

عوامل مؤثر در دمای هوای معدن

مهندس حسن مدنی

استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱ چکیده:

در معادن عمیق زیرزمینی، به دلیل مختلف - که در این مقاله خواهد آمد - دمای هوای معدن عموماً "بالاست و این امر نقش مهمی در پائین آوردن بازده کارکنان معدن دارد. برای آن که دمای بالا تاثیر مهمی در کار افراد داخل معدن نداشته باشد، اولاً "باید تا حد ممکن از بالا رفتن دمای هوا جلوگیری کرد و ثانیاً با استفاده از سیستم‌های سردکننده، دمای هوا را پایین آورد. گرچه در شرایط فعلی، دمای هوا در معادن ایران چندان بالا نیست و توجهی به آن نمی‌شود ولی ظرف چند سال آینده، قطعاً از جمله مشکلات اساسی معدنکاری در کشور ما خواهد شد و می‌بایست از هم‌اکنون، مطالعات لازم را در این زمینه آغاز کرد. این مقاله در دو قسمت و در دو شماره درج می‌شود. در این شماره عوامل مؤثر در دمای هوای معدن را شرح می‌دهیم و در مقاله بعدی، نقش دما در کار افراد و روشهای پایین آوردن آنرا شرح خواهیم داد. مهمترین عوامل مؤثر در دمای هوای معدن دمای بالایی سنگها در اعماق مختلف و تبادل حرارتی آن با هوای معدن، تراکم خودبه‌خود هوا، اکسیداسیون چوبها و مواد معدنی، ماشین‌آلات موجود در معدن، افراد، آتشباری و بعضی عوامل دیگر است. از سوی دیگر فرایندهای حرارت‌گیر، سبب کاهش دمای هوای معدن می‌شود. در این مقاله، پدیده‌های یاد شده به تفصیل بررسی شده است.

۲ حرارت ناشی از سنگها

۱.۱.۲ آشنایی:

و اندازه‌گیری‌های مختلف میزان جریان حرارتی از داخل زمین به‌سوی سطح آنرا ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ و به‌طور متوسط ۰/۰۵ وات بر متر مربع نشان داده که این مقدار در نقاط مختلف زمین کمابیش ثابت است (۳ و ۲).

گرچه ممکن است در نظر اول، این جریان حرارتی اندک به نظر برسد ولی از آنجا که هوا در طول حرکت خود در قسمتهای مختلف معدن با سطح عظیمی از سنگها در تماس است، لذا میزان انرژی حرارتی داده شده به هوا بسیار زیاد است و در معادن عمیق به ۲۰ الی ۳۰ هزارکیلو وات می‌رسد* (۳).

۲-۲ روش محاسبه دمای سنگهای بکر در اعماق مختلف

در حالت کلی می‌توان با در دست داشتن جریان حرارتی زمین و ضریب هدایت حرارتی سنگها، شیب زمین گرمایی و دمای طبیعی سنگها را در اعماق مختلف، از رابطه عمومی انتقال حرارت، محاسبه کرد:

$$Q = KA \frac{\Delta t}{\Delta z} \quad (1)$$

گرچه دمای سنگهای سطحی زمین تابع دمای هوا و بنابراین در فصول مختلف متغیر است، اما عوامل جوی به‌طور متوسط تا عمق ۱۵ الی ۳۰ متری سطح زمین موثر و در این عمق دمای سنگها در طول سال عملاً ثابت است. و نوسان سالیانه آن از ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد تجاوز نمی‌کند (۲ و ۱). در اعماق پایین‌تر، دمای سنگها ثابت نیست و با افزایش عمق، دمای آنها نیز اضافه می‌شود. تغییرات دمای سنگها به‌ازای واحد عمق راشیب زمین گرمایی ۱ و عکس آنرا به‌حرارتی ۲ می‌گویند (۴).

شیب زمین گرمایی در مناطق مختلف متغیر است و عوامل متعددی از قبیل نوع، سن زمین‌شناسی و خواص حرارتی سنگها و نیز ارتباط با فعالیت‌های آذرین در آن موثر است. حتی در یک منطقه نیز، این مشخصه ثابت نیست و به‌طور عرضی و عمقی تغییر می‌کند (۳). شکل ۱، تغییرات شیب زمین گرمایی در چند معدن مختلف دنیا را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز اندازه شیب زمین گرمایی مناطق مختلف درج شده است.

عامل افزایش دمای سنگها با عمق، منبع حرارت درون زمین است

در این رابطه Q جریان حرارتی، A سطح مقطع، K ضریب هدایت حرارتی Δt اختلاف دمای دو نقطه از سنگ به فاصله قائم ΔZ و $\frac{\Delta t}{\Delta Z}$ شیب زمین گرمایی ناحیه است. از آنجا که شدت جریان حرارتی زمین یعنی جریان حرارتی مبادله شده در واحد سطح ($q = \frac{Q}{A}$) به طور متوسط در دست است، لذا شیب زمین گرمایی متوسط هر ناحیه را می توان با تغییر مختصری در رابطه (۱) به شرح زیر به دست آورد:

$$\frac{\Delta t}{\Delta Z} = \frac{q}{k} \quad (2)$$

مثلاً " اگر سنگهای ناحیه ای از جنس آهک باشد، از آنجا که ضریب تبادل حرارتی آهک $\frac{0.08}{\text{سانتیمتر} \times \text{دقیقه}}$ است، با توجه به آن که شدت جریان حرارتی متوسط زمین $\frac{0.05}{\text{متر مربع}}$ است لذا شیب زمین گرمایی متوسط ناحیه خواهد شد:

$$\frac{\Delta t}{\Delta Z} = \frac{0.05}{2.08} = 0.024$$

با معلوم بودن شیب زمین گرمایی، می توان دمای سنگها را در عمق مورد نظر به دست آورد. اگر دمای سنگها در عمق h در طول سال ثابت و برابر t_h و شیب زمین گرمایی G باشد، دمای سنگها در عمق H خواهد شد:

$$t_H = t_h + (H-h)G \quad (3)$$

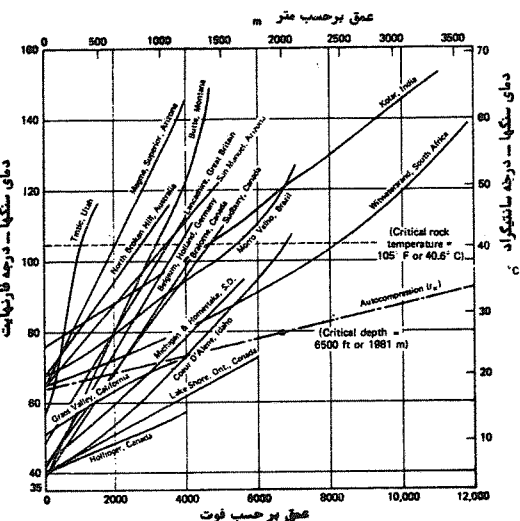
در این محاسبه ساده، شیب زمین گرمایی در اعماق مختلف ثابت فرض شد ولی در عمل، به علت تغییر جنس و مشخصات سنگها در قسمتهای مختلف، شیب زمین گرمایی نیز در اعماق مختلف متفاوت است.

در معادن زغال ایران، طبقات زغالدار محدود به سازند شمشک است که از تناوب لایه های ماسه سنگ، سنگ سیلت ۱۴، شیل، شیل زغالدار، زغال و ندرتا " آهک تشکیل شده است. توزیع زغال در سازند شمشک یکنواخت نیست بلکه در قسمتهای خاصی از آن لایه های قابل کار زغال متمرکز شده است که به نام زون ۱۵ زغالی خوانده می شوند. مثلاً " در ناحیه زغالی کرمان ۵ زون زغالی موسوم به زونهای A, B, C, D و E وجود دارد. در البرز شرقی نیز زغالهای قابل کار و مرغوب در دوزون متمرکز شده که هر کدام چندین لایه زغالی دارد. از آنجا که ضریب هدایت حرارتی زونهای زغالی و بقیه سنگها متفاوت است، لذا با توجه به شکل ۲، اگر شیب زمین گرمایی و ضخامت سنگهای مختلف موجود تا عمق مورد نظر به ترتیب G_j و t_j فرض شود، دمای سنگهای بکر سنگها در عمق H خواهد شد.

$$t_H = t_0 + L_1 G_1 + L_2 G_2 + \dots + L_n G_n = t_0 + \sum L_j G_j \quad (4)$$

از آنجا که با تقریب کافی می توان شیب زمین گرمایی طبقات زغالدار و طبقات فاقد زغال را ثابت در نظر گرفت لذا اگر G_c و G_s به ترتیب شیب زمین گرمایی زونهای زغال و سایر طبقات و L_c و L_s ضخامت آنها باشد، دمای سنگهای بکر از رابطه ساده تر زیر به دست خواهد آمد:

$$t_H = t_0 + \sum L_c G_c + \sum L_s G_s \quad (5)$$



شکل (۲) - شیب زمین گرمایی در چند منطقه معدنی (۲)

منطقه معدنی	کشور	شیب زمین گرمایی °C/متر / ۰۰ درجه سانتیگراد	حرارتی درجه سانتیگراد / متر
معدن زغال سنگ نژده - شاهرود	ایران	۱/۲	۸۳
معدن زغال سنگ درمک - کرمان	ایران	۱/۳۵	۷۲
ماکوگا ۵	شوری	۲/۲۶	۲۹/۷
زورینسکی ۶	شوری	۲/۹۸	۳۲/۵
آرتم ۷	شوری	۲/۶۱	۳۸/۲
سری دلبریت ۸	آفریقای جنوبی	۲/۷۶	۳۶
گدازه های وینترسروپ ۹	آفریقای جنوبی	۱/۲۷	۷۲
کواترتاری ایوت وایترز راند ۱۰	آفریقای جنوبی	۰/۷۸	۱۲۸
منطقه آناکوندا، ایالت مونتانا	ایالات متحده آمریکا	۴/۶ - ۶	۲۱/۷ - ۱۶/۶
مس آریزونا	ایالات متحده آمریکا	۳/۸	۲۴/۳
معدن مس انگلیس	انگلستان	۱/۸ - ۲	۵۵/۵
معدن نیکل اکتیو ۱۱	استرالیا	۱/۳	۷۶/۹
معدن طلای کولار ۱۲	هند	۱/۱	۹۰/۹

جدول (۱) - اندازه شیب زمین گرمایی در مناطق مختلف (۱ و ۳، ۲، ۴)

یکی از روابط معروف در این زمینه، رابطه برور ۱۷ به شرح زیر است :

$$T_{t_i} = T_{\infty} + \frac{q}{4\pi k} \log \frac{t_i}{t_i - t_1} \quad (6)$$

در این رابطه T_{t_i} دمای اندازه شده در عمق مورد نظر چاه در زمان t_i برحسب درجه سانتیگراد T_{∞} دمای متعادل شده سنگها در همان عمق پس از زمان بی نهایت برحسب درجه سانتیگراد، q شدت جریان حرارتی زمین برحسب وات بر مترمربع، k ضریب هدایت حرارتی سنگها برحسب وات بر سانتیمتر، t_i فاصله زمانی بین شروع حفر گمانه در عمق مورد نظر تا زمان اندازه گیری دما و t_1 زمان اغتشاش حرارتی در عمق مورد نظر است.

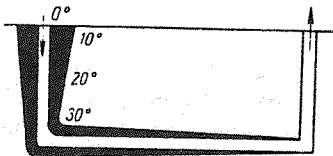
بدین ترتیب می توان با اندازه گیری T_{t_i} ، به کمک رابطه (۶)، دمای سنگها را پس از برگشت وضعیت حرارتی به حالت اولیه، به دست آورد.

