



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

مدلسازی حرارتی کوره دوار

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

سعید رضایی

استاد راهنما:

دکتر احمد صابونچی

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فهرست مطالب	هشت
فهرست اشکال	ده
فهرست جداول	دوازده
فهرست علائم	سیزده
چکیده	۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مروری بر تاریخچه کوره‌های دوار	۳
۲-۱ انتقال حرارت در کوره دوار	۷
۳-۱ نحوه حرکت مواد در بستر	۸
۴-۱ درجه انباشتگی	۱۰
۵-۱ زمان اقامت	۱۰
۶-۱ شیب کوره	۱۱
۷-۱ سیستم سوخت کوره دوار	۱۱
۸-۱ عایق کاری	۱۵
۹-۱ مروری بر کارهای انجام گرفته	۱۷
۱۰-۱ مقدمه ای بر کار حاضر	۱۹

فصل دوم: معادلات اساسی جریان

۱-۲ معادلات بقاء جرم و مومنتم و انرژی	۲۱
۲-۲ اغتشاش	۲۴
۳-۲ احتراق	۲۷
۴-۲ انتقال حرارت تشعشعی	۳۴

فصل سوم: نگاهی به روشهای عددی

۱-۳ روش گام به گام	۴۴
۲-۳ روش همزمان	۴۵
۳-۳ خطی سازی معادلات	۴۵
۴-۳ گسسته سازی	۴۶
۵-۳ ضرایب تخفیف	۵۰
۶-۳ روش حل معادلات	۵۰
۷-۳ گسسته سازی معادله پیوستگی	۵۱

۵۳.....	۸-۳ معیار همگرایی.....
۵۴.....	۹-۳ شبکه محاسباتی.....
۵۵.....	۱۰-۳ خواص.....
۵۶.....	۱۱-۳ شرایط مرزی.....
۵۷.....	۱۲-۳ روشهای بکار رفته در کار حاضر.....

فصل چهارم: نتایج

۵۹.....	۱-۴ مدل گاز داغ.....
۶۱.....	۲-۴ مدل دیوار.....
۶۲.....	۳-۴ مدل بستر.....
۶۵.....	۴-۴ مطالعه شبکه.....
۶۷.....	۵-۴ نتایج.....
۸۰.....	خلاصه ، نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۸۱.....	پیوست (الف).....
۸۲.....	پیوست (ب).....
۸۳.....	مراجع.....

فهرست اشکال

عنوان شکل

صفحه

.....۳	شکل (۱-۱) کوره اولیه آهک پزی
.....۴	شکل (۲-۱) کوره عمودی غیر دائم
.....۵	شکل (۳-۱) طرح شماتیک کوره دوار
.....۷	شکل (۴-۱) شماتیک مسیرهای انتقال حرارت در کوره دوار
.....۹	شکل (۵-۱) انواع حرکت بستر در کوره دوار [۵]
.....۱۰	شکل (۶-۱) نمایی از سطح مقطع کوره برای محاسبه درجه انباشتگی
.....۱۳	شکل (۷-۱) مشخصات و اجزای اصلی مشعل
.....۱۴	شکل (۸-۱) حالت‌های مختلف شعله در کوره دوار
.....۱۵	شکل (۹-۱) مکان‌های مختلف قرارگیری مشعل
.....۲۰	شکل (۱۰-۱) نمایی کلی از کوره دوار و قسمت‌های مختلف آن
.....۳۰	شکل (۱-۲) نمایش تصویری تابع چگالی احتمال
.....۳۱	شکل (۲-۲) محیط جاذب، ساطع و پخش کننده تشعشع
.....۳۸	شکل (۳-۲) نمایش زوایای θ و ϕ
.....۳۹	شکل (۴-۲) گسسته سازی زاویه ای با سطوح حجم معیار در شبکه منظم
.....۳۹	شکل (۵-۲) عدم تطابق گسسته سازی زاویه ای با سطوح حجم معیار در شبکه نامنظم
.....۳۹	شکل (۶-۲) عدم تطابق گسسته سازی زاویه ای با سطوح حجم معیار در حالت سه بعدی
.....۴۰	شکل (۷-۲) تبدیل هر زاویه محدود برای رفع مشکل تداخل زوایای محدود و حجم محدود
.....۴۴	شکل (۱-۳) الگوریتم حل دستگاه معادلات به روش گام به گام
.....۴۵	شکل (۲-۳) الگوریتم حل دستگاه معادلات به روش حل همزمان
.....۴۷	شکل (۳-۳) دو سلول مجاور و سطح مشترک آنها برای مرتبط ساختن مقادیر
.....۴۹	شکل (۴-۳) نامگذاری سلول های مجاور و فواصل آنها در یک شبکه منظم
.....۵۵	شکل (۵-۳) سلول های متداول در شبکه های دو بعدی
.....۵۵	شکل (۶-۳) انواع سلول در شبکه های سه بعدی
.....۵۷	شکل (۷-۳) نمونه ای از مواردی که می توان از شرط مرزی خروجی استفاده کرد
.....۵۸	شکل (۱-۴) نحوه تبادل اطلاعات (شار و دما) بین مدلها
.....۶۱	شکل (۲-۴) شماتیک مدل دیوار برای تحلیل های هدایتی
.....۶۴	شکل (۳-۴) دمای مقطعی بستر در طول محوری الف) $0/5$ متر ب) $2/5$ متر ج) $4/5$ متر [۲۸]
.....۶۵	شکل (۴-۴) نمایی از سلول های محاسباتی بستر

.....۶۶.....	شکل (۵-۴) توزیع دمای گاز بر روی محور کوره
.....۶۶.....	شکل (۶-۴) توزیع دمای متوسط بستر در راستای طول کوره
.....۶۷.....	شکل (۷-۴) کانتور غلظت جرمی متان در صفحه y-Z
.....۶۹.....	شکل (۸-۴) نمودار غلظت جرمی متان بر روی محور کوره
.....۷۰.....	شکل (۹-۴) مقایسه دمای محوری کوره با نتایج الیاسر [۲۴]
.....۷۱.....	شکل (۱۰-۴) کانتورهای دمای داخلی کوره
.....۷۱.....	شکل (۱۱-۴) کانتورهای سرعت محوری کوره
.....۷۳.....	شکل (۱۲-۴) توزیع دمای گاز در مقاطع مختلف کوره در جهت y
.....۷۵.....	شکل (۱۳-۴) پروفیل دمای بستر
.....۷۶.....	شکل (۱۴-۴) غلظت جرمی سنگ آهک در بستر [۲۸]
.....۷۷.....	شکل (۱۵-۴) کانتور دمای دیوار در $z = 4.5 \text{ m}$
.....۷۷.....	شکل (۱۶-۴) دمای دیوار داخلی کوره بر حسب جهت محیطی
.....۷۸.....	شکل (۱۷-۴) نرخ کلی انتقال حرارت به بستر
.....۷۹.....	شکل (۱۸-۴) نرخ انتقال حرارت از دیوار به بستر. نتایج آزمایشگاهی Run T21 Barr [۴۰]
.....۷۹.....	شکل (۱۹-۴) نرخ اتلاف حرارتی از دیوار. Run T21 Barr [۴۰]

