تعیین مخازن هیدروکربنی با استفاده از روش دماسنجی

* دکتر حمید رضا کامیار

افزایش روز افزون احتیاج به انرژی باعث شده که در کنار انرژی های فسیلی، آلترناتیوهای دیگری جستجو شوند که در این راستا انرژی های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی و زمین گرمایی) جایگاه‌های خود را حداقل درکشورهای پیشرفته پیدا کرده‌اند.

در رابطه با انرژی های فسیلی (نفت و گاز) و اکتشاف آنها که حدود ۱۰۰ سال از قدمت آن می گذرد، در کنار مسایل زمین شناسی، روش های مختلف ژئوفیزیک دسترسی به آنها به کار برده می‌شود. از جمله روش های ژئوفیزیکی برای اکتشاف نفت و گاز می توان لرزه‌نگاری، مغناطیس سنجی و گرانی سنجی را نام برد. که روش لرزه‌نگاری مطمئن تر قدیمی تر، گران قیمت تر و جا افتاده ترین روش برای این هدف است.

پرسشی که در اینجا مطرح شده، این است که کدام یک از روش‌های ژئوفیزیکی زمان کمتری را در بر می گیرد و در نتیجه از لحاظ قیمت مناسب تر است. در این راستا پیشرفت‌های زیادی صورت گرفته است.

در سال ۱۹۹۹ میلادی روش حرارت سنجی برای اکتشاف مخازن هیدروکربنی برای اولین بار ارائه شد. استفاده از این روش (حرارت سنجی) با توجه به لازم بودن زمان کوتاه و در نتیجه مناسب بودن قیمت آن، می تواند به عنوان روش پایه‌ای جهت اکتشاف مخازن هیدورکربنی و یا حتی روش تکمیلی به حساب آید. در این مقاله طرز استفاده از این روش به طور کلی و با جزئیات کامل شرح داده می شود.

مخزن هیدروکربن با یک آنومالی دمای منفی در بالای سطح و آنومالی دمای مثبت در زیر سطح آن همراه است. با استفاده از روش دماسنجی می توان محل مخازن هیدروکربنی و همچنین شکل و مرزهای آنها را تعیین کرد. تشریح و توضیح نقشه های آنومالی دما برای تعیین هیدروکربن زیرزمین به صورت کمی مورد استفاده قرار می گیرند و این بدون استفاده از داده‌های قبلی اکتشافی امکان پذیر است. به علاوه در اینجا روش های دمایی(Temperature) و لرزه ای(Seismic) در راستای اکتشاف مخازن هیدروکربنی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مشخصات شاخص این روش عبارتند از: ۱. آسان، ۲. سریع، ۳. مطمئن، ۴. ارزان، ۵. احتیاج نداشتن به هیچ گونه مجوزی، ۶. به دست آوردن جواب ها در زمان کوتاه و از همه مهم تر ۷. مفید بودن برای محیط زیست.

جریان گرما از درون زمین به طرف بالا و سطح حرکت می کند، یعنی حرکت آن از مناطقی با دمای زیاد به مناطق خنک تر (قانون دوم ترمودینامیک). هیدروکربن ها به صورت یک سد عمل می کنند و از انتقال گرما جلوگیری می کنند. به همین جهت انباشت های هیدروکربنی با آنومالی دمای منفی در روی سطح و آنومالی دمای مثبت در زیر سطح آنها همراه هستند.

این روش تفسیر نقشه های آنومالی دمای منفی به منظور پی جویی، اکتشاف مخازن هیدروکربنی(Hydrocarbon) زیرسطحی به صورت کمی و بدون نیاز به اطلاعات و داده های اکتشافی دیگر را میسر می سازد. مخصوصاً می توان این روش را در مخازن از نوع چینه ای همراه با تعیین شکل و مرزهای مخزن به کار برد.

همچنین می توان زون های زیرین چاه های حفر شده یا محل های شکسته شده (گسل خورده) را بدون تاثیر منفی نمک بین لایه‌ای ردیابی و پی جویی کرد.

این روش را می توان به صورت نسبتاًموثر در اکتشاف مخازن هیدروکربنی به کار برد، زیرا شرایط سیالات هیدروکربنی به صورت یک مانع دمایی عمل می کنند. مخازن هیدروکربنی به تنهایی یک سد ناقصی برای انتقال گرما هستند. آب دارای انتقال گرمای بالایی است، ولی مخلوطی از آب و نفت یک سد کاملی را در مقابل انتقال گرما تشکیل می دهد. از این رو، یک توازن دینامیکی در شرایط و وضعیت موجود ما بین آنومالی های دمایی منفی(Negative) در روی سطح و مثبت(Positive) در زیرسطح این مخازن برقرار خواهد شد.

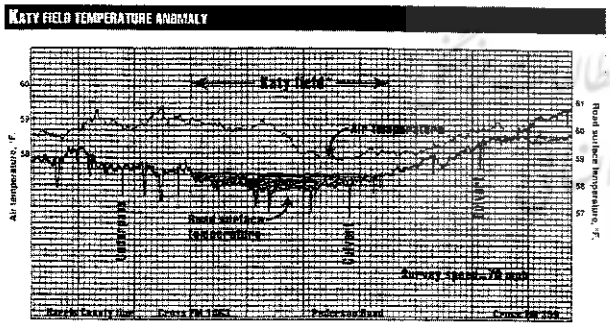
به طور کلی آنومالی دمای منفی اثر شدیدتر و قوی‌تری بر روی انباشت های هیدروکربنی در نقطه برداشت (Measuring) اعمال می کند.

روش های اندازه گیری دما

الف -اندازه گیری دما با استفاده از ماهواره

یک روش اندازه گیری دما به وسیله ماهواره ها(Remote Sensing) صورت می گیرد. دمای اندازه گرفته شده با استفاده از اشعه مادون قرمز (Infrared) نسبی است. برای دست یافتن به مقدار واقعی باید روی آن تصحیحات متعددی مانند: تعیین مقدار رطوبت هوای نزدیک به سطح زمین و وقایع روزانه و سالانه(Daily Event Year Event) انجام گیرند. در شکل ۱. می توان اختلاف دما در روی سطح زمین و حتی هوای نزدیک به سطح را در جایی که مخزن هیدروکربنی در زیرزمین موجود یا غیر موجود است را مشاهده کرد.

شکل ۱.اندازه گیری دما از ماهواره در منطقه(Katy Field)

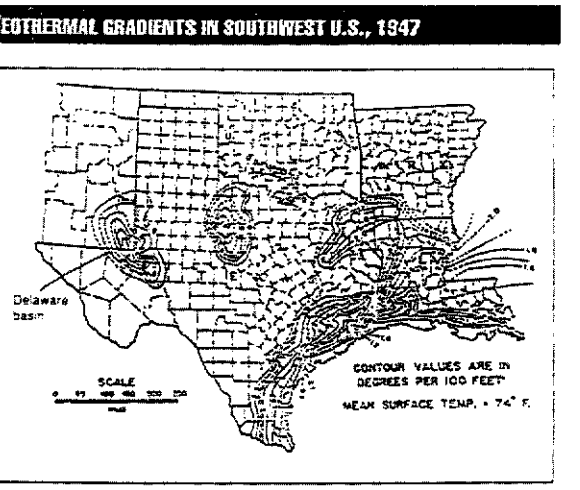


ب -اندازه گیری دما در ارتفاع کم از سطح زمین با استفاده از پرواز

در این روش که به صورت پرواز با هواپیما یا هلی‌کوپتر صورت می گیرد، دمای سطح زمین به صورت مطلق در ارتفاع ft ۵ ۴/۵ از سطح زمین برداشت می شود. این مقادیر هم تابع تصحیحات ذکر شده هستند ولی نه به شدت فوق.

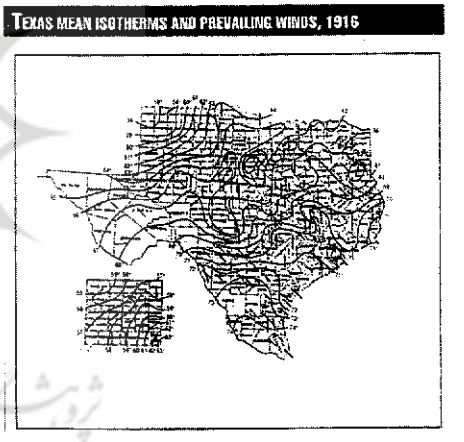
در شکل ۲. میانگین دمای سالیانه و ثبت آن با پرواز در ارتفاع۴/۵ft از سطح زمین در سال ۱۹۴۱ توسط وزارت کشاورزی امریکااندازه گیری و نقشه مربوطه تهیه شد. در این نقشه میادین نفتی عظیمی مانند: Fortworth،Midland Basin،Delaware and Anadarko که پس از سال ۱۹۴۱ به وسیله حفاری های عمیق کشف شدند را مشخص شده است.

