ در نواحی پتانسیل‌دار شمال و جنوب ساختار قالی کوه تهیه شدند (شکل‌های ۱ و ۲). در فاز سوم عملیات تعداد ۴۶ برش ساختمانی با مقیاس ۱:۱۰,۰۰۰ تهیه قرار گرفت. با توجه به مدل ساخته شده میزان ذخیره در جای شیل نفتی ناحیه قالی کوه حدود ۲۳۲۰ میلیون متر مکعب برآورد گردیده است.

به منظور اکتشاف و مدل‌سازی ذخیره معدنی شیل‌های نفتی وجود نقشه‌های زمین‌شناختی بزرگ مقیاس جزو ضروری ترین ارکان پروژه محسوب می‌گردد. ناحیه مورد مطالعه در محدوده‌ای قرار گرفته که تنها یک نقشه زمین‌شناختی ۱:۲۵۰,۰۰۰ قدیمی شرکت BP آن را پوشش می‌دهد. به علاوه چهار گوش محدوده از تقسیم بندی‌های استاندارد نقشه‌های ۱:۵۰,۰۰۰ ایران پیروی نکرده و لذا می‌بایست نقشه عملیاتی منحصر به این ناحیه تهیه



۱ | تطابق چینه‌شناسی افق‌های حاوی شیل نفتی در سازندهای سرگلو (Sr) و گرو (Gr) در ناحیه قالی‌کوه لرستان



۲ | نقشه زمین‌شناختی ۱:۵۰,۰۰۰ از ناحیه قالی‌کوه و نقشه‌های زمین‌شناختی از نواحی اکتشافی نیمه تفصیلی ۱:۱۰,۰۰۰

الف: آماده سازی اولیه داده‌ها

در این مرحله داده‌های مورد نیاز جهت ورود به مدل آماده‌سازی گردیدند. از آنجایی که از داده‌های مربوط به ترانسه‌ها در تصحیح نقشه‌های زمین‌شناختی ۱:۱۰,۰۰۰ برای چهار ناحیه استفاده شده بود و مرزهای سازندها و شیل‌های نفتی با داده‌های آن‌ها انطباق یافته بود، به نوعی به صورت غیرمستقیم در مدل دخالت داده شدند. داده‌های گمانه‌ها با مشخص بودن مختصات و ارتفاع ابتدا و انتهای گمانه و همچنین ضخامت هر یک از لایه‌ها رقومی‌سازی شده و وارد مدل گردیدند.

ب: بازسازی لایه‌های شیل نفتی به روش Empirical Bayesian Kriging

این روش از روش‌های جدید بازسازی سطح است که از روش‌های کریجینگ کلاسیک به وسیله دخالت دادن خطای برآورد شده با تخمین مدل سمیواریوگرام متمایز می‌گردد. این امر با تخمین و سپس استفاده مدل‌های سمیواریوگرام به تعداد زیاد به جای استفاده از سمیواریوگرام منفرد میسر می‌شود. با استفاده از این روش چهار سطح برای شیل نفتی سرگلو و گرو بازسازی شدند که نمونه‌ای از آن در شکل - ۴ برای قسمت جنوب شرقی منطقه NI نمایش داده شده است. در این شکل سطح پایین و بالای شیل نفتی سرگلو و گرو به ترتیب با رنگ‌های آبی روشن، آبی تیره، سبز روشن و سبز تیره نشان داده می‌شود. شکل - ۵ نیز سطح بازسازی شده پایین لایه شیل نفتی سرگلو را برای قسمت غربی ناحیه مطالعاتی S2 نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات پیوسته رنگ زرد - قرمز - آبی متناسب با تغییرات ارتفاع است و از زرد به آبی ارتفاع افزایش می‌یابد.