فهرست جداول

عنوان جدول

صفحه

جدول (۱-۱) مقدار تجربی شیب کوره بر حسب درجه انباشتگی [۱۱].....	۱۰
جدول (۲-۱) مشخصات شیمیایی-فیزیکی سوخته‌های رایج در کوره دوار [۱۲].....	۱۱
جدول (۱-۴) ضرایب هدایت دیوار برای مقایسه با نتایج الیاسر [۲۴].....	۶۱
جدول (۲-۴) مشخصات کوره برای تطبیق با نتایج الیاسر [۲۴].....	۶۶
جدول (۳-۴) میزان عدم توازن جرم و حرارت ورودی و خروجی در مدل گاز داغ و دیوار.....	۶۷
جدول (۴-۴) مقایسه بین میزان انتقال حرارت تشعشعی و انتقال حرارت کلی در مدل گاز داغ.....	۶۷
جدول (۵-۴) مشخصات ورودی کوره برای تطبیق با نتایج بار [۴۰].....	۷۲
جدول (۶-۴) میزان عدم توازن جرم و حرارت ورودی و خروجی در حالت کوپل سه مدل.....	۷۳
جدول (۷-۴) مقایسه میزان انتقال حرارت تشعشعی و انتقال حرارت کلی.....	۷۳

فهرست علائم

N_r	سرعت دوران	a	ضریب جذب
N_θ	تعداد پیکسل در جهت θ	aL	ضخامت نوری
N_ϕ	تعداد پیکسل در جهت ϕ	a_w	ضریب تجربی
P	فشار	a_ε	ضریب وزنی صدور گاز خاکستری
P'	فشار اصلاحی	A	مساحت سطح
P_e	عدد پکلت	b_w	ضریب تجربی
Q	شار حرارتی	C	ثابت تجربی (معادله ۱-۲)
Q_{gb}	شار تشعشعی و جابجایی از گاز به بستر	C_p	گرمای ویژه
Q_{gi}	شار تشعشعی و جابجایی از گاز به دیوار	C_{pw}	گرمای ویژه دیوار
Q_{ib}	شار تشعشعی و هدایتی از دیوار به بستر	D	قطر داخلی کوره
Q_{io}	شار هدایتی از دیوار درونی به دیوار بیرونی	$D_{i,m}$	ضریب پخش نمونه جرمی i
Q_{os}	شار تشعشعی و جابجایی از دیوار به محیط	D_t	ضریب پخش مغشوش
r	بردار موقعیت	E	انرژی درونی
R_i	نرخ تولید یا مصرف نمونه جرمی i	f	کمیت بقائی کسر مخلوط
R^ϕ	مانده کمیت ϕ	f'	واریانس کسر مخلوط
s	بردار جهت تشعشع	\bar{f}	متوسط کسر مخلوط
s'	بردار جهت پخش تشعشع	F	نیروی حجمی
$SCFM$	فوت مکعب بر دقیقه در شرایط استاندارد	g	شتاب گرانش
Sc_t	عدد اشمیت مغشوش	G	تشعشع ورودی
Sh	چشمه حرارتی	G_b	تولید انرژی جنبشی اغتشاشی بواسطه نیروی حجمی
Sm	چشمه جرم	G_k	تولید انرژی جنبشی اغتشاشی
t	زمان اقامت	h	آنتالپی محسوس
T	دما	H	آنتالپی کل
T_{ref}	دمای مبنا	I	شدت تشعشع
u	سرعت در راستای x	I_{out}	شدت تشعشع خروجی از دیوار
u'	مولفه نوسانی سرعت	J	شار پخش نمونه جرمی
v	سرعت	k	انرژی جنبشی اغتشاشی
v'	ضریب استوکیومتری واکنش دهنده‌ها	$k_{b,k}$	ثابت نرخ پسرو
v''	ضریب استوکیومتری محصولات	$k_{f,k}$	ثابت نرخ پیشرو
V	حجم	K	ضریب هدایت
Y	کسر جرمی	K_{eff}	ضریب هدایت موثر
Y_m	اثر نوسانات در جریان مغشوش	K_t	ضریب هدایت توربولانس
z	جهت محوری کوره	Le	عدد لوئیس
Z_i	کسر مخلوط عنصر i	n	ضریب شکست
		N	تعداد نمونه‌های جرمی

علائم یونانی

α_p	ضریب تخفیف فشار
β	درجه انباشتگی
Γ_φ	ضریب پخش φ
δ	تابع دیراک
ε	نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی
η'_k	نرخ توانی واکنش دهنده‌ها در واکنش k ام
η''_k	نرخ توانی محصولات در واکنش k ام
θ	جهت محیطی
μ	لزجت مولکولی
μ_t	لزجت اغتشاشی
ρ	چگالی
ρ_w	چگالی دیوار
σ	ثابت استفان بولتزمن
σ_s	ضریب پخش تشعشعی
τ	تانسور تنش
ϕ	کمیت اسکالر
Φ	تابع فاز
Ω	سرعت چرخشی دیوار

چکیده

یک مدل نیمه سه بعدی برای بررسی جریان و انتقال حرارت در کوره دوار ارائه شده است. مدل نهایی از حل کلی و کوپل مدل‌های گاز داغ، دیوار و بستر بدست می‌آید. تبادل اطلاعات بین مدل‌ها یک مدل نیمه سه بعدی از تحلیل حرارتی کوره دوار را نتیجه می‌دهد. در مدل گاز داغ تمامی فرایندهای مهم در جریان گاز شامل احتراق، توربولانس، نیروی شناوری و تشعشع در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر جریان در این مدل با استفاده از نرم افزار فلوئنت حل شده و شار عبوری از سطوح کوره را بدست می‌دهد. با حل معادله انرژی سه بعدی در مدل دیوار و با در نظر گرفتن اثر چرخش در آن، یک پروفیل دمای سه بعدی در دیوار و شار حرارتی بر روی سطوح کوره حاصل می‌شود. شار حرارتی روی سطوح بستر بدست آمده از مدل‌های گاز داغ و دیوار به مدل بستر اعمال شده و با حل معادله انرژی یک بعدی در بستر، دمای هر مقطع از بستر و دمای جدید سطوح مشترک با دو مدل دیگر محاسبه می‌شود. این دما به مدل‌های گاز داغ و دیوار به عنوان شرط مرزی جدید اعمال می‌گردد. برای محاسبه پروفیل دمای صحیح در بستر نیاز به دانستن شار دقیق ورودی به آن ضروری می‌باشد. لذا برای مطمئن شدن از صحت نتایج در مدل گازهای داغ و دیوار که مستقیماً شار ورودی به سطوح بستر را بدست می‌دهند، ابتدا در یک مدل ساده‌تر (بدون در نظر گرفتن بستر) صحت مدل گازهای داغ و دیوار با نتایج تجربی مطابقت داده شده است. سپس نتایج مدل نهایی (حاصل کوپل کردن هر سه مدل گاز داغ، دیوار و بستر) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی یک کوره دوار و نتایج یک حل عددی دیگر مقایسه شده و صحت مدل ارائه شده بررسی شده است.

کلمات کلیدی: کوره دوار، کوره، مدلسازی، انتقال حرارت، تشعشع، احتراق

فصل اول

مقدمه

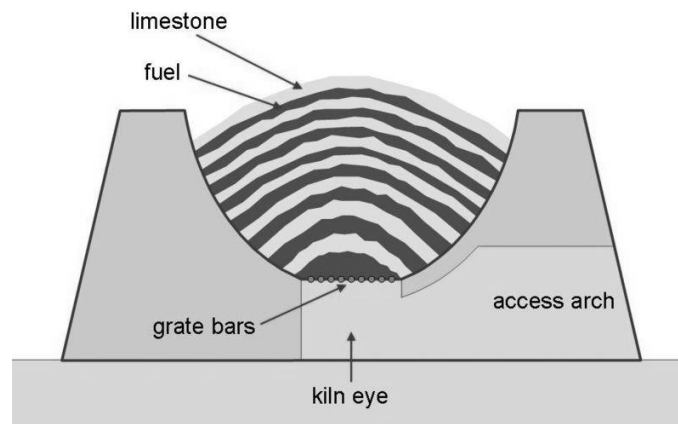
کوره دوار^۱ یکی از متداولترین راکتورهای صنعتی برای تماس بین گازها و جامدات بشمار می‌رود. این کوره‌ها اساساً بمنظور کلسینه کردن، احیا مواد جامد، انجام واکنش‌های فاز جامد، سوزاندن زباله‌ها و موارد دیگر بکار گرفته می‌شوند. از آنجا که فرایندهای فوق غالباً در درجه حرارت‌های زیاد صورت می‌گیرند، از جمله وظایف کوره‌ها را می‌توان رساندن مواد جامد به درجه حرارت واکنش دانست. بطور مثال در کوره‌های قدیمی احیاء سنگ آهن، حدود ۷۰ درصد از طول کوره صرف پیشگرم کردن مواد و تنها ۳۰ درصد برای انجام واکنش‌های احیاء مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کوره‌های تولید سیمان به روش تر نیز قسمت زیادی از کوره بعنوان پیش‌گرمکن و مبدل حرارتی بکار گرفته می‌شود. با این حال علیرغم پیشرفت‌های منتهی به کاهش طول کوره‌ها و اختصاص آنها به محل وقوع واکنش‌های شیمیایی هرگز نمی‌توان از اهمیت طراحی حرارتی آنها بدلیل وابستگی فرایند به انجام واکنش‌های شیمیایی و نقش حرارت در واکنش‌های مربوطه غافل بود [۱].

کوره دوار، استوانه‌ای افقی با قطر حدوداً بین ۱-۴ متر و طول نسبتاً زیاد (بین ۲۰-۹۰ متر) است که با شیب ملایمی (تقریباً بین ۲-۴ درصد نسبت به افق) استقرار یافته و با سرعت زاویه‌ای معینی (سرعت محیطی بین ۴۰-۷۰ سانتیمتر بر ثانیه) حول محور خود دوران می‌کند. حرارت لازم توسط مشعل انتهای کوره تامین می‌گردد. مواد بستر از ابتدای کوره وارد شده و بر اثر دوران و شیب کوره به آرامی به سمت پایین و انتهای کوره حرکت می‌کنند و پس از طی طول کوره و کامل شدن پخت، از انتهای کوره خارج می‌شوند. جریان گاز ناشی از احتراق در کوره دوار در خلاف جهت حرکت بستر است. طراحی کوره باید بگونه‌ای باشد که با صرف حداقل انرژی و در زمان مناسب، مواد به دمای پخت برسند.

¹ Rotary Kiln

۱-۱ مروری بر تاریخچه کوره‌های دوار

قدیمی‌ترین کوره‌های آهک^۱ به شکل ظرف‌های ننگه دارنده تخم مرغ هستند که در آن سنگ آهک^۲ و سوخت (معمولاً زغال‌سنگ) به صورت لایه‌ای و به شکل تخم مرغی بر روی هم چیده می‌شده‌اند (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱) کوره اولیه آهک پزی

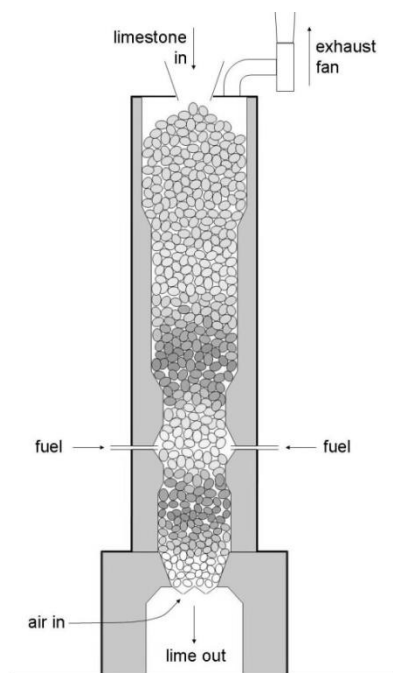
در این روش تنها ذرات بزرگتر سنگ آهک به کار برده می‌شد و از ذرات ریز استفاده نمی‌شده است. پس از چیدن لایه‌ها بر روی هم کوره را از زیر آن روشن می‌کردند که توسط آن، این لایه‌ها به تدریج می‌سوختند. پس از کامل شدن عمل سوختن و سرد شدن کوره، آهک حاصله را تخلیه می‌کردند.

