

بخش دوم: سی تی اسکن و سنگ

## کاربرد سی تی اسکن برای محاسبه خواص پتروفیزیکی و لیتولوژیکی

کاظم سعادت - پژوهشگاه صنعت نفت

### ۶۵ مقدمه

بر اساس مقدماتی که قبلاً آمد سی تی اسکن اشعه ایکس بر اساس اختلاف در چگالی و جرم اتمی بنیان نهاده شده است. بنابراین تمام اجزای اجسامی که از اجزای مختلف تشکیل شده باشند در نتیجه این آنالیز آشکار خواهند شد. در آزمایشاتی که در آزمایشگاه های مغزه صورت می گیرد نتایج آنالیز سی تی اسکن به دو صورت تصویری و عددی ارائه می شود که نتایج تصویری نمایانگر کیفی مغزه و اعداد نمایانگر کمیت همان تصاویر است که برای محاسبات مختلف از آنها استفاده می شود. با توجه به این که ضریب تضعیف خطی و عدد سی تی (واحد هانسفیلد) در انواع کانیها و مایعات مختلف متفاوت است، می توان در باره نوع و مقدار کانی ها، سیال و تخلخل نظر داد. همچنین ساختهای رسوبی اولیه، ساختار موجود و نوع تخلخل را نشان می دهد. اگر زمان نیز به آزمایشات اضافه گردد یعنی در طول زمان تزریق سیال سی تی اسکن صورت گیرد می توان تراوایی نسبی و چگونگی حرکت سیالات در نمونه را نیز بدست آورد.

ابتدا در سال ۱۹۷۰ سی تی اسکن در علوم پزشکی مورد استفاده قرار گرفت. اخیراً در صنعت نفت از آن برای مطالعات پتروفیزیکی و مهندسی مخزن استفاده شده است (Wellington and Vinegar, 1987).

مطالعات بعدی در سنگ های مخزن توسط (Fransham and Jelen, 1987; Want et al. 1985) صورت گرفت. سی تی اسکن

همچنین برای مطالعه زغالها در ماسه های نفتی بکار برده شد (Maylotte et al. 1986).

ژاپنی ها از سی تی اسکن در محدوده وسیعی در آنالیز رسوبات سست برای مطالعه ساختار داخلی یخهای دریایی و

(Kawamara, 1988) چندین محقق برای ارزیابی غیرتهاجمی خاکها از سی تی اسکن استفاده کردند. آنها چگالی کلی خاک و مقدار

آب آن را با استفاده از این روش محاسبه نمودند. (Petrovic et al. 1982; Anderson et al. 1988).

در علوم دیرینه شناسی و باستان شناسی سی تی اسکن بطور ویژه ای مورد استفاده قرار گرفت.

دارای اعداد سی تی متفاوتی هستند.

همچنان که در شکل شماره ۱۰ مشاهده می شود، کراس پلات چگالی در مقابل عدد سی تی برای کانیهای مختلف متفاوت است که به ما این امکان را می دهد که نوع کانیها را تشخیص دهیم.

کانیهای چگال کوچکتر عدد سی تی پایین تری نسبت به درشتهای همجنس خود نشان می دهند. زیرا کانیهای کوچکتر تحت تاثیر کانیهای کم چگال اطراف هستند. در نمونه هایی که از نظر لیتولوژی همگن هستند عدد سی تی بیشتر تحت تاثیر تخلخل و ریز تخلخل قرار دارد در حالی که در نمونه های ناهمگن از نظر لیتولوژی عدد سی تی تحت تاثیر کانی شناسی است.

شکل شماره ۱۱ تاثیر توام کانی شناسی و شکاف در عدد سی تی را نشان می دهد.

### ساختر داخلی

تصاویر سی تی مقاطع نازک بدون تخریب سنگ هستند که مطالعه ساختار داخلی را در جهات مختلف امکان پذیر می سازند که در مقاطع واقعی از سنگ این امکانات وجود ندارد. در کل ساختارهایی در سنگ قابل مشاهده است که اندازه آنها از اندازه پیکسل انتخاب شده برای اسکن کردن بزرگتر باشد و ساختارهای کوچکتر از اندازه پیکسل دیده نمی شوند و حتی باعث ایجاد خطا در تشخیص سایر ساختارهای گردند (با تاثیری که در مقادیر سی تی می گذارند ولی خود دیده نمی شوند).

