



مقاله پژوهشی

مطالعه و مقایسه بیومارکری و ایزوتوپی سنگ مادر گرو در جنوب غرب ایران و مناطق هم‌جوار

احسان حسینی^{۱*}، محمدامین حاج اکبری^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴ آذر ۱۴، بازنگری: ۰۷ بهمن ۱۴۰۴، پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴)

چکیده

حوضه رسوبی زاگرس از مهم‌ترین نواحی نفت‌خیز جهان است و چندین سیستم نفتی فعال در آن موجب پدید آمدن میدان‌های نفت و گاز متعددی شده‌اند. یکی از این سیستم‌ها مربوط به سنگ مادر غنی از مواد آلی «گرو» با سن کرتاسه است که علاوه بر پهنه ایران، در نواحی هم‌جوار از جمله کویت و عراق نیز گستردگی قابل توجهی دارد. هدف این مطالعه، بررسی و مقایسه منطقه‌ای ویژگی‌های بیومارکری و ایزوتوپی سنگ مادر گرو در جنوب غرب ایران و بخش‌های شمال شرقی و جنوب شرقی عراق است. داده‌های مورد استفاده شامل شاخص‌های بیومارکری و نسبت‌های ایزوتوپی از ۳۳ میدان و رخنمون متعلق به حوضه‌های لرستان، فروافتادگی دزفول، دشت آبادان و نواحی جنوب و شمال عراق است. تحلیل‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که الگوهای بیومارکری و مقادیر ایزوتوپی با رسوب‌گذاری در محیط‌های دریایی کربناتی با شوری نرمال سازگار است. ترکیب و ویژگی‌های آلی نمونه‌ها حاکی از غالب بودن کروژن نوع II است که توان هیدروکربن‌زایی مطلوبی را نشان می‌دهد. ارزیابی پارامترهای بلوغ حرارتی نشان داد که سنگ مادر گرو در بخش شرقی حوضه لرستان در وضعیت نابالغ قرار دارد، در حالی که در سایر نواحی مورد مطالعه عمدتاً در اوج یا اواخر پنجره نفتی بوده و طی زمان مقدار قابل توجهی هیدروکربن تولید کرده است. نتایج این تحقیق بر نقش کلیدی سنگ مادر گرو در تولید هیدروکربن در پهنه‌های مورد بررسی دلالت دارد و اطلاعات حاصل می‌تواند در ارزیابی توان اکتشافی و طراحی راهبردهای توسعه‌ای در حوضه زاگرس و مناطق هم‌جوار مفید باشد.

کلمات کلیدی

سازند گرو، سازند سولی، سازند چیاگارا، بیومارکر، ایزوتوپ پایدار کربن

*عهده‌دار مکاتبات: ehosseiny@yazd.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2026.23980.1712

۱- مقدمه

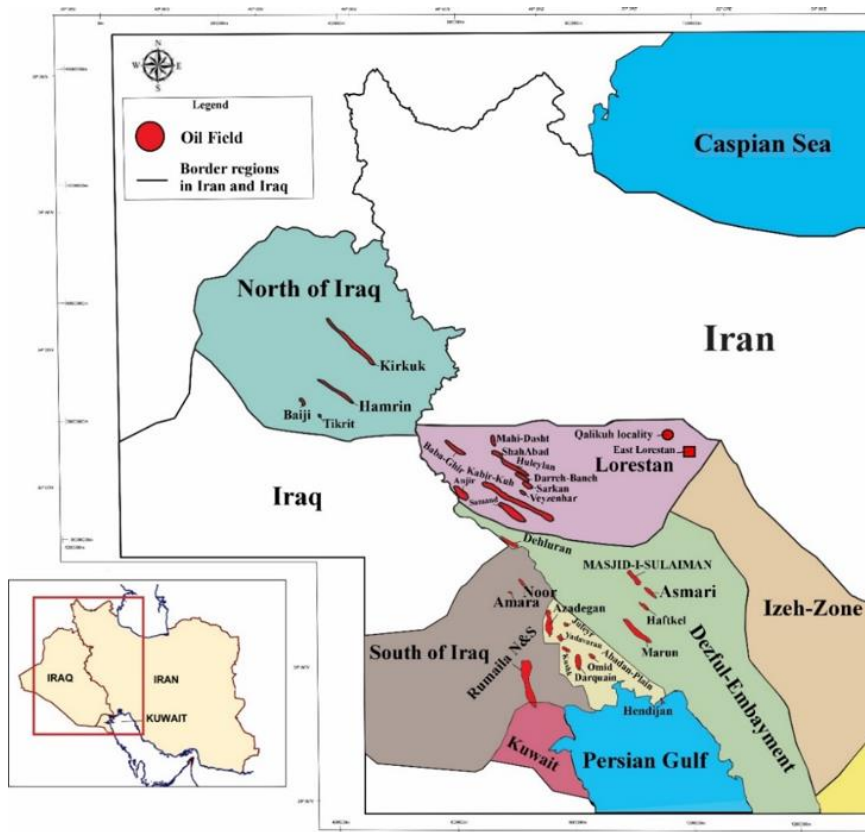
حوضه رسوبی زاگرس یکی از مهم‌ترین مناطق نفت‌خیز جهان است که بخش عمده آن در ایران قرار دارد و تا کشورهای هم‌جوار چون عراق، ادامه دارد [۱]. این حوضه رسوبی در ایران به چندین زیرحوضه شامل دشت آبادان، لرستان، زون ایزه، فروافتادگی دزفول و فارس تقسیم می‌شود (شکل ۱). سیستم‌های نفتی مختلفی در حوضه رسوبی زاگرس فعال هستند که باعث ایجاد میدان‌های متعدد نفت و گاز در منطقه شده‌اند [۲]. دوره کرتاسه در غرب و جنوب غرب ایران حاوی مهم‌ترین سنگ‌های مادر حوضه رسوبی زاگرس است. یکی از این سیستم‌های نفتی فعال، در طول کرتاسه پیشین توسعه یافته است جایی که شیل‌های غنی از مواد آلی سازند گرو به‌عنوان سنگ مادر عمل می‌کنند. سازند گرو به دلیل سنگ‌شناسی، ضخامت و گسترش آن در حوضه زاگرس، از اهمیت بالایی برخوردار است. توان هیدروکربن‌زایی بالا به‌ویژه در بخش پایینی آن، ویژگی‌های زمین‌شناسی مطلوب و داده‌های ژئوشیمیایی و بیومارکری امیدوارکننده، این سازند را به‌عنوان سنگ مادر میزان قابل توجهی نفت و گاز در منطقه تبدیل کرده است [۳]. این سازند عمدتاً در نواحی نفت‌خیز جنوب غرب ایران و برخی از نواحی عراق به‌عنوان یک سنگ مادر برای ذخایر نفتی شناخته می‌شود و با افزایش عمق در قسمت‌هایی از حوضه رسوبی وارد پنجره گازی نیز شده است.