برای طی این فرایند یک روز برای شارژ کوره، سه روز برای سوختن، دو روز برای سرد کردن و یک روز برای تخلیه کوره زمان لازم بود. در هر مرحله، ظرفیت این کوره بین ۲۵-۳۰ تن محصول بود. به دلیل اختلاف دمای زیاد بین مرکز و دیواره کوره، محصول کیفیت بسیار پایینی داشته است. مصرف سوخت این کوره‌ها نیز بسیار بالا بوده است (۰/۵ تن زغال‌سنگ به ازای یک تن آهک). انرژی مصرفی این کوره‌ها فوق العاده بالا بود و به نیروی انسانی زیادی احتیاج داشتند. مضافاً اینکه ظرفیت تولید آنچنان پایین بود که پاسخگوی نیاز رو به افزایش بشر نبودند.

پس از این کوره‌ها، کوره‌های عمودی غیر دائم پدید آمدند. اساس کار در این کوره‌ها چنین بود که در ابتدا مواد خام بصورت دوغاب یا پودر در آمده و سپس تبدیل به خشت می‌شد. خشت‌های خشک شده را همانند کوره آجر پزی در کوره می‌چیدند. کوره به آرامی گرم می‌شد و پس از چند روز خشت‌های پخته شده را سرد می‌کردند و بالاخره کوره را تخلیه و برای شارژ بعدی آماده می‌کردند. پودر حاصل از آسیاب کردن خشت‌های پخته بعنوان سیمان به بازار مصرف عرضه می‌شد. ظرفیت تولید این نوع کوره‌ها در حد چند تن در هفته بود.

¹ Lime Kiln

² Lime Stone



شکل (۱-۲) کوره عمودی غیر دائم

در سال‌های ۱۸۸۰ فشار زیادی برای پایین آوردن قیمت تمام شده تولید و همچنین بالا بردن کیفیت سیمان اعمال می‌شد. تا اینکه در سال ۱۸۸۳ کوره‌ای موسوم به کوره مطبق توسط دیچ^۱ ابداع شد. این کوره بعنوان اولین کوره عمودی مداوم^۲ شناخته می‌شود (شکل ۱-۲).

کیفیت کلینکر تولیدی با این کوره بالا و قیمت تمام شده آن پایین بود. میزان تولید این کوره‌ها ۲۰ - ۳۵ تن در روز و مصرف سوخت آن ۱۵ - ۱۸ درصد وزن کلینکر بود که در مقایسه با کوره‌های قبلی بسیار پایین بوده است. پخش کلینکر در این کوره‌ها نیاز به ممارست و تجربه زیادی داشت. زیرا می‌بایست قسمت تکلیس کوره آنچنان پر شود که هوا بتواند از لابلای خشت‌ها عبور نماید. مضافاً اینکه باید دقت شود که خروجی کلینکر از منطقه خنک‌کن به آرامی و یکنواخت صورت پذیرد [۲].

از معایب این کوره یکی سختی کار کردن با آن بوده، زیرا که نیاز به مواظبت مستمر داشت و در موقع باز شدن دریچه‌های کوره، احتمال بیرون

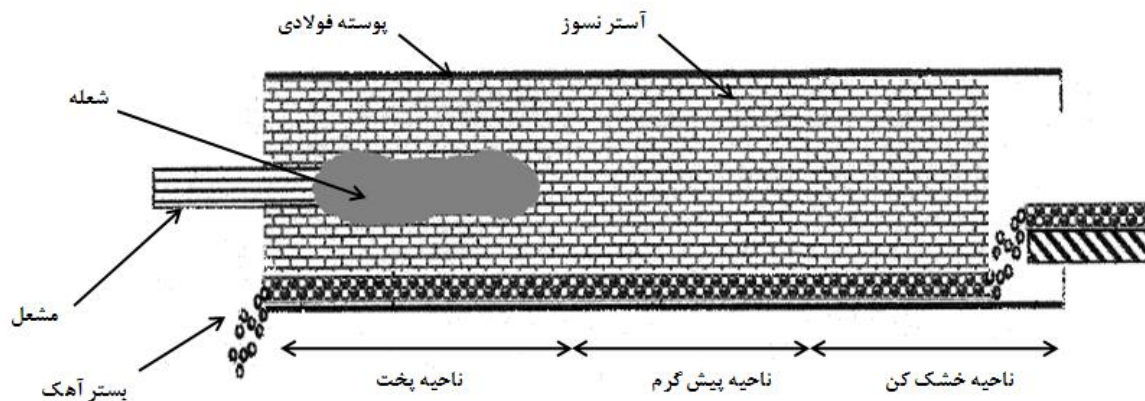
زدن شعله و ایجاد سوختگی بسیار زیاد بود. عیب دیگر انباشته شدن و خرد شدن مواد خام در راه طی مسیر از اطاق گرم به اطاق پخت بود که روی مکش کوره و در نتیجه روی نحوه کار کوره اثر می‌گذاشت. موفقیت در پایین آوردن قیمت تمام شده در طول سال‌های (۱۹۱۰-۱۸۸۵) چندان چشمگیر نبود تا اینکه به مرور کوره‌ها اتوماتیک‌تر شدند. از جمله در حوالی سال ۱۹۱۰ سیستم تغذیه مواد خام به تخلیه کلینکر بصورت اتوماتیک در آمد و با اضافه کردن پنکه قادر به تامین هوای با فشار معادل ۳۰۰-۱۰۰ میلیمتر آب جهت کوره شدند. تمام دریچه‌ها بخوبی آب بندی شده بودند و دریچه اصلی خروج کلینکر مجهز به سیستم پنوماتیک شده بود. با انجام این کارها و تا حدی اتوماتیک کردن کوره قادر شدند تولید روزانه بین ۴۰ تا ۵۰ تن را به ۱۰۰ تن در روز افزایش دهند.

در این کوره‌ها می‌بایستی خوراک کوره به صورت خشت یا کلوخه درآیند تا بدین وسیله امکان عبور هوا از لابلای آنها وجود داشته باشد. منظور از اتوماتیک شدن کوره‌های عمودی در این مقطع از زمان با آنچه که هم اکنون از اتوماسیون می‌فهمیم متفاوت است. در این کوره‌ها یک صفحه مشبک گردان در کف کوره نصب گردیده بود و بدینوسیله این امکان فراهم شده بود که تغذیه و تخلیه کوره یکنواخت‌تر صورت گیرد. اولین کوره از این نوع در سال ۱۹۱۲ در یوگوسلاوی و در سال ۱۹۱۷ در آلمان مورد استفاده قرار گرفت. یکی از نکاتی که در سیر تکاملی کوره‌های عمودی مورد توجه بوده است کاهش اندازه کلوخه‌های خوراک کوره می‌باشد.