تصاویر حاصل از عمل سی تی اسکن می تواند در محدوده ای از رنگ خاکستری که توسط چشم قابل دید باشد تنظیم شود که نوع لیتولوژی و ساختارها را نشان دهد. همچنین می توان بخشی از تصاویر

### تعیین چگالی

بر اساس مقدار انرژی دو نوع برهمکنش در برخورد اشعه ایکس با مواد رخ می دهد که برهمکنش کامپتون بعنوان برهمکنش اصلی عمل می کند. در این برهمکنش مقدار جذب اشعه توسط اجسام با چگالی اتمی جسم کنترل می شود. بنابراین با استفاده از مقدار تضعیف اشعه ایکس و در نتیجه مقدار واحد هانسفیلد می توان چگالی اجسام را محاسبه کرد (شکل ۹):

$$H = -100 + \alpha \cdot \rho$$

$\rho$ : چگالی جسم

$\alpha$ : ضریب وابسته به کانی شناسی

H: واحد هانسفیلد

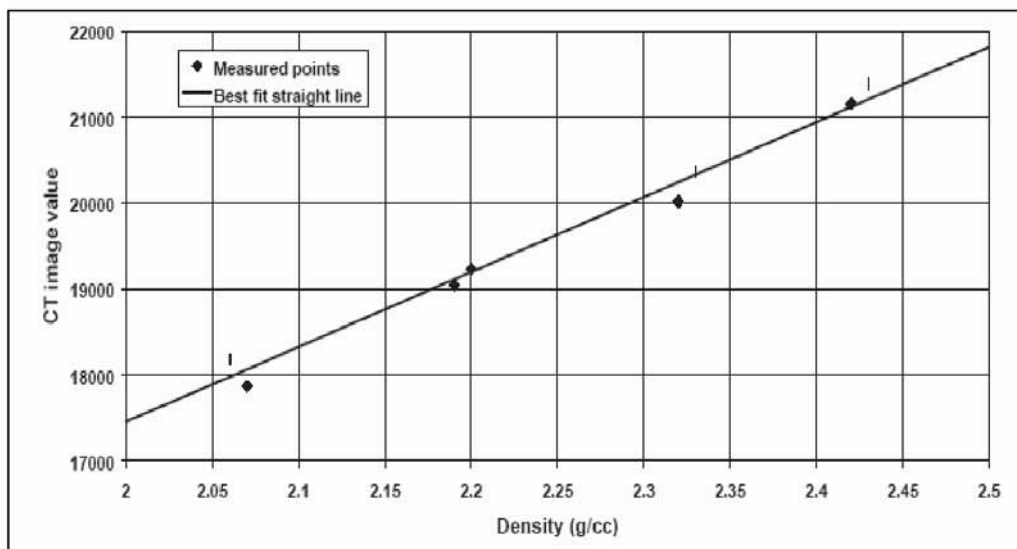
این فرمول در حالتی است که عدد سی تی آب -۷۰۰ باشد (SuzanneRaynaud, ۱۹۸۹).

فرمول زیر چگالی را در وکسل به اندازه  $0.6 \times 0.6 \times 5 \text{ mm}$  و با استفاده از کالیبره با شش نوع بنتونیت با چگالیهای مختلف را به دست می دهد:

$$\text{Density} = \frac{CT\text{value}}{1250} + 1.0 (R^2 = 0.902)$$

### تعیین لیتولوژی

در صورت وجود عدد سی تی یا هانسفیلد ترکیبات مختلف (کانیهای مختلف) در سنگ ها، می توان با استفاده از عدد بدست آمده از دستگاه، نمونه های مختلف را از نظر کانی شناسی از هم تشخیص داد. همان طور که در جدول زیر آمده کانیهای مختلف با توجه به اختلاف چگالیشان



شکل ۹- نمودار کراس پلات عدد سی تی در مقابل چگالی

رادر حالت دو و سه بعدی حذف و بخش های مورد نیاز را انتخاب کرد. مثلا تصاویر حاصل از عدد سی تی مایعات را نشان داد که مقدار تخلخل و ارتباط آنها با هم و شکلشان قابل مشاهده گردد.

