

فصل پنجم

کوره‌های ذوب شیشه

۱-۵- تقسیم‌بندی کوره‌های ذوب شیشه

مهمترین بخش تولید شیشه و محصولات شیشه‌ای، کوره‌های ذوب شیشه هستند که در آن به بچ مواد اولیه و خرده شیشه جهت بدست آوردن مذاب حرارت داده می‌شود. عمل ذوب شیشه شامل پنج مرحله به صورت زیر می‌باشد:

- تشکیل سیلیکات^۱
- تشکیل شیشه^۲
- تصفیه مذاب^۳
- همگن شدن مذاب^۴
- سرد شدن مذاب^۵

-
- 1- Silicate Formation
 - 2- Glass Formation
 - 3- Refining
 - 4- Homogenizing
 - 5- Cooling

در کوره‌های صنعتی ذوب شیشه، تفکیک قابل ملاحظه‌ای بین این مراحل وجود نداشته و هر بچ مواد اولیه از پنج مرحله فوق عبور کرده و تحت تأثیر گرمای حاصل از احتراق سوخت نفت و یا گاز طبیعی در کوره‌های سوخت فسیلی و یا در اثر عبور جریان الکتریسیته در کوره‌های الکتریکی، به شیشه مذاب تبدیل می‌شود. طراحی کوره ذوب شیشه به نوع سوخت مصرفی، ترکیب و خواص شیشه مذاب و روش تولید کوره بستگی دارد. ترکیب و خواص شیشه مذاب خود نیز بستگی به وضعیتهای شیشه مذاب و نهایتاً تعیین روش تولید کوره ذوب شیشه دارد.

دما مهمترین و اصلی‌ترین عامل در ذوب شیشه می‌باشد. با افزایش کشش مذاب از کوره، می‌توان میزان مصرف سوخت کوره را به ازای واحد ذوب کاهش و راندمان را افزایش داد. معمولاً در کوره‌ها از سوخته‌های با ارزش حرارتی بالا مانند گاز طبیعی و یا هیدروکربنهای مایع استفاده می‌کنند که در نتیجه، گرمای مورد نیاز تأمین می‌شود و از سوی دیگر کوره از شعله مناسبی برخوردار خواهد بود.

کوره‌های مدرن ذوب شیشه با توجه به روش عملکرد، روش گرمادهی، طراحی فضای کوره، جهت حرکت گاز، روش بازیابی گرما از گازهای حاصل از احتراق و روش تقسیم‌بندی مخزن و فضای شعله طبقه‌بندی می‌شوند.

- بر اساس روش عملکرد، کوره‌های ذوب شیشه به دو دسته متناوب (کوره‌های مخزنی و دیگی) و پیوسته (فقط نوع مخزنی) تقسیم بندی می‌شوند.

در کوره‌های پیوسته تمام مراحل ذوب شیشه در قسمت‌های مختلف کوره اتفاق می‌افتد و در کوره‌های نوع متناوب، تمامی مراحل در همان فضای مشابه کوره انجام می‌گیرد، ولی مراحل مذکور در زمانهای جدا از یکدیگر صورت می‌پذیرد.

کوره‌های نوع پیوسته برای تولید شیشه جام، شیشه ساختمانی، ظروف، لوله‌ها، ظروف تزئینی، الیاف شیشه‌ای و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کوره‌های نوع متناوب بطور کلی برای تولید شیشه‌هایی با کاربردهای خاص مانند محصولات اپتیکی، شیشه‌های رنگی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- از نظر روش گرمادهی کوره‌ها به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف- کوره‌های مشعلی که در آنها انرژی حرارتی از احتراق گاز طبیعی یا سوخته‌های مایع تأمین می‌شود.

ب- کوره‌های الکتریکی که در آنها گرمای تولید شده بوسیله جریان الکتریسیته است.

ج- کوره‌های مشعلی- الکتریکی که روش ترکیب شده‌ای از نوع الف و ب بوده و برای گرمادهی کوره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کوره‌های الکتریکی به کوره‌های نوع مقاومتی (مستقیم یا غیرمستقیم)، کوره‌های نوع قوس الکتریکی و کوره‌های القایی تقسیم‌بندی می‌شود. کوره‌های مقاومتی از انواع دیگر متداول‌تر می‌باشد.

- با توجه به طراحی کوره، می‌توان کوره‌های نوع متناوب (دیگی) را از کوره‌های نوع پیوسته (مخزنی یا تانکی) تشخیص داد. کوره‌های نوع مخزنی پیوسته بدلیل راندمان بالا و میزان تولید بالا مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند.

- تقسیم‌بندی کوره‌ها بر اساس روش بازیابی حرارت گازهای حاصل از احتراق، با تشخیص کوره‌های ریژنراتوری و رکوپراتوری به منظور پیش گرمایش هوای احتراق صورت می‌پذیرد.
- در طبقه‌بندی کوره‌ها بر اساس تقسیم‌بندی مخزن و فضای شعله، کوره‌های ذوب شیشه ممکن است یک مخزن مشترک یا دو مخزن مجزا (ذوب و کار) داشته باشند.

۲-۵- کوره‌های مخزنی

در تولید شیشه صنعتی، کوره‌های مخزنی پیوسته برای تولید انواع محصولات شیشه‌ای بکار برده می‌شوند و کوره‌های نوع متناوب معمولاً برای تولید محصولات شیشه‌ای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۲-۵- کوره‌های مخزنی متناوب

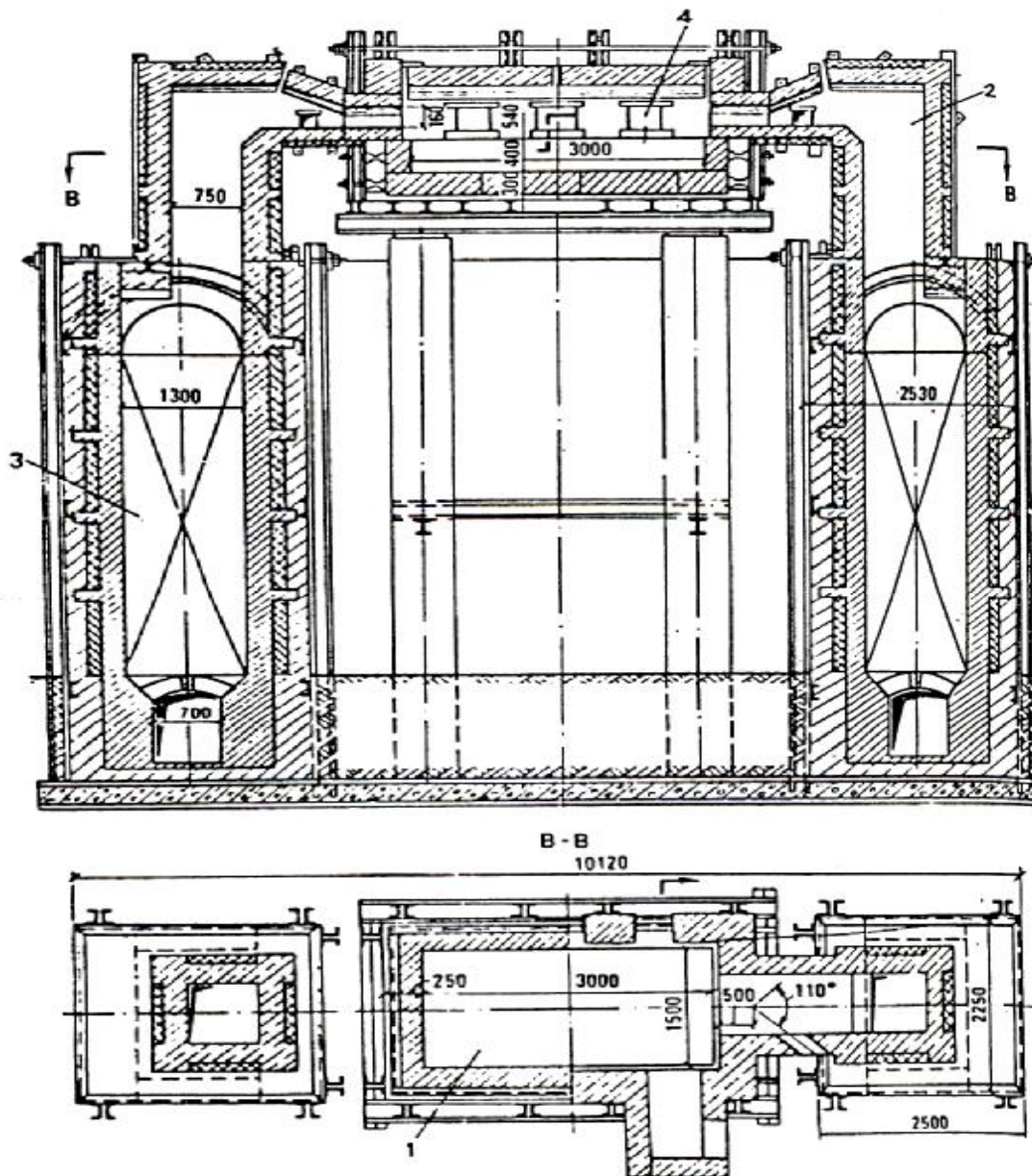
در کوره‌های مخزنی متناوب، شکل شعله به صورت عرضی یا U شکل بوده و از آنها عموماً برای ذوب شیشه‌های تزئینی و شیشه‌های با کاربردهای خاص به کار برده می‌شوند (شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵). در این کوره‌ها دمای ذوب شیشه در حدود ۱۶۰۰-۱۴۰۰ درجه سانتیگراد و دمای کاری مذاب ۱۸۰۰-۱۲۳۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. عمق مخزن معمولاً ۷۰۰-۴۰۰ میلیمتر است. زمان ذوب شیشه و انجام کار ۲۴ تا ۴۸ ساعت است.

شیشه مذاب در کوره‌های مخزنی تناوبی با توجه به مشکل ایجاد حباب از همگنی بیشتری برخوردار است. مشکل مهم کوره‌های تناوبی، افزایش خوردگی آجرهای نسوز تانک در محدوده دمای بالایی کوره (دمای ذوب شیشه) و محدوده دمای پایین کوره (مرحله کاری) می‌باشد، بطوری که سطح شیشه مذاب در طی کار از ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر کاهش پیدا می‌کند.

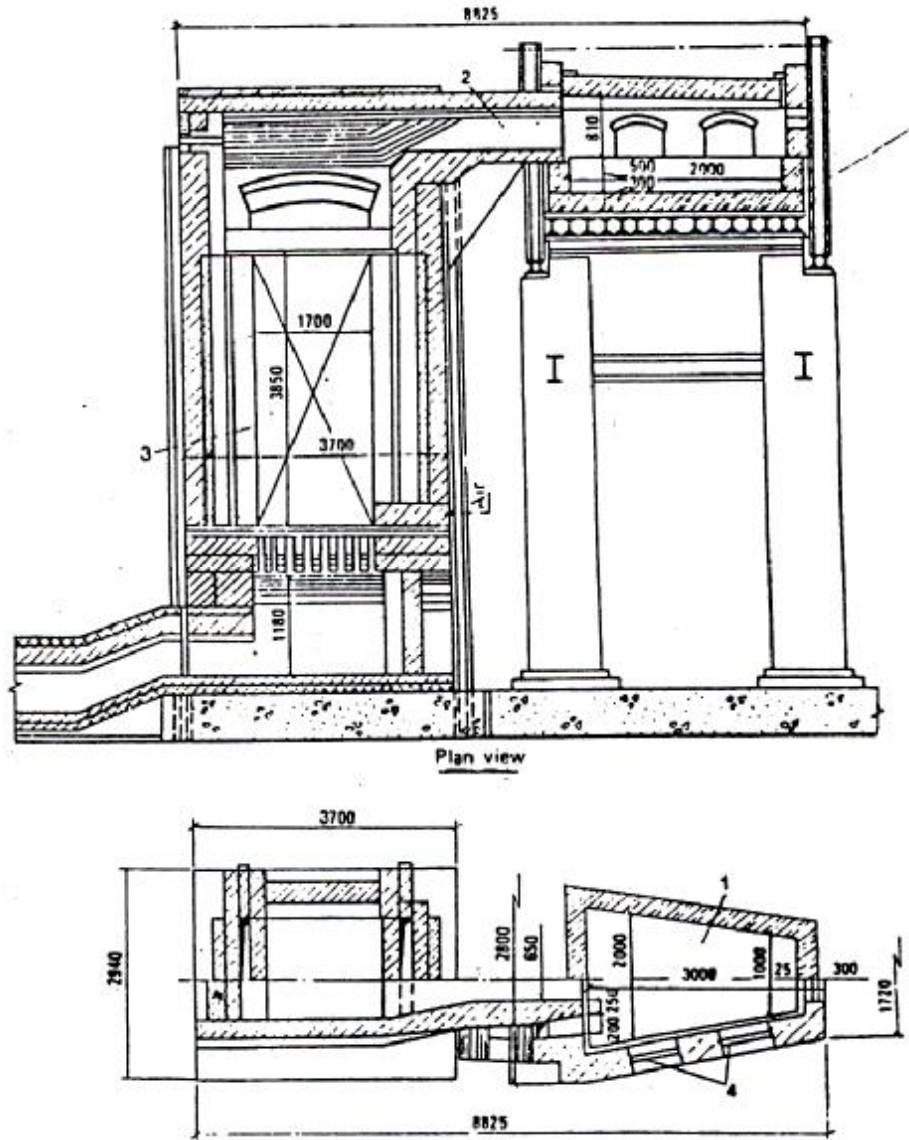
فضای کوره مخزنی متناوب شامل یک تانک می‌باشد که از آجرهای نسوز مقاوم تشکیل شده است. دیواره‌های کناری و سقف، تشکیل دهنده فضای بالایی مخزن است. کار لقمه‌گیری مذاب از طریق درهایی که در دیواره‌های طولی فضای کوره تعبیه شده است، انجام می‌گیرد.

کوره‌های تناوبی توسط گاز طبیعی یا سوخت مایع گرم می‌شوند. هوای مصرفی برای کوره، در ریژنراتور پیش گرم می‌شود. کوره مخزنی تناوبی مزایای زیادی نسبت به کوره‌های نوع دیگری دارد. فضای این کوره‌ها دارای راندمان بیشتری است و مشکلات حفاظتی در مورد کوره‌های دیگری در این کوره‌ها دیده نمی‌شود.

اندازه مخزن کوره تناوبی برحسب میزان شیشه مذاب تحویلی (kg/m^2) معین می‌گردد. معمولاً سطح تانک کوره‌های تناوبی ۵-۱ مترمربع و عمق مخزن ۶۰۰-۴۰۰ میلیمتر می‌باشد.



شکل (۱-۵): کوره مخزنی متناوب با شعله متقاطع
 ۱- تانک ۲- مشعل ۳- ریژنراتوار ۴- دریچه‌های کار



شکل (۲-۵): کوره مخزنی متناوب با شعله U شکل

۲-۲-۵- کوره‌های مخزنی پیوسته

کوره‌های مخزنی پیوسته دارای منطقه ذوب (قسمت ذوب و تصفیه مذاب) و قسمت کار است. بعضی از خصوصیات کوره‌های مخزنی نوع پیوسته در جدول (۱-۵) ارائه شده است.

جدول (۱-۵): مشخصات کوره‌های مخزنی پیوسته

نوع کوره	نوع محصول	مخزن						میزان شیشه مذاب تحویلی (kg/m ² day)	راندمان حرارتی کوره (درصد)
		قسمت ذوب				قسمت کار			
		عرض (b) (m)	طول (l) (m)	عمق (h) (m)	سطح (m ²)	سطح (m ²)	عمق (h) (m)		
Open type (without partitions) with transverse flame, regenerative	شیشه جام	6-9	18-30	1.5	80-260	80-400*	1,2	800-1500	12-30
With throat, transverse flame, regenerative with screen	بطری (سبز رنگ)	6-7	12-15	0.9-1.2	70-90	-	0.6-0.9	1500-2500	10-30
With throat, transverse flame, regenerative	ورق شیشه‌ای، ظروف شیشه‌ای (تقریباً سفید)	6-8	8-20	1.2-1.5	up to 150	-	0.9-1.2	1500-2500	15-30
With throat, direct heated, without regenerators	ظروف شیشه‌ای، لوله شیشه‌ای	0.8-3	1 : b= (4-7):1	0.5-1.2	up to 30	-	0.5-0.9	800-1000	10-30
With throat, U-shaped flame, regenerative or recuperative	ظروف شیشه‌ای	2.5-6	2.5-8	0.6-1.2	up to 45	-	0.6-0.9	800-1500	10-30

* منظور سطح منطقه سرمایش است.

کوره‌های ریژنراتوری با سطح ذوب بیش از 50 m^2 ، شعله عرضی دارند. مشعل‌های عرضی در طول دیواره‌های جانبی کوره و برای کنترل آسانتر دما در طول کوره تعبیه می‌شوند.

در کوره‌های با سطح مذاب کمتر، مشعلها در انتهای دیوار کوره تعبیه می‌شوند و محل شارژ مواد اولیه در انتهای دیوار بین مشعلها قرار گرفته (شکل ۳-۵) و یا در طول دیواره جانبی کوره ترتیب داده می‌شوند (شکل ۴-۵). در کوره‌های رکوپراتوری، جهت حرکت گاز ممکن است به صورت U شکل، طولی یا ترکیبی باشد.

در حال حاضر کوره‌های مخزنی با مخزن جداسازی نشده در منطقه ذوب شیشه، کاربرد زیادی پیدا کرده‌اند. دیگرام کوره‌های مخزنی برای تولید شیشه‌های جام در شکل (۵-۵) نشان داده شده است. فضای شعله کوره در مرز بین مخزنهای ذوب و خنک کن به دو صفحه تقسیم می‌شوند. گازهای احتراقی در جهت عرضی کوره حرکت می‌کنند و انرژی حرارتی گازهای خروجی برای گرم کردن هوا و گاز با ارزش حرارتی کم در ریژنراتور بکار گرفته می‌شود. (شکل ۶-۵).

سطح تانک مذاب در کوره‌های تولید شیشه جام در حدود $300-100$ مترمربع و سطح منطقه خنک کن تانک $150-50$ درصد سطح تانک مذاب است. عمق تانک مذاب و تانک خنک کن به ترتیب $1/5$ متر و $1/2$ متر، عمق کانال کشش مذاب $0/9$ متر، پهناي تانک مذاب $10-7$ متر و پهناي تانک خنک کن $6-5$ متر می‌باشد.

میزان کشش بار یا مذاب کوره با افزایش ابعاد کوره افزایش یافته و از سوی دیگر با افزایش کشش مذاب از کوره، میزان مصرف سوخت به ازای واحد کشش مذاب کاهش می‌یابد. به همین دلیل پیشنهاد می‌گردد که حتی‌الامکان کوره‌ها با مخزن بزرگ و کشش بار بالا ساخته شوند.