همچنین سازند گرو در برخی نقاط می‌تواند به‌عنوان ذخایر هیدروکربنی نامتعارف هم مطرح باشد. رسوبات ناتراوا و غنی از مواد آلی این سازند بر مبنای میزان بلوغ آن، یکی از اشکال ذخایر نامتعارف شیل‌های نفتی یا گازی را شامل می‌شود. میزان مواد آلی در سازند گرو در بخش عمده‌ای از حوضه این سازند بالا بوده و در بخش‌های مختلف، متفاوت است [۴]. این سازند علاوه بر گستردگی در حوضه ایران، گستردگی فراوانی در مناطق هم‌جوار از جمله کویت و عراق دارد. بخش پایینی سازند گرو در جنوب کشور عراق با نام سولی ۱ و در شمال آن با نام چیاگارا ۲ معرفی می‌گردد [۴]. تاکنون پژوهش‌های گوناگونی در مورد ویژگی‌های ژئوشیمیایی این سازند در جنوب غرب ایران و مناطق هم‌جوار انجام گرفته و منتشر شده است [۳، ۵-۱۳]. این مطالعات بیشتر بر روی توان هیدروکربن‌زایی تأکید داشته و

صرفاً روی یک یا چند میدان انجام شده است. تاکنون یک مطالعه جامع مقایسه‌ای که ویژگی‌های بیومارکری و ایزوتوپی این سنگ مادر مهم را در مقیاس کل حوضه رسوبی و به‌صورت فرامرزی (ایران و عراق) بررسی کند، وجود نداشته است. هدف اصلی این پژوهش، پر کردن این خلأ دانشی از طریق تجمیع نظام‌مند و تحلیل یکپارچه و مقایسه داده‌های بیومارکری و ایزوتوپی سنگ مادر گرو در یک مقیاس منطقه‌ای شامل جنوب غرب ایران، شمال شرق و جنوب شرق عراق است. این تحقیق (۱) به ارائه الگوی مکانی بلوغ حرارتی (۲) چگونگی شرایط محیطی و سنگ‌شناسی سنگ مادر گرو در منطقه مورد مطالعه و (۳) ایجاد یک چارچوب ژئوشیمیایی هماهنگ به‌عنوان پایه‌ای برای ارزیابی‌های سیستم نفتی و فعالیت‌های اکتشافی آینده در حوضه رسوبی زاگرس می‌پردازد.

۲- زمین‌شناسی منطقه

ویژگی‌های زمین‌شناسی حوضه زاگرس به‌ویژه چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها و ساختارهای پیچیده، تأثیر زیادی بر ذخایر هیدروکربنی داشته است که این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که ذخایر نفت و گاز در این حوضه به شکلی ویژه و در مقیاس‌های بزرگ توزیع شوند. به‌طور کلی رسوب‌گذاری در کرتاسه به‌طور سرتاسری در حوضه رسوبی زاگرس در ایران و مناطق هم‌جوار صورت گرفته است [۱۴]. یکی از این توالی‌های رسوبی با سن کرتاسه پیشین، سازند گرو است (شکل ۲). برش الگوی آن در تنگ گرو واقع در کبیرکوه لرستان قرار دارد و نام خود را از این منطقه گرفته است [۱۵]. سازند گرو به‌طور پیوسته از آهک‌های رسی تیره و شیل‌های بیتومنی تشکیل شده است. ضخامت آهک‌ها از پایین به بالای سازند، افزایش می‌یابد و از ضخامت شیل‌ها و میزان تیرگی آن‌ها کاسته می‌شود. نهشته شدن رسوبات دانه‌ریز همراه با لامیناسیون و وجود فسیل رادیولارها نشان‌دهنده محیط رسوبی کم‌انرژی و شرایط احیایی برای سازند گرو در هنگام نهشته شدن است [۱۶]. بخش پایینی سازند گرو با میزان مناسبی از مواد آلی به‌عنوان یک سنگ مادر در جنوب غرب ایران، شمال غرب خلیج فارس و بخش‌هایی از عراق مطرح است. کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی این بخش در مناطق مختلف حوضه رسوبی زاگرس متفاوت است.



شکل ۱: نقشه حوضه‌های رسوبی و میادین نفتی مورد مطالعه در ایران و عراق

AGE	IRAN		IRAQ			
	East-Zagros	West-Zagros	South	Central	North-East	
Lower Cretaceous	Gadvan		Yamama	Yamama	Balambo	Sarmord
	Fahliyan	Garau	Sulaiy	Sulaiy/Makhul	Chia Gara	Chia Gara
Berriasian-Valanginian				Chia Gara		

Shale	Dolomite	Limestone	Anhydrite	Shaly Limestone	Anhydrite	Limestone	Dolomite	Limestone

شکل ۲: ستون چینه‌شناسی کرتاسه پیشین حوضه رسوبی زاگرس در ایران و عراق

بالای کربن آلی کل ۳ و کروژن نوع II را برای این سازند نشان می‌دهند [۱۸]. سازند چیاگارا با سن ژوراسیک پسین تا کرتاسه پیشین در شمال عراق، منطقه نفت‌خیز کردستان، گسترش دارد. سنگ‌شناسی آن شامل آهک و شیل‌های غنی از مواد آلی است [۱۹]. مقادیر بالای TOC در این سازند نشان‌دهنده پتانسیل هیدروکربن‌زایی خوب تا بسیار خوب این سازند است. این سازند در برخی مناطق، دارای کروژن نوع II و III و در برخی مناطق دیگر دارای کروژن نوع III و VI است [۲۰]. بلوغ حرارتی در این سازند در مناطق مختلف

بیشترین میزان کمیت و کیفیت مواد آلی مربوط به نواحی شرقی حوضه لرستان است، اگرچه هنوز بالغ نشده‌اند. با افزایش عمق به سمت غرب حوضه لرستان، فروافتادگی دزفول و دشت آبادن، بلوغ سنگ مادر گرو افزایش یافته و از میزان کمیت و کیفیت آن کاسته می‌شود [۴]. معادل سازند گرو در جنوب عراق و کویت با نام سولی و در شمال شرق عراق با نام چیاگارا مشخص می‌گردد [۱۷] (شکل ۲). سازند سولی با سنگ‌شناسی مارن و آهک‌رسی دارای سن ژوراسیک پسین تا کرتاسه پیشین است. مطالعات ژئوشیمیایی میزان

شدن سنگ مادر است [۳۲]. نسبت پرستان به فیتان اندازه‌گیری شده از بخش‌های مختلف حوضه گرو بین ۰/۵ و ۱/۲ متغیر است (بخش عمده نمونه‌ها مقدار کمتر از یک دارند) که نشان می‌دهد سنگ مادر گرو در یک شرایط احیایی نهشته شده است.

