# خواص فیزیکی ـ شیمیایی و سرعت اکسیداسیون پلت ها و بریکت های آهن اسفنجی تولیده شده در مجتمع فولاد اهواز

ناصر توحیدی ـ دانشکدهٔ فنی ، دانشگاه تهران

**چکیده**

برای بررسی سرعت اکسیداسیون آهن اسفنجی و شناخت مکانیسم آن ، آگاهی ازخواص فیزیکی ـ شیمیایی پلت ها و بریکت ها ضروریست . دراین مقاله نتایج تحقیقاتی که بر روی پلت ها و بریکت های آهن اسفنجی محتمع فولاد اهواز انجام گشته ، گزارش شده است . ضمن ارائه خواص فیزیکی ـ شیمیایی پلت ها و بریکت ها ، سرعت اکسیداسیون آنها در هوا بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجهٔ سانتیگراد نیز اندازه گیری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است . مضافا " اینکه اساس نظری و قانون مندی سرعت‌اکسیداسیون آهن اسفنجی در هوا نیز تشریح گشته است .

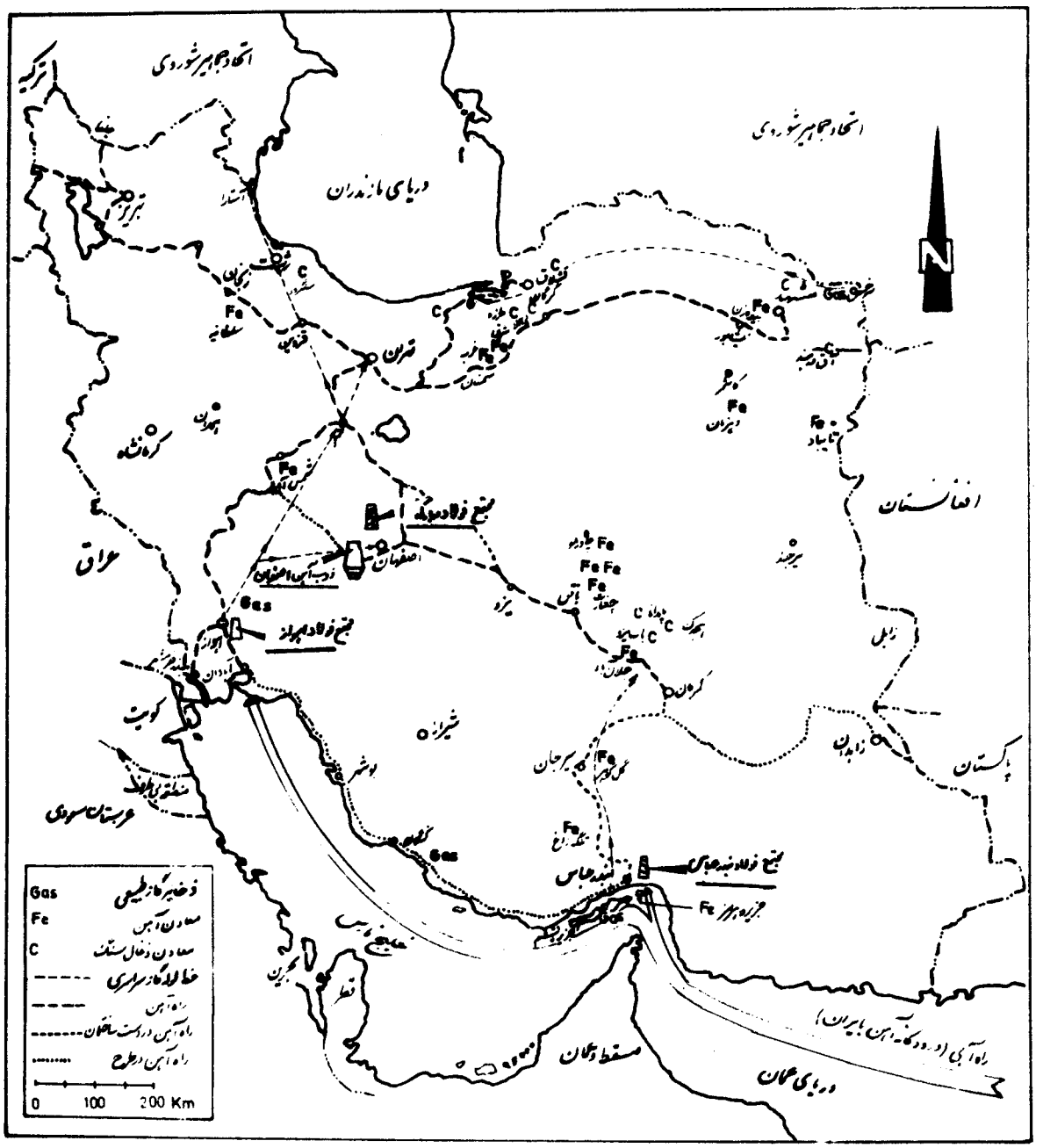
**مقدمه**

در دههٔ اخیر ،در ایران ، سرمایه گذاری های‌وسیعی جهت تولید آهن و فولادبه روش های احیای‌مستقیم ، انجام گرفته‌ومجتمع تولیدفولاد اهواز ، تاءسیس شده و ایجادمجتمع های تولید فولاد بندرعباس و مبارکه ( اصفهان ) ، در دست بررسی‌می‌باشند .حتی واحد احیای مستقیم شمارهٔ یک مجتمع فولاد اهواز ـ واحدپورفر (Purofer) ،مدتی مشغول‌تولید پلت و بریکت آهن اسفنجی بوده است . سایر واحدهای آن مجتمع در شرف راه اندازی و تکمیل می‌باشند .در شکل ۱ محل کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان ، مجتمع های تولید فولاد اهواز ، بندرعباس و مبارکه (اصفهان)و همچنین معادن‌سنگ آهن ، ذغال سنگ و گاز طبیعی ، آورده شده است .

نظربه اینکه آگاهی از خواص کانه های آهن از نقطه نظر قابلیت احیا ، برای‌شناخت مکانیسم احیا ، در واحدهای صنعتی ضروری است لذا گروه مهندسی متالورژی وگداز فلزات در دانشکدهٔ فنی از سال ۱۳۵۱ شمسی تحقیقاتی را دراین زمینه ،شروع کرده است به این امید که نتایج حاصل از انجام این پژوهش هامورداستفادهٔ‌صنایع تولید آهن و فولادایران ، قرار گیرد .

این مقاله مربوط به قسمتی از طرح "بررسی خواص کانه های آهن ایران ازنقطه نظر قابلیت احیای مستقیم " می‌باشدکه درگروه متالورژی دانشکدهٔ فنی انجام شده‌است . در قسمت اول این طرح،بررسی نظری و نتایج تحقیقات‌عملی در مورد نحوهٔ‌تولید گازهای حاصل از تغییر شکل گازطبیعی و نیز قابلیت پلت (Pellet) شدن و قابلیت احیای پلت های ساخته شده از کانه های آهن ، در شرایط آزمایشگاهی ، انجام گرفته است .

گزارش قسمت اول این طرح در اسفند ماه ۱۳۵۳ شمسی ارائه گردیده [۱] و مورد تائید و تصویب شورای‌توسعه و تشویق پژوهشهای علمی وزارت علوم و آموزش عالی قرار گرفته است .ادامهٔ این طرح ، ازطرف وزارت علوم و آموزش عالی به گروه مهندسی متالورژی و گداز فلزات دانشکدهٔ فنی ، پیشنهاد و به علت نیاز شرکت ملی صنایع فولادایران به نتایج آن ، از طرف محریان‌طرح نیز مورد قبول واقع شد .



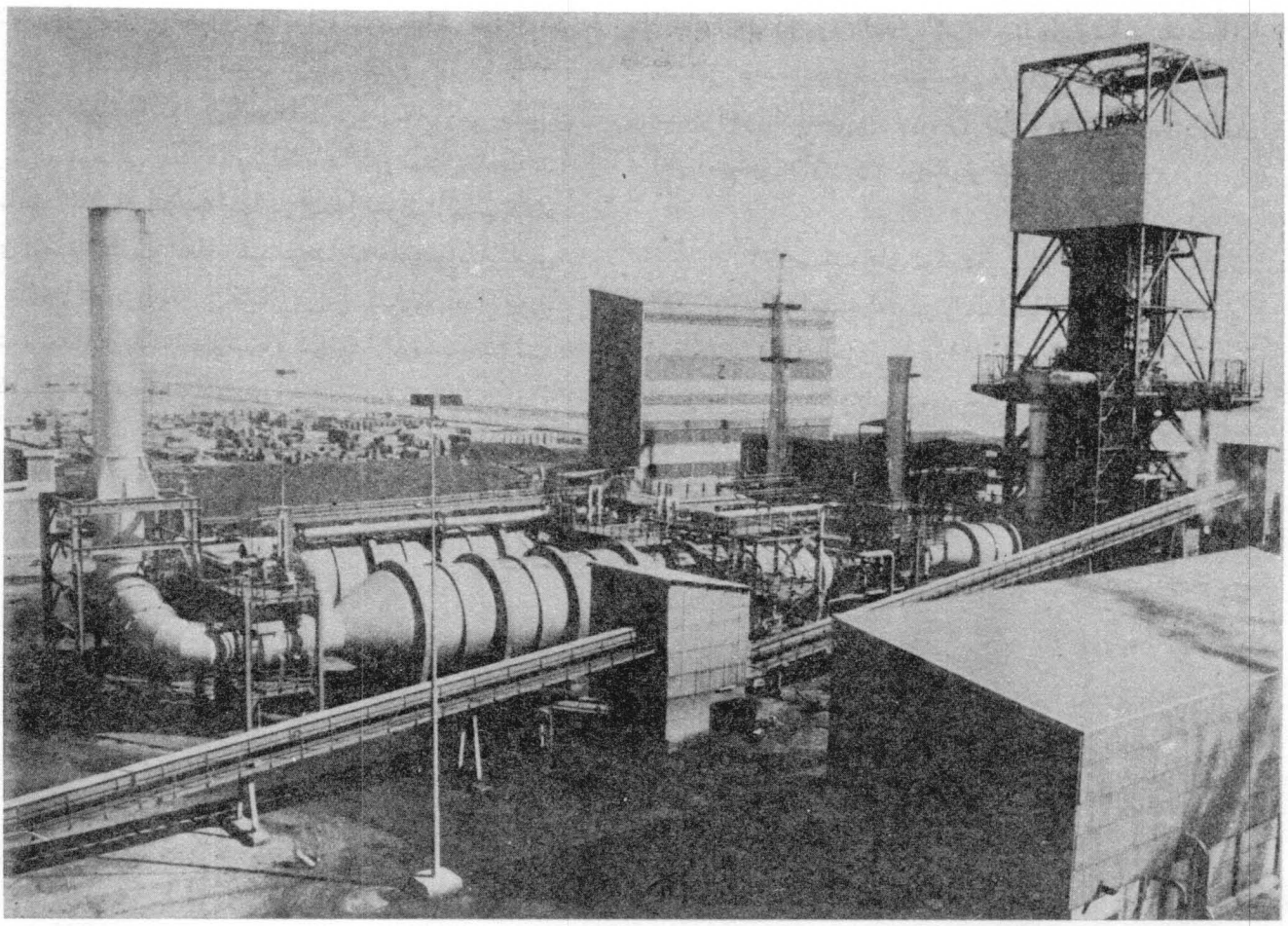

شکل ۱ ــ محل کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان، مجتمع های فولاد اهواز، بندرعباس و مبارکه (اصفهان) و نیز معادن سنگ آهن، ذغال سنگ وگاز طبیعی درایران [۲].

این گزارش به بررسی خواص فیزیکی ـ شیمیایی پلت های احیا نشده و نیز قابلیت اکسیداسیون پلت ها و بریکت های آهن اسفنجی واحدپوروفز در مجتمع فولاد اهواز اختصاص داده شده است .

واحد پوروفر در مجتمع فولاد اهواز ، براساس‌قرارداد در ۱۰ اردیبهشت ماه ۱۳۵۳ شمسی (۳۰ آوریل ۱۹۷۴ میلادی) ، بین شرکت ملی صنایع فولاد ایران و شرکت‌تیسن (Thyssen) از آلمان فدرال ، برای تولید آهن اسفنجی به روش پوروفر ، پایه ریزی شده و در اواخر اسفند ماه ۱۳۵۵ شمسی ( مارس ۱۹۷۷ میلادی) ، شروع بکار کرد و درشرایط عادی حدود ۱۰۰۰ تن بریکت آهن اسفنجی در روز تولید می‌کند . در شکل ۲ نمایی از واحد پوروفر واقع در مجتمع فولاد اهواز ، دیده می‌شود .

در واحد پوروفر مجتمع فولاد اهواز ،پلت های‌پخته به طور مداوم به‌کورهٔ احیا وارد و به وسیله گازهای حاصل از اکسیداسیون‌جزئی گاز طبیعی ،احیا و آهن اسفنجی به صورت پلت گداخته از کوره خارج و بوسیلهٔ انباره های محفوظ از هوا ،به واحدبریکت (Briqette) سازی ، منتقل‌میگردد . پلت های آهن اسفنجی درماشین های بریکت سازی بافشاری در حدود ۲۰۰ اتمسفر ، به صورت بریکت در می‌آید . سپس این بریکت های گداخته ، با آب‌سرد ، و در هوای آزاد ، انباشته می‌گردد (۳) .

نظر به اینکه گزارش کامل ، تجزیه وتحلیل‌و بحث نظری دربارهٔ کارهای انجام شده دراین طرح به‌درازا می‌انجامد ، لذا کوشش شده است‌که تا حد ممکن مطالب به اختصار نوشته شود . برای مطالعهٔ بیشتر در این زمینه به منابع ۴ تا ۱۳ مراجعه گردد .



شکل ۲ـ نمای واحد پوروفر در مجتمع فولاد اهواز (۳) .

## ۱– بررسی خواص فیزیکی – شیمیایی پلت ها و بریکت های مجتمع فولاد اهواز

شکل و ابعاد هندسی و میزان تخلخل پلت ها ، میزان پلت های ترک دار ، مقاومت پلت ها در برابراصطکاک و فشار بار ،وزن مخصوص ، میزان رطوبت ، دمای به هم جوش خوردن ذرات ، سختی و ترکیب شیمیایی پلت ها از عوامل اساسی بوده و نقش تعیین کننده یی در قابلیت احیا ، بهره دهی احیا و بالاخره پالایش آهن اسفنجی دارند .لذا این عوامل در مورد پلت های خام ، پلت های پخته و نیز پلت های احیا شده ، اندازه گیری شده است . چون پلت‌های احیا شدهٔ واحد پوروفر– در مجتمع فولاد اهواز – پرس شده و به صورت بریکت در می‌آیند و این‌عمل خود در سطح‌ویژه، در مقدار تخلخل ، در میزان رطوبت ، و از همه مهمتر در قابلیت اکسیداسیون پلت های‌آهن اسفنجی اثر گذاشته و در نتیجه قابلیت ذوب ، پالایش و میزان انرژی ضروری جهت پالایش را تغییر می‌دهند لذا اندازه گیری عوامل فوق الذکر در مورد بریکت ها نیز ، صورت گرفته است .

نظر به اینکه آزمایش‌های مربوط به بررسی خواص فیزیکی ـ شیمیایی پلت ها و بریکت ها کم‌و بیش شناخته‌شده می‌باشد ، لذا از تشریح آنها در اینجا خودداری می‌گردد . برای تجسم شکل و ابعاد هندسی نمونه های مورد آزمایش، در شکل ۳ تصویر قطعه یی کانهٔ آهن مانیتیتی ، تعدادی پلت پخته ، تعدادی پلت احیا شده و نیز چهار بریکت جدا نشده ