

### سوخت‌ها

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل، از فراگیر انتظار می‌رود که بتواند:

- ۱- منابع مختلف انرژی را بیان کند.
- ۲- عمل احتراق را توضیح دهد و احتراق کامل را تعریف کند.
- ۳- شرایط احتراق کامل سوخت‌های فسیلی را بیان کند.
- ۴- واکنش‌های مربوط به احتراق کامل و احتراق ناقص را بنویسد.
- ۵- ترکیب سوخت‌ها و درصد اجزای آن‌ها را بنویسد.
- ۶- حجم هوای لازم برای احتراق سوخت و قدرت حرارتی سوخت‌ها را با در نظر گرفتن ترکیب آن‌ها حساب کند.
- ۷- محاسبات مربوط به سوخت‌ها را انجام دهد.

### ۳- سوخت‌ها

#### ۳-۱- منابع انرژی

تأمین گرما و ایجاد دمای لازم برای ذوب فلزات و آلیاژها همواره به مقداری انرژی نیاز دارد. منابع انرژی متعددی وجود دارد که با تبدیل آن‌ها به گرما می‌توان این منظور را عملی کرد. در شرایط فعلی، مهمترین این منابع عبارتند از: انرژی الکتریکی و انرژی شیمیایی سوخت‌ها که در این فصل محاسبات مربوط به انواع سوخت‌ها و کیفیت تبدیل انرژی شیمیایی آن‌ها به انرژی گرمایی، مطالعه و بررسی می‌شود.

چون گرما، یکی از شکل‌های مختلف انرژی است، لذا می‌توان آن را از تغییر شکل دادن سایر

انواع انرژی نیز به دست آورد. مثلاً توسط سیستم‌های نوری می‌توان تشعشعات خورشید را متمرکز و گرما و دمای زیادی تولید کرد. در حقیقت، خورشید یکی از بزرگترین منابع انرژی جهان (در منظومه شمسی) است که می‌تواند در هر ثانیه  $3/7 \times 10^{23}$  کیلوکالری انرژی به صورت تابشی در فضا پخش کند. از این مقدار انرژی، فقط یک ده‌هزار میلیونیم آن را سطح کره زمین دریافت می‌کند و با اینکه این انرژی، در برابر تمامی انرژی تشعشعی خورشید، بسیار کوچک است، معادل شش تا ده برابر کل انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی<sup>۱</sup> موجود در جهان (نفت، گاز طبیعی، زغال سنگ و مشتقات آن‌ها) در هر سال است. نوع دیگری از انرژی که از اوایل قرن بیستم میلادی تاکنون توسعه زیادی یافته است انرژی اتمی و هسته‌ای است (در یک پیل اتمی، چنانچه هسته‌های اتم یک عنصر ناپایدار و سنگین، مانند اورانیم، متلاشی شوند، مقدار زیادی انرژی به صورت نور و گرما آزاد می‌شود).

امروزه به منابع انرژی خورشیدی و هسته‌ای توجه کافی معطوف شده است و سعی شده است تا از سوخت‌های آلی، و به خصوص نفت، در صنایع پتروشیمی، دارویی و غذایی (تهیه پروتئین از نفت) استفاده به عمل آید. با این حال تأکید این نکته ضروری است که سوخت‌های فسیلی و سایر سوخت‌های آلی، هنوز مهمترین و پر مصرفترین ماده برای تأمین انرژی مورد نیاز صنایع را تشکیل می‌دهند. سوخت‌های فسیلی منشأ گیاهی و حیوانی داشته‌اند و احتمالاً از تجزیه شیمیایی اندام‌های حیوانات و گیاهانی که در دوران‌های گذشته زمین، در دریاها ته‌نشین شده بودند تشکیل شده‌اند. قسمت اعظم سوخت‌ها را عناصر کربن و نئیدروژن تشکیل می‌دهند و معمولاً عناصر اکسیژن، نیتروژن و گوگرد نیز در آن‌ها وجود دارند.

انتخاب هر یک از انواع سوخت‌ها و بررسی قوانین کمی و شرایط کیفی احتراق<sup>۲</sup> آن‌ها (ترکیب با اکسیژن و هوا) در صنعت ذوب فلزات و ریخته‌گری از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا با توجه به شرایط اقتصادی و اصول طراحی و تولید قطعات، می‌توان از اتلاف حرارتی آن‌ها در حد امکان جلوگیری کرد.

## ۳-۲ - شرایط احتراق کامل سوخت

احتراق عبارت است از اکسیداسیون سریع عناصر موجود در سوخت که معمولاً با شعله همراه است و گرمای قابل استفاده‌ای تولید می‌کند. به عبارت دیگر احتراق فعل و انفعالی است شیمیایی توأم

با نور و گرما که به آسانی بین اکسیژن و عناصر سوخت انجام می‌گیرد. چنانچه این نور و حرارت همراه با فشار و تراکم گازهای حاصله باشد، به آن انفجار<sup>۱</sup> می‌گویند.

اغلب سوخت‌ها از کربن و نئیدروژن تشکیل شده‌اند؛ لذا محصولات احتراق، عبارت خواهند بود از گاز انیدرید کربنیک (دی اکسید کربن) و بخار آب.

احتراق کامل یک سوخت، هنگامی انجام می‌گیرد که تمام عناصر قابل احتراق آن، کاملاً بسوزند و به آخرین حد اکسیداسیون خود برسند. چنانچه احتراق کامل باشد، گرمای تولید شده، حداکثر است. به همین علت، همواره باید سعی کرد تا شرایط لازم برای این عمل فراهم شود. این شرایط عبارتند از:

۱-۲-۳- تماس کامل سوخت با اکسیژن: هرچه سطح تماس سوخت با اکسیژن (یا هوا) بیشتر باشد، احتراق سریعتر و بهتر انجام می‌گیرد، زیرا در هر لحظه، مقدار اکسیژن بیشتری با سوخت در ارتباط است (برخورد و تماس ملکول‌های سوخت و اکسیژن زیادتر است). سوخت‌های گازی، چون به مراتب بهتر از سوخت‌های مایع با اکسیژن و هوا مخلوط می‌شوند، با سهولت بیشتری می‌سوزند و همین مشخصه برای سوخت‌های مایع نسبت به جامد نیز وجود دارد. سوخت‌های جامد را در اندازه‌های مناسب خرد می‌کنند تا احتراق به نحو مطلوب انجام گیرد و در این حال، اگر سوخت جامد را نیز کاملاً پودر و با هوا مخلوط کنند، احتراق آن، به شرایط مخلوط سوخت گازی و هوا نزدیک می‌شود. در کوره‌های با سوخت مایع نیز به کمک مشعل<sup>۲</sup> (سوخت پاش) و فشار هوای دم<sup>۳</sup>، سطح تماس سوخت و هوا را افزایش می‌دهند.

اندازه ذرات، به وسیله روش‌های مختلفی سنجیده می‌شود که یکی از آن‌ها تعیین سطح نسبی یا «مدول سطحی» است که نسبت سطح به حجم متوسط ذرات را مشخص می‌کند. هر قدر مدول سطحی بزرگتر باشد، واکنش پذیری بیشتر است.

$$\text{مدول سطحی} = \frac{\text{سطح متوسط}}{\text{حجم متوسط}} \Rightarrow M_a = \frac{A}{V}$$

مثال: قطر متوسط ذرات یک سوخت که به شکل کروی و تقریباً هم حجم فرض شده‌اند برابر ۱۲۰ میکرون است. مدول سطحی ذرات این سوخت را تعیین کنید. چنانچه قطر این ذرات ۵ برابر کوچک شود، مدول سطحی آن‌ها چند برابر افزایش می‌یابد؟

حل: شعاع متوسط هر ذره برابر است با: میکرون  $60 = r = \frac{120}{2}$  بنابراین با توجه به سطح و حجم کره می توان نوشت:

$$M_a = \frac{A}{V} \Rightarrow M_a = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3}{r}$$

$$M_a = \frac{3}{60} = 0.05 \frac{1}{\text{میکرون}} \quad \text{مدول سطحی ذرات سوخت}$$

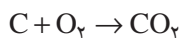
اگر قطر هر ذره ۵ برابر کوچک شود، شعاع آن نیز به همین نسبت کوچک خواهد شد بنابراین با توجه به اینکه:  $M_a = \frac{3}{r}$  است، مدول سطحی، افزایش می یابد و احتراق سوخت بهتر می شود:

$$M_a = \frac{3}{\frac{60}{5}} = \frac{15}{60} = 0.25 \frac{1}{\text{میکرون}}$$

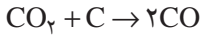
یعنی مدول سطحی به اندازه  $5 = \frac{0.25}{0.05}$  برابر بزرگ می شود.

لازم به توضیح است که اندازه قطعات و شکل آن ها، چه در مورد سوخت ها و چه در مورد قطعات بار (شارژ مصرفی) در ذوب فلزات، در سرعت واکنش های شیمیایی تأثیر دارند و در حالی که کوچکی اندازه در مورد سوخت ها مطلوب است، در مورد قطعات بار، نباید از حدّ معینی کمتر باشد، زیرا در این صورت، سطح نسبی آن ها افزایش می یابد و در نتیجه، سرعت واکنش ها، حجم سرباره و تلفات فلزی افزایش می یابد. به همین دلیل در ریخته گری در صورت لزوم، انواع براده و سوفاره را فشرده می کنند و به صورت بریکت<sup>۱</sup> (خسته) در کوره بار می کنند.

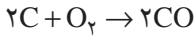
**۲-۳- کافی بودن اکسیژن:** برای سوختن کامل، همواره لازم است که مقدار اکسیژن به اندازه کافی در محیط احتراق وجود داشته باشد. مثلاً در احتراق کربن، در صورتی که مقدار اکسیژن کافی نباشد ابتدا مقداری از کربن با تمامی اکسیژن ترکیب می شود و گاز  $CO_2$  تولید می کند:



این فعل و انفعال تولید گرما می کند (واکنش گرمازا) در نتیجه، درجه حرارت کربن و محیط احتراق بالا می رود و دی اکسید کربن حاصل، با کربن باقی مانده، ترکیب می شود که نتیجه آن، گاز منواکسید کربن است:

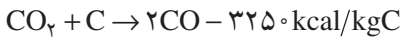


از جمع دو فعل و انفعال مذکور واکنش احتراق ناقص کربن به دست می‌آید:



این نوع احتراق کربن علاوه بر آنکه گاز سمی و خطرناک CO تولید می‌کند، مقدار حرارت کمتری نیز ایجاد می‌کند.

مثال: برای احتراق ۲۴ کیلوگرم کربن ۳۳/۶ متر مکعب اکسیژن وجود دارد، با توجه به واکنش‌های داده شده، درصد گاز CO به CO<sub>2</sub> حاصل و همچنین کاهش گرمای حاصله را نسبت به هنگامی که احتراق، کامل انجام گرفته باشد تعیین کنید.



حل: ابتدا با تشکیل چند تناسب، درصد گاز CO به CO<sub>2</sub> را محاسبه می‌کنیم:

CO<sub>2</sub> دی‌اکسید کربن    O<sub>2</sub> اکسیژن    C کربن

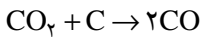
$$12 \text{ kg} \quad 22/4 \text{ m}^3 \quad 22/4 \text{ m}^3$$

$$x \quad 33/6 \quad y$$

$$x = \frac{33/6 \times 12}{22/4} = 18 \text{ kg} \quad \text{کربن سوخته در مرحله اول}$$

$$y = \frac{22/4 \times 33/6}{22/4} = 33/6 \text{ m}^3 \quad \text{دی‌اکسید کربن حاصل}$$

$$24 - 18 = 6 \text{ kg} \quad \text{کربن باقی‌مانده}$$



2CO منواکسید کربن    C کربن    CO<sub>2</sub> دی‌اکسید کربن

$$22/4 \text{ m}^3 \quad 12 \text{ kg} \quad 2 \times 22/4 \text{ m}^3$$

$$x \quad 6 \quad y$$

$$x = \frac{22/4 \times 6}{12} = 11/2 \text{ m}^3 \quad \text{گاز دی‌اکسید کربن مصرف شده}$$

$$y = \frac{6 \times 2 \times 22/4}{12} = 22/4 \text{ m}^3 \quad \text{گاز منواکسید کربن}$$

$$33/6 - 11/2 = 22/4 \text{ m}^3 \quad \text{گاز دی‌اکسید کربن باقی‌مانده}$$

$$\frac{CO}{CO_2} \times 100 = \frac{22/4}{22/4} \times 100 = 100\% = \text{درصد گاز منواکسیدکربن به گاز دی‌اکسیدکربن}$$

اگر کربن احتراق کامل داشت، به ازای هر کیلوگرم کربن  $8090$  کیلوکالری حرارت حاصل می‌شد.

$$24 \times 8090 = 194160 \text{ kcal} \text{ حرارت حاصل از احتراق کامل}$$

$$18 \times 8090 = 145620 \text{ kcal} \text{ حرارت حاصل از احتراق کامل قسمتی از کربن}$$

$$6 \times 3250 = 19500 \text{ kcal} \text{ حرارت مصرف شده در مرحله دوم}$$

$$145620 - 19500 = 126120 \text{ kcal} \text{ حرارت حاصل}$$

$$\frac{126120}{194160} \times 100 = 64.96 \approx 65\% \text{ نسبت گرمای حاصله، در مقابل احتراق کامل}$$

**۳-۲-۳- درجه حرارت احتراق:** هر سوخت برای احتراق، به یک درجه حرارت حداقل نیاز دارد که آن را درجه حرارت احتراق یا درجه حرارت اشتعال می‌نامند. مثلاً در شرایط معمولی محیط، نفت سفید در درجه حرارت  $15^\circ$  درجه سانتی‌گراد مشتعل می‌شود. سوخت‌هایی با درجه حرارت اشتعال پایین، از نظر ایمنی نمی‌توانند در ریخته‌گری مورد مصرف واقع شوند (به عنوان مثال برای رنگ کردن قالب، به جای بنزین می‌توان از الکل به همراه گرافیت استفاده کرد). بعضی مواد حتی در درجه حرارت محیط نیز به سرعت مشتعل می‌شوند که از آن جمله می‌توان به فسفر قرمز اشاره کرد و به همین منظور، آن را دور از هوا و تحت لایه‌های آب یا روغن نگهداری می‌کنند (یا نگاهداری Na و Li در روغن). افزایش فشار محیط و یا فشار در انبار و تانکر باعث تنزل درجه حرارت اشتعال می‌شود و به همین دلیل در اثر فشار و تراکم مخلوط سوخت و هوا احتراق سریع‌تر انجام می‌گیرد (موتورهای دیزلی).

در خاتمه مطالب این قسمت، باید اضافه کرد که به طور کلی، اجسام و عناصری که در یک واکنش اکسیدی حرارت ایجاد می‌کنند (گرمازا) می‌توانند نوعی سوخت محسوب شوند. ولی آنچه که در صنایع حرارتی به عنوان سوخت به کار می‌رود باید دارای شرایطی باشند که عبارتند از: شرایط ایمنی احتراق، شرایط اقتصادی (و فور و قابل دسترس بودن آن)، امکان انتقال و امکان انبارسازی. به طور مثال، بنزین یکی از انواع سوخت‌های مرغوب و با قدرت حرارتی مناسب محسوب می‌شود. ولی استفاده از آن، فقط در یک محیط مسدود نظیر سیلندر موتورهای احتراق داخلی مجاز است. شرایط اقتصادی انتخاب سوخت نیز به فراوانی و ارزانی آن بستگی دارد. علاوه بر آن، امکان استفاده از سوخت، در صورت‌های دیگر نیز می‌تواند عامل شرایط اقتصادی را ضعیف کند. به طور مثال امروزه از چوب در صنایع کاغذسازی و تزئینات استفاده می‌کنند و به عنوان سوخت، چوب فقط

در راه اندازی کوره تازه ساخته شده و یا رطوبت‌گیری آن «کوره کویل» و یا پیش‌گرم کردن کوره و احتراق اولیه به مقدار کمی به کار می‌رود.