شکل ۲. تعیین دمای هوا در ارتفاع ۴/۵ft از سطح زمین



نقشه ایزوترم‌های دمایی و خطوط جریان بادها و جهت آنها به وسیله وزارت کشاورزی در ایالت تگزاس به سال ۱۹۱۶ در شکل ۳. ترسیم شده‌اند. این نقشه میادین عظیم نفتی در شرق تگزاس را که حدوداً ۱۴ سال بعد به سال ۱۹۳۰ در Fortbend and Eastland کشف و مورد بهره برداری قرارگرفتند را کاملاً نشان می دهد.

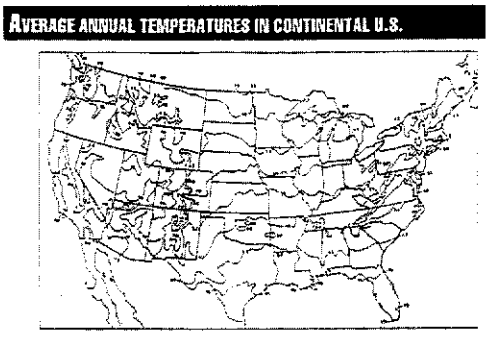
شکل ۳. ایزوترم های دمایی و خطوط جریان باد



ج -اندازه‌گیری دما با کارگذاشتن دماسنج در روی سطح زمین

در این روش دماسنج روی سطح زمین قرار می‌گیرد و در ارتباط مستقیم با زمین است. دمای‌اندازه‌گرفته شده کاملاً مطلق است و همین طور تابع تصحیحات فوق است. برای مثال تعداد ایستگاه‌های‌اندازه‌گیری دما در روی سطح زمین به سال ۱۹۴۱ در امریکا ۱۰ هزار بوده و ۴۲ سال بعد به سال ۱۹۸۳ به ۱۳ هزار افزایش یافت و این کمک بسزایی در صرفه‌جویی در زمان کرد. (شکل ۴.)

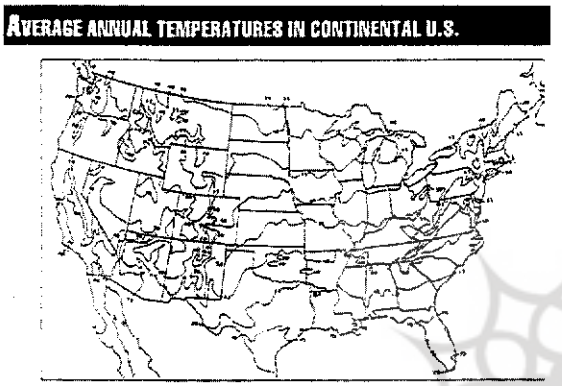
شکل ۴. تعداد ایستگاه های هواشناسی در روی سطح زمین در امریکا



د -اندازه‌گیری دما در اعماق کم

دما در حفاری هایی با عمق کم از سطح زمین‌اندازه‌گرفته می شود.اندازه گیری های دما در عمق کم تا(۵ft) در منطقه عظیم نفتی Webster در شهر Harris County واقع در Texas را نشان می دهند که در آن حتی مرزهای این مخزن مشخص هستند. این روش برای پیش بینی کردن انباشت‌های هیدروکربن زیرین، ابزار کار مناسب و قابل اعتمادی است. ما می دانیم که نمک دارای انتقال گرمای بالایی است، ولی این قانون برای درون نمک جایی که مولکول ها به هم فشرده هستند، اعتبار دارد. در روی سطح نمک، که تراکم مولکول ها شدید نیست، دما در آنجا جمع شده و یک آنومالی دمای مثبت ثبت می شود. شکل ۵. نمایشگر این دو پدیده است.