^۱ Dietzsch

^۲ Continous Shaft Kiln

اولین طرح و برنامه ریزی برای احداث کوره دوار احتمالاً در سال ۱۸۷۷ شروع شده است، ولی اولین ثبت کننده اختراع این کوره فریدریک رانسوم^۱ است که در دوم می سال ۱۸۸۵ اختراع خود را در انگلستان به ثبت رسانید. با وجود اینکه تا آن زمان اختراع رانسوم نقطه عطفی برای صنعت سیمان بود ولی سال‌های بسیاری گذشت تا عملاً کوره دوار مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گرفت. پیشگامان رشد و بلوغ اختراع رانسوم مهندسين آمریکایی بودند که موفق شدند اولین کوره دوار با شرایط مطلوب اقتصادی را به مرحله بهره‌برداری برسانند. این کوره در سال ۱۸۹۹ یعنی حدود ۱۵ سال پس از اختراع رانسوم توسط هاری و سیمان^۲ از شرکت سیمان اطلس، مورد بهره‌برداری قرار گرفت. اولین کوره رانسوم ۵ فوت قطر و ۲۵ فوت طول داشت و بعداً در حدود سال ۱۸۹۵ کوره پیشرفته‌تری بقطر ۶ فوت و طول ۶۰ فوت در امریکا ساخته شد. ظرفیت این کوره بصورت خشک ۳۴/۱ و بصورت تر ۲۳/۸ تن در روز بود [۲].



شکل (۳-۱) طرح شماتیک کوره دوار

همانگونه که در شکل (۳-۱) دیده می‌شود، در این نوع کوره مواد از ابتدای کوره، که در ارتفاع بالاتری نسبت به انتهای کوره که مشعل قرار دارد، وارد کوره شده و در اثر چرخش و نیروی وزن به سمت انتهای گرم کوره و مشعل حرکت می‌کنند. جریان گاز در کوره بر خلاف جهت حرکت مواد بستر صورت می‌گیرد. این امر باعث افزایش انتقال حرارت از گاز به بستر می‌گردد.

در آلمان اولین واحد تولید سیمان در ۱۸۸۵ پایه گذاری شد و تا مدتها مورد استفاده بود. اولین کوره دوار در صنعت سیمان آلمان در سال ۱۸۹۸ بطور آزمایشی راه افتاد. در سال ۱۹۰۰، ۸۳ واحد تولید سیمان در این کشور مشغول به کار بود و اغلب آنها از نوع کوره‌های عمودی بودند. سوخت کوره‌های دوار در امریکا مایع (نفت کوره) و در آلمان پودر زغال سنگ بود. خوراک کوره هم بصورت دوغاب و هم به صورت پودر بود که البته در سیستم خشک برای کاهش مقدار گرد و خاک حدود ۶ درصد آب به مواد خام افزوده می‌شد. کلینکر خروجی از کوره دوار وارد

^۱ Fredrick Ransome

^۲ Harry and seaman

استوانه عمودی و یا استوانه دواری می‌شد و توسط هوا خنک می‌گردید. هوای خروجی از خنک‌کن کلینکر جهت سوختن ذغال یا نفت کوره در داخل کوره مورد استفاده قرار می‌گرفت.

بدلایل سهولت کار با کوره دوار، کمتر بودن نیروی انسانی مورد نیاز، بهتر و یکنواخت‌تر بودن کیفیت کلینکر، این کوره‌ها بزودی توانستند برتری خود را بر کوره‌های عمودی نشان دهند. اولین مزیتی که این کوره‌ها داشتند آن بود که خوراک این کوره‌ها لازم نبود به صورت بلوکه باشد و از ذرات ریز سنگ آهک نیز می‌شد در این کوره‌ها نسبت به کوره‌های عمودی استفاده کرد. لذا در کوره‌های دوار نیاز به خشت زدن مواد خام که بخش عمده‌ای از قیمت تمام شده را به خود اختصاص می‌داد وجود نداشت. از سوی دیگر سرمایه‌گذاری بیشتر، مصرف نیرو و فضای بیشتری در مقایسه با کوره‌های عمودی، برای کوره دوار مورد نیاز بود.

در این کوره‌ها سوخت مصرفی حدود ۳۰ درصد وزن کلینکر تولیدی یعنی حدود ۲۵۰۰-۲۹۰۰ کیلوکالری به کیلوگرم کلینکر بود. که مقدار قابل توجهی بیش از کوره عمودی بود. بعلاوه بخاطر بیضوی شدن بدنه کوره و پیش آمدن اشکالاتی در پایه‌های کوره، کار با کوره‌های دوار همراه با دردسرهای خاص خود بود.

در فاصله سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۰ کوره‌های عمودی و دوار دوشادوش یکدیگر در حال پیشرفت و رقابت بودند. طراحان کوره دوار بیشتر به فکر پایین آوردن مقدار سوخت مصرفی و قدرت مصرفی بودند و طراحان کوره‌های عمودی در تلاش یکنواخت‌تر کردن روند تولید و بالا بردن کیفیت بودند.

در سیستم تر با افزودن به طول کوره دوار و قرار دادن موانعی نظیر زنجیر در سر راه خروج هوا، بازیابی حرارتی بالا رفت. در سیستم خشک هوای خروجی از کوره که ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داشت در خشک‌کن دوار برای خشک کردن مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفت. برای صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت، نصب و کارهای ساختمانی کوره و خنک‌کن، اقدام به حذف خنک‌کن عمودی گردید و بجای آن مقداری به طول منطقه خنک‌کن کوره اضافه شد. بعدها این قسمت از منطقه خنک‌کن به صورت استوانه‌های کوچکتری در آمد و اطراف سطح جانبی کوره نصب گردید که به آنها خنک‌کن‌های گوشواره‌ای می‌گویند.