رابطه بین ایزوپروئیدهای پرستان و فیتان با نرمال آلکان‌های C17 و C18 می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از نوع کروژن، محیط رسوبی، بلوغ و تخریب میکروبی نفت‌ها و بیتومن‌ها ارائه دهد (شکل ۳-الف) [۳۳، ۳۴]. بازه تغییرات Pristane/n-C17 از ۰/۰۲ تا ۰/۷ و Phytane/n-C18 از ۰/۱۴ تا ۱/۱۷ قرار گرفته است. براین اساس تمام نمونه‌ها سنگ مادری را نشان می‌دهند که در یک محیط احیایی دریایی نهشته شده است و حاوی مواد آلی با تیپ کروژن II می‌باشد. مقادیر نسبی نرمال استران‌های C27، C28 و C29 شرایط محیط رسوبی سنگ مادر و نوع مواد آلی ورودی به محیط را بازتاب می‌دهد. استران C27 نشان‌دهنده محیط‌های دریایی است. استران C28 از مواد آلی محیط‌های دریاچه‌ای منشأ می‌گیرد. درحالی‌که استران C29 اشاره به مواد آلی خشکی دارد [۳۸]. شکل ۳-ب محیط‌های رسوبی مختلف را بر مبنای مقادیر نسبی استران‌ها نشان می‌دهد. تمام نمونه‌ها محیط دریایی را برای سنگ مادر گرو نشان می‌دهد. تعدادی از نمونه‌های شمال عراق به سمت محیط دریایی کم‌عمق‌تر تمایل دارند. همچنین این حقیقت به‌خوبی در نمودار نسبت استران C29/C27 در مقابل Pr/Ph نیز مشخص است (شکل ۳-ج) [۳۷].

از نسبت استران نرمال C28/C29 جهت تعیین سن سنگ مادر به‌ویژه در تمایز سن کرتاسه بالایی و ترشباری از پالئوزوئیک تا ژوراسیک استفاده می‌شود. مولدوان و همکاران (۱۹۸۵) پیشنهاد کردند که در طول زمان زمین‌شناسی، یک کاهش کلی در محتوای نسبی استران‌های C29 و افزایش استران‌های C28 در نفت‌های دریایی وجود دارد. این نسبت برای نفت‌های پالئوزوئیک و ژوراسیک کمتر از ۰/۷ و برای نفت‌های کرتاسه و جوان‌تر بیشتر از ۰/۷ است [۳۳]. این نسبت برای تمام نفت‌های مورد مطالعه به‌جز نفت‌های مربوط به شمال عراق بالاتر از ۰/۷ است. پایین بودن این نسبت در بیشتر نفت‌های شمال عراق احتمالاً به محیط کم‌عمق‌تر حوضه یا بخشی از چیاگارا با سن ژوراسیک اشاره دارد (شکل ۳-د).

شمال عراق متفاوت است به‌طوری‌که در برخی مناطق وارد پنجره نفتی شده و در مناطقی، وارد پنجره گازی شده است [۲۰].

۳- روش کار

در این مطالعه، برای بررسی محیط رسوبی، سنگ‌شناسی و بلوغ سنگ مادر گرو و مقایسه آن‌ها در حوضه رسوبی گرو از نسبت‌های بیومارکری و ایزوتوپی استفاده شده است که نسبت به داده‌های مطلق غلظت، وابستگی کمتری به شرایط دقیق آنالیز دارند و برای مطالعات مقایسه‌ای پایدارتر در نظر گرفته می‌شوند. بدین منظور نتایج حاصل از آنالیزهای کروماتوگرافی گازی، کروماتوگرافی گازی - طیف‌سنجی جرمی و ایزوتوپ کربن مربوط به بیتومن استخراج یافته از سنگ مادر گرو در پژوهش‌های انجام‌یافته در ایران و عراق جمع‌آوری شد و از داده‌های با کیفیت بالا جهت تحلیل استفاده گردید [۳، ۵، ۷، ۱۰-۱۳، ۱۹، ۲۱-۳۱]. منطقه مورد مطالعه شامل حوضه‌های لرستان، فروافتادگی دزفول، دشت آبادان، جنوب و شمال عراق می‌شود (شکل ۱). داده‌ها مربوط به بیومارکرها و ایزوتوپ ۳۳ میدان و رخنمون در منطقه مورد مطالعه است. میدان‌های مورد مطالعه در ایران شامل سه‌هند، انجیر، باباقیر، ویزنهار، دره بانه، سرکان، ماهی دشت، شمال شاه‌آباد، منطقه کبیرکوه، هلیلان، منطقه قالیکوه (حوضه لرستان)، آسماری، دهلران، مسجد سلیمان، هفتکل، مارون (فروافتادگی دزفول)، جفیر، آزادگان، دارخوین، کوشک، هندیجان، یادآوران، آزادگان و امید (دشت آبادان) است. در قسمت عراقی منطقه مورد مطالعه، میدان‌های کرکوک، بایجی، تکریت (شمال عراق)، رومیلا، آمارا و نور (جنوب عراق) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱).