ج: برآورد خطای مدل

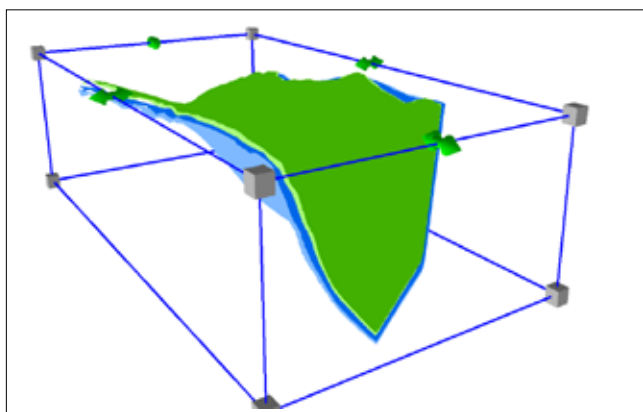
از میان داده‌های آماده شده برای بازسازی سطح لایه‌های شیل نفتی، ۲۵ درصد به صورت تصادفی انتخاب شدند تا برای برآورد دقت مدل استفاده گردند و ۷۵ درصد باقی به صورت مستقیم در مدل‌سازی به کار گرفته شدند. پس از بازسازی چهار سطح به وسیله روش EBK برآورد پارامترهای ضریب تعیین و RMSE با استفاده از ۲۵ درصد از داده‌ها که برای تست در نظر گرفته شده بودند، صورت پذیرفت. به علت این که هر یک از مناطق چهارگانه مورد مطالعه با توجه به ناهمسانگردی موجود در داده‌ها قسمت‌بندی شده بودند، متوسط پارامترهای دقت، با توجه به

در بخش جنوبی ساختار قرار دارند (شکل - ۱). در محدوده‌های مذکور با هدف تفکیک دقیق‌تر واحدهای شیل نفتی از دیدگاه چینه‌شناسی و ساختمانی و داشتن مبنایی برای عملیات اکتشافی از جمله حفاری ترانسه و گمانه و مدل‌سازی ماده معدنی، نقشه‌های زمین‌شناختی با مقیاس ۱:۱۰,۰۰۰ تهیه گردید.

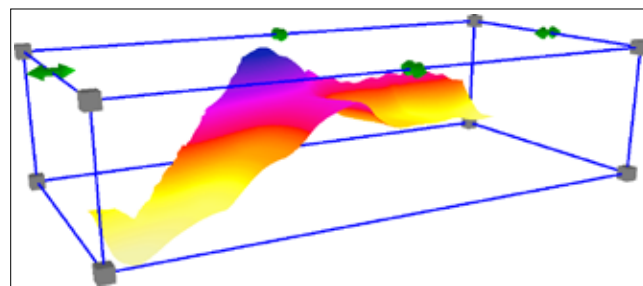
۲- مدل‌سازی سه بعدی برای تعیین حجم ذخیره شیل نفتی

مهمترین هدف از تهیه نقشه‌های زمین‌شناختی ۱:۱۰,۰۰۰ در ناحیه قالی‌کوه استفاده در مدل‌سازی سه بعدی با تهیه برش‌های عرضی مناسب و دقیق جهت تخمین ذخیره شیل نفتی است. در مجموع تعداد ۴۶ برش ساختمانی که پوشش دهنده تمامی قسمت‌های مورد اکتشاف قرار گرفته (نواحی چهارگانه) باشد ترسیم گردید. در ترسیم برش‌ها از روش کینگ که استاندارد شرکت ملی نفت ایران است، استفاده شد. اطلاعات حاصل از ترانسه‌ها و گمانه‌ها و همچنین ضخامت‌های به دست آمده از پیمایش‌های صورت گرفته سطحی در نواحی مختلف قالی‌کوه در برش‌های عرضی اعمال گردید.

