

# راهکارهای کاهش مصرف انرژی حرارتی در صنعت شیشه

قاسم عرب / کارشناس ارشد سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور

## چکیده

انرژی یکی از عوامل مهم تولید در واحدهای صنعتی بوده و در کنار مواد اولیه، نیروی کار، سرمایه، ماشین آلات و تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جوامع صنعتی پیشرفته، بهینه‌سازی مصرف انرژی یک مسوولیت مدیریتی در کلیه سطوح تلقی گردیده و مدیران سعی می‌نمایند با اشاعه این امر در بین پرسنل خود، آنرا به صورت فرهنگی عمومی و کارساز در آورند. امروزه به کارگیری منطقی انرژی در صنعت هم در سطوح منطقه‌ای و هم در سطوح ملی (خرد و کلان) بعنوان یک ضرورت مورد توجه کارشناسان و دست اندرکاران قرار گرفته است. با توجه به اختلاف مصرف ویژه انرژی (میزان مصرف انرژی به ازای واحد تولید) در ایران با مقادیر جهانی، توجه به امر بهینه‌سازی انرژی ضرورت می‌یابد و انجام ممیزی انرژی و استقرار واحد مدیریت انرژی به عنوان راهکاری برای تعیین پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی و اجرای آنها در یک واحد صنعتی، از اولویت ویژه برخوردار می‌باشد. در این مقاله ابتدا با مروری بر میزان مصرف حامل‌های انرژی فسیلی در صنعت شیشه، سهم و متوسط مصرف ویژه انرژی هر یک از بخش‌های تولیدی آورده شده و میزان پتانسیل صرفه‌جویی در هر بخش برآورد می‌گردد. سپس فرآیند تولید شیشه مدنظر قرار گرفته و میزان انرژی مصرفی در هر قسمت از فرآیند تولید به تفکیک مشخص گردیده است. در ادامه راهکارهای کاهش مصرف انرژی حرارتی در صنعت شیشه مورد توجه قرار گرفته و هر یک از راهکارها به تفصیل شرح داده شده است.



## مقدمه

صنعت شیشه کشور در سال ۱۳۸۲ میزان ۴۶۰ میلیون متر مکعب معادل گاز طبیعی، حامل‌های انرژی فسیلی مصرف نموده است که سهم بخش‌های تولیدی شیشه جام (شیت) برابر ۳۷/۲۵ درصد، شیشه ظروف (بلور و بطری) ۳۶/۴۵ درصد، شیشه فلوت ۱۷/۱۷ درصد و واحدهای سنتی ۹/۱۳ درصد از این مصرف بوده است. ارزش کل انرژی مصرفی از دیدگاه ملی در این صنعت سالیانه برابر ۲۵۷۷۴ میلیون دلار می‌باشد که سهم ارزشی بخش تولیدی شیشه جام (شیت) برابر ۳۷/۳۸ درصد، شیشه ظروف (بلور و بطری) ۴۲/۸۰ درصد، شیشه فلوت ۱۰/۷۴ درصد و واحدهای سنتی ۱۵/۰۸ درصد بوده است. در این سال صنعت شیشه میزان ۹۰۵ هزار تن محصولات شیشه‌ای تولید نمودند که سهم شیشه جام (شیت) برابر ۳۷/۱۸ درصد، شیشه ظروف (بلور و بطری) ۳۵/۱۵ درصد، شیشه فلوت ۲۹/۸۰ درصد و واحدهای سنتی ۳/۸۷ درصد از کل تولید بوده است. متوسط مصرف ویژه انرژی کل صنعت شیشه کشور برابر ۴۶۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم محصول می‌باشد. این در حالی است که مقادیر متوسط جهانی ۱۹۷۰ کیلوکالری بر کیلوگرم محصول را نشان می‌دهند. شاخص متوسط مصرف ویژه انرژی در شیشه جام (شیت) برابر ۵۵۰۰، شیشه ظروف (بلور و بطری) ۴۷۷۰، شیشه فلوت ۲۶۵۰ و واحدهای سنتی ۱۰۸۵۰ کیلوکالری بر کیلوگرم محصول می‌باشد و در صورت رسیدن به معیارهای جهانی در صنعت شیشه سالیانه تا ۲۵۰ میلیون متر مکعب معادل گاز طبیعی می‌توان صرفه‌جویی نمود که ۷۶ درصد این صرفه‌جویی در بخش‌های شیشه جام (شیت) و ظروف وجود دارد.



### فرآیندهای تولید شیشه

صرف نظر از نوع محصول نهایی کارخانجات شیشه، فرآیند تولید انواع شیشه شامل چهار مرحله اصلی می باشد. این چهار مرحله عبارتند از:

- \* آماده سازی مواد اولیه
- \* ذوب و تصفیه شیشه
- \* شکل دهی محصول
- \* عملیات پس از شکل دهی

جدول (۱) مصرف ویژه انرژی را در بخش های مختلف فرآیندهای تولید انواع محصولات شیشه ای نشان می دهد. همان طور که از این جدول نیز پیداست، صرف نظر از نوع محصولات شیشه ای تولیدی، بزرگترین بخش مصرف کننده انرژی در فرآیندهای تولید شیشه، بخش ذوب و تصفیه مذاب است. بخش ذوب و تصفیه مذاب حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد از کل انرژی مصرفی در صنایع تولید محصولات شیشه ای را به خود اختصاص می دهد.

### راهکارهای کاهش مصرف انرژی در صنعت شیشه با کاهش زمان ماند مذاب در کوره

در فرآیندهای صنعتی ذوب شیشه، از کوره های مخزنی با عملکرد پیوسته استفاده می شود که در آنها گرمای لازم برای ذوب مواد اولیه از طریق شعله (احتراق سوخت فسیلی) و یا الکتروتود (نیروی برق) تأمین می شود. اولین کوره های مخزنی پیوسته در نیمه دوم قرن ۱۹ معرفی شدند و از آن زمان تا کنون تغییرات عمده ای به منظور کاهش مصرف انرژی در کوره ها صورت پذیرفته است. یکی از عمده ترین تغییرات تکنولوژیکی صورت گرفته در طراحی و ساخت کوره های ذوب شیشه، با هدف به حداقل رساندن زمان ماند مذاب در کوره توسعه داده می شده است. انرژی حرارتی خالصی که به مواد اولیه ورودی به کوره در منطقه نزدیک به دریچه بارریز منتقل می گردد، حدود ۹۰-۷۵ درصد از کل انرژی لازم برای ذوب و تصفیه مذاب را شامل می شود و نکته قابل توجه آن است که انتقال این میزان انرژی حرارتی به بیچ مواد اولیه، فقط طی ۶۰-۴۵ دقیقه صورت می گیرد. طی این مدت، مواد اولیه ذوب می شود اما برای آنکه مذاب تولیدی به میزان مورد نظر تصفیه شود، لازم است تا درجه حرارت آن باز هم افزایش یابد و به علاوه برای آنکه مذاب کاملاً همگن شود، باید مدت زمان بیشتری را در داخل کوره سپری کند. تصفیه مذاب شامل خارج ساختن حباب های گاز محلول در مذاب، اختلاط و همگن سازی شیمیایی و حرارتی مذاب تولیدی می شود. زمان ماند مذاب در کوره مستقیماً تابع کیفیت محصول شیشه ای تولیدی و در نتیجه متأثر از عملیات تصفیه مذاب می باشد. از سوی دیگر زمان ماند مذاب، حجم مخزن ذوب کوره را نیز تعیین می کند، چرا که طبق رابطه زیر، حاصلضرب مقدار متوسط زمان ماند مذاب در کشش کوره، ظرفیت استاتیک و یا حجم مورد نیاز مخزن ذوب کوره را بدست می دهد و حجم مخزن ذوب نیز ابعاد کوره را مشخص می کند. که در رابطه فوق:

Residence: مدت زمان ماند مذاب در کوره، (hr)

PR: کشش کوره، (Ton/day)

SC: ظرفیت استاتیک کوره، (Ton)

شکل (۱)، حداقل زمان ماند مذاب را در قسمت های مختلف فرآیند ذوب و تصفیه مذاب در کوره نشان می دهد. همانطور که از شکل (۲) نیز پیداست، حداقل زمان ماند مذاب در کوره شامل زمان های زیر می شود:

### \* ذوب مواد اولیه بیچ، ۷۵/۰ ساعت

در اولین مرحله از ذوب، مواد اولیه تحت تأثیر انرژی تشعشعی دریافتی از شعله مشعل ها و محافظه احتراق، گرم شده و بخش دیگری از انرژی دریافتی در مرحله ذوب را از جریان مذاب شیشه که در زیر توده شناور مواد اولیه در حرکت است، کسب می کند. شکل (۲)، به صورت شماتیک وضعیت توده شناور مواد اولیه و جریان های مذاب را در یک کوره مخزنی ذوب شیشه نشان می دهد. کل مدت زمان ماند بیچ مواد

اولیه در مرحله ذوب که طی آن مواد اولیه گرم شده، واکنش های گرماگیر<sup>۲</sup> و گرمازای<sup>۳</sup> خود را طی نموده و در نهایت گرمایش مذاب تولید شده انجام می پذیرد، در اغلب فرآیندهای ذوب شیشه ۶۰-۴۰ دقیقه به طول می انجامد. شکل (۳)، مقدار توریک انرژی دریافتی توسط بیچ مواد اولیه (برحسب MJ/kg) در مراحل مختلف گرمایش و دریافت انرژی حرارتی طی فرآیند ذوب را بر حسب دمای مواد اولیه نشان می دهد.

برگشت جریان مذاب شیشه از نقاط داغ کوره<sup>۴</sup> به سمت نقاط ابتدای کوره یا منطقه شناوری مواد اولیه بیچ، از یک سو تأمین کننده بخش عمده ای از انرژی حرارتی لازم برای ذوب مواد اولیه است (که در مورد برخی محصولات شیشه ای، به ۶۵ درصد از کل انرژی مورد نیاز ذوب می رسد) و از سوی دیگر باعث می شود تا کیفیت بالای مذاب برگشتی از نقاط داغ کوره، در اختلاط با مذاب واقع در زیر توده شناور مواد اولیه (که مملو از شن دانه های<sup>۵</sup> ذوب نشده است) تنزل یابد.

### \* انحلال شن دانه های باقیمانده در مذاب، ۲-۱/۵ ساعت

در طول فرآیند ذوب، بیش از ۹۰-۸۰ درصد از بیچ مواد اولیه ذوب می شود و ۲۰-۱۰ درصد باقیمانده به صورت شن دانه های حل نشده در مذاب باقی می ماند. شن دانه های باقیمانده در مذاب، با نفوذ ذرات سیلیس (SiO<sub>2</sub>) موجود در آنها به داخل مذاب، حل یا ذوب شده و از بین می روند. انحلال شن دانه های موجود در مذاب بستگی به میزان قابلیت انحلال<sup>۶</sup> سیلیس در مذاب، ضریب نفوذ<sup>۷</sup> سیلیس به داخل مذاب شیشه، ابعاد شن دانه ها و جابجایی جریان مذاب نسبت به دانه ها دارد.

### \* تصفیه مقدماتی مذاب، ۳-۲ ساعت

منطقه تصفیه مذاب، داغ ترین ناحیه در کوره های مخزنی ذوب شیشه است. بدلیل دمای بسیار زیاد در این ناحیه، چگالی مذاب شیشه پایین آمده و در نتیجه جریان جابجایی آزاد، مذاب شیشه از کف کوره به سمت سطح مذاب حرکت می کند. با حرکت به سمت بالای مذاب شیشه که تحت تأثیر نیروی شناوری ناشی از اختلاف چگالی مذاب شیشه در کف کوره با مذاب شیشه در سطح ایجاد می شود، دو جریان ناهمسوز از مذاب در نقاطی از سطح مذاب (موسوم به چشمه مذاب) شکل می گیرد، که یکی از جریانات به سمت بالا دست کوره (محل بارریز مواد اولیه بیچ) و دیگری به سمت پایین دست آن (محل گلوگاه کوره) حرکت می کند. (شکل ۳) تصفیه مقدماتی مذاب، اساساً در ناحیه چشمه مذاب کوره انجام می شود. در سمت پایین دست چشمه مذاب به سمت گلوگاه کوره، زمان ماند مذاب قبل از وارد شدن به گلوگاه، به اندازه ای کم است که امکان دارد عملیات ذوب و تصفیه مذاب به طور کامل انجام نشود. بنابراین تصفیه مذاب باید پس از آنکه تمام شن دانه های موجود در مذاب کاملاً حل شدند، صورت پذیرد.

دردهماهای زیاد (ناحیه تصفیه مذاب)، برخی مواد افزودنی مورد استفاده جهت تصفیه مذاب، نظیر سولفات سدیم تجزیه شده و موادی مانند کلرور سدیم نیز تبخیر می شوند. حالت اکسیدکنندگی مذاب و نیز غلظت افزودنی های محلول در مذاب، پارامترهایی هستند که توسط آنها دمایی که طی آن گازهای حاصل از تجزیه افزودنی های مذاب در فشاری بیش از فشار اتمسفریک شروع به تولید شدن می کنند، تعیین می شود. این دما، درجه حرارت آغاز<sup>۹</sup> تصفیه نامیده می شود. در دمای بیش از این درجه حرارت، حباب های گاز به صورت پیوسته و یکنواخت شروع به رشد می کنند، چرا که گازهای حاصل از تجزیه افزودنی های مذاب در مرحله تصفیه ذوب مانند O<sub>2</sub> و/یا SO<sub>2</sub>، NaCl یا NaClO<sub>2</sub>، فشاری بیش از فشار داخلی گازهای درون حباب های معمولی شامل N<sub>2</sub> و/یا CO<sub>2</sub> تولید می کنند. رشد پیوسته حباب های گاز، باعث شتاب گرفتن حرکت به سمت بالای حباب ها می شود. نرخ حرکت صعودی حباب های گاز در داخل مذاب با توان دوم قطر حباب افزایش می یابد. به این ترتیب در مرحله تصفیه مقدماتی مذاب که ۳-۲ ساعت به طول می انجامد، بخش اعظم گازهای محلول در مذاب و نیز حباب های گاز حاصل از تجزیه افزودنی های ذوب از مذاب خارج می شود.