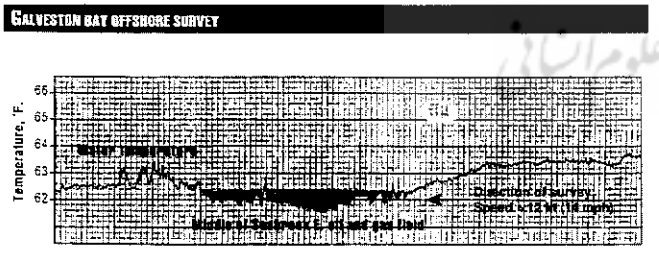
شکل ۵اندازه گیری دما در عمق کم



هـ-اندازه گیری دما روی سطح آب در فلات قاره (Offshore)

اندازه گیری دما در روی سطح آب در مقایسه بااندازه گیری دما در روی سطح خشکی به مراتب راحت‌تر است و بسیاری از فاکتورهای مهم مانند تخلخل وجود ندارد که می توانند نادیده گرفته شوند. شکل ۶. رابطه مستقیم مابین آنومالی دمای منفی در روی سطح آب با مخزن هیدروکربنی موجود در زیر آن را در منطقه (Galveston Bay) کاملاً نشان می دهد.

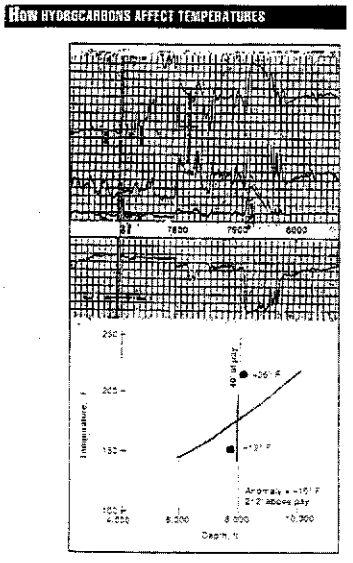
شکل ۶.اندازه گیری دما روی سطح آب در فلات قاره(Offshore)



نقشه های گرادیان دمای موجود به عنوان با ارزش ترین و مهم ترین وسیله برای شناسایی مخازن جدید هیدروکربن شناخته می شوند. با بررسی های ساده و سطحی یک نقشه گرادیان دما می توان سازند و زون های غنی از هیدروکربن را در اعماق پائین تر از چاه های موجود درناحیه شناسایی کرد (FONS 1999).

آنومالی دمای منفی در روی مخزن هیدروکربنی و آنومالی دمای مثبت در زیر مخزن در رابطه با دمای واقعی و گرادیان آن در عمق در نظر گرفته می شوند. شکل ۷. این رابطه را نشان می دهد.

شکل ۷. رابطه آنومالی مثبت و منفی دما برای مخزن هیدروکربن با گرادیان دما در عمق



مقایسه با روش لرزه‌ای

به غیر از انرژی خورشیدی که بر اثر تابش به سطح زمین، باعث حرکت جریان گرما به درون زمین می‌شود، همان طور که ذکر شد، جریان گرمای درون زمین از اعماق به طرف بالا و سطح حرکت می کند. یکی از پارامترهای مهم در روش دماسنجی، انتقال گرما(Thermal Conductivity) است.

در روش لرزه‌ای اساساً انرژی لازم در سطح زمین ایجاد شده به اعماق فرستاده و مجدداً به سطح زمین برمی گردد، یعنی مسافت دوبار طی شده و زمان رفت و برگشت(Travel Time) در نظر گرفته می شود.

مقایسه پارامترهای دو روش مذکور ۱. لرزه‌ای، زمان سیر مسافت (Travel Time) و ۲. دماسنجی، انتقال گرما،(Thermal Conductivity) در شرایط یکسان و استاندارد برای آب، نفت و گاز به این صورت است.

DIFFERENCES IN PROPERTIES:

-انتقال گرما و واحد آن Thermal Conductivity $\lambda = (10^{-3}$ al/ sec.cm.°C)

-زمان سیر مسافت در روش لرزه‌ای و واحد آن Acoustic Travel Time $t_A = (s/ft)$

OIL: $\frac{\lambda}{t_A} = \frac{0.3}{2.38}$ (۱)

GAS (Methane): $\frac{\lambda}{t_A} = \frac{0.073}{6.26}$ (۲)

WATER: $\frac{\lambda}{t_A} = \frac{1.39}{1.86}$ (۳)

با توجه به اثرات مشابه مانند لیتولوژی در روش‌های لرزه‌ای و دمایی که خارج از این بحث هستند، پیچیدگی آن بر روی روش دماسنجی بسیار کمتر است، از این رو به عنوان یکی از مزایای عمده این روش محسوب می شود.