روش انجام این مرحله از پروژه به طور مختصر عبارتند از:



شکل ۴ | سطح بازسازی شده برای لایه‌های شیل نفتی سرگلو و گرو



شکل ۵ | سطح بازسازی شده پایین لایه شیل نفتی سرگلو برای قسمت غربی ناحیه مطالعاتی S2

در ناحیه قالی کوه جمع آوری شد. نمونه‌های انتخابی به طور سیستماتیک از رخنمون‌های سطحی، ترانشه‌ها و مغزه‌های عمقی جمع‌آوری شده است. با این وجود بخش اصلی نمونه‌ها مرتبط با رخنمون سطحی است. فاصله بین نمونه‌های انتخابی از رخنمون و ترانشه‌ها، حدوداً ۱ تا ۱,۵ متر است.

الف: میزان کربن آلی و داده‌های پیرولیز راک-اول

در ناحیه قالی کوه لرستان، محتوی کل کربن آلی (TOC) شیل نفتی سازند سرگلو (ژوراسیک میانی) بین ۰,۴۸ تا ۲۷,۱۵ درصد وزنی و با میانگین ۱۲,۸ درصد وزنی و برای شیل نفتی سازند گرو (کرتاسه آغازین) بین ۰,۷۵ تا ۲۷,۱۷ درصد وزنی با میانگین ۱۵,۶ درصد وزنی است.

میزان شاخص هیدروژن (HI) شیل نفتی سازند سرگلو به طور میانگین حدود ۴۶۲ و برای سازند گرو حدود ۴۹۳ میلی‌گرم هیدروکربن بر گرم کربن است. نوع کروژن در هر دو شیل نفتی مشابه و به طور غالب از نوع II است. میانگین توان زایش برای نمونه‌های سرگلو ۶۵ و برای نمونه‌های گرو حدود ۸۱ کیلوگرم هیدروکربن بر تن سنگ است. شیل‌های نفتی در زون نابالغ تا ابتدای پنجره نفتی قرار دارند.

مقیاس کاری قابل قبول بوده و متوسط ضریب تعیین با تغییرات جزئی بین قسمت‌ها ۰/۹۴ و متوسط RMSE ۲,۱ متر محاسبه گردید.