### \* تصفیه تکمیلی مذاب، ۲-۱ ساعت

مذاب شیشه پس از عبور از ناحیه تصفیه مقدماتی در کوره، ممکن است همچنان شامل برخی حباب های گاز باقیمانده باشد. در این مرحله با سرمایش کنترل شده مذاب، قابلیت انحلال گازهای نظیر O<sub>2</sub>، CO<sub>2</sub> و SO<sub>2</sub> در مذاب افزایش یافته و حباب های حاوی چنین گازهایی مجدداً به طور کامل جذب مذاب شده و

از جمله طرح های شناخته شده ای هستند که به منظور بهبود کارایی کوره ها از سال ها پیش در کشورهای صنعتی به کار برده شده اند و عملاً پتانسیل بیشتری در رابطه با صرفه جویی انرژی از این طریق نمی توان تصور کرد.

پیش گرم کردن مواد اولیه و یا شیشه خورده های بازیافتی می تواند به طور قابل ملاحظه ای باعث کاهش مصرف سوخت شود. اصول حاکم بر این تکنولوژی بسیار ساده است و اساساً از یک فرآیند انتقال حرارت بین گازهای داغ اتلافی خروجی از کوره و بیج مواد اولیه سرد ورودی به کوره تشکیل می شود. فرآیند انتقال حرارت می تواند به صورت تماس مستقیم گازهای داغ اتلافی با بیج مواد اولیه انجام پذیرد و یا از طریق یک فرآیند غیرمستقیم که در آن جریان گازهای داغ اتلافی و بیج مواد اولیه بوسیله صفحات مبدل حرارتی از یکدیگر جدا می شوند، صورت گیرد. سیستم مستقیم پیش گرمایش می تواند به گونه ای طراحی شود که در ضمن نقش یک فیلتر را هم برای گازهای اتلافی ایفا نماید. پیش گرمایش می تواند صرفاً در مورد شیشه خورده های بازیافتی انجام گیرد، که در این صورت عملکرد سیستم های پیش گرمایش شیشه خورده نسبت به سیستم پیش گرمایش مخلوط شیشه خورده و بیج مواد اولیه ساده تر خواهد بود. با این وجود در این سیستم ها نیاز به مقدار زیادی شیشه خورده بازیافتی است، تا از نظر اقتصادی نیز توجیه پذیر گردند.

پیش گرمکن های مخلوط شیشه خورده بازیافتی و بیج مواد اولیه، عملکردی به مراتب پیچیده تر دارند و می توانند با مشکلاتی نیز از نظر پخش ذرات و غبار مواد اولیه همراه باشند. با این وجود از آنجائی که در این روش، فرآیند پیش گرمایش، تمام خوراک کوره را در برمی گیرد، پتانسیل صرفه جویی بیشتری ایجاد می شود. حد ماکزیم درجه حرارتی که شیشه خورده های بازیافتی می تواند در سیستم های پیش گرمکن کسب کنند، بدون اینکه نرم شده و یا خاصیت چسبندگی پیدا کنند، میزان گرمای بازیافتی در سیستم های پیش گرمکن را محدود می نماید. شیشه خورده های مصرفی در بیج مواد اولیه، در دمای حدود ۶۰۰-۶۰۰ C نرم شده و به حالت شبه خمیری در می آیند، که در نتیجه پیش گرم کردن عملاً به دمای ۵۰۰-۴۵۰ C محدود می شود. حداکثر صرفه جویی انرژی ممکن که می تواند با پیش گرم کردن مواد اولیه خوراک کوره حاصل شود، حدود ۲۵ درصد از انرژی مورد نیاز ذوب در کوره می باشد. پیش گرمکن های مواد اولیه، علاوه بر کاهش مصرف سوخت کوره، همچنین از شدت جریان جرمی محصولات احتراقی داخل کوره کاسته و نیز با کاهش درجه حرارت در قسمت تاج کوره، به افزایش عمر عملیاتی کوره کمک می کنند. شکل (۴)، تأثیر دمای پیش گرمایش خوراک کوره و درصد شیشه خورده مصرفی در بیج مواد اولیه بر مصرف ویژه انرژی کوره را نشان می دهد.

### سیستم پیش گرمایش مستقیم

در سیستم پیش گرمکنی که برای اولین بار توسط کارخانه شیشه ناینبرگر<sup>۱۱</sup> توسعه داده شد، تماس مستقیمی بین جریان گازهای داغ اتلافی و مواد خام (شیشه خورده بازیافتی و بیج مواد اولیه) در یک جریان متقاطع ناهمسو<sup>۱۲</sup> برقرار می شود. اولین واحد پیش گرم کن مواد اولیه از این نوع، نخستین بار در کوره شماره ۴ کارخانه شیشه ناینبرگر در سال ۱۹۸۷ نصب گردید. عملکرد و کارایی سیستم پیش گرمکن نصب شده با موفقیت همراه بوده و پس از آن پیش گرمکن های زیادی مورد استفاده قرار گرفتند. به عنوان نمونه می توان به یک واحد پیشگرمکن مواد اولیه از نوع تماس مستقیم اشاره کرد که از سال ۱۹۹۵ بر روی کوره ذوب شیشه بی رنگ کارخانه نیونهاگن<sup>۱۳</sup> با ظرفیت روزانه ۷۳۰ ton/day نصب شده است. پس از نصب پیش گرمکن مذکور، شاخص مصرف ویژه انرژی در این کارخانه به ۴۷۳ GJ/ton رسید که معادل ۲۶ درصد صرفه جویی در مصرف انرژی بود. به علاوه، کاهش محسوسی نیز در میزان انتشار گازهای اسیدی (SO<sub>2</sub>, HCl, HF) به دست آمد.

جریان گازهای داغ اتلافی که کوره ذوب را ترک می کنند، در ابتدا برای پیش گرم کردن هوای احتراق تا دمای ۱۳۰۰-۱۲۰۰ C مورد استفاده قرار می گیرند. هنگامی که این گازها ریژنراتور را ترک می کنند، درجه حرارتی در حدود ۶۰۰-۴۵۰ دارند و هنوز حاوی حدود ۲۵ درصد از انرژی احتراقی سوخت فسیلی هستند. جریان گازهای اتلافی سپس از طریق کانالی از پشت ریژنراتور به سمت پیش گرمکن مواد هدایت می شوند، به گونه ای که در مسیری خلاف جهت جریان خوراک کوره یعنی از پایین به بالا جریان یابند. در ساختمان داخلی پیش گرمکن، صفحات آهنی ای وجود دارد

عملیات تصفیه مذاب تکمیل می شود. بدیهی است برای آنکه مکانیزم جذب مجدد حباب های گاز در مذاب در طول فرآیند سرمایش کنترل شده مذاب توسعه یابد، لازم است تا در مرحله تصفیه مقدماتی، اکثر حباب های گاز از مذاب خارج شده و مذابی به مرحله تصفیه تکمیلی راه پیدا کند که شامل حباب های کوچک با غلظت کم گازهای محلول باشد.

باید توجه داشت که حباب های حاوی گاز N<sub>2</sub> می بایستی به شکل مؤثری در طول فرآیند تصفیه مقدماتی از مذاب خارج شوند، چرا که انحلال نیتروژن در مذاب شیشه در طول فرآیند سرمایش کنترل شده مذاب به خوبی صورت نمی گیرد. در تولید مذاب شیشه سودا-آهک-سیلیس، تصفیه تکمیلی مذاب با سرمایش کنترل شده آن در دمای بین ۱۳۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد انجام می پذیرد و حداقل زمان ماند مذاب در این مرحله بر حسب بازدهی خارج ساختن حباب های گاز در مرحله تصفیه مقدماتی مذاب بین ۲ تا ۱ ساعت تغییر می کند.