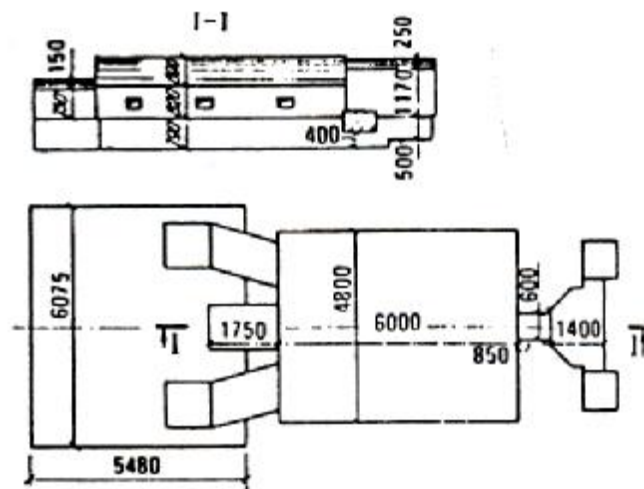
کوره‌های مخزنی گلوبی^۱ برای تولید محصولات شیشه‌ای مختلف نظیر بطری، ظروف شیشه‌ای، لوله‌های شیشه‌ای و غیره بکار می‌روند. تدارک قسمت گلوبی در کوره از سویی سبب کاهش جریان وزشی بین تانکهای کار و ذوب گردیده و از سوی دیگر عبور شیشه مذاب از تانک ذوب تا تانک کار باعث خنک‌تر شدن مذاب و همگن‌تر شدن آن می‌شود.

گلوبی ممکن است از نوع غوطه‌ور، غیرغوطه‌ور، بالا آمده، شیب‌دار و ... باشد (شکل ۷-۵). انتخاب نوع ویژه‌ای از گلوبی بستگی به ترکیب شیشه، تولید شیشه و نوع آجرهای نسوز در داخل کوره دارد.

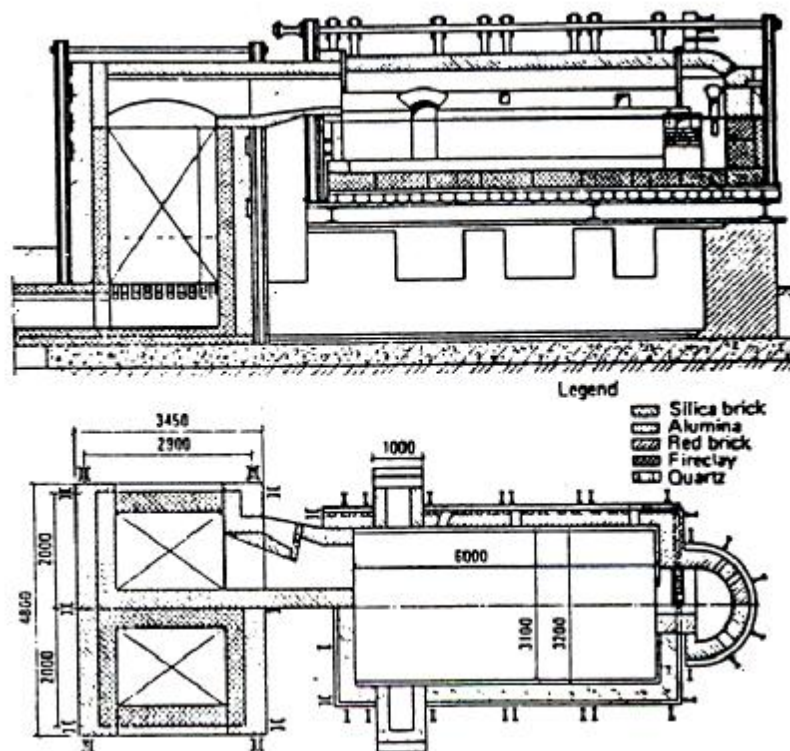
در عمل سطح مقطع گلوبی حدود $(300-400) \times (600-700)$ میلی‌متر مربع و طول آن $1300-1000$ میلی‌متر می‌باشد. کوره‌های مجهز به گلوگاه، معمولاً دارای $50-40$ مترمربع سطح مذاب بوده و معمولاً بیشتر آنها از نوع ریژنراتوری با حرکت عرضی گازهای احتراقی می‌باشند (شکل ۸-۵).

در ظرفیت‌های کمتر، انواع کوره‌های ریژنراتوری و رکوپراتوری با گازهای احتراقی U شکل و یا طولی (شکل ۵-۹) و کوره‌های گرماگیر مستقیم (شکل ۱۰-۵) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

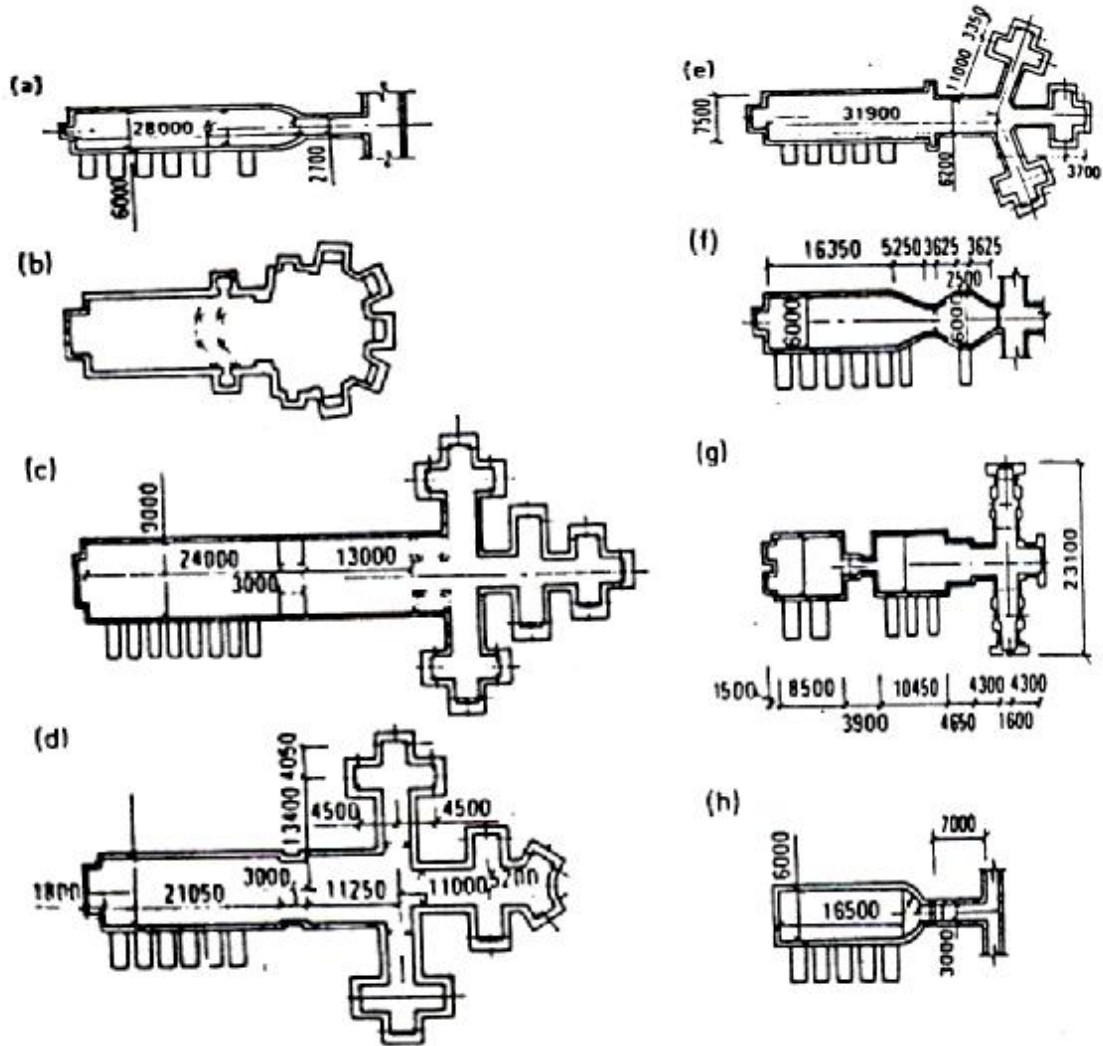
علیرغم بهبودهای کیفی که در طراحی کوره‌های کوچک ریژنراتوری مجهز به گلوبی (با سطح تانک در حدود $40-30$ مترمربع) صورت گرفته، اما مقدار راندمان حرارتی در این کوره‌ها همچنان کم و در حدود $15-8$ درصد بوده و بعلاوه هزینه ساخت آنها هنوز بالا می‌باشد.



شکل (۳-۵): کوره با شعله U شکل (محل شارژ مواد اولیه بین دو مشعل در انتهای کوره)



شکل (۴-۵): کوره ریژنراتوری با شعله U شکل (محل شارژ مواد اولیه در طول دیواره جانبی کوره)

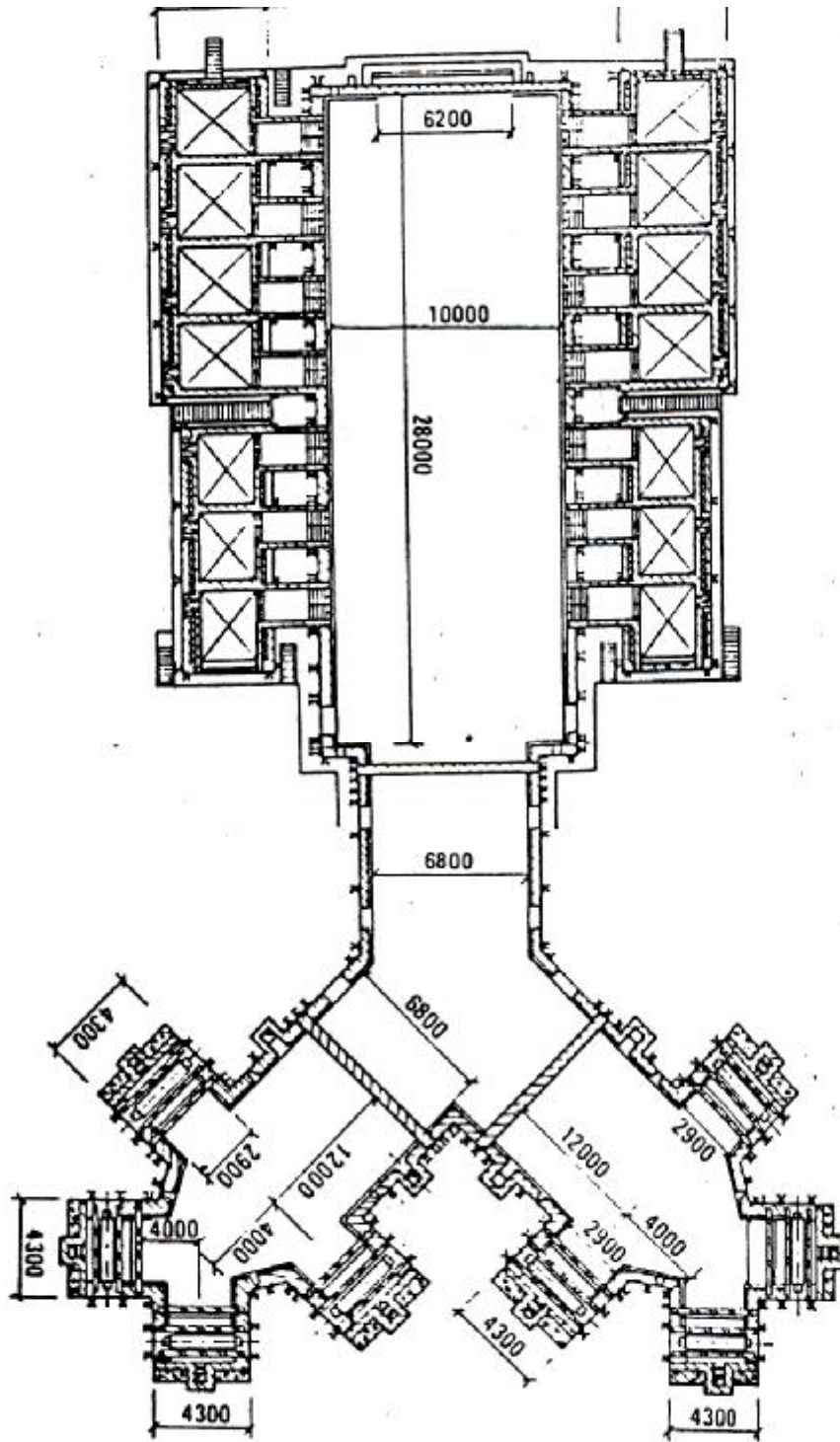


شکل (۵-۵): شکل‌های مختلف کوره‌های تولید شیشه جام

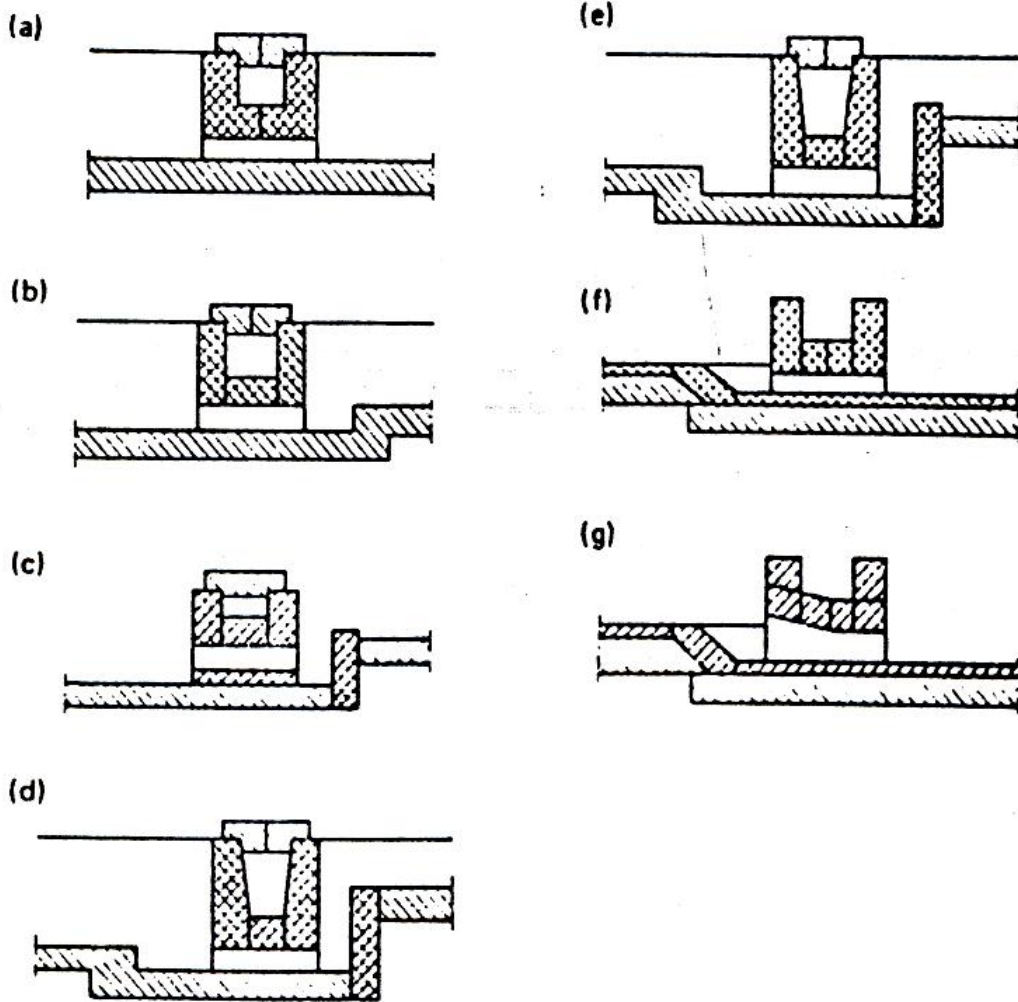
(a,b) با یک تانک مشترک

(c,d,e) بدون مجزاکننده تانکها

(f,g,h) با مجزاکننده‌های تانکها



شکل (۵-۶): کوره ریژنراتوری با هفت جفت مشعل عرضی برای تولید شیشه جام



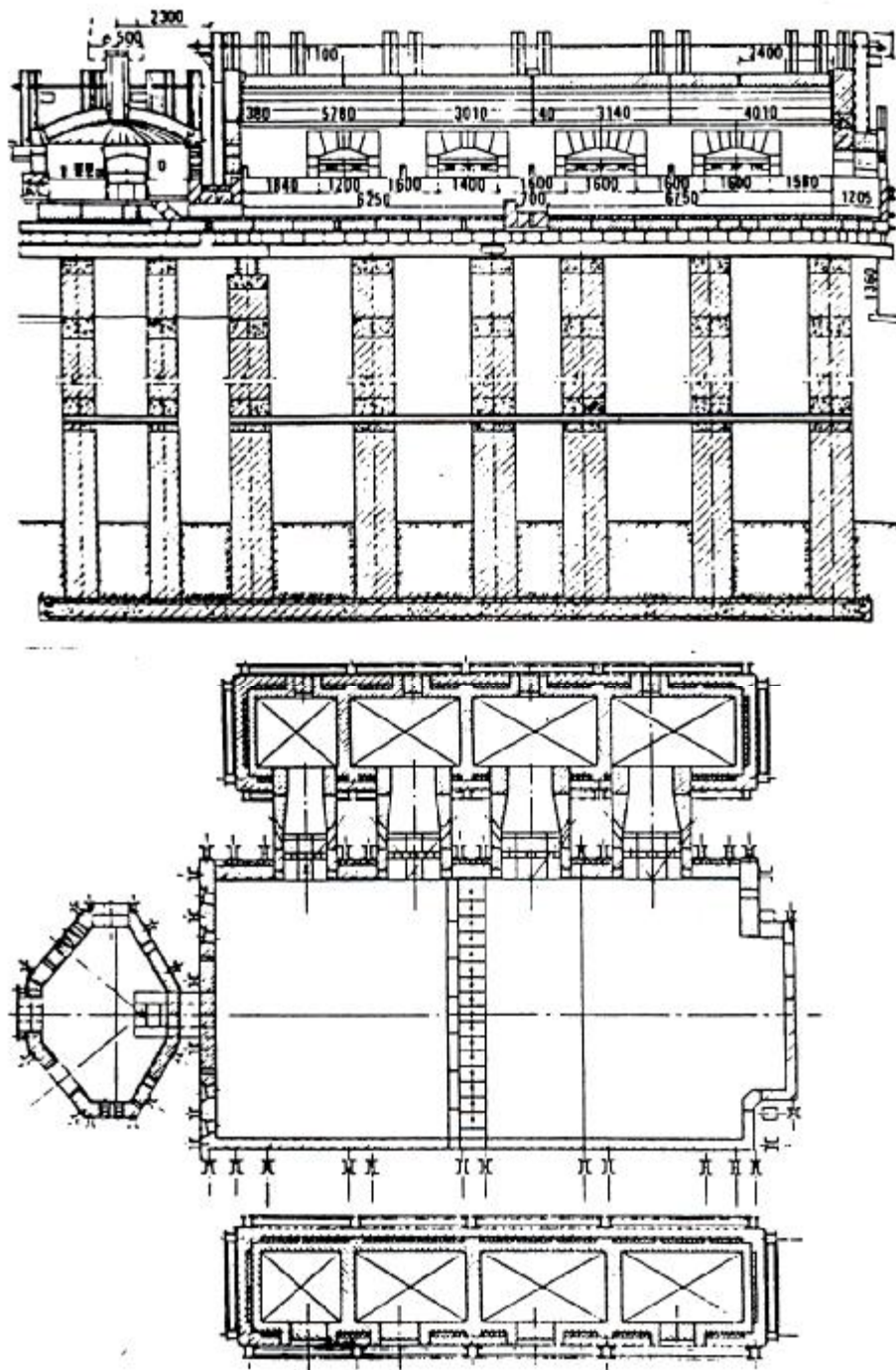
شکل (۵-۷) طرحهای گلوبی‌ها:

(a,b) غیر غوطه‌ور

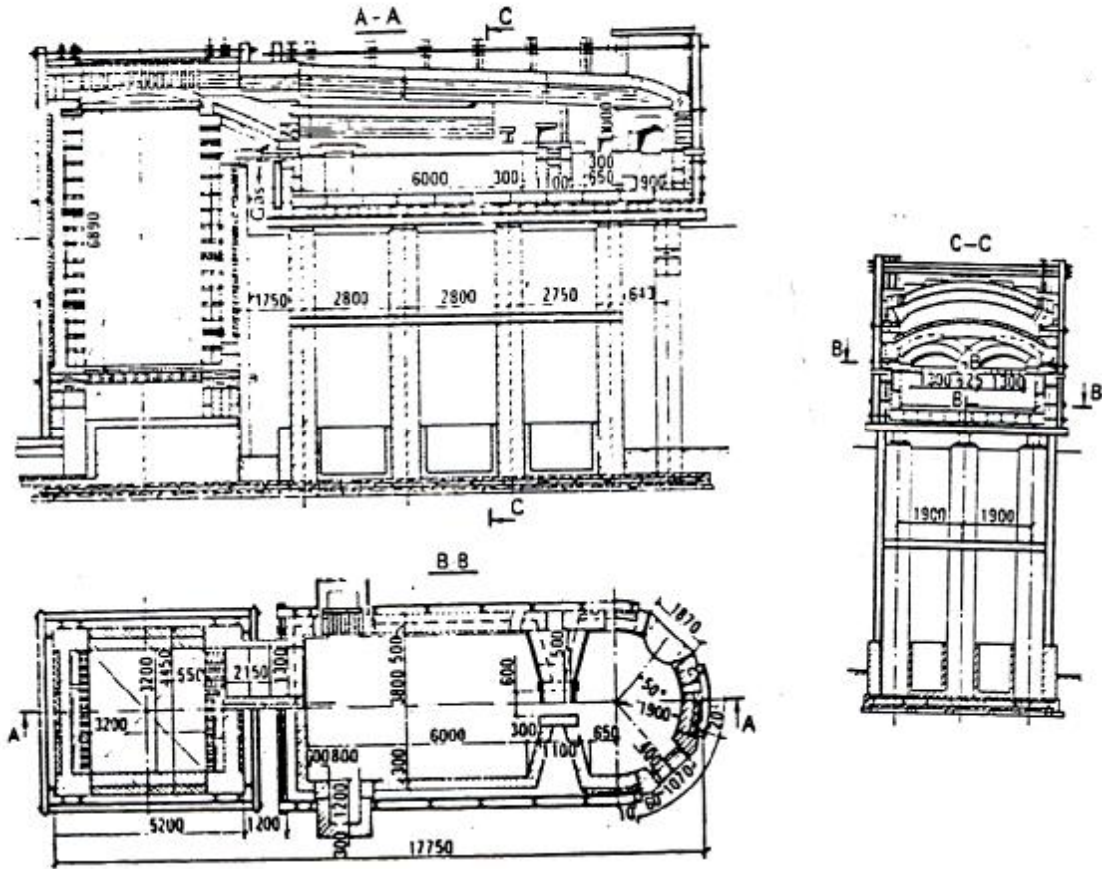
(c) از کف بالاتر قرار گرفته

(d,e) غوطه‌ور

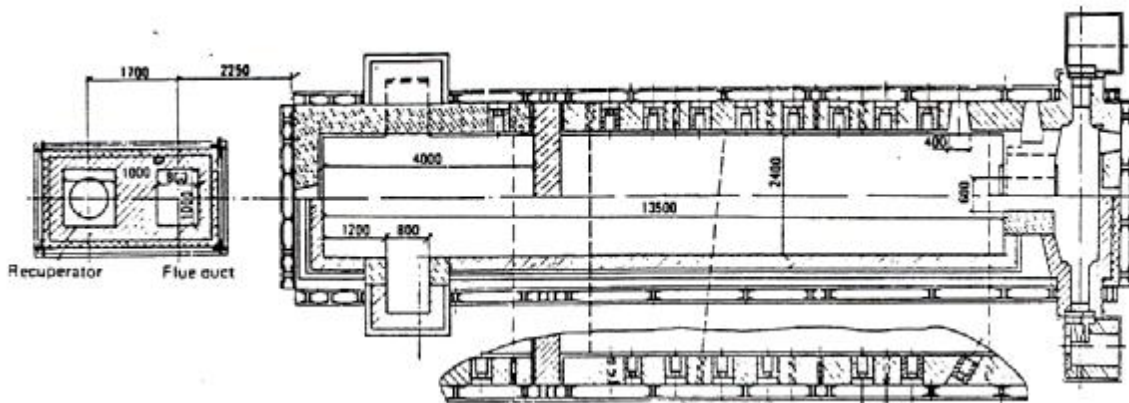
(f,g) غیر غوطه‌ور با شیب مخصوص



شکل (۸-۵): کوره ریژنراتوری با گلوگاه



شکل (۵-۹): کوره ریژنراتوری با گلوگاه و سقف دوبر



شکل (۵-۱۰): کوره حرارت مستقیم با گلوگاه

۳-۵- کوره‌های ذوب شیشه نوع حرارت مستقیم^۱

کوره‌های ذوب شیشه نوع حرارت مستقیم از سال ۱۹۵۶ کاربرد وسیعی پیدا کردند. کوره حرارت مستقیم تانکی است که به صورت باریک و طولی کشیده شده و مشعلهای آن با هوای سرد و یا پیش‌گرم شده (400°C) کار می‌کنند. نسبت پهنا به طول این کوره‌ها (۴-۵): ۱ می‌باشد.

کوره‌های حرارت مستقیم معمولاً نه تنها ریژنراتور بلکه رکوپراتور نیز ندارند. در این نوع کوره‌ها، مشعلها در طول کوره چیده می‌شوند که تضمین کننده ضریب بالایی از نظر پوشش گازهای احتراقی بر روی سطح مذاب شیشه می‌باشند.

گازهای کوره بطور غیرمستقیم نسبت به مواد اولیه حرکت می‌کنند که این امر اثر گرد و غبار مواد اولیه را در سطح کوره کاهش داده و این امکان را بوجود می‌آورد که دمای شیشه مذاب افزایش یابد.

کوره‌های حرارت مستقیم مزایای دیگری نیز دارند، از جمله می‌توان امکان احتراق سوخت در کمترین میزان نسبت هوا ($\alpha = 1.05$)، امکان دستیابی به درجه حرارت بالا با هوای خارجی پیش‌گرم شده (حرارت $250-400$ درجه سانتی‌گراد)، امکان عایق‌کاری سقف کوره و دیواره‌ها و در نتیجه کاهش افت گرما را نام برد. عمق تانک در این کوره‌ها پایین بوده و معمولاً در حدود $800 - 500$ میلیمتر می‌باشد که بستگی به میزان مصرف شیشه دارد. همچنین در این نوع کوره‌ها، ساختمان فضای بالای کوره ارتفاع کمتری دارد.

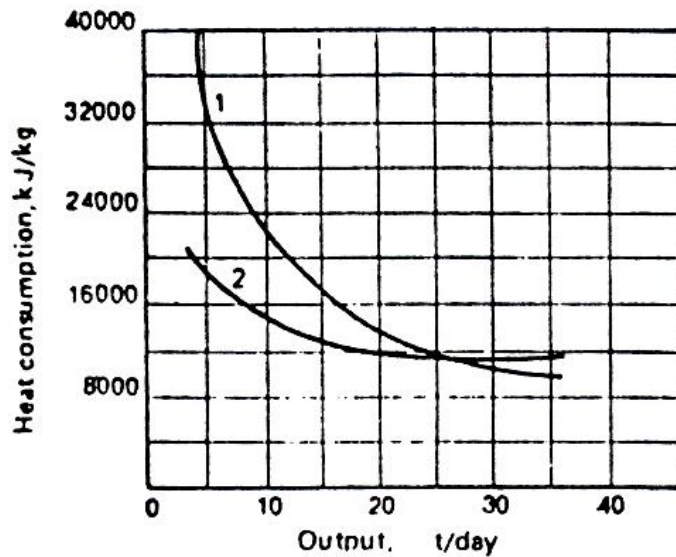
بنابراین کوره‌های حرارت مستقیم از نظر اقتصادی از راندمان بالایی برخوردارند، زیرا فضای کمی را اشغال کرده و در ساختمان آنها ریژنراتور با شیرهای برگشتی وجود نداشته و کوره قابلیت تغییرپذیری از ذوب یک نوع شیشه به نوع دیگر را بدون متوقف کردن عملیات کوره، دارا می‌باشد. در رابطه با کاربرد مشعلهای دو مسیری^۲، درون مخلوطی^۳ با شعله کوتاه، پهنای کوره نباید از ۳ تا $3/5$ متر تجاوز کند. خصوصیات کوره‌های حرارت مستقیم در جدول (۲-۵) داده شده است.

جدول (۲-۵): مشخصات کوره‌های حرارت مستقیم

ابعاد ناحیه ذوب			مذاب تولیدی (ton/day)	مصرف ویژه انرژی حرارتی (kJ/kg)
طول (m)	عرض (m)	سطح (m ²)		
6	1.2	7.2	5-9	13500-16500
8.4	1.2	10.1	7-12	12500-17600
9	1.8	16.2	9-20	12150-15100
11	1.8	19.8	12-20	12150-13850

1- Direct-Heated
2- Two Pass
3- Intermixing

کوره‌های حرارت مستقیم برای ذوب شیشه‌های مخصوص یا رنگی مانند شیشه کریستال بکار می‌روند. منحنی‌های میزان مصرف سوخت به ازای کیلوگرم شیشه ذوب شده در یک کوره حرارت مستقیم (با سطح محفظه ذوب در حدود 20 m^2) و مقایسه آن با کوره ریژنراتوری (با محفظه ذوبی در حدود 17 m^2) در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۱): نمودار انرژی حرارتی مصرفی

(۱) کوره ریژنراتوری

(۲) کوره حرارت مستقیم (بدون بازیافت حرارت)

در سالهای اخیر، طراحی کوره‌های ذوب شیشه بطور اساسی بهبود یافته و راندمان آنها افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است که این افزایش به عوامل زیر بستگی دارد:

- وضعیت ذوب در دمای بالا (1580°C).
- استفاده از مشعلهای کارا تر.
- وجود گاز ذخیره شده که تضمین کننده پوشش مناسب تر گازها بر روی سطح شیشه مذاب می‌باشد.
- امکان استفاده از حرارت الکتریکی اضافی برای بالا بردن ناگهانی درجه حرارت به منظور حباب‌زدایی مذاب قبل از وارد شدن به گلوبی منطقه ذوب.
- امکان استفاده از مخلوط‌کن‌های مکانیکی برای همگن تر ساختن شیشه مذاب.
- ایجاد مناطق حرارتی مستقل در عملکرد مخزنها (جدایی مخزن ذوب از مخزن کار در فضای کوره).

- استفاده از آجر نسوزهای الکتروذوبی^۱ در دیواره‌های کوره و غیره.

مصرف آجر نسوز در کوره‌های صنعتی حرارت مستقیم نسبتاً کم است، به علاوه هزینه عملکرد این کوره‌ها پایین بوده و فضای کمتری را نیز اشغال می‌کنند. کوره‌های الکتریکی ذوب شیشه عمدتاً برای ساخت شیشه‌های خاص صنعتی و شیشه کریستال بکار برده می‌شوند.

در رابطه با و بهبود طرح کوره‌های ذوب شیشه و افزایش کارایی فرآیند ذوب، موارد زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

- تدارک بهینه مواد اولیه برای شتاب دادن به مکانیزم تبادل حرارت.
 - افزایش سطح تماس مواد اولیه با گازهای داغ احتراقی و پیش گرم کردن مواد اولیه.
 - بهبود تبادل حرارتی بین شعله و شیشه مذاب جهت افزایش میزان تولید.
 - اختلاط بهتر مذاب.
 - شتاب دادن به عمل تصفیه مذاب.
 - راندمان بیشتر مصرف سوخت برای حداقل کردن واحد سوخت مصرفی.
 - کاربرد مواد نسوز مقاوم در مقابل خوردگی ایجاد شده ناشی از جریان شیشه مذاب.
- بعضی از طرحهای پیشنهادی کوره‌های ذوب شیشه در ادامه تشریح می‌گردند.

۱-۳-۵- کوره‌های ذوب دورانی^۲

در یک کوره دورانی (شکل ۱۲a-۵)، فضای کوره به صورت یک درام^۳ استوانه‌ای شکل می‌باشد. شارژ مواد اولیه در این نوع کوره‌ها، در خلاف جهت حرکت مذاب شیشه صورت می‌گیرد. در نتیجه گردش درام (با سرعت دورانی ۱۰۰-۶۰ rpm)، مواد اولیه و شیشه مذاب به صورت لایه نازکی بر روی دیواره داخلی درام پخش می‌گردد. در کوره بوست^۴ (شکل ۱۲b-۵)، مواد اولیه بداخل یک فورهارت شیب‌دار در حال چرخش با شیبی کم وارد می‌شود. به این ترتیب مواد اولیه مستقیماً بداخل مخزن ذوب انتقال پیدا نمی‌کند. کوره‌های مذکور به دلیل خوردگی شدید در دیواره‌ها و کیفیت پائین شیشه تولیدی چندان مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

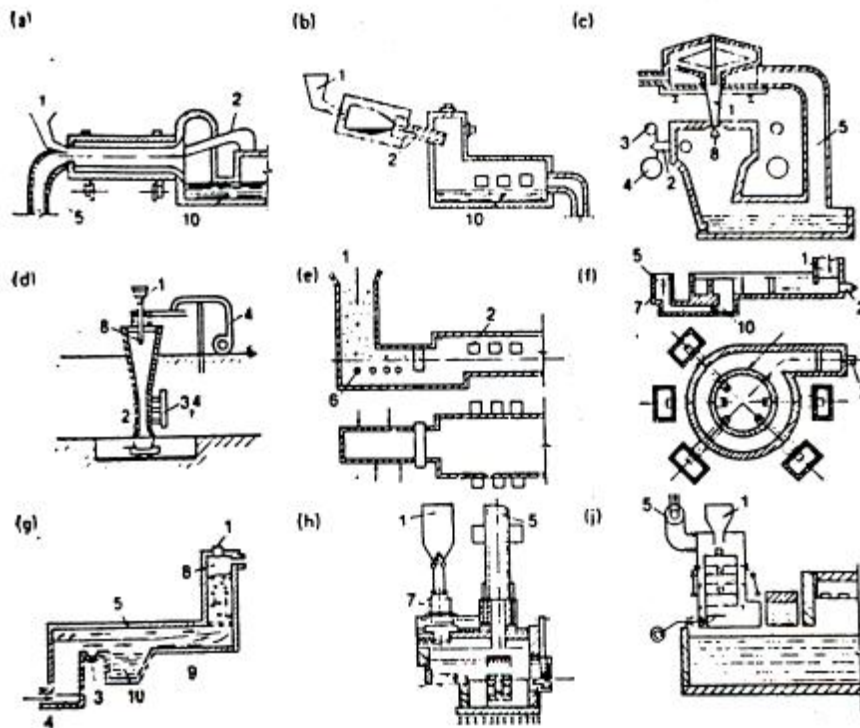
۲-۳-۵- کوره‌های ذوب شیشه در حالت معلق^۵

در این کوره که اولین بار توسط فرگوسن^۶ پیشنهاد شد (شکل ۱۲c-۵)، مواد اولیه در حالت معلق ذوب می‌شود. شیشه ذوب شده نهایی در جهت محور کوره حرکت می‌کند. آزمایشهای انجام شده در این نوع کوره

1- Electromelted
2-Rotary Furnaces
3-Drum
4- Bosset
5- Furnaces for glass melting in suspended state
6- Fergusson

نشان می‌دهد که دیواره کوره در معرض خوردگی شدید قرار گرفته و شیشه مذاب یکنواخت نمی‌باشد و توسط ناخالصی‌ها آلوده می‌شود.

در کوره پیشنهادی توسط کیتوگوردسکی^۱، گینزبرگ^۲ و سوروتسف^۳ (شکل ۱۲d-۵)، مواد اولیه از ناحیه بالا تغذیه می‌شود و گازهای داغ احتراقی و هوا از کف حرکت می‌کند، بطوریکه مواد اولیه در یک حالت معلق نگهداری شده و نمی‌تواند در کنار دیواره کوره قرار گیرد. آزمایشهایی که بر روی این نوع کوره انجام شده، نشان می‌دهد که ترکیب ذوب همگن بوده، اما درصد زیادی از مواد اولیه ناشی از جریان گازهای داغ خروجی تلف می‌گردد.



شکل (۱۲-۵): طرح‌های نوین کوره‌های ذوب شیشه

۳-۳-۵- کوره‌های ذوب با مشعلهای غوطه‌ور^۴

این نوع کوره دارای مخزن ذوبی است که در آن معمولاً دو مشعل به صورت غوطه‌ور قرار گرفته‌اند (شکل ۱۲e-۵). در بالای مخزن ذوب کوره‌های با مشعل غوطه‌ور، یک ستون تبادل حرارتی برای پیش‌گرم کردن مواد اولیه بوسیله حرارت گازهای داغ خروجی در ناحیه مذاب در نظر گرفته شده است. تصفیه شیشه مذاب در

1- I.I.Kitougorodsky
2- D.B. Ginzburg
3- V.P. Surotsev
4- Furnace with Submerged Burners

لایه‌ای نازک صورت می‌گیرد. مشعلهای غوطه‌ور می‌توانند بصورت عمودی در کف یا در دیواره‌های مخزن قرار گیرند.

۴-۳-۵- کوره دایره‌ای^۱

مذاب شیشه در چنین کوره‌ای فقط در یک جهت حرکت می‌کند. این نوع کوره‌ها سطح مقطع دایره‌ای دارند (شکل ۱۲f - ۵ و ۵ - ۱۲g). مواد اولیه از طریق ستون تبادل حرارتی وارد کوره شده و به این ترتیب ناشی از تبادل حرارت با گازهای داغ خروجی، به خوبی پیش‌گرم می‌شود. این نوع کوره‌ها به وسیله مشعلهای غوطه‌ور تجهیز می‌شوند. تجربه نشان داده که این نوع کوره‌ها قابلیت تولید شیشه با کیفیت بالا و بسیار همگن را دارا می‌باشند.

۵-۳-۵- کوره سیکلونی آبشاری^۲

در کوره‌های سیکلونی آبشاری، سطح وسیعی از ناحیه ذوب، محل اتصال بین گازهای داغ احتراقی و مواد اولیه می‌باشد (شکل ۱۲h - ۵). در این نوع کوره خوراک‌دهنده، بیج آماده شده را از مخزن مواد اولیه به داخل سیکلون می‌فرستد. سوخت و هوای پیش‌گرم شده نیز به شکل مماسی بداخل سیکلون هدایت می‌شوند. شیشه مذاب از اولین جریان گردبادی بداخل اولین مرحله تصفیه فرستاده شده، سپس به مرحله دوم می‌رود و در نهایت به داخل تانک ذخیره‌سازی مذاب فرستاده می‌شود. شعله مستقیماً داخل مراحل تصفیه قرار دارد. گازهای داغ خروجی از منطقه ذوب و تصفیه، پیش از ترک کوره از داخل رکوپراتور تابشی عبور می‌کند که در این ناحیه هوا جهت احتراق بهتر با سوخت، پیش‌گرم می‌شود.