۴-۲. تبادل حرارتی بین سنگها و هوای معدن :

تبادل حرارتی بین سنگها و هوای معدن، از جمله مسایل پیچیده تهبویه است و به علت دخالت عوامل متعدد، نمی توان آن را به طور دقیق پیش بینی کرد.

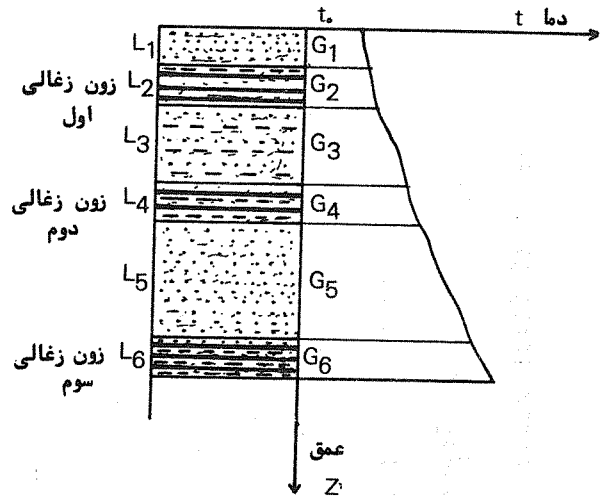
به طور کلی می توان گفت که در معادن کم عمق، در تابستان هوای ورودی سنگها را گرم می کند و در زمستان برعکس، سنگها باعث گرم شدن هوای ورودی می شود، اما در مورد معادن عمیق، تقریباً همیشه جریان حرارتی از سنگها به سوی هوای معدن برقرار است (۱). بدیهی است این امر سبب سرد شدن آن قسمت از سنگها که بلافاصله با هوای معدن تماس دارند می شود و بدین ترتیب در اثر عبور هوا، در اطراف کارهای معدنی، قشری از سنگها وجود دارد که دمای آن بین دمای سنگهای بکر و هوای معدن است و رل انتقال حرارت از سنگهای گرم به هوا را به عهده دارد. این قشر سنگها را به نام قشر متعادل کننده دما ۱۸ می نامند. ضخامت این قشر به بسیاری عوامل و از آن جمله دمای سنگهای بکر، ضریب هدایت حرارتی سنگها، شدت جریان و دمای هوای عبوری وابسته است. براساس مطالعاتی که در معدن زغال سنگ رور ۱۹ آلمان انجام گرفته، در روزهای اول گشایش معدن، دمای سنگهای اطراف کارهای معدنی با سرعت ۵ سانتی متر در روز کاهش یافته و پس از ۲ سال، سرد شدن سنگها در قشری به ضخامت ۱۰ تا ۲۰ متر در ماسه سنگها، ۸ تا ۱۰ متر در شیل و ۳ تا ۵ متر در زغال متوقف شده است و در واقع اعداد یاد شده، نشانگر ضخامت قشر متعادل کننده در مورد سنگهای مختلف است (۱).

بنابر آن چه دیدیم، ضخامت قشر متعادل کننده دما طی مدت زمانی که از عمر معدن می گذرد ثابت نیست و از سوی دیگر، ضخامت این قشر در طول آن نیز ثابت نیست و در طول آن کاهش می یابد به طوری که در فاصله تقریبی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر از چاه ورودی هوا، ضخامت آن به صفر می رسد (ش ۳).



(۱)

شکل ۳- تغییرات ضخامت قشر متعادل کننده دما در طول کارهای معدنی



شکل ۴- تغییرات دمای سنگهای بکر در اعماق مختلف معادن زغال ایران

۴-۲. روش عملی تعیین دمای سنگها در اعماق مختلف

به هنگام اکتشاف کانسارها، از گمانه هایی ۱۶ که به منظور دستیابی به ماده معدنی و نمونه گیری از آن حفر می کنند، برای تعیین دمای سنگها در اعماق مختلف نیز استفاده می شود. برای این کار، سوند ویژه اندازه گیری دما را به ته گمانه می فرستند و آنرا به آهستگی بالا می کشند. دستگاه ضمن بالا آمدن، دمای سنگها را اندازه می گیرد و نتیجه روی نموداری ثبت می شود.

دستگاه اندازه گیر معمولاً "بر اساس خاصیت پل و تستون کار می کند، بدین معنی که تغییر دما سبب تغییر مقاومت یکی از شاخه های پل می شود که در نتیجه باعث عبور جریان الکتریکی از گالوانومتر می گردد. گالوانومتر مسقیماً برحسب دما مدرج است.

نکته مهمی که در این مورد وجود دارد، آن است که حفر گمانه، خود سبب می شود که وضعیت حرارتی سنگها بهم بخورد و بنابراین آنچه که در این اندازه گیری ها حاصل می شود، دمای واقعی سنگها نیست. مهمترین علل این امر به شرح زیر است :

- الف - حرارت ناشی از اصطکاک سر مته با سنگها به هنگام حفر.
 - ب - تماس گل حفاری با سنگها که دمای آن در قسمتهای بالای گمانه بیشتر و در قسمتهای پایین آن کمتر از دمای سنگهاست.
 - ج - سایر عوامل نظیر شستشو و یا لوله گذاری گمانه.
- بدیهی است تغییرات حرارتی ناشی از حفر گمانه دائمی نیست و پس از مدتی، وضع به حالت اولیه برمی گردد و فقط در این حالت است که نتایج اندازه گیری با واقعیت تطابق دارد. مدت زمان لازم جهت رفع اغتشاشات حرارتی ناشی از حفر گمانه زیاد است و براساس مطالعات انجام شده، حداقل زمان لازم برای این کار، ده برابر مدت زمان حفر و استفاده از گمانه است (۶). از آنجا که این زمان طولانی است و ممکن است در طی آن گمانه ریزش کند، لذا کوشش های زیادی انجام گرفته است تا بتوان به کمک نتایج حاصله از اندازه گیری دمای سنگها در گمانه های تازه حفر شده، دمای واقعی سنگها را به دست آورد.