انتقال سوخت نیز از نکات عمده دیگر است، به طور مثال انتقال سوخت‌های مایع و گازی از طریق لوله، نسبت به سوخت‌های جامد، با سهولت انجام می‌گیرد و علاوه بر آن نیروی انسانی و وسایل کمتری در انتقال آن‌ها مورد نیاز است. سیستم انبارسازی و ایمنی از خطرات ناشی از اشتعال بی‌مورد آن‌ها نیز از اهمیت زیادی برخوردار است و در این حال، سوخت‌های جامد و سوخت‌های با درجه اشتعال بالاتر، مطلوب‌تر هستند.

علاوه بر نکات مذکور، کنترل احتراق و تأمین درجه حرارت لازم و کنترل محیط احتراق (از نظر محیط‌های اکسیدان، خنثی و یا احیایی) یکی از عوامل مؤثر در انتخاب سوخت است. با توجه به توضیحات داده شده مشخص می‌شود که انواع سوخت‌های گازی طبیعی در ایران، به دلایل، وفور و ارزانی شرایط انتقال و نیاز نداشتن به انبارسازی در داخل کارخانه و کارگاه و شرایط کنترل مطلوب، بر سایر سوخت‌ها ترجیح دارند.

### ۳-۳ - دسته‌بندی سوخت‌ها

به طور کلی تمام سوخت‌های آلی و فسیلی را می‌توان به دو گروه طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی کرد که هر گروه نیز به سه دسته سوخت‌های جامد، مایع و گاز طبقه‌بندی می‌شود.

از مهمترین سوخت‌های جامد طبیعی، چوب و زغال سنگ و از مهمترین سوخت‌های جامد مصنوعی، کک، زغال چوب و بریکت را می‌توان نام برد. انواع و اقسام نفت‌های استخراجی، سوخت‌های مایع طبیعی را تشکیل می‌دهند که در حقیقت، نوعی تبدیل و تغییر شکل زغال سنگ‌ها هستند که در شرایط خاص و وجود عوامل حیوانی، به صورت مایع درآمده‌اند. الکل‌ها و محصولات تقطیر نفت طبیعی مانند بنزین، نفت سفید و گازوئیل از سوخت‌های مایع مصنوعی به شمار می‌آیند.

گاز طبیعی چاه‌های نفت و گاز معادن زغال سنگ، در دسته سوخت‌های گازی طبیعی، قرار می‌گیرند. در حالی که سوخت‌های گازی ساختگی، دامنه وسیعی دارند و مشتمل بر گاز کوره‌های بلند ذوب آهن، گاز تقطیر زغال سنگ، محصولات گازی کراکینگ (شکسته شدن ملکول‌های بزرگ و تبدیل آن‌ها به ملکول‌های کوچک) و گاز مولدها (دستگاه‌هایی که در آن‌ها زغال سنگ، به طور ناقص محترق شده و تولید گازهای قابل سوختن می‌کند) هستند. در جدول ۱-۳ دسته‌بندی انواع سوخت، نشان داده شده است.

### جدول ۱-۳- دسته‌بندی سوخت‌های آلی

گروه سوخت‌ها	دسته‌های سوخت	نوع سوخت
طبیعی	جامد	چوب
		زغال سنگ
	گاز	نفت‌های طبیعی
		گاز طبیعی (گاز چاه‌های نفت)
		گاز معادن زغال سنگ
مصنوعی	جامد	زغال چوب
		کک
		پریت
	مایع	محصولات تقطیر نفت
		محصولات کراکینگ نفت
		الکل‌های صنعتی
	گاز	گاز کوره بلند ذوب آهن
		کراکینگ گاز طبیعی
		گاز تقطیر زغال سنگ
		گازهای سنتز مانند: متان، بوتان و ...
		گاز مولدها: گاز هوا، گاز آب و گاز مخلوط

### ۳-۴- ترکیب سوخت

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، قسمت اعظم و سازنده اصلی سوخت‌ها را کربن و هیدروژن تشکیل می‌دهد. با این حال از نقطه نظر اشتعال و ایجاد حرارت مورد نیاز، سوخت‌ها را می‌توان ترکیبی از کربن (C)، هیدروژن (H)، اکسیژن (O)، ازت (یا نیتروژن N)، گوگرد فرآر<sup>۱</sup> (یا قابل احتراق S<sub>V</sub>)، مواد غیر قابل احتراق به نام خاکستر (A) و رطوبت (W) دانست. این مواد و عناصر، در داخل سوخت، دارای ترکیبات ساده یا پیچیده‌ای هستند که مطالعه و بررسی آن‌ها مربوط به علم شیمی است و در محاسبات فنی مورد نظر نیستند.

معمولاً ترکیب سوخت‌های جامد و مایع را بر حسب درصد وزنی و سوخت‌های گازی را



برحسب درصد حجمی محاسبه می‌کنند. بدیهی است که مجموع درصدهای عناصر و ترکیبات یک سوخت، باید همواره، صددرصد جرم (یا حجم) کل آن باشد. به عبارت دیگر:

$$C + H + O + N + S_V + A + W = 100 \quad \text{درصد}$$

این رابطه، در واقع، درصد ترکیب عناصر ساده (به استثنای خاکستر A و رطوبت W که اجسام مرکبی هستند) و مؤثر در ایجاد حرارت و عملیات احتراق سوخت را نشان می‌دهد. گوگرد در داخل سوخت‌ها ممکن است به سه شکل و ترکیب متفاوت وجود داشته باشد که عبارتند از:

الف - سولفات‌ها ( $CaSO_4$  ,  $K_2SO_4$  ,  $Na_2SO_4$ )

ب - سولفور فلزات (معمولاً پیریت به فرمول  $FeS_2$ )

ج - ترکیبات آلی

گوگرد به شکل سولفات، قابل احتراق نیست (غیر فرّار) و وارد خاکستر می‌شود. ترکیبات آلی گوگرد و همچنین گوگرد به شکل پیریت، می‌توانند محترق شوند و از این نظر، مجموعاً، گوگرد قابل احتراق سوخت را تشکیل می‌دهند. بنابراین در صورتی که گوگرد به شکل سولفور (پیریت) با  $S_p$  و به شکل ترکیبات آلی با  $S_o$  نمایش داده شود، بدیهی است که گوگرد قابل احتراق چنین خواهد بود:

$$S_V = S_p + S_o \quad \text{درصد}$$

با روش‌های تهیه مواد معدنی، دو نوع گوگرد به شکل سولفات‌ها و سولفورها قابل جدا کردن است و می‌توان با وسایلی آن‌ها را از بین برد و یا دست کم مقدارشان را به حداقل رساند (مثلاً شستشوی نفت یا زغال سنگ توسط اسیدسولفوریک) در حالی که گوگرد به شکل ترکیبات آلی در ساختمان و ترکیب شیمیایی سوخت است و به سهولت نمی‌توان آن را جدا کرد (گوگرد، عنصر مضرّی شناخته شده است و وجود آن در فلزات و آلیاژها خواص مکانیکی و متالورژیکی آن‌ها را پایین می‌آورد). معمولاً مقدار گوگرد، به شکل ترکیبات آلی، در داخل سوخت‌ها، ناچیز است. و از ۱٪ تجاوز نمی‌کند. از این نظر در محاسبات احتراق می‌توان از آن صرف‌نظر کرده و ترکیبات آلی سوخت را فقط شامل C، H، O، M دانست.