شکستگی از پدیده های مهم در صنعت نفت می باشد که تشخیص، جهت، پهنا و پراکندگی آن کمک فراوانی به اکتشافات و باز یافت ثانویه می کند. در رسوبات سنگ نشده اولیه می توان ساختارهای رسوبی را با این روش مورد شناسایی و بررسی قرار داد.

شکل تخلخل ها نیز با استفاده از نرم افزارهای خاص مورد ارزیابی قرار می گیرد بدین صورت که سه قطر بیضی با سه قطر تخلخل مقایسه می شود.

در کل می توان گفت با استفاده از تصاویر حاصل از روش سی تی اسکن ساختار داخلی سنگ از قبیل شکستگی ها، نوع تخلخل، ارتباط تخلخل ها با هم و گسترش آنها را مشاهده کرد که توسط نرم افزارها انجام می شود.

### تخلخل

با توجه به اینکه تخلخل ها از مایعات و گازها پر می شوند و ضریب تضعیف و عدد سی تی برای سیالات و جامدات اختلاف زیادی دارد در نتیجه براحتی می توان تخلخل را از این روش بدست آورد. در این روش تمام تخلخل موجود در سنگ که از آب، نفت و گاز پر شده اند (جز ریز تخلخل های کوچکتر از پیکسل) نشان داده می شود:

$$\Phi = \frac{(CT_{wm} - CT_{am})}{(CT_w - CT_a)}$$

$CT_{wm}$ : عدد سی تی نمونه صد درصد اشباع از آب

$CT_{am}$ : عدد سی تی نمونه خشک

$CT_a$ : عدد سی تی هوا

$CT_w$ : عدد سی تی آب

از فرمول خلاصه شده زیر نیز می توان

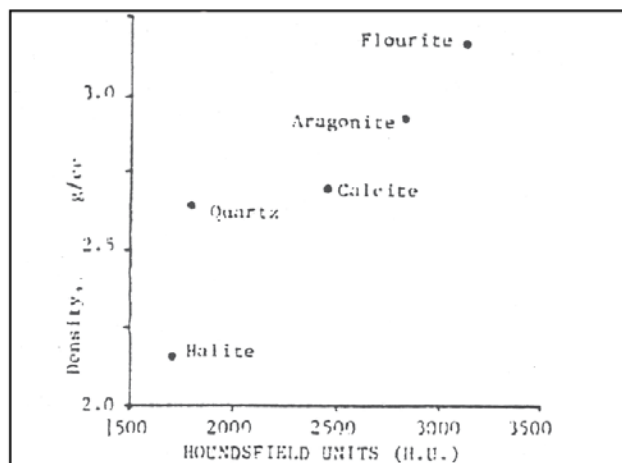


Fig. 1—Crystalline solid density crossplot.

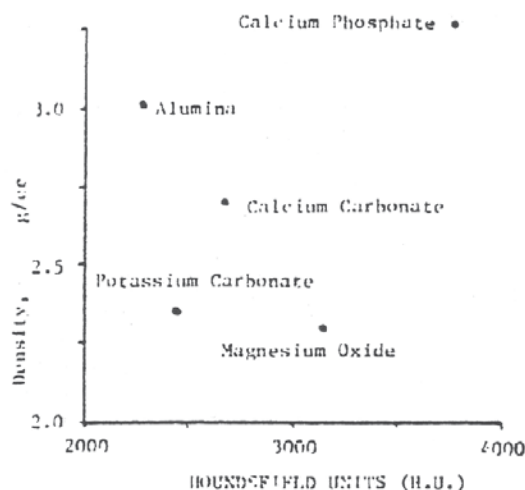
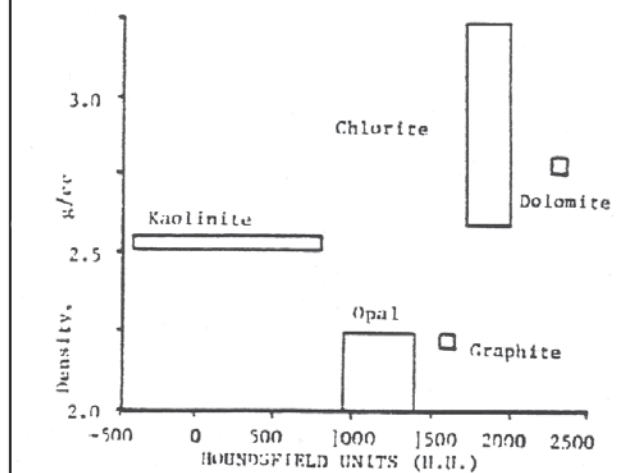


Fig. 2—Randomly oriented crystalline grain density crossplot.