تعیین عمق مخازن هیدروکربنی

تعیین محل مخازن هیدروکربنی در عمق با به کارگیری تصحیحات لازم در قالب معادلات ریاضی بر روی مقادیراندازه‌گرفته شده دما صورت می گیرد. مقادیر دمایی در کنار تصحیحاتی مانند: تعیین مقدار رطوبت هوای نزدیک به سطح زمین و وقایع روزانه و سالانه (Daily Event Year Event) از تصحیحات دیگری مانند: توپوگرافی - دمای دیرینه(Palaeotemperature) و فرسایش تبعیت می کنند.(KAMYAR ۲۰۰۰) معادلات مربوطه برای تصحیحات ذکر شده عبارتند از:

الف- (توپوگرافی BIRCH ۱۹۵۰)

اثرات توپوگرافی تا عمق ۱۰ کیلومتر نفوذ کرده و باید برطرف شوند، بنابراین انجام این تصحیح بر روی مقادیر دمایی الزامی است.

$$\Delta T_{top.} = \frac{z}{2\pi}\int_0^{\infty} E_{(\beta)} \cdot \frac{r}{R^3} dr \cdot \int_0^{2\pi} f_{(r,\varphi,t)} d\varphi \qquad (۴)$$

با $\Delta T_{top.}$..... دمای توپوگرافی تصحیح شده[°C]،

z.... عمق [m]،

R... فاصله با درنظر گرفتن ارتفاع[m] و با $R = \sqrt{r^2 + z^2}$،

r.... شعاع (فاصله افقی از دماسنج یا مخزن[m])،

φ.... زاویه (بین ۳۶۰° درجه) [°]،

$E_{(\beta)} = 2erfc(\beta) - 4i^2 erfc(\beta)$ und $\beta = \frac{R}{\sqrt{4\kappa t}}$،

k.... انتقال گرما $[m^2/s]$، برای مثال $[m^2/s]$ k=۱۳۰۰۰۰۰

t.... زمان به (ثانیه)،

f.... تابع خروجی [°].

ب - دمای دیرینه (Palaeotemperature)(BIRCH):۱۹۴۸

منظور از دمای دیرینه،(Palaeotemperature) دمایی است که زمین در ایام گذشته دارا بوده‌است. به علت نبودن اطلاعات دقیق از دمای موجود در زمان قدیم برای دوران یخبندان و موجود بودن فقط مدت زمان این دوره‌ها، جهت محاسبه آخرین دوره یخبندان(Wuerm) با مدت طول ۱۱۰ هزار سال که به زمان کنونی نزدیک‌تر است، در نظر گرفته می شود. جدول ۱. دوره‌های یخبندان و مدت زمان آنها را نشان می دهد.

جدول ۱. سن و مدت زمان دوره های یخبندان(KERTZ):۱۹۶۹

Wuerm - Ice Age	from ۱۲۰۰۰۰	to	۱۰۰۰۰ years ago
Riss - Ice Age	from ۲۴۰۰۰۰	to	۴۳۰۰۰۰ years ago
Mindel Ice Age	from ۱۲۱۰۰۰۰	to	۱۰۶۰۰۰۰ years ago
Guenz Ice Age	from ۱۵۰۰۰۰	to	۱۳۷۰۰۰۰ years ago

با به کارگیری مدت زمان این دوره و انتقال گرمایی برابر با ۰/۰۰۰۰۰۱۳ در معادله زیر (۵) می توان اختلاف دمای دیرینه با دمای امروز را محاسبه کرد. زمین از آن زمان تا به حال حدوداً ۸C° گرم شده است. ۲۰۰۰ (KAMYAR)

$$\Delta T_{palāo.} = Ts_1[1 - erfc(z/\sqrt{4kt_1}) + \sum_{i=2}^{n} Ts_i(z/\sqrt{4kt_i}) - erfc(z/\sqrt{4kt_{i-1}})] \qquad (۵)$$

با $\Delta T_{palāo.}$ ..... تصحیح دمای دیرینه به[°C]،

Ts.... دمای سطح زمین،[°C] اختلاف دمای موجود در ایام قدیم را با دمای فعلی وصف کرده و(t) فاصله زمانی هریک از دمای دیرینه است.

z... عمق بر حسب متر،

t... زمان بر حسب ثانیه ۱۱۰۰۰۰=t سال (مدت زمان دوره یخبندان(Wuerm،

K... انتقال گرما =[m^2/s] ۰/۰۰۰۰۰۱۳

(n).. تعداد فواصل زمانی دمای مشخص در گذشته و شاخص (۱) وضعیت دمایی فعلی را نشان می دهند.

با درنظرگرفتن فاکتور عمق (z) و معادله فوق می توان حتی دمای سطح زمین موجود در گذشته را برای عمق برون یابی (Extrapolation) و محاسبه کرد.

ج - فرسایش:(KAPPELMEYER HAENEL ۱۹۷۴)

فاکتور دیگری که باید درنظر گرفته، محاسبه و تصحیح شود، اثرات رسوبات و مقدار فرسایش لایه بر روی دما در طول زمان است. نیم فضای (نیم کره) در نظرگرفته شده در سطح یا عمق با سرعت رسوبات(v(m/s به طرف بالا حرکت می کند و یا به صورت یک فرسایش با سرعت منفی(v -) به طرف پایین حرکت می کند.

تصحیح کردن این از زمین شناسی منطقه یا بهتر بگوئیم لایه تبعیت می کند و موقعی امکان پذیر است که لایه از لحاظ زمین شناسی یک واحد و

یکنواخت باشد. معادله پایه برای این سیستم این چنین است:

$$\kappa\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}+v_s\frac{\partial\theta}{\partial z}=\frac{\partial\theta}{\partial z} \quad (۶)$$

با K... انتقال گرما= $[m^2/s]$ ۰/۰۰۰۰۰۱۳،

θ... تصحیح دمای فرسایش به[°C]،

z... عمق بر حسب متر،

Vs... سرعت فرسایش به(cm/s)است.

Vs... مقطع فرسایش در این معادله است.

و با دارا بودن شرایط مرزی زیر:

$$\theta = \theta_0 - zG_f \quad \text{fur } z > \text{und } t = ۰ \quad (۷)$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{fur } z = \text{und } t = ۰$$

تصحیح فرسایش با معادله زیر (۸) و بدین صورت حل می شود:

$$\theta = \theta_0 + G_u(z - v_s t) + \frac{1}{2}\left(G_u + \frac{b}{v_s}\right)\left[(z+v_s t)e^{\frac{v_s z}{\kappa}}.\operatorname{erfc}\left(\frac{z-v_s t}{2\sqrt{\kappa t}}\right) + (v_s t - z)\operatorname{erfc}\left(\frac{z-v_s t}{2\sqrt{\kappa t}}\right)\right] \quad (۸)$$

دراین معادله،

θ... تصحیح دمای فرسایش به[g°]،

θ_0... مقدار اولیه گرادیان دما به(C/m)،

Gu... کاهش دمای جو (اتمسفر) به،(C/m)

z... عمق بر حسب متر،

Vs... سرعت فرسایش به(cm/s)است.

t... زمان به (ثانیه)،

b... میانگین ارتفاع از شروع فرسایش به متر و

k... انتقال گرما $[m^2/s]$ = ۰/۰۰۰۰۰۱۳هستند.

برای مثال در اروپا (اتریش) برای یک منطقه مقدار فرسایش رسوبات درطول مدت ۳۰ میلیون سال حدود ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر (۰/۰۳ میلیمتر در سال)و برای منطقه ای دیگر این مقدار در طول مدت ۷ میلیون سال حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر (۰/۰۷ میلیمتر در سال)است(KAMYAR ۲۰۰۰).

د - تصحیح دمای سطح براساس توپوگرافی:

می توان با استفاده از روش دورسنجی(Remote Sensing) دمای سطح را توسط ماهواره‌اندازه گیری کرد، این دما به شدت از دمای رطوبت اتمسفر ما بین سیستم و هدفی که در فاصله نزدیکی از زمین قرار گرفته و مقدار تابش خورشید تبعیت می کند. اما این مشکل را می توان با نقشه برداری واندازه گیری دقیق و همچنین بکار بردن تصحیحات لازمه بر روی دماها بر طرف کرد. (GEMEINER ۱۹۹۶).

برای دمای سطح زمین(h)T به(C)برحسب ارتفاع و بلندی توپوگرافی(h) معتبراست(SIGNORELLI ۱۹۹۹)

$$T(h) = ۱۳/۱۵ - ۰/۰۰۴۸ * h \quad (۹)$$

و h... ارتفاع توپوگرافی به متر از سطح آبهای آزاد است.