کوره‌های دوار هم دستخوش پیشرفت‌های زیادی شده و از نظر شکل به فرم‌های زیر دسته‌بندی می‌شوند:

کوره دوار مستقیم

کوره دوار با قسمت پهن‌تر

کوره دوار با قسمت کلسیناسیون پهن‌تر

کوره دوار با قسمت کلسیناسیون و پخت پهن‌تر

کوره دوار با قسمت خشک‌کن و پخت و کلسیناسیون پهن‌تر

کوره دوار با قسمت خشک‌کن و پیش‌گرم‌کن پهن‌تر

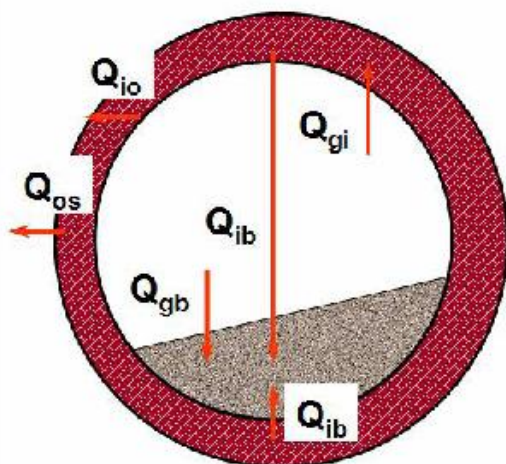
هدف از این پهن کردن در بعضی از مناطق، اضافه شدن زمان اقامت در آن منطقه خاص کوره و کاهش سرعت گاز

برای انتقال حرارت بهتر از گاز کوره به مواد جامد است [۳].

در ادامه این فصل نگاهی کلی به برخی فرایندها و تعاریف کوره دوار، شامل فرایندهای انتقال حرارت، نحوه حرکت مواد در بستر، درجه انباشتگی، زمان اقامت، شیب کوره، عایق کاری و سیستم سوخت در کوره‌های دوار می‌کنیم و سپس مروری بر مطالعات انجام گرفته خواهیم داشت.

۱-۲ انتقال حرارت در کوره دوار

فرایند انتقال حرارت در کوره‌های دوار بدلیل همزمانی سه مکانیسم تشعشع، جابجایی و هدایت بین گاز، دیواره و بستر از پیچیدگی خاصی برخوردار است. جریان گاز بعنوان چشمه حرارت، انرژی لازم را برای مواد بعنوان چاه حرارت تامین می‌کند. در این بین دیواره کوره بعنوان بازیابنده^۱ حرارت عمل می‌کند. گازهای حاصل از احتراق، حرارت را به صورت تشعشع، مستقیماً به دیواره کوره و سطح مواد منتقل می‌سازند. در عین حال بدلیل جریان و حرکت خود می‌توانند بطریق جابجایی نیز انرژی خود را به سطوح مربوطه منتقل نمایند. دیواره کوره حرارت را بصورت تشعشع مستقیم به سطح بستر مواد منتقل می‌سازد و با دوران کوره، هنگامیکه در زیر بستر مواد قرار می‌گیرد بطریق هدایت با مواد تبادل حرارت می‌کند. بخشی از حرارت دریافت شده توسط دیواره به صورت تلفات حرارتی به پوسته بیرونی آن هدایت می‌شود (شکل ۱-۳). در کوره‌های دوار با شعله مستقیم و در مقیاس صنعتی مجموع حرارت حاصل از کنوکسیون و هدایت که به مواد می‌رسد تنها بخشی از مجموع حرارتی است که بستر دریافت می‌دارد. بدینسان اهمیت تبادل تشعشعی در کوره‌های دوار آشکار می‌گردد.



- Q_{gb} Convection and radiation from gas to bed
- Q_{gi} Convection and radiation from gas to inner wall
- Q_{ib} Conduction and radiation from inner wall to bed
- Q_{io} Conduction from inner wall to outer wall
- Q_{os} Convection and radiation from outer wall to surroundings

شکل (۱-۴) شماتیک مسیرهای انتقال حرارت در کوره دوار

اصولاً در بین روشهای مختلف انتقال حرارت، تشعشع از ویژگیهای خاصی برخوردار است. یکی از عواملی که اهمیت تشعشع حرارتی را نشان می‌دهد، وابستگی شدید آن به قدر مطلق درجه حرارت است. در جابجایی و هدایت،

^۱ Regenerator

میزان انرژی تبادل یافته بین دو نقطه به تفاضل توان یکم دمای آن دو نقطه بستگی دارد، در صورتیکه تفاضل توان چهارم درجه حرارت‌های مطلق بین دو جسم در تشعشع، وابستگی شدید آنرا به درجه حرارت نشان می‌دهد و با توجه به اینکه در کوره دوار با درجه حرارت‌های بیش از 1400°C مواجه هستیم، اهمیت تشعشع در این کوره‌ها مشخص می‌شود [۱]. تشعشع همچنین بدلیل ماهیت خود دارای پیچیدگی‌های ریاضی است. در هدایت و کنوکسیون، انرژی از طریق یک محیط و واسطه فیزیکی منتقل می‌شود بنابراین علاوه بر گرادیان درجه حرارت، به خواص فیزیکی محیط و واسطه مورد نظر نیز بستگی دارند. در حالیکه در تشعشع، انرژی می‌تواند بدون وجود واسطه فیزیکی بین دو جسم انتقال یابد. هنگامی که تشعشع با هدایت و جابجایی بطور همزمان بیامیزد، وجود هر دو نوع جملات انتگرالی و دیفرانسیلی با توانهای متفاوتی از درجه حرارت، منجر به معادله‌های انتگرال دیفرانسیلی می‌گردد که اصولاً حل کردن آنها به سادگی صورت نمی‌گیرد.

علاوه بر پیچیدگی‌های ریاضی فوق، می‌بایست از تعیین دقیق خواص و مشخصات تابشی اجسام نیز بعنوان مشکلات بررسی تشعشع حرارتی نام برد. این موضوع هنگامی روشن می‌گردد که بدانیم خواص تابشی جامدات به بسیاری از متغیرها، همچون: زبری سطح و درجه براقیت آن، خلوص ماده مورد نظر، ضخامت پوشش روی سطح، درجه حرارت، طول موج تشعشع و زاویه‌ای که اشعه حرارتی جسم را ترک می‌کند، بستگی دارد. در مورد خواص گازها نیز مخصوصاً در شعله‌ها با محدودیت‌هایی مواجه می‌شویم که بر پیچیدگی آن می‌افزاید [۴].

۱-۳ نحوه حرکت مواد در بستر

حرکت مواد بستر در کوره دوار دو مؤلفه دارد، اول حرکت در سطح مقطع کوره و دوم حرکت در جهت محور آن. اصولاً شرط حرکت محوری و یکنواخت تمام ذرات بر این اساس است که زاویه شیب کوره بزرگتر از زاویه لغزش مواد باشد. از آنجا که کوره‌های دوار دارای شیب ۴-۲ درصد، یعنی کوچکتر از زاویه لغزش مواد هستند، نتیجه می‌گیریم که حرکت انتقالی و یکنواخت تمام جرم امکان پذیر نیست. شش مد حرکت ذرات در بستر یک کوره دوار (شکل ۱-۵) عبارتند از: لغزش^۱، افتادن یکباره‌ای^۲، غلتیدن^۳، به شکل آبخاری ریختن^۴، آبخاری شدید^۵ و گریز از مرکزی^۶. که حرکت غلطشی معمول‌ترین نوع حرکت در کوره‌های دوار است [۵].