شکل ۱۰- نمودار کراس پلات چگالی در مقابل واحد هانسفیلد برای انواع کانی ها

تخلخل را محاسبه کرد:

$$H = A - a.n$$

n: تخلخل

H: عدد هانسفیلد حاصل از دستگاه

سی تی اسکنر

A: عدد هانسفیلد سنگ بدون تخلخل

a: ضریب وابسته به کانی شناسی

برای آهک ها و ماسه سنگ ها مقادیر اعداد

ثابت (a,A) تعیین می شوند.

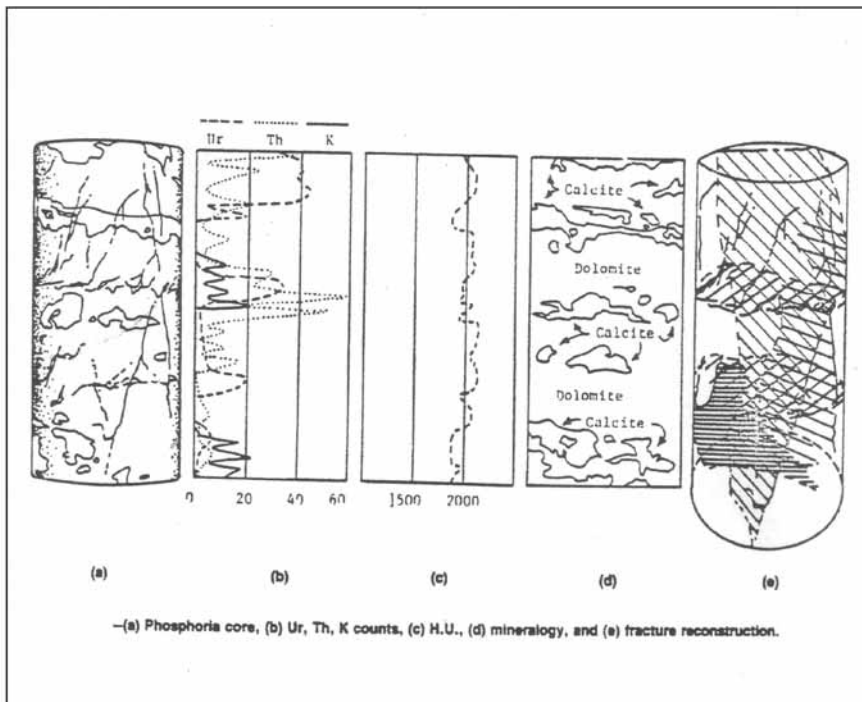
آنچه که مهم به نظر می آید این است که تخلخلهای درشت تر از اندازه و کسل، در آزمایش سی تی اسکن مشاهده می شوند. بنابراین تخلخل حاصل از سی تی اسکن همیشه کمتر از تخلخل آزمایشگاهی است. با استفاده از این خاصیت، می توان از وکسل ها در آنها استفاده کرد و درصد تخلخل در آنها را بدست آورد.

همچنین محاسبه و پیش بینی تراوایی با استفاده از آنالیز عدد هانسفیلد در شکل شماره ۱۲ نشان داده شده است.