### \* همگن سازی مذاب ۱-۵، ۰/۵ ساعت

برای تولید محصول شیشه ای با ویژگی های ظاهری یکنواخت و همگن، ترکیب شیمیایی مذاب شیشه و نیز توزیع دما در مذاب باید تا حد ممکن یکنواخت باشد. عملیات همگن سازی مذاب در تمام نواحی کوره ذوب مخزنی انجام می گیرد. با این وجود ممکن است حتی در پایین دست نقاط داغ کوره، برخی ترکیبات به صورت محلول وارد مذاب شیشه شوند. مثلاً ممکن است به مرور زمان ورود ترکیباتی از دیگر گازها یا نسوزهای بدنه کوره به مذاب، همگنی مذاب شیشه را از بین ببرند. همگن سازی مذاب شیشه از طریق همزدن آن، زمان نسبتاً کمی را در بر می گیرد و غالباً کمتر از ۵ درصد متوسط زمان ماند مذاب در کوره را شامل می شود.

بدیهی است هر چه زمان ماند مذاب در کوره کمتر باشد، انرژی حرارتی کمتری به مصرف می رسد. بنابراین یکی از مؤثرترین راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع شیشه، به حداقل رساندن زمان ماند مذاب در کوره، همزمان با حفظ کیفیت مذاب تولیدی است. زمان ماند مذاب در کارخانجات تولید کننده شیشه بر حسب نوع و کیفیت محصول شیشه ای تولیدی، بسیار متغیر است و گستره وسیعی را در بر می گیرد. به عنوان مثال متوسط زمان ماند مذاب در کوره های ذوب شیشه مظروف و بطری حدود ۲۴ ساعت و در کوره های ذوب فلوت گاه تا بیش از ۶۰ ساعت است.

مدل های تئوریک ارائه شده، حداقل زمان ماند لازم برای ذوب تمام مواد اولیه بیج و اطمینان از تصفیه کامل مذاب را بر حسب نوع محصولات شیشه ای تولیدی، حدود ۹-۵ ساعت محاسبه کرده است. با این حال نسبت بین حداقل زمان ماند و متوسط عملی زمان ماند مذاب در کوره، معمولاً بین ۱:۶-۴:۱ است. اختلاف ۴ تا ۶ برابری متوسط زمان ماند مذاب در کوره به زمان تئوریک آن، ناشی از جریان های برگشتی و چرخشی و نیز جریان های اختلاطی مذاب درون کوره است که بر اثر آن شیشه کاملاً ذوب شده قبل از ترک کوره، چندین بار با مذاب تازه شکل گرفته از مواد اولیه مخلوط می شود. اختلاف بسیار زیاد بین متوسط زمان ماند مذاب در کوره و حداقل زمان تئوریک آن از یک سو و مقدار بسیار زیاد جذب انرژی حرارتی در مراحل اولیه ذوب (که تنها در مدت زمانی معادل ۵ درصد متوسط زمان ماند مذاب در کوره صورت می پذیرد) از سوی دیگر و نیز مکانیزم انتقال انرژی حرارتی به توده مواد اولیه بیج از جمله مواردی هستند که امروزه موضوع تحقیقات کاربردی بسیاری با هدف افزایش بهره وری انرژی در فرآیندهای ذوب کوره های صنعتی شده اند.

### پیش گرمایش مواد اولیه

در این بخش به پتانسیل های صرفه جویی انرژی و دیگر مزایای زیست محیطی حاصله در صورت استفاده از سیستم های پیش گرمکن مواد اولیه و یا شیشه خورده بازیافتی پرداخته شده است. سیستم های مختلف پیش گرمایش مواد اولیه، شیشه خورده و یا ترکیبی از مواد اولیه و شیشه خورده مصرفی عبارتند از:

- سیستم پیش گرمایش مستقیم

- سیستم پیش گرمایش غیرمستقیم

### - سیستم پیش گرمکن همراه با فیلتر الکترواستاتیکی

امروزه با اجرای هر چه بیشتر طرح های بهینه سازی مصرف انرژی، بهبود بازدهی عملکرد کوره های مدرن ریژنراتوری محدودتر و مشکل تر شده است. تغییرات انجام پذیرفته به منظور طراحی بهینه کوره، عایق کاری پیشرفته و کنترل بهینه احتراق، همگی

صفحه‌ای از نوع جریان متقاطع - جریان ناهمسو<sup>۱۷</sup> است که از چند مجرای افقی هدایت کننده جریان گازهای داغ خروجی و چند مجرای عمودی هدایت کننده خوراک کوره تشکیل می‌شود. شیشه خرده و بیج مواد اولیه (سرد) در اثر نیروی جاذبه از قسمت بالای پیش گرمکن به سمت پایین جریان می‌یابد و با دریافت غیر مستقیم انرژی گرمایی گازهای داغ اتلافی از صفحات مبدل حرارتی در حدود ۳۵۰-۳۰۰ گرم می‌شود. سینی‌های ارتعاشی فیدر<sup>۱۸</sup>، شیشه خرده گرم شده را به کلکتور<sup>۱۹</sup> فیدر منتقل کرده و از آنجا نیز بیج مواد اولیه به طور مستقیم به بارریز کوره تغذیه می‌شوند. از سوی دیگر، گازهای داغ اتلافی در مسیر مجرای خود در حد فاصل صفحات مبدل، جریان یافته و با عبور از مجاری فرعی کناری مسیر خود را از قسمت پایین پیش گرمکن تا بالای آن طی می‌کنند. این مجاری فرعی توسط دریچه‌های "بازبینی" مناسب، به منظور کنترل و نگهداری سیستم، مجهز شده‌اند. در طول فرآیند پیش گرم کردن مواد، دمای گازهای داغ اتلافی از ۵۵۰ C به ۲۰۰ C کاهش می‌یابد.

ساختمان پیش گرمکن غیر مستقیم، از واحدهای تکرار شونده‌ای<sup>۲۰</sup> تشکیل شده است که این امر استفاده از فضای موجود را بهینه کرده و به علاوه امکان تعویض بخش‌های فرسوده واحدهای مذکور در مبدل حرارتی را برآحتی فراهم می‌کند. هنگامی که کوره با استفاده از گاز طبیعی گرم می‌شود، کانال‌های انتقال محصولات احتراقی (گازهای داغ اتلافی) کاملاً تمیز باقی می‌مانند. اما هنگامی که سوخت‌های سنگین نفتی مانند مازوت با میزان زیاد سولفور، سوخت اصلی کوره باشد، مقداری رسوب که عمدتاً شامل سولفات سدیم است، در این کانال‌ها شکل می‌گیرد. با این وجود همگام با توسعه کاربرد سیستم‌های اولتراسونیک، ضرورت تمیز کردن دستی این کانال‌ها برطرف شده است. استفاده از سیستم اولتراسونیک، تمیز کاری پیوسته و اتوماتیک پیش گرمکن را به خوبی تضمین می‌نماید. کارخانه شیشه PLM به دلایل زیست محیطی و همچنین به منظور جلوگیری از برگشت احتمالی سولفات سدیم به کوره از طریق شیشه خرده‌های پیش گرم شده (که باعث تشکیل کف در سطح مذاب شیشه می‌شود)، سیستم پیش گرمکن غیر مستقیم را انتخاب کرده است. تجربه کاربرد عملی سیستم‌های پیش گرمکن غیر مستقیم از مواد اولیه، مزایای زیر را مشخص نموده است:

- \* کاهش مصرف انرژی به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد.
- \* کوره‌های ذوب شیشه در محدوده دمایی حداقل (دمای مواد اولیه ورودی به کوره) و حداکثر (دمای تاج کوره) عمل می‌کنند. با افزایش دمای حداقل کوره که به علت افزایش دمای مواد اولیه ورودی به کوره در پیش گرمکن صورت می‌پذیرد، امکان کاهش دمای تاج کوره فراهم می‌آید. در نتیجه امکان افزایش عمر عملیاتی کوره به میزان حدود یکسال و یا امکان افزایش کشش مذاب کوره به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد بدون کاهش عمر عملیاتی کوره ایجاد می‌شود.
- \* انتشار آلاینده‌های NOX به علت کاهش مصرف انرژی و نیز پایین آمدن دمای تاج کوره، به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.
- \* برخلاف سیستم‌های پیش گرمکن مستقیم، در سیستم‌های پیش گرمکن غیر مستقیم به علت عدم تماس جریان نسبتاً شدید گازهای داغ اتلافی و ذرات ریز مواد اولیه، افزایشی در میزان انتشار آلاینده‌ها وجود ندارد و به همین علت هم نیازی به تجهیزات خاص کنترل آلودگی نمی‌باشد.
- \* کاهش دمای گازهای اتلافی پس از عبور از سیستم پیش گرمکن غیر مستقیم، در صورت لزوم امکان استفاده از تکنولوژی فیلترهای کیسه‌ای<sup>۲۱</sup> را برای جمع آوری ذرات و غبار موجود در محصولات احتراقی قبل از خروج از دودکش فراهم می‌آورد.

### سیستم پیش گرمکن همراه با فیلتر الکترواستاتیکی

بسترهای گرانولی<sup>۲۲</sup> یا اصطلاحاً بسترهای شنی، از دیر باز به عنوان فیلترهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته اند، به‌خصوص در فرآیندهای احتراقی همچون سوزاندن چوب. امروزه کاربرد میدان‌های الکتریکی در بستر گرانولی، به طور قابل توجهی راندمان فیلتراسیون را افزایش داده است. در فیلتر الکترواستاتیکی با بستر گرانولی که اولین بار توسط ادمستون ابداع شد، مزایای سیستم فیلتراسیون و پیش گرمکن با یکدیگر ترکیب شده است. سیستم اصلی ابداعی توسط ادمستون<sup>۲۳</sup> ابداع شد، مزایای سیستم فیلتراسیون و پیش گرمکن با یکدیگر ترکیب شده است. سیستم

که برای هدایت جریان مواد اولیه از بالا به پایین با شیب معکوس به بدنه پیش گرمکن نصب شده‌اند. در داخل پیش گرمکن مواد، جریان گازهای اتلافی از میان فضای بین صفحات آهنی مذکور عبور کرده و به طور مستقیم در تماس با خوراک کوره قرار می‌گیرند. شکل (۵)

در پیش گرمکن‌های مواد اولیه به روش تماس مستقیم، جریان شدید گازهای اتلافی از یک سو و وجود ذرات ریز مواد اولیه از سوی دیگر، حجم ذرات و غبار موجود در گازهای اتلافی را به مقدار بسیار زیادی افزایش می‌دهد. و به همین دلیل سیستم پیش گرمکن می‌بایست بایک سیستم جذب غبار همراه باشد. شکل (۶) تماس مستقیم جریان گازهای اتلافی و بیج مواد اولیه از یک نقطه نظر دیگر هم حائز اهمیت است. مقدار نسبتاً زیادی از گازهای اکسید سلنیم و اکسید سولفور موجود در گازهای داغ خروجی، هنگام پیش گرمایش خوراک کوره توسط بیج مواد اولیه جذب می‌شوند، این امر باعث کاهش مقدار افزودنی‌های سلنیم و سولفات سدیم به بیج مواد اولیه می‌گردد. در واقع مقدار ماده افزودنی سلنیم به بیج مواد اولیه از ۲۰ g/ton به ۲ g/ton و مقدار ماده افزودنی سولفات سدیم از ۵ kg/ton به ۷/۵ kg/ton کاهش می‌یابد که در ملاحظات اقتصادی موثر خواهد بود. کارایی موثر سیستم پیش گرمکن مواد اولیه، مستلزم استفاده از فیلتر غبار است تا بخوبی کنترل شده و به طور منظم شرایط عملکردی آن تحلیل شود. استفاده از پیش گرمکن‌های مواد اولیه، همیشه هم سودمند نیست. به عنوان مثال زمانی که جریان گازهای داغ خروجی از دو کوره مختلف به یک پیش گرمکن هدایت می‌شود، شیشه‌ای که قرار است ذوب شود و موادی که لازم است پیش گرم شوند، باید با یکدیگر سازگاری فرآیندی داشته باشند.

به عنوان مثال، به علت وجود عنصر کروم در گازهای داغ خروجی از کوره‌های ذوب شیشه سبز، از این جریان گازهای اتلافی نمی‌توان در سیستم پیش گرمکن مواد اولیه مصرفی برای تولید محصولات شیشه‌ای بی رنگ (بلور) و یا کهربایی استفاده کرد. به همین ترتیب به علت غلظت زیاد ترکیبات آهنی موجود در جریان گازهای داغ خروجی از کوره‌های ذوب شیشه بی رنگ (بلور) و کهربایی، بهتر است از این جریان گازهای اتلافی صرفاً برای پیش گرم کردن مواد اولیه مصرفی در تولید شیشه کهربایی استفاده شود. یک فاکتور مهم دیگر، میزان شیشه خرده مصرفی در بیج مواد اولیه است. وقتی مقدار شیشه خرده مصرفی ۸۰-۵۰ درصد مواد اولیه را تشکیل دهد، مشکلی در انتقال مخلوط مواد اولیه و شیشه خرده بوجود نمی‌آید.

در حالی که وقتی میزان شیشه خرده مصرفی به کمتر از ۵۰ درصد مواد اولیه می‌رسد، همجوشی‌هایی بین مواد بیج بوجود آمده و اصطلاحاً کلوخه‌هایی تشکیل می‌شود، هر چند مقدار آن آنقدر زیاد نیست که گرفتگی جدی ایجاد کند. به طور کلی افزودن حداقل ۲۰ درصد شیشه خرده مصرفی به بیج مواد اولیه برای پیشگیری از مشکلات احتمالی انتقال خوراک به کوره ضروری است. پیش گرم کردن بیج مواد اولیه همچنین حائز مزایایی در زمینه کنترل انتشار گازهای آلاینده می‌باشد. علاوه بر حذف ترکیبات کلر، فلور و SOX در طول فرآیند پیش گرم کردن مواد اولیه، می‌توان یک عامل جذب ترکیبات سولفور را نیز در کانال انتقال گازهای داغ خروجی حد فاصل پیش گرمکن و رسوب دهنده الکترواستاتیکی ذرات اضافه نمود. این امر می‌تواند باعث حذف نیاز به سولفور زدایی از جریان گازهای خروجی از کوره در مراحل بعدی شود. در صورت استفاده از سیستم پیش گرمکن مواد اولیه، انتشار گاز آلاینده NOX نیز از دو طریق زیر کاهش می‌یابد:

- ۱- نتیجه مستقیم کاهش مصرف سوخت در کوره
- ۲- عملکرد کوره در دمای پایین تر

### سیستم پیش گرمایش غیر مستقیم

سیستم پیش گرمکن غیر مستقیم که اولین بار توسط شرکت زاپ<sup>۲۴</sup> و چند موسسه دیگر تحقیقاتی در آلمان توسعه داده شد، اساساً به منظور پیش گرمایش شیشه خرده باز یافتی طراحی گردیده است. مدل پایلوت سیستم پیش گرمکن غیر مستقیم در کارخانه و تروپک<sup>۲۵</sup> در کشور سوئیس مورد آزمایش قرار گرفته است.