۶-۳-۵- کوره آبشاری با ستونهای مبدل حرارتی

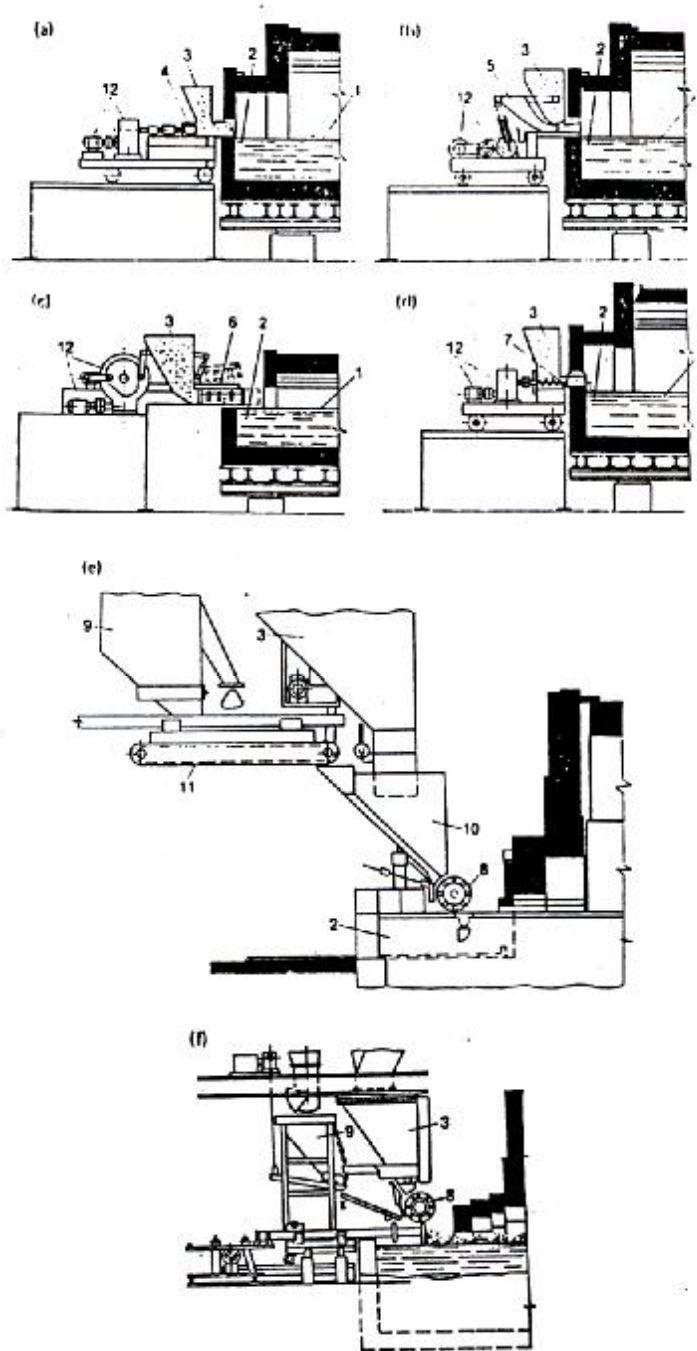
در این نوع کوره، ابتدا مواد اولیه از تانک ذخیره‌سازی بیج به داخل مبدل حرارتی در خلاف جهت حرکت گازهای احتراقی کوره فرستاده می‌شود (شکل ۱۲j - ۵). سپس مواد به درون صفحه افقی تعبیه شده در جهت جریان گازهای احتراقی کوره ریخته می‌شود. پس از آن مواد اولیه که تا حدود بسیار زیادی انرژی حرارتی دریافت کرده، به داخل ناحیه ذوب فرستاده شده و سپس به داخل منطقه تصفیه می‌رود.

۴-۵- تزریق مواد اولیه

در بیشتر مخازن ذوب پیوسته، خوراک‌دهی کوره به صورت مکانیزه انجام می‌شود. مخلوط مواد اولیه و خرده شیشه از طریق یک دریچه به داخل محفظه‌ای که برای این کار تعبیه شده، خوراند می‌شوند. این محفظه چهارگوش، در کوره‌های باشعله عرضی در انتهای دیواره کوره و در کوره‌های با شعله U شکل در جهت طولی دیواره جانبی کوره قرار گرفته است. این محفظه‌های چهارگوش معمولاً از دیواره کوره بیرون زده‌اند که عرض آنها به میزان تولید کوره بستگی دارد. شکلهای مختلف خوراک‌دهی کوره در شکل (۱۳ - ۵) نشان داده شده است.

1- Circular Furnace
2- Cyclone- Cascade

همانطور که از شکل (۱۳-۵) نیز پیدا است، مخلوط مواد اولیه و خرده شیشه می‌تواند توسط مکانیزم‌های مختلف انتقال مواد، نظیر: ماردون، پیستون، ویبراتور و غیره به داخل کوره فرستاده شود. مکانیزم‌های خوراک‌دهی کوره بطور اتوماتیک با فرمان ارسالی از سطح سنج مذا ب عمل می‌نماید.



شکل (۱۳-۵): طرح‌های مختلف خوراک‌دهی کوره

(a) تغذیه‌کننده نوع پیستونی (b) تغذیه‌کننده نوع پیستونی لرزشی (c) تغذیه‌کننده نوع شانه‌ای

(d) تغذیه‌کننده نوع ماردونی (e,f) تغذیه‌کننده چرخشی**۵-۵- مشعلهای کوره‌های مخزنی**

مشعلها در کوره‌های مخزنی برای تأمین مقدار مناسب سوخت (به صورت گاز) و اختلاط آن با هوای احتراق درون کوره، مخلوط کردن داخلی مذاب، سازماندهی شعله و هدایت شعله به داخل فضای احتراق کوره مورد استفاده قرار می‌گیرند. وظیفه مشعلها شکل دادن شعله در طول معین (وابسته به عرض کوره) می‌باشد، که این شعله باید بخوبی سطح شیشه مذاب را پوشش داده و مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز جهت انتقال به مواد اولیه درون کوره را تأمین نماید. در کوره‌های مخزنی ریژنراتوری که با سوخت‌های با ارزش حرارتی بالا کار می‌کنند، عموماً سوخت از میان کانالهایی تأمین می‌شود که در انتها و کف مشعلها قرار دارند و تحت زاویه‌ای خاص با جریان هوایی که توسط ریژنراتور تأمین می‌گردد، مخلوط می‌شود. سوخت به داخل اتاقک پیش اختلاط هدایت می‌شود و این عمل از انتها، کناره‌ها یا کف مشعلها صورت می‌گیرد (شکل ۱۴-۵). برای مخلوط شدن بهتر گاز و هوا و همچنین هدایت مناسب شعله به داخل فضای ذوب شیشه، شیب سقف و قوس محل مشعل باید زاویه‌ای در حدود ۲۵-۲۰ داشته باشد.

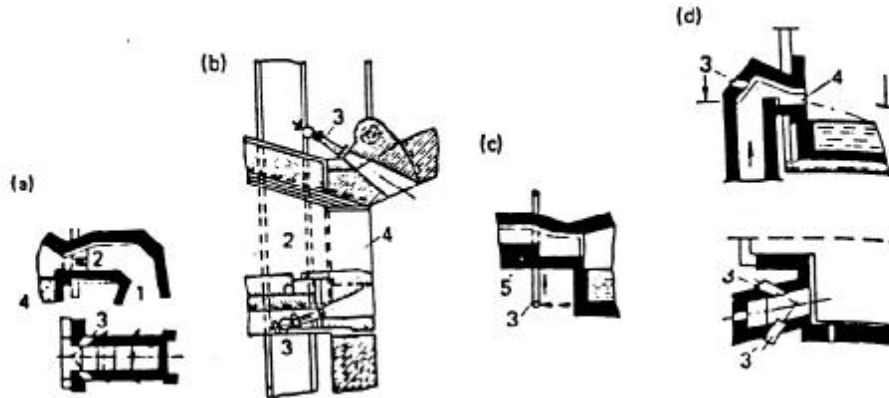
سرعت هوا در کانالهای عمودی با شعله عرضی باید در حدود ۳-۴ متر بر ثانیه و در کوره‌های با شعله U شکل، ۵-۷ متر بر ثانیه باشد. سرعت هوا در کانالهای افقی معمولاً ۶-۸ متر بر ثانیه می‌باشد. سرعت مخلوط هوا - گاز (W) بر حسب m/s در ناحیه مشعل بوسیله فرمول ارائه شده توسط گینزبرگ^۱ محاسبه می‌شود:

- برای کوره‌های با شعله طولی یا عرضی $W=4+L$

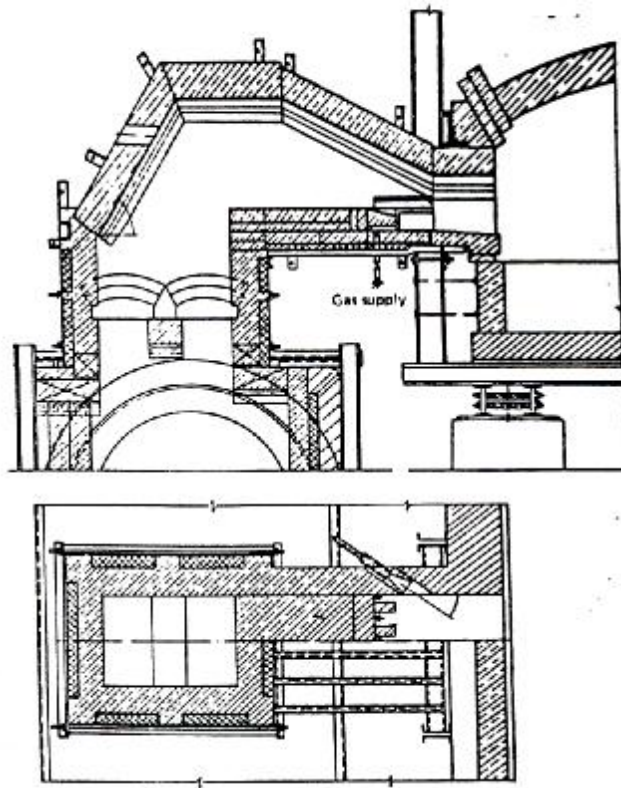
- برای کوره‌های با شعله U شکل $W=7+L$

که در آن L فاصله بین مشعلها در کوره با شعله عرضی و یا فاصله بین مشعل و دیواره‌ها در کوره‌های با شعله U شکل (بر حسب متر) می‌باشد.

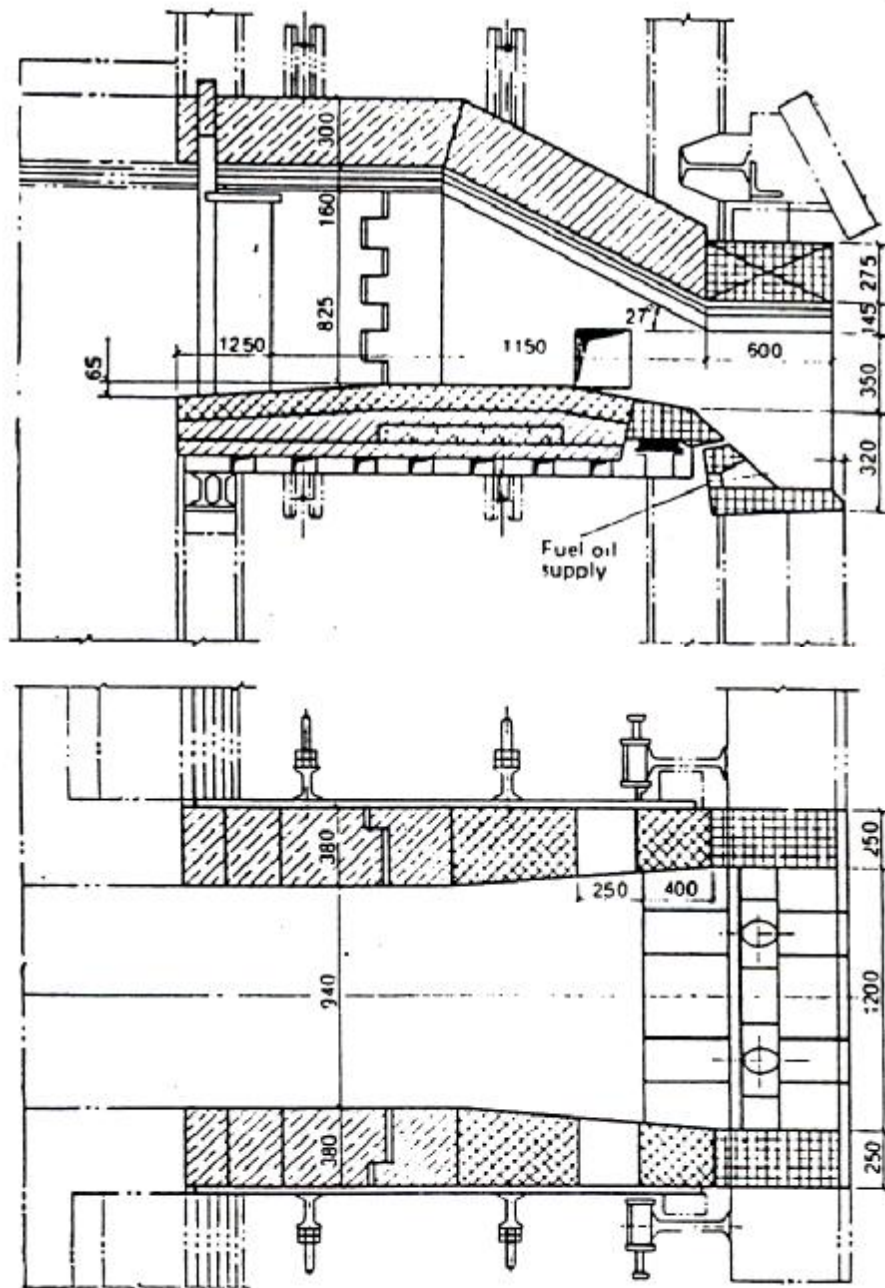
مشعلهای کوره به صورت شماتیک در شکل‌های (۱۵-۵) و (۱۶-۵) نشان داده شده است. سطح مقطع مشعلها تقریباً، ۳ - ۲/۵ درصد سطح مقطع گرمایش کوره مخزنی با شعله عرضی و ۲ - ۱/۵ درصد همان سطح در کوره‌های با شعله U شکل می‌باشد.



شکل (۱۴-۵): طرحهایی از مشعل برای کوره‌های مخزنی
 (a) مشعل شفتی با گاز ورودی از پهلو (b) مشعل با گازهای ورودی از بالا و پائین
 (c) مشعل با تغذیه‌کننده گاز در پله (d) مشعل با گاز ورودی از انتها
 (۱) کانال عمودی (۲) کانال افقی (۳) منبع گاز (۴) دریچه احتراق (۵) پله



شکل (۱۵-۵): طرحی از ترکیب مخزن با هوای قابل احتراق آن



شکل (۱۶-۵): طرحی از مشعل کوره

۵-۶- گلوبی‌ها

گلوبی‌ها باعث اختلاط و همگن شدن بیشتر مذاب، کاهش درجه حرارت مذاب، تقسیم فضای کوره به منطقه ذوب و منطقه کار مذاب، کاهش جریان بازگشتی و غیره می‌شود. دیاگرام گلوبی در شکل (۷-۵) نشان داده شده است.

انتخاب طرح خاص از گلوبی بستگی به ترکیب و رنگ شیشه و یا تولید کوره دارد. کوره‌های نوع گلوبی غیر غوطه‌ور (شکل ۷-۵ a,b,f,g) برای ذوب شیشه‌های رنگی و نیمه شفاف با ظرفیت $1500 - 300 \text{ kg/m}^2$ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در کوره‌هایی با ظرفیت $2000 - 1800 \text{ kg/m}^2$ گلوبی غوطه‌ور ترجیح داده می‌شود، که این امر باعث سرد شدن سریعتر شیشه مذاب می‌گردد.

۵-۷- پیش‌بینی‌های لازم برای حباب‌زدایی مذاب

تصفیه مذاب و همگن‌سازی آن از مهمترین و بحرانی‌ترین عملیات مربوط به تولید شیشه محسوب می‌شوند، بطوریکه همگن بودن شیشه مذاب و کیفیت محصول نهایی همراستا می‌باشند.

تصفیه مذاب توسط روشهای زیر سرعت داده می‌شود:

- افزایش درجه حرارت در منطقه تصفیه.
- افزایش طول منطقه ذوب و تصفیه.
- استفاده از حباب‌ساز در کف کوره.
- بهم‌زدن و اختلاط مکانیکی مذاب.

روش مصنوعی حباب‌سازی که ابتدا در انواع کوره‌های ذوب شیشه استفاده می‌شد، هم اکنون برای کوره‌های نوع مخزنی پیوسته بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. حباب‌سازی باعث می‌شود که حرارت به لایه‌های عمیق مذاب نفوذ کرده، زمان حضور شیشه در ناحیه ذوب افزایش یافته و در نهایت کیفیت شیشه و تولید کوره بهبود یابد.

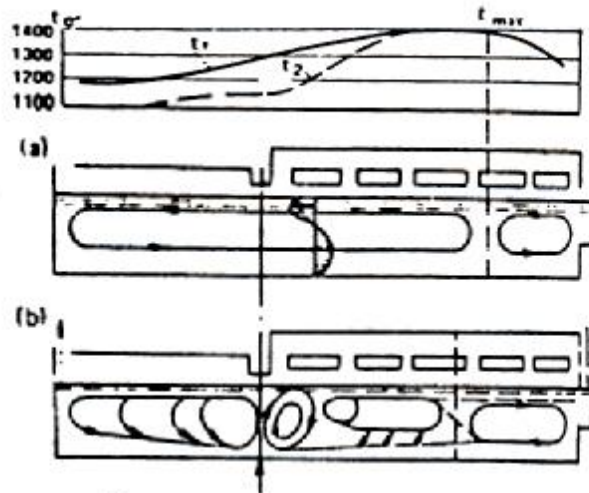
بر طبق نظر ولر^۱، هنگام بالا آمدن حباب‌ها از درون مذاب، دو سری جریان گردابی در دو طرف محل بالا آمدن حبابها بوجود می‌آید که یکی از این دو جریان به طرف منطقه ذوب و دیگری بطرف منطقه خنک‌سازی حرکت می‌کند (شکل ۱۷-۵).