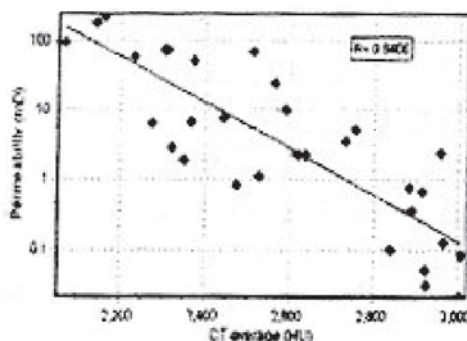
## اشباع شدگی

با توجه به این که عدد سی تی سیالات و جامدات اختلاف زیادی باهم دارند بنابراین براحتی از هم تمیز داده می شوند. اما به خاطر نزدیکی چگالی آب و هیدروکربور تشخیص این دو از هم سخت است. در آزمایش هایی که در آزمایشگاه تزریق صورت می گیرد با اضافه کردن موادی به آب اختلافات جذب اشعه را زیاد کرده و از هم تشخیص می دهند. اما در نمونه های بدست آمده از چاه برای محاسبه مقدار آب و هیدروکربور با تغییرات در مقدار انرژی اشعه ایکس می توان به زحمت آنها را از هم باز ساخت.

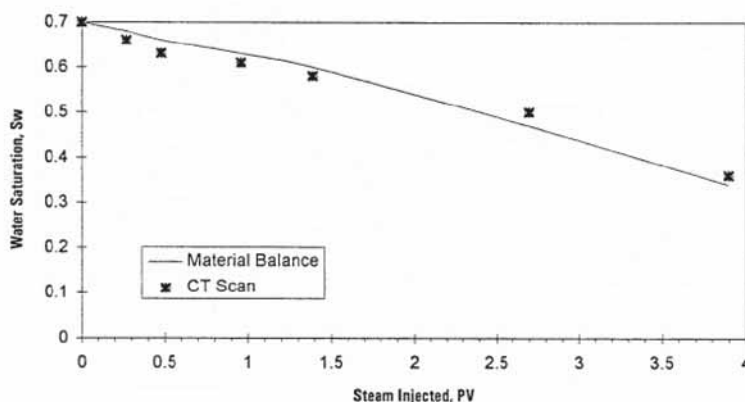
اگر عمل سی تی اسکن هنگام تزریق صورت گیرد می توان اشباع شدگی فازهای مختلف را در زمانهای مختلف بدست آورد و مکانیسم حرکت سیالات را مورد بررسی قرار داد. بدین ترتیب که نمونه، از هیدروکربور اشباع



شکل ۱۱- تائیر ترکیبی کانی شناسی و ساختارهایی مثل شکاف بر عدد هانسفیلد



شکل ۱۲- مقایسه تراوایی حاصل از روش آزمایشگاهی و بدست آمده از عدد سی تی (حسن زاده، ۲۰۰۵)



شکل ۱۳- آب اشباع شدگی حاصل هنگام تزریق آب در دوروش آزمایشگاهی و عدد سی تی

## منابع

- Toshiya, O., Hiroshi, O., 2000. EARLY WATER BREAKTHROUGH IN CARBONATE CORE SAMPLES VISUALIZED WITH X-RAY CT Japan National Oil Corporation, (SCA-08)
- Juichiro, A., 1997. COMPUTED TOMOGRAPHY SCAN IMAGE ANALYSIS OF SEDIMENTS. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 156
- DEMIR, M., 2001. EFFECT OF PORE SIZE DISTRIBUTION ON POROSITY MEASUREMENT BY COMPUTURIZED TOMOGRAPHY. Middle East Technical University
- Ebrahim Hassanzadeh, S. Saleh Hendi, 2003. A METHOD FOR ESTIMATING PERMEABILITY OF CARBONATE ROCKS FROM CT SCAN DATA International Symposium of the Society of Core Analysts held in Pau, France, 21-24 September
- A. Moctezuma-Berthier, 1,3, O. Vizika, P.M. Adler, 2003. CORE RECONSTRUCTION FROM CT SCAN POROSITY FIELDS. International Symposium of the Society of Core Analysts held in Pau, France, 21-24 September
- Walters, D.A., Wong, R. C. K., Kantzas, A., 1998. The Application of Computer-Assisted Tomography in the Analysis of Fracture Geometry. American Society for Testing and Materials
- Barry M. Freifeld, Timothy J. Kneafsey, Investigating Methane Hydrate in Sediments using X-Ray Computed Tomography. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA
- Gerardo J. Iturrino, David Goldberg, Richard Ketcham, Integration of Core and Downhole Images in the San Andreas Fault Zone. Department of Geological Sciences, University of Texas-Austin, Austin, TX 78712
- Dr Stephen F Burch, Measurement of density variations in Compacted Parts using X-ray Computerized Tomography. AEA Technology plc
- Avrami Grader, R. P. (Bob) Kehl, 2000. Petrophysical Core Analysis with X-ray and MRI Tomography: Visualization using PV-Wave and Data Explorer. Pennsylvania State University
- Bakul C. Sharma, William E. Brigham, Louis M. Castanier, 1997. CT Imaging Techniques for Two-Phase and Three-Phase In-Situ Saturation Measurements. U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Fossil Energy
- Tomoyuki Ohtani, Yoshito Nakashima, Tsukasa Nakano and Hirofumi Muraoka, 2000. X-RAY CT IMAGING OF PORES AND FRACTURES IN THE KAKKONDA GRANITE, NE JAPAN Geological Survey of Japan, Higashi, Tsukuba, 305-8567