نتیجه گیری

جریان گرما از درون زمین به طرف بالا و سطح حرکت می کند یعنی حرکت آن از مناطقی با دمای زیاد به مناطق خنک تر و فقط در روی سطح زمین که تابش خورشید است جریان گرما به طرف درون زمین در حرکت است. هیدروکربن ها به صورت یک سد ناقص عمل می کنند ولی مخلوطی از آب و نفت که غالباً مخازن هیدروکربنی این چنین هستند یک سد کاملی را به وجود می آورد و از انتقال گرما به سمت بالا جلوگیری می کنند. با استفاده از روش دماسنجی می توان محل مخازن هیدروکربنی و همچنین شکل و مرزهای آنها را تعیین کرد. تشریح و توضیح نقشه های آنومالی دما برای تعیین هیدروکربن زیرزمین به صورت کمی امکان پذیر است و این بدون استفاده از داده های قبلی اکتشافی میسر می شود. مخزن هیدروکربن با یک آنومالی دمای منفی در بالای سطح و آنومالی دمای مثبت در زیر سطح آن همراه است.اندازه گیری دما در روی سطح زمین با استفاده از روش های زیر ممکن است:

۱.اندازه گیری دما با استفاده از ماهواره،

۲.اندازه گیری دما در ارتفاع کم از سطح زمین با استفاده از پرواز،

۳.اندازه گیری دما با کارگذاشتن دماسنج در روی سطح زمین،

۴.اندازه گیری دما در اعماق کم و

۵.اندازه گیری دما روی سطح آب در فلات قاره

بعد از برداشت دما در روی سطح تصحیحات مختلفی باید بر روی آنها اعمال شوند، مانند:

۱. تعیین مقدار رطوبت هوای نزدیک به سطح زمین،

۲. وقایع روزانه و سالانه،(Daily Event Year Event)

۳. توپوگرافی

۴. دمای دیرینه

۵. فرسایش.

روش های دمایی(Temperature) و لرزه ای(Seismic) در راستای اکتشاف مخازن هیدروکربنی با یکدیگر مقایسه می شوند و انتقال گرما نشان می دهد که فاکتور قابل اعتمادی در مقابل با زمان رفت و برگشت در مخازن هیدروکربنی است و از پیچیدگی و سختی کمتری بر روی روش دماسنجی دارد. از این رو به عنوان یکی از مزایای عمده این روش محسوب می شود.

برای نتیجه‌گیری بهتر و مفیدتر از روش دماسنجی باید دمای مطلق‌اندازه گیری شود و در دسترس باشد. برای محاسبه عمقی که در آن لایه هیدروکربنی قراردارد باید بر روی مقادیر دمای‌اندازه گرفته شده تصحیحاتی اعمال شوند برای مثال: توپوگرافی، دمای وقت، دمای دیرینه و فرسایش(KAMYAR،۲۰۰۰).

*** ژئوفیزیک**

شرکت سهامی‌خدمات مهندسی برق (مشانیر)

منابع

BIRCH, F. (1948): The effect of Pleistocene climatic varations upon geothermal gradient. Am. J. Sci. 246; 729 -760.

BIRCH, F. (1950): Flow of Heat in Front Range, Colorado. Bull. Geol. Soc. Am. v. 61; 567 -630.

BIRCH, F.(1954): Heat flow radioaktivity. In Nuclar Geology, 148 -174€ Wiley , Jons, New York.

FONS€ L. (1999): Temperature Method can help Locate Oil, Gas Deposits. Lioyd Fons Exploration Inc. Houston€ Texas. Oil & Gas Journal (12.04.99), p. 58 – 64.

GEMEINER, B. (1996): Korrekturverfahren in der Geothermie an den Beispielen von IR – Oberflächentemperaturen und Bohrlochtemperaturmessungen. Dissertation Universität Wien.

KAMYAR€ H. R. (2000): Verteilung der Untergrundtemperaturen an den Beispielen der Bohrlochtemperatur (BHT) - Messungen in den RAG – Konzessionen Oberösterreichs und Salzburgs (Molasse - und Flyschzone). Dissertation Universität Wien.

KAPPELMEYER, O. & HAENEL, R.(1974): Geothermics with Spezial Reference to Application - Berlin (Bornträger).

KERTZ, W. (1969): Einführung in die Geophysik, Band 1. Bibliographisches Institut. Mannheim, Wien, Zürich. Wissenschaftsverlag.

SIGNORELLI, S. (1999): Geothermische Messungen im NEAT - Schacht Sedrun und ihre Interpretation. Diplomarbeit der ETH -Zürich.