با عمل حباب‌سازی، کل جرم شیشه مذاب که به منطقه کار وارد می‌شود، از میان دیواری از حبابها عبور می‌کند. با توجه به داده‌های حاصل از آزمایشات مکرر، معمولاً برای عمل حباب‌سازی نازل‌هایی در یک یا دو ردیف ترتیب داده می‌شوند. در کوره‌های با شعله عرضی پیشنهاد می‌گردد که اولین ردیف نازلها در ناحیه‌ای قرار گیرد که شیشه مذاب بیشترین دما را دارد. در کوره‌های با گلوبی، نازل‌های حباب‌سازی در فاصله ۲۵ - ۳۰ درصد طول تانک (از گلوبی) در منطقه‌ای که سطح شیشه مذاب صاف می‌باشد، قرار می‌گیرند. برای افزایش ظرفیت شیشه مذاب در منطقه ذوب، نازلها در ناحیه تشکیل سیلان حباب یا کف^۲ در سطح شیشه قرار

می‌گیرند. نازلها باید طوری قرار گیرند که فاصله‌ای در حدود ۵۰۰-۴۰۰ میلیمتر بین آنها باشد و حداکثر فاصله نازلها باید ۸۰۰-۶۰۰ میلیمتر از کناره دیوار تانک باشد. همچنین نازلهای دو ردیفه می‌بایستی طوری قرار گیرند که بین آنها فاصله‌ای در حدود ۱۰۰۰-۸۰۰ میلیمتر وجود داشته باشد.

عمل حباب‌سازی متأثر از هوای خشک و اکسیژن مصرفی به این منظور است. نرخ جریان گازهای حباب در حدود $2/5 - 1/2 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد و فشار نازل حباب‌ساز نیز در حدود $0/6 \times 10^5 - 0/2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ قرار دارد. فرکانس حباب‌سازی نباید کمتر از ۱۵ تا ۲۰ حباب بر دقیقه و بیشتر از ۵۰ تا ۶۰ حباب در دقیقه گردد. مقدار مذکور بستگی به نوع شیشه مذاب دارد.

پارامترهای پذیرفته شده حباب‌سازی برای شیشه‌های مختلف در جدول (۳-۵) ارائه شده است. نازلهای حباب‌سازی از پلاتینیم یا سایر فلزات و آلیاژهای مقاوم حرارتی ساخته می‌شوند (شکل ۱۸-۵). نازلها بصورت عمودی در کف مخزن مذاب قرار می‌گیرند. دیوارها و کف کوره در ناحیه حباب‌سازی از مواد نسوز دیرگدازی ساخته شده و معمولاً این دیوارها خنک می‌شوند. دیاگرام سیستم حباب‌سازی در شکل (۱۹-۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۷-۵): جریان‌های وزشی در شیشه مذاب

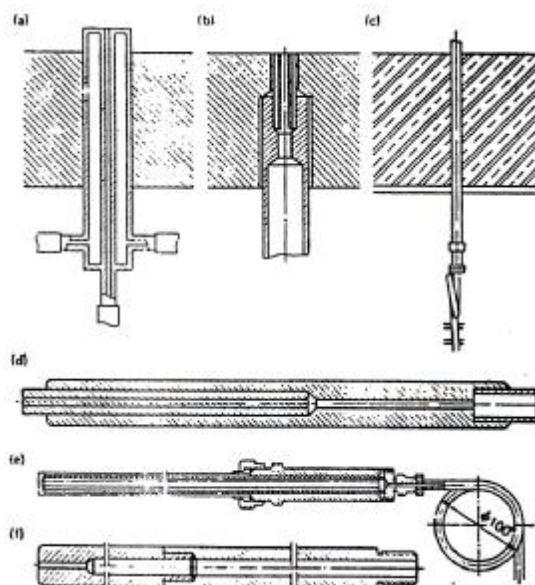
(a) بدون حباب‌ساز

(b) با حباب‌ساز

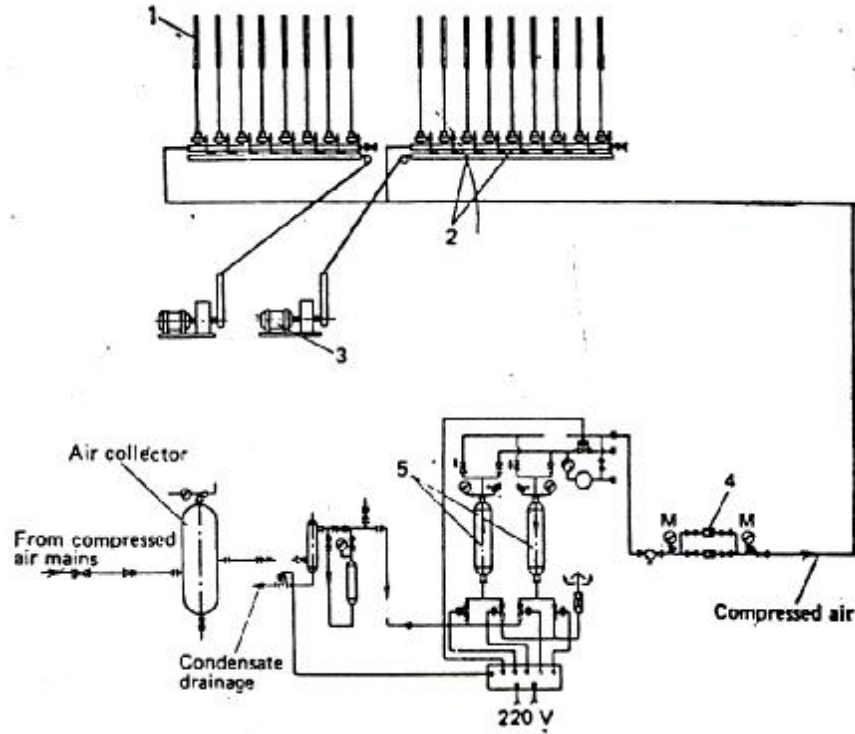
(منحنی درجه حرارت: t_1 - بدون حباب‌ساز، t_2 - با حباب‌ساز)

جدول (۳-۵): پارامترهای حباب‌سازی برای انواع شیشه‌ها

Glass	Pressure or Flow Rate of Air per Nozzle (N/m ²)	Number of Bubbles Rising to Surface per Minute	Bubble Diameter (mm)
Dark-Green	$(0.2-0.6) \times 10^5$	15-20	≈150
Semi-White	$(0.4-0.5) \times 10^5$	50-60	200-250
Colourless Neutral	$(0.25-0.3) \times 10^5$	35-40	-
Colourless Alkaline	$(0.2-0.5) \times 10^5$	20-40	100-150
Colourless Slightly Alkaline	1.4-2.5 m ³ /h	-	-
Colourless Barium	$(0.3-0.4) \times 10^5$	-	150-200



شکل (۱۸-۵): انواع نازلها و ترتیب قرار گرفتن آنها در کف مخزن ذوب
 (a) آب - خنک (b) خنک‌کاری توسط گازهای فلزی (c) با قطعات رادیوم پلاتین
 (d) مقاومت حرارتی (e,f) مقاومت حرارتی فلزی



شکل (۱۹-۵): دیاگرام سیستم حباب‌سازی

۸-۵- محاسبه کوره‌های مخزنی

انتخاب نوع کوره بستگی به ترکیب شیشه، نوع محصول تولیدی، میزان کشش بار از کوره، روش کار بر روی شیشه و نوع سوخت مصرفی دارد. سطح مخزن ذوب (ناحیه گرما) در کوره‌های مخزنی پیوسته با توجه به میزان مواد اولیه ورودی و یا شیشه مذاب خروجی از کوره محاسبه می‌گردد.

در محاسبات کوره‌های مخزنی، به نرخ مواد اولیه ورودی یا مذاب خروجی از واحد سطح مخزن ذوب کوره، واحد بار^۱ مذاب گفته می‌شود. با توجه به داده‌های عملی، ورودی کوره برای تولید شیشه‌های جام در حدود $0.18 - 1.5 \text{ ton/m}^2 \cdot \text{day}$ ، برای تولید شیشه‌های سودایی $0.18 - 2.5 \text{ ton/m}^2 \cdot \text{day}$ و برای تولید محصولات شیشه‌ای مطروف (در کوره‌های نوع گلوبی) $1.5 - 2 \text{ ton/m}^2 \cdot \text{day}$ و برای تولید لامپ الکتریکی و شیشه‌های صنعتی (در کوره‌های نوع گلوبی) $0.15 - 1.3 \text{ ton/m}^2 \cdot \text{day}$ می‌باشد. واحد بار مذاب به میانگین دمای شیشه مذاب در ناحیه ذوب بستگی دارد که از داده‌های ارائه شده در جدول (۴-۵) بدست می‌آید.

1- Unit yield of molten glass

جدول (۴-۵): واحد بار بر اساس میانگین دمای ناحیه ذوب

1600	1540	1500	1470	1420	1370	1300	میانگین دما (T) (°C)
3	2	1.5	1.05	0.7	0.35	0	میزان واحد بار (q) (ton/m ² .day)

سطح ناحیه گرمایش یک کوره (S، منطقه ذوب و تصفیه)، بر حسب مترمربع به وسیله رابطه (۵-۱) محاسبه می‌گردد.

$$S=G/q \quad (m^2) \quad (5-1)$$

که در رابطه فوق G میزان شیشه مذاب خروجی از کوره بر حسب kg/day و q واحد بار شیشه مذاب بر حسب kg/m².day می‌باشد.

۹-۵- ابعاد ناحیه خنک‌کاری و ناحیه کار مذاب

ابعاد این نواحی بستگی به طراحی کوره، روش کار بر روی شیشه و میزان بار شیشه مذاب دارد. در کوره‌های شیشه جام، سطح ناحیه خنک‌کاری کوره در حدود ۱۵۰ - ۵۰ درصد سطح ناحیه ذوب می‌باشد. برای کوره‌های نوع گلوبی‌دار، ابعاد ناحیه کار مذاب بطور کلی از ترتیب ابزارهای مربوط به کار بر روی شیشه محاسبه و تعیین می‌گردد.

سطح منطقه ذوب باید برای جذب مناسب حرارت به وسیله شیشه مذاب، کافی و بسنده باشد. بیشترین مقدار گرمای شعله توسط سطح مواد اولیه جذب می‌گردد، در صورتی که حدود ۲۰-۱۰ درصد حرارت از طریق مکانیزم انتقال حرارت جابجایی (کنوکسیون) از کف کوره و توسط جریان شیشه مذاب از ناحیه تصفیه مذاب انتقال پیدا می‌کند.

سطح منطقه تصفیه باید برای تضمین جذب حرارت به منظور بالا بردن دمای مذاب مناسب باشد و درجه حرارتی که جهت همگن کردن مذاب در این زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید در حد مناسبی که معمولاً °C ۱۴۷۰ - ۱۵۳۰ است، باشد.

طول و پهنای کوره بستگی به مقدار سطح مخزن ذوب و شیوه احتراق سوخت دارد. برای کوره‌های با شعله عرضی، کمترین پهنای مخزن ذوب تقریباً برابر با ۴ متر (معادل کمترین طول شعله) و ماکزیمم پهنای ۱۰-۹ متر برای کوره‌هایی با شعله U شکل می‌باشد. نسبت طول به پهنای تقریباً (۲-۱):۱ می‌باشد.

در کوره‌های با شعله طولی، پهنای کوره حدود ۵-۳ متر و طول منطقه ذوب ۷-۴ متر می‌باشد. عمق مخزن ذوب از فرضیات تکنولوژیک (فنی) محاسبه می‌شود، که مقدار آن ۱/۵-۱/۲ متر، برای کوره‌های مخصوص تولید

شیشه جام و برای کوره‌های نوع گلوبی جهت تولید انواع شیشه‌های شفاف ۱/۲-۰/۷ متر و برای کوره‌های تولید شیشه‌های غیرشفاف یا مات ۰/۶-۰/۵ متر می‌باشد.

حدود فضای مورد نیاز شعله در کوره‌های با شعله عرضی، با تعیین ابعاد زیر امکان پذیر می‌گردد:
فاصله بین سطح بلوک مخزن تا بالای پائین‌ترین بلوک مشعل معادل ۲۰۰-۱۵۰ میلی‌متر، ابعاد قسمت مشعل ۵۰۰-۳۵۰ میلی‌متر، ضخامت کمان محل خروجی ۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع سقف ۸۰۰-۱۱۰۰ میلی‌متر. مجموع ارتفاع فضای شعله در حدود ۲۰۰۰-۱۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع سقف باید حدود $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{9}$ فضای شعله کوره باشد. تعداد کوره‌های مورد نیاز (N) برای تولید مقدار مورد نظر مذاب از رابطه (۲-۵) بدست می‌آید.

$$N = G_1 / G_2 d \quad (5-2)$$

که در آن:

d: تعداد روزهای کاری در سال

G₁: تولید مورد نظر کوره بر حسب تن در سال

G₂: تولید یک کوره تنها بر حسب تن در روز

مصرف سوخت (Q) از موازنه حرارتی یا بر پایه داده‌های عملی بدست می‌آید. مصارف سوخت kJ/m²h برای کوره‌های ریژنراتوری و رکوپراتوری از رابطه زیر به دست می‌آید که به رابطه گینزبرگ^۱ معروف است.

$$Q = \frac{(Pn + wk_2)}{(1 - k_1 k_3)} \quad (kJ / m^2 h) \quad (5-3)$$

در رابطه (۳-۵)، P مقدار شیشه مذاب بر حسب kg/m²h و n میزان حرارت مصرفی در درجه حرارت کاری شیشه بر حسب kJ/kg می‌باشد. k₁ و k₃ ضریب افت حرارتی با گازهای احتراقی خروجی از کوره می‌باشد که مقدار آن تقریباً k₁k₃=0.25 در نظر گرفته می‌شود. k₂ ضریب متغیرهای مشخص افت حرارتی به محیط در اثر تغییر حرارت در کوره در درجه حرارت ۱۴۰۰ °C و w گرمای تلف شده به محیط بر حسب kJ/m²h می‌باشد.

مقادیر k₃, k₂, n از نمودگرام^۲ شکل (۲۰-۵) و w از شکل (۲۱-۵) بدست می‌آید.

مصرف کل سوخت کوره (Q_{fur}) از رابطه (۴-۵) محاسبه می‌گردد.

$$Q_{fur} = Q S \quad (kJ / h) \quad (5-4)$$

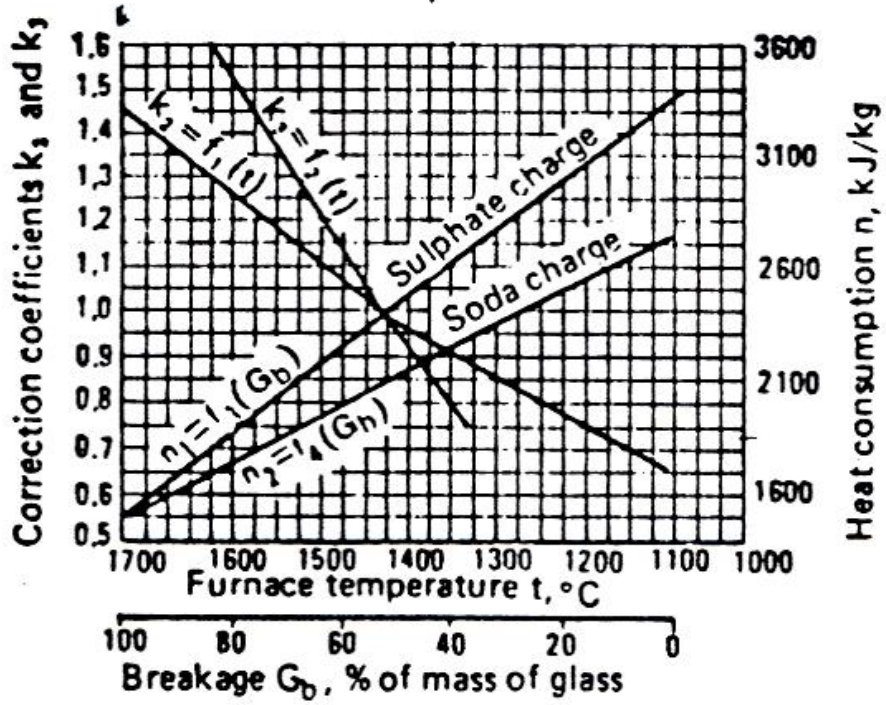
که در رابطه فوق S سطح منطقه حرارت دیده کوره بر حسب m² می‌باشد. برای کوره‌های حرارت مستقیم، کل سوخت مصرفی (Q) از فرمول تجربی (۵-۵) محاسبه می‌شود.

$$Q = [(13.2 + 1.7S) + 10.7Y] \times 10^6 \quad (kJ / day) \quad (5-5)$$

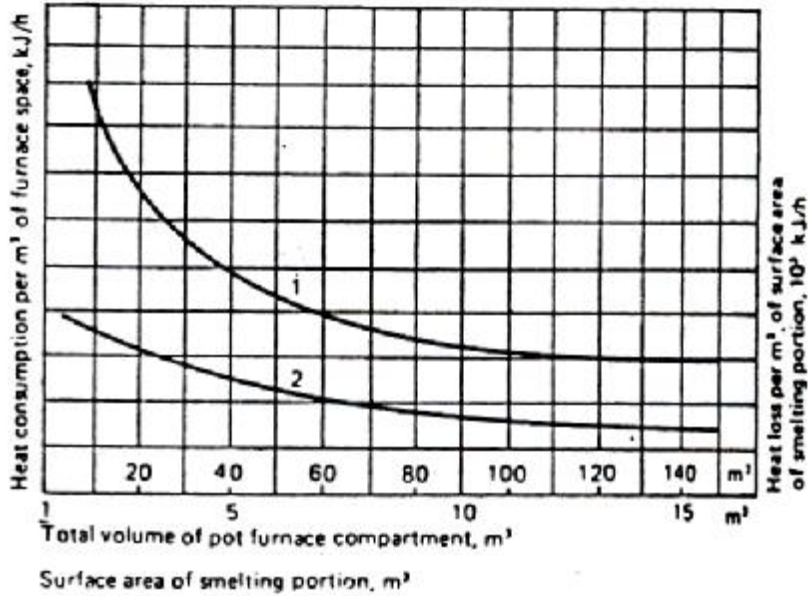
که در آن S سطح تانک مذاب بر حسب m² و Y بار شیشه بر حسب ton/day می‌باشد.

1- D.B.Grinzburg

2- Nomogram



شکل (۲۰-۵): نمودار تعیین مقادیر k_3, k_2, n



شکل (۲۱-۵): نمودار تعیین مقدار W

(۱) نرخ حرارت مصرفی در واحد حجم فضای کوره (۲) نرخ تلفات حرارتی از واحد سطح کوره

۵-۱۰- تجهیزات موردنیاز برای بازیافت حرارت گازهای حاصل از احتراق

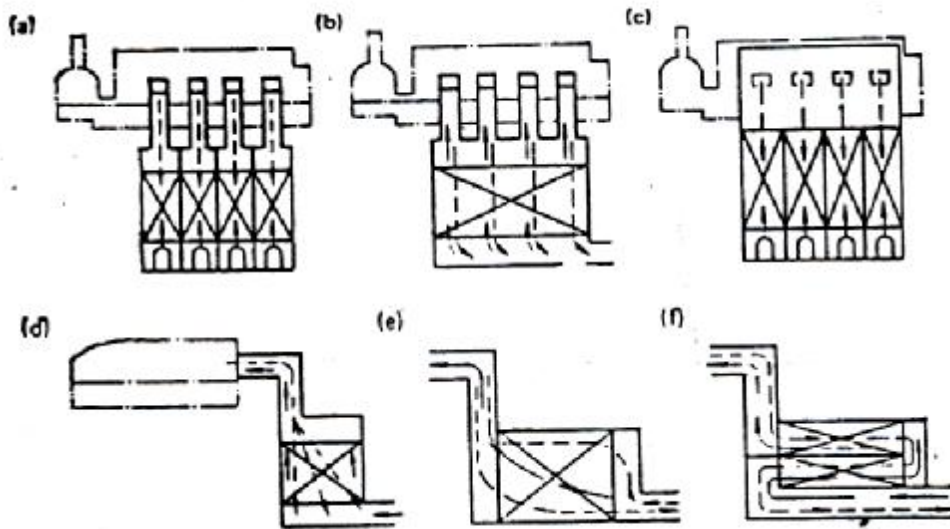
گرمای گازهای احتراقی خروجی از یک کوره در حدود $1600^{\circ}\text{C} - 1500^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. این حرارت می‌تواند برای پیش‌گرم کردن هوا، تولید بخار یا آب گرم مورد استفاده قرار گیرد. گرمای گازهای داغ احتراقی در مبدل‌های حرارتی با عملکرد تناوبی (ریژنراتورها) یا عملکرد پیوسته (رکوپراتورها) می‌تواند مجدداً مورد استفاده قرار گیرد.

