

آخرین شاخص های مصرف انرژی در صنعت ریخته گری

nergyenergy.ir

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۸.....	فصل اول : ترازبایی ریخته گری
۸.....	۱-۱. شاخص های ترازبایی
۸.....	۱-۱-۱. راندمان فرآیند
۹.....	۱-۱-۱-۱. تلفات ذوب
۹.....	۱-۱-۱-۲. تلفات ناشی از پاشش و سرریز مذاب
۱۰.....	۱-۱-۱-۳. تلفات سیستم راهگاه و تغذیه
۱۰.....	۱-۱-۱-۴. ضایعات و قطعات برگشتی
۱۱.....	۱-۲. راندمان تولید
۱۲.....	۱-۲-۱. زمان توقف
۱۲.....	۱-۲-۲. سرعت کم قالب گیری
۱۳.....	۱-۲-۳. قالب های معیوب
۱۴.....	۱-۳. راندمان ظرفیت
۱۵.....	فصل دوم : شاخص های مربوط به ریخته گری
۱۵.....	۱-۲. مقایسه شاخص های ریخته گری ایران با شاخص های جهانی
۱۹.....	۲-۲. بررسی سهم بخش های مختلف صنعت ریخته گری در مصرف انرژی
۲۱.....	۳-۲. بررسی شاخص های مصرف، دستاوردها و تکنولوژی های نوین در بخش ذوب
۲۱.....	۱-۳-۲. بررسی تنوع کوره های ذوب
۲۵.....	۲-۳-۲. شاخص های مصرف ویژه انرژی ذوب بر اساس نتایج کارخانه های مختلف
۲۷.....	۳-۳-۲. فرآیند ذوب در کوره های کوپل
۲۹.....	۴-۳-۲. فرآیند ذوب در کوره های القایی
۳۲.....	۵-۳-۲. فرآیندهای ذوب دوتایی: ذوب با کوره کوپل + کوره های نگهدارنده القایی
۳۴.....	۶-۳-۲. فرآیندهای نگهداری القایی
۳۴.....	۷-۳-۲. فرآیندهای ذوب قوس الکتریکی
۳۶.....	۴-۲. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری جهان
۳۶.....	۱-۴-۲. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری اروپا و روسیه
۳۷.....	۲-۴-۲. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری آمریکا، ژاپن، هند، چین و کانادا
۳۹.....	۳-۴-۲. مصرف ویژه انرژی در صنایع ریخته گری چدن و فولاد در آمریکا، آلمان، انگلستان، هلند، فنلاند و هند
۴۲.....	۴-۴-۲. مصارف انرژی مربوط به فرآیندهای غیر ذوب
۴۵.....	۵-۲. مقایسه داده های تئوری با عملکردهای موجود
۴۶.....	۶-۲. مقایسه ای بین مصارف کوره های مختلف

فهرست جداول

عنوان

صفحه

جدول ۱-۲. سهم آلیاژهای تولیدی (چدن و فولاد) در اروپا و روسیه [۱] ۱۵

جدول ۲-۲. مقایسه شاخص های عملکرد واحدهای ریخته گری چدن ایران با اروپا و روسیه [۱] ۱۶

جدول ۳-۲. مقایسه شاخص های عملکرد واحدهای ریخته گری فولاد ایران با اروپا و روسیه [۱] ۱۷

جدول ۴-۲. مقایسه شاخص های عملکرد واحدهای ریخته گری چدن - فولاد ایران با اروپا و روسیه [۱] ۱۸

جدول ۵-۲. مقایسه درصد تلفات مذاب (سوخت) با تفکیک نوع کوره ذوب در ریخته گری های چدن و فولاد اروپا و روسیه [۱] ۱۸

جدول ۶-۲. مقایسه درصد تلفات پاشش مذاب با تفکیک نوع کوره ذوب در ریخته گری های چدن و فولاد اروپا و روسیه [۱] ۱۹

جدول ۷-۲. درصد تلفات سیستم راهگامی و تغذیه به وزن مذاب قالب به تفکیک آلیاژ در اروپا و روسیه [۱] ۱۹

جدول ۸-۲. درصد کل ضایعات برگشتی به تفکیک نوع آلیاژ در اروپا و روسیه [۱] ۱۹

جدول ۹-۲. سهم هریک از انواع کوره ها در کارخانه های ریخته گری امریکا (۱۹۹۲) به تفکیک نوع محصول ۲۴

جدول ۱۰-۲. محدوده انرژی ویژه مصرفی فرآیند ذوب در کارخانه های ویسکانسین [۱۰] ۲۶

جدول ۱۱-۲. انرژی مورد نیاز برای ذوب بر حسب نوع محصول (به صورت تئوری) [۱۱] ۲۶

جدول ۱۲-۲. مصرفی ویژه ذوب (KWH/TON) در کوره های الکتریکی به تفکیک چدن و فولاد [۱۲] ۲۶

جدول ۱۳-۲. اطلاعات مربوط به کوره کوپل ، شامل نرخ ذوب ، بهترین عملکرد و مصرف ویژه انرژی [۱۳] ۲۷

جدول ۱۴-۲. مصارف ویژه (KWH/TON) برای چند کارخانه نمونه در امریکا به تفکیک نوع محصول و نوع فرآیند [۱۴] ۲۷

جدول ۱۵-۲. اطلاعات مربوط به کوره القایی، شامل نرخ ذوب، بهترین عملکرد و مصرف ویژه انرژی [۱۳] ۳۰

جدول ۱۶-۲. مصرف ویژه انرژی ذوب متوسط برای کوره های القایی بدون هسته برحسب فرکانس [۱۵] ۳۰

جدول ۱۷-۲. مقایسه رنج مصرف انرژی ویژه ذوب برای کوره های القایی با کک مصرفی در کوره های کوپل ۳۰

جدول ۱۸-۲. اطلاعات مربوط به کوره قوس الکتریکی، شامل نرخ ذوب، مصرف ویژه انرژی و بهترین عملکرد [۱۳] ۳۵

جدول ۱۹-۲. انرژی مصرفی بر حسب کیلو وات ساعت برای یک تن مذاب چدن و فولاد با کوره های قوس و القایی [۱] ۳۶

جدول ۲۰-۲. مقدار انرژی مصرفی برای تولید یک تن قطعه تمام شده انواع فولاد و چدن در ریخته گری های اروپا و روسیه [۱] .. ۳۶

جدول ۲۱-۲. شاخص های عملکرد اروپا و روسیه به تفکیک چدن ریز و فولاد ریز [۱] ۳۷

جدول ۲۲-۲. مصارف ویژه ذوب بر اساس ممیزی کارخانه های کانادایی [۱۵] ۳۸

جدول ۲۳-۲. پتانسیل ذخیره انرژی در کارخانه های ریخته گری چدن و فولاد هند با استفاده از مقایسه با بهترین نتایج جهانی [۱۶] ۳۸

جدول ۲۴-۲. مصارف بخش های غیر ذوب کارخانه های ریخته گری ۴۳

-
- جدول ۲-۲۵. درصد انرژی مصرفی هر بخش بر اساس گزارش کانادایی ۴۴
- جدول ۲-۲۶. مصارف انرژی در بخش های مختلف کارخانه های ریخته گری ۴۵
- جدول ۲-۲۷. مقایسه ای بین نتایج تئوری و داده های عملی مصارف ویژه انرژی بر تن ذوب (KWH/TON) ۴۵
- جدول ۲-۲۸. مقایسه بین مصارف انرژی کوره های کوپل و کوره های القایی [۱۳] ۴۶
- جدول ۲-۲۹. مقایسه مصارف ویژه انرژی برای کوره های مختلف [۱۹] ۴۷
- جدول ۲-۳۰. مقایسه کوره های مختلف از نظر تلفات و بازده حرارتی [۱۲] ۴۷

energyenergy.ir

فهرست شکل ها

عنوان

- شکل ۲-۱. سهم بخش های مختلف در فرآیند ریخته گری [۵] ۲۰
- شکل ۲-۲. سهم انرژی مصرفی فرآیندهای مختلف در کارخانه های ریخته گری [۷] ۲۱
- شکل ۲-۳. سهم تولید هر یک از کوره های فسیلی و الکتریکی در تعدادی از کشورهای اروپایی در سال ۱۹۹۶ [۸] ۲۲
- شکل ۲-۴. سهم هر یک از منابع انرژی در تامین انرژی مصرفی در کارخانه های ریخته گری امریکا [۹] ۲۳
- شکل ۲-۵. سهم هر یک از کوره ها در ریخته گری چدن در امریکا ۲۳
- شکل ۲-۶. سهم انواع کوره های الکتریکی در کارخانه های فولادریز [۱۰] ۲۴
- شکل ۲-۷. شماتیک از بقای انرژی در کوره های ذوب [۱۱] ۲۵
- شکل ۲-۸. مصرف ویژه ذوب در کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و نشکن با کوره کوپل [۱۰] ۲۸
- شکل ۲-۹. نمودار مصرف ویژه ذوب بر حسب MBTU/TON (محور عمودی) به ازای بازده فرآیند (محور افقی) [۱۰] ۲۸
- شکل ۲-۱۰. مصرف ویژه ذوب برای کارخانه های تولید کننده چدن چکش خوار با کوره کوپل [۱۰] ۲۹
- شکل ۲-۱۱. مصرف ویژه ذوب در کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری با کوه القایی [۱۰] ۳۱
- شکل ۲-۱۲. مصرف ویژه ذوب در کارخانه های تولید کننده فولاد با کوره القایی [۱۰] ۳۱
- شکل ۲-۱۳. انرژی ویژه ذوب مصرفی در کوره های القایی از سال ۱۹۵۰ تا سال ۱۹۹۰ در کارخانه های ریخته گری امریکا [۱۶] ... ۳۲
- شکل ۲-۱۴. مصرف ویژه به ازای تن محصول (محور عمودی) کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و نشکن ۳۳
- شکل ۲-۱۵. مصارف ویژه ذوب برای کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و نشکن ۳۴
- شکل ۲-۱۶. مصارف ویژه ذوب برای کارخانه های تولید کننده چدن چکش خوار که از فرآیندهای دوتایی استفاده می کنند ۳۴
- شکل ۲-۱۷. مصرف ویژه انرژی ذوب کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و شکل پذیر برای کوره های القایی ۳۴
- شکل ۲-۱۸. مصرف ویژه کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری با استفاده از کوره قوس [۱۰] ۳۵
- شکل ۲-۱۹. مصرف ویژه ذوب برای کارخانه های تولید کننده فولاد با کوره قوس الکتریک [۱۰] ۳۵
- شکل ۲-۲۰. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری فولاد آمریکا، ژاپن، هند و چین [۱۴] ۳۷
- شکل ۲-۲۱. مقدار مصرف ویژه انرژی فولاد برای ایالات متحده آمریکا در نیم قرن گذشته [۱۷] ۳۹
- شکل ۲-۲۲. روند کاهش مصرف انرژی ویژه فولاد خام در آلمان، بر حسب انرژی مصرفی به فولاد تولید شده (GJ/T) ۳۹
- شکل ۲-۲۳. روند کاهش مصرف انرژی ویژه در صنایع فولاد انگلستان بر حسب انرژی مصرفی به فولاد تولید شده (GJ/T) ۴۰
- شکل ۲-۲۴. میزان مصرف انرژی ویژه در صنایع فولاد هلند بر حسب انرژی مصرفی به تن تولید در کوره های قوس الکتریکی ۴۰
- شکل ۲-۲۵. روند میزان مصرف انرژی ویژه در شرکت فولاد روکی راهه فنلاند بر حسب انرژی مصرفی به تن تولیدی ۴۱

-
- شکل ۲-۲۶. مصرف ویژه انرژی صنعت ریخته‌گری فولاد در ده سال در کشور هند [۳]..... ۴۱
- شکل ۲-۲۷. شاخص مصرف انرژی در کارخانه SAIL واقع در کشور هند برای تولید فولاد به روش ریخته‌گری [۳] ۴۲

energyenergy.ir

چکیده

در فصل اول این گزارش به توضیح در مورد شاخص های ترازیبی در صنعت ریخته گری پرداخته شده است. سه شاخص ترازیبی در صنعت ریخته گری عبارتند از راندمان فرآیند، راندمان تولید و راندمان ظرفیت که در فصل اول مورد بررسی قرار می گیرد. شایان ذکر است پارامتر مربوط به مصرف انرژی نیز جزء شاخص های ترازیبی می باشد که در فصل دوم به تفصیل به آن پرداخته می شود. علاوه بر این در این فصل با به کارگیری یک مطالعه گسترده از تمامی اطلاعات مفید و قابل دسترس موجود، آخرین شاخص های ریخته گری در کشورهای مختلف دنیا جمع آوری شده اند و مقایسه ای بین شاخص های موجود در کشور با کشورهای که در این زمینه پیشرو هستند انجام گرفته است.

فصل اول

ترازیابی ریخته گری

با توجه به سهم قابل توجه کارخانه های ریخته گری در مصارف انرژی و ظرفیت های موجود برای افزایش بهره وری مصرف انرژی در این کارخانه ها، تلاش های جهانی فراوانی در جهت ارزیابی و ارائه شاخص های مصرف انرژی در این بخش انجام شده است. البته نظر به تنوع روش های موجود در ریخته گری و انواع فلزات مورد استفاده در آن، نیاز به گردآوری جداگانه داده های مربوط به هر بخش است تا بتوان شاخص های مناسب برای هر بخش را به تفکیک ارائه نمود. لذا می بایست با به کارگیری یک مطالعه گسترده کتابخانه ای / اینترنتی از تمامی اطلاعات مفید و قابل دسترس موجود در جهت ارائه آخرین شاخص های جهانی مصرف انرژی در کارخانه های ریخته گری، استفاده شود.

۱-۱. شاخص های ترازیابی

سه شاخص ترازیابی در صنعت ریخته گری عبارتند از:

(۱) راندمان فرآیند

(۲) راندمان تولید

(۳) راندمان ظرفیت

در ادامه به توضیح این شاخص ها پرداخته شده است. شایان ذکر است پارامتر مربوط به مصرف انرژی نیز جزء شاخص های ترازیابی می باشد که در فصل دوم به تفصیل به آن پرداخته می شود.

۱-۱-۱. راندمان فرآیند^۱

یکی از شاخص های کلیدی عملکرد در ترازیابی صنایع ریخته گری، راندمان فرآیند می باشد. راندمان فرآیند از بالانس جرم فرآیند تولید بدست می آید. در واقع راندمان فرآیند برابر است با مقدار قطعات ریخته گری فروخته شده، که به صورت درصدی از مواد خام فلزی ورودی به کوره بیان می شود. این پارامتر میزان استفاده کارخانه از مواد خام ورودی را نشان می دهد [۱،۲،۳].

از جمله پارامترهای مؤثر در راندمان فرآیند می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. تلفات ذوب^۲

۲. تلفات ناشی از پاشش و سرریز مذاب^۳

¹ Process Yield

² Melting Loss

³ Pig and Spillage

۳. تلفات سیستم راهگاه و تغذیه^۱

۴. ضایعات و قطعات برگشتی^۲

راندمان فرآیند، از رابطه (۱) بدست می آید:

$$(1) \quad \left(\frac{\text{تلفات ضایعات و برگشتی}}{100} \left(1 - \frac{\text{تلفات راهگاه و تغذیه}}{100} \right) \right) * \left(1 - \frac{\text{تلفات پاشش و سرریز}}{100} \right) * \left(1 - \frac{\text{تلفات ذوب}}{100} \right) * 100 = \text{راندمان فرآیند}$$

لازم به ذکر است که کلیه پارامترهای فوق بر حسب درصد می باشند. در ادامه به توضیح پارامترهای مؤثر در راندمان فرآیند پرداخته شده است.

الف- تلفات ذوب

این تلفات شامل موادی است که در حین فرآیند ذوب به صورت تلفات خارج می شوند و به صورت درصدی از مواد فلزی شارژ شده به کوره های ذوب بیان می شود. تلفات ذوب را می توان به دو بخش تقسیم نمود:

- ✓ تلفات ضروری جهت حصول ترکیب شیمیایی و خواص مورد نظر
- ✓ تلفات ناخواسته بدلیل کیفیت پایین مواد اولیه، فرآیند و تکنولوژی
- تلفات ذوب بر مصرف مواد اولیه و مصرف انرژی تأثیر گذار است. موارد زیر بر تلفات ذوب تأثیر بسزایی دارند:
 - ✓ کیفیت مواد شارژ
 - ✓ ترکیب مواد شارژ
 - ✓ زمان و درجه حرارت نگهداری ذوب
 - ✓ انتخاب غلط نسوز کوره ذوب
 - ✓ کنترل ضعیف ترکیب شیمیایی سرباره
 - ✓ تجهیزات ذوب نامناسب

ب- تلفات ناشی از پاشش و سرریز مذاب

این تلفات، مذابی است که هنگام تخلیه ی کوره و بارریزی به قالب، سرریز یا پاشش کرده و به صورت درصدی از مذاب تخلیه شده بیان می شود. لازم به ذکر است که حدود ۵ تا ۱۰ درصد تلفات ناشی از پاشش، قابلیت بازیافت ندارد و حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد تلفات ناشی از پاشیدن مذاب قابل بازیابی است. اما باید توجه کرد که برای بازیابی :

- ✓ تلفات بیشتری در هنگام ذوب این ضایعات به وجود خواهد آمد.
- ✓ انرژی بیشتری برای ذوب باید صرف شود.
- ✓ ظرفیت ذوب و نیروی کار در بخش ذوب باید افزایش یابد.
- ✓ اگر بخش ذوب، گلوگاه تولید باشد ظرفیت کارخانه و نیروی کار باید افزایش یابد.