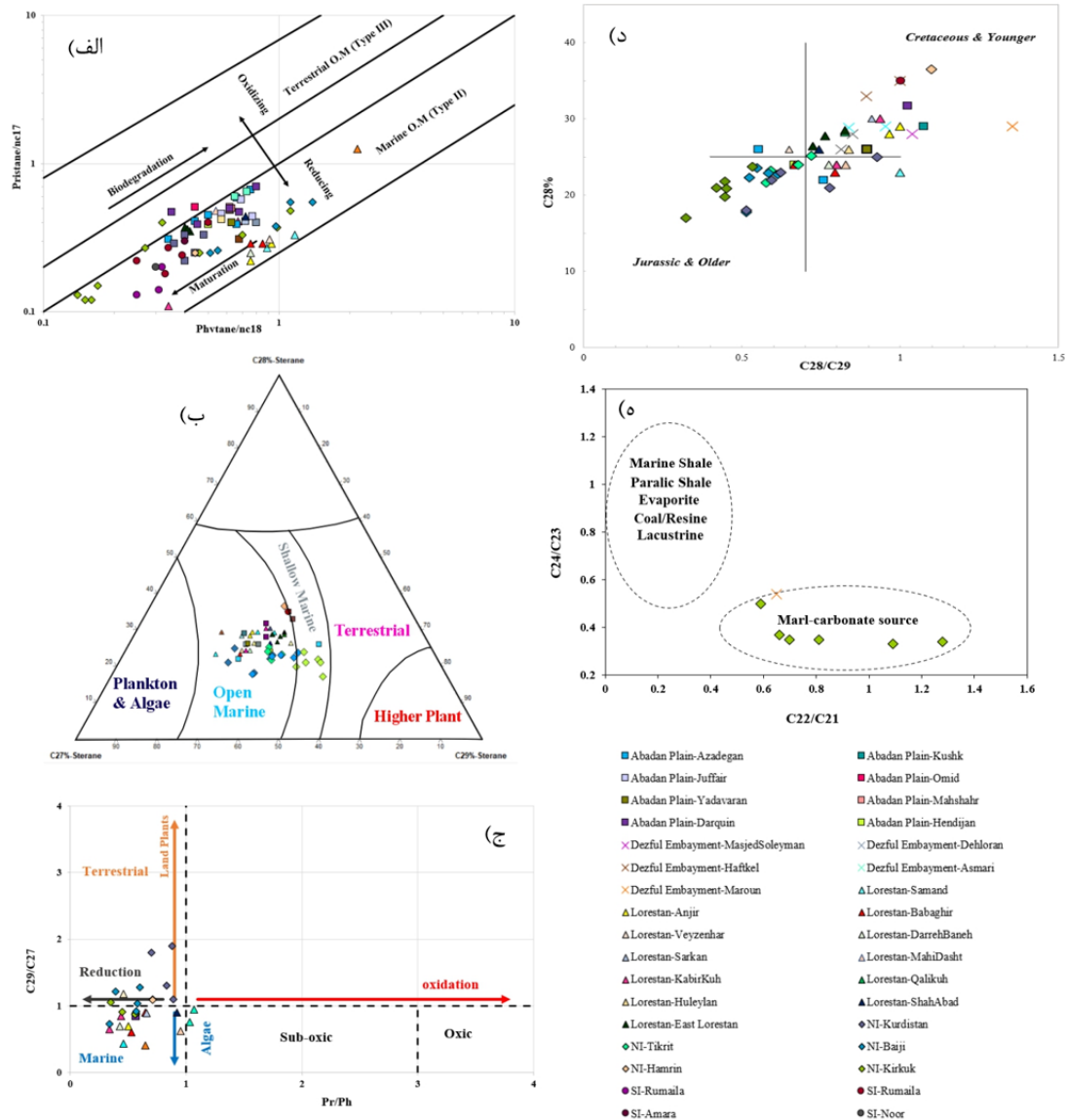
۳- نتایج و بحث

۳-۱- محیط رسوبی و سنگ‌شناسی

نسبت پرستان به فیتان (Pr/Ph) یکی از شاخص‌های مهم در ژئوشیمی آلی است که برای تفسیر شرایط رسوب‌گذاری و نوع ماده آلی ورودی استفاده می‌شود. این نسبت در بازه‌های مختلف، شرایط متفاوتی از محیط رسوبی را نشان می‌دهد. مقادیر کمتر از یک بیانگر محیط‌های احیایی و کم‌اکسیژن هستند. مقادیر بالاتر از یک این نسبت نشان‌دهنده محیط نیمه احیایی تا اکسیدی در هنگام نهشته

در کردستان عراق دارای این دو نسبت هستند. مقدار نسبت $C22/C21$ بین ۰/۵۹ و ۱/۲۸ و نسبت $C24/C23$ بین ۰/۳۳ و ۰/۵۴ قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده سنگ‌شناسی کربناته برای سازند گرو در حوضه‌های مورد مطالعه است (شکل ۳-۵).

برخی از نسبت‌های تریان‌های سه حلقه‌ای اطلاعاتی مفید در مورد سنگ‌شناسی سنگ‌های مادر ارائه می‌دهند. نسبت بالای $C22/C21$ (>0.5) و نسبت پایین $C24/C23$ ، سنگ مادر کربناته را از شیلی متمایز می‌کند [۳۹]. نمونه‌های میدان مارون در فروافتادگی دزفول و میدان نفتی کرکوک



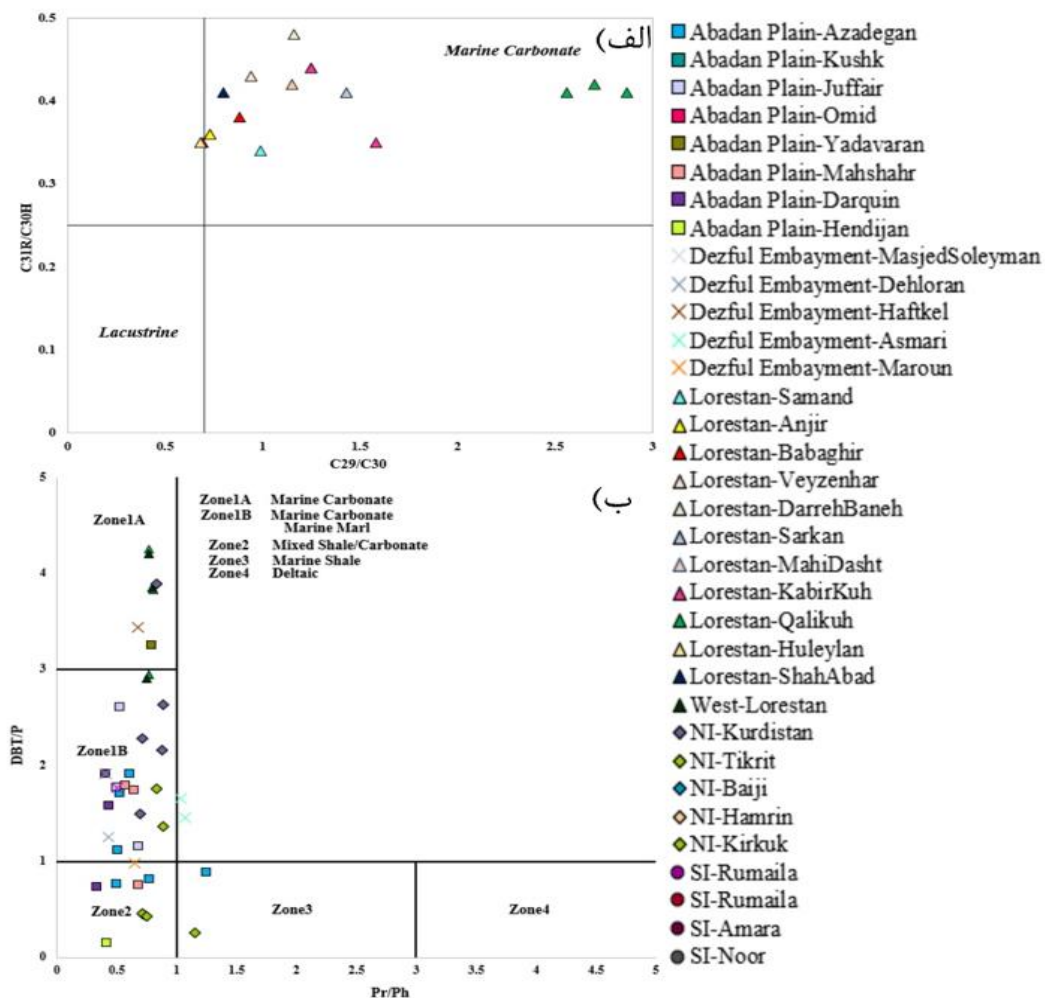
شکل ۳: الف) نسبت‌های ایزوپروپونئید خطی به آلکان‌های نرمال [۳۵]. ب) نمودار دیاگرام مثلثی ایزواستران‌های $C27$ ، $C28$ و $C29$ که نشان‌دهنده محیط‌های رسوبی سنگ‌های مادر است [۳۴]. ج) نمودار نسبت استران‌های منظم $C29/C27$ در مقابل نسبت Pr/Ph [۱۱] که باتوجه به شکل تمامی نمونه‌ها در منطقه سنگ مادر احیایی که شامل مواد آلی جلبکی است، قرار دارند. د) نسبت $C28/C29$ به $C28$ که به جهت تعیین سن سنگ مادر استفاده می‌شود [۳۳]. ه) نمودار تریان‌های سه حلقه‌ای $C24/C23$ در مقابل $C22/C21$ که محیط رسوبی مرتبط با سنگ‌شناسی سنگ منشأ را نشان می‌دهد [۳۶].