بازیافت حرارت از گازهای داغ احتراقی باعث افزایش راندمان حرارتی کوره و ایجاد درجه حرارت مناسب درون فضای کوره می‌شود.

۵-۱۰-۱- ریژنراتورها

در سیستم بازیافت حرارت از نوع ریژنراتور، هوا در حدود $1200-1000^{\circ}\text{C}$ درجه سانتیگراد پیش‌گرم می‌شود و ساختمان آن به صورت اتاقی است که ردیفهای آجری چکر^۱ در داخل آن قرار گرفته‌اند.

طرح ریژنراتورهای مختلف در شکل (۲۲-۵) نشان داده شده و اختلاف بین ریژنراتورهای عمودی و افقی مشخص شده است. در ریژنراتورهای عمودی، گازهای کوره از طرف بالا به پائین و هوا از پایین به طرف بالا حرکت می‌کند (شکل ۲۲-۵ قسمت a,b). در ریژنراتورهای نوع افقی، گازها به صورت افقی حرکت می‌کنند (شکل ۲۲-۵ قسمت e,f). نوع قبلی بیشتر از نوع افقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۲۲-۵): طرحهای مختلف ریژنراتورها

ریژنراتورهای عمودی: (a) نوع بخش بخش (b) با یک گذرگاه (c) بخش بخش نوع جعبه‌ای (d) برای کوره‌هایی با شعله U شکل. ریژنراتورهای افقی: (e) با یک گذرگاه (f) با دو گذرگاه

چکرها در ریژنراتورهای عمودی اساساً از مقاومت کمتری نسبت به نوع افقی برخوردارند، زیرا گازها به طور عمودی در سطح مقطع چکرها پخش می‌شوند.

ریژنراتورهای افقی از ارتفاع کوتاهتری برخوردارند و به همین دلیل وقتی سطح آب زیرزمینی در محل کارخانه بالاست، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

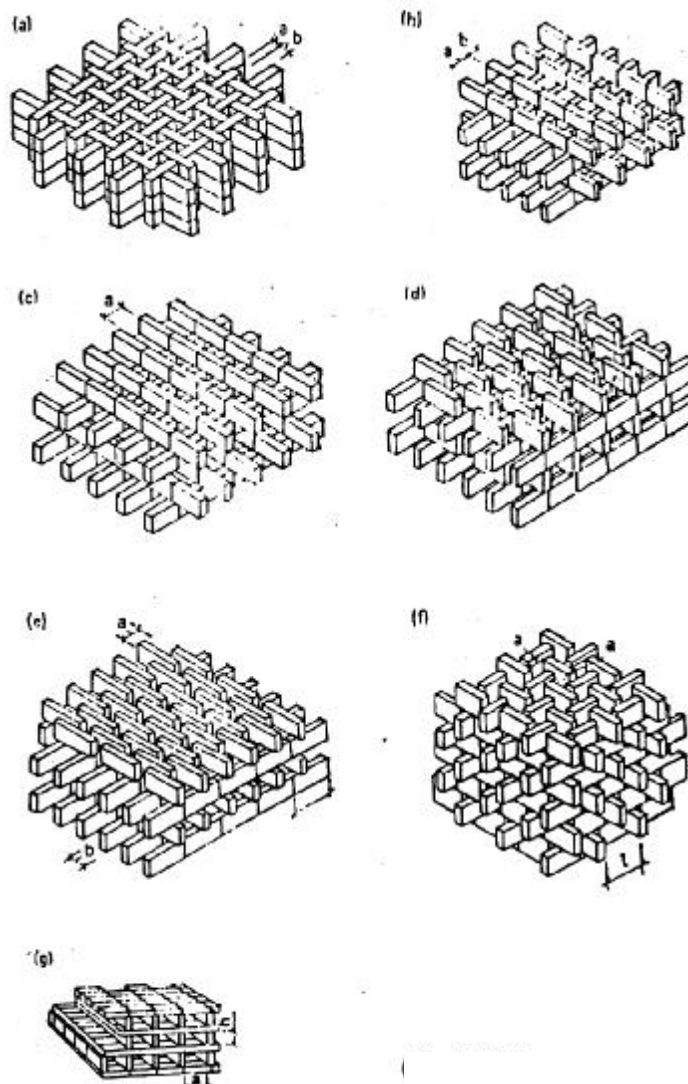
اخیراً ریژنراتورهای بخش بخش شده مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲۲-۵ قسمت a,c). یکی از خصوصیات مفید این نوع سیستم آنست که در آن چکرها بدون اینکه بر روی سیستم تأثیر خاصی داشته باشند، تعویض می‌گردند. همچنین چکرها بطور مناسبی در مسیر حرکت گازها قرار گرفته و می‌توانند هوا را تا درجه حرارت بالایی پیش‌گرم کنند که این میزان در مقایسه با انواع مرسوم ریژنراتورها، تقریباً ۱۵۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر است. در کوره‌های مخزنی با شعله عرضی، مبدلهای بازیافت حرارت در طول دیواره جانبی کوره چیده می‌شوند و در کوره‌های با شعله U شکل، مبدلهای در دیواره انتهایی کوره قرار می‌گیرند.

۱-۱-۱-۵- محفظه‌های بازیافت حرارتی نوع تناوبی

طرح شطرنجی یا شبکه لانه زنبوری^۱ آجرهای نسوز در ریژنراتورها، از گل نسوز، آلومینای غنی‌شده^۲ یا از آجرهای منیزی^۳ تشکیل می‌شود. طرح شطرنجی نوع منیزی قابلیت تحمل گرما تا دمای ۱۴۰۰°C را دارا بوده و همچنین از پایداری و دوام خاصی برخوردار می‌باشند. آجرها در شبکه لانه زنبوری یا طرح شطرنجی به روشهای مختلفی چیده می‌شود (شکل ۲۳-۵).

معمولاً طرح شطرنجی زیمنس با ردیفهای آجری یکنواخت، پیوسته و موازی و طرح شطرنجی لیچت^۴ با ردیفهای آجری متناوب در کوره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. خصوصیت طرح شطرنجی نوع لیچت، وجود سطحی وسیع برای پیش‌گرمایش هوا می‌باشد. طرح شطرنجی از آجرهای نسوزی به ابعاد ۶۵×۱۲۴×۲۵۰ میلی‌متر یا (۶۵-۷۵)×۱۵۰×(۳۰۰-۵۰۰) میلی‌متر تشکیل می‌شود، که معمولاً ۶۰-۵۵ درصد حجم محفظه ریژنراتور را اشغال می‌کند. ارتفاع ریژنراتورهای عمودی در کوره‌ها حدود ۸-۵ متر و پهنای آنها بیش از ۴ متر می‌باشد. ارتفاع ریژنراتور ممکن است حتی از وان مذاب کوره هم بیش از ۳ متر بالاتر باشد. کانال پایینی شبکه لانه زنبوری با طاقی حدوداً تا ضخامت ۳۰۰ میلی‌متر پوشیده شده و پهنای آن ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد.

1- Checker Work
2- High-Alumina
3- Thermostable Magnesite
4- Lichte



شکل (۲۳-۵): طرح شبکه لانه زنبوری عمودی در ریژنراتورها
 (a) با کانالهای پیوسته (b) با ردیفهای متناوب و گذرهای موازی (بدون مرحله‌ای بودن)
 (c) با ردیفهای متناوب و گذرهای قابل تغییر (مرحله ای) (d,e) با ردیفهای متناوب و آجرهای پیشین متناوب
 (f) با آجرهای مرحله‌ای (g) با کانالهای پیوسته افقی

۲-۱۰-۵- طراحی ریژنراتورها

شبکه لانه زنبوری ریژنراتور بصورت تناوبی گرم و سرد می‌شود و وضعیت دریچه‌های آن در مدت ۲۵-۳۰ دقیقه تعویض می‌گردد. طراحی ریژنراتورها با محاسبه ضریب انتقال حرارت چکر، سطح انتقال حرارت، درجه حرارت گازهای احتراقی خروجی از ریژنراتور، اندازه ریژنراتور و مقاومت در برابر حرکت گازها انجام می‌گیرد. مساحت سطح انتقال حرارت در یک ریژنراتور (S) به وسیله رابطه (۶-۵) بدست می‌آید.

$$S = \frac{Q_{cycle}}{X \Delta T_{ave}} \quad (m^2) \quad (5-6)$$

که در آن X ضریب انتقال حرارت برای یک سیکل تناوبی برحسب $W/m^2 \cdot ^\circ C$ و Q_{cycle} نرخ حرارت ذخیره شده در شبکه لانه زنبوری (یا مقدار حرارت انتقال یافته به هوای احتراق) در یک سیکل بر حسب W می باشد. ΔT_{ave} نیز متوسط اختلاف دمای چکر برحسب درجه سانتیگراد است. برای بدست آوردن Q_{cycle} از رابطه (5-7) استفاده می شود.

$$Q_{cycle} = V_{air} (t_{air}^2 - t_{air}^1) \quad (W) \quad (5-7)$$

که در رابطه فوق V_{air} نرخ حجم هوای عبوری در سیکل تناوبی برحسب (m^3/sec) و t_{air}^1 و t_{air}^2 مقادیر آنتالپی هوا در ورودی و خروجی ریژنراتور برحسب J/m^3 می باشد. ضریب انتقال حرارت کلی برای یک سیکل، با متوسط گیری از ضریب انتقال حرارت چکر بصورت زیر بدست می آید:

$$x = \frac{(x_t + x_b)}{2} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (5-8)$$

که در رابطه (5-8) x_b, x_t به ترتیب ضریب انتقال حرارت کلی قسمتهای بالا و پایین شبکه لانه زنبوری آجرها در ریژنراتور می باشد. ضریب نهایی انتقال حرارت می تواند از رابطه (5-9) محاسبه می گردد.

$$X = \frac{1}{\frac{1}{a_{heat} t_{heat}} + 4j \frac{r}{It} + \frac{3.6}{rrcb} + \frac{1}{a_{cool} t_{cool}}} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (5-9)$$

که در رابطه فوق $\alpha_{heat} = \alpha_{conv} + \alpha_{rad}$ ، ضریب انتقال حرارت از گازهای احتراقی کوره به چکر در سیکل گرمایش ریژنراتور برحسب $W/m^2 \cdot ^\circ C$ و α_{cool} ضریب انتقال حرارت از چکر به هوا در هنگام سرد شدن برحسب $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ و τ زمان یک سیکل بر حسب ساعت می باشد. τ از رابطه (5-10) بدست می آید:

$$t = t_{heat} + t_{cool} \quad (h) \quad (5-10)$$

λ ضریب هدایت حرارتی آجرهای چکر، بر حسب $W/m \cdot ^\circ C$ است؛ r برحسب متر، اندازه خطی قسمتی از آجر است که در انتقال حرارت دخالت دارد و برای آجری به ضخامت 65 mm مقدار آن $r=0.0325$ می باشد؛ ϕ ضریب بدون بعدی است که مقدار جرم آجری که در انتقال حرارت سهیم است را در نظر می گیرد ($j = \frac{1}{4}$). b نسبت گرادیان درجه حرارت در آجر در طول گرم شدن و سرد شدن می باشد ($b=50$)، ρ جرم حجمی آجر بر حسب kg/m^3 ؛ و C متوسط ظرفیت حرارتی آجر بر حسب $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ می باشد.

درجه حرارت گازهای داغ احتراقی در خروجی ریژنراتور از موازنه انرژی بدست می آید. بنابراین با روابط فوق می توان سطح انتقال حرارت ریژنراتور را بدست آورد. حجم شبکه لانه زنبوری بوسیله رابطه (5-11) محاسبه می شود.

$$V_{\text{cheker work}} = S/s \quad (\text{m}^3) \quad (5-11)$$

که در رابطه فوق S مقدار سطح انتقال حرارت موجود در هر مترمکعب از فضای شبکه لانه زنبوری ریژنراتور است.

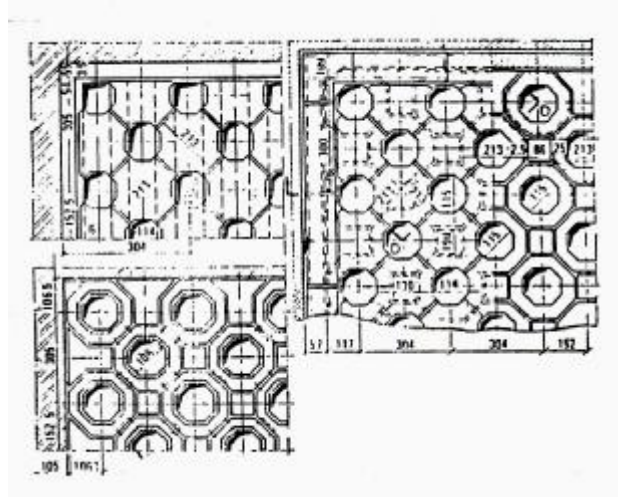
طول و پهنای ریژنراتور با در نظر گرفتن ترتیب قرار گرفتن مشعلها انتخاب می‌شود. برای کوره‌های مخزنی، سطح انتقال حرارت شبکه لانه زنبوری ریژنراتورها معمولاً $20 - 30 \text{ m}^2$ و یا $1/8 - 1/1$ مترمربع به ازای واحد سطح ذوب در کوره می‌باشد.

۲-۱۰-۵- رکوپراتورها

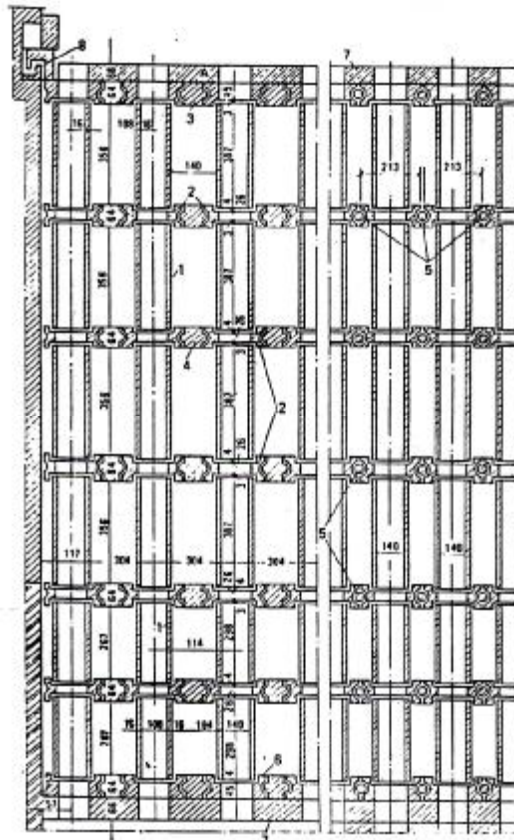
درجه حرارت گازهای حاصل از احتراق به حدود $1400 - 1500^\circ\text{C}$ می‌رسد که بخش قابل ملاحظه‌ای از این میزان حرارت اتلافی را می‌توان جهت پیش گرم کردن هوای احتراق تا دمای $800 - 1000^\circ\text{C}$ در رکوپراتورهای سرامیکی بازیافت کرد. در این حالت هوای احتراق (گرم شونده) در خلاف جهت جریان گازهای احتراقی عبوری از رکوپراتور جریان می‌یابد. امروزه رکوپراتورهای تابشی جهت کاربرد در کوره‌های حرارت مستقیم به خوبی توسعه یافته‌اند به گونه‌ای که رکوپراتورهای مذکور می‌توانند هوا را حدود $400 - 500^\circ\text{C}$ پیش گرم کنند.

۱-۲-۱۰-۵- رکوپراتورهای سرامیکی

رکوپراتورهای سرامیکی از اجزای نسوز تشکیل شده و دایره‌ای شکل می‌باشند. اجزای نسوز دیواره رکوپراتور تا 1400°C مقاومت حرارتی داشته و برای دمای حدود 1500°C و بیشتر می‌توان از نسوز کربورانوم^۱ یا آلومینای غلیظ استفاده نمود. شکل‌های (۵-۲۴) و (۵-۲۵) یک رکوپراتور سرامیکی را نشان می‌دهد که گازهای حاصل از احتراق از بالا به سمت پایین در داخل لوله‌ها جریان دارد و هوا با حرکت در خلاف جهت جریان گازهای احتراقی در اطراف لوله‌های سرامیکی گرم می‌شود. اجزاء لوله‌ها در جهت عمودی توسط رینگ به یکدیگر متصل می‌شوند. مساحت سطح رکوپراتورهای سرامیکی در واحد حجم حدود $6 - 12 \text{ m}^2/\text{m}^3$ و محدوده ضریب انتقال حرارت آنها $5 - 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ می‌باشد. سرعت جریان گازهای حاصل از احتراق در رکوپراتورها $1 - 3 \text{ m/s}$ و سرعت جریان هوای احتراق $2 - 1 \text{ m/s}$ می‌باشد.



شکل (۲۴-۵): برش عمودی رکوپراتور سرامیکی

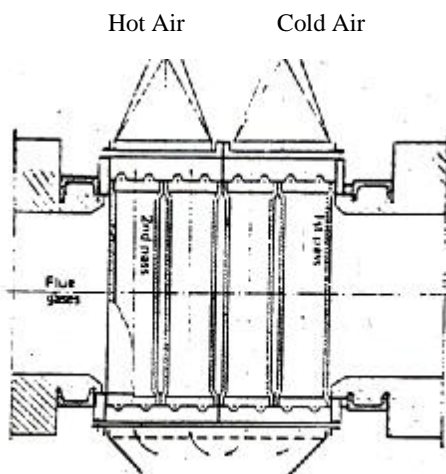


شکل (۲۵-۵): جزئیات سیستم رکوپراتور سرامیکی

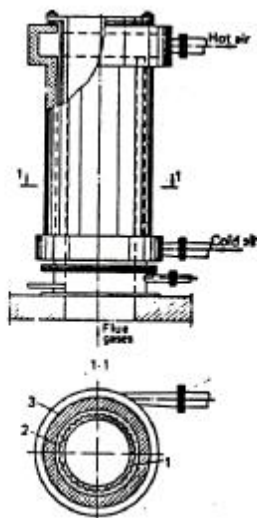
- ۱) لوله های رکوپراتور (۲) رینگ میانی (۳) رینگ بالایی (۴) مجزاکننده میانی
- ۵) پلاگ ها (plugs) (۷) رینگهای پائینی (۸) پوشش صفحه های بالایی (۹) واشر ماسه‌ای

۲-۲-۱۰-۵- رکوپراتورهای فلزی

انواع مختلفی از رکوپراتورهای فلزی در کوره‌های ذوب شیشه ساخته و بکار گرفته می‌شوند، مانند: رکوپراتور چدنی نوع هرمی (شکل ۲۶-۵)، رکوپراتور چدنی استیلی ترموبلاک^۱، رکوپراتورهای استیلی استوانه‌ای و رکوپراتورهای نوع تابشی (شکل ۲۷-۵). رکوپراتورهای هرمی شکل در کوره‌های کوچک و در صورتی که درجه حرارت گازهای احتراقی در حدود $1000 - 700^{\circ}\text{C}$ باشد، بکار گرفته می‌شوند. اجزاء اصلی رکوپراتور نوع هرمی، استوانه آهنی به طول $1640 - 880$ میلی‌متر است. ضریب انتقال حرارت این رکوپراتورها حدود $75 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ می‌باشد.