¹ Runners and Risers

² Scrap Casting and Rejects

تلفات ناشی از پاشیدن مذاب با توجه به موارد زیر متغیر است:

✓ نوع فرآیند ذوب

✓ نوع تکنولوژی قالب گیری: در روش قالب گیری دستی باید همواره مقداری مذاب اضافی برای اطمینان از پر شدن قالب در نظر گرفته شود.

دلایل بروز تلفات بیش از اندازه ذوب در اثر پاشیدن عبارتند از:

✓ آنالیز غلط مذاب

✓ درجه حرارت اشتباه مذاب در پاتیل

✓ توقف خط قالب گیری پس از تخلیه ی کوره

✓ طرح تولید آسیب پذیر و شکننده

✓ تکنولوژی بارریزی نامناسب

ج- تلفات سیستم راهگاه و تغذیه

همواره بخشی از مذابی که برای تولید قطعات ریخته گری به داخل قالب ریخته می شود، در سیستم راهگاه و تغذیه باقی می ماند، که تلفات سیستم راهگاه و تغذیه نام دارد و به صورت درصدی از مذاب ورودی به قالب بیان می شود.

تلفات ناشی از سیستم راهگاهی و تغذیه بر اساس موارد ذیل تغییر می یابد :

✓ نوع مواد و آلیاژ ریختگی

✓ نوع محصول

✓ نوع فرآیند (سختی و صلب بودن قالب)

✓ شکل قطعه (مدول) و پیچیدگی آن

د- ضایعات و قطعات برگشتی

این تلفات شامل قطعات قراضه¹ کارخانه و قطعاتی است که از طرف خریدار برگشت داده شده اند و به صورت درصدی از وزن قطعات ناخالص² تولید شده بیان می شود.

دلایل گوناگون برای افزایش ضایعات و قطعات برگشتی وجود دارد که عموماً عبارتند از:

✓ کنترل ناکافی فرآیند

✓ اشتباه متالورژیکی

✓ مشکلات مرتبط با ماسه

✓ طراحی قطعات ریختگی

¹ Scrap casting

² Gross casting

✓ فرآیند تولید غلط

لازم به ذکر است که راندمان فرآیند برای جامعه آماری مورد نظر از رابطه (۱) محاسبه شده است. برای اثبات درستی رابطه (۱)، معادل پارامترهای تلفات ذوب، تلفات پاشش و سرریز، تلفات راهگاه و تلفات ضایعات و برگشتی (با توجه به تعاریف مذکور) جایگزین شده است. در نتیجه رابطه (۱) معادل است با:

$$(2) \quad \text{راندمان فرآیند} = \left(\frac{\text{جرم قطعات سالم}}{\text{جرم کل قطعات}} \right) * \left(\frac{\text{جرم کل قطعات}}{\text{مذاب ورودی به قالب}} \right) * \left(\frac{\text{مذاب ورودی به قالب}}{\text{مذاب تخلیه شده}} \right) * \left(\frac{\text{جرم مذاب}}{\text{مواد ورودی به کوره}} \right)$$

با ساده کردن عبارات هم ارز، راندمان فرآیند برابر خواهد بود با :

$$(3) \quad \text{راندمان فرآیند} = \frac{\text{جرم قطعات سالم}}{\text{مواد ورودی به کوره}}$$

همان طور که در این رابطه مشاهده می شود، راندمان فرآیند نشان دهنده مقدار قطعات ریخته گری نهایی می باشد که به صورت درصدی از مواد ورودی به کوره بیان می شود.

 ۱-۱-۲. راندمان تولید^۱

یکی دیگر از شاخص های کلیدی عملکرد در ترازبایی صنایع ریخته گری، راندمان تولید می باشد. راندمان تولید نشان دهنده زمان استفاده شده برای تولید محصول نهایی است که به صورت درصدی از کل زمان عملیات بیان می شود [۱،۲،۳].

از جمله عوامل مؤثر در راندمان تولید به موارد زیر می توان اشاره کرد:

۱. زمان توقف^۲
 ۲. زمان کار با سرعت کم^۳
 ۳. قالب های معیوب^۴
 ۴. ضایعات ریخته گری و برگشتی ها
- راندمان تولید، از رابطه (۴) بدست می آید:

$$(4) \quad \text{راندمان تولید} = 100 * \left(\frac{\text{تلفات ضایعات و برگشتی}}{100} \right) * \left(\frac{\text{قالب معیوب های}}{100} \right) * \left(\frac{\text{زمان کار با سرعت کم}}{100} \right) * \left(\frac{\text{زمان توقف}}{100} \right)$$

لازم به ذکر است که کلیه پارامترهای فوق بر حسب درصد می باشند.

پارامتر ضایعات ریخته گری و برگشتی ها در بخش راندمان فرآیند توضیح داده شد، در ادامه به توضیح دیگر پارامترهای مؤثر در راندمان تولید پرداخته شده است.

¹ Production Efficiency or Overall Equipment Efficiency (OEE)

² Down Time

³ Slow Running

⁴ Bad moulds and Scrap casting

الف- زمان توقف

زمان توقف نشان دهنده زمانی است که قالب گیری انجام نشده (متوقف بوده) و به صورت درصدی از کل زمان عملیات^۱ بیان می شود.

تلفات و هدر رفت متناسب با تکنولوژی قالب گیری متغیر است:

✓ قالب گیری دستی: به علت اینکه تجهیزات مورد استفاده در این فرآیند از پیچیدگی کمتری برخوردارند توقف تولید کمتر بروز می نماید.

✓ قالب گیری ماشینی: به علت حجم گسترده تر استفاده از تجهیزات، زمان توقف در این نوع قالب گیری بیشتر اتفاق می افتد.

✓ قالب گیری اتوماتیک: این خطوط با خطر توقف مواجه هستند و نیاز به وجود یک سیستم هشدار دهنده و یک برنامه ی سازمان یافته تعمیر و نگهداری دارند.

دلایل توقف های اضافی در خطوط قالب گیری عبارتند از:

✓ توقف های الکتریکی و مکانیکی

✓ انتظار و توقف برای مذاب و یا ماسه در خط

✓ تغییرات زیاد مدل

✓ ناکارآمدی های فرآیندی یا سازمانی

✓ برنامه ریزی ضعیف

ب- سرعت کم قالب گیری

در صورتی که کارخانه در زیر ظرفیت مورد نظر کار کند، سرعت عملیات قالب گیری کمتر از سرعت قالب گیری در ظرفیت مورد نظر خواهد بود. تلفات ناشی از این سرعت کم، تلفات سرعت کم قالب گیری نامیده شده که به صورت درصدی از زمان کاری (زمان کاری = کل زمان عملیات - زمان توقف) بیان می شود.

این شاخص بیانگر تلفات زمانی ناشی از عملکرد پایین تر از ظرفیت طراحی، حین فرآیند قالب گیری است که به صورت درصدی از زمان کاری بیان می شود.

تلفات ناشی از سرعت پایین قالب گیری به تکنولوژی قالب گیری وابسته است:

✓ قالب گیری دستی: سرعت در قالب گیری دستی توسط نیروی کار کنترل شده و سرعت تولید می تواند به راحتی به کمتر از میزان استاندارد افت نماید.

✓ قالب گیری ماشینی و اتوماتیک: سرعت قالب گیری توسط ماشین آلات، کنترل شده که می تواند توسط اپراتور کاهش یافته و یا متوقف گردد.

¹ Total time available for production

دلایل افزایش در سرعت کم قالب گیری عبارتند از :

۱. دشوار بودن قطعه ریختگی برای قالب گیری در یک خط ماشینی نرمال
۲. وجود یک سری از توقف های کوچک و عدم ثبت آنها در زمان های توقف
۳. انجام عملیات و کارهای غیر هماهنگ با فرآیند قالب گیری
۴. زمان های طولانی بارریزی برای قطعات سنگین
۵. سرپرستی ضعیف

ج- قالب های معیوب

این پارامتر نشان دهنده تعداد قالب هایی است که ساخته شده اما به دلیل معیوب بودن مورد استفاده قرار نگرفته اند. این پارامتر به صورت درصدی از کل قالب های ساخته شده بیان می شود. به عبارت دیگر این پارامتر نشان دهنده نسبت زمان صرف شده برای تولید قالب های معیوب به زمان تولید کل قالب ها می باشد (بر حسب درصد). کاهش درصد قالب های معیوب در عملکرد ریخته گری باعث افزایش تولید خالص قطعات ریختگی تولید شده در یک دوره ی زمانی می شود، که در نتیجه:

- بهره وری نیروی کار افزایش می یابد.
- راندمان ظرفیت، بهبود می یابد.
- در مصرف ماهیچه هایی که در قالب های معیوب استفاده شده صرفه جویی می شود.

هدر رفت ناشی از قالب های معیوب برای تکنولوژی های قالب گیری مختلف متفاوت است:

- ✓ قالب گیری دستی: برخی از قالب های معیوب قابل تعمیر می باشند.
- ✓ قالب گیری ماشینی و اتوماتیک: معمولاً نمی توان برای تعمیر قالب، خط را متوقف نمود و فقط عیوب جزئی قابل ترمیم می باشند.

دلایل افزایش ضایعات قالب عبارتند از :

- شرایط ماسه استفاده شده
- شرایط مدل مورد استفاده
- مشکلات در تنظیمات ماشین قالب گیری (عدم انطباق دو لنگه قالب)
- قالب های بارریزی نشده

برای اثبات درستی رابطه (۴)، معادل پارامترهای زمان توقف، زمان کار با سرعت کم، قالب های معیوب و تلفات ضایعات و برگشتی^۱ (با توجه به تعاریف مذکور) در رابطه جایگزین شده است. در نتیجه رابطه (۴) معادل خواهد بود با:

^۱ لازم به ذکر است که پارامتر ضایعات و برگشتی را می توان به صورت نسبت زمان صرف شده برای تولید قطعات معیوب به زمان تولید کل قطعات نیز بیان نمود.

$$(5) \quad \text{راندمان تولید} = \left(\frac{\text{زمان تولید قطعات سالم}}{\text{زمان تولید کل قطعات}} \right) * \left(\frac{\text{زمان تولید قالب های سالم}}{\text{زمان تولید کل قالب ها}} \right) * \left(\frac{\text{زمان کاری خالص}}{\text{کل زمان عملیات}} \right) * \left(\frac{\text{زمان کاری}}{\text{کل زمان عملیات}} \right)$$

با توجه به این که زمان کاری خالص (زمان کاری - تلفات زمان ناشی از سرعت کم) معادل زمان تولید کل قالب ها و زمان تولید قالب های سالم معادل زمان تولید کل قطعات می باشد، بنابراین با ساده کردن عبارات هم ارز، راندمان تولید برابر خواهد بود با :

$$(6) \quad \text{راندمان تولید} = \frac{\text{زمان تولید قطعات سالم}}{\text{کل زمان عملیات}}$$

همان طور که در این رابطه مشاهده می شود، راندمان تولید نشان دهنده زمان استفاده شده برای تولید محصول نهایی می باشد که به صورت درصدی از کل زمان عملیات بیان می شود.

۱-۱-۳. راندمان ظرفیت^۱

راندمان ظرفیت برابر است با راندمان تولید کارخانه با فرض بر این که ساعت کارکرد کارخانه به ۲۴ ساعت در ۳۶۵ روز سال افزایش یابد. راندمان ظرفیت از رابطه (۷) بدست می آید [۴] :

$$(7) \quad \text{راندمان ظرفیت} = \left(\frac{\text{زمان کار کارخانه}}{۲۴ * ۳۶۵} \right) * \text{راندمان تولید}$$

دلایل پایین بودن راندمان ظرفیت عبارتند از:

- ✓ پایین بودن اثر بخشی کلی تجهیزات (OEE)
- ✓ سفارشات ناکافی
- ✓ محدودیت دسترسی به برق
- ✓ مصرف بالای برق در ساعت های پیک

¹ Capacity Utilisation or Total Effective Equipment Performance (TEEP)

فصل دوم

شاخص های مربوط به صنعت ریخته گری

انرژی در کنار مواد اولیه یکی از مهمترین عوامل در هزینه های فرآیند ریخته گری است. پارامتر مصرف انرژی به دو صورت می تواند مورد بررسی قرار گیرد [۴-۱]. اولاً انرژی مصرف شده برای ذوب که این پارامتر نشان دهنده انرژی است که برای تولید یک تن ذوب (kwh/ton melted) مصرف شده است و مقدار آن برابر است با انرژی مصرفی کوره (kwh) تقسیم بر تن مذاب (ton melted) تولید شده. این شاخص مصرف ویژه ذوب نامیده می شود. دلایل افزایش مصرف انرژی در ذوب عبارتند از نگهداری مذاب برای زمان های طولانی، تجهیزات قدیمی و راندمان پایین الکتریکی، فرآیندهای از رده خارج برای ذوب (مانند استفاده از کوره های قوس)، و پایین بودن دانسیته توان^۱ (توان ورودی به ظرفیت کوره) برای برخی از کوره ها و طولانی شدن فاصله ذوب ها (به خصوص در کوره قوس). ثانیاً کل انرژی مصرف شده در کارخانه که این پارامتر نشان دهنده کل انرژی مصرفی کارخانه می باشد که برای تولید یک تن محصول نهایی (kwh/ton of good quality casting) مصرف شده و مصرف ویژه انرژی کلی کارخانه نامیده می شود.

دلایل مصرف بالای انرژی در ریخته گری عبارتند از: استفاده از تجهیزات ذوب با بهره وری پایین، سیکل های طولانی عملیات حرارتی، سیستم های گرمایش و تهویه هوا با بهره وری پایین و در نهایت آگاهی کم از پایین بودن بهره وری در مصرف انرژی

۱-۲. مقایسه شاخص های ریخته گری ایران با شاخص های جهانی

در جدول ۱-۲ به طور خلاصه ساختار جامعه آماری ایران را از نظر خانواده آلیاژی واحدها در مقایسه با نمونه اطلاعات اروپا و روسیه نشان می دهد [۱].

جدول ۱-۲. سهم آلیاژهای تولیدی (چدن و فولاد) در اروپا و روسیه [۱]

آلیاژ تولیدی	ایران ۲۰۰۸-۲۰۰۹	اروپا ۲۰۰۷-۲۰۰۸	روسیه ۲۰۰۸
چدن خاکستری	٪ ۳۹/۹	٪ ۵۰	٪ ۸۴
چدن نشکن	٪ ۲۳/۹	٪ ۳۰	-
چدن آلیاژی	٪ ۱۰/۱	-	-
فولاد	٪ ۲۶/۱	٪ ۲۰	٪ ۱۶

^۱ Power Density=kwh/ton

در جدول ۲-۲ تا جدول ۴-۲ مقایسه شاخص های عملکرد واحدهای ریخته گری چدن، فولاد و چدن- فولاد ایران با اروپا و روسیه ارائه شده است.

جدول ۲-۲. مقایسه شاخص های عملکرد واحدهای ریخته گری چدن ایران با اروپا و روسیه [۱]

واحدهای تولید کننده چدن						شاخص های عملکرد	
ایران		روسیه		اروپا			
میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه		
۶۳/۹	۸۰/۶	۵۲/۵	۶۴/۶	۶۴/۲	۶۹/۱	راندمان فرآیند %	1
۹/۰	۲/۰	۴/۱	۲	۲	۱	تلفات ذوب %	
۳/۸	۱/۵	۲/۹	۱/۶	۲/۴	۱/۹	پاشش مذاب %	
۲۱/۰	۱۰/۰	۳۹/۲	۳۱/۳	۳۰/۹	۲۷/۸	تغذیه و راهگاہ %	
۷/۳	۲/۰	۷/۲	۲/۳	۲/۹	۱/۶	برگشتی و ضایعات %	
۵۴/۵	۸۷/۵	۴۴/۱	۸۵/۹	۷۷/۹	۸۱/۹	راندمان تولید %	2
۳۱/۶	۳/۰	۲۳/۸	۴/۱	۱۴/۳	۱۱/۹	زمان توقف %	
۱۰/۹	۰/۰	۳۵/۱	۸	۵/۲	۴/۶	زمان کار با سرعت کم %	
۳/۹	۰/۰	۴	۰/۵	۱/۳	۱	ضایعات قالب %	
۷/۳	۲/۰	۷/۲	۲/۳	۲/۹	۱/۶	ضایعات و برگشتی %	
۱۵/۶	۶۹/۷	۲۲/۳	۳۵/۷	۵۶/۳	۸۶/۳	راندمان ظرفیت %	3
۹۷۱	۴۵۷	۱۱۱۸	۸۰۷	۵۷۱	۵۵۸	مصرف ویژه انرژی ذوب (kwh/ton)	4
۶۰۲۶	۱۱۲۰	۴۲۳۵	۳۰۱۴	۱۳۳۸	۱۱۶۵	مصرف ویژه انرژی کل (kwh/ton)	

همان طور که در این جدول مشاهده می گردد، تلفات ذوب و تلفات زمان توقف واحدهای ریخته گری چدن ایران نسبت به اروپا و روسیه بیشتر و راندمان ظرفیت کمتر آن می باشد. همچنین مصرف ویژه انرژی کل برای واحدهای ریخته گری چدن ایران بیشتر از اروپا و روسیه می باشد. بنابراین واحدهای ریخته گری چدن ایران در زمینه تلفات ذوب و تلفات زمان توقف، راندمان ظرفیت و مصرف انرژی، پتانسیل بهبود دارند.