### ۵-۳- محاسبه حجم هوای لازم برای احتراق

در صورتی که در یک تجزیه کمی، درصد عناصر شرکت کننده و قابل احتراق در سوخت مانند C، H، O و  $S_V$  در دست باشد، حجم هوای لازم برای احتراق را می‌توان به سهولت

محاسبه کرد. در ابتدا، باید میزان مصرف اکسیژن برای هریک از عناصر قابل احتراق تعیین شود. سپس با توجه به آنکه ترکیب هوا مشخص است، می توان حجم یا وزن هوای لازم را به دست آورد. در جدول ۲-۳ ترکیب هوا در شرایط متعارفی برحسب درصد حجمی و همچنین درصد وزنی نشان داده شده است.

جدول ۲-۳- ترکیب هوای جو در شرایط متعارفی

مقدار		نام گاز و ترکیب شیمیایی آن	مقدار		نام گاز و ترکیب شیمیایی آن
درصد جرمی	درصد جرمی		درصد جرمی	درصد جرمی	
۰/۰۰۰۱۰۸	۰/۰۰۰۳	Kr کریپتون	۷۸/۰۹	۷۵/۵	N <sub>۲</sub> نیتروژن
۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۴	Xe گزنون	۲۰/۹۵	۲۳/۱۰	O <sub>۲</sub> اکسیژن
۶×۱۰ <sup>-۱۸</sup>	-	Rn رادون	۰/۹۳۲۵	۱/۲۸۶	Ar آرگن
۰/۰۳۰	۰/۰۴۶	CO <sub>۲</sub> دی اکسید کربن	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۲	Ne نئون
۰/۰۰۰۰۵	-	H <sub>۲</sub> هیدروژن	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۷	He هلیم

توجه: درصد بخار آب موجود در هوای جو بین ۲ تا ۴ درصد جرمی تغییر می کند. برای سهولت محاسبات احتراقی مربوط به سوخت ها، می توان گازهای نادر را که در عملیات احتراق غیرفعال هستند جزء نیتروژن (ازت) محسوب کرد. بنابراین فرض می شود که ترکیب هوا، فقط از دو عنصر نیتروژن و اکسیژن تشکیل شده باشد که در این صورت تقریباً درصد حجمی و جرمی آن ها چنین است:

	درصد جرمی	درصد جرمی
اکسیژن	۲۱	۲۳
نیتروژن	۷۹	۷۷

حتی با تقریب بیشتر می توان گفت که هوا شامل ۲۰٪ حجمی اکسیژن و ۸۰٪ حجمی نیتروژن است. به عبارت دیگر از هر ۵ واحد حجم هوا، یک واحد اکسیژن و ۴ واحد نیتروژن است.

مثال: برای احتراق کامل ۲۵ کیلوگرم از یک نوع زغال (خشک) با ترکیب و درصدهای جرمی داده شده، چند متر مکعب هوا (در شرایط متعارفی) لازم است؟ (ترکیب حجمی هوا: ۲۰٪ اکسیژن و بقیه نیتروژن در نظر گرفته می شود.) همچنین نسبت حجمی و جرمی هوای احتراقی به سوخت مصرفی را تعیین کنید.

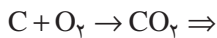
کربن ۸۲٪، ئیدروژن ۳٪، اکسیژن ۵٪، نیتروژن ۱٪، خاکستر ۹٪ (درصد مواد فرآر و گوگرد این زغال ناچیز فرض می‌شود.) چگالی هوا در شرایط متعارفی برابر است با ۱/۲۹۳ g/lit

حل: عناصر قابل احتراق در این زغال، فقط کربن و ئیدروژن هستند. بنابراین ابتدا باید جرم اکسیژن لازم و سپس حجم برای احتراق کامل آن‌ها تعیین شود:

$$۲۵ \times \frac{۸۲}{۱۰۰} = ۲۰/۵ \text{ kg} \quad \text{جرم کربن در زغال}$$

$$۲۵ \times \frac{۳}{۱۰۰} = ۰/۷۵ \text{ kg} \quad \text{جرم ئیدروژن در زغال}$$

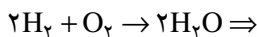
و چون احتراق به طور کامل انجام می‌گیرد، می‌توان نوشت:



$$۱۲ \text{ kg} \quad ۳۲ \text{ kg}$$

$$۲۰/۵ \text{ kg} \quad x = \frac{۲۰/۵ \times ۳۲}{۱۲} = ۵۴/۶۷ \text{ kg} \quad \text{جرم اکسیژن لازم برای احتراق کامل کربن}$$

ئیدروژن سوخت نیز محترق می‌شود و تولید بخار آب می‌کند:



$$۴ \text{ kg} \quad ۳۲ \text{ kg}$$

$$۰/۷۵ \text{ kg} \quad x = \frac{۰/۷۵ \times ۳۲}{۴} = ۶ \text{ kg} \quad \text{جرم اکسیژن لازم برای احتراق ئیدروژن}$$

در نتیجه، جرم کل اکسیژن لازم، چنین است:

۵۴/۶۷ + ۶ = ۶۰/۶۷ kg

از طرفی در سوخت، مقداری اکسیژن موجود است که باید از این مقدار کسر شود:

$$۲۵ \times \frac{۵}{۱۰۰} = ۱/۲۵ \text{ kg} \quad \text{اکسیژن موجود در سوخت}$$

$$۶۰/۶۷ - ۱/۲۵ = ۵۹/۴۲ \text{ kg} \quad \text{اکسیژن لازم که باید از هوا تأمین شود}$$

برای تعیین حجم این مقدار اکسیژن، باید یادآوری کرد که هر ملکول گرم اکسیژن (۳۲ گرم) در شرایط متعارفی ۲۲/۴ لیتر حجم خواهد داشت و اگر جرم ملکولی برحسب کیلوگرم باشد، حجم مذکور ۲۲/۴ متر مکعب منظور می‌شود:

جرم اکسیژن      حجم اکسیژن

۳۲kg

۲۲/۴m<sup>۳</sup>

$$x = \frac{۵۹/۴۲ \times ۲۲/۴}{۳۲} = ۴۱/۶m^۳$$

حجم اکسیژن لازم برای احتراق سوخت

اکنون چون ترکیب هوای جو مشخص است، می توان حجم هوای لازم را به سهولت به دست

آورد و همان طور که قبلاً ذکر شد، حجم هوا تقریباً ۵ برابر حجم اکسیژن محتوای آن است

$$\left(\frac{۱۰۰}{۲۱} \approx ۵\right)$$

$$۴۱/۶ \times ۵ = ۲۰۸m^۳$$

حجم هوای لازم برای احتراق

در عمل، با توجه به شکل، ابعاد و نوع کوره و همچنین مرغوبیت و نوع سوخت و عوامل متعدد

دیگر نظیر اکسیدان یا خنثی بودن محیط ذوب، معمولاً حجم هوا بیش از مقدار محاسبه شده قبلی

است. به همین علت این حجم را در ضریبی که بین ۱/۸ - ۱/۱ متغیر است ضرب می کنند (به عبارت

دیگر می توان گفت که سوخت با ۱۰ الی ۸۰ درصد بیشتر از هوای لازم محترق می شود). مثلاً در

صورتی که در مثال اخیر، زغال مذکور با ۳۰ درصد بیشتر از هوای لازم بسوزد، باید حجم هوای لازم

برای احتراق را در ضریب ۱/۳ ضرب کرد:

$$۲۰۸ \times ۱/۳ = ۲۷۰/۴m^۳ \text{ حجم } ۳\% \text{ اضافه}$$

نسبت حجمی هوا به سوخت و به عبارت دیگر، حجم هوای لازم، برای احتراق هر کیلوگرم

سوخت، از این کسر تعیین می شود:

$$\frac{\text{حجم هوای لازم برای احتراق (لیتر)}}{\text{جرم سوخت (کیلوگرم)}} = \frac{۲۷۰/۴ \times ۱۰۰۰}{۲۵} = ۱۰۸۰۰ \text{ lit/kg}$$
$$= ۱۰/۸m^۳/\text{kg}$$

جرم هر لیتر هوا در شرایط متعارفی برابر ۱/۲۹۳ گرم است و لذا نسبت جرمی هوا به سوخت

به سهولت از رابطه جرم و چگالی به دست می آید:

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = ۱/۲۹۳ \times ۱۰۸۰۰ = ۱۳۹۶۴/۴ \text{ گرم}$$

جرم هوای لازم برای احتراق یک کیلوگرم سوخت

نسبت جرمی هوا به سوخت

$$\frac{۱۳۹۶۴/۴}{۱۰۰۰} \approx ۱۴ \quad \text{جرم سوخت}$$

۱-۵-۳- محاسبه حجم هوا در شرایط غیر متعارفی: در محاسبه قبل شرایط احتراق، متعارفی و در فشار یک اتمسفر ( $۷۶۰$  میلی متر جیوه) و درجه حرارت صفر سانتی گراد مورد نظر بود. هرگاه، هوا در درجه حرارت غیر مشخص  $\theta$  (دمای محیط) و همچنین فشار غیر اتمسفری  $P$  در نظر گرفته شود، در این صورت بر اساس قوانین فیزیک و محاسبه مربوطه، می توان حجم هوای لازم را از این رابطه تعیین کرد:

$$V = \frac{\alpha P_0 V_0 T}{P}$$

که در آن  $V$ : حجم هوای لازم در شرایط غیر متعارفی بر حسب  $m^3$ .

$$\alpha: \text{ضریب انبساط حجمی گازها که برابر است با مقدار ثابت: } \frac{1}{273} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P: \text{فشار هوای جو: } P_0 = 760 \text{ بر حسب میلی متر جیوه (mmHg)}$$

$$V_0: \text{حجم هوای لازم در شرایط متعارفی بر حسب } m^3$$

$$T: \text{درجه حرارت کلونین: } T = 273 + \theta$$

$P$ : فشار هوای محیط که بر حسب ارتفاع کارگاه یا کارخانه، نسبت به سطح آزاد دریا، تغییر می کند بر حسب (mmHg) است. با توجه به مثال قبل، تعیین حجم هوای لازم برای احتراق کامل هر کیلوگرم سوخت، در صورتی که درجه حرارت هوا  $3^\circ\text{C}$  و فشار آن  $660 \text{ mmHg}$  باشد چنین است:

$$V_0 = 10/8 m^3 \quad \text{حجم هوا در شرایط متعارفی}$$

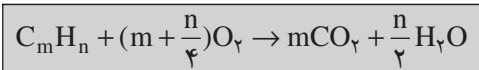
$$V = \frac{\alpha P_0 V_0 T}{P} = \frac{1}{273} \times 760 \times 10/8 \times (273 + 30) / 660 = 13/803 m^3$$

که در مقایسه با مقدار هوا در شرایط متعارفی به اندازه  $3 \approx 10/8 - 13/803$  مترمکعب (برای هر کیلوگرم سوخت) افزایش یافته است. بدیهی است که علت این امر، مربوط به ازدیاد دما و کاهش فشار هواست. به عبارت دیگر می توان گفت که در اثر این عوامل، هوا رقیق شده است و در اثر انبساط هوا، مقدار اکسیژن (تعداد ملکول های اکسیژن) در هر واحد حجم آن کاهش یافته است و از این نظر باید هوای مصرفی، بیشتر از حالت قبل باشد.

باید دانست که رطوبت هوا نیز در حجم هوای لازم برای احتراق مؤثر است. مثلاً در مناطقی

که هوا گرم و بیش از حد مرطوب باشد (نظیر مناطق شمالی و مناطق جنوبی کشور) این افزایش قابل ملاحظه است و به  $10\%$  نیز می‌رسد که لازم است آن را در محاسبات احتراقی در نظر گرفت.

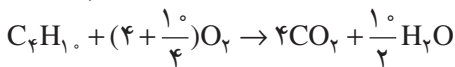
۲-۵-۳- احتراق سوخت‌های مایع و گاز: چون معمولاً ترکیب شیمیایی سوخت‌های مایع و گاز مشخص است و در اکثر موارد فقط متشکل از کربن و ئیدروژن است، لذا محاسبه حجم هوای احتراقی از فعل و انفعال آن با اکسیژن، به سهولت امکان‌پذیر است:



مثال: مطلوب است تعیین حجم هوای لازم برای احتراق کامل  $2/9$  کیلوگرم گاز بوتان با ترکیب شیمیایی  $C_4H_{10}$  (در شرایط متعارفی). ترکیب هوا عبارت است از  $21\%$  اکسیژن و  $79\%$  نیتروژن.

حل: فعل و انفعال احتراقی چنین است:

$$m = 4, n = 10$$



که پس از ساده کردن خواهیم داشت:



اکنون باید حجم اکسیژن لازم برای احتراق را تعیین کرد. جرم ملکولی این گاز برابر است با:

$$4 \times 12 + 10 \times 1 = 58 \quad \text{جرم ملکولی گاز بوتان}$$

بنابراین با تشکیل یک تناسب، می‌توان حجم مذکور را به دست آورد:

گاز بوتان                      اکسیژن

$$58 \text{ kg} \quad 6.5 \times 22.4 \text{ m}^3$$

$$2/9 \quad x = \frac{2/9 \times 6.5 \times 22.4 / 4}{58} = 7/28 \text{ m}^3 \quad \text{حجم اکسیژن}$$

$$7/28 \times \frac{100}{21} = 34/67 \text{ m}^3 \quad \text{حجم هوای لازم}$$

باید دانست که سوخت‌های گازی و مایعی که در صنایع ذوب فلزات به کار می‌روند مانند گاز طبیعی، نفت، گازوئیل، مازوت و ... دارای یک ترکیب شیمیایی خالص و منظم (مانند ئیدروکربن‌ها) نیستند و ممکن است از صدها ترکیب مختلف با جرم ملکولی مختلفی تشکیل شده باشند. ولی در هر

صورت با معلوم بودن فرمول شیمیایی یا فرمول ساده (که به کمک آن‌ها ضرایب  $m$  و  $n$  معلوم می‌شوند) محاسبه حجم هوای احتراقی امکان‌پذیر است.

### ۳-۵-۳- سوخت‌های مصرفی در صنایع ذوب فلزات: همان‌طور که در قسمت‌های قبل

گفته شد، انواع و اقسام مواد آلی شامل کربن و بیدروژن، در صورت داشتن شرایط عمومی، می‌توانند نوعی سوخت محسوب شوند؛ ولی از نقطه نظر ریخته‌گری، هر نوع سوختی قابلیت مصرف ندارد. از میان سوخت‌هایی که در جدول ۱-۳ نشان داده شده‌اند، کک، گازوئیل، مازوت و گاز طبیعی می‌توانند به دلیل وفور، ارزانی و قدرت حرارتی مناسب، در صنایع ذوب و ریخته‌گری مورد استفاده قرار گیرند. کک<sup>۱</sup>: زغال کک و یا به اختصار کک، از حرارت دادن زغال سنگ در محیط مسدود تولید می‌شود. در اثر حرارت گازهای مختلفی از زغال سنگ خارج و تغییراتی در حجم زغال سنگ ایجاد می‌شود. با ادامه عمل، شدت گازهای متصاعد تنزل می‌کند و بالاخره متوقف می‌شود و جسم جامد خاکستری رنگ نسبتاً سختی، با تخلخل نسبی، حاصل می‌شود که آن را کک می‌نامند.

هرچند در گذشته از زغال سنگ نیز به طور مستقیم در صنایع ذوب و گرم کردن استفاده به عمل می‌آمد، ولی امروزه، استفاده مستقیم از زغال سنگ متوقف شده است و عموماً از کک، به عنوان تنها سوخت جامد صنعتی، بهره می‌گیرند. علل عدم کاربرد زغال سنگ را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

الف- قدرت حرارتی انواع زغال سنگ‌ها متفاوت است، در حالی که قدرت حرارتی کک نسبتاً ثابت است و کنترل و تنظیم حرارت کوره بهتر انجام می‌گیرد.