شکل (۲۶-۵): رکوپراتور چدنی نوع هرمی با دو گذر



شکل (۲۷-۵): رکوپراتور تابشی

(۱) لوله داخلی (۲) لوله خارجی (۳) عایق حرارتی

رکوپراتورهای چدنی- استیلی ترموبلاک از لوله‌های صاف استیلی با قطر ۱۶-۲ متر تشکیل شده و دیواره‌های آن به وسیله چدن پوشیده شده است. ضریب انتقال حرارت در این نوع رکوپراتور حدود $10 - 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ می‌باشد.

در صورتی که درجه حرارت گازهای احتراقی در کوره‌های حرارت مستقیم $1200^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$ باشد، رکوپراتورهای نوع تابشی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲۷-۵). گازهای داغ احتراقی در لوله داخلی رکوپراتور و با سرعت پایین و هوای احتراق در فضای بین لوله داخلی و خارجی با سرعت حدود $20 - 30 \text{ m/s}$ حرکت می‌کند. در این سیستم بازیافت حرارت، درجه حرارت هوای پیش‌گرم شده به حدود $350 - 400^\circ\text{C}$ سانتیگراد می‌رسد.

۳-۲-۱۰-۵- محاسبات رکوپراتور

رکوپراتورها بر اساس معادله تبادل حرارت (۱۲-۵) محاسبه می‌شوند.

$$Q = KS\Delta T \quad (W) \quad (5-12)$$

که در رابطه فوق Q مقدار حرارت انتقال یافته از گازهای داغ احتراقی به هوا، K ضریب انتقال حرارت کلی برحسب $W/(m^2 \cdot C)$ ، S مساحت سطح انتقال حرارت رکوپراتور بر حسب m^2 و ΔT اختلاف درجه حرارت متوسط گازهای خروجی و هوای احتراق برحسب درجه سانتیگراد می‌باشد. ضریب انتقال حرارت کلی K از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K = \frac{1}{1/a_g + d/l + 1/a_{air}} \quad (W/m^2 \cdot C) \quad (5-13)$$

در رابطه فوق α_g ضریب انتقال حرارت از گازهای داغ احتراقی به دیوارهای رکوپراتور برحسب $W/(m^2 \cdot C)$ ، α_{air} ضریب انتقال حرارت از دیوار رکوپراتور به هوای احتراق برحسب $W/(m^2 \cdot C)$ و δ/λ مقاومت حرارتی دیوار رکوپراتور می‌باشد. ضریب α_g با در نظر گرفتن ترکیب انتقال حرارت تابشی و جابجایی از رابطه (۱۴-۵) بدست می‌آید.

$$a_g = a_{g.conv} + a_{g.rad} \quad (W/m^2 \cdot C) \quad (5-14)$$

$a_{g.conv}$ ضریب انتقال حرارت جابجایی از گازهای داغ احتراقی به دیوار رکوپراتور برحسب $W/(m^2 \cdot C)$ و $a_{g.rad}$ ضریب انتقال حرارت تابشی از گازهای داغ احتراقی به دیوار رکوپراتور برحسب $W/(m^2 \cdot C)$ است. لازم بذکر است برای رکوپراتورهای فلزی فاکتور δ/λ قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$K = a_g a_{air} / (a_g + a_{air}) \quad (W/m^2 \cdot C) \quad (5-15)$$

برای رکوپراتورهای سرامیکی، پایداری حرارتی دیوارهای رکوپراتور توسط رابطه (۱۶-۵) بیان می‌شود.

$$K(t_g - t_{air})d \leq 8200 \quad (5-16)$$

که در آن t_g و t_{air} به ترتیب دمای گازهای داغ احتراقی و هوا برحسب سانتیگراد است. δ ضخامت دیوار برحسب سانتیمتر و K ضریب انتقال حرارت مقطع کنترل برحسب $W/(m^2C)$ است.

۱۱-۵- کوره‌های الکتریکی و شعله‌ای - الکتریکی

امروزه استفاده از انرژی الکتریکی در فرآیند ذوب شیشه و حرارت دادن به خوبی توسعه یافته است. طراحی این نوع کوره‌ها ساده بوده و بدلیل بکار نبردن سیستم‌های بازیافت حرارت مانند ریژنراتورها و یا رکوپراتورها و کانالهای مربوطه، ابعاد آن کوچک است.

بارزترین مشخصات کوره‌های الکتریکی عبارتند از: اتلاف حرارت کمتر در اطراف کوره، حذف تلفات حرارتی ناشی از خروج گازهای داغ احتراقی از دودکش، بازده حرارتی ۷۰-۶۰ درصد و قابلیت کنترل اتوماتیک درجه حرارت.

بر خلاف کوره‌های سوخت فسیلی در کوره‌های الکتریکی در طول مدت ذوب، اجزاء مواد اولیه تحت تاثیر فشار داخلی اتمسفر کوره به بیرون کوره منتقل نمی‌شوند و فراریت اجزاء تشکیل دهنده مواد اولیه بطور مؤثری پایین‌تر می‌باشد. به علاوه در کوره‌های الکتریکی مورد استفاده برای ذوب شیشه، بدون اینکه تلاطم ناشی از جریان مذاب صدمه‌ای به کوره وارد آورد، امکان افزایش بیشتر دما و حرارت در مذاب وجود دارد. تمام فاکتورهای فوق به تولید شیشه با کیفیت بالا کمک می‌کنند.

کوره‌های الکتریکی به انواع قوس الکتریکی، فرکانس بالا (القایی) و مقاومتی تقسیم می‌شوند.

۱-۱۱-۵- کوره‌های قوس الکتریکی

در کوره‌های قوس الکتریکی، انرژی حرارتی بوسیله تخلیه قوس الکتریکی بین مذاب و الکتروود (عملکرد مستقیم) یا بین دو الکتروود (عملکرد غیرمستقیم) انجام می‌گیرد. کوره‌های قوس الکتریکی در صنعت شیشه، کاربرد محدودی دارند.

۲-۱۱-۵- کوره‌های فرکانس بالا

کوره‌های فرکانس بالا خود به دو نوع زیر تقسیم می‌شوند:

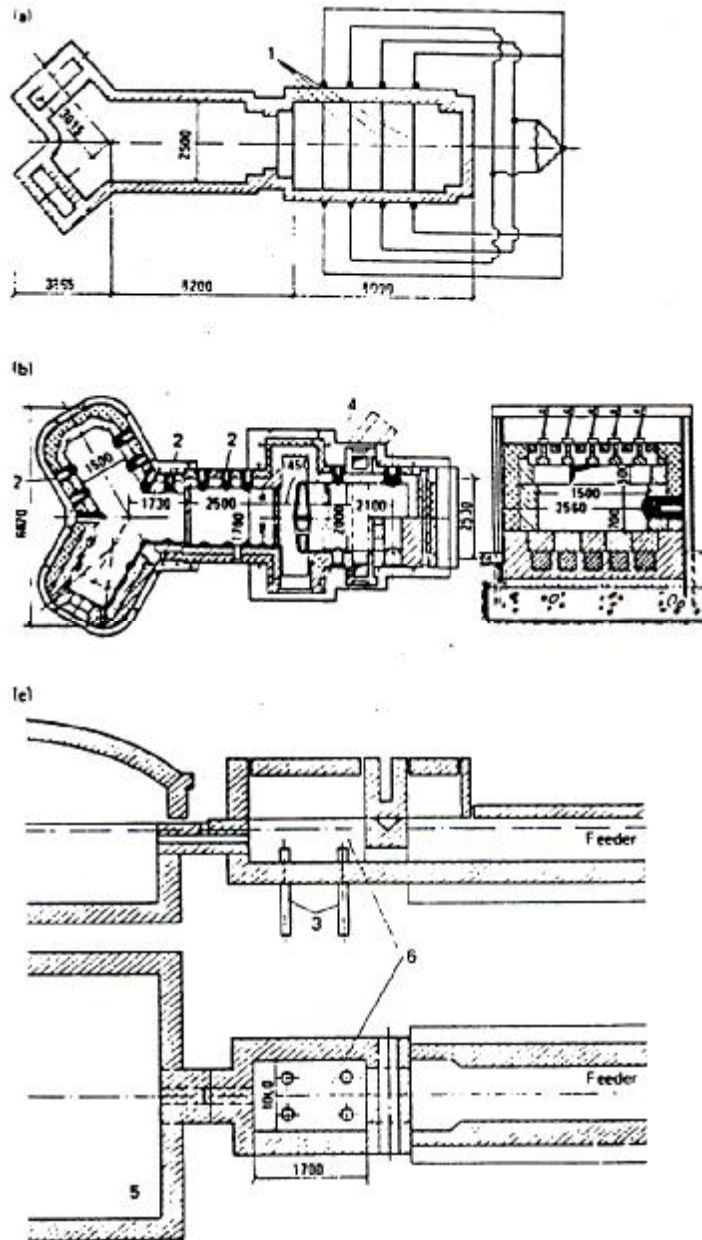
- کوره‌های حرارت مستقیم، که مواد اولیه و شیشه با تلفات دی الکتریکی حرارت می‌بیند.
- کوره‌های حرارت غیرمستقیم^۱ که مواد اولیه و شیشه بوسیله جریانهای گردابی که در خارج مذاب ظاهر می‌شود، حرارت می‌بیند.

در کوره‌های فرکانس بالا از نوع حرارت مستقیم، مواد اولیه سرد در میدان الکتریکی متناوب قرار می‌گیرد، ولی در نوع غیرمستقیم، مواد اولیه ابتدا پیش‌گرم شده و سپس در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد.

کوره‌های با فرکانس بالا برای تولید شیشه‌های اپتیکی، مقاوم حرارتی و شیشه‌های صنعتی بکار می‌روند. توان الکتریکی این کوره‌ها معمولاً ۲۰۰ - ۱۰۰ KW می‌باشد.

۳-۱۱-۵- کوره‌های مقاومتی

کوره‌های مقاومتی نیز به انواع حرارت مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. کوره‌های مقاومتی از نوع حرارت غیرمستقیم در تولید الیاف شیشه‌ای، شیشه کوارتز و شیشه‌های سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع کوره‌ها الکترودهای پلاتینیوم، تنگستن یا گرافیت بکار می‌رود. کوره‌های الکتریکی در صنعت شیشه معمولاً از نوع حرارت مستقیم می‌باشند (شکل ۲۸-۵).



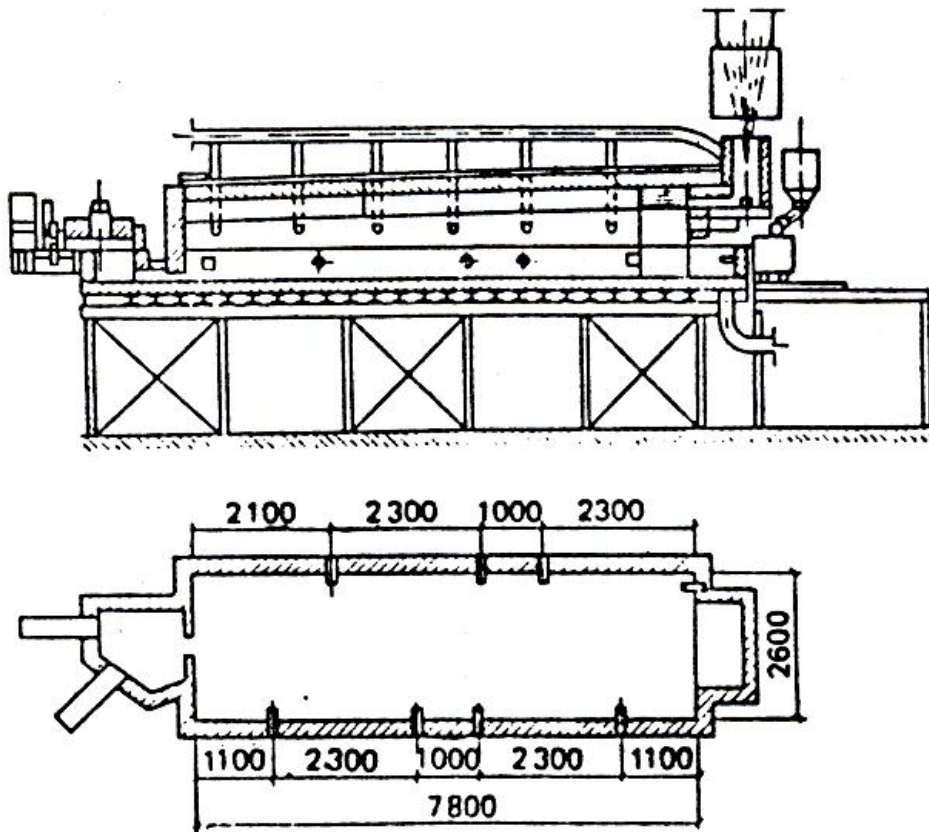
شکل (۲۸-۵): کوره‌های الکتریکی ذوب شیشه از نوع حرارت مستقیم

۴-۱۱-۵- کوره‌های شعله - الکتریکی

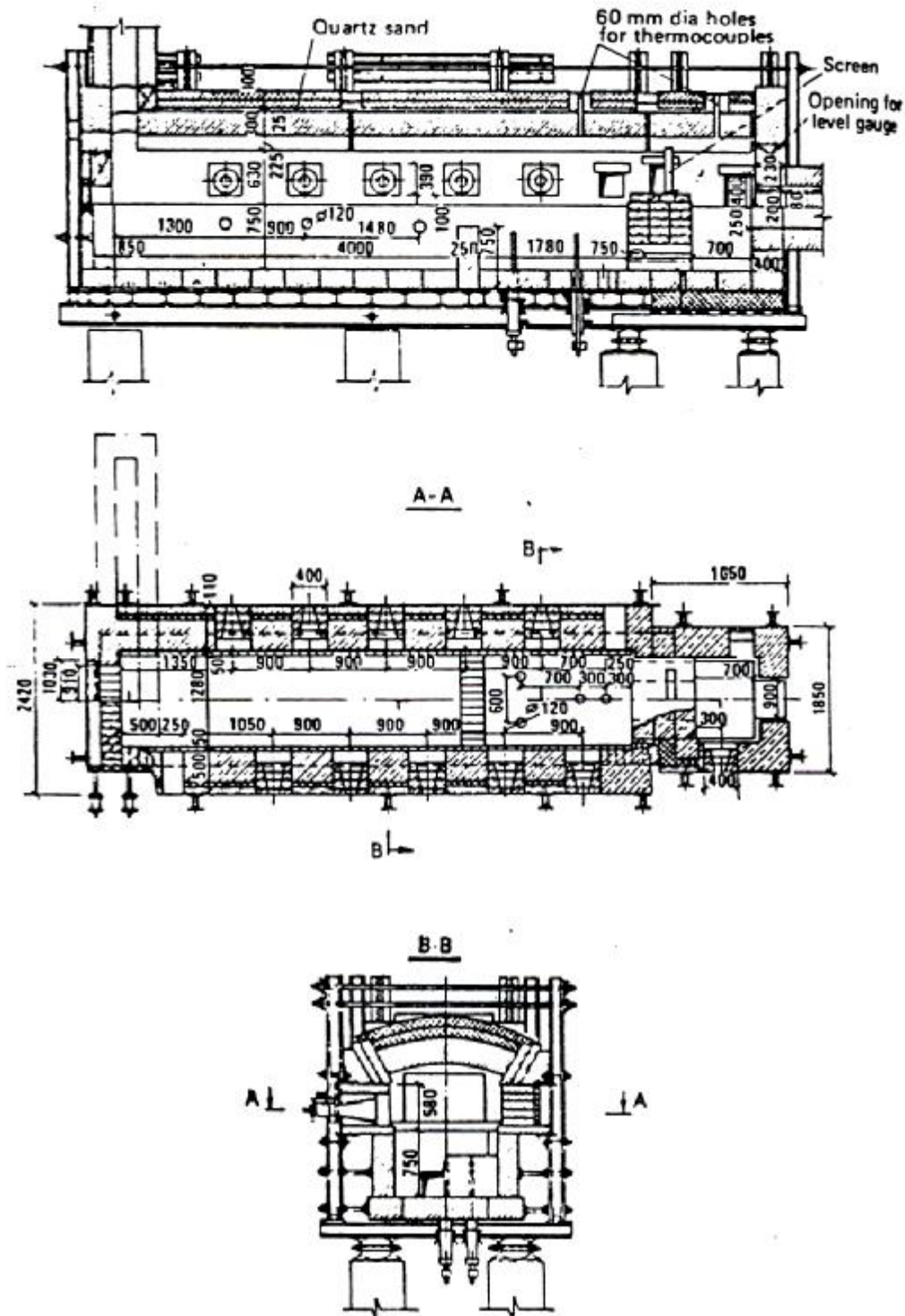
امروزه استفاده از انرژی الکتریکی و حرارت شعله به صورت ترکیبی، کاربرد وسیعی در فرآیندهای تولید شیشه یافته است. تقویت حرارت مشعل کوره با حرارت ایجاد شده توسط انرژی الکتریکی، امکان افزایش کشش کوره را تا میزان ۶۰-۱۰ درصد فراهم آورده و بدون تغییر شرایط استاندارد کیفیت مذاب را در کوره‌های مشعلی بالا می‌برد. استفاده از انرژی الکتریکی جهت تقویت حرارت کوره‌ها، مخصوصاً در تولید شیشه‌های مزروف دارای کاربرد وسیعی می‌باشد. در این نوع کوره‌های ترکیبی، الکترودها می‌توانند بصورت افقی نسبت به دیواره کوره قرار گیرند (شکل ۲۹-۵) و یا می‌توانند در کف کوره قرار بگیرند (شکل ۳۰-۵).

در تولید شیشه‌های سودا آهکی، از الکترودهای مولیبدنی استفاده می‌شود، زیرا در مقایسه با الکترودهای گرافیتی باعث رنگی شدن مذاب شیشه نمی‌شود.

مجموع حرارت مصرفی جهت ذوب شیشه به میزان $2 \text{ ton/m}^2 \text{ day}$ در صورت تقویت حرارت الکتریکی به میزان 7650 kJ/kg کاهش می‌یابد.