همان‌گونه که گفتیم، تبادل حرارتی بین سنگها و هوای معدن، فرآیند بسیار پیچیده‌ای است و محاسبه دقیق آن ممکن نیست. به‌ویژه آن‌که روند این تبادل حرارتی دایم نیست و نسبت به زمان تغییر می‌کند. برای محاسبه تبادل حرارتی، می‌توان با بعضی فرضیات، روابطی به‌دست آورد که در عمل با دقت کافی قابل استفاده باشد. بدین منظور فرض می‌کنیم که در عمق معین در داخل سنگهایی که تا بینهایت گسترش دارند و دمای بکر آنها t_r است، تونلی با مقطع دایره و به شعاع r_d حفر شده‌باشد. در زمان معین T ، دمای سطح تونل که در تماس با هوا قرار دارد، کاهش می‌یابد و به حد t_0 می‌رسد و فرض می‌کنیم که دما در این حد ثابت بماند.

حال می‌توان برای بررسی انتقال حرارت، رابطه فوریه 2^0 را در مختصات استوانه‌ای به‌شرح زیر به‌کار برد:

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (7)$$

در این رابطه r فاصله محور تونل تا نقطه‌ای که در آن دمای سنگها اندازه‌گیری شده در صفحه عمود بر امتداد تونل و α ضریب پخشیدگی حرارتی 2^1 سنگها است. همان‌گونه که می‌دانیم، این ضریب خود تابع سایر خواص سنگهاست و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_R} \quad (8)$$

که در آن K ضریب هدایت حرارتی برحسب $\frac{\text{وات}}{\text{درجه سانتیگراد} \times \text{متر}}$ ، ρ جرم مخصوص برحسب $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مترمکعب}}$ و C_R گرمای ویژه سنگها برحسب

$\frac{\text{کیلو ژول}}{\text{درجه سانتیگراد} \times \text{کیلوگرم}}$ است. در رابطه (8) ضریب α برحسب $\frac{\text{مترمربع}}{\text{ثانیه}}$ بیان می‌شود.

با حل معادله دیفرانسیل (7) می‌توان دمای سنگها را در فاصله r از محور تونل و در زمان T به‌دست آورد و به‌کمک آن میزان انتقال حرارت از سنگها به هوا را محاسبه کرد. بدیهی است برای تعیین توابع انتگرال می‌توان از شرایط استانه‌ای زیر استفاده کرد:

$$T=0 \Rightarrow t=t_r \quad \text{با شرط } r > r_d$$

$$r=r_d \Rightarrow t=t_0 \quad \text{با شرط } T > 0$$

از آن‌جا که حل ریاضی معادله دیفرانسیل پیچیده است لذا گوی 2^2 و پاترسون 2^3 راه حل تقریبی‌ای به‌کمک جدول ارائه داده‌اند که در زیر به‌شرح آن می‌پردازیم:

در روش گوی و پاترسون، ضریب بی‌بعد ξ به‌شرح زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \frac{\alpha T}{r_d^2} \quad (9)$$

در این رابطه T زمان برحسب ثانیه و r_d شعاع تونل برحسب متر است. از آن‌جا که تونلها ندرتا "با مقطع دایره حفر می‌شوند و معمولاً چهارگوش‌اند، لذا به جای r_d از شعاع هیدرولیکی R_h به‌شرح زیر استفاده می‌شود:

$$R_h = \sqrt{2} \frac{A}{P} \quad (10)$$

ϵ	ω	ϵ	ω	ϵ	ω	ϵ	ω
0.010	6.1289	0.125	2.0571	1.60	0.8536	28	0.4317
0.011	5.8658	0.130	2.0246	1.70	0.8387	30	0.4261
0.012	5.6362	0.135	1.9957	1.80	0.8250	35	0.4140
0.013	5.4336	0.140	1.9679	1.90	0.8123	40	0.4040
0.014	5.2531	0.150	1.9152	2.00	0.8006	45	0.3955
0.015	5.0910	0.160	1.8679	2.20	0.7795	50	0.3882
0.016	4.9442	0.170	1.8248	2.40	0.7609	55	0.3818
0.017	4.8106	0.180	1.7853	2.60	0.7444	60	0.3761
0.018	4.6883	0.190	1.7489	2.80	0.7296	65	0.3710
0.019	4.5757	0.200	1.7152	3.00	0.7162	70	0.3664
0.020	4.4716	0.220	1.6548	3.20	0.7040	75	0.3622
0.022	4.2852	0.240	1.5020	3.40	0.6929	80	0.3583
0.024	4.1225	0.260	1.5554	3.60	0.6827	85	0.3548
0.026	3.9790	0.280	1.5138	3.80	0.6732	90	0.3515
0.028	3.8510	0.300	1.4763	4.00	0.6644	95	0.3484
0.030	3.7360	0.320	1.4423	4.50	0.6449	100	0.3456
0.032	3.6320	0.340	1.4113	5.00	0.6282	110	0.3404
0.034	3.5373	0.360	1.3829	5.50	0.6137	120	0.3358
0.036	3.4505	0.380	1.3567	6.00	0.6009	130	0.3316
0.038	3.3707	0.400	1.3325	6.50	0.5895	140	0.3278
0.040	3.2968	0.420	1.3100	7.00	0.5793	150	0.3244
0.042	3.2283	0.440	1.2890	7.50	0.5700	160	0.3212
0.044	3.1645	0.460	1.2694	8.00	0.5615	180	0.3157
0.046	3.1049	0.480	1.2510	8.50	0.5538	200	0.3108
0.048	3.0491	0.500	1.2346	9.00	0.5467	220	0.3065
0.050	2.9966	0.550	1.1944	9.50	0.5401	240	0.3027
0.055	2.8781	0.600	1.1600	10.00	0.5339	260	0.2993
0.060	2.7746	0.650	1.1296	11.00	0.5228	280	0.2962
0.065	2.6832	0.700	1.1025	12.00	0.5130	300	0.2933
0.070	2.6018	0.750	1.0780	13.00	0.5042	350	0.2872
0.075	2.5287	0.800	1.0558	14.00	0.4963	400	0.2820
0.080	2.4624	0.850	1.0355	15.00	0.4892	450	0.2776
0.085	2.4020	0.900	1.0169	16.00	0.4826	500	0.2738
0.090	2.3467	0.950	0.9997	17.00	0.4766	600	0.2674
0.095	2.2959	1.000	0.9838	18.00	0.4711	700	0.2622
0.100	2.2488	1.100	0.9562	19.00	0.4660	800	0.2579
0.105	2.2050	1.200	0.9301	20.00	0.4611	900	0.2542
0.110	2.1643	1.300	0.9048	22.00	0.4524	1000	0.2510
0.115	2.1263	1.400	0.8809	24.00	0.4448		
0.120	2.0906	1.500	0.8589	26.00	0.4379		

