



حجم نفت و گاز تشکیل شده از سنگ مادر چگونه محاسبه می‌شود

مترجم: محمد کسایی نجفی
پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

در این مقاله روش محاسبه جرم هیدروکربورهای تولیدشده از سنگ‌های مادر سیستم‌های نفتی شرح داده شده است که طی آن محاسبه‌ها در چهار مرحله متوالی انجام می‌شوند:

- ۱- تشخیص سنگ مادر و تعیین مرزهای آن
- ۲- محاسبه جرم ماده آلی در سنگ مادر (با استفاده از معادله ۱)
- ۳- برآورد جرم هیدروکربور تشکیل شده از سنگ مادر به ازای هر گرم ماده آلی (با استفاده از معادله ۲)
- ۴- محاسبه جمع کل هیدروکربورهای تشکیل شده با ضرب این داده‌ها در یکدیگر (با استفاده از معادله ۳)

این محاسبه‌ها بر استفاده از ایندکس هیدروژن (Hydrogen Index-HI) استوار است. ایندکس هیدروژن پارامتری است که از آنالیز نمونه‌ها توسط دستگاه "Rock Eval" به دست می‌آید و نشان دهنده توان هیدروکربورزایی موجود در سنگ مادر مورد مطالعه است. تفاوت بین ایندکس هیدروژن قبل از تشکیل هرگونه هیدروکربور از سنگ مادر با ایندکس هیدروژن زمان حاضر، نشان دهنده مقدار کاهش در توان هیدروکربورزایی است که در اینجا معادل هیدروکربور تشکیل شده در نظر گرفته شده است.

مقدمه

در این بخش رهنمودهای لازم برای محاسبه مقدار هیدروکربور تشکیل شده از یک سیستم نفتی ارائه شده است. انجام چنین محاسبه‌هایی به سه دلیل لازم است. اول، از محاسبات حجمی و دیگر پارامترهای همراه آن داده‌هایی به دست می‌آیند که می‌توان به کمک آنها سیستم نفتی را تعریف و توصیف کرد. دوم، داده‌های حاصل از برآورد مقدار هیدروکربور تشکیل شده زمینه را برای تجزیه و تحلیل‌های رانش، مهاجرت و انباشته شدن هیدروکربور فراهم می‌کنند. سوم، وجود یک سری از داده‌های منسجم و منطقی از محاسبات حجمی مربوط به انواع مختلف سیستم‌های نفتی باعث به روز شدن مسایل سیستم‌های نفتی به طور عام می‌گردد.

در بعضی حالات پارامترهای لازم برای انجام محاسبه مقدار هیدروکربور تشکیل شده با دقت کافی تهیه نمی‌شوند و موجب بروز خطاهای بزرگی در محاسبه‌ها می‌گردند. خطاهای بزرگ ارزش

محاسبه حجم را نفی نمی‌کنند. به عنوان مثال دانستن این که آیا مقدار هیدروکربور تشکیل شده در حد یک میلیارد، دو میلیارد یا ۱۰ میلیارد بشکه است با ارزش است و بایستی توجه داشت که اطلاعاتی که براساس مشاهدات و بررسی‌های کمی برای این موضوع به دست می‌آیند معمولاً قطعی نیستند. گاهی ناکارآمدی (inefficiency) سیستم‌های رانش، مهاجرت و انباشته شدن هیدروکربور بسیار زیاد است. در نتیجه مقدار نفت تشکیل شده در مقایسه با مقدار نفت درجا ممکن است خیلی زیاد باشد. محاسبات "McDowell, 1975" نشان داد که از تعدادی معدود از حوضه‌های رسوبی ۱۰٪ نفت قابل استحصال است و از برخی حوضه‌ها، یک الی دو درصد نفت تشکیل شده در سنگ مادر استحصال می‌شود. یک دهه بعد Moshier and Waples, 1975 به نتیجه کلی مشابهی رسیدند. برنامه‌های حفاری گسترده در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ ظاهراً بر روی این دیدگاه که نسبت مقدار نفت تشکیل شده از سنگ مادر به مقدار نفت ذخیره شده بسیار بالاتر است، تغییری ایجاد نکرد.

محاسبه مقدار هیدروکربور تولیدشده

مساله مورد نظر در این بخش، محاسبه جرم هیدروکربور تشکیل شده از سنگ مادر در یک سیستم نفتی است. یک روش محاسبه بایستی به طور گسترده برای انواع مختلف سیستم‌های نفتی قابل استفاده باشد. همچنین یک روش محاسبه باید بین آسان‌سازی محاسبه‌ها و دقت آنها موازنه برقرار کند و برای زمین‌شناسان دارای زمینه‌های متفاوت قابل درک باشد. داده‌های لازم برای محاسبه به طور لزوم بایستی قابل دسترسی باشند. نتایج حاصل از کاربرد روش محاسبه‌ای که شرح داده می‌شود به شدت تحت تاثیر این محدودیت‌ها قرار می‌گیرند.

بررسی کلی

روش‌های حجمی برای محاسبه هیدروکربور تشکیل شده از نظر شیوه و جزئیات با یکدیگر متفاوت هستند. (برای مثال به Demasion and Murriss, 1984, White and Gehman, 1979, Waples, 1985, Mackenzie and Quigley, 1988 و مراجعه شود.)

تبدیل کروژن به هیدروکربور اساس روش ارایه شده در این مبحث است. مفهوم مشابهی توسط Jones, 1981, and Claypool, Merewether 1980 Schmoker and Hester, 1983 استفاده شده است. گرچه آنها از داده های پیرولیز (به جای برآورد کردن مقدار هیدروکربور تشکیل شده) برای برآورد کردن مقدار هیدروکربور رانده شده استفاده کردند.

باید امکان بالقوه بروز خطای آزمایشگاهی هنگام تعیین ایندکس هیدروژن را یادآوری کرد. ایندکس هیدروژن به کربن آلی کل (TOC) بستگی دارد و در سنگ های مادری که از نظر حرارتی بالغ باشند در حقیقت نشان دهنده مقدار کروژن و هیدروکربور موجود در سنگ است. بنابراین اختلاف در میزان توان راندن "Expulsion Efficiency" موجب اختلاف در ایندکس هیدروژن می گردد که به طور مستقیم به ویژگی های ژئوشیمیایی کروژن مربوط نمی شود.

روش انجام محاسبات

در شکل ۱، نمودار مراحل انجام محاسبات جرم هیدروکربور تولید شده از سیستم های نفتی نشان داده شده است. در مرحله سنگ مادر سیستم نفتی مشخص می شود و در صورت لزوم به واحد دارای خواص فیزیکی و ژئوشیمی همگن تقسیم می شود. سپس مقدار هیدروکربور تشکیل شده از هر واحد سنگی محاسبه شده و نتایج همه واحدها با هم جمع می شوند تا جمع کل هیدروکربور تشکیل شده از کل سیستم نفتی به دست آید.

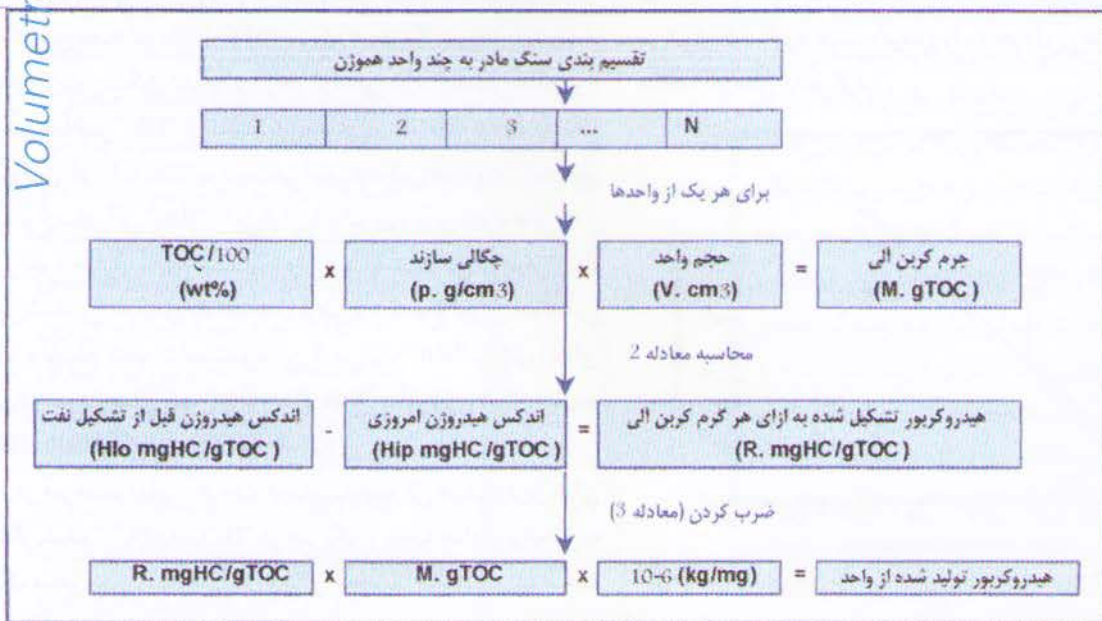
اما بسیاری از دست اندرکاران در روش های خود یک یا چند عنصر از مراحل چهارگانه ذیل را که عناوین کلی روش محاسبه ارایه شده را تشکیل می دهند به کار برده اند:

- ۱- مشخص کردن سنگ مادر و تعیین مرزهای آن
 - ۲- محاسبه جرم کربن آلی موجود در سنگ مادر
 - ۳- برآورد جرم هیدروکربور تشکیل شده بر حسب واحد جرم کربن آلی
 - ۴- محاسبه جمع کل جرم هیدروکربور تشکیل شده با ضرب کردن اطلاعات فوق در یکدیگر
- در مراحل ۱ و ۲ مقدار ماده آلی موجود در زمان حاضر تعیین می شود که به آسانی قابل درک است. مرحله چهارم با عدد و رقم سروکار دارد. اما مرحله سوم از نظر مفهومی پیچیده است و نقطه ای است که در آن روش های مختلف از یکدیگر فاصله می گیرند. جرم هیدروکربور تولید شده به ازای هر واحد جرم کربن آلی به نوع کروژن، سینتیک واکنش و سرگذشت زمان/حرارتی که کروژن در معرض آن قرار گرفته بستگی دارد. به جای محاسبه این عوامل در اینجا از یک مقیاس تجربی برای تبدیل کروژن به هیدروکربور بر اساس ایندکس هیدروژن استفاده شده است.

ایندکس هیدروژن (Hydrogen Index-HI) که بر حسب میلی گرم هیدروکربور در هر گرم کربن آلی (Total Organic Carbon-TOC) نشان داده می شود از پیرولیز کردن نمونه سنگ (مادر) طی یک برنامه حرارتی توسط دستگاه "Rock Eval" به دست می آید. ایندکس هیدروژن نشان دهنده مقدار هیدروکربور تشکیل شده به ازای تجزیه حرارتی کروژن موجود در یک گرم کربن آلی کل (TOC) است.

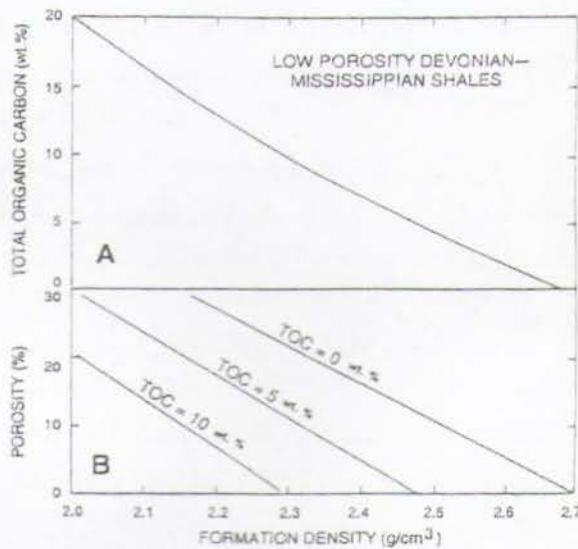
اختلاف بین ایندکس هیدروژن اولیه (قبل از هرگونه تشکیل هیدروکربور) با ایندکس هیدروژن امروزی را می توان معادل هیدروکربور تشکیل شده از سنگ مادر بر حسب واحد جرم کربن آلی قرارداد.

استفاده از ایندکس هیدروژن برای برآورد کمیت



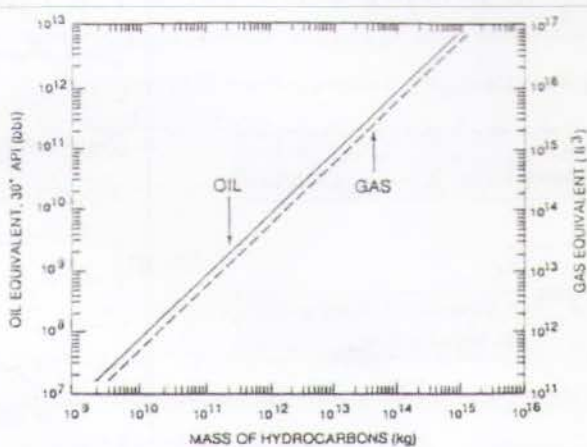
شکل ۱ - نمودار روش انجام محاسبات برآورد جرم هیدروکربور تشکیل شده در سنگ مادر سیستم نفتی

قبلی به دست می آیند.



شکل ۲- چگالی سازندهای شیلی: A- ارتباط بین کربن آلی کل و چگالی سازندهای شیلی دارای تخلخل کم از دوین تا می سی سی بین که از داده های تجربی به دست آمده اند (اقتباس از شکل ۵ در Hester et al., 1990) B- ارتباط بین تخلخل و سازندهای شیلی (که از داده های محاسبه شده به دست آمده اند) برای سه مقدار مختلف "TOC".

معادله ۳) $HCG(kgHC/gTOC) = R(mgHC/gTOC) \times M(gTOC) \times 10^{-6}(kg/mg)$ یادآور می شود که با ضرب کردن معادله در 10^{-6} ، واحد جرم از میلی گرم به کیلوگرم تبدیل می شود. واحدهای حجمی که برای هیدروکربور به کار می روند (میلیارد بشکه "bbl" برای نفت و فوت مکعب ft^3 برای گاز) ممکن است نسبت به واحدهای ذکر شده در معادله ۳ آشناتر باشند. با استفاده از نمودار ارائه شده در شکل ۳ می توان کیلوگرم هیدروکربور را به معادل آن بشکه نفت و یا فوت مکعب گاز متان تبدیل کرد.



شکل ۳- نمودار برای تبدیل جرم هیدروکربور به معادل آن بشکه نفت و فوت مکعب برای گاز.

هدف از انجام مرحله دوم، تعیین جرم کربن آلی "M(gTOC)" برای هر واحد سنگی است. داده های لازم برای محاسبه مقدار کربن آلی "TOC(wt%)"، میانگین چگالی سازند "P(g/cm³)" و حجم "V(cm³)" برای هر واحد را شامل می شوند. از ضرب کردن این پارامترها در یکدیگر جرم کربن آلی هر یک از واحدهای سنگی به دست می آید:

$$M(gTOC) = [TOC(wt\%) / 100 \times P(g/cm^3) \times V(cm^3)] \quad (1) \text{ معادله ۱}$$

به منظور تبدیل TOC از درصد به اعشار ۱۰۰ تقسیم شده است. معمولاً TOC بر اساس نتایج آنالیز پیرولیز سنگ مادر (توسط دستگاه Rock Eval) تعیین می شود ولی می توان آن را از لاگ چاه ها در افق های شیلی غنی از مواد آلی و کم تخلخل نیز تعیین کرد.

چگالی یک سازند به ماتریکس مینرالی و تخلخل و همچنین به مقدار "TOC" موجود در آن بستگی دارد (زیرا چگالی "TOC" از ماتریکس سنگ کمتر است). در شکل ۲ تغییرات چگالی شیل به صورت تابعی از "TOC" و تخلخل نشان داده شده است. این نمودار برای تعیین چگالی سنگ های مادر شیلی بدون نیاز به دسترسی به لاگ های چگالی سودمند است. حجم واحدهای سنگ مادر بر اساس ضخامت و گسترش آنها محاسبه می شود.

هدف از انجام مرحله سوم، تعیین جرم هیدروکربور تولید شده "R(mgHC/gTOC)" به ازای هر واحد کربن آلی هر بخش سنگ مادر است. داده های لازم برای محاسبه "R" عبارتند از: ایندکس هیدروژن زمان حاضر "HIp(mgHC/gTOC)" و ایندکس هیدروژن اولیه "HIo(mgHC/gTOC)" سنگ مادر قبل از تشکیل هرگونه هیدروکربور. اختلاف بین این دو ایندکس مقدار تقریبی هیدروکربور تشکیل شده را به ازای هر گرم "TOC" نشان می دهد.

$$R(mgHC/gTOC) = HIo(mgHC/gTOC) - HIp(mgHC/gTOC) \quad (2) \text{ معادله ۲}$$

در این معادله مقدار کاهش توان هیدروکربورزایی با مقدار هیدروکربور تشکیل شده برابر در نظر گرفته می شود. ایندکس هیدروژن عصر حاضر "HIp" از آنالیز نمونه های سنگ مادر توسط دستگاه پیرولیز "Rock Eval" به دست می آیند. ایندکس هیدروژن زمان قبل از بلوغ ماده آلی "HIo" را می توان با آنالیز پیرولیزی نمونه هایی که از نظر بلوغ حرارتی نابالغ هستند، تعیین کرد. به شرط این که بتوان از نظر زمین شناسی به صورت مستدل فرض کرد که نوع کروژن نمونه های بالغ و نابالغ متفاوت نیست و یا این که می توان "HIo" را از روند های کلی در نمودارهای شبه "Van Krevelen" برآورد کرد (برای مثال به Tissot and Welte, 1984 مراجعه شود).

در مرحله نهایی، هدف محاسبه جمع کل هیدروکربن های تشکیل شده "HCG(kgHC)" در هر یک از واحدهای زیرمجموعه سنگ مادر است. داده های لازم برای محاسبه "HCG" در دو مرحله

یک مثال محاسبه‌ای

ارایه یک مثال ممکن است در روشن شدن دستورالعمل‌های محاسبه جرم هیدروکربور تولید شده از سنگ مادر فعال سیستم‌های نفتی کمک کند. این مثال با مراحل ذکر شده در نمودار ۱ مطابقت دارد. در صورت لزوم، سنگ مادر یک سیستم نفتی مورد مطالعه را می‌توان به چند واحد تقریباً هموزن از نظر خواص فیزیکی و ژئوشیمیایی تقسیم کرد. سپس مقدار هیدروکربور تشکیل شده از هر واحد را به طور جداگانه محاسبه کرد.

فرض کنیم که میانگین ضخامت یک واحد از سنگ مادر ۲ متر (2×10^3 سانتی متر) طول آن ۳۰ کیلومتر (3×10^6 سانتی متر) و عرض آن ۲۰ کیلومتر (2×10^6 سانتی متر) باشد. حجم این واحد $1/2 \times 10^{16}$ خواهد بود. مقدار "TOC" به طور میانگین ۶٪ و چگالی سازند را (با فرض این که یک شیل با فشردگی بالا است) $2/4 \text{ g/cm}^3$ (بر اساس شکل ۲) در نظر می‌گیریم. با ضرب کردن این مقادیر در یکدیگر (مانند معادله ۱) جرم کربن آلی کل "M" در این واحد از سنگ مادر برابر $1/73 \times 10^{15} \text{ g TOC}$ به دست خواهد آمد.

فرض کنیم که ایندکس هیدروژن کروژن موجود در سنگ مادر در زمان حاضر "HIp" برابر 150 mg HC/g TOC ، ایندکس هیدروژن اولیه "Hlo" قبل از آغاز تشکیل هیدروکربور 380 mg HC/g TOC برآورد شده باشد. با تفریق کردن این دو ایندکس (مانند معادله ۲) جرم هیدروکربور تشکیل شده "R" به ازای هر گرم کربن آلی (TOC) معادل 3×10^9 میلیارد بشکه نفت و یا 2×10^{12} فوت مکعب گاز خواهد بود.

بحث

به چند دلیل مقدار هیدروکربوری که با استفاده از روش شرح داده شده، برآورد می‌شود حداقل مقداری است که در سنگ مادر تشکیل می‌شود: نخست این که در این روش مقدار هیدروکربوری که ممکن است در شیل‌های غیربالغ (از نظر حرارتی) وجود داشته باشد در نظر گرفته نمی‌شود. دوم، همانطور که Ehrenberg, 1989 و Pate, 1989 عنوان کرده‌اند، در شرایط کاهش تخلخل در طول زمان دفن شدگی مقدار کاهش ایندکس هیدروژن که از تفریق دو نسبت مربوطه (معادله ۲) به دست می‌آید، فقط در حالتی درست است که مخرج‌های دو نسبت (یعنی TOC آنها) مساوی باشند.

به دلیل این که در اثر رانش مقداری از هیدروکربور تشکیل شده از سنگ مادر خارج می‌شود، این مخرج (TOC) برای ثبت‌های "HIp" و "Hlo" متفاوت خواهد بود و بنابراین، معادله ۲ مقدار نفت تشکیل شده را کم‌تر برآورد می‌کند.

سوم این که مقدار جرم کربن آلی اولیه موجود در سنگ مادر "Mo(gTOC)" به طور تقریبی براساس مقدار امروزی آن "MP" برآورد می‌شود. جرم کربن آلی کل اولیه "Mo" از "Mp" بیشتر است، زیرا مقداری از هیدروکربور از سنگ مادر رانده می‌شود و آن مقداری که در سنگ مادر باقی می‌ماند هیدروکربورهای سبک‌تر از "C5-C10" در آزمایشگاه در حین انجام آنالیز برای اندازه‌گیری "TOC" از بین می‌روند (بسیار ساده) (Larter, 1988 مراجعه شود).

به علت این که "Mo" از "Mp" بیشتر است، مقدار هیدروکربوری که با استفاده از معادله ۲ برآورد می‌شود حداقل است. بر این اساس معادله صحیح‌تر ممکن است معادله زیر باشد:

$$\text{HCG} = (\text{Hlo} \times \text{Mo}) - (\text{Hp} \times \text{Mp}) \times 10^6 \quad (\text{معادله ۴})$$

اشکال معادله ۴ این است که به پارامترهای لازم برای انجام محاسبه یک پارامتر ژئوشیمیایی دیگر یعنی "Mo" اضافه می‌شود که موجب افزایش پیچیدگی محاسبه می‌گردد. از طرفی تعیین "Mo" مشکل است. برخلاف ایندکس هیدروژن اولیه "Hlo" که به نوع کروژن ارتباط دارد و به طور ذاتی قابل پیش‌بینی است، جرم کربن آلی کل اولیه "Mo" یکی از خواص سازند است و نمی‌توان آن را بدون خطا پیش‌بینی کرد. با استفاده از داده‌هایی که توسط "Sluijk and Nederlof, 1984" ارائه شده به جای استفاده از معادله ۴ می‌توان حداکثر خطای حاصل از استفاده معادله ۳ را محاسبه کرد. با فرض حداکثر بلوغ حرارتی ($\text{HIp} = 0$) و رانده شدن کامل هیدروکربور از سنگ مادر "Mp/Mo" تقریباً مساوی "Gr/Co" خواهد بود (Cr مقدار کربن پس‌مانده بعد از انجام پیرولیز و Co کل کربن آلی قبل از انجام پیرولیز است). براساس داده‌های "Sluijk and Nederlof, 1984" برای کروژن نوع III نسبت Cr/Co برابر با ۰/۷۵ و جرم هیدروکربوری که با استفاده از معادله ۳ به دست می‌آید معادل سه