شکل (۲۹-۵): نمایش قرار گرفتن الکترودهای کوره بصورت افقی نسبت به دیواره کوره



شکل (۳۰-۵): ترتیب قرار گرفتن الکترودهای مولیبدن در کف کوره

طراحی کوره‌های الکتریکی از یک سو شامل تحلیل موازنه انرژی و از سوی دیگر محاسبه میزان حرارت مصرفی، محاسبه مقاومت الکتریکی ذوب شیشه و جریان الکترودها می‌باشد. میزان حرارت مصرفی از روشی شبیه به محاسبه در کوره‌های شعله‌ای بدست می‌آید و تنها اختلاف آن در این است که می‌بایستی مصرف انرژی جهت خنک نمودن الکترودها را نیز در نظر گرفت. توان الکتریکی لازم برای یک کوره از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = KQ / (3.6 \times 10^3) \quad (KW) \quad (5-17)$$

که در آن Q مقدار حرارت لازم کوره بر حسب KJ/h، K ضریب اطمینان می‌باشد که مقدار آنرا معمولاً در حدود ۱/۲-۱/۳ در نظر می‌گیرند. با توجه به داده‌های عملی، مصرف ویژه انرژی در کوره‌های ذوب الکتریکی بطور متوسط ۱/۱-۱/۲ KWh/kg می‌باشد. مقاومت الکتریکی ذوب R برای الکترودهای استوانه‌ای با قطر d و طول L بر حسب سانتیمتر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R = n_1 n_2 r \ln(2L/d) / KL \quad (\Omega) \quad (5-18)$$

که در رابطه فوق n_1 فاکتوری است که غیرهموزن بودن مذاب را در نظر می‌گیرد ($n_1 = 1/0.5 - 1/1$)، n_2 فاکتوری است که موقعیت الکترودها را نسبت به سطح مذاب در نظر می‌گیرد ($n_2 = 1/3 - 1/4$)، L فضای بین الکترودها بر حسب سانتیمتر و ρ مقاومت واحد ذوب در درجه حرارت مربوطه بر حسب $\Omega \cdot cm$ می‌باشد. همچنین ولتاژ و جریان در الکترودها توسط روابط (۵-۱۹) و (۵-۲۰) بدست می‌آید:

$$V = \sqrt{PR \times 10^{-3}} \quad (V) \quad (5-19)$$

$$I = P / V = \sqrt{(P/R) \times 10^{-3}} \quad (A) \quad (5-20)$$

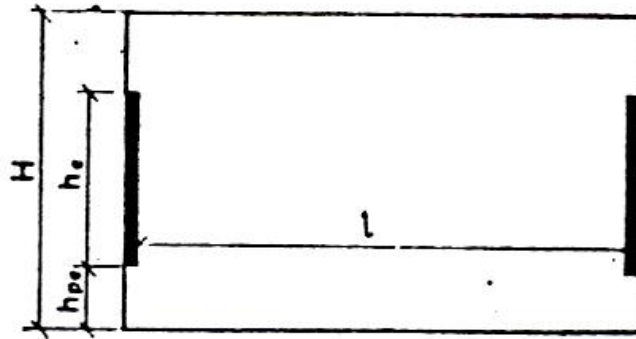
چگالی جریان قابل قبول برای الکترودهای گرافیتی $0.3 - 0.6 A/cm^2$ و برای الکترودهای مولیبدنی $0.6 - 1 A/cm^2$ می‌باشد. مقاومت الکتریکی شیشه مذاب برای الکترودهای نوع صفحه‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R = K_1 K_2 r (L/S) \quad (\Omega) \quad (5-21)$$

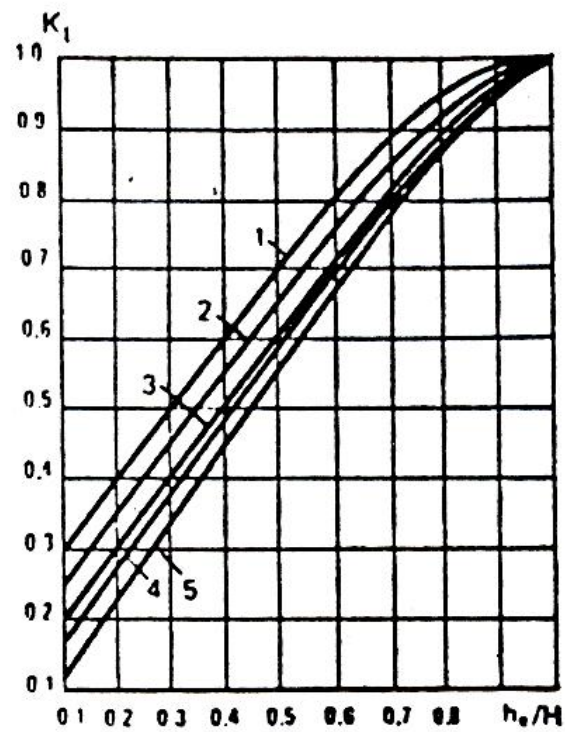
که در آن K_1 ضریبی است که اثر شکل مخزن ذوب را برای الکترودهای نصب شده در کف در نظر می‌گیرد، K_2 ضریبی است که فاصله بین الکترودها و کف مخزن ذوب را در نظر می‌گیرد (برای الکترودهایی که در کف نصب شده‌اند $K_2 = 1$ می‌باشد)، S مساحت سطح مقطع الکترودها بر حسب m^2 و L فضای بین الکترودها بر حسب m است. ترتیب قرار گرفتن الکترودهای صفحه‌ای در شکل (۵-۳۱) نمایش داده شده است. در محدوده $h_e/H = 0.1 - 0.8$ ، ضرایب K_2, K_1 از روابط (۵-۲۲) و (۵-۲۳) و یا با استفاده از شکل‌های (۵-۳۲) و (۵-۳۳) بدست می‌آیند.

$$K_1 = h_e / H + 0.145(H/L)^{0.325} \quad (5-22)$$

$$K_2 = 1 - 0.0455(H/h_e)(h_{pe}/H)^{0.325} \quad (5-23)$$

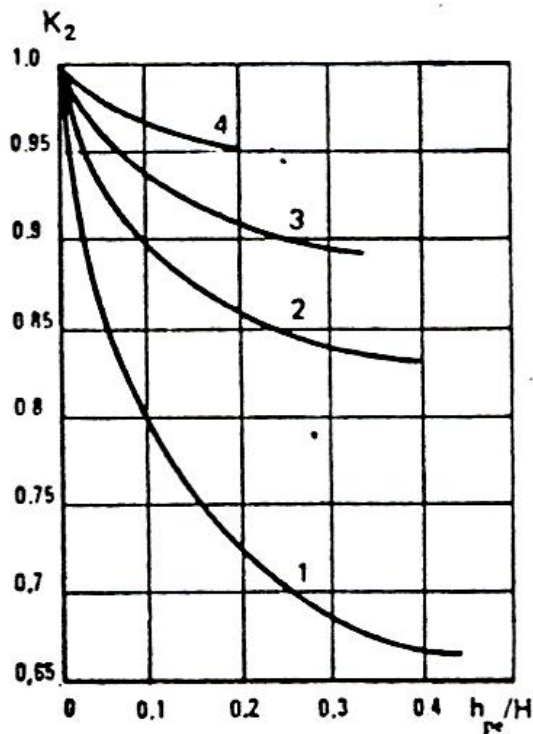


شکل (۵-۳۱): ترتیب قرار گرفتن الکترودهای صفحه‌ای



شکل (۵-۳۲): مقادیر ضریب K_1

$L/H=3$ (5) , $L/H=2.5$ (4) , $L/H=2$ (3) , $L/H=1$ (2) , $L/H=0.5$ (1)



شکل (۵-۳۳): مقادیر ضریب K_2

$h_c/H=0.6$ (4) ; $h_c/H=0.3$ (3) ; $h_c/H=0.2$ (2) ; $h_c/H=0.1$ (1)

۵-۱۳- مصرف ویژه انرژی حرارتی و بازده کلی

مصرف ویژه انرژی حرارتی به راندمان حرارتی فرآیند ذوب بستگی داشته و عبارت است از میزان انرژی حرارتی که برای ذوب کردن یک کیلوگرم شیشه به مصرف می‌رسد. راندمان کل (h_{tot}) نشانگر نسبتی از انرژی حرارتی ورودی به کوره است که بعنوان انرژی مفید به مصرف می‌رسد. به عبارت دیگر بخشی از انرژی حرارتی ورودی که صرف فرآیند گرم کردن و ذوب کردن مواد خام می‌شود. راندمان کل با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$h_{tot} = 100 \frac{q_n}{q_s} \quad (۵-۲۴)$$

در رابطه فوق q_n میزان انرژی حرارتی مفیدی است که از نظر تئوری برای ذوب یک کیلوگرم شیشه موردنیاز است و q_s مقدار عملی مصرف ویژه انرژی حرارتی می‌باشد. از آنجائیکه انرژی حرارتی مفید تنها در مباحث نظری مطرح می‌شود، لذا بکارگیری مفهوم مصرف ویژه انرژی حرارتی به جای راندمان کل ترجیح داده می‌شود.

در تحلیل مصرف ویژه حرارتی، معمول است که صرفاً میزان انرژی حرارتی مصرفی در طول مدت کشش کوره در نظر گرفته شود و از مقدار مصرف در زمان توقف تولید صرف نظر گردد. در جدول (۵-۵) مصرف ویژه

انرژی حرارتی در کوره‌های ذوب انواع مختلف شیشه‌ها ارائه شده است. مقادیر کوچکتر مربوط به مخازن با راندمان ذوب بالا و کارخانه‌هایی با بهره‌وری انرژی بالاتر (ریژنراتورهای بزرگ، کنترل‌های دقیق مشعل، عایق بندی خوب) می‌باشد.

جدول (۵-۵): مصرف ویژه انرژی حرارتی در کوره‌ها (Btu/lb)

Kind of Glass	Continuous Tanks	Day Tanks
Sheet	3960-6300	-
Plate and Rolled	3060-5400	-
Colourless Hollow-Ware	3060-5400	5400-7200
Coloured Bottles	3600-6300	5400-7200

در کوره‌های قدیمی با بار مذاب خیلی کم، مقادیر مصرف ویژه انرژی حرارتی در حدود ۷۲۰۰ - ۱۰۸۰۰ Btu/lb می‌باشد. تحت شرایط مساوی، مصرف ویژه انرژی حرارتی در مخازن ذوب شعله از پهلوی یا متقاطع^۱ نسبت به مخازن ذوب شعله نعل اسبی حدوداً ۱۵ درصد بیشتر است.

همچنین مخازن ذوب شعله از پهلوی، نسبت به مخازن ذوب شعله از انتها از راندمان بالاتری برخوردار می‌باشند. فاکتورهای تأثیرگذار دیگر در مصرف انرژی عبارتند از: ابعاد کوره، عمر کوره، رنگ و ترکیب شیشه و درجه حرارت عملکرد. بدیهی است ابعاد کوره در میزان تابش خروجی از سطح آن کاملاً تعیین کننده است. کوره‌های بزرگتر به شرط آنکه در بار کامل عمل نمایند، اقتصادی‌تر از کوره‌های کوچکتر می‌باشند، زیرا نسبت تلفات حرارتی از دیواره‌های کوره به مذاب تحویلی در کوره‌های بزرگتر نسبت به کوره‌های کوچکتر کمتر است. هرچه از عمر کوره می‌گذرد، مصرف سوخت افزایش می‌یابد. در این حالت افزایش مصرف انرژی حرارتی به میزان ۱۵-۲۵ درصد گزارش گردیده که در شرایط بدتر حتی از محدوده مذکور نیز تجاوز می‌کند.

دو روش مختلف برای بهینه‌سازی مصرف ویژه انرژی حرارتی مطلوب می‌شود. اولین روش این است که راندمان مخصوص ذوب یعنی نسبت خروجی مذاب از کوره (تن) بر مساحت سطح ذوب در طول روز افزایش داده شود و دومین روش بر اساس تصحیح ساختمان کوره می‌باشد، به گونه‌ای که تلفات حرارتی از دیواره‌ها کمتر شده و حرارت گازهای داغ خروجی نیز کمتر تلف شود.

برای ارزیابی عملکرد حرارتی یک کوره، از شاخصی به نام مقدار عدم بهره‌وری^۲ استفاده می‌شود که بدین صورت تعریف می‌گردد:

مقدار مصرف انرژی حرارتی در کوره بر حسب Btu/hr در شرایط ایده‌آل، زمانی که خروجی مذاب از کوره صفر باشد. این مقدار نشان دهنده میزان حرارتی است که توسط کوره به مصرف رسیده اما منجر به تولید مذاب

1- Cross-Fired
2- Non-productive value

و تحویل آن نشده است. جهت مقایسه کوره‌های مختلف با اندازه‌های مساوی و دمای عملکرد یکسان، معیار مذکور را می‌توان بعنوان یک معیار اقتصادی بکار برد. مقدار عدم بهره‌وری کوره از رابطه زیر قابل بدست می‌آید:

$$Q_1 = Q - \frac{Q_n}{h_f} \quad (5-25)$$

که در آن:

Q_n : مقدار انرژی حرارتی مفید

η_f : راندمان احتراق

Q : مقدار انرژی حرارتی مصرفی

Q_1 : مقدار عدم بهره‌وری کوره

تلاش متخصصین صنعت شیشه جهت حذف وابستگی شاخص عدم بهره‌وری کوره به پارامترهای اندازه کوره و درجه حرارت عملکرد آن، منجر به تعریف شاخص کارآمدی کوره^۱ گردید. به این منظور با اعمال فاکتورهای اصلاح کننده‌ای بر روی معادله (۵-۲۵)، تمام مقادیر خاص نسبت به حجم واحد سنجیده می‌شوند. بنابراین اثر عمر کوره نمی‌تواند به صورت یک عدد بیان شود و روابط تنها برای مقایسه کوره‌های نو یا برای مشاهدات مستمر از یک مخزن ذوب اعتبار خواهد داشت. شاخص مقدار کارآمدی کوره (p) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = \frac{0.026}{k_f \cdot f} \left(\frac{G \cdot H}{K_T} - S \cdot C \right) \quad (Btu / ft^2 \cdot ^\circ C) \quad (5-26)$$

که در آن:

F : سطح کل کوره (ft^2)

G : مصرف سوخت (ton/24h)

H : مقدار گرمای خالص سوخت (Btu/ft³ or Btu/lb)

S : نرخ مذاب خروجی از مخزن ذوب (ton/ 24h)

C : مقدار مصرف واقعی انرژی حرارتی برای ذوب مواد خام در دمای ۱۴۰۰ سانتیگراد

T : درجه حرارت عملکرد کوره و یا قسمتهای خاص از کوره

K_f : ضریب بدون بعد تصحیح سطح ذوب کوره

K_t : ضریب بدون بعد تصحیح درجه حرارت عملکرد کوره

مقادیر ضریب تصحیح سطح ذوب کوره (K_f) در جدول (۵-۶) ارائه شده است.

جدول (۵-۶): مقادیر K_f برای تصحیح سطح ذوب کوره

Furnace Area sq. ft	K_f	Furnace Area sq. ft	K_f
50	2.74	1000	0.840
100	2.03	1200	0.792
200	1.52	1400	0.757
300	1.30	1600	0.725
400	1.16	1800	0.700
500	1.07	2000	0.680
600	1.00	2500	0.644
700	0.95	3000	0.606
800	0.905	3500	0.586
900	0.870	4000	0.565

چنانچه درجه حرارت در بخشهای مختلف کوره متفاوت باشد، باید متوسط K_t را با اندازه‌گیری درجه حرارت در هر قسمت کوره بدست آورد. این کار طبق رابطه (۵-۲۷) انجام می‌شود.

$$K_t = \frac{K_{t1}F_1 + K_{t2}F_2 + \dots + K_{tm}F_n}{F} \quad (۵-۲۷)$$

که در رابطه فوق، کوره به بخشهای 1, 2, ..., n تقسیم شده است. مقدار ضریب تصحیح درجه حرارت K_t در جدول (۵-۷) ارائه شده است.

جدول (۵-۷): مقادیر K_t برای تصحیح درجه حرارت عملکرد کوره

$T \begin{Bmatrix} ^\circ C \\ ^\circ F \end{Bmatrix}$	K_t	$T \begin{Bmatrix} ^\circ C \\ ^\circ F \end{Bmatrix}$	K_t
1700 3092	1.457	1350 2462	0.939
1650 3002	1.376	1300 2372	0.830
1600 2912	1.295	1250 2282	0.828
1550 2822	1.214	1200 2192	0.777
1500 2732	1.133	1150 2102	0.725
1450 2642	1.064	1100 2012	0.674
1400 2552	1.00		

حاصل ضرب S.C نشان دهنده مصرف واقعی انرژی حرارتی جهت ذوب است. بنابراین:

$$S.C = \frac{Q_n}{h_t}, \quad C = \frac{Q_n / S}{h_t} = \frac{q_n}{h_t} \quad (5-28)$$

که در رابطه فوق، Q_n مقدار حرارت مفیدی است که صرف ذوب شیشه شده و اصطلاحاً حرارت ذوب تئوری نامیده می شود و واحد آن Btu/24h است. هر چند مشخص کردن مقدار دقیق مصرف ویژه حرارتی برای ذوب شیشه بسیار مشکل است، اما عموماً راندمان مشعل 0.55 و q_n برای ذوب مواد اولیه Btu/lb 1001 فرض می شود و برای ذوب خرده شیشه نیز مقدار q_n معادل 749 Btu/lb در نظر گرفته می شود. باید توجه داشت که مقادیر فوق تقریبی بوده و بکارگیری آن نیاز به دقت بسیار زیادی دارد. در مجموع مقدار واقعی انرژی حرارتی برای ذوب مواد خام (C) می تواند از داده های فوق برای خرده شیشه و مواد اولیه محاسبه شود.

در جدول (5-8) مقادیر C برای درصد های مختلف خرده شیشه و نیز برای دو راندمان متفاوت بدست آمده است. مقادیر دقیقتر در جدول (5-9) ارائه شده است.

جدول (5-8): مقادیر C برای محاسبه عملکرد کوره

Cullet Addition as % of the Melt	0	20	40	60	80	100
C for $\eta_t = 0.55$	1818	1726	1634	1543	1451	1359
C for $\eta_t = 0.65$	1539	1460	1384	1305	1228	1148

جدول (5-9): حرارت مفید برای انواع شیشه ها در دمای 2550 درجه فارنهایت و در درجه حرارت کاری

Kind of Glass	Relative Temp. °F	Useful Heat in Btu/lb of Glass for a Cullet Ratio of %					
		0	20	40	60	80	100
Hollow-Ware	2552	1037	977	918	859	799	740
	2282	954	895	835	776	716	657
Sheet	2552	1199	1107	1013	922	823	736
	2102	1028	936	842	751	657	565
Apparatus	2552	914	868	819	772	724	677
	2372	859	812	763	716	668	621
Lead Crystal	2552	893	850	806	763	720	677
	2012	704	661	617	574	531	488

شاخص کارآمدی کوره می‌تواند به صورت جدول (۵-۱۰) طبقه‌بندی شود.

جدول (۵-۱۰): شاخص کارآمدی کوره

P<5	Btu/sq. ft. sec	good
5-6	Btu/sq. ft. sec	average
6-7	Btu/sq. ft. sec	fair
>7	Btu/sq. ft. sec	bad