از آب

$CT_o$ : عدد سی تی نمونه صد در صد اشباع از نفت

$CT_{wo}$ : عدد سی تی نمونه اشباع از آب و نفت

$S_w$ : اشباع شدگی آب

$S_o$ : اشباع شدگی نفت

برای بدست آوردن  $CT_w$  نمونه صد در صد اشباع از آب با اشعه ایکس اسکن می شود و مقدار حاصل  $CT_w$  را نشان می دهد. برای بدست آوردن  $CT_o$  نمونه را با تزریق نفت به حالتی رسانده که فقط آب کاهش نیافتنی ( $Connate\ Water\ Saturation$ ) باقی بماند. در این حالت نمونه اشباع از آب کاهش نیافتنی و بقیه نفت می باشد. در این موقع نمونه را اسکن کرده و از طریق فرمول زیر  $CT_o$  را محاسبه می شود:

$$CT_w \cdot S_{wc} + CT_o \cdot (1 - S_{wc}) = CT_{swc}$$

$CT_{swc}$ : عدد سی تی نمونه در حالت اشباع از آب کاهش نیافتنی و نفت است.

$S_{wc}$ : مقدار اشباع آب کاهش نیافتنی است که می توان از تفریق آب خارج شده بعد از تزریق نفت از اشباع آب صد در صد بدست آورد.

شده و سپس تزریق آب انجام می گیرد که در زمانهای مختلف تزریق می توان اشباع شدگی دو سیال را اندازه گیری کرد. در حالت سه بعدی نیز همین روش انجام می گیرد (شکل ۱۳).

نحوه عمل بدین صورت است که نمونه های حاوی نفت و آب را توسط دستگاه سی تی اسکنر تحت آزمایش قرار داده و اعداد سی تی هر و کسل، بدست می آید. برای هر و کسل از نمونه معادله ای نوشته می شود که نشان می دهد تضعیف اشعه ایکس ناشی از تاثیر ترکیبی نفت، آب و ماتریکس است. معادله زیر مشاهده می شود که اشباع شدگی حاصل از عدد سی تی برای یک سیستم شامل نفت و آب بطور خطی با مقادیر اشباع هر کدام ارتباط می یابد:

$$CT_w \cdot S_w + CT_o \cdot S_o = CT_{wo}$$

$$S_w + S_o = 1$$

$$\Rightarrow S_o = \frac{CT_{wo} - CT_w}{CT_o - CT_w}$$

$CT_w$ : عدد سی تی نمونه صد در صد اشباع

جدول ۱- انواع کانیها را از نظر ترکیب، چگالی و عدد سی تی متناظر آنها را نشان می دهد

Mineral	Idealized Formula	Mass Density (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	CT Number (HU)
Quartz	SiO <sub>2</sub>	2.65	0.448	1275
Muscovite	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	2.83	0.490	1323
Hedenbergite	CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3.63	0.823	2005
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	2.71	0.530	1384
Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2.87	0.513	1357
Microcline	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.56	0.452	1279
Rutile	TiO <sub>2</sub>	4.25	0.955	2326
Diopside	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3.23	0.601	1513
Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.62	0.436	1266
Fayalite	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	4.39	1.22	2993
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.22	1.62	4000