جدول ۲-۳. مقایسه شاخص های عملکرد واحدهای ریخته گری فولاد ایران با اروپا و روسیه [۱]

واحدهای تولید کننده فولاد						شاخص های عملکرد	
ایران		روسیه		اروپا			
میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه		
۵۶/۷	۵۸/۹	۵۱/۶	۷۱	۴۵/۳	۴۹/۵	راندمان فرآیند %	1
۵/۶	۲	۵/۸	۴/۳	۷/۱	۴/۹	تلفات ذوب %	
۲/۷	۱	۴/۷	۱/۹	۵	۴	پاشش مذاب %	
۳۵/۰	۳۵/۰	۳۹/۵	۲۳	۴۶	۴۳/۵	تغذیه و راهگاه %	
۵/۰	۵/۰	۵	۱/۷	۵	۳/۸	برگشتی و ضایعات %	
۶۶/۶	۸۴/۰	۶۳/۲	۹۰/۱	۷۵/۱	۷۸/۷	راندمان تولید %	2
۱۹/۵	۳	۱۹/۱	۶/۲	۱۴	۱۲	زمان توقف %	
۹	۰/۰	۱۵/۳	۱/۶	۷/۵	۶/۸	زمان کار با سرعت کم %	
۲/۸	۰/۰	۲/۹	۰/۶	۰/۵	۰/۳	ضایعات قالب %	
۵	۵	۵	۱/۷	۵	۳/۸	ضایعات و برگشتی %	
۴۰/۴	۸۱/۹	۳۴/۲	۶۹/۵	۴۴/۸	۵۰/۲	راندمان ظرفیت %	3
۸۹۲	۵۳۸	۱۳۱۰	۶۸۶	۵۲۵	۵۰۰	مصرف ویژه انرژی ذوب (kwh/ton)	4
۲۸۸۶	۱۰۲۸	۵۳۵۹	۳۶۰۴	۱۸۱۵	۱۵۰۳	مصرف ویژه انرژی کل (kwh/ton)	

پارامترهای مورد بررسی، برای واحدهای ریخته گری فولاد ایران در مقایسه با اروپا و روسیه تفاوت چندانی ندارد.

این مسئله نشان دهنده مناسب بودن عملکرد واحدهای ریخته گری فولاد در ایران می باشد.

جدول ۲-۴. مقایسه شاخص های عملکرد واحدهای ریخته گری چدن- فولاد ایران با اروپا و روسیه [۱]

شاخص های عملکرد						واحدهای تولید کننده چدن- فولاد					
		اروپا		روسیه		ایران					
		بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین		
1	راندمان فرآیند %	۶۴/۱	۵۹/۴	۶۶/۲	۵۲/۳	۶۶/۱	۵۹/۶	راندمان فرآیند %	۶۴/۱	۵۹/۴	۶۶/۲
	تلفات ذوب %	۱/۹	۳/۲	۲/۶	۴/۵	۲/۰	۵/۳	تلفات ذوب %	۱/۹	۳/۲	۲/۶
	پاشش مذاب %	۲/۴	۳	۱/۷	۳/۳	۲/۰	۳	پاشش مذاب %	۲/۴	۳	۱/۷
	تغذیه و راهگاه %	۳۱/۵	۳۴/۵	۲۹/۳	۳۹/۳	۲۰/۰	۲۹/۳	تغذیه و راهگاه %	۳۱/۵	۳۴/۵	۲۹/۳
	برگشتی و ضایعات %	۲/۱	۳/۴	۲/۲	۶/۷	۰/۷	۸/۰	برگشتی و ضایعات %	۲/۱	۳/۴	۲/۲
2	راندمان تولید %	۸۱/۱	۷۷/۳	۸۶/۹	۴۸/۴	۸۰/۱	۵۶/۲	راندمان تولید %	۸۱/۱	۷۷/۳	۸۶/۹
	زمان توقف %	۱۱/۹	۱۴/۲	۴/۶	۲۲/۷	۴	۲۰/۸	زمان توقف %	۱۱/۹	۱۴/۲	۴/۶
	زمان کار با سرعت کم %	۵/۱	۵/۷	۶/۵	۳۰/۳	۰/۰	۲۰/۹	زمان کار با سرعت کم %	۵/۱	۵/۷	۶/۵
	ضایعات قالب %	۰/۸	۱/۱	۰/۵	۳/۸	۰/۰	۱/۸	ضایعات قالب %	۰/۸	۱/۱	۰/۵
	ضایعات و برگشتی %	۲/۱	۳/۴	۲/۲	۶/۷	۰/۷	۸/۰	ضایعات و برگشتی %	۲/۱	۳/۴	۲/۲
3	راندمان ظرفیت %	۶۳/۹	۵۳/۵	۴۳/۶	۵۲/۲	۷۳/۵	۳۵/۵	راندمان ظرفیت %	۶۳/۹	۵۳/۵	۴۳/۶
	مصرف ویژه انرژی ذوب (kwh/ton)	۵۴۴	۵۶۰	۷۷۹	۱۱۶۴	۵۳۶	۷۹۶	مصرف ویژه انرژی ذوب (kwh/ton)	۵۴۴	۵۶۰	۷۷۹
4	مصرف ویژه انرژی کل (kwh/ton)	۱۲۴۷	۱۴۵۳	۳۱۵۵	۴۵۰۶	۷۱۶	۱۹۸۲	مصرف ویژه انرژی کل (kwh/ton)	۱۲۴۷	۱۴۵۳	۳۱۵۵

پارامترهای مورد بررسی، برای واحدهای ریخته گری چدن- فولاد ایران در مقایسه با اروپا و روسیه تفاوت چندانی ندارد. این مسئله نشان دهنده مناسب بودن عملکرد واحدهای ریخته گری چدن- فولاد در ایران می باشد. در جدول ۲-۵ تلفات ذوب و در جدول ۲-۶ میزان درصد تلفات ناشی از پاشش مذاب آلیاژهای آهنی بر مبنای نوع کوره برای کل آلیاژهای آهنی در اروپا و روسیه ارائه شده است.

جدول ۲-۵. مقایسه درصد تلفات مذاب (سوخت) با تفکیک نوع کوره ذوب در ریخته گری های چدن و فولاد اروپا و روسیه [۱]

تلفات ناشی از ذوب (سوخت) %	اروپا		روسیه	
	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین
کوره القایی	۱	۲	۱-۳	۱/۴-۷/۷
کوره کوپل	۱	۴	۲/۸-۵	۲/۸-۹
کوره قوس	۴-۵	۵-۷/۵	۴/۲-۵/۶	۴/۳-۹/۲

جدول ۲-۶. مقایسه درصد تلفات پاشش مذاب با تفکیک نوع کوره ذوب در ریخته‌گری‌های چدن و فولاد اروپا و روسیه [۱]

روسیه		اروپا		تلفات ناشی پاشش مذاب %
میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	
۱/۵ - ۶	۱ - ۴/۸	۲/۵ - ۵	۱/۶ - ۴	کوره القایی
۱/۵ - ۶	۱ - ۴/۸	۲/۵ - ۵	۱/۶ - ۴	کوره کوپل
۲/۴ - ۹/۱	۱ - ۵	۵	۴	کوره قوس

درصد تلفات سیستم راهگامی و تغذیه به وزن مذاب قالب به تفکیک نوع چدن و فولاد در جدول ۲-۷ ارائه شده است.

جدول ۲-۷. درصد تلفات سیستم راهگامی و تغذیه به وزن مذاب قالب به تفکیک آلیاژ در اروپا و روسیه [۱]

روسیه		اروپا		درصد راهگام و تغذیه
میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	
۲۵/۷ - ۴۲	۲۰/۹ - ۳۴/۹	۲۵ - ۴۰	۲۰ - ۳۸	چدن خاکستری %
۴۵/۳ - ۵۴/۲	۱۷/۹ - ۴۷/۹	۳۷/۵ - ۴۰	۳۵ - ۳۸	چدن نشکن %
۳۳ - ۵۰/۸	۲۹/۹ - ۵۹/۹	۳۲/۵ - ۵۰	۳۰ - ۴۸	فولاد %

در جدول ۲-۸ درصد کل ضایعات برگشتی (شامل قطعاتی که از طرف مشتری عودت داده شده است) به تفکیک نوع آلیاژ ارائه شده است.

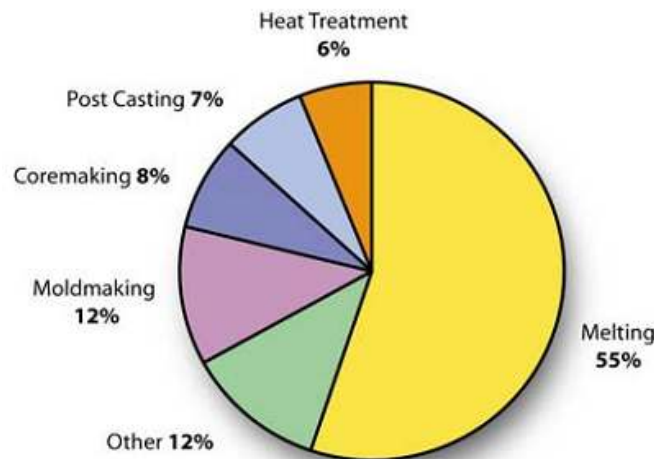
جدول ۲-۸. درصد کل ضایعات برگشتی به تفکیک نوع آلیاژ در اروپا و روسیه [۱]

روسیه		اروپا		ضایعات برگشتی
میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	
۵/۴ - ۲۵/۶	۱ - ۳	۲/۵ - ۵	۱ - ۴	چدن خاکستری %
۶/۳ - ۱۴	۲/۲ - ۱۶	۲/۵ - ۵	۱/۲ - ۴	چدن نشکن %
۱/۸ - ۷/۴	۰/۵ - ۴/۷	۵	۲/۵ - ۴	فولاد %

۲-۲. بررسی سهم بخش‌های مختلف صنعت ریخته‌گری در مصرف انرژی

در این قسمت از گزارش، ابتدا سهم هر یک از بخش‌های صنعت ریخته‌گری را در مصرف انرژی کلی کارخانه‌های ریخته‌گری بررسی کرده و پس از تعیین فرآیندهای مصرف‌کننده انرژی، شاخص‌های موجود برای هر قسمت ارائه می‌شود.

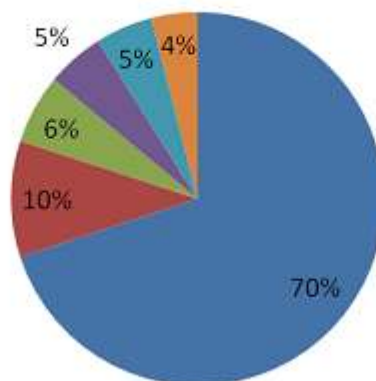
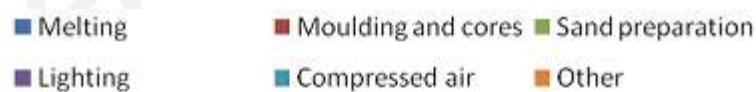
در میان فرآیندهای مختلف، فرآیند ذوب بیشترین سهم را در مصارف انرژی کارخانه های ریخته گری دارد و آمارها بیانگر آن است که در حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد از کل مصارف کارخانه را در بر می گیرد. برای مصارف بخش های مختلف داده های مختلفی گزارش شده که هر چند دقیقا یکسان نیستند ولی در رنج های مشابهی قرار دارند. بعنوان مثال دپارتمان انرژی امریکا سهم بخش های مختلف را مطابق شکل ۱-۲ بیان می کند:



شکل ۱-۲. سهم بخش های مختلف در فرآیند ریخته گری [۵]

همچنین بر اساس مطالعه ای که بر روی ۴۵ کارخانه ریخته گری در کانادا انجام گرفته، نتایج مشابهی گزارش شده که حاکی از آن است که فرآیند ذوب در کارخانه های ریخته گری چدن ۸۴٪-۵۴٪ (میانگین ۶۹٪) از کل مصارف انرژی را به خود اختصاص می دهد. باقیمانده انرژی نیز نتیجه مصرف الکتریسیته در موتور (۳۰٪) و روشنایی (۴٪) است [۶].

درمقاله ای که اخیرا در یکی از ژورنال های معتبر اروپا منتشر شد نیز، توزیع مصارف انرژی بخش های مختلف کارخانه های ریخته گری مطابق شکل ۲-۲ گزارش شده است:



شکل ۲-۲. سهم انرژی مصرفی فرآیندهای مختلف در کارخانه های ریخته گری [۷]

از آنجا که طبق بررسی های صورت گرفته قسمت عمده مصرف انرژی کارخانه های ریخته گری در بخش ذوب است در ادامه، بررسی ها بیشتر به این بخش اختصاص می یابد و در پایان شاخص های مصرف بخش های غیر ذوب نیز ارائه می شود.

۳-۲. بررسی شاخص های مصرف، دستاوردها و تکنولوژی های نوین در بخش ذوب

با توجه به اینکه که مصرف انرژی در بخش ذوب تا حدود زیادی وابسته به نوع کوره ها و نوع محصول می باشد، در این قسمت ابتدا تنوع کوره های مورد استفاده در بخش ذوب با توجه به تنوع محصولات تولیدی مورد بررسی قرار می گیرد و سپس شاخص های مصرف انرژی بر اساس این بخش ارائه خواهد شد.

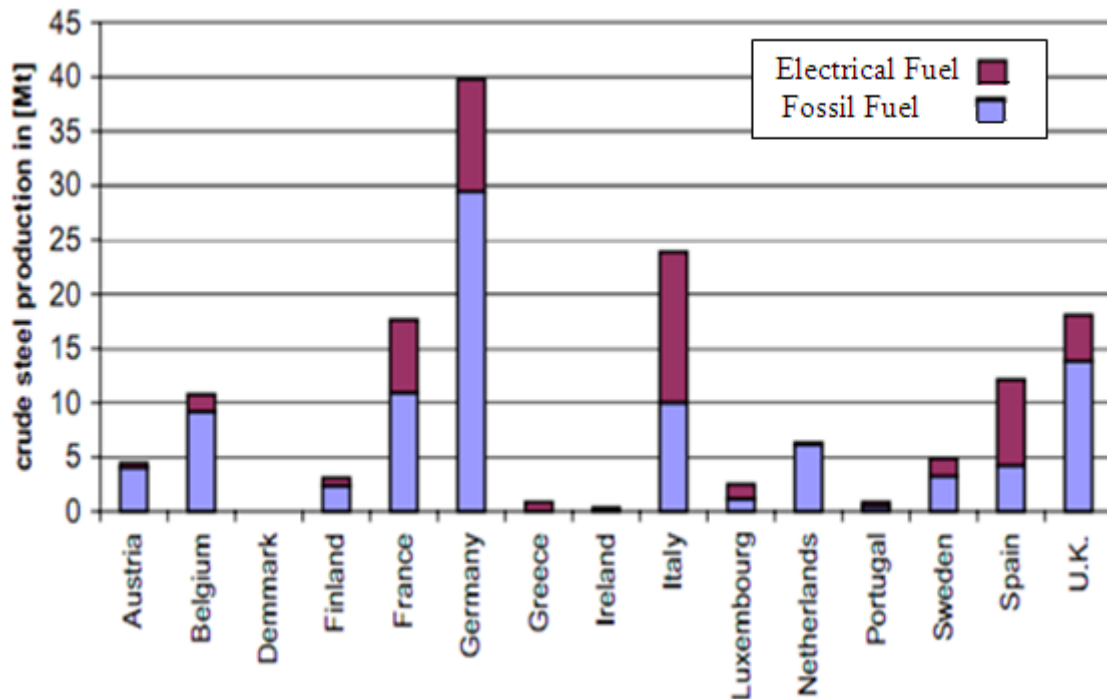
۱-۳-۲. بررسی تنوع کوره های ذوب

در بخش ذوب، کوره های ذوب مهمترین تجهیزات مصرف کننده انرژی هستند و از آن جا که کوره های مختلف مصارف انرژی متفاوتی دارند، عموماً انرژی های مصرفی بر اساس نوع کوره ها گزارش می شود. کوره ها از نظر کاربرد به سه گروه پیشگرم، ذوب و نگه دارنده و از لحاظ مصرف انرژی به دو دسته عمده تقسیم بندی می شوند:

۱. کوره های مصرف کننده سوخت فسیلی

۲. کوره های با گرمایش الکتریکی

میزان استفاده کشورهای مختلف از هر یک از منابع فوق، بسته به ملاحظات اقتصادی و جغرافیایی متفاوت است. برای نمونه در شکل ۲-۳ سهم تولید هر یک از کوره های فسیلی و الکتریکی در تعدادی از کشورهای اروپایی نشان داده شده است.



شکل ۲-۳. سهم تولید هر یک از کوره های فسیلی و الکتریکی در تعدادی از کشورهای اروپایی در سال ۱۹۹۶ [۸]

در آمریکا ریخته گری فلزات آهنی ۶۸٪ از کل ریخته گری فلزات و نیز ۴۹/۵٪ از کل انرژی مصرفی در ریخته گری فلزات را به خود اختصاص می دهد. دپارتمان انرژی آمریکا در گزارش سال ۲۰۰۴ خود از عملکرد سالیانه کارخانه های ریخته گری، سهم منابع مختلف انرژی در تامین انرژی مورد نیاز این کارخانه ها را مطابق شکل ۲-۴ بیان کرده است .