جدول (۱) - محاسبه ضریب بی‌بعد ξ به‌کمک ضریب بی‌بعد ϵ

که در آن A سطح مقطع تونل برحسب مترمربع و P محیط آن برحسب متر است. ضریب $\sqrt{2}$ به این علت وارد فرمول شده‌است که تاثیر افزایش محیط تونل در نتیجه ناهموار بودن سطح آن را خنثی کند.

پس از محاسبه ضریب ξ از رابطه (9) با مراجعه به جدول 2، ضریب بی‌بعد ω مربوط به آن به‌طور مستقیم و یا به کمک درون‌نخمنی 24 تعیین می‌شود.

پس از تعیین ضریب ω ، شدت جریان حرارتی ناشی از سنگها در واحد سطح، از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{K(t_r - t_0)}{r_d} \omega \quad (11)$$

می‌بایست توجه داشت که شدت جریان حرارتی‌ای که از رابطه (11) به‌دست می‌آید، فقط برای جزء کوچکی از طول تونل صادق است. و با تغییر طول مسیر هوا در تونل و عمر کار معدنی تغییر می‌کند اما در عمل می‌توان این روند را در قطعات 15 متری از تونل‌های با عمر چند ماه و قطعات 30 متری از تونل‌های قدیمی‌تر، ثابت در نظر گرفت (2).

به‌کمک رابطه (11)، می‌توان کل حرارتی را که بین سنگها و هوای قطعه‌ای از تونل به‌طول L متر و محیط P متر مبادله شده‌است، به‌دست آورد:

$$Q = PL \frac{K}{r_d} (t_r - t_0) \omega \quad (12)$$

در این صورت دمای هوا در انتهای قطعه یاد شده از تونل خواهد شد :

$$t_i = t_0 + \frac{Q}{60 \bar{P}_a C_a V} \quad (13)$$

در این رابطه \bar{P}_a جرم مخصوص هوا بر حسب کیلوگرم متر مکعب، V شدت جریان هوای عبوری از تونل بر حسب متر مکعب ثانیه و C_a گرمای ویژه هوای مرطوب بر حسب کیلوژول ثانیه است.

۳- حرارت ناشی از تراکم خود به خود ۲۵ هوا در چاه :

هنگامیکه هوا در چاه ورودی معدن پائین می‌رود، در اثر تراکم، فشارش با آهنگ تقریبی ۱/۱ کیلو پاسکال در هر ۱۰۰ متر عمق اضافه می‌شود که این امر، افزایش دمای هوا را به دنبال دارد. در واقع همزمان با پائین رفتن هوا در چاه، انرژی پتانسیل آن به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود.

اگرچه ضمن پایین رفتن هوا در چاه، بعضی تبادل حرارتی انجام می‌گیرد ولی با تقریب عملی، می‌توان فرآیند تراکم خودبه‌خود هوا در چاه را از نوع بی‌دررو (آدیاباتیگ) ۲۶ در نظر گرفت. با چنین فرضی، می‌توان دمای هوا در اعمال مختلف چاه را از رابطه عمومی تحول بی‌دررو به دست آورد :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (14)$$

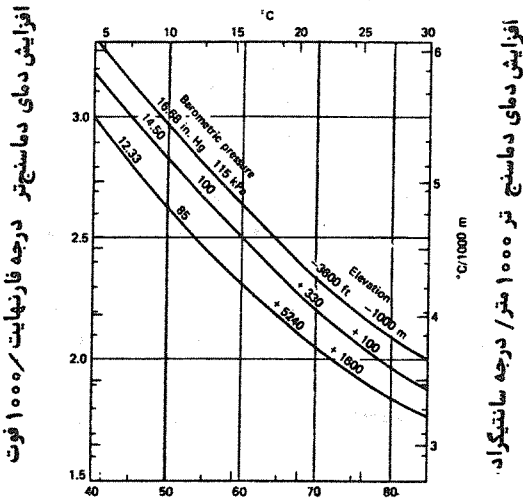
که در آن T_1 و T_2 دمای مطلق هوا قبل و بعد از تراکم، P_1 و P_2 فشار هوا قبل و بعد از تراکم و K نسبت گرمای ویژه هوا در فشار ثابت به گرمای ویژه آن در حجم ثابت است (ضریب اتمی سیته). از آن‌جاکه ضریب K در مورد هوای خشک و مرطوب به ترتیب ۱/۴۰۲ و ۱/۳۶۲ است لذا توان رابطه (۱۴) یعنی نسبت $\frac{T_2 - T_1}{T_1}$ در مورد هوای خشک و مرطوب به ترتیب ۰/۲۸۷ و ۰/۲۶۶ است.