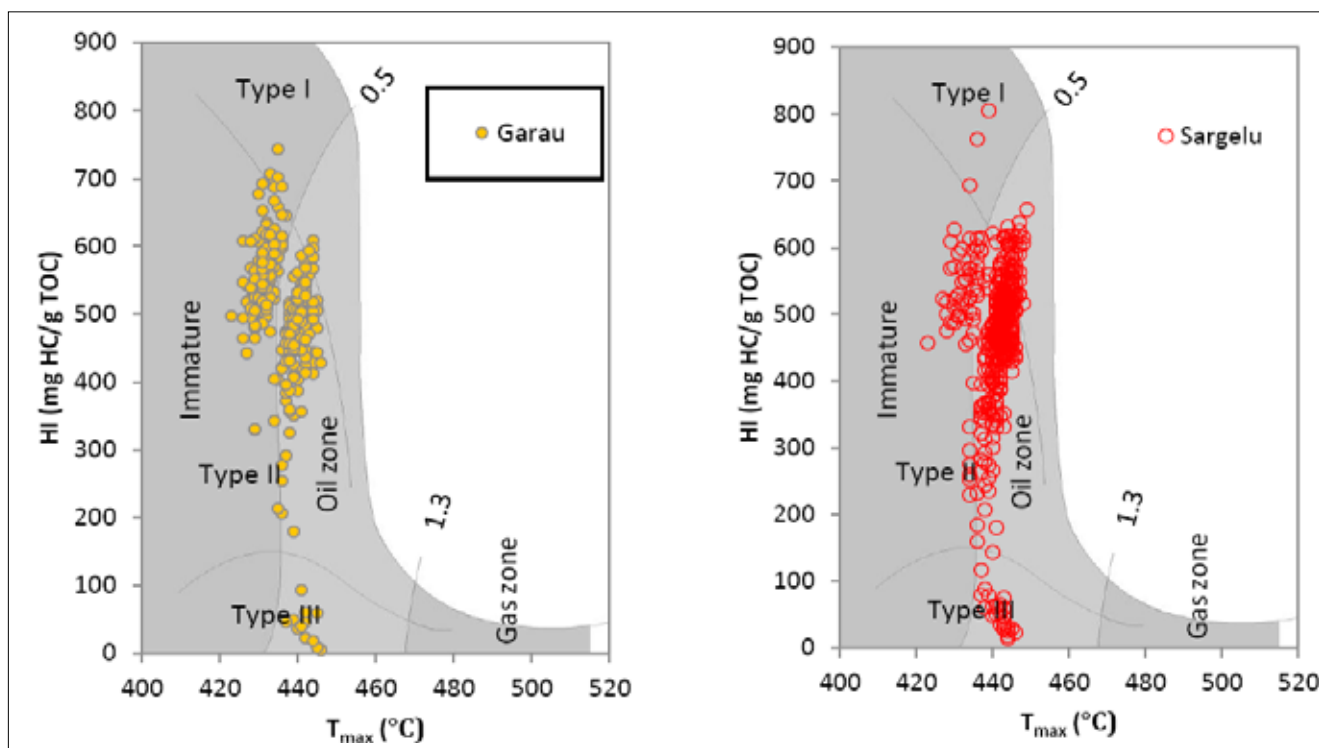
د: برآورد حجم ذخیره

در این مرحله با استفاده از الگوریتم محاسبه حجم که بر مبنای رستر عمل می‌نماید حجم ما بین دو سطح مدل‌سازی شده برای لایه شیل نفتی سرگلو و گرو به صورت جداگانه مورد محاسبه قرار گرفت. الگوریتمی که برای محاسبه حجم به کار می‌رود بر مبنای رستر عمل می‌نماید، بدین ترتیب که با مشخص بودن مساحت دو پیکسل متناظر و فاصله عمودی مابین آن‌ها حجم برای هر پیکسل محاسبه می‌گردد.

در نهایت نتایج تعیین حجم ذخیره منابع شیل نفتی منطقه قالی کوه لرستان به تفکیک مناطق چهارگانه مطالعاتی و لایه‌های شیل نفتی گرو و سرگلو تعیین گردید. به طور کلی میزان حجم شیل نفتی در ناحیه حدود ۲۳۲۰ میلیون مترمکعب برآورد شد.

۳- مطالعات ژئوشیمیایی و نفت‌دهی شیل‌های نفتی

در این تحقیق تعداد ۷۶۰ نمونه سطحی از ۱۲ ناحیه مختلف



ب: پتروگرافی آلی و انعکاس بیتومن

بررسی‌های پتروگرافی آلی با استفاده از میکروسکوپ نور فلورسانس و انعکاسی بر روی نمونه سنگ شیل نفتی انجام گردید. نمونه‌های انتخابی هر کدام به عنوان یک نمونه مرجع، معرف یک ناحیه می‌باشد. بر اساس آنالیز کیفی پالینوفاسیس‌ها (با استفاده از میکروسکوپ نور عبوری) مواد آلی موجود در شیل‌های نفتی سرگلو و گرو تقریباً مواد آلی آمورف (AOM) و مقداری خرده‌های شبیه به فیتوکلاست است. با توجه به مشاهدات میکروسکوپی با نور انعکاسی تقریباً تمام بخش آلی نمونه‌ها بیتومن است که به صورت سیمان متن سنگ را تشکیل داده و به طور محدود حفره‌ها و فضاهای خالی سنگ را پر کرده است. شکل - ۷ تصاویر میکروسکوپی کروژن و بیتومن از نمونه‌های انتخابی از شیل نفتی قالی کوه را نشان می‌دهد. داده‌های انعکاس بیتومن، بیانگر قرار داشتن نمونه‌ها در ابتدای پنجره تولید نفت است.