$C31R/C30H$ بالاتر از ۰/۲۵ دارند. نسبت‌های کمتر از ۰/۲۵ اشاره به محیط‌های دریاچه‌ای دارد [۲۹]. بازه این نسبت برای نمونه‌ها از ۰/۲۲ تا ۰/۴۸ متغیر است و نشان‌دهنده محیط دریایی برای سنگ مادر گرو است (شکل ۴-الف).

از دیگر نسبت‌های بیومارکری که می‌توان محیط رسوبی و سنگ‌شناسی سنگ مادر را حدس زد، نسبت‌های هوپان $C31R/C30H$ و $C29/C30$ است. نفت و بیتومن حاصل از سنگ مادر شیل و کربناته دریایی عموماً نسبت

کربناته را نشان می‌دهد درحالی که مقادیر کم بیانگر سنگ مادر شیلی است [۴۱]. باتوجه به شکل ۴-ب اکثر نمونه‌های مورد مطالعه چه در قسمت ایرانی و چه در قسمت عراقی در Zone-1 قرار دارند که سنگ‌شناسی کربناته را برای سنگ مادر گرو در منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کند. همچنین نسبت پایین گاماسران (Gam/C30) نمونه‌ها شوری نرمال محیط رسوبی را در طول رسوب‌گذاری سازند گرو نشان می‌دهد [۴۲].

[۳۷]. مقادیر بالای C29/C30 (> 0.7) به سنگ‌شناسی کربناته سنگ مادر نسبت داده می‌شود [40]. این نسبت برای نمونه‌ها در تمام حوضه‌های مورد مطالعه شامل دشت آبادان، فروافتادگی دزفول، لرستان و شمال عراق بزرگ‌تر از ۰.۷ است که سنگ‌شناسی کربناته برای سازند گرو اثبات می‌نماید. نسبت آروماتیکی دی‌بنزوتیوفن به فنانترن (DBT/Phen) اغلب برای تمایز سنگ مادر شیلی از کربناته استفاده می‌شود. مقادیر بالای این نسبت (> 1) سنگ مادر



شکل ۴: الف) نمودار نسبت C31R/C30h به C29/C30 نشان‌دهنده‌ی محیط رسوب‌گذاری (دریایی، خشکی، باتلاقی یا دلتایی) است [۳۷]. ب) نسبت DBT/P در مقابل Pr/Ph که نمایانگر محیط رسوب‌گذاری سنگ مادر مورد مطالعه است.

آلی با منشأ خشکی است، درحالی که CV کوچک‌تر از ۰.۴۷ نشانگر ماده آلی دریایی است. مقدار CV برای نمونه‌های مورد مطالعه بین ۰.۸۳- و ۰.۰۶- متغیر است که مواد آلی دریایی را در سنگ مادر گرو نشان می‌دهد (جدول ۱).

ترکیب ایزوتوپ‌های کربن پایدار بیتومن و کروژن سنگ‌مادر به محیط رسوب‌گذاری و نوع مواد آلی ورودی آن وابسته است. متغیر متعارف $^{13}C_{Sat} = -2.53$ (CV) برای تعیین محیط رسوب‌گذاری تعریف می‌گردد [۴۳]. مقادیر بزرگ‌تر از ۰.۴۷ نشانگر ماده

جدول ۱: نسبت‌های بیومارکری برخی از نمونه‌های مورد مطالعه در حوضه‌های مختلف سازند گرو

حوضه	میدان	Pr/Ph	Pr/n-C17	Ph/n-C18	CPI	C29 Sterane S/S+R	C29 Sterane $\beta\beta/\alpha\alpha+\beta\beta$	%C27
دشت آبادان	دارخوین	۰/۴۷	۰/۵	۰/۵۸	۱/۰۶	۰/۴۵	۰/۴۶	۳۸/۱۱
دشت آبادان	آزادگان	۰/۶۹	۰/۴۷	۰/۵۶	۱/۰۶	۰/۴۶	۰/۵۵	۳۸
دشت آبادان	جفیر	۰/۶	۰/۴۹	۰/۶۶	۱/۰۲	۰/۵۳	۰/۵۵	۴۵
فروافتادگی دزفول	مسجد سلیمان	۰/۵	۰/۴۹	۰/۶۲	۱/۰۶	۰/۵۰	۰/۵۱	۴۵
فروافتادگی دزفول	مارون	۰/۶۵	۱/۲۶	۲/۱۵	۱/۰۵	۰/۴۲	۰/۵۸	۴۹/۵۰
فروافتادگی دزفول	آسماری	۱/۰۵	۰/۶۲	۰/۶۹	۱	۰/۴۸	۰/۵۵	۳۸/۶۰
شرق لرستان	انجیر	۰/۵	۰/۱۷	۰/۸۱	۱/۰۳	۰/۴۵	۰/۵۵	۴۲/۵۰
شرق لرستان	کییرکوه	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۶۰	۰/۹۳	۰/۴۲	۰/۵۳	۴۳/۳۰
شرق لرستان	ویزنهار	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۹۱	۰/۹۷	۰/۴۵	۰/۵۸	۳۴
شرق لرستان	هولیلان	۰/۸۷	۰/۴۲	۰/۵۷	۰/۸۹	۰/۵۲	۰/۵۵	۴۳
غرب لرستان	قالیکوه	۰/۷۸	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۳۴	۰/۵۱	...	۳۶/۰۵
غرب لرستان	لرستان	۰/۷۷	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۵۲	...	۳۶/۷۵
شمال عراق	کرکوک	۰/۸۴	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۹۹	۰/۴۶	۰/۵۳	۳۳/۱۵
جنوب عراق	رومیلا	۰/۸۲	۰/۲۲	۰/۳۳	۰/۹۳	...	...	۳۰/۱۰
حوضه	میدان	%C28	%C29	Ts/Tm	G/C30	C29/C30H	C31R/C30H	DBT/Phen
دشت آبادان	دارخوین	۲۹/۸۷	۳۲	۱/۱۶	۰/۱۷	۱/۰۲	...	۱/۴۰
دشت آبادان	آزادگان	۲۴	۳۸	۱/۳۴	۰/۱۲	۱/۰۹	...	۱/۱۹
دشت آبادان	جفیر	۲۶	۲۹	۰/۷۸	۰/۰۷	۱/۳۰	...	۱/۸۴
فروافتادگی دزفول	مسجد سلیمان	۲۸	۲۷	۱/۳۰	...	۰/۷۸	...	۱/۷۷
فروافتادگی دزفول	مارون	۲۹/۰۴	۲۱/۴۶	۰/۶۱	...	۱/۱۴	۰/۲۲	۰/۹۸
فروافتادگی دزفول	آسماری	۲۸/۹۵	۳۲/۴۵	۰/۵۴	۰/۰۶	۱/۱۱	...	۱/۵۶
شرق لرستان	انجیر	۲۸/۵۰	۲۹	۱/۲۶	...	۰/۷۳	۰/۳۶	...
شرق لرستان	کییرکوه	۲۶	۳۰/۶۶	۰/۷۵	...	۱/۳۶	۰/۴۱	...
شرق لرستان	ویزنهار	۲۶	۴۰	۱/۴۰	...	۰/۹۴	۰/۴۳	...
شرق لرستان	هولیلان	۲۶	۳۱	۰/۷۸	...	۰/۶۸	۰/۳۵	...
غرب لرستان	قالیکوه	۲۷/۵۰	۳۵/۸۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۲/۷۱	۰/۴۱	۳/۶۷
غرب لرستان	لرستان	۲۷/۵۰	۳۵/۷۷	۰/۰۲	...	...	۰/۴۰	۳/۶۵
شمال عراق	کرکوک	۲۰/۶۹	۴۷/۷۵	...	۰/۱۱	...	...	۰/۷۸
جنوب عراق	رومیلا	۳۳/۵۰	۳۴/۹۰	...	...	...	...	...