به طور کلی سه نوع روش برای ذوب فلزات به کار می رود :

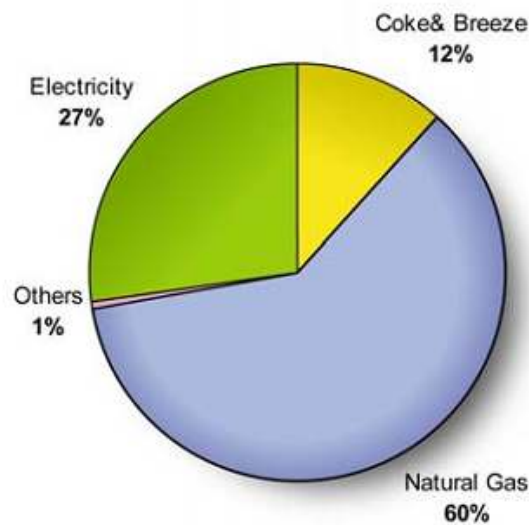
۱- کوپل

۲- ذوب به روش القایی

۳- ذوب به روش قوس الکتریکی

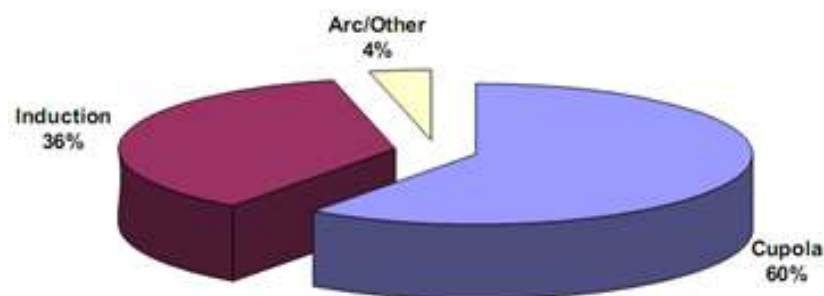
انتخاب یکی از روش های فوق بسته به نوع محصول تولیدی و ملاحظات اقتصادی متفاوت است. پر کاربردترین روش های ذوب در ریخته گری های چدن، استفاده از ذوب به روش های القایی و کوره کوپل است. همچنین کوره های القایی و برخی از کوره های مقاومتی، بعنوان نگهدارنده در بین خطوط ذوب و قالب گیری مورد استفاده قرار می گیرند. البته برخی از کارخانه ها نیز از کوره های قوس الکتریکی برای ذوب استفاده می کنند که در مقایسه با دو کوره قبلی کاربرد بسیار کمتری دارند.

Energy Use in Metal Casting



شکل ۲-۴. سهم هر یک از منابع انرژی در تامین انرژی مصرفی در کارخانه های ریخته گری امریکا [۹]

در شکل ۲-۵ سهم هر یک از انواع کوره ها در ریخته گری چدن در امریکا نشان داده شده است. [۵]



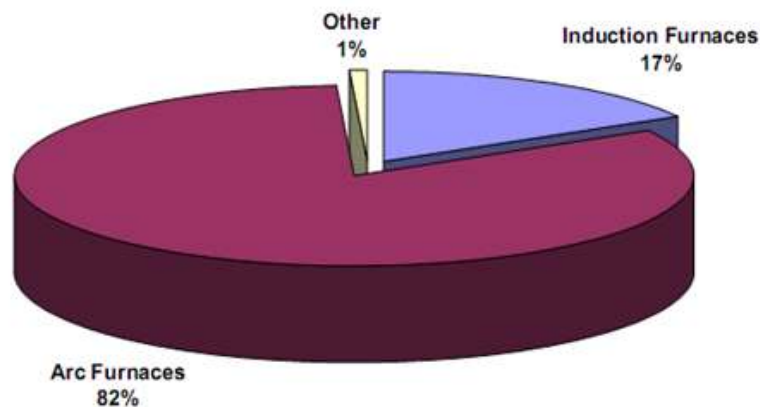
شکل ۲-۵. سهم هر یک از کوره ها در ریخته گری چدن در امریکا

در گزارشی دیگر سهم هر یک از انواع کوره ها در کارخانه های ریخته گری امریکا (۱۹۹۲) به تفکیک نوع محصول آورده شده است، که جدول ۲-۹ کاربرد هر کوره در تولید چدن یا فولاد را بهتر مشخص می کند [۱۰]:

جدول ۲-۹. سهم هریک از انواع کوره ها در کارخانه های ریخته گری امریکا (۱۹۹۲) به تفکیک نوع محصول

کد SIC	نوع محصول کارخانه	نوع کوره ها
۱۳۲۱	چدن خاکستری، چدن نشکن	کوره های کوپل با سوخت کک (۷۵٪)
۱۳۲۲	و چدن چکش خوار	کوره های القایی بدون هسته / کانالی (۲۰٪) کوره های قوس الکتریک (۵٪)
۱۳۲۵	فولاد سخت	کوره های قوس الکتریک (۷۵٪) کوره های بوتله ای (۲۵٪)

بر اساس جدول فوق مشخص است که، هر چند سهم کوره های قوس در تولید چدن ناچیز است ولی این کوره ها در کارخانه های تولید کننده فولاد بیشترین سهم را دارند. شکل ۲-۶ این مطلب را بهتر بیان می کند :



شکل ۲-۶. سهم انواع کوره های الکتریکی در کارخانه های فولادریز [۱۰]

لازم به ذکر است، در این گزارش ارائه شاخص های مصرف انرژی با توجه به بیان های مختلف موجود در گزارشات جهانی بر اساس انرژی ویژه ذوب^۱ و انرژی ویژه محصول^۲ ارائه شده است. مشکلی که در اکثر گزارشات جهانی منتشر شده وجود دارد، عدم توانایی در تعریفی جامع از محدوده مصرف انرژی برای تمامی کارخانه ها، به دلیل عدم وجود یا ناقص بودن اطلاعات کارخانه ها است. به عنوان مثال مرکز انرژی ایالت ویسکانسین^۳ (ایالتی در شمال ایالت متحده امریکا که کارخانه های ریخته گری زیادی را در خود جای داده است) در گزارش خود دلایل عدم ارائه لیستی جامع از مصارف انرژی را این گونه بیان می کند :

¹ millions of BTUs (MBTU) or kWh / ton of metal melted

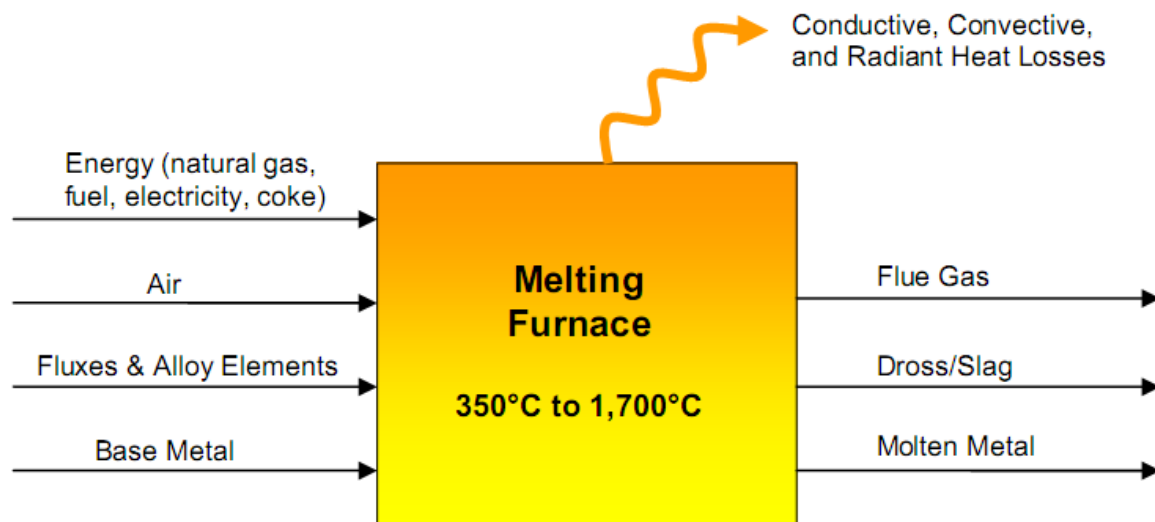
² MBTU or kWh / ton of good castings

³ WISCONSIN

کم بودن یا عدم وجود داده های مصرف انرژی در فرآیندهای مختلفی که در صنایع ریخته گری رخ می دهد، سبب شده است که نتوان مصرف میانگین و نیز بهترین نتیجه را در بین کارخانه های موجود در ویسکانسین گزارش کرد [۱۰].

۲-۳-۲. شاخص های مصرف ویژه انرژی ذوب بر اساس نتایج کارخانه های مختلف

همان طور که اشاره شد، در میان فرآیندهای مختلف، فرآیند ذوب بیشترین انرژی را در کارخانه های ریخته گری مصرف می کند، که در حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد از کل مصارف کارخانه را در بر می گیرد. بدون توجه به نوع کوره، قانون بقای انرژی برای کوره های ذوب را به صورت شماتیک می توان مطابق شکل ۲-۷ نشان داد :



شکل ۲-۷. شماتیکی از بقای انرژی در کوره های ذوب [۱۱]

میزان مصرف انرژی به بازدهی فرآیند ریخته گری نیز بستگی دارد. در ریخته گری همواره مقداری تلفات ناشی از برگشتی و ضایعات وجود دارد که میزان آن با توجه به نوع فرآیند ریخته گری مورد استفاده، بین ۳۰ تا ۹۰ درصد متغیر است [۱۰]. این مواد ذوب می شوند ولی به محصول نهایی تبدیل نمی شوند و لذا میزان مصرف انرژی به ازای تن قطعه تمام شده به راندمان قالب گیری، پیچیدگی قطعه و میزان ضایعات بستگی دارد. تنوع موجود در روش های مختلف حرارت دهی، اختلافی قابل توجه در میزان مصرف ایجاد می کند، بنابراین نمی توان یک رنج کلی برای مصرف انرژی به ازای هر تن محصول ریخته گری در تمامی کارخانه ها، تعریف کرد.

در جدول ۲-۱۰ محدوده انرژی مصرفی سه روش مختلف ذوب برای تولید چدن خاکستری در کارخانه های ایالت ویسکانسین آمریکا آورده شده است.

جدول ۲-۱۰. محدوده انرژی ویژه مصرفی فرآیند ذوب در کارخانه های ویسکانسین [۱۰]

نوع کوره	انرژی ویژه به ازای تن محصول (kwh/ton)
کوره کوپل	۱۲۰۰-۱۳۰۰
کوره القایی	۴۵۰-۶۰۰
کوره قوس الکتریکی	۴۰۰-۵۵۰

در سمینار مربوط به مصارف انرژی که در سال ۱۹۹۸ در ژاپن برگزار شد، انرژی ویژه ذوب در کارخانه های ریخته گری بر اساس نوع محصول به صورت تئوری محاسبه شده و گزارش شد، که در جدول ۲-۱۱ قابل مشاهده است. البته مسلماً داده های حاصل از عملکرد کارخانه های موجود، به دلیل وجود تلفات مختلف، مصارف انرژی بالاتری را نسبت به داده های تئوری زیر نشان می دهند.

جدول ۲-۱۱. انرژی مورد نیاز برای ذوب بر حسب نوع محصول (به صورت تئوری) [۱۱]

محصول	BTU/Ton	Kwh/ton
چدن	$1.06 \times 10^6 / 12$	۳۲۷
ریخته گری چدن	$1.06 \times 10^6 / 85$	۲۴۹
فولاد ۲۵٪ کربن	$1.06 \times 10^6 / 11$	۳۲۲

همچنین می توان با مقایسه داده های گزارش شده از کشورهای مختلف، مصرف ویژه ذوب را برای کارخانه هایی که از کوره های الکتریکی استفاده می کنند با یکدیگر مقایسه کرد. جدول ۲-۱۲ بر اساس داده ها گزارش شده از کشورهای هند، کانادا، امریکا و اتحادیه اروپا برای مصرف ویژه انرژی ذوب بر حسب kwh/ton در کوره های الکتریکی است، که به تفکیک چدن و فولاد آورده شده است. لازم به ذکر است از آن جا که داده های مربوط به آمریکا تفکیک نشده بودند، محدوده کلی مصارف انرژی برای آن ارائه شده است.

جدول ۲-۱۲. مصرفی ویژه ذوب (kwh/ton) در کوره های الکتریکی به تفکیک چدن و فولاد [۱۲]

ریخته گری	الگوی جهانی	هند ^۱	امریکا ^۲	کانادا ^۳	اروپا ^۴
کارخانه های چدن ریز	۵۲۰	۷۸۰-۹۰۰	۵۰۰-۸۲۵	۵۹۵-۱۲۹۰	۵۲۰-۸۰۰
کارخانه های فولاد ریز	۵۰۰	۷۳۵		۶۲۰-۲۷۶۰	۵۰۰-۸۰۰

¹ Kirloskar, 2009

² Energetics, 1999

³ NRCAN, 2003

⁴ Institute for Prospective Tecnological Studies (IPTS,2005)

در ادامه گزارش مصارف ویژه بر اساس نوع کوره ها ارائه می شود.

۳-۳-۲. فرآیند ذوب در کوره های کوپل

انرژی مصرفی در کوره های کوپل اغلب از سوخت های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و... تامین می شود و سهم انرژی الکتریکی در این کوره ها ناچیز (۵ تا ۷ درصد کل انرژی مصرفی) است. در مطالعه ای که سال ۲۰۰۴ بر روی بهترین عملکردهای موجود بین کارخانه های امریکا صورت پذیرفت، اطلاعات مربوط به کوره کوپل، شامل نرخ ذوب، مصرف ویژه انرژی و بهترین عملکرد مطابق جدول ۲-۱۳ گزارش شد :

جدول ۲-۱۳. اطلاعات مربوط به کوره کوپل، شامل نرخ ذوب، بهترین عملکرد و مصرف ویژه انرژی [۱۳]

نوع کوره	جنس فلز	نرخ ذوب Ton/hr	مصرف ویژه انرژی Kwh/Ton	بهترین عملکرد Kwh/Ton
کوپل	چدن	۵/۶ - ۲۲/۴	۸۳۸/۱ - ۱۴۳۰/۲	۸۲۳/۵ - ۱۱۸۳

داده های گزارش شده در انگلیس (۱۹۹۰) محدوده $۶۶۵/۲۷ \text{ kwh/ton}$ تا $۲۷۰۷/۹۸ \text{ kwh/ton}$ را با میانگین وزنی $۹۳۱/۹۷ \text{ kwh/ton}$ برای انرژی ویژه ذوب در این کوره ها گزارش می دهد. جالب توجه است که در سال ۱۹۸۰ میانگین ارائه شده $۱۲۴۵/۵۵ \text{ kwh/ton}$ بوده است که نشان دهنده افزایش ۲۵ درصدی در راندمان کاری کارخانه ها در این بازه زمانی ده ساله است.

مطالعه دقیق تری بر روی کوره های کوپل در سال ۲۰۰۳ در امریکا صورت گرفت، که متوسط مصارف ویژه به ازای تن محصول برای چند کارخانه نمونه بر حسب kwh/ton در آن مطابق جدول ۲-۱۴ به تفکیک نوع محصول و نیز نوع فرآیند ریخته گری، ارائه شده است :

جدول ۲-۱۴. مصارف ویژه (kwh/ton) برای چند کارخانه نمونه در امریکا به تفکیک نوع محصول و نوع فرآیند [۱۴]

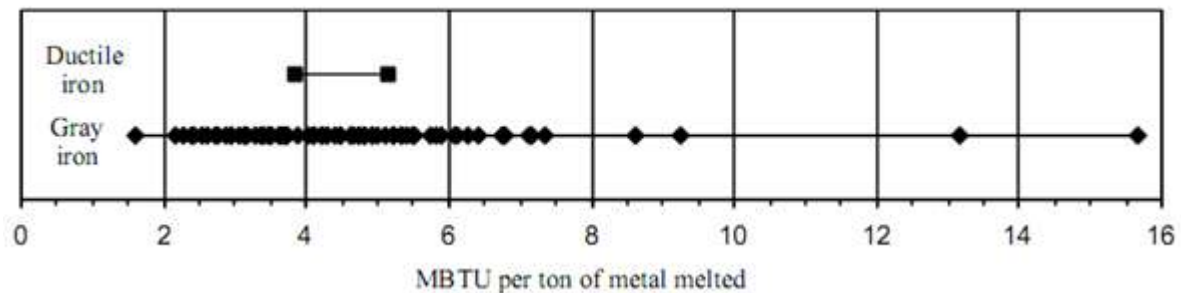
نوع محصول	فرآیند قالب گیری	مصارف دیگر	مصرف ویژه کک	مصرف ویژه گاز طبیعی	مصرف ویژه الکتریکی	مصرف ویژه کل
چدن خاکستری	ماسه تر	۱۱/۷۲	۱۴۹۴/۶۶	۶۴۹/۵۸	۶۰۶/۶۶	۲۷۶۲/۶۲
چدن چکش خوار	ماسه تر	۱۱/۷۲	۱۷۴۹/۶۳	۵۷۷/۳۵	۶۳۵/۵۵	۲۹۷۴/۲۵
چدن چکش خوار (لوله)	گریز از مرکز	۲۳/۴۴	۸۱۷/۶۷	۷۷۶/۶۴	۱۳۴/۸۱	۱۷۵۲/۵۶

بر اساس گزارش مرکز انرژی ویسکانسین در شکل ۲-۸ شدت انرژی ویژه ذوب برای چدن خاکستری^۲ در

^۱ 2.27 MBTU/ton

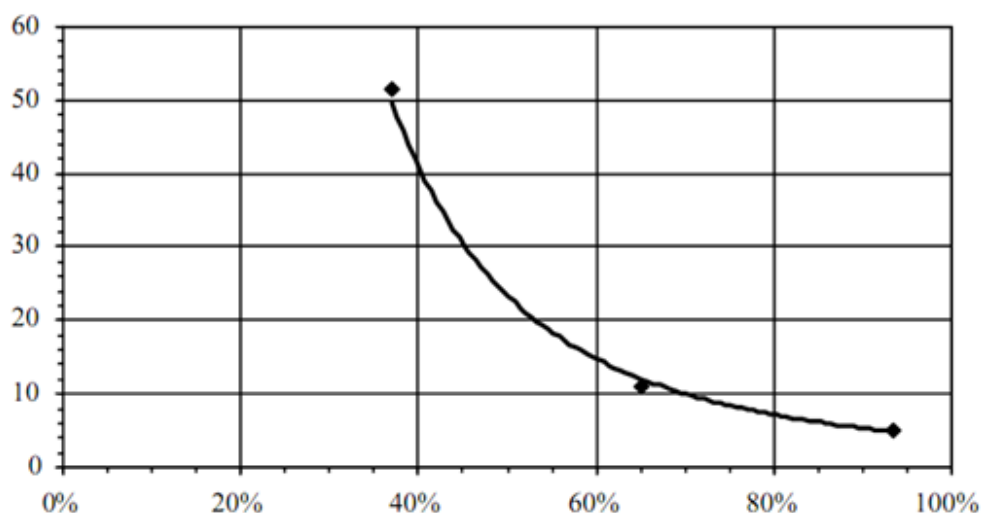
^۲ Gray iron

محدوده $1/62 \text{ MBTU/ton}$ (475 kwh/ton) تا $15/26 \text{ MBTU/ton}$ (4472 kwh/ton) آورده شده است. مینیمم انرژی مصرفی گزارش شده برای کوره های کوپل $1/62 \text{ MBTU/ton}$ (475 kwh/ton) است که فاصله زیادی تا میانگین داده ها $2/27$ (1383 kwh/ton) دارد. همان طور که در شکل قابل مشاهده است دو داده نیز برای مصرف ویژه ذوب کارخانه های تولید کننده چدن نشکن^۱ ارائه شده است.



شکل ۲-۸. مصرف ویژه ذوب در کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و نشکن با کوره کوپل. [۱۰]

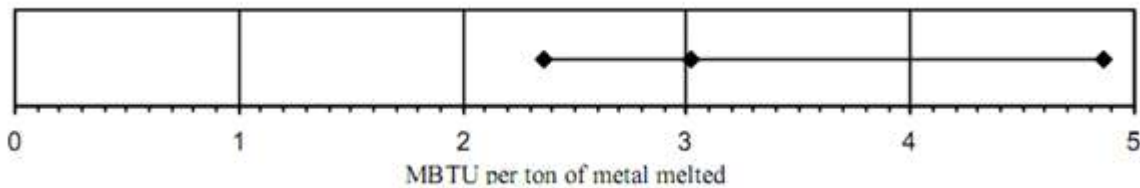
بازده فرآیند برای کارخانه های چدن خاکستری در محدوده ۳۷ تا ۹۳ درصد گزارش شده است. شکل ۲-۹ نشان دهنده کل انرژی ویژه مصرفی (به ازای تن محصول) در کارخانه های ریخته گری در برابر بازده کارخانه های چدن خاکستری است. بزرگترین میزان انرژی مصرفی به ازای تن محصول $51/64 \text{ MBTU/ton}$ است که مربوط به بازده فرآیند ۳۷ درصد است و کمترین میزان انرژی مصرفی به ازای تن محصول $5/16 \text{ MBTU/ton}$ است که مربوط به بازده ۹۳ درصد است.



شکل ۲-۹. نمودار مصرف ویژه ذوب بر حسب MBTU/ton (محور عمودی) به ازای بازده فرآیند (محور افقی) [۱۰]

^۱ Ductile iron

بر اساس آمار ارائه شده توسط جامعه ریخته گران آمریکا^۱ در سال های ۱۹۹۵-۱۹۹۶ تنها سه کارخانه در ایالت ویسکانسین با کوره کوپل تولید محصولات ریخته گری چدن چکش خوار دارند. کمترین میزان انرژی مصرفی ذوب $۲/۳۷ \text{ MBTU/ton}$ (۶۹۵ kWh/ton) و بیشترین میزان مصرف $۴/۸۶ \text{ MBTU/ton}$ (۱۴۲۴ kWh/ton)، گزارش شده همچنین میانگین داده ها $۳/۴۲ \text{ MBTU/ton}$ (۱۰۰۲ kWh/ton) است که در شکل ۲-۱۰ آورده شده اند.



شکل ۲-۱۰. مصرف ویژه ذوب برای کارخانه های تولید کننده چدن چکش خوار با کوره کوپل [۱۰]

۲-۳-۴. فرآیند ذوب در کوره های القایی

تکنولوژی گرمایش القایی در واقع تولید حرارت توسط میدان متغیر مغناطیسی قوی است که به وسیله سیستم های مختلفی قابل تولید می باشد. کوره های القایی در مقایسه با کوره های سوخت فسیلی دارای مزایای فراوانی از جمله دقت بیشتر، تمیزی و تلفات گرمایی کمتر است. در ضمن در کوره هایی که در آنها از روش های دیگر (غیر القا) برای ذوب استفاده می شود، اندازه کوره بسیار بزرگ بوده و زمان راه اندازی و خاموش کردن آنها طولانی است. یکی از معضلات موجود جهت مقایسه داده های کوره های القایی مشکل هزینه نگهداری است. اغلب، کوره های فرکانس متوسط به صورت جفت نصب می شوند، بنابراین کوره ذوب می تواند بعد از اتمام ذوب، بعنوان کوره نگهدارنده/پاشنده (holding/pouring) مذاب، ایفای نقش کند. در حالیکه در کوره های کوپل و کوره های القایی فرکانس شبکه، هزینه پیش بینی شده انرژی مصرفی شامل فرآیندهای ذوب و نگهداری/پاشش نیز می شود. نگهداری چدن مذاب در کوره های القایی فرکانس شبکه و کوره های کوپل باید توسط یک کوره القایی کانالی^۲ انجام شود و داده های مصرف انرژی مربوط به این کوره ها، اغلب به صورت جداگانه گزارش می شوند. بر اساس مطالعه ای که به منظور تعیین بهترین عملکردهای موجود بر روی کوره های القایی صورت گرفت، داده های مربوط به کمترین مصارف ویژه ذوب به تفکیک جنس فلز مطابق جدول ۲-۱۵ گزارش شد:

^۱Foundrymen's Society American (AFS)

^۲ furnace channel induction

جدول ۲-۱۵. اطلاعات مربوط به کوره القایی، شامل نرخ ذوب، بهترین عملکرد و مصرف ویژه انرژی [۱۳]

نوع کوره	جنس فلز	نرخ ذوب	مصرف ویژه انرژی	بهترین عملکرد
		Ton/Hr	Kwh/Ton	Kwh/Ton
القایی	فولاد و چدن	۱/۱۲-۱۱/۲	۵۳۵/۲۵-۹۷۰	۵۳۴/۷۱-۷۱۴/۲۹

بر اساس داده های گزارش شده اداره ارزیابی بازدهی انرژی انگلستان^۱ که از کوره های ذوب القایی بدون هسته^۲ جمع آوری شده اند، متوسط انرژی ویژه مصرفی ذوب برای کوره های القایی فرکانس شبکه ۷۵۱ kwh/ton است در حالیکه برای کوره های فرکانس متوسط مقدار ۸۱۸ kwh/ton گزارش شده است. بعنوان یک شاخص می توان این مقادیر را با مقدار تئوری انرژی الکتریکی مصرفی مورد نیاز برای افزایش دمای آهن تا ۱۴۵۰ درجه سلسیوس، که حدود ۴۱۹ kwh/ton است، مقایسه کرد. با در نظر گرفتن تلفات کویل و تلفات حرارتی در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد، مینیمم انرژی مصرفی برای کوره های القایی با بازدهی بالا در حدود ۴۵۹ kwh/ton خواهد شد. این موارد در جدول ۲-۱۶ قابل مشاهده اند و بیانگر آن است که کوره های القایی با فرکانس شبکه، مصرف انرژی کمتری دارند. لازم به ذکر است که این داده ها فقط از کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و فولاد جمع آوری شده اند.

جدول ۲-۱۶. مصرف ویژه انرژی ذوب متوسط برای کوره های القایی بدون هسته برحسب فرکانس [۱۵]

نوع کوره	میانگین SEC ذوب (kwh/ton)	SEC تئوری
القایی بدون هسته - فرکانس شبکه	۷۵۱	۴۵۹
القایی بدون هسته - فرکانس متوسط	۸۱۸	

بر اساس نتایج منتشر شده در ۵۷ امین کنفرانس ریخته گری هند در سال ۲۰۰۹ رنج مصرف انرژی ویژه ذوب برای کوره های القایی با کک مصرفی در کوره های کویل مطابق جدول ۲-۱۷ مقایسه شده است:

جدول ۲-۱۷. مقایسه رنج مصرف انرژی ویژه ذوب برای کوره های القایی با کک مصرفی در کوره های کویل

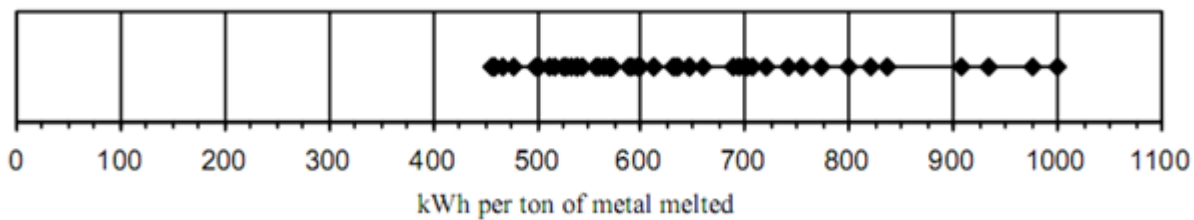
توضیحات	انرژی ویژه (SEC)
انرژی ویژه ذوب مصرفی در کوره های القایی	۶۲۰ kwh/ton
مصرف کک در کوره های کویل به ازای تن مذاب	۱۳۵ kwh/ton

در تحقیقی که مرکز انرژی ویسکانسین بر روی کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری با کوره القایی انجام

¹ British Energy Efficiency Office survey (1991)

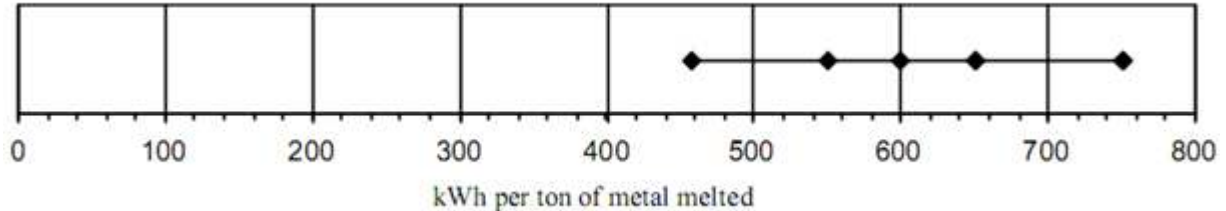
² coreless induction melting furnaces

داد، مطابق شکل ۲-۱۱ انرژی ویژه مصرفی ذوب در محدوده ۴۵۷ kWh/ton تا ۱۰۰۰ kWh/ton گزارش شد. بر اساس این گزارش میانگین و میانه داده‌های جمع آوری شده به ترتیب ۶۲۷ kWh/ton و ۵۹۳ kWh/ton است. سه کارخانه ریخته‌گری تقریباً انرژی ویژه مصرفی ذوبی در حدود ۹۵ درصد مینیمم مصرف ویژه انرژی تئوری دارند که بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که پتانسیل بالایی در دست یابی به انرژی‌های ویژه مصرفی پایین تر برای سایر کارخانه ها وجود دارد. برخی از این داده‌های انرژی ویژه پایین، در ارزیابی سال ۱۹۸۳ کارخانه‌های ریخته‌گری ویسکانسین گزارش شده‌اند.^۱



شکل ۲-۱۱. مصرف ویژه ذوب در کارخانه‌های تولید کننده چدن خاکستری با کوره القایی [۱۰]

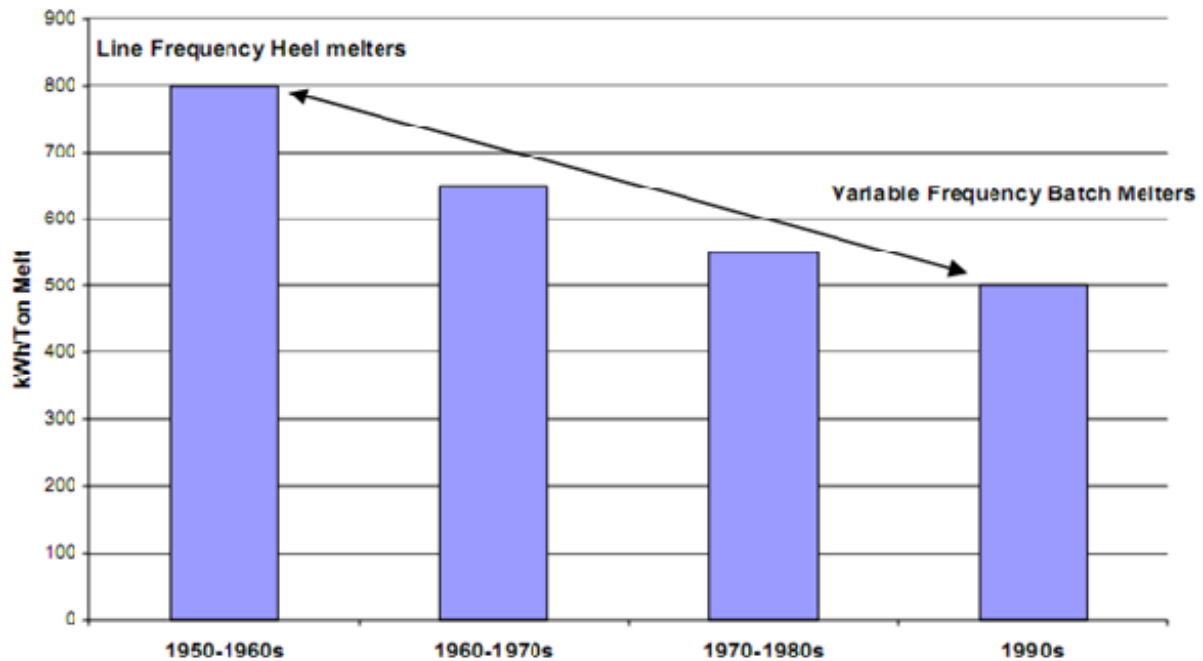
بر اساس همان گزارش، میزان مصرف ویژه انرژی ذوب برای کارخانه‌های فولادریز، در محدوده ۴۵۷ تا ۷۵۰ kWh/ton قرار دارد. مطابق شکل ۲-۱۲ میانگین و میانه داده‌های جمع آوری شده به ترتیب ۶۳۰ و ۶۵۰ هستند.



شکل ۲-۱۲. مصرف ویژه ذوب در کارخانه‌های تولید کننده فولاد با کوره القایی [۱۰]

لازم به ذکر است که در دهه‌های اخیر با گسترش فناوری و استفاده از تکنولوژی‌های نوین کاهش چشم گیری در مصارف انرژی کوره‌های القایی رخ داده است، شکل ۲-۱۳ کاهش انرژی ویژه ذوب در کوره‌های القایی از سال ۱۹۵۰ تا سال ۱۹۹۰ در کارخانه‌های ریخته‌گری امریکا را نشان می‌دهد که بیانگر کاهش مصرف ویژه از ۸۰۰ kWh/ton به ۵۰۰ kWh/ton به دلیل استفاده از تکنولوژی‌های جدید در کوره‌های القایی است.

¹ Leedom, 1984



شکل ۲-۱۳. انرژی ویژه ذوب مصرفی در کوره های القایی از سال ۱۹۵۰ تا سال ۱۹۹۰ در کارخانه های ریخته گری امریکا [۱۶]

تغییر فرکانس کوره های القایی از فرکانس اصلی به فرکانس متوسط

کوره های القایی فرکانس متوسط (۲۵۰ HZ) در مقایسه با کوره های فرکانس شبکه (۵۰ HZ) ظرفیت ذوب بالاتری دارند. به طوری که ظرفیت ذوب کوره های فرکانس متوسط بالای ۱۰۰۰ kwh/ton گزارش شده در حالیکه ظرفیت ذوب کوره های فرکانس شبکه در حدود ۳۰۰ kwh/ton است. این ویژگی امکان استفاده از بوتله های کوچکتر را فراهم می کند که باعث کاهش تلفات حرارتی خواهد شد. بازده حرارتی کوره های القایی فرکانس متوسط در حدود ۱۰ درصد بیشتر از کوره های القایی فرکانس شبکه است. علاوه بر این برای آنکه کوره های القایی فرکانس شبکه مصرف بهینه ای داشته باشند باید مذاب موجود در بوتله آن ها در حدود دو سوم ظرفیت کل بوتله باشد و نیاز به یک واحد مخصوص برای راه اندازی شارژهای سرد دارد. در مقابل کوره های فرکانس متوسط می توانند به راحتی با شارژهای سرد راه اندازی شوند و در پایان هر شیفت کاری یا در پایان هر ذوب تخلیه شوند. [۱۷]

۲-۳-۵. فرآیندهای ذوب دوتایی: ذوب با کوره کوپل + کوره های نگهدارنده القایی

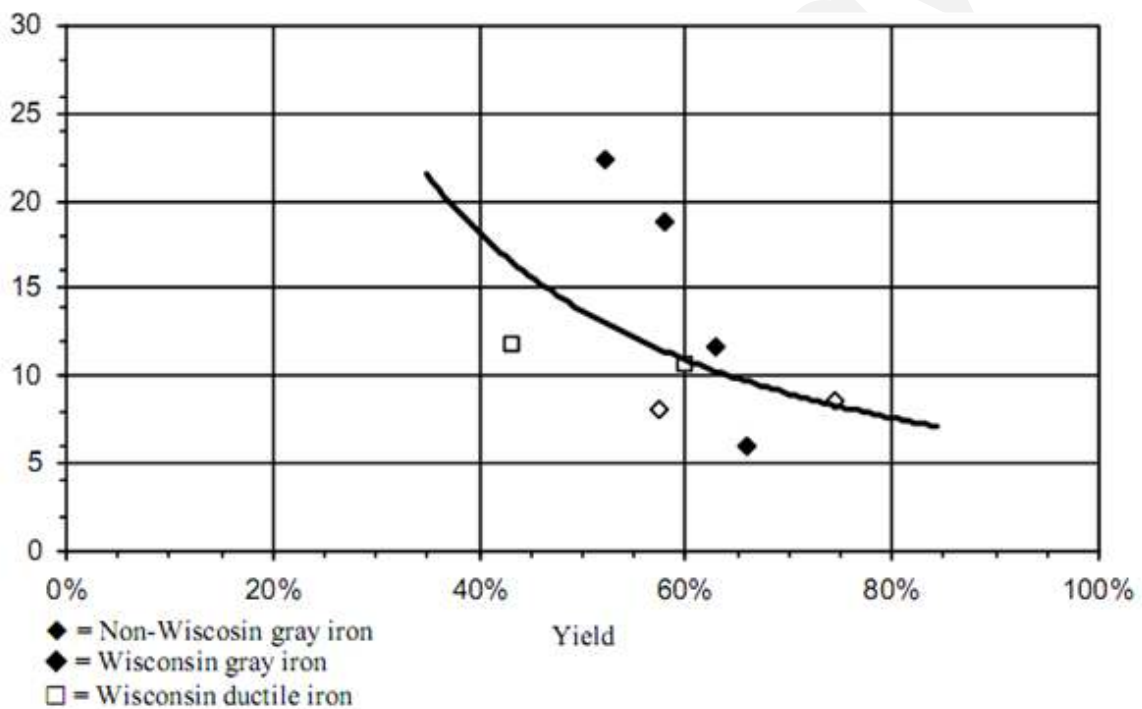
برخی از کارخانه ها از هر دو نوع کوره کوپل و القایی استفاده می کنند، بدین شکل که اغلب، کوره های کوپل نقش ذوب کننده و کوره های القایی نقش نگهدارنده را ایفا می کنند. مطالعه ای بر روی کارخانه هایی که از فرآیند دوتایی استفاده می کنند انجام شده که داده های حاصل از آن، در شکل های ۱-۱۵، ۱-۱۶ و ۱-۱۷ آورده شده است. توجه شود که در این شکل ها، به جای داده های تجربی برای فرآیندهای جداگانه مجموع داده ها برای فرآیند

¹ Duplex Process

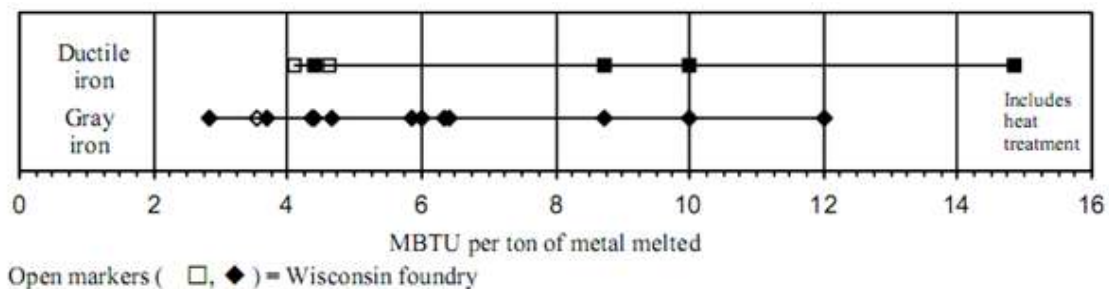
ترکیبی آورده شده است. بنابراین، این داده ها اغلب بیانگر مجموعی از داده های مربوط به فرآیندهای با نوع مختلف (بعنوان مثال ۷۰ درصد کوپل و ۳۰ درصد الکتریکی) و برخی از انواع ریخته گری (بعنوان مثال ۸۲ درصد چدن خاکستری، ۱۱ درصد چدن نشکن و ۷ درصد چدن چکش خوار) هستند و در برخی موارد، به روشنی مشخص نیست که داده های گزارش شده برای فرآیندهای دوگانه است یا ترکیبی از داده ها برای برخی از فرآیندها است، برخی از داده ها برای کوپل و بقیه برای الکتریکی هستند.

در شکل ۲-۱۴ مصرف ویژه به ازای تن محصول برای کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و نشکن که از فرآیندهای دوتایی استفاده می کنند، نسبت به بازده فرآیند رسم شده است.

در شکل ۲-۱۵ مصارف ویژه ذوب برای کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و نشکن که از فرآیندهای دوتایی استفاده می کنند آورده شده است.

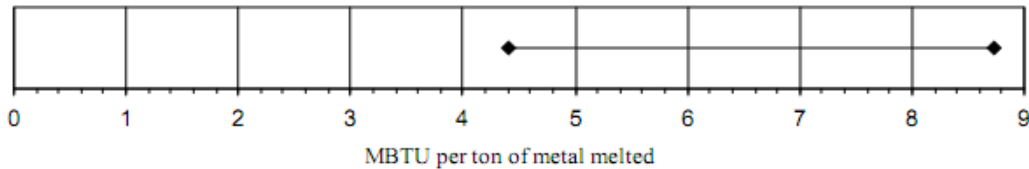


شکل ۲-۱۴. مصرف ویژه به ازای تن محصول (محور عمودی) کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و نشکن با فرآیندهای دوتایی نسبت به بازده فرآیند (محور افقی) [۱۰]



شکل ۲-۱۵. مصارف ویژه ذوب برای کارخانه های تولیدکننده چدن خاکستری ونشکن که از فرآیندهای دوتایی استفاده می کنند [۱۰]

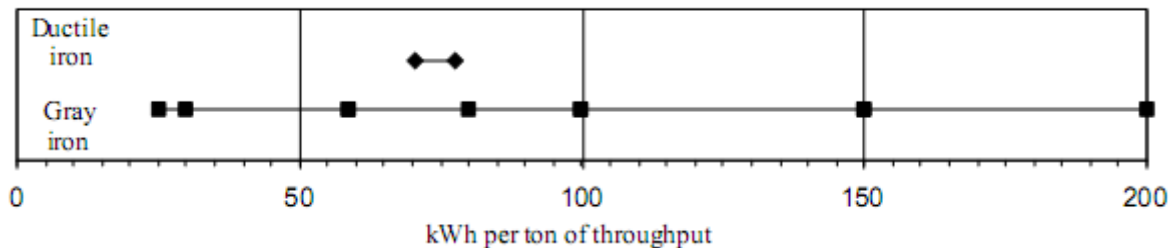
در شکل ۲-۱۶ مصارف ویژه ذوب برای کارخانه های تولیدکننده چدن چکش خوار که از فرآیندهای دوتایی استفاده می کنند آورده شده است.



شکل ۲-۱۶. مصارف ویژه ذوب برای کارخانه های تولیدکننده چدن چکش خوار که از فرآیندهای دوتایی استفاده می کنند [۱۰]

۲-۳-۶. فرآیندهای نگهداری القایی

شکل ۲-۱۷ محدوده انرژی ویژه لازم جهت نگهداری مذاب را نشان می دهد. مقادیر میانگین و میانه داده های جمع آوری شده برای فرآیندهای نگهداری با کوره های القایی به ترتیب ۹۲ kWh/ton و ۷۹ kWh/ton گزارش شده است.



شکل ۲-۱۷. مصرف ویژه انرژی ذوب کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری و شکل پذیر برای کوره های القایی نگهدارنده [۱۰]

۲-۳-۷. فرآیندهای ذوب قوس الکتریکی^۱

کوره های قوس الکتریکی اغلب برای ذوب فولاد و به منظور فولادسازی مورد استفاده قرار می گیرد. در کوره های قوس الکتریکی، انرژی الکتریکی از طریق ایجاد قوس بین الکترودهای گرافیتی و شارژ فلزی و یا ایجاد قوس بین خود الکترودها، به حرارت تبدیل شده و موجب ذوب فلزات می گردد. به همین خاطر این کوره ها را بر دو نوع قوسی مستقیم (قوس به بار کوره) و قوسی غیر مستقیم (قوس بین الکترودها) تقسیم بندی می کنند. در ادامه مصارف ویژه هریک از آنها با توجه به نوع محصول ارائه می شود.

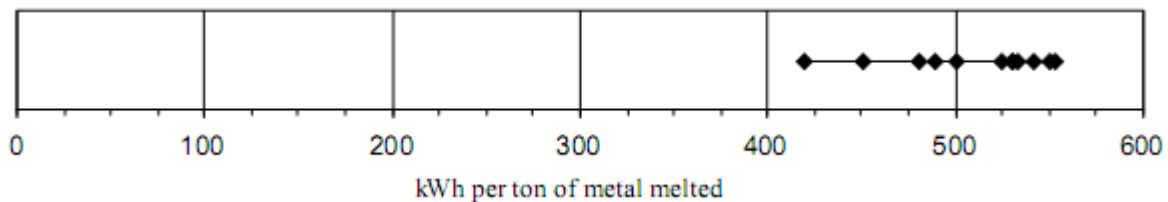
بر اساس مطالعه ای که به منظور تعیین بهترین عملکردهای موجود بر روی کوره های قوس الکتریک صورت گرفت، داده های مربوط به کمترین مصارف ویژه ذوب به تفکیک جنس فلز مطابق جدول ۲-۱۸ گزارش شد :

¹ Electric Arc Melting Process

جدول ۲-۱۸. اطلاعات مربوط به کوره قوس الکتریکی، شامل نرخ ذوب، مصرف ویژه انرژی و بهترین عملکرد [۱۳]

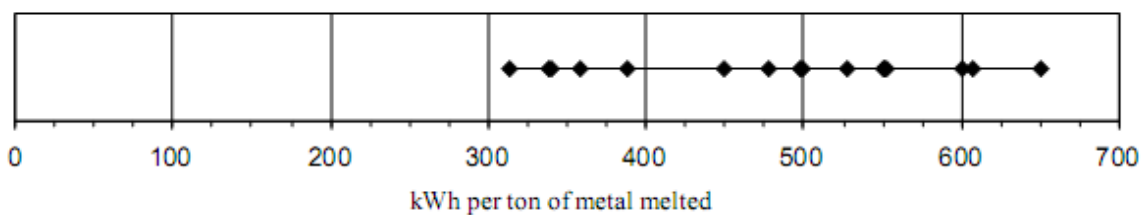
نوع کوره	جنس فلز	نرخ ذوب Ton/Hr	مصرف ویژه انرژی Kwh/Ton	بهترین عملکرد Kwh/Ton
قوس الکتریکی	فولاد	۱۱۲	۴۴۶/۴۳ - ۵۳۵/۷۱	۴۵۱/۳

محدوده مصرف ویژه انرژی ذوب برای چدن خاکستری در کوره های قوس الکتریکی نیز ۴۱۹ تا ۵۴۰ kWh/ton گزارش شده است (شکل ۲-۱۸). میانگین و میانه داده های جمع آوری شده به ترتیب ۵۰۹ kWh/ton و ۵۲۸ kWh/ton است. بر اساس تحقیقی که مرکز انرژی ویسکانسین در سال ۱۹۷۰ در مورد کمترین انرژی ویژه مصرفی کلی (به ازای تن محصول) در کارخانه های ریخته گری چدن خاکستری با کوره های قوس انجام داد، مصرف ویژه در حدود ۶۶۲۵ kWh/ton بر تن محصول، گزارش شد.



شکل ۲-۱۸. مصرف ویژه کارخانه های تولید کننده چدن خاکستری با استفاده از کوره قوس [۱۰]

مصرف ویژه انرژی ذوب در کارخانه های ریخته گری فولاد با کوره های قوس الکتریکی در محدوده ۳۱۳ تا ۶۵۰ kWh/ton گزارش شده شکل ۲-۱۹ میانگین و میانه داده های جمع آوری شده به ترتیب ۴۸۱ kWh/ton و ۴۹۹ kWh/ton است. داده ها از آخرین مطالعات صورت گرفته به منظور یافتن کمترین میزان های مصرف ویژه، جمع آوری شده است. تعداد داده های مربوط به کارخانه های فولاد ریز و دارای کوره قوس کم است. دو داده در حدود ۸۸۰۰ kWh/ton برای انرژی ویژه مصرفی به ازای تن محصول گزارش شده است. برخی از داده های گزارش شده نیز که دارای مقادیری بالاتر از ۱۲۰۰۰ kWh/ton هستند داده های مناسبی تشخیص داده نمی شوند و نمی توان در تحلیل ها این نتایج را ملاک قرار داد [۱۶].



شکل ۲-۱۹. مصرف ویژه ذوب برای کارخانه های تولید کننده فولاد با کوره قوس الکتریکی [۱۰]

۴-۲. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری جهان

در این قسمت از گزارش شاخص های مصرف انرژی گزارش شده از کشورهای مختلف، به منظور مقایسه عملکرد کشورهای مختلف و تعیین الگویی جهانی از مصارف انرژی ارائه شده است.

۴-۲-۱. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری اروپا و روسیه

به منظور تعیین عملکرد یک واحد صنعتی از جهت مصرف انرژی، عموماً انرژی مصرفی هرواحد به ازاء تناژ تولید آن واحد بیان می شود که این معیار معرف شاخص مصرف انرژی (مصرف ویژه انرژی) آن واحد صنعتی می باشد. انحراف شدت انرژی کل نسبت به حالت بهینه در واحدهای ریخته گری بیشتر مربوط به بخش های ذوب، عملیات حرارتی و پیشگرم پاتیل می باشد.

در جدول ۲-۱۹ انرژی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت به ازای هرتن ذوب برای کوره های قوس و القایی ارائه شده است.

جدول ۲-۱۹. انرژی مصرفی بر حسب کیلو وات ساعت برای یک تن مذاب چدن و فولاد با کوره های قوس و القایی [۱]

انرژی مصرفی ذوب (kwh/ton)					
نوع کوره	جنس آلیاژ	اروپا		روسیه	
		بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین
کوره القایی	چدن	۵۴۰-۶۲۰	۵۵۰-۶۲۵	۵۳۴-۱۴۷۸	۸۹۳-۱۴۹۷
	فولاد	۵۸۰-۷۰۰	۶۷۵-۸۰۰	-	-
کوره قوس	چدن	-	-	-	-
	فولاد	۵۰۰	۵۲۵	۶۴۵-۸۸۴	۸۵۹-۱۵۶۴

در جدول ۲-۲۰ مقدار انرژی مصرفی بر حسب کیلو وات برای تولید یک تن قطعه ی تمام شده انواع فولاد و چدن ارایه شده است.

جدول ۲-۲۰. مقدار انرژی مصرفی برای تولید یک تن قطعه تمام شده انواع فولاد و چدن در ریخته گری های اروپا و روسیه [۱]

انرژی مصرفی بر حسب kwh به ازای تن محصول					
جنس آلیاژ	اروپا		روسیه		
	بهترین نتیجه	میانگین	بهترین نتیجه	میانگین	
چدن خاکستری	۱۰۰۰-۱۳۰۵	۱۱۶۹-۱۴۸۳	۱۵۲۱-۴۵۳۳	۲۹۳۹-۵۴۴۸	
چدن نشکن	۱۲۸۴-۱۵۶۶	۱۷۴۴-۱۷۵۸	۲۳۴۴-۳۵۳۹	۳۳۲۲-۵۰۱۶	
فولاد	۱۱۶۵-۲۰۸۸	۱۳۹۱-۲۶۷۶	۲۸۷۴-۶۹۹۴	۳۲۸۵-۷۴۶۴	

در جدول ۲-۲۱ شاخص های عملکرد (کیلو وات ساعت به تن ذوب و کیلو وات ساعت به تن محصول) در ریخته گری های اروپا و روسیه به تفکیک چدن ریز و فولاد ریز آورده شده است.

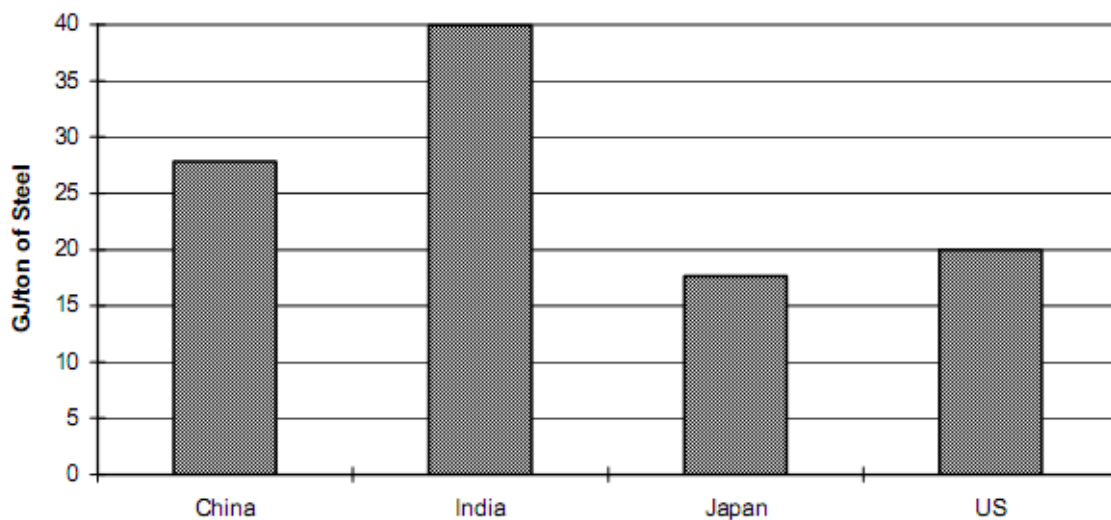
جدول ۲-۲۱. شاخص های عملکرد اروپا و روسیه به تفکیک چدن ریز و فولاد ریز [۱]

واحد های چدن ریز				واحد های فولاد ریز				شاخص های عملکرد
اروپا		روسیه		اروپا		روسیه		
بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	
۵۵۸	۵۷۱	۸۰۷	۱۱۱۸	۵۰۰	۵۲۵	۶۸۶	۱۳۱۰	کیلو وات ساعت به تن ذوب
۱۱۶۵	۱۳۳۸	۳۰۱۴	۴۲۳۵	۱۵۰۳	۱۸۱۵	۳۶۰۴	۵۳۵۹	کیلو وات ساعت به تن محصول

۲-۴-۲. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری آمریکا، ژاپن، هند، چین و

کانادا

همانطور که در شکل ۲-۲۰ دیده می شود مصرف انرژی تولید فولاد به روش ریخته گری در کشورهای آمریکا، ژاپن، هند و چین بر حسب انرژی مصرفی به تن تولیدی آورده شده است.



شکل ۲-۲۰. مقایسه بین شاخص های مصرف انرژی در صنایع ریخته گری فولاد آمریکا، ژاپن، هند و چین [۱۴]

علاوه بر آن شاخص های فوق را می توان با مصارف ویژه کارخانه های کانادایی که در جدول ۲-۲۲ به تفکیک نوع محصول آورده شده است، مقایسه کرد.

جدول ۲-۲۲. مصارف ویژه ذوب بر اساس ممیزی کارخانه های کانادایی [۱۵]

کارخانه های چدن ریز		کارخانه های فولاد ریز		SEC بر حسب (kwh/ton)
متوسط	محدوده	متوسط	محدوده	
۲۳۹۵	۱۲۱۰ - ۳۳۱۰	۴۴۸۶	۲۲۰۰ - ۶۶۰۰	SEC به ازای تن محصول
۱۵۸۱	۱۰۲۵ - ۲۲۰۰	۲۷۱۰	۱۴۳۰ - ۴۷۴۰	SEC به ازای تن ذوب
۹۹۲	۷۷۰ - ۱۲۹۰	۱۸۰۰	۹۴۰ - ۳۰۹۰	SEC الکتریکی ذوب

جدول ۲-۲۳ پتانسیل ذخیره انرژی در کارخانه های ریخته گری چدن و فولاد هند را با استفاده از مقایسه بهترین نتایج جهانی با مصارف انرژی در هند ارائه می دهد. مصرف ویژه انرژی کلی در هند مجموع سوخت مصرفی و الکتریسیته خریداری شده است. توجه شود که در جدولی زیر مقادیر SEC در $^1 \text{GJ/tcs}$ آورده شده اند.

جدول ۲-۲۳. پتانسیل ذخیره انرژی در کارخانه های ریخته گری چدن و فولاد هند با استفاده از مقایسه با بهترین نتایج جهانی [۱۶]

سال	سال ۱۹۹۲	سال ۱۹۹۳	سال ۱۹۹۴	سال
SEC الکتریکی	۱/۸۱	۱/۹۴	۱/۹۸	هند
SEC سوخت	۳۳/۵۵	۳۳/۴۶	۳۳/۴۹	
SEC کلی	۳۵/۳۶	۳۵/۳۶	۳۵/۴۷	
SEC الکتریکی	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۱۸	بهترین عملکرد جهانی
SEC الکتریکی	% ۳۶	% ۴۰	% ۴۰	پتانسیل ذخیره
SEC سوخت	۱۵/۸۷	۱۶/۷۱	۱۷/۴۹	بهترین عملکرد جهانی
SEC سوخت	% ۵۳	% ۵۰	% ۴۶	پتانسیل ذخیره
SEC کلی	۱۷/۰۳	۱۷/۸۷	۱۹/۱۲	بهترین عملکرد جهانی
SEC کلی	% ۵۲	% ۴۹	% ۴۶	پتانسیل ذخیره

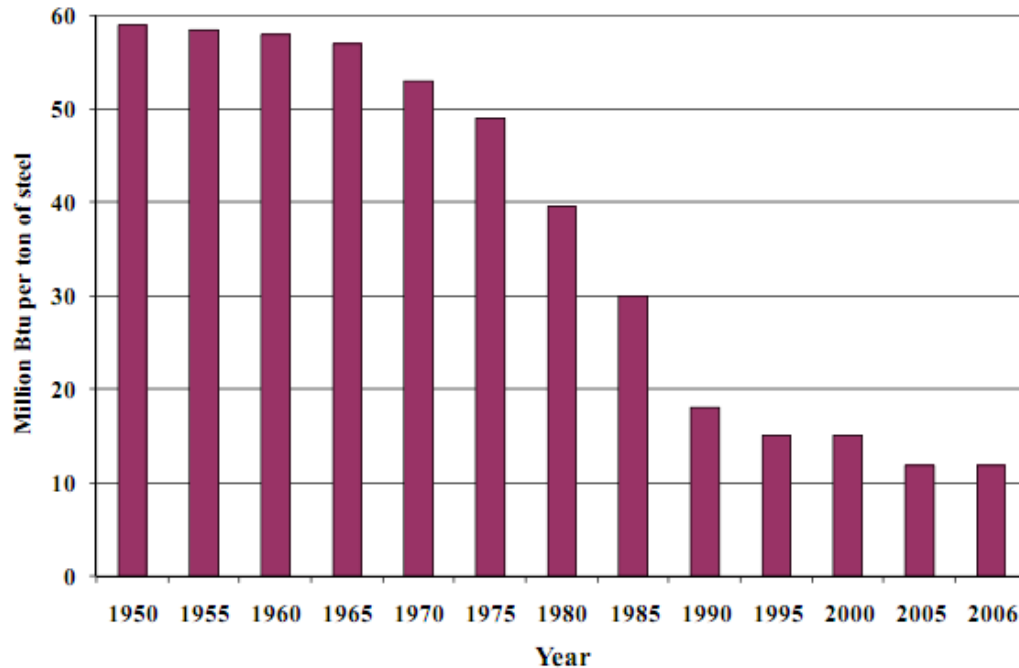
جدول فوق بیانگر آن است که در کارخانه های ریخته گری هند، در زمینه مصرف ویژه سوخت پتانسیل ۵۳ درصدی و در مصرف ویژه کلی پتانسیلی ۵۲ درصدی برای کاهش مصرف وجود دارد که می تواند کاهش چشم گیری را در هزینه ها ایجاد کند.

^۱ گیگاژول بر تن فولاد خام

۳-۴-۲. مصرف ویژه انرژی در صنایع ریخته‌گری چدن و فولاد در آمریکا، آلمان، انگلستان، هلند،

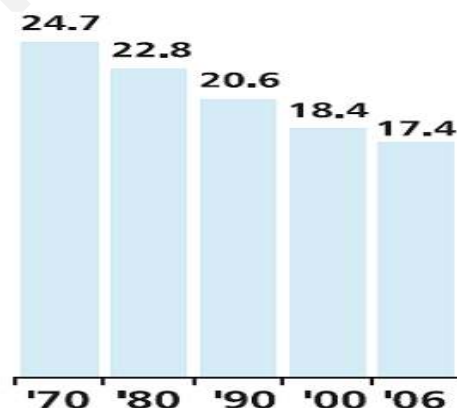
فنلاند و هند

در شکل ۲-۲۱ تاریخچه مقدار مصرف ویژه انرژی برای تولید فولاد در ایالات متحده آمریکا در نیم قرن گذشته آمده است. همانطور که انتظار می‌رفت این مقدار همواره در حال کاهش است.



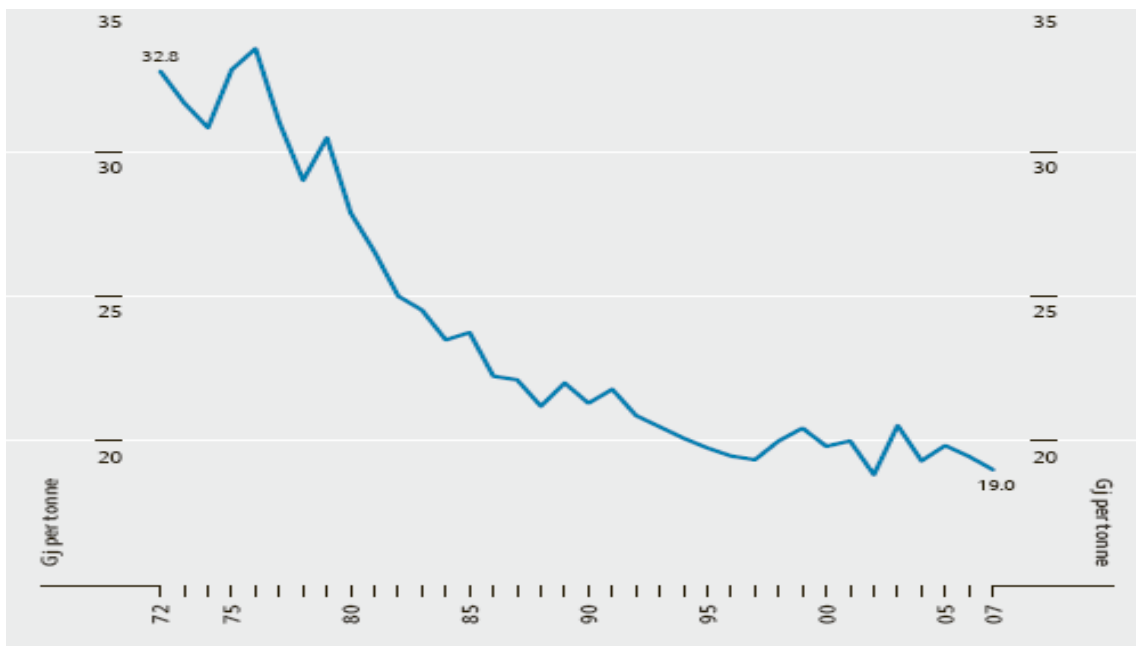
شکل ۲-۲۱. مقدار مصرف ویژه انرژی فولاد برای ایالات متحده آمریکا در نیم قرن گذشته [۱۷]

در شکل ۲-۲۲ روند کاهش مصرف انرژی ویژه فولاد خام در آلمان، برحسب انرژی مصرفی به فولاد تولید شده (GJ/T) نمایش داده شده است.



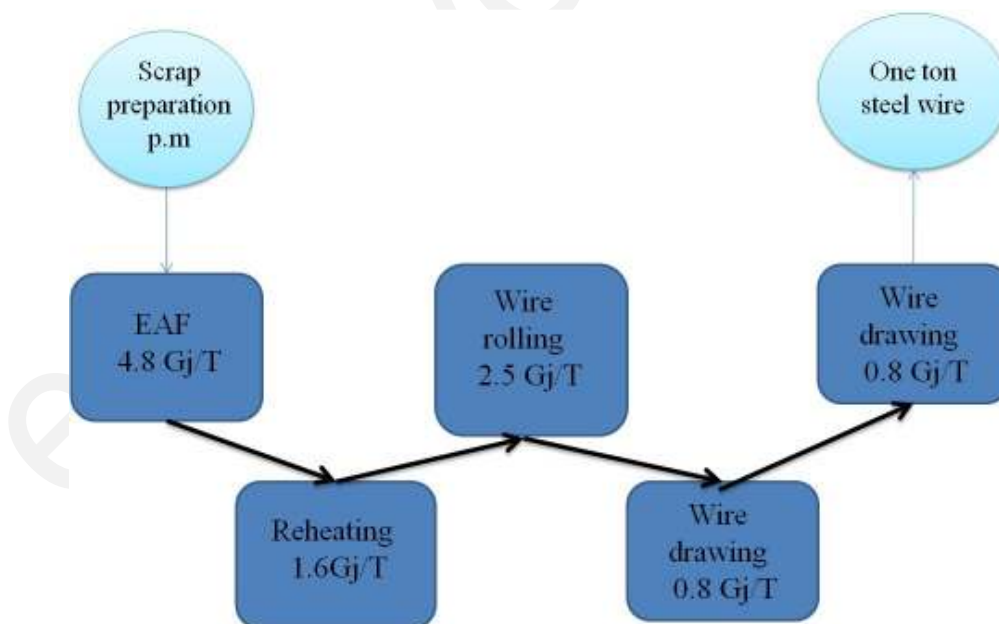
شکل ۲-۲۲. روند کاهش مصرف انرژی ویژه فولاد خام در آلمان، برحسب انرژی مصرفی به فولاد تولید شده (GJ/T)

در شکل ۲-۲۳ روند کاهش مصرف انرژی ویژه در صنایع فولاد انگلستان برحسب انرژی مصرفی به فولاد تولید شده (GJ/T) نمایش داده شده است.



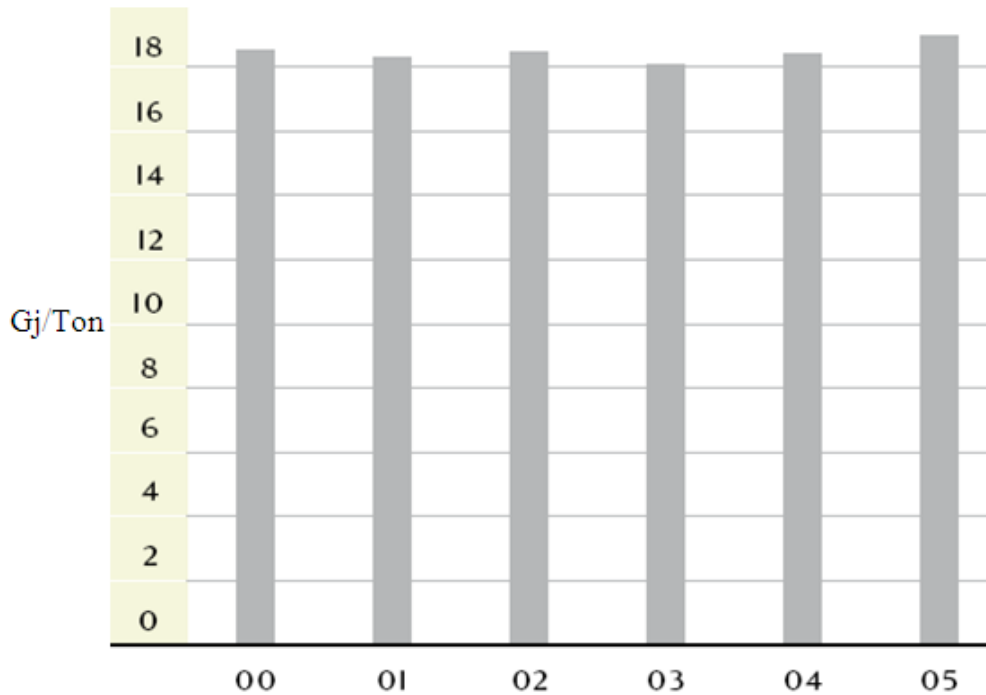
شکل ۲-۲۳. روند کاهش مصرف انرژی ویژه در صنایع فولاد انگلستان برحسب انرژی مصرفی به فولاد تولید شده (GJ/T)

در شکل ۲-۲۴ میزان مصرف انرژی ویژه در صنایع فولاد هلند بر حسب انرژی مصرفی به تن تولیدی در کوره های قوس الکتریکی به صورت شماتیک ارائه شده است.



شکل ۲-۲۴. میزان مصرف انرژی ویژه در صنایع فولاد هلند بر حسب انرژی مصرفی به تن تولیدی در کوره های قوس الکتریکی

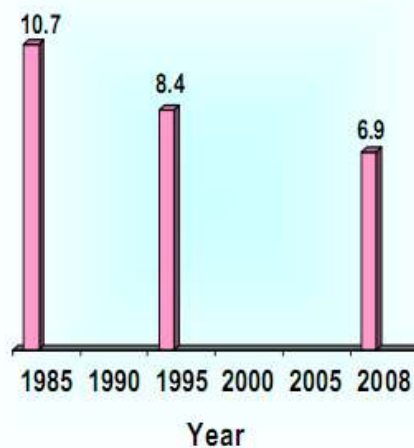
در شکل ۲-۲۵ روند میزان مصرف انرژی ویژه در شرکت فولاد روکی راهه فنلاند برحسب انرژی مصرفی به تن تولیدی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۲۵. روند میزان مصرف انرژی ویژه در شرکت فولاد روکی راهه فنلاند برحسب انرژی مصرفی به تن تولیدی

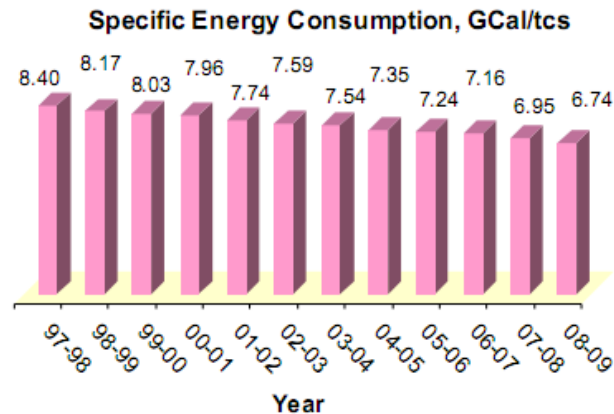
در شکل ۲-۲۶ مقدار مصرف ویژه انرژی صنعت ریخته گری فولاد در ده سال در کشور هند آمده است.

GCal/tcs



شکل ۲-۲۶. مصرف ویژه انرژی صنعت ریخته گری فولاد در ده سال در کشور هند [۳]

در تحقیق انجام گرفته در کارخانه SAIL واقع در کشور هند مصرف ویژه انرژی برای تولید فولاد به روش ریخته گری طی دوازده سال متوالی (۲۰۰۹-۱۹۹۷) اندازه گیری شده است که نتایج حاصل از آن در شکل ۲-۲۷ آمده است.



شکل ۲-۲۷. شاخص مصرف انرژی در کارخانه SAIL واقع در کشور هند برای تولید فولاد به روش ریخته گری [۳]

۴-۲-۴. مصارف انرژی مربوط به فرآیندهای غیر ذوب

برای سایر بخش های غیر ذوب در کارخانه های ریخته گری، اغلب داده ها برای هر فرآیند به طور جداگانه گزارش نشده است و بین داده های موجود نیز اکثر این داده ها ماهیتی تئوری دارند و به تازگی در مطالعات اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. جدول ۲-۲۴ که در ادامه آورده شده حاوی بخشی از داده هایی است که در مورد این فرآیند ها گزارش شده است. واحد ها بر اساس میلیون BTU بر تن محصول بیان شده اند که معادل kWh /ton است. [۱۰]. ۲۹۳/۰۷۱

جدول ۲-۲۴. مصارف بخش های غیر ذوب کارخانه های ریخته گری

توضیحات	سوخت	انرژی ویژه به تن محصول MBTU/ton	فرآیند
چدن خاکستری، کوره کوپل	الکتریکی، گاز	۲/۰۷	قالب گیری و ماهیچه
فولاد، کوره قوس الکتریک	الکتریکی، گاز	۲/۷۲	قالب گیری و ماهیچه گذاری
چدن خاکستری، ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	الکتریکی	۰/۰۵	اختلاط
چدن خاکستری، ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	الکتریکی	۰/۰۱	ساخت ماهیچه
چدن خاکستری، ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	غیر الکتریکی	۱/۳۰	پخت ماهیچه
چدن خاکستری، ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	الکتریکی	۰/۰۱	قالب ماسه ای
چدن خاکستری، ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	غیر الکتریکی	۳/۹۰	خشک کردن قالب
۸۲٪ خاکستری، ۱۱٪ نشکن، ۷٪ چکش خوار (۷۰٪ کوپل، ۳۰٪ الکتریک)	الکتریسیته، سوخت فسیلی	۱/۹۵	قالب گیری و ماهیچه گذاری
فولاد- انرژی ذوب = ۲۴٪ کل انرژی	_____	۱۳٪ از کل انرژی مصرفی	قالب گیری و ماهیچه گذاری
چدن- انرژی ذوب = ۵۰٪ کل انرژی	الکتریکی	۲	پخت قالب
چدن خاکستری- ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	الکتریکی	۰/۰۲	مذاب ریزی
چدن خاکستری- ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	الکتریکی	۰/۰۴	بیرون انداختن ^۱
فولاد- انرژی ذوب = ۲۴٪ کل انرژی	_____	۷٪ از کل انرژی مصرفی	مذاب ریزی، بیرون انداختن، تمیزکاری و حمل
فولاد- فرآیند قوس	گاز	۳	نرمال سازی ^۲
چدن خاکستری، کوره کوپل	گاز، الکتریکی	۰/۴	تمیز کاری
فولاد- فرآیند قوس	گاز، الکتریکی	۰/۶۳	تمیز کاری
فولاد- فرآیند قوس	الکتریکی	۰/۰۴	اتمام و بازرسی
چدن خاکستری- ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	غیر الکتریکی	۶	تمیز کاری و اتمام
چدن خاکستری، کوره کوپل	گاز، الکتریسیته	۰/۳۲	عملیات حرارتی
فولاد- فرآیند قوس	گاز، الکتریسیته	۳/۰۴	عملیات حرارتی
چدن خاکستری- ۷۵٪ کوپل و مابقی الکتریکی	غیر الکتریکی	۰/۴۲	عملیات حرارتی

^۱ Shakeout

^۲ نرمال سازی فرآیند عملیات حرارتی که هدف از آن، از بین بردن تنش های درونی است (Normalize)

ادامه جدول ۲-۲۴. مصارف بخش های غیر ذوب کارخانه های ریخته گری

توضیحات	سوخت	انرژی ویژه به تن محصول MBTU/ton	فرآیند
۸۲٪ خاکستری، ۱۱٪ نشکن، ۷٪ چکش خوار (۷۰٪ کوپل، ۳۰٪ الکتریک)	الکتریسیته، سوخت فسیلی	۱	عملیات حرارتی
فولاد - انرژی ذوب = ۲۴٪ کل انرژی	_____	۳۰٪ از کل انرژی مصرفی	عملیات حرارتی
چدن خاکستری، کوره کوپل	الکتریکی	۰/۱	جابه جایی های داخلی
فولاد - فرآیند قوس	الکتریکی	۰/۱۳	جابه جایی های داخلی
چدن خاکستری، کوره کوپل	گاز، الکتریسیته	۲/۱۸	کنترل آلودگی هوا
فولاد - فرآیند قوس	گاز، الکتریسیته	۱/۸۱	کنترل آلودگی هوا
۸۲٪ خاکستری، ۱۱٪ نشکن، ۷٪ چکش خوار (۷۰٪ کوپل، ۳۰٪ الکتریک)	گاز، الکتریسیته	۱/۰۵	کنترل های محیطی
فولاد - انرژی ذوب = ۲۴٪ کل انرژی	_____	۵٪ از کل انرژی مصرفی	کنترل های محیطی
چدن خاکستری، کوره کوپل	گاز، الکتریسیته	۴/۵۴	گرمایش محیط
فولاد	گاز، الکتریسیته	۴/۲۴	گرمایش محیط
۸۲٪ خاکستری، ۱۱٪ نشکن، ۷٪ چکش خوار (۷۰٪ کوپل، ۳۰٪ الکتریک)	الکتریسیته، سوخت فسیلی	۴/۵۳	هوای تغذیه
فولاد - انرژی ذوب = ۲۴٪ کل انرژی	_____	۲۱٪ از کل انرژی مصرفی	هوای تغذیه

بر اساس مطالعه ای که توسط مرکز انرژی کانادا انجام شد، درصد انرژی مصرفی هر بخش مطابق جدول ۲-۲۵

بیان شده است [۱۵]:

جدول ۲-۲۵. درصد انرژی مصرفی هر بخش بر اساس گزارش کانادایی

تجهیزات / فرآیندها	درصد انرژی مصرفی نسبت به مصرف کل کارخانه %
ذوب	۵۹
فن ها و پمپ ها	۶
روشنایی	۶
موتورها	۱۲
کمپرسورهای هوا	۵
مصارف دیگر	۱۲

در جدول ۲-۲۶ مصارف انرژی در بخش های مختلف کارخانه های ریخته گری بر اساس گزارش منتشر شده در - ۵۷ امین کنفرانس ریخته گری هند، در جدول زیر آورده شده است [۱۸]:

جدول ۲-۲۶. مصارف انرژی در بخش های مختلف کارخانه های ریخته گری

بخش های مختلف	درصد انرژی مصرفی نسبت به مصرف کل کارخانه %
ذوب	٪ ۷۰
قالب گیری و ماهیچه	٪ ۱۰
ماسه ریزی	٪ ۶
روشنایی	٪ ۵
کمپرسورها	٪ ۵
مصارف دیگر	٪ ۴

۲-۵. مقایسه داده های تئوری با عملکردهای موجود

بدیهی است که انرژی مورد نیاز برای ذوب یک تن فلز در تجهیزات ریخته گری به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از مینیمم مقدار لازم تئوری است. مقدار انرژی را به صورت تئوری می توان از فرآیندهای گرمایش و ذوب محاسبه کرد ولی باید توجه کرد که تعداد زیادی از فرآیندهای دیگر نیز در ریخته گری رخ میدهند که انرژی مصرف می کنند لکن محاسبه مینیمم انرژی تئوری برای کل فرآیندهایی که در تجهیزات رخ می دهد دشوار است. هم چنین مقادیر انرژی مصرفی تجهیزات بر اساس حجم و نوع محصول نیز تفاوت های زیادی خواهد داشت.

در مطالعه ای که توسط دپارتمان انرژی آمریکا در سال ۲۰۰۴ انجام شد، انرژی مورد نیاز فرآیندهای ذوب به تفکیک آلیاژهای آهنی و غیر آهنی به صورت تئوری محاسبه شده است. در جدول ۲-۲۷ بر اساس نوع کوره ها مقایسه ای بین نتایج تئوری و داده های عملی مصارف ویژه انرژی بر تن (kwh/ton) ذوب آورده شده [۱۳].

جدول ۲-۲۷. مقایسه ای بین نتایج تئوری و داده های عملی مصارف ویژه انرژی بر تن ذوب (kwh/ton)

فرآیندهای انتخابی / نوع محصول	مینیمم تئوری	بهترین عملکرد	تفاوت بهترین با مینیمم تئوری %	میانگین کارخانه ها	تفاوت میانگین با مینیمم تئوری %
ذوب القایی / چدن	۳۵۱/۵	۵۳۸/۱	٪ ۳۵	۷۹۶/۳	٪ ۵۶
ذوب کوپل / چدن	۳۵۱/۵	۱۰۰۲/۵	٪ ۶۵	۱۴۱۳/۶	٪ ۷۵

جدول فوق مینیمم انرژی تئوری مورد نیاز برای ذوب یک تن از فلز را صرفنظر از کلیه تلفات بازده در مقایسه با مصارف میانگین و بهترین عملکرد کارخانه ها ارائه می دهد. بهترین عملکرد بیانگر مینیمم انرژی مصرف شده برای ذوب کردن یک تن از فلز در حالت های مختلف کارکرد کارخانه است یا به بیان دیگر این بهترین عملکرد واقعی کارخانه است که همانطور که ذکر شد مقادیری بزرگتر از مینیمم تئوری دارد.

۶-۲. مقایسه ای بین مصارف کوره های مختلف

در این قسمت به منظور مقایسه بین مصارف انرژی انواع کوره ها، داده های گزارش شده برای کوره های مختلف را با هم مقایسه می کنیم. بر همین اساس در جدول ۲-۲۸ مقایسه ای بین انرژی مورد نیاز برای کوره های کوپل و کوره های القایی انجام شده است.

جدول ۲-۲۸. مقایسه بین مصارف انرژی کوره های کوپل و کوره های القایی [۱۳]

نوع کوره	انرژی ویژه ذوب (kwh/ton)	کل انرژی ویژه ذوب (kwh/ton)
کوره القایی با ذوب پسماند ^۱	۹۷۰	۳۰۴۵
کوره های القایی مدرن با ذوب ناپیوسته ^۲	۵۳۹	۱۶۹۱
کوره های کوپل با بازده پایین ^۳	۱۴۴۱	۱۶۸۸
کوره های کوپل با بازده بالا ^۴	۹۵۲	۱۸۷۶

مشاهده می شود که انرژی تحویل داده شده به کوره های کوپل ۵۰ تا ۷۵ درصد بالاتر از کوره های القایی است. توجه شود که در حالت کلی مقادیر انرژی مصرفی ارائه شده برای کوره های کوپل بیشتر از مقادیر مربوط به کوره های القایی است، زیرا در مقادیر مربوط به کوره های القایی هزینه های صرف شده در نیروگاه برای تامین برق لحاظ نشده است. بنابر این برای مقایسه صحیح داده های مربوط به کوره های القایی با کوره های کوپل باید انرژی های مصرفی اولیه (کک، الکتریسیته و...) نیز لحاظ شوند. بدین منظور راندمان نیروگاهی در نظر گرفته می شود و مقادیر انرژی مصرفی القایی بر بازده نیروگاه تولید کننده برق تقسیم شده تا کل انرژی مصرفی در نظر گرفته شود. بر همین اساس در ستون سوم کل انرژی ویژه ذوب با در نظر گرفتن مصارف اولیه انرژی آورده شده است که نشان می دهد مصرف کلی کوره های القایی در مقایسه با کوره های کوپل مقادیر بیشتری دارند [۱۳].

در جدول ۲-۲۹ مقایسه ای بین عملکردهای عمومی کوره ها از نظر مصرف انرژی با بهترین عملکردهای گزارش شده، انجام گرفته است. مرکز تحلیل و انتشار تکنولوژی های نوین انرژی، در هلند، دستورالعملی در زمینه مصارف انرژی در تکنولوژی های نوین ریخته گری منتشر کرده که این مقادیر در جدول زیر آورده شده اند تا با بهترین

¹ Induction Heel Melting

² Modern Induction Batch Melting

³ Low-Efficiency Cupola

⁴ High-Efficiency Cupola

عملکردهای موجود در امریکا مقایسه شوند.

جدول ۲-۲۹. مقایسه مصارف ویژه انرژی برای کوره های مختلف [۱۹]

بهترین عملکردهای امریکا MBTU/ton	محدوده انرژی ویژه تعیین شده		نرخ ذوب (Tons/hour)	نوع فلز	نوع کوره
	Kwh/ton	MBTU/ton			
۱/۵۴	۴۴۶/۴۳-۵۳۵/۷۱	۱/۵۲-۱/۸۳	۱۱۲	فولاد	قوس الکتریکی
۲/۸۱-۴/۰۳	۸۳۸/۱۸-۱۴۳۰/۱۸	۲/۸۶-۴/۸۸	۵/۶-۲۲/۴	چدن	کوپل
۱/۸۴-۳/۳۱	۵۳۵/۷۱-۷۱۴/۲۹	۱/۸۳-۲/۴۴	۱/۱۲-۱۱/۲	فولاد و چدن	القایی بدون هسته
-	۱۲۵۰-۲۴۷۲	۴/۲۳-۸/۴۶	۲/۲۴-۲۲/۴	چدن	دوار ^۱

همان طور که مشاهده می شود داده های ارائه شده به بهترین عملکردهای موجود بسیار نزدیک هستند.

در جدول ۲-۳۰ مقایسه ای بین کوره های مختلف از نظر کاربرد، میزان تلفات و بازده حرارتی انجام شده است.

توجه شود که مقادیر مصرف انرژی بدون در نظر گرفتن راندمان نیروگاهی آورده شده اند.

جدول ۲-۳۰. مقایسه کوره های مختلف از نظر تلفات و بازده حرارتی [۱۲]

تلفات ذوب	بازده حرارتی	حداکثر ظرفیت	موارد کاربرد	نوع کوره
٪ ۳-۱۲	٪ ۴۰-۵۰	۲۰ Tons/hr	چدن	کوپل
٪ ۵-۸	٪ ۳۵-۴۵	۱۰۰ Tons	فولاد	قوس مستقیم
٪ ۱-۲	٪ ۵۰-۷۰	۵۰ Tons	چدن	القایی
٪ ۲-۳	٪ ۵۰-۷۰		فولاد	

¹ Rotary

مراجع

- [1] GEMCO, International Financial Corporation, "Resource Efficiency in the Ferrous Foundry Industry in Russia : Benchmarking Study", 2011.
- [2] U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, "Available And Emerging Technologies For Reducing Greenhouse Gas Emissions From The Iron And Steel Industry", October 2010.
- [3] K.K.Singhal , "Energy Efficiency in Steel Industry in Steel Industry and clean Development Mechanism(CDM)".
- [4] www.wikipedia.org, OEE and TEEP
- [5] U.S. Department Of Energy, Office Of Industrial Technologies, "Energy And Environmental Profile Of The U.S. Metalcasting Industry".
- [6] "Natural Resources OF CANADA(NRCAN)" , 2003.
- [7] Seweryn Jarza, Polish Journal Of Management Studies, "Importance Of Energy Management In Foundries", 2011.
- [8] "Best Available Techniques Reference Document On The Production Of Iron And Steel", December 2001.
- [9] U.S. Department Of Energy, Energy Information Administration , "Metal Casting Annual Report", 2004.
- [10] Energy Center Of Wisconsin, "The Foundry Industry", Report 155-1 , May 1997.
- [11] The Energy conservation Center Japan, "Seminar On Energy Conservation In Iron Casting Industry", 1998.
- [12] BCS Incorporated, "Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry", Prepared for ITP Metal Casting, November 2005.
- [13] J. F. Schifo & J.T. Radia, "Theoretical/Best Practice Energy Use In Metalcasting Operations KERAMIDA Environmental", Inc. Indianapolis, May 2004.
- [14] School of Environment, Resources and Development Asian Institute of Technology, "Energy Efficiency And Environmental Externalities In The Iron And Steel Industry", Bangkok, 1997.
- [15] "Guide to Energy Efficiency Opportunities in Canadian Foundries", available on oee.nrcan.gc.ca/cipec/ieep/newscentre/foundry/index.cfm
- [16] Katja Schumacher and Jayant Sathaye, "India's Iron and Steel Industry: Productivity, Energy Efficiency and Carbon Emissions", Environmental Energy Technologies Division, October 1998
- [17] "American iron & steel institute".
- [18] Dr.M.Arasu, L.Rogers Jeffrey, "Energy Consumption Studies In Cast Iron Foundries" ,57th Indian foundry congress,2009.
- [19] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, CADDET energy efficiency, "Learning from Experiences with Process Heating in the Metals Industry" ,Analyses Series No. 11, page 117,Netherlands, October 1993.