¹ Slipping

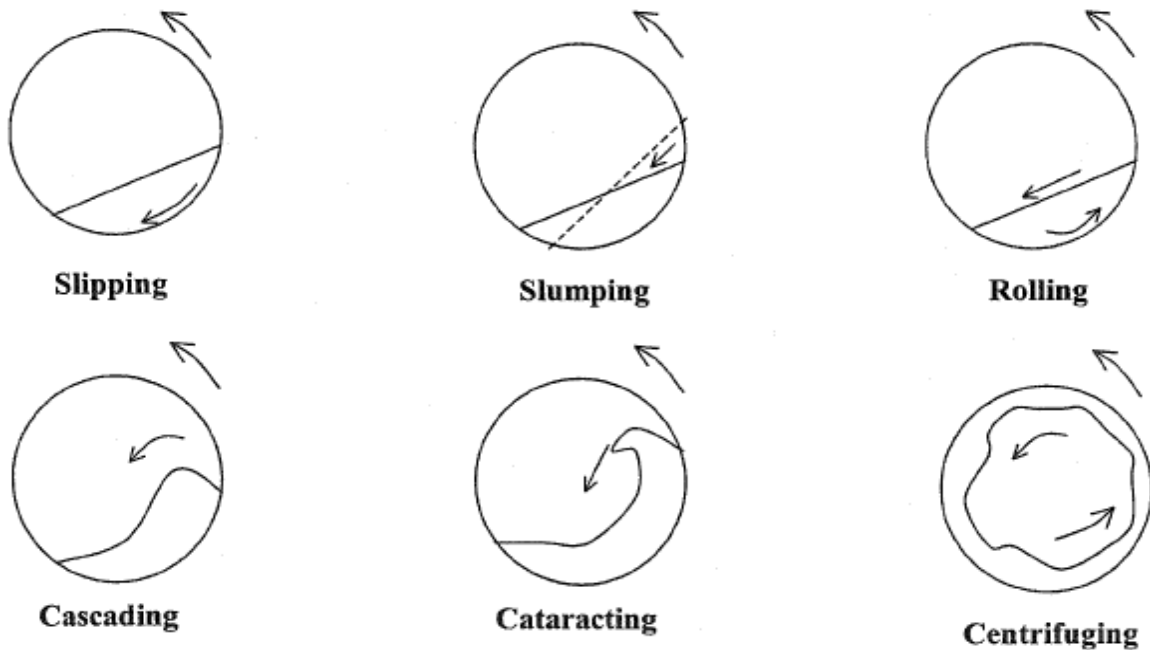
² Slumping

³ Rolling

⁴ Cascading

⁵ Cataracting

⁶ Centrifuging



شکل (۱-۵) انواع حرکت بستر در کوره دوار [۵]

در حرکت غلطشی، در یک مقطع دو ناحیه قابل تمیز هستند. یک ناحیه با حرکت پیستونی که در آن ذرات به صورت یک جسم صلب با سرعت زاویه‌ای دیواره می‌چرخند. در این ناحیه ذرات هیچ حرکت محوری ندارند. این جریان لایه فعال در سطح بستر را تغذیه می‌کند. ناحیه دیگر که بر روی ناحیه پیستونی قرار دارد و حدود ۱۰ درصد از عمق بستر را اشغال می‌کند و در آن اختلاط ذرات زیاد است را لایه فعال^۱ می‌نامند. در این ناحیه، لایه‌ای از مواد توسط دیواره کوره و در جهت دوران آن جابجا شده و بر سطح بستر مواد که زاویه آن نزدیک به زاویه لغزش مواد است شروع به غلطیدن می‌کند. زاویه لغزش مواد معمولاً بین ۲۰-۴۰ درجه است. به هنگام دوران کوره، هر یک از ذرات مواد حرکتی مارپیچی را در جهت محور کوره شروع می‌کنند. در حین اختلاط مواد ریزتر غالباً در مرکز بستر تجمع می‌کنند.

روتگرز [۶] نحوه حرکت ذرات در بستر غلطشی را مشخص کرد. بیشتر اختلاط ذرات بستر در یک مقطع از کوره در این لایه صورت می‌گیرد. دونال و ماکالی [۷]، [۸] دریافتند که اختلاط در یک مقطع تقریباً دو مرتبه^۲ از اختلاط محوری بیشتر است.

¹ Active Layer

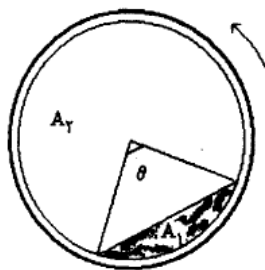
² order

۴-۱-۴-۱ درجه انباشتگی

بخشی از حجم داخلی کوره‌ها که بوسیله مواد خام یا کلینکر جاری در کوره پر می‌شود را درجه انباشتگی کوره می‌نامند. که مقطع آن در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.

درجه انباشتگی (درصد پرشدگی) کوره را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۳].

$$\beta = \frac{A_1}{A_2} * 100 \quad (1-1)$$



شکل (۶-۱) نمایی از سطح مقطع کوره برای محاسبه درجه انباشتگی

درصد پرشدگی کوره فاکتوری است که مورد علاقه مهندسين و اپراتورهاست. بين اپراتورها، عده‌ای ترجیح می‌دهند کوره را در سرعت بالاتر و درجه پرشدگی کمتر قرار دهند. در حالیکه عده‌ای دیگر سرعت کم با بستر عمیق‌تر را ترجیح می‌دهند. اپراتورها می‌توانند درجه انباشتگی را با تنظیم سرعت کوره و سرعت خوراک تغییر دهند. مقدار بهینه را می‌توان با سعی و خطا پیدا کرد. برای بدست آوردن آن، کوره معمولاً در مقادیر درجه انباشتگی متفاوت چند روزی کار می‌کند و اثر آن روی پایداری عملیاتی کوره و بازدهی بررسی می‌شود تا مقدار ایده‌آل بدست آید. در کوره مورد مطالعه در کار حاضر درصد پرشدگی ۱۳٪ در نظر گرفته شده است.