ب- خواص مکانیکی زغال سنگ‌ها از نظر مقاومت به فشار، ضربه و اصطکاک نیز متفاوت و پایین است و لذا در عمل علاوه بر سختی شرایط کنترل، به سهولت خرد و نرم می‌شوند که در نتیجه، جریان هوا، از داخل آن‌ها با سختی انجام می‌گیرد و باعث خفگی در احتراق می‌شود.

ج- زغال سنگ‌ها، دارای مواد آلی پرارزشی هستند که در کک‌سازی، خارج می‌شوند و مورد استفاده قرار می‌گیرند (قطران، آمونیاک، بنزن، فنل، نفتالین و آتراسن، از این گازها محسوب می‌شوند). علاوه بر آن، سوختن زغال سنگ و خروج گازهای مذکور، آلودگی محیط کارگاه را تشدید می‌کنند.

د- زغال سنگ در مجاورت هوا به تدریج اکسیده می‌شود، به همین دلیل انبارسازی زغال سنگ خطرناک است و احتمال حریق آن وجود دارد. به علاوه اکسیداسیون و جذب اکسیژن، ارزش حرارتی و قابلیت کک شدن زغال سنگ را به میزان قابل ملاحظه‌ای پایین می‌آورد.

مشخصات ککی که در صنایع ذوب فلزات به کار می‌رود عبارتند از :

**الف - ترکیب شیمیایی:** یک کک مناسب برای ریخته‌گری دارای چنین ترکیبی است :

کربن : ۹۰-۸۵ درصد      مواد فرآر کمتر از ۱ درصد

خاکستر حداکثر ۱۲ درصد      رطوبت حداکثر ۲ درصد

گوگرد قابل احتراق ( $S_V$ ) کمتر از ۲ درصد

گوگرد، عنصر نامطلوب در کک شناخته شده است و باید مقدار آن از ۲ درصد کمتر باشد (لازم به توضیح است که درصد گوگرد کک مصرفی در تهیه بعضی از فلزات نظیر چدن با گرافیت کروی باید به مراتب کمتر از این اندازه باشد). ترکیب، درصد و نقطه ذوب خاکستر نیز از عوامل شناخته شده‌ای هستند که نقش مهمی در ارزش حرارتی کک دارند.

**ب - ضریب تخلخل:** کک مصرفی در ریخته‌گری باید متخلخل باشد تا احتراق به طور کامل انجام شود. محاسبه، نشان داده است که ضریب تخلخل یک قطعه کک (نسبت حجم فضای خالی به حجم کل قطعه) برابر است با :

$$\text{درصد تخلخل} = \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \times 100\% \Rightarrow \text{ضریب تخلخل} = 1 - \frac{\rho'}{\rho}$$

که در آن‌ها  $\rho$  و  $\rho'$  به ترتیب چگالی حقیقی و ظاهری کک هستند.

کک‌های صنعتی معمولاً دارای چنین مشخصاتی هستند :

$$\rho = 0.45 - 0.55 \text{ g/cm}^3 \quad \rho' = 1.8 - 2.0 \text{ g/cm}^3 \quad e = 0.18 - 0.19$$

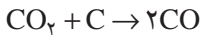
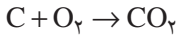
**ج - ارزش حرارتی:** در کوره‌هایی که سوخت، مستقیماً با بار کوره تماس دارد (مانند کوره کوپل و کوره بلند ذوب آهن)، کک بهترین و مناسبترین سوخت محسوب می‌شود؛ زیرا اولاً کربن آزاد موجود در کک نقش مهمی در احیای مواد اکسیدی دارد و ثانیاً در کوره کوپل و کوره بلند جزء یکی از عناصر اصلی و مهم چدن است.

در هر حال، با این که قدرت حرارتی کک نسبتاً زیاد نیست، ولی به علت همین تماس با بار، راندمان کوره‌های مذکور، در مقایسه با سایر کوره‌ها بالاست.

ارزش حرارتی یک کک خوب، با ترکیب شیمیایی مناسب و با داشتن حداکثر خاکستر به میزان ۸ درصد، بین ۶۵۰۰ تا ۷۵۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم تغییر می‌کند. لازم به توضیح است که قدرت حرارتی کربن خالص (کک ایده آل) برابر است با : ۸۰۹۰ kcal/kg



د- رآکتیویته<sup>۱</sup>: در احتراق کک، میزان تولید گاز منواکسید کربن (CO) یکی از مشخصات و خواص عمده آن، در عملیات احیای اکسیدهای فلزات است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، در یک احتراق ناقص، در ابتدا، مقداری از کربن کک، در مجاورت اکسیژن (یا هوا) می‌سوزد و تولید گاز دی‌اکسید کربن (CO<sub>۲</sub>) می‌کند. سپس باقیمانده کربن، با این گاز ترکیب می‌شود و تولید گاز منواکسید کربن می‌کند:



گاز CO به سهولت می‌تواند اکسیدهای فلزی را احیا و به علاوه تولید گرما کند (فعل و انفعال گرمازا) مثلاً در احیای اکسید آهن توسط CO داریم:



طبق تعریف، رآکتیویته، عبارت از نسبت تعداد ملکول‌های دی‌اکسید کربن تبدیل شده به منواکسید کربن (B) بر تعداد کل ملکول‌های دی‌اکسید کربن تولید شده (A) در احتراق است یعنی:

$$R = \frac{B}{A}$$

محاسبه نشان داده است که درصد رآکتیویته، برحسب درصد گازهای دی‌اکسید کربن و منواکسید کربن، چنین است:

$$\% R = \frac{\% CO}{\% CO + 2\% CO_2} \times 100$$

رآکتیویته کک در فشار ثابت بستگی به دو عامل مهم، درجه حرارت گاز CO<sub>۲</sub> و سرعت عبور آن از روی کک گذاخته دارد. در داخل کوره‌های کویل رآکتیویته کک حدود ۲۰٪ است و تقریباً  $\frac{۲}{۳}$  کربن کک با احتراق کامل می‌سوزد. در حالی که در کوره بلند ذوب آهن که مقدار اکسیدهای آهن زیاد است، رآکتیویته کک در ۹۰°C حداقل حدود ۷۵٪ و حداکثر حدود ۹۰٪ است.

— نفت‌ها: نفت‌ها ترکیبات پیچیده و مختلفی از ئیدروکربن‌های زنجیری یا حلقوی هستند که عناصر اصلی در ترکیب آن‌ها کربن و ئیدروژن است که گاهی گوگرد نیز در ترکیبات مختلف در آن‌ها حضور دارد و معمولاً مقدار آن از ۲ درصد کمتر است.

۱- Reactivity

نفت‌هایی که در صنایع ریخته‌گری به کار می‌روند، عموماً از پالایش نفت خام حاصل می‌شوند و در دسته تیدروکربن‌های نسبتاً سنگین (نسبت به نفت سفید و بنزین) قرار دارند که در شرایط حاضر، گازوئیل، مازوت و نفت کوره از سوخت‌های مناسب برای ریخته‌گری محسوب می‌شوند. نفت‌ها، سوخت‌های باارزشی هستند که مزایای آن‌ها عبارت است از:

الف - قدرت حرارتی نفت‌ها به دلیل خاکستر و رطوبت بسیار کم، عموماً زیاد و حدود ۹۰۰۰ تا ۱۰۶۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم است.

ب - خاکستر نفت‌ها بسیار کم و در اکثر آن‌ها غیر قابل ملاحظه است.

ج - کنترل، تنظیم و ثابت نگهداشتن درجه حرارت، در کوره‌هایی که با سوخت مایع (نفت‌ها) کار می‌کنند به سهولت انجام می‌گیرد و می‌توان به اختیار، مقدار سوخت را کم یا زیاد کرد.  
د - برای انبارسازی، به فضای کمتری احتیاج دارند و علاوه بر آن، حمل و نقل آن‌ها به آسانی انجام می‌گیرد.

ه - احتراق کامل نفت‌ها، به هوای کمتری نیاز دارند و راندمان حرارتی آن‌ها بیشتر است.  
و - با هوا به آسانی مخلوط می‌شوند و اشتعال آن‌ها سریع انجام می‌گیرد و به سرعت به درجه حرارت ماکزیم خود می‌رسند.