۳-۲- بلوغ

گرو در منطقه مورد مطالعه در بازه ۰/۲ تا ۱/۳ قرار می‌گیرد. اکثر نمونه‌ها حدود یک هستند که بالغ بودن سنگ مادر را بیان می‌کند. مقادیر پایین مربوط به نمونه‌های قالیکوه و منطقه شرقی حوضه لرستان است. این نتیجه‌گیری با نتایج پارامترهای انعکاس ویتروینایت نیز تطابق دارد [۴].

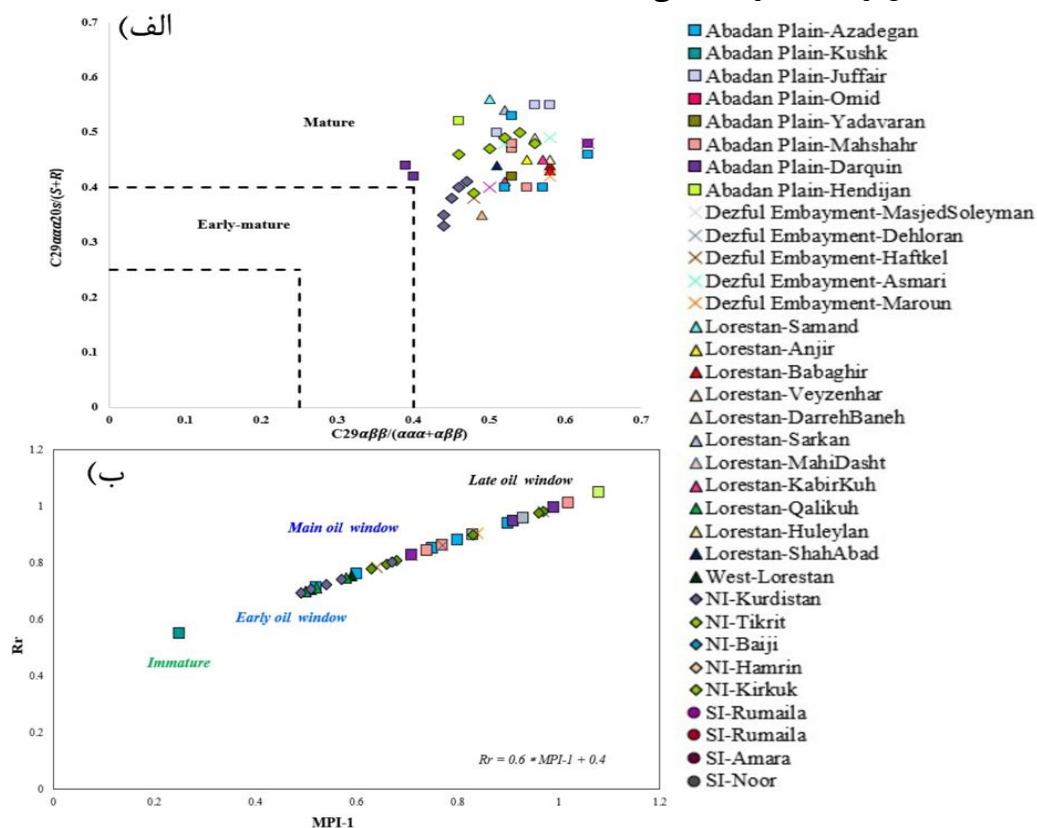
ایزومراسیون استران C29 در 20S/(20S+20R) و $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ معمولاً برای ارزیابی بلوغ نفت و سنگ مادر

از میزان اندیس ترجیحی کربن فرد به زوج (CPI) می‌توان برای بررسی بلوغ سنگ‌های مادر استفاده کرد که مقادیر CPI در محدوده یک بیانگر بلوغ حرارتی مناسب و قرارگیری در پنجره نفتی است [۳۷]. میزان اندیس ترجیحی کربن فرد به زوج اندازه‌گیری شده در نمونه‌های سنگ مادر

کربناته مقدار بالاتری از خود نشان می‌دهد [۲۹]. در این مطالعه، نسبت Ts/Tm تطابق قابل قبولی با دیگر شاخص‌های بلوغ از خود نشان می‌دهد. کمترین میزان این نسبت مربوط به نمونه‌های منطقه قالیکوه و شرق حوضه رسوبی لرستان است (جدول ۱).

یکی دیگر از شاخص‌های بلوغ حرارتی، شاخص متیل فنانترن (MPI-1) است با افزایش بلوغ حرارتی این شاخص افزایش می‌یابد. رادکه و همکاران (۱۹۸۲) میزان تقریبی انعکاس ویتیرینایت را با استفاده از این شاخص تخمین زدند که تطابق خوبی با مقادیر واقعی انعکاس ویتیرینایت داشت [۳۷]. استفاده از این دو پارامتر نشان می‌دهد که نمونه‌های شرق حوضه لرستان کمترین بلوغ را دارند و نمونه‌های مربوط به دشت آبادان، فروافتادگی دزفول در اوج و اواخر پنجره نفتی قرار دارند (شکل ۵-ب).