۵-۱-۵-۱ زمان اقامت

برای بدست آوردن زمان اقامت مواد در کوره می‌توان از روابط تجربی موجود استفاده نمود [۹].

$$t = \frac{CL}{pN_r D} \quad (2-1)$$

در این رابطه، t برحسب دقیقه، C یک ثابت تجربی است که برای آن اعدادی بین ۱۱/۲ تا ۱۹ گزارش شده است [۱۰]. D و L به ترتیب طول و قطر داخلی کوره برحسب متر هستند و همچنین p شیب کوره می‌باشد که معمولاً مقدار آن بین ۲ تا ۴ درصد برای کوره‌های مختلف متغیر است. N_r نیز سرعت دوران کوره بوده و بین ۱/۷ تا ۲/۵ دور در دقیقه متغیر می‌باشد. با توجه به این رابطه زمان اقامت در کوره مورد مطالعه در حدود ۵۶ دقیقه می‌باشد.

۱-۶ شیب کوره

همانطور که بیان شد به منظور حرکت مواد، کوره نسبت به افق بایستی زاویه‌ای داشته باشد که اندازه این زاویه، شیب کوره نامیده می‌شود. معمولاً این میزان بین ۲ تا ۴ درصد نسبت به افق در تغییر است. هر چقدر سرعت دورانی کوره کم باشد بایستی شیب بیشتر باشد و بالعکس برای دوره‌های بالا، شیب کوره کمتر است. همچنین اگر شیب کوره کم باشد، می‌توان کوره را پرت‌تر نگه داشت. بر اساس تجربه‌های فراوان حاصل از کارکرد کوره‌ها، مقادیر تجربی متعددی برای مقدار شیب کوره بر حسب درجه انباشتگی ارائه شده است که در جدول (۱-۱) این مقادیر آورده شده است. کوره مورد بررسی دارای شیب ۲ درصد نسبت به افق می‌باشد.

جدول (۱-۱) مقدار تجربی شیب کوره بر حسب درجه انباشتگی [۱۱]

۴/۵	۴	۳/۵	۳	۲/۵	شیب (درصد)
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	درجه انباشتگی (درصد)

۱-۷ سیستم سوخت کوره دوار

انرژی گرمایی مورد نیاز جهت پخت مواد اولیه، در اثر سوختن سوخت و ایجاد شعله تامین می‌شود. سیستم سوخت در کوره‌های دوار یکی از قسمت‌های اساسی کوره است که علاوه بر نقش اساسی در نحوه کار کوره، در بهبود کیفیت محصول و تداوم عمر آجرهای نسوز نیز نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. از جنبه اقتصادی نیز چگونگی کار با سیستم سوخت و استفاده بهینه از میزان انرژی گرمایی آزاد شده، بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

۱-۷-۱ انواع سوختها

تمامی سوختها به سه شکل جامد، مایع و گاز وجود دارند که با توجه به شرایط جغرافیایی و در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی، در کوره‌های دوار بکار گرفته می‌شوند. در ابتدا، تنها سوختهای جامد مورد مصرف بودند اما بتدریج سوختهای مایع و گاز نیز جای خود را در این صنعت باز نمودند. سوختهای جامد شامل زغال‌سنگ، کک، ضایعاتی نظیر لاستیک کهنه اتومبیل، خرده چوب می‌باشند، که قبل از استفاده می‌بایستی عملیات‌های زیادی بر روی آنها انجام شود تا برای سوختن آماده گردند. برای کار با سوختهای جامد، تجهیزات اضافی و نیروی انسانی زیادی نیز مورد نیاز خواهد بود. به همین دلیل این سوختها بخصوص زغال‌سنگ فقط در مناطقی بکار می‌رود که ارزان و قابل دسترس باشند. سوختهای جامد بخصوص زغال‌سنگ و کک، در کشورهای اروپایی به مقدار زیادی مصرف می‌شوند، چرا که معادن زغال‌سنگ در آن کشورها فراوان است.

سوختهای مایع (بخصوص نفت کوره و مازوت) نیز در حد وسیعی در صنعت کاربرد دارند. برای ایجاد احتراق مناسب، این سوختها تمیزه می‌شوند و بصورت قطرات بسیار ریزی در می‌آیند تا براحتی با اکسیژن هوا ترکیب شوند.

جدول (۱-۲) مشخصات شیمیایی - فیزیکی برخی سوخت‌های رایج در کوره دوار [۱۲]

مشخصه / سوخت	زغال سنگ	نفت کوره	گاز طبیعی
کربن (درصد وزنی)	۷۸	۸۶	۵۷/۹
هیدروژن (درصد وزنی)	۵	۱۲	۱۸/۹
گوگرد (درصد وزنی)	۱	۱/۵	—
ازت (درصد وزنی)	۱/۵	۰/۲	۲۱/۸
اکسیژن (درصد وزنی)	۶	۰/۶	۲۱/۴
خاکستر (درصد وزنی)	۸/۵	کمتر از ۰/۱	—
ارزش حرارتی (kj/kg)	۳۴۷۵۰	۴۰۲۰۰-۴۱۴۰۰	۳۱۶۰۰
درجه حرارت ایده آل شعله °K	۲۱۵۵	۲۱۲۰	۲۰۱۰

سوخت‌های گازی (غالباً گاز طبیعی) که امروزه بیشترین سهم را در صنعت دارند، دارای مزیت‌های فراوانی نسبت به سوخت‌های جامد و مایع می‌باشند. سوخت گازی احتیاجی به آماده سازی قبل از احتراق (عملیاتی از قبیل گرم کردن اولیه، خرد کردن، خشک کردن و غیره) نخواهد داشت. علاوه بر آن، این نوع سوختها بر خلاف دو نوع دیگر، نیازی به هوای اولیه برای سوختن ندارند. اگر هم نیازی به هوای اولیه باشد بسیار کم خواهد بود. بنابر این به تنهایی می‌تواند برای احتراق در کوره بکار رود. سوخت گازی خاکستر ندارد و گازهای حاصل از احتراق این سوختها، آلودگی کمی ایجاد می‌کنند.

۱-۲-۲ شعله و مشعل

در طراحی کوره دوار این نکته حائز اهمیت است که بسیاری از مشکلاتی که در کار کوره رخ می‌دهد از قبیل کیفیت پایین، بازدهی کم سوخت، انرژی آزاد شده پایین و طول عمر کوتاه لایه عایق، می‌تواند در اثر طراحی نامناسب و یا شرایط کاری نامناسب مشعل ایجاد گردد. در این مشعل‌ها سوخت و هوای اولیه از مرکز مشعل و هوای اضافی از تعدادی سوراخ در اطراف مشعل وارد کوره می‌شوند. که البته هوای اضافی از بقیه سوراخهای کوره مانند درز بین کلاهک و کوره و غیره نیز وارد کوره می‌شود.