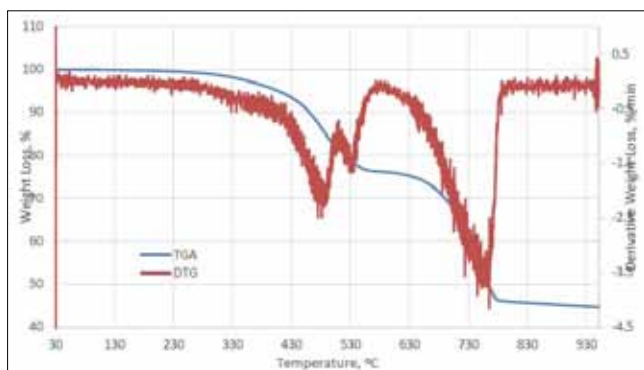
ج: آنالیز عنصری کروژن

میزان محتوی هیدروژن کروژن‌های انتخابی بین ۵,۲ تا ۷,۱ درصد وزنی است که به طور کلی بیانگر حضور کروژن غنی از هیدروژن در شیل نفتی است. میزان گوگرد کروژن بین ۹ تا ۱۲ درصد وزنی، به طور متوسط حدوداً ۱۰,۵ درصد وزنی است که بیانگر کروژن‌های غنی از سولفور است. موقعیت نمونه‌ها روی نمودار ون-کروولن بیانگر مراحل اولیه پنجره نفتی در ابتدای مسیر تکاملی کروژن نوع I و II است.

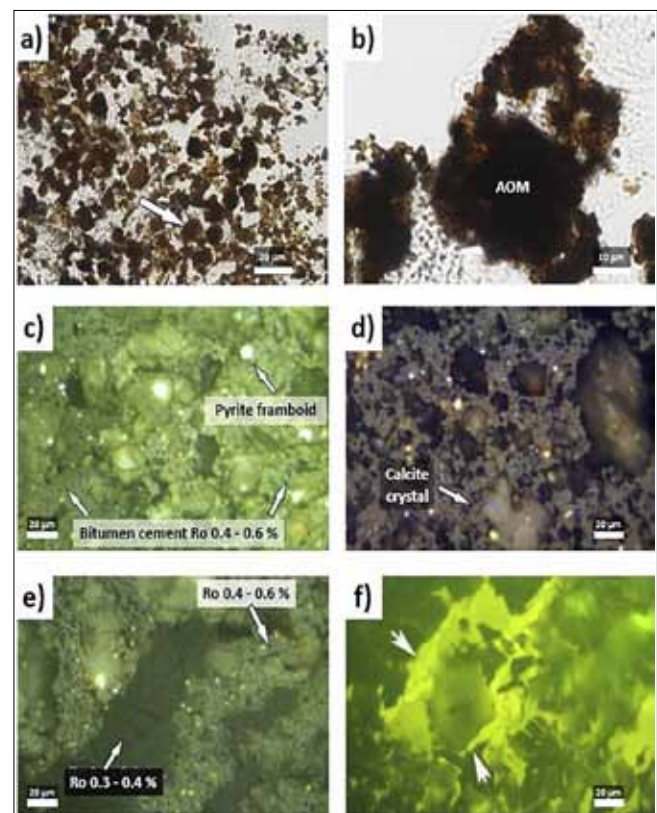
د: آنالیز حرارتی شیل‌های نفتی

به منظور مطالعه رفتار حرارتی و ارزیابی ظرفیت تولید و همچنین بررسی‌های کینتیک شیل‌های نفتی تجزیه و تحلیل‌های توازن حرارتی (TG/DTG) مورد استفاده قرار گرفت (انجل و دیگران، ژئوشیمی آلی: روش‌ها و کاربردها، ۲۰۱۳). خروجی آنالیزهای حرارتی دو محدوده واکنشی اصلی را نشان می‌دهد، اولین محدوده واکنش نتیجه تجزیه ماده آلی (کروژن و بیتومن سنگین) و دومین محدوده، به علت شکست کانی کلسیت است. میزان اتلاف جرم ماده آلی در محدوده واکنش ماده آلی (کروژن) بین ۲۰ تا ۲۵ درصد وزنی است که بیانگر قابلیت زیاد شیل‌های نفتی قالی کوه برای تولید نفت شیل است (شکل - ۸).