پیشرفت‌های بعدی انجام گرفته بر روی این نوع از سیستم‌های پیش گرمایش خوراک کوره، باعث شد که از این سیستم بتوان برای پیش گرمایش مخلوط شیشه خرده و مواد اولیه بیج نیز استفاده کرد. نمونه‌ای از این مدل پیش گرمکن نیز در کارخانه PLM کشور آلمان نصب شده است. سیستم مذکور واقع در یک مبدل حرارتی

و پیش گرم کن بچ مواد اولیه بسیار قابل ملاحظه و عبارتند از:

- \* صرفه جویی انرژی به میزان ۲۰-۱۰ درصد
- \* پتانسیل افزایش محصول تولیدی
- \* بهبود عملکرد سیستم بازیافت حرارت اتلافی
- \* کاهش سطح انتشار گازهای آلاینده NOx
- \* کنترل موثر پخش ذرات و غبار

طرح سیستم ترکیبی فیلتر الکترواستاتیکی و پیش گرمکن مواد اولیه بچ بسیار فشرده بوده و تنها نیاز به فضای در حدود ۴×۴×۲۰ متر دارد و بنابراین می توان از این سیستم ها در فضاهای محدود نیز استفاده کرد. یک نمونه از سیستم ترکیبی فوق که برای پیش گرمایش شیشه خرده های بازیافتی طراحی شده بود، با بودجه برنامه THERMIE و تحت ارزیابی های اتحادیه اروپایی در کارخانه شیشه بطری "ایرلند" در شهر دوبلین در سال ۱۹۹۵ نصب گردید. متأسفانه بعدها ارزیابی جامع عملکرد این سیستم بدلیل بروز مشکلات غیرمنتظره ای ناتمام ماند. در سال ۱۹۹۹ شرکت پراکسیر<sup>۳۵</sup> حقوق این طرح را به طور کامل از ادمستون خریداری نمود و اعلام کرد که به تحقیقات و توسعه این سیستم ادامه می دهد.

### بازیافت شیشه های مصرفی

مکانیزم استانداردسازی مصرف انرژی در تولید محصولات شیشه ای تنها محدود به کارخانه و فرآیند تولید نمی شود و در این رابطه لازم است تا کلیه فعالیت هایی که به گونه ای به کاهش مصرف انرژی و رساندن آن به مقدار مرجع بازدهی انرژی در فرآیند تولید محصولات شیشه ای کمک می کنند، در نظر گرفته شوند. برخی از این فعالیت ها مستقیماً برخاسته از حوزه تکنولوژی نبوده و مستلزم سیاست گذارهای مشخص و مدیریت صحیح می باشند.

بازیافت محصولات شیشه های مصرفی یکی از این موارد است. شیشه ماده ای است که بر خلاف سایر مواد مورد استفاده در بسته بندی محصولات، سازگاری خوبی با محیط زیست دارد. شیشه را می توان به صورت نامحدود بازیافت کرده و در چرخه تولید مجدد<sup>۳۶</sup> قرار داد. باز تولید شیشه های بازیافتی، مصرف ویژه انرژی ذوب را تا حد بسیار زیادی کاهش می دهد، چرا که انرژی مورد نیاز برای انجام واکنش های شیمیایی ذوب در دمای بسیار زیاد کوره، به صورت بالقوه در شیشه های بازیافتی وجود دارد. به طور کلی در صورت جایگزینی ۱۰ درصد مواد اولیه خام مصرفی در تولید محصولات شیشه ای با شیشه های بازیافتی، حدود ۲ درصد در انرژی مورد نیاز ذوب صرفه جویی می شود. تدوین برنامه ای برای بازیافت شیشه های مصرفی و استفاده مجدد از آن در چرخه تولید، علاوه بر آنکه یک استراتژی پایدار برای کاهش مصرف انرژی در صنعت شیشه و رعایت استانداردهای وضع شده در این خصوص به شمار

اصلی ابداعی توسط ادمستون، فقط شامل پیش گرمکن شیشه خرده های بازیافتی موسوم به سیستم (Culex) بود. اصلاحات بعدی انجام شده بر روی این سیستم باعث گردید تا پیش گرمکن جداگانه ای نیز موسوم به hexex برای بچ مواد اولیه در نظر گرفته شود.

نحوه عمل سیستم ترکیبی پیش گرم کن مواد و فیلتراسیون الکترواستاتیکی به شرح زیر است، شکل (۷). گازهای داغ اتلافی از قسمت بالای فیلتر داخل شده و از آنجا وارد بخش یونیزاسیون فیلتر می شود. بخش یونیزاسیون شامل الکترودهائیسست که به برق DC با ولتاژ منفی بالا متصل شده اند. در این حالت تخلیه الکتریکی همراه با پدیده کرونا اتفاق می افتد و به این ترتیب تمام ذرات معلق در مدت زمانی به طول چند هزارم ثانیه، بار الکتریکی پیدا می کنند. سپس جریان باردار گازهای داغ اتلافی، از بستر فیلتر که در شکل سنتی آن از مواد گرانولی نظیر دانه های درشت شنی تشکیل شده است، عبور می کند. از سوی دیگر الکترودهایی که در بستر فیلتر به برق ولتاژ بالا متصل هستند، مواد تشکیل دهنده بستر فیلتر را پلازما کرده و به تناوب آنها را با بارهای الکتریکی مثبت و منفی باردار می کند. در این صورت ذرات و غبار موجود در جریان گازهای داغ اتلافی به دلیل اختلاف بار الکتریکی جذب مواد تشکیل دهنده بستر فیلتر شده و بر روی آنها می نشینند. شکل (۸)، طرح شماتیک این سیستم را نشان می دهد.

بدیهی است که در طول زمان و با جذب ذرات و غبار موجود در گازهای اتلافی، مواد تشکیل دهنده بستر فیلتر نیاز به تجدید و تعویض دارند، اما سیستم ترکیبی فیلتراسیون و پیش گرمکن به صورتی طراحی شده است که شیشه خرده های تمیز بازیافتی به طور پیوسته از قسمت بالایی فیلتر وارد شده و به آرامی به سمت پایین آن حرکت می کند. بنابراین بستر فیلتر (شیشه خرده های بازیافتی) همیشه به طور پیوسته و یکنواخت در حال تجدید و احیاء است. شیشه خرده های بازیافتی همزمان با جذب ذرات و غبار، انرژی گرمایی گازهای اتلافی را نیز جذب می کنند. ذرات و غبار جذب شده به شیشه خرده های بازیافتی پس از ترک فیلتر، در معرض جریان هوای خشک و کم فشار قرار گرفته و به سمت یک سیکلون مجهز به جمع کننده غبار<sup>۳۷</sup> انتقال می یابند. درجه حرارت بهینه گازهای اتلافی برای استفاده از این سیستم پیش گرمکن در فرآیند تولید شیشه، حدود ۳۰۰-۲۵۰ C می باشد. در دماهای بالاتر از این محدوده، مقاومت الکتریکی ذرات و غبار موجود در فیلتر به قدری زیاد می شود که تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا به درستی انجام نخواهد شد. حرکت بسیار آرام مواد تشکیل دهنده بستر فیلتر (شیشه خرده های بازیافتی) به سمت پایین باعث می شود که این مواد، برای مدت زمان طولانی در معرض جریان گازهای داغ اتلافی قرار گرفته و لذا انرژی گرمایی گازها را به خوبی دریافت کنند. پتانسیل های به کارگیری سیستم ترکیبی فیلتر الکترواستاتیکی



می آید، مزایای دیگری نیز به شرح زیر در پی خواهد داشت:

- کاهش مصرف مواد خام اولیه.
- کاهش ضایعات حاصل از تولید مواد خام اولیه در معادن.
- کاهش انتشار آلاینده های آب و هوا.
- کاهش انتشار گازهای گلخانه ای.
- کاهش انباشت مواد شیشه ای به صورت زباله.

سیاست بازیافت مواد شیشه ای در کشورهای عضو اتحادیه اروپا با هدف دستیابی به چنین مزایایی در طول دهه گذشته ثمرات بسیاری داشته است. نرخ مصرف محصولات شیشه ای در اروپا از سال ۱۹۹۰ تا سال ۱۹۹۶ سالانه حدود ۲/۵ درصد رشد داشته است. این در حالی است که نرخ بازیافت مواد شیشه ای طی این مدت با رشدی معادل ۷/۵ درصد در سال همراه بوده است. به عبارت دیگر در خلال سال های ۹۶-۱۹۹۰ میزان بازیافت شیشه ای از ۵ میلیون تن در سال به ۷/۴ میلیون تن در سال بالغ گردید که رشد ۵۰ درصدی را نشان می دهد. طی همین مدت مقدار ضایعات مواد شیشه ای به عنوان زباله با کاهش ۱۲ درصدی از ۶/۷ میلیون تن به ۵/۹ میلیون تن رسید. نمودار شکل (۹) روند تغییرات در تولید، بازیافت و دورریز مواد شیشه ای را در خلال سال های ۹۶-۱۹۹۰ در کشورهای عضو اتحادیه اروپایی نشان می دهد.

همان طور که از شکل نیز پیداست در سال ۱۹۹۳، مقدار ضایعات شیشه ای (به عنوان زباله دورریز) با میزان بازیافت مواد شیشه ای برابر شده و از این سال به بعد مقدار مواد شیشه ای بازیافتی همواره بیش از ضایعات دورریز بوده است. چنین روند فزاینده ای در بازیافت مواد شیشه ای و استفاده از آن در چرخه تولید مجدد، نشان از درصد بالای شیشه خرده مصرفی در پیچ مواد اولیه کوره های ذوب صنایع شیشه در این کشورها دارد. شکل (۱۰) نیز مقدار وزنی مواد شیشه ای بازیافتی (برحسب هزارتن) و درصد بازیافت این مواد را در تعدادی از کشورهای اروپایی نشان می دهد.

نکته حائز اهمیت آنست که مقادیر ارائه شده در نمودار شکل (۱۰)، بازیافت مواد شیشه ای از منابع خارجی (ضایعات شیشه ای به عنوان زباله) را نشان می دهد و شامل شیشه خرده های برگشتی از فرآیند تولید (به عنوان منبع داخلی بازیافت) نمی شود. با این توضیح، چنانچه مقادیر بازیافت مواد شیشه ای در کشورهای صنعتی با ایران مقایسه شود، ارقام بازیافت شیشه در ایران معنای بیشتری می یابند. در بررسی کوره های ذوب کارخانجات شیشه کشور مشخص شد که درصد شیشه خرده مصرفی در پیچ مواد اولیه عموماً بین ۱۵ تا ۶۰ درصد در نوسان است. نسبت شیشه خرده مصرفی در پیچ

مواد اولیه تابع پارامترهای بسیار متعددی است و مقدار آن بر حسب شرایط عملکردی در زمان های مختلف تغییر می کند. با این وجود در خوش بینانه ترین حالت، می توان نسبت ۴۰-۳۰ درصدی را به عنوان متوسط مصرف شیشه خرده در کوره های ذوب کشور معرفی کرد. این مقدار درصد استفاده از شیشه خرده بازیافتی در کوره های ذوب شیشه کشور در مقایسه خام و ابتدایی با مقادیر شکل (۱۱)، ایران را در ردیف ضعیف ترین کشورهای اروپایی از لحاظ بازیافت مواد شیشه ای قرار می دهد، اما اگر به این نکته اشاره شود که بخش قابل ملاحظه ای از همین نسبت ۴۰-۳۰ درصدی نیز توسط شیشه خرده های برگشتی از فرآیند تولید تأمین می شود، کشور ما دیگر حتی قابل مقایسه با ضعیف ترین کشورهای اروپایی به لحاظ بازیافت مواد شیشه ای نخواهد بود.

بازیافت مواد شیشه ای با هر هدفی که صورت پذیرد، مستقیماً بر میزان شیشه خرده مصرفی در پیچ مواد اولیه و در نتیجه بر مصرف ویژه انرژی ذوب تأثیر می گذارد. بنابراین یکی از دلایل عمده اختلاف مصرف ویژه انرژی ذوب در ایران و سایر کشورهای صنعتی - برآمده از مسائل غیر فنی - نبود برنامه ای منسجم برای بازیافت شیشه است. تدوین چنین برنامه ای و اجرای مؤثر آن به منظور جمع آوری و بازیافت مواد شیشه ای، بیش از آنکه به بخش صنعت کشور مربوط باشد، نیازمند برنامه ریزی کلان در حوزه مدیریت شهری است. برخی از مهمترین موانع پیش روی بازیافت مؤثر مواد شیشه ای در کشور عبارتند از:

- \* نبود فرهنگ بازیافت مواد در باور توده جامعه.
- \* نبود وسایل و تجهیزات لازم برای جمع آوری مکانیزه و بازیافت مواد.
- \* کیفیت پایین محصولات تولیدی از مواد بازیافتی و بازار کم رونق آن.
- \* عدم آگاهی عمومی نسبت به مخاطرات زیست محیطی.
- \* حجم اندک مواد شیشه ای بازیافتی از مناطق اطراف کارخانه شیشه.
- \* هزینه زیاد حمل مواد بازیافتی از نقاط دور به کارخانه.
- \* آلودگی مواد شیشه ای بازیافتی به مواد پلاستیکی، کاغذ، مواد مورد استفاده در چاپ و....
- \* نبودن قوانین لازم الاجرا و سخت گیرانه به منظور رعایت استانداردهای مصرف انرژی.
- \* هزینه تجهیزات اضافی جهت جداسازی مواد شیشه ای مختلف، شستشو و....
- \* اختلاف رنگ مواد شیشه ای بازیافتی و عدم تناسب آن با مذاب درون کوره ها.