میزان متوسط افزایش دمای هوا از بابت تراکم خودبه‌خود هوا ۰/۹۶۶ تا ۱ درجه سانتی‌گراد به ازای هر ۱۰۰ متر عمق است (۲۰۱).
گرچه افزایش دمای هوا از بابت تراکم خودبه‌خود در داخل چاه را می‌توان از رابطه (۱۴) به دست آورد اما نمودارهایی نیز در این مورد وجود دارد که نمونه‌ای از آنها در شکل ۴ نشان داده شده است. به کمک این نمودار می‌توان میزان افزایش دمای هوا در هر ۱۰۰۰ متر عمق چاه را با معلوم بودن ارتفاع دهانه چاه و دمای هوای ورودی به معدن به دست آورد. در این نمودار، درجه حرارت، دمای دماسنج‌تر در نظر گرفته شده است.

۴- اکسیداسیون چوبها و مواد معدنی :

اکسیداسیون مواد معدنی نظیر زغال‌سنگ و بعضی سولفورهای فلزی - به‌ویژه پیریت - نقش مهمی در بالا رفتن دمای هوای معدن دارد. البته فعالیت شیمیایی زغال‌سنگها و مواد معدنی سولفور، متفاوت است. بعضی از این مواد به قدری فعال‌اند که تماس دائم هوا با آنها، منجر به خودسوزی ۲۶ این مواد می‌شود. در منطقه وطن از حوضه زغال‌خیز قشلاق (البرز شرقی)، بعضی از زغال‌ها به قدری فعالیت قوی دارند که به محض این‌که با حفر ترانشه‌های اکتشافی در معرض هوا قرار گیرند، به سرعت

دمای دماسنج متر سانتی‌گراد



دمای دماسنج‌تر - فارنهایت

شکل ۴- تغییرات آهنگ افزایش دمای ناشی از تراکم خودبه‌خود هوا نسبت به تغییرات دما و فشار هوای ورودی به چاه (۲)

اکسیده می‌شوند و پس از مدت کوتاهی دود می‌کنند.

زغالهای معدن زغال‌سنگ باب‌نیزو در حوضه زغالی کرمان نیز خاصیت خودسوزی دارند و در اثر تماس مداوم با هوا مشتعل می‌شوند و تاکنون چندین بار زغالهای این معدن آتش گرفته‌است. بدیهی‌است قبل از اشتعال زغال سنگ، دمای آن و درصد گاز دی‌اکسید کربن موجود در هوای معدن، افزایش می‌یابد.

در میان معادن فلزی ایران، معدن سرب و روی کوشک (در حوالی بافق یزد) از نظر خودسوزی پیریت جالب توجه است و خودسوزی ماده معدنی در این معدن، سبب بالا رفتن دما و تولید گازهای سمی می‌شود. برای این‌که نقش اکسیداسیون مواد معدنی - به‌ویژه زغال‌سنگ - در بالا رفتن دمای هوای معدن روشن‌تر شود، به شرح مثالی در این مورد می‌پردازیم :

افزایش ۰/۱ درصد گاز دی‌اکسید کربن در هوای معدن، به معنی ورود یک لیتر یا تقریباً ۲ گرم از این گاز در هر متر مکعب هواست. از آن‌جاکه تشکیل ۲ گرم گاز دی‌اکسید کربن با تولید ۴/۳ کیلوکالری حرارت همراه است، بنابراین با توجه به آن‌که جرم یک متر مکعب هوا تقریباً ۱/۲۵ کیلوگرم و گرمای ویژه آن ۰/۲۴ کیلوکالری است لذا ورود این حجم از گاز به هوا سبب خواهد شد که دمای هوا تقریباً ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد :

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c_e} = \frac{4.3}{1.25 \times 0.24} = 14.5 \quad \text{درجه سانتی‌گراد}$$

۵- ماشین‌آلات و تاسیسات موجود در معدن :

در داخل معدن ماشین‌آلات و تاسیسات مختلفی وجود دارد که همگی سبب گرم شدن هوای معدن می‌شوند. از جمله این وسائل و تاسیسات

می‌توان الکتروموتورها، خط لوله هوای فشرده، موتورهای احتراقی، بارکنده‌ها و ماشینهای حفار را نام برد.

در معادن پیشرفته که از ماشین‌آلات مختلف استفاده می‌شود، ممکن است ۲۵ تا ۵۰ درصد از کل حرارتی که به هوا داده می‌شود، از طریق ماشین‌آلات مبادله شود و این مقدار حرارت، دمای هوای معدن را ع تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد (۲).

برای سهولت محاسبه میزان حرارت مبادله شده بین هوای معدن و ماشین‌آلات، فرض می‌کنند که تمام انرژی ماشین‌آلات به‌طور مستقیم و

یا به‌طور غیرمستقیم (از طریق اصطکاک) به حرارت تبدیل می‌شود. بدین ترتیب با در دست داشتن توان ماشین‌ها، می‌توان آن را به حرارت هم ارز تبدیل کرد و میزان تبادل حرارتی از این بابت را به دست آورد.

در مورد موتورهای دیزل، مبنای محاسبه بر این اساس است که ۹۰ درصد ارزش حرارتی سوخت مصرف شده را به‌عنوان مقدار حرارتی که با هوای معدن مبادله شده‌است، در نظر می‌گیرند.

۴- آبهای زیرزمینی و خط لوله آبکشی :

آبهای زیرزمینی موجود در معدن - به‌ویژه آبهای موجود در اعماق - دمای بالایی دارد و مقدار قابل توجهی حرارت به هوای معدن می‌دهد و دمای آن را بالا می‌برد.