استفاده می‌شوند. این نسبت‌ها در طول فرآیند بلوغ به ترتیب به مقدار تعادلی حدود ۰/۵۵ و ۰/۷ می‌رسند [۴۴]. نسبت استران $20S/(20S+20R)$ بزرگ‌تر از ۰/۴ مربوط به بازتاب ویتیرینایت ۰/۸ درصد است [۴۴]. این نسبت‌ها به ترتیب در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۵۵ و ۰/۴ تا ۰/۶۳ قرار دارند که نشان‌دهنده بالغ بودن سنگ مادر گرو و تولید نفت در حوضه است. نمونه‌های منطقه غرب حوضه لرستان، دشت آبادان، فروافتادگی دزفول و شمال عراق بلوغ بالایی را از خود نشان می‌دهند (شکل ۵-الف). این نتیجه‌گیری با نتایج انعکاس ویتیرینایت نیز همخوانی دارد [۴]. نسبت Ts/Tm نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های بلوغ حرارتی شناخته می‌شود که با بالا رفتن بلوغ حرارتی مواد آلی، افزایش می‌یابد. البته در به‌کارگیری آن باید با احتیاط رفتار کرد چرا که این نسبت به محتوای کانی‌های رسی نیز حساس است به‌طوری که در بیتومن و نفت‌های حاصل از سنگ مادرهای شیلی نسبت به



شکل ۵: الف) نمودار نسبت $C29aaa20S/(20S+20R)$ به $C29a\beta\beta/(aaa+a\beta\beta)$ به جهت تخمین میزان بلوغ نمونه‌های مورد مطالعه [۳۶]. ب) نمودار نسبت $MPI-1/Rr$ نشان‌دهنده بلوغ حرارتی در نمونه‌های مورد مطالعه است.

فرورفتگی دزفول، لرستان، شمال و جنوب عراق پرداخته و تصویری هماهنگ و قانع‌کننده‌ای از تاریخچه زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی این سنگ مادر مهم ارائه داده است. مقادیر نسبت پریستان به فیتان، الگوی توزیع نرمال استران‌های

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی و مقایسه محیط رسوبی، سنگ‌شناسی و بلوغ سنگ مادر گرو توسط نسبت‌های بیومارکری و ایزوتوپی در حوضه‌های رسوبی دشت آبادان،

Early Cretaceous Garau Formation, Qalikh locality, Zagros Mountains, Iran. *International Journal of Coal Geology*, 206, 1–18.

[6] Kobraei, M., Rabbani, A., & Taati, F. (2019). Upper Jurassic–Lower Cretaceous source-rock evaluation and oil–source rock correlation in the Abadan plain, Southwest Iran. *Geochemistry International*, 57, 790–804.

[7] Mahbobipour, H., Kamali, M. R., & Solgi, A. (2016). 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, 991–1009.

[8] Asadi Mehmandousti, E., Adabi, M. H., Bowden, S. A., & Alizadeh, B. (2015). Geochemical investigation, oil–oil and oil–source rock correlation in the Dezful Embayment, Marun Oilfield, Zagros, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 68*, 648–663.

[9] Zeinalzadeh, A., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., & Sajjadian, V. A. (2018). Source rock potential of the Early Cretaceous intervals in the Darquain field, Abadan Plain, Zagros Basin, SW Iran. *Geosciences Journal*, 22, 569–580.

[10] Zohrevand, M., Shekarifard, A., & Tavakoli, V. (2020). Petroleum geochemistry of the Albian–Turonian Sarvak reservoir in one of the oil fields of southwest Iran. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 10(3), 39.

[11] Hemmati, M., Ahmadi, Y., Vaferi, B., Alibak, A. H., & Wood, D. A. (2025). Surveying organic matter, thermal maturity level, and paleo-environmental conditions by considering biomarker and stable carbon isotopic analysis. *Journal of Earth Science*, 36(2), 428–440.

[12] Ghorbani, B., Tavakoli, V., Rahimpour–Bonab, H., & Vahidmotlagh, N. (2025). Oil–oil and oil–source correlations in the Abadan Plain, SW Iran: Updated insights into Middle Jurassic–Lower Cretaceous petroleum systems through biomarker analysis and chemometrics. *Journal of African Earth Sciences*, 223, 105525.

[13] Jalil, S., & Ahmadreza, R. (2018). Characteristics of the first occurrence of Jurassic petroleum in the Zagros Basin, Iran. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(6), 2280–2296.

[14] Khadivi, S. (2010). Tectonic evolution and growth of the Zagros Mountain Belt (Fars, Iran): Constraints from magnetostratigraphy, sedimentology and low-temperature thermochronometry [Master's thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI]. HAL Open Science.

[15] Motiei, H. (1993). Stratigraphy of Zagros. In A. Hushmandzadeh (Ed.), *Treatise on the Geology of Iran* (No. 1). Geological Survey of Iran, Tehran, 536 p. (In Persian)

C27، C28 و C29 و مقادیر ایزوتوپ کربن برش‌های اشباع و آروماتیک، دلالت بر نهشته شدن سازند گرو در یک محیط دریایی احیایی دارند. مجموعه‌ای از شاخص‌های بیومارکری مانند نسبت تریان‌های سه حلقه‌ای C22/C21 و C24/C23، نسبت هوپان C29/C30 و نسبت آروماتیکی DBT/Phen، به‌صورت هماهنگ سنگ‌شناسی کربناته را برای این سنگ مادر در سرتاسر حوضه گرو نشان می‌دهد. مقادیر شاخص CPI در حدود یک، رسیدن نسبت‌های ایزومریزاسیون استران C29 به مقادیر تعادلی خود و روند شاخص‌های Ts/Tm و MPI-1، قرارگیری بخش‌های وسیعی از این سازند در پنجره نفتی را تأیید می‌کند. مناطق دشت آبادان، فروافتادگی دزفول و غرب لرستان از بلوغ بالاتری برخوردارند، درحالی‌که نمونه‌های شرق حوضه لرستان (مانند منطقه قالیکوه) از بلوغ کمتری برخوردار بوده و احتمالاً هنوز به طور کامل وارد پنجره نفتی نشده است. این پژوهش به طور جامع اثبات می‌کند که سازند گرو به‌عنوان یک سنگ مادر کربناته دریایی، پتانسیل بالایی برای تولید نفت در حوضه‌های مورد مطالعه دارد.

مراجع

- [1] Hosseiny, E., & Barati Boldaji, S. (2020). Evaluation of hydrocarbon generation potential of Sargelu source rock in southwestern Iran and the northwestern Persian Gulf. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(23), 79–89. (In Persian)
- [2] Hosseiny, E., Beirami, A., & Amini Mostafaabadi, A. (2024). Geochemical assessment of the Pabdeh Formation from the perspective of conventional and unconventional hydrocarbon resources, southwest of Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 40(1), 45–58.
- [3] Kobraei, M., Rabbani, A. R., & Taati, F. (2017). 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), 1051–1070.
- [4] Hosseiny, E., & Mohseni, A. (2023). Garau Formation as an unconventional hydrocarbon resource in southwestern Iran: A geochemical investigation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(7), 1535–1549.
- [5] Shekarifard, A., Daryabandeh, M., Rashidi, M., Hajian, M., & Röth, J. (2019). Petroleum geochemical properties of the oil shales from the

- [26] El Diasty, W. S., El Beialy, S., Mahdi, A., & Peters, K. (2016). Geochemical characterization of source rocks and oils from northern Iraq: Insights from biomarker and stable carbon isotope investigations. *Marine and Petroleum Geology*, 77, 1140–1162.
- [27] Rastegar Kalateh, O., & Ghavami Riyabi, S. R. (2015). Arzyabi-ye shimiayi-ye sazand-e Gur (Kretaseh Pishin) be onvan-e sang-e madar dar nahieh-ye Lorestan [Geochemical evaluation of the Garau Formation (Lower Cretaceous) as a source rock in the Lorestan region]. In 2nd International Congress on Applied Geology (Conference paper). (In Persian)
- [28] Mahboobi Pour, H., Kamali, M. R., & Salgi, A. (2016). Arzyabi-ye geoshimiayi-ye sazandeh-ye Gur dar taghdis-haye Anjir va Kabirkuh dar jonub-e gharb-e nahieh-ye Lorestan [Geochemical evaluation of the Garau Formation in the Anjir and Kabirkuh anticlines in the southwest of the Lorestan region]. (In Persian).
- [29] Nae'mati, M., Ghavami Riyabi, S. R., & Tavangarranjbar, M. (2014). Arzyabi-ye potential-e shale gas dar do sazand-e Gur va Sargalu bar اساس-e etela'at-e geoshimi-ye ali [Evaluation of shale gas potential in the Garau and Sargalu formations based on organic geochemistry data]. Ministry of Science, Research, and Technology – Shahrood University of Technology, Faculty of Mining Engineering. (In Persian).
- [30] Abeed, Q., Alkhafaji, A., & Littke, R. (2011). Source rock potential of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous succession in the southern Mesopotamian Basin, southern Iraq. *Journal of Petroleum Geology*, 34(2), 117–134.
- [31] Abdula, R. A. (2020). Crude oil classification based on age and provenance from the Southern Iraq: A review. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 70, 87–102.
- [32] Ten Haven, H., De Leeuw, J., Rullkötter, J., & Damsté, J. S. (1987). Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator. *Nature*, 330(6149), 641–643.
- [33] Moldowan, J. M., Seifert, W. K., & Gallegos, E. J. (1985). Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *AAPG Bulletin*, 69(8), 1255–1268.
- [34] Peters, K. E, and J. M. Moldowan. 1993. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [35] Hill, R. J., Jarvie, D. M., Zumberge, J., Henry, M., & Pollastro, R. M. (2007). Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort
- [16] Ammari, A., & Alipour, M. (2024). Organic geochemistry and petrography of the early Cretaceous Garau Formation in the Kabir-Kuh Anticline, Ilam. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 40*(3), 29–46
- [17] Aqravi, A. A., & Badics, B. (2015). Geochemical characterisation, volumetric assessment and shale-oil/gas potential of the Middle Jurassic–Lower Cretaceous source rocks of NE Arabian Plate. *GeoArabia*, 20*(3), 99–140.
- [18] Al-Ameri, T. K., & Al-Musawi, F. A. A. (2011). Hydrocarbon generation potential of the uppermost Jurassic—basal Cretaceous Sula'iy formation, South Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(1), 53–58.
- [19] Mohialdeen, I. M., Hakimi, M. H., & Al-Beyati, F. M. (2013). Geochemical and petrographic characterization of Late Jurassic–Early Cretaceous Chia Gara Formation in Northern Iraq: Palaeoenvironment and oil-generation potential. *Marine and Petroleum Geology*, 43, 166–177.
- [20] Edilbi, A. N., & Sherwani, G. H. (2019). Petrography and source rock potential of Chia Gara formation (late jurassic–early cretaceous) in Northern Iraq and Kurdistan Region. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9(3), 1801–1818.
- [21] Asadi Mehmandoosti, E., Adabi, M. H., & Alizadeh, M. (2010). Dadeh-haye biomarkeri nemuneh-haye naft-e kham va bitumen estekhraj shodeh az sang-haye mansha' vaqe' dar meydan-e nafti-ye Marun [Biomarker data of crude oil and bitumen samples extracted from source rocks in the Marun oil field]. *Pajooresh-haye Chineh Negari va Rasub Shenasi*, 26(1), 69–88. (In Persian)
- [22] Kobraei, M., Rabbani, A., & Taati, F. (2019). Upper Jurassic-lower cretaceous source-rock evaluation and oil—source rock correlation in the Abadan plain, Southwest Iran. *Geochemistry International*, 57(7), 790–804.
- [23] Mehmandosti, E. A., Adabi, M. H., Bowden, S. A., & Alizadeh, B. (2015). Geochemical investigation, oil–oil and oil–source rock correlation in the Dezful Embayment, Marun Oilfield, Zagros, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 68, 648–663.
- [24] Zeinalzadeh, A., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., & Sajjadian, V. A. (2018). Source rock potential of the early cretaceous intervals in the Darquain field, Abadan Plain, Zagros Basin, SW Iran. *Geosciences Journal*, 22(4), 569–580.
- [25] Mohialdeen, I. M., Hakimi, M. H., & Al-Beyati, F. M. (2015). Biomarker characteristics of certain crude oils and the oil–source rock correlation for the Kurdistan oilfields, Northern Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(1), 507–523.

of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists, pp. 127–133.

[41] Hughes, W. B., Holba, A. G., & Dzou, L. I. (1995). The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(17), 3581–3598.

[42] Liu, B., Bechtel, A., Sachsenhofer, R. F., Gross, D., Gratzner, R., & Chen, X. (2017). Depositional environment of oil shale within the second member of Permian Lucaogou Formation in the Santanghu Basin, Northwest China. *International Journal of Coal Geology*, 175, 10–25.

[43] Sofer, Z. (1984). Stable carbon isotope compositions of crude oils: Application to source depositional environments and petroleum alteration. *AAPG Bulletin*, 68(1), 31–49.

[44] Seifert, W., & Moldowan, J. (1986). Use of biological markers in petroleum exploration. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 24, 261–290.

Worth Basin. *AAPG Bulletin*, 91(4), 445–473.

[36] Hosseiny, E. (2024). Geochemical variability of oils from Jurassic petroleum system in the east of Persian Gulf. *Petroleum Science and Technology*, 42(1), 102–121.

[37] Peters, K. E., K. E. Peters, C. C. Walters, and J. Moldowan. 2005. *The biomarker guide*, vol. 1. New York: Cambridge University Press

[38] Hosseiny, E., Rabbani, A. R., & Moallemi, S. A. (2017). Oil families and migration paths by biological markers in the eastern Iranian sector of Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 150, 54–68.

[39] Zumberge, J. E., & Ramos, S. (1996). Classification of crude oils based on genetic origin using multivariate modeling techniques. In *Proceedings, 13th Australian Geological Convention*, Canberra: Australian Geological Survey Organisation, Abstracts (Vol. 492).

[40] Zumberge, J. E. 1984. Source rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley, Colombia, Palacas. In: Palacas, J.G. (Ed.), *Geochemistry and Source Rock Potential*

¹ Sulaiy

² Chia Gara

³ TOC

⁴ Canonical Variable