جدول (۱) - مصرف ویژه انرژی در فرایندهای تولید شیشه

میانگین مصرف ویژه انرژی در کشورهای پیشرفته (10 <sup>3</sup> Btu/ton)	حدود مصرف ویژه انرژی در کشورهای پیشرفته (10 <sup>3</sup> Btu/ton)	فرآیند تولید
۰/۶۸	۱/۲ - ۲/۷	فرآیند آماده سازی پیچ
۸/۶	۶/۵ - ۸/۸	فرآیند ذوب و نسجه مذاب
۳/۵	۲/۸ - ۳/۸	شیشه جام
۷/۳	۲/۶ - ۱۲	نسجه مخلوف
۸/۴	۴/۶ - ۱۰/۵	پرسی - معشی
		الیاف شیشه ای <sup>۱</sup>
۱/۵	۱/۵	فرآیند شکل دهی
۴	۴	شیشه جام
۷/۳	۲/۶ - ۱۲	نسجه مخلوف
۸/۴	۴/۶ - ۱۰/۵	پرسی - معشی
		الیاف شیشه ای <sup>۱</sup>
۲/۲	۰/۴ - ۴/۲	فرآیند پس از شکل دهی
۱/۸۶	۱/۸۶	شیشه جام
۳	۳	نسجه مخلوف
۳/۸	۲/۲ - ۴/۴	پرسی - معشی
		الیاف شیشه ای <sup>۱</sup>

۱- مصرف انرژی الکتریکی بر عینای ضریب تبدیل ۳۳۱۲ Btu/KWh وارد شده است

۲- الیاف شیشه ای تولیدی شامل محصولات پشم شیشه الیاف مورد استفاده در سازه ها و فیبرهای نوری می شود

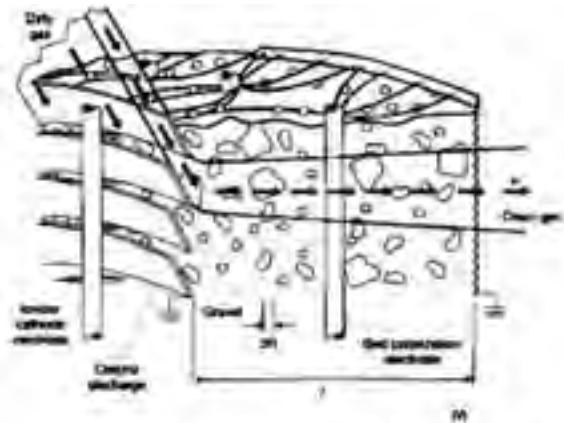




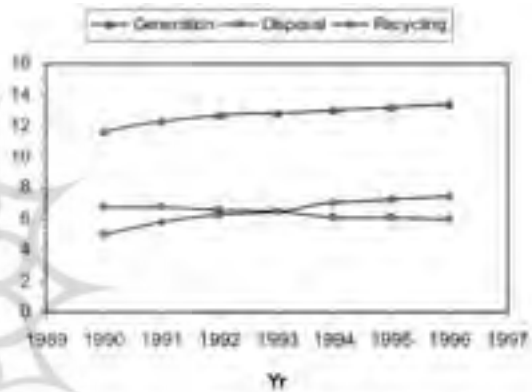
منابع و مراجع

۱. "تعیین معیار مصرف انرژی در صنعت شیشه جام و مطروف"، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۸۳
  ۲. نقشه راهبردی صنعت شیشه کشور، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۸۳
  ۳. "ممیزی انرژی"، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۸۳
  ۴. "بروشور مدیریت انرژی"، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۸۲
1. "Energy and Enviromental Profile of the U.S. Glass Industry", Prepared by ENERGETICS, April 2002
  2. GLASS INDUSTRY, United Nations Industrial Development Organization, 1993
  3. "Glass Industry Technology Roadmap", Glass Manufacturing Industry Council, April 2002
  4. www.iceo.org
  5. www.energy.gov
  6. www.eia.doe.gov

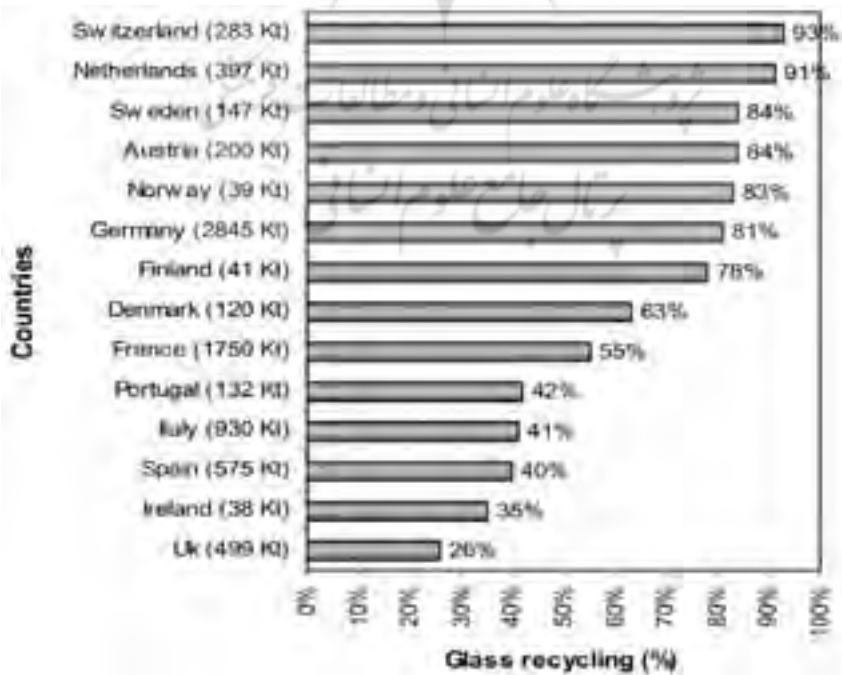
- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| ۱ - Batch Blanket Zone      | ۱۴- Neuenhagen                |
| ۲- Endo thermic             | ۱۵- Zippe                     |
| ۳- Exo thermic              | ۱۶- Vetropack                 |
| ۴- Hot Spots                | ۱۷- Counter flow - Cross flow |
| ۵- Sand Grain               | ۱۸- Vibratory tray feeder     |
| ۶- Solubility               | ۱۹- Collector                 |
| ۷- Diffusion Coefficient    | ۲۰- Modular                   |
| ۸- Fining                   | ۲۱- Bag filter                |
| ۹- Onset Temperature        | ۲۲- Granule bed               |
| ۱۰- Refining                | ۲۳- Edmeston                  |
| ۱۱- Homogenization          | ۲۴- Dust collector            |
| ۱۲- Nienburger Glass and GE | ۲۵- Praxair                   |
| ۱۳- Cross-counter           | ۲۶- Recycle                   |



شکل (۸) جزئیات عملکرد سیستم فیلتراسیون الکتریکی



شکل (۹) روند تولید، بازیافت و دورریز مواد شیشه‌ای در کشورهای عضو اتحادیه اروپایی



شکل (۱۰) مقدار وزنی و درصد مواد شیشه‌ای بازیافتی در تعدادی از کشورهای اروپایی