خط لوله آبکشی نیز عامل دیگری برای افزایش دمای هوای معدن است زیرا معمولاً دمای آب زیرزمینی موجود در معدن، بیش از دمای هوای معدن است. البته بعضی از خط لوله‌ها، دمای کمتری دارند که از آن جمله می‌توان دمای آب مورد مصرف در چالزنی، خط لوله آب آتش‌نشانی و خط لوله محلول سردکننده (در سیستم تهویه مطبوع) را نام برد.

از آنجا که در مرحله اکتشاف دمای آب معدن در اعماق مختلف تعیین می‌شود لذا با استفاده از روابط انتقال حرارت می‌توان تبادل حرارتی و افزایش دما از این بابت را محاسبه کرد.

۷- سایر عوامل :

علاوه بر عوامل یاد شده، بعضی عوامل دیگر نیز در افزایش دمای هوای معدن موثرند که در زیر به آنها اشاره می‌کنیم :

۱-۷. افراد :

همان‌گونه که در بحث بعدی خواهیم دید، بدن انسان به منزله یک ماشین حرارتی با راندمان پایین است و بایستی بخش اعظم انرژی دریافتی را به‌صورت حرارت با خارج مبادله کند که این امر، خود موجب بالا رفتن دمای هوای معدن می‌شود.

بسته به شرایط محیط و نحوه کار کارکنان، مقدار حرارت مبادله شده بین افراد و هوای معدن بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ کیلوکالری بر ساعت به‌ازای هر نفر تغییر می‌کند (۱).

۲-۳. آتشباری :

از آنجا که بیش از ۵۰ درصد و در پاره‌ای موارد حدود ۹۰ درصد انرژی آزاد شده از مواد منفجره به‌صورت حرارت است، لذا آتشباری

نیز نقش مهمی در بالا رفتن دمای هوای معدن دارد. از سوی دیگر به دلیل آنکه بخش عظیمی از حرارت تولید شده جذب سنگها می‌شود، لذا محاسبه دقیق افزایش دما از این بابت ممکن نیست.

۸- عوامل کاهش‌دهنده دمای هوای معدن :

مهمترین عوامل کاهش‌دهنده دمای معدن تبخیر آب و انبساط خود به‌خود هوا در چاه خروجی است که در زیر آنها را بررسی می‌کنیم :

۸-۱. تبخیر آب :

تبخیر آب، مهمترین عامل کاهش دمای هوای معدن است. تبخیر یک‌گرم آب، حدود ۵۹/۰ کیلوکالری حرارت جذب می‌کند که این مقدار حرارت، دمای یک متر مکعب هوا را حدود ۱/۹ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد.

۸-۲. انبساط خودبه‌خود هوا در چاه خروجی :

به هنگام خروج هوا از معدن از طریق چاه خروجی، هوا منبسط می‌شود و این امر دمای آنرا پایین می‌آورد. از نظر تئوری، کاهش دمای هوا در اثر انبساط خودبه‌خود در چاه خروجی، برابر افزایش دمای آن در چاه ورودی در اثر تراکم خودبه‌خود است اما این کاهش دما، هنگامی انجام می‌گیرد که هوا از معدن خارج می‌شود و بنابراین در کاهش دمای هوای درون معدن نقشی ندارد.

۹- نقش عوامل مختلف در دمای هوای معدن :

بسته به شرایط هر معدن، عوامل یاد شده، نقش متفاوتی در تبادل دمای هوای معدن به‌عهده دارند. برای روشن شدن مطلب به شرح چند مثال در این باره می‌پردازیم :

۹-۱. معادن زغال ناحیه دونتس شوروی ۲۸ :

بر اساس مطالعاتی که در حوضه زغال‌سنگ دونتس اتحاد شوروی انجام گرفته، نقش متوسط عوامل مختلف به‌شرح جدول ۳ بوده‌است.

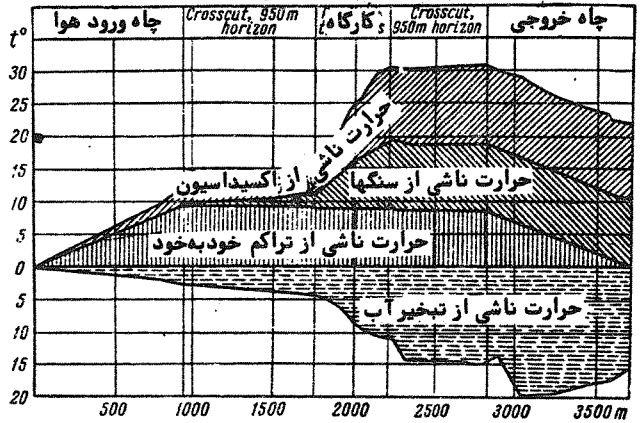
جدول ۳- حرارت آزاد شده از منابع مختلف در معادن ناحیه دونتس

عمق هرسب متر	حرارت ناشی از سنگها درصد	حرارت ناشی از اکسیداسیون زغال و چوبها درصد	حرارت ناشی از قطعات خرد شده سنگها و زغال درصد	ماشین‌آلات درصد	سایر عوامل درصد
۹۰۰	۴۵	۳۲	۸	۹	۶
۱۰۰۰	۴۹	۲۹	۹	۸	۵
۱۱۰۰	۵۲	۲۶	۹	۸	۵

۹-۲. معادن عمیق زغال در ناحیه دونباس شوروی ۲۹ :

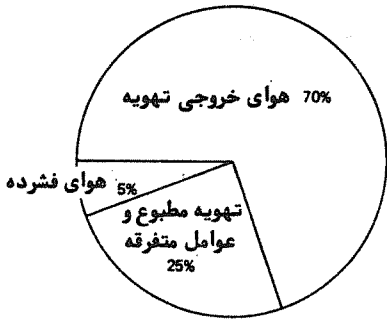
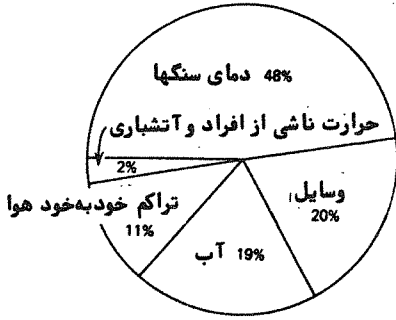
شکل ۵. متوسط حرارت ناشی از عوامل مختلف را در معادن عمیق ناحیه دونباس اتحاد شوروی نشان می‌دهد.