نتایج همچنین نشان می‌دهد که نرخ واکنش بر انرژی فعال‌سازی تجزیه ماده آلی تأثیر دارد. پارامترهای کینتیک کانی‌های معدنی، انرژی فعال‌سازی و لگاریتم فاکتور اکسپوننشیال بیانگر تشابه منحنی‌ها است و لذا آنالیز حرارتی (TG/DTG) به‌عنوان یک ابزار برای تفکیک گروه‌های شیل‌های نفتی گرو و سرگلو در ناحیه مورد مطالعه، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۸ | منحنی TGA/DTG یک نمونه شیل نفتی قالی‌کوه



شکل ۷ | تصاویر میکروسکوپی ماده آلی نمونه‌های شیل نفتی قالی‌کوه، (a, b) ماده آلی آمورف به رنگ نارنجی تا قهوه‌ای، نور عبوری، (c) غلبه سیمان بیتومن در متن سنگ با مقادیر متفاوت انعکاس و پیریتیت به همراه پیریت، نور انعکاسی (d) سیمان بیتومن همراه با بلورهای کلسیت، نور انعکاسی (e) فازهای مختلف تولید بیتومن با بلوغ‌های حرارتی متفاوت، نور انعکاسی (f) پرشدگی فضای خالی متن سنگ با بیتومن با خامیت فلورسانس زایی شدید، نور انعکاسی

ه: آنالیز برش فیشر و تولید نفت شیل

آنالیز برش فیشر، یک روش پیرولیز استاندارد آزمایشگاهی است که برای ارزیابی میزان نفت دهی شیل نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکنیک نوعی شبیه ساز مناسب برای درک رفتار شیل‌های نفتی طی پالایش است که اطلاعات پایه‌ای برای مقایسه شیل‌های نفتی را در اختیار قرار می‌دهد. نتایج برش فیشر برای پنج نمونه شیل نفتی که از مخلوط شدن چند نمونه به دست آمده است، را نشان می‌دهد. شیل‌های نفتی قالی کوه از نظر تجاری در گروه شیل‌های نفتی متوسط تا خوب قرار دارد. میانگین نفت‌دهی برای نمونه‌های انتخابی حدود ۸,۶ درصد است که با در نظر گرفتن میزان ویسکوزیته نفت شیل به دست آمده، این میزان معادل با حدود ۸۳ لیتر نفت شیل بر تن است. میزان API نفت شیل‌های به دست آمده، به طور میانگین حدود ۴۰ درجه است که از بسیاری از نفت شیل‌های شناخته شده دنیا بالاتر و با کیفیت‌تر است. میزان API در برخی نمونه‌ها تا ۴۷ درجه نیز ثبت شده است.

و: آنالیزهای ژئوشیمی مولکولی

در این مطالعه پنج نمونه مرجع (دو نمونه از سازند سرگلو و سه نمونه از سازند گرو) برای انجام مطالعات ژئوشیمی مولکولی انتخاب شد. نتایج ژئوشیمی بی‌تومن‌های استحصال شده به روش حلال، بیانگر غلبه مواد آلی با منشأ جلبکی/باکتریایی دریایی است. در تایید نتایج بلوغ حرارتی کروژن و سنگ، نتایج ژئوشیمی بی‌تومن نیز بیانگر بلوغ ابتدایی است. بر اساس الگوی عمومی و توزیع محصولات پیرولیز از داده‌های PY-GC و در تایید نتایج نفت شیل به دست آمده از فیشر، شیل‌های نفتی قالی کوه پتانسیل خوبی برای تولید نفت‌های سبک دارند. این نتایج نشان می‌دهند، در شرایطی که بلوغ حرارتی کامل گردد (عمق تدفین کافی)، این منابع قابلیت ایجاد نفت شیل و شیل‌گازی نیز دارند.

نتیجه‌گیری

۱- دو لایه شیل نفتی در منطقه (در سازندهای سرگلو و گرو) شناسایی شده است. تغییرات ضخامت شیل نفتی سازند سرگلو بین ۵-۵۱ متر و سازند گرو ۳-۱۷ متر اندازه‌گیری شده است. براساس محاسبات، میزان ذخایر درجای شیل‌های نفتی منطقه قالی کوه ۲۳۲۰ میلیون متر مکعب برآورد می‌گردد.

۲- داده‌های به دست آمده در این مطالعه بیانگر رخداد منابع عظیم شیل نفتی بالقوه در سازندهای سرگلو و گرو در ناحیه قالی کوه لرستان است. تمام داده‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که این شیل‌های نفتی کم و بیش مشابه بوده و خواص ژئوشیمیایی، پتروگرافی، رفتارحرارتی، کانی‌شناسی و شیمیایی مشابهی دارند. ۳- با توجه به مطالعات انجام شده، میانگین نفت‌دهی برای شیل‌های نفتی قالی کوه حدود ۸۳ لیتر بر تن است که در برخی مناطق تا ۹۶ لیتر بر تن نیز افزایش می‌یابد. همچنین گرانروی نفت استحصالی برابر با آب بوده و API آن به طور میانگین حدود ۴۰ درجه است (نفت شیل سبک تا فوق سبک).

۴- با توجه به آنالیزهای حرارتی، شیل‌های نفتی قالی کوه دو مرحله اتلاف جرم (محدوده واکنشی) را نشان می‌دهند. اولین مرحله مربوط به تجزیه کروژن/بی‌تومن سنگین و دومین مرحله مربوط به تجزیه کانی کلسیت است.

۵- با در نظر گرفتن میانگین نفت‌دهی برای نمونه‌های انتخابی و مساحت محدوده مورد مطالعه و تخمین حجم شیل نفتی، میزان نفت شیل درجا در ناحیه مورد مطالعه بیش از ۲,۴ میلیارد بشکه برآورد می‌گردد.

۶- نتایج ژئوشیمیایی اولیه و مطالعات زمین‌شناختی و میزان ذخیره برآورده شده، به وضوح بیانگر ضرورت تکمیل و تعمیق اکتشافات تخصصی با استفاده از فناوری‌های پیشرفته و نوین به منظور ارزیابی دقیق ظرفیت شیل‌های نفتی قالی کوه است. ■

منابع

[1]. Rasouli, A., Shekarifard, A., Farahani, F. J., Kök, M. V., Daryabandeh, M., & Rashidi, M. (2015). Occurrence of organic matter-rich deposits (Middle Jurassic to Lower Cretaceous) from Qalikh locality, Zagros Basin, South-West of Iran: A possible oil shale resource. *International Journal of Coal Geology*, 143, 3442-3452.

[2]. Shekarifard, A., Daryabandeh, M., Rashidi, M., Hajian, M., & Röth, J. (2019). Petroleum geochemical properties of the oil shales from the Early Cretaceous Garau Formation, Qalikh locality, Zagros Mountains, Iran. *International Journal of Coal Geology*, 206, 118-128.

[3]. Bordenave, Max L., ed. *Applied petroleum geochemistry*. Vol. 524. Paris: Technip, 1993.

[4]. Mahbobipour, Hojjat, Mohammad Reza Kamali, and Ali Solgi. "Organic geochemistry and petroleum potential of Early Cretaceous Garau Formation in central part of Lurestan zone, northwest of Zagros, Iran." *Marine and Petroleum Geology* 77 (2016): 9911009-9911020.

[5]. Kobraei, Mehdi, Ahmad Reza Rabbani, and Farid Taati. "Source rock characteristics of the Early Cretaceous Garau and Gadvan formations in the western Zagros Basin-southwest Iran." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 7.4 (2017): 10511070-10511080.

[6]. Engel, Michael H., and Stephen A. Macko, eds. *Organic geochemistry: principles and applications*. Vol. 11. Springer Science & Business Media, 2013.