با این حال در مقابل محاسن و مزایای فوق، معایبی نظیر گرانی، خطر انفجار و اشتعال بی‌موقع، بوی نامطبوع، ضایعات در اثر تبخیر و بالاخره تولید رسوبات در مخازن و لوله‌ها را (که باعث انسداد و قطع جریان نفت می‌شوند)، باید نام برد.

مشخصات نفت‌های مورد مصرف در کوره‌های ذوب فلزات: هر نوع نفتی نمی‌تواند در کوره‌های ذوب فلزات به عنوان سوخت، قابل استفاده باشد. شرایط نفت‌های صنعتی به این شرح است:

الف - حداقل نقطه اشتعال این نفت‌ها باید  $150^{\circ}\text{C}$  باشد تا از بروز انفجار و حریق جلوگیری شود.

ب - حداکثر گوگرد محتوای این نفت‌ها نباید از ۲٪ تجاوز کند و چنانچه مقدار آن از این حد بیشتر باشد، گاز دی‌اکسید گوگرد ( $\text{SO}_2$ ) ایجاد شده در اثر احتراق، باعث خوردگی شدید آجرهای نسوز کوره می‌شود. علاوه بر آن، مخصوصاً در کوره‌هایی مانند کوره‌های شعله‌ای (روربر) شعله گاز با مقداری از عناصر بار کوره وارد فعل و انفعال می‌شود که در نتیجه گوگرد جذب مذاب و

باعث حضور انواع ناخالصی‌های غیر فلزی در محصول می‌شود.

ذکر این نکته در اینجا لازم است که چون در پالایشگاه‌ها برای حذف گوگرد معمولاً از اسیدسولفوریک استفاده می‌کنند، لذا ممکن است مقداری از این اسید در نفت به صورت محلول موجود باشد که در این صورت، اشکالاتی نظیر گاز دی‌اکسید گوگرد که اشاره شد، در اینجا نیز با شدت بیشتری ظاهر می‌شود. بنابراین در نفت‌های مورد بحث، میزان درصد اسیدسولفوریک محلول در آن‌ها هرگز نباید از ۰/۰۶٪ تجاوز کند.

**ج - رطوبت این نفت‌ها باید پایین باشد و از ۰/۰۲٪ تجاوز نکند.**

**د - چگالی:** به طور کلی، چگالی نفت‌ها، با تغییر درجه حرارت، تغییر می‌کند و معمولاً از  $1 \text{ g/cm}^3$  کمتر است. علاوه بر درجه حرارت، ترکیب شیمیایی و نوع نفت نیز در چگالی آن مؤثر است. نفت‌هایی که در کوره‌های ذوب فلزات به کار می‌روند دارای چگالی بین ۰/۸ تا ۱ گرم بر سانتی متر مکعب (در  $25^\circ \text{C}$ ) هستند.

**ه - مواد رسوب کننده:** این مواد در نفت (مانند کربن آزاد)، معمولاً به شکل ذرات کوچک و معلق و غیر محلول وجود دارند و غالباً در اثر برودت و سرما، رسوب می‌کنند و به تدریج باعث انسداد لوله‌های عبور نفت می‌شوند. حال، چنانچه نفت دوباره گرم شود خاصیت سیالیت آن به حال اول برمی‌گردد ولی رسوب حاصله به وضعیت قبلی بر نمی‌گردد. از این نظر، باید در انتخاب نفت، به عنوان سوخت کوره دقت کامل شود.

**و - ویسکوزیته (گرانروی):** ویسکوزیته این نفت‌ها نباید بیش از حد، بالا باشد، چون در این صورت، خاصیت سیالیت آن‌ها در اثر سرما از بین می‌رود و انتقال آن‌ها در لوله به دشواری انجام می‌گیرد (مثلاً مازوت که در سرما سیال نیست و برای انتقال باید مخزن محتوای آن را گرم کرد).

**ز - انبساط:** به طور کلی ضریب انبساط تمام انواع نفت‌ها زیاد است و حجم آن‌ها در اثر گرما افزایش می‌یابد و از این نظر باید توجه کرد که مخازن نفت هرگز کاملاً پر نشود تا از ترکیدن مخزن جلوگیری شود. تغییرات حجم نفت، علاوه بر درجه حرارت، بستگی به چگالی آن نیز دارد و برای نفتی که چگالی آن حدود ۰/۸ گرم بر سانتی متر مکعب است می‌توان از این رابطه استفاده کرد:

$$V = V_0 (1 + 8/8 \times 10^{-4} \theta + 13/2 \times 10^{-7} \theta^2)$$

که در آن  $\theta$  درجه حرارت نفت بر حسب  $^{\circ}\text{C}$ ،  $V_0$  و  $V$  به ترتیب حجم نفت در صفر و  $\theta$  درجه سانتی گراد است.

— سوخت‌های گازی: این سوخت‌ها نیز مانند سوخت‌های جامد و مایع به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند:

سوخت گاز طبیعی، مخلوطی است از ئیدروکربن‌های مختلف که قسمت عمده آن، گاز متان ( $\text{CH}_4$ ) است. درصد این گاز بین  $90-75$  درصد متغیر است. بقیه این گاز شامل گازهای ئیدروژن، نیتروژن، گاز دی‌اکسید کربن و مقدار کمی اکسیژن است. در بعضی از گازهای طبیعی گاز ئیدروژن سولفور ( $\text{H}_2\text{S}$ ) نیز موجود است که در هنگام احتراق تولید گاز دی‌اکسید گوگرد ( $\text{SO}_2$ ) می‌کند و همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، برای عملیات گداز فلزات در کوره‌های شعله‌ای بسیار مضر است. به‌طور کلی، گاز طبیعی قابل استفاده نیست و باید تصفیه شود. قدرت حرارتی گاز طبیعی بالاست و به  $8500-8000 \text{ kcal/m}^3$  می‌رسد.

سوخت‌های گاز مصنوعی نیز متعدد هستند و در صنعت به روش‌های مختلف تهیه می‌شوند. این سوخت‌ها عبارتند از:

- الف — گاز تقطیر زغال سنگ (گاز کوره‌های کک‌سازی)
  - ب — گاز مولدها (گازهای تولید شده از احتراق ناقص زغال سنگ)
  - ج — گاز کوره بلند ذوب آهن
  - د — گاز آب (گازهای تولید شده در اثر عبور بخار آب از روی زغال سنگ گداخته).
  - ه — گازهای تهیه شده به طریق سنتز (ساختگی) مانند ئیدروژناسیون زغال سنگ که تولید ئیدروکربن‌های متعددی می‌کند.
  - و — گازهای حاصله از تقطیر و کراکینگ (شکسته شدن ملکول‌ها) نفت‌های سنگین.
- مزایا و معایب سوخت‌های گازی: این سوخت‌ها نسبت به سوخت‌های جامد و مایع دارای مزایایی هستند که عبارتند از:

- الف — سهولت کنترل مخلوط گاز و هوا و ایجاد محیط اکسیدان، احیا و خنثی، بر حسب نیاز و احتیاج.
- ب — نداشتن خاکستر.
- ج — تولید درجه حرارت بالا (بیشتر از سایر سوخت‌ها).
- د — چون احتراق این سوخت‌ها، کامل انجام می‌گیرد، هوای کمتری برای سوختن لازم دارند.

هـ - سوخت‌های گازی را به سهولت می‌توان به توسط لوله به فاصله‌های دور منتقل کرد.

و - ارزش حرارتی سوخت‌های گازی در تمام مدت احتراق ثابت است (برخلاف سوخت‌های جامد).

ز - کنترل و تنظیم درجه حرارت در این سوخت‌ها، به آسانی انجام می‌گیرد.

ح - سوخت‌های گازی را می‌توان از زغال سنگ‌هایی که نسبتاً بی‌ارزش هستند تهیه کرد.

با تمام مزایای مذکور، سوخت‌های گازی، از نظر هزینه تأسیسات و حفاظت و ایمنی‌ای که دارند، کمتر مصرف می‌شوند. این توضیح، به خصوص در مورد گازهای مصنوعی که هزینه تهیه و تولید آن نیز وجود دارد، بیشتر اهمیت می‌یابد. درحالی که از گازهای کوره بلند، کوره کوپل و یا گاز آب، درعمل، به منظور پیش گرم کردن کوره و برخی از تأسیسات استفاده می‌شود. استفاده از گاز طبیعی در ایران با توجه به منابع عظیم آن در داخل کشور و بهای نازل آن نسبت به انواع سوخت‌های مایع و جامد و یا گازهای مصنوعی، روز به روز در حال توسعه است و می‌تواند به سهولت در ریخته‌گری‌ها و ذوب انواع آلیاژها به کار رود.

### ۶-۳- بررسی قدرت حرارتی سوخت

براساس واکنش‌های قابل احتراق عناصر داخلی سوخت با اکسیژن و همچنین تعیین درصد آن‌ها، همواره می‌توان حرارت تولید شده برای هر واحد جرم (kg) و یا واحد حجم ( $m^3$ ) یعنی ارزش حرارتی سوخت را محاسبه و تعیین کرد.

درعمل، سوخت همواره حاوی خاکستر و رطوبت نیز هست که به خصوص مقدار خاکستر در سوخت‌های جامد قابل ملاحظه است. خاکستر و مواد غیر قابل احتراق فقط به دلیل کاهش درصد مواد قابل احتراق در قدرت حرارتی مؤثرند، در حالی که رطوبت موجود در سوخت امکان تبخیر و گرماگیری دارند و اثرات آن در کاهش قدرت حرارتی، بیشتر از مقدار درصد غیر قابل احتراقی آن است.

حضور اکسیژن در سوخت، به علت ترکیب با ئیدروژن (در موقع احتراق)، از قدرت حرارتی آن می‌کاهد (همچنین می‌توان گفت که جسم اکسیژن‌دار قبلاً اکسیده شده و در نتیجه از قدرت حرارتی آن کاسته شده است). به طور کلی، قدرت حرارتی یک سوخت را با توجه به گرمایی عناصر مختلف در ترکیب با اکسیژن و ساده شدن شرایط محاسبه می‌توان از این رابطه تعیین کرد:

$$q_m = 8000C + 34000\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2000S - 6000W$$

مثال ۱: مطلوب است تعیین قدرت حرارتی یک نوع گازوئیل که در تجزیه کمی آن ۹۰ درصد کربن، ۹ درصد تیدروژن، ۵/۰ درصد گوگرد و ۵/۰ درصد مواد غیر قابل احتراق تعیین شده است.  
حل:

$$q_m = 8 \cdot C + 34 \cdot (H - \frac{O}{8}) + 2 \cdot S - 6W$$

$$q_m = 80 \times 90 + 340 \times 9 + 20 \times 0 / 5$$

$$q_m = 10270 \text{ kcal/kg}$$

مثال ۲: مطلوب است تعیین قدرت حرارتی یک زغال با نسبت ترکیبی:

$$C = 84\% \quad H = 1\% \quad A = 11\% \text{ (خاکستر)} \quad W = 4\%$$

حل:

$$q_m = 8 \cdot C + 34 \cdot (H - \frac{O}{8}) + 2 \cdot S - 6W$$

$$q_m = 80 \times 84 + 340 \times 1 - 6 \times 4$$

$$q_m = 7036 \text{ kcal/kg}$$

در عمل، به دلیل ناچیز بودن اکسیژن و گوگرد در سوخت، اغلب مقدار آن‌ها را در محاسبه منظور نمی‌کنند و حتی از تأثیر اضافی رطوبت نیز می‌توان در حدود تقریب صرف نظر کرد. به طور مثال، قدرت حرارتی سوخت مذکور در مثال ۲ با فرمول ساده شده و حذف تأثیر اضافی رطوبت عبارت است از:

$$q_m = 8 \cdot C + 34 \cdot H$$

$$q_m = 80 \times 84 + 340 \times 1$$

$$q_m = 7060 \text{ kcal/kg}$$

## تمرین

۱- مکعبی به ضلع ۸ سانتی متر را در یک مرتبه به ۸ مکعب مساوی و در مرتبه دیگر به ۱۲۵ مکعب مساوی تقسیم کرده‌ایم. تعیین کنید مدول سطحی در حالت دوم چند برابر افزایش یافته است؟ (نسبت به حالت اول).

۲- مکعبی به ضلع ۲۰ cm را به فرض یک بار به تعدادی مکعب به ضلع ۵ cm و بار دوم به مکعب‌هایی به ضلع ۲ cm تقسیم کرده‌اند مطلوب است تعیین مدول سطحی حالت دوم نسبت به

حالت اول.

۳- در احتراق ۲۴ کیلوگرم کربن،  $33/6$  متر مکعب اکسیژن وجود دارد. چنانچه در احتراق کامل، به ازای هر کیلوگرم کربن ۸۰۰۰ کیلوکالری گرما تولید و در واکنش کربن با دی‌اکسید کربن به ازای هر کیلوگرم کربن ۳۲۰۰ کیلوکالری گرما لازم باشد، مطلوب است:

الف - نسبت گاز CO به  $CO_2$  تولید شده.

ب - کاهش گرمای حاصله نسبت به هنگامی که احتراق کامل باشد (اکسیژن به مقدار کافی وجود داشته باشد).

۴- برای احتراق کامل ۳۰ کیلوگرم از یک نوع کک (بدون رطوبت) با ترکیب ۸۵٪ کربن، ۳٪ نیتروژن، ۴٪ اکسیژن و ۸٪ خاکستر اولاً چند متر مکعب هوا در شرایط متعارفی لازم است؛ ثانیاً نسبت حجمی هوای احتراقی به سوخت مصرفی را تعیین کنید (سوخت با ۱۰ درصد بیشتر از هوای لازم محترق می‌شود). درصد حجمی هوا عبارت است از ۲۰٪ اکسیژن و ۸۰٪ نیتروژن.

۵- مطلوب است تعیین حجم هوای لازم برای احتراق کامل ۸ کیلوگرم گاز متان با ترکیب شیمیایی  $CH_4$  (در شرایط متعارفی) ترکیب حجمی هوا عبارت است از ۲۰٪ اکسیژن و بقیه نیتروژن.

۶- حجم هوای لازم برای احتراق کامل  $11/4$  کیلوگرم گاز اکتان با ترکیب شیمیایی  $C_8H_{18}$  در شرایط غیر متعارفی ۶۸۰ میلی‌متر جیوه و ۳۰ درجه سانتی‌گراد چند متر مکعب است؟ در صورتی که ترکیب حجمی هوا، عبارت است از ۲۰٪ اکسیژن و بقیه نیتروژن و ضریب انبساط حجمی گازها  $\alpha = \frac{1}{273} \frac{1}{C}$  و سوخت با ۱۰ درصد بیشتر از هوای لازم محترق می‌شود.

۷- در تجزیه کمی ۸۶ گرم از یک نوع سوخت، ۷۲ گرم کربن و بقیه نیتروژن تعیین شده است. اولاً فرمول ساده سوخت را مشخص کنید و ثانیاً حجم هوای لازم برای احتراق هر کیلوگرم از آن را در شرایط متعارفی به دست آورید. درصد حجمی هوا شامل ۲۰٪ اکسیژن و بقیه نیتروژن است.

۸- در تجزیه کمی یک نوع سوخت مایع (مازوت)، ۹۰ درصد کربن،  $8/6$  درصد نیتروژن و  $8/8$  درصد گوگرد و  $6/6$  درصد مواد غیر قابل احتراق تعیین شده است. مطلوب است محاسبه و تعیین قدرت حرارتی این سوخت.

۹- مطلوب است تعیین قدرت حرارتی یک نوع کک با نسبت ترکیبی:

$C = 88\%$     $H = 1/5\%$    (خاکستر)    $A = 7/5\%$    (رطوبت)    $W = 3\%$