میان برمنشعب از افق ۹۵۰ متر



الف

شکل ۵- نقش عوامل مختلف در حرارت معادن زغال ناحیه دوبناس



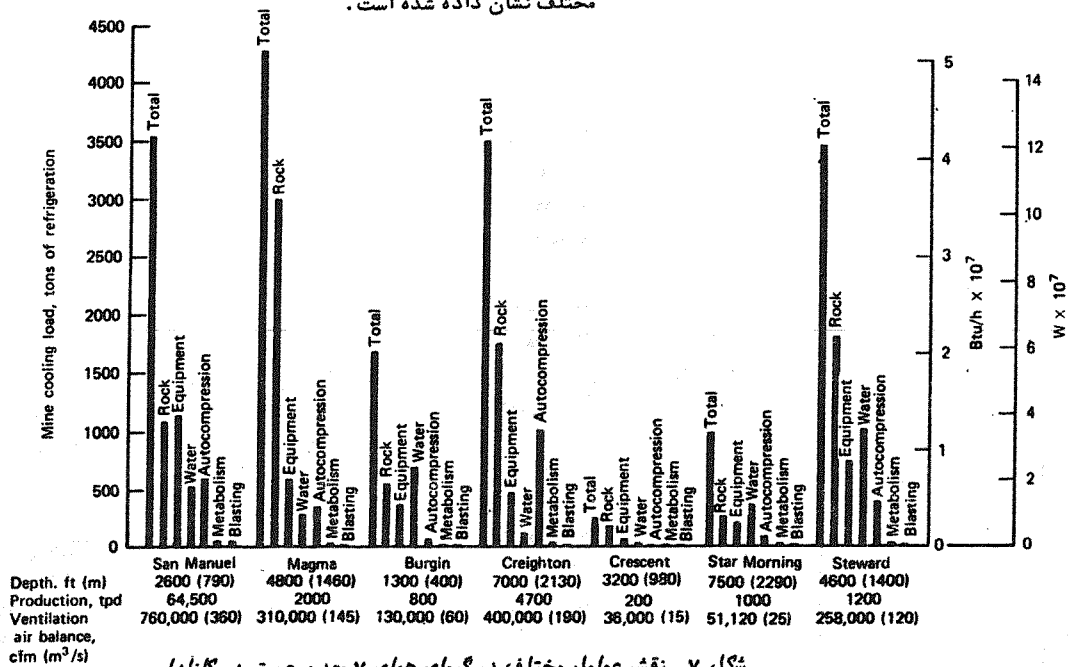
ب

۳-۹. معادن عمیق ایالات متحده آمریکا و کانادا :

براساس مطالعاتی که در ۷ معدن عمیق این کشورها انجام گرفته ، متوسط حرارت مبادله شده به صورت شکل ۶ به دست آمده است . شکل ۶- الف نقش عوامل گرم کننده هوا و شکل ۶- ب نقش عوامل سردکننده را نشان می دهد .

شکل ۶- نقش عوامل مختلف در تعادل دمای هوای معادن آمریکا

در شکل ۷ نیز نقش هر یک از عوامل ، به طور جداگانه در مورد معادن مختلف نشان داده شده است .



شکل ۷- نقش عوامل مختلف در گرمای هوای ۷ معدن عمیق در کانادا و ایالات متحده (۲)

- 1- Skochinsky, A. - Komarov, V.
Mine ventilation
Mir publishers — Moscow — 1968.
- 2- Hartman, Howard L.
Mine Ventilation and Air Conditioning
John Wiley and Sons. Inc. — 1982.
- 3- Burrows, J.H.J — Hemp, R.— Lancaster, F.H.— Quilian, J.H.
The Ventilation of South African Gold Mines
Cape and Transvaal Printers Ltd. — 1974
- 4- *Report on Detailed Exploration of Darregeor Aea*
National Iranian Steel Co. — Kerman Geological Group — 1970
- 6- Field, J.—Taufers, A.—Benes, M.—Kohut, R.
Determination of Virgin Rock Temperatur in Prospective Area of Underground Mining
Third International Mine ventilation Congress — England—1984
The Institution of Mining and Metallurgy Publication—1984
- 7- Stewart, J.M.
The use of Heat Transfer and Limiting Physiological criteria as a Basis for Setting Heat Stress Limits
Second International Mine Ventilation Congress — U.S.A. 1979
S.M.E. Inc. — 1980

۵- نتایج تحقیقات اکتشافی منطقه پشکلات
انتشارات شرکت ملی ذوب آهن ایران - شرکت ذغال سنگ البرز شرقی
۱۳۵۶ -

۸- مدنی، حسن تهویه در معادن، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی - زیر چاپ

پاورقی

۱- اعداد داخل پرانتز نشانه منبع مورد استفاده در فهرست منابع است.

2. Geothermal Gradient

3. Thermal step

۴- در بعضی کتابها، هر دو تعریف را شبیه زمین گرمایی می گویند.

5. Makejevka

6. Dzerzhinsky

7. Artem

8. Dolerite

9. Ventersdorp Lava

10. Witwatersrand Quartzite

11. Agnew

12. Kolar

۱۳- توجه دقیق به این اعداد، عظمت انرژی حرارتی زمین را به خوبی نشان می دهد و با مهار آن می توان به منبع عظیمی از انرژی رایگان، دست یافت.

14. Siltstone

15. Zone

16. Borehole

17. Brewer

18. Temperature — equalizing Jacket

19. Ruhr

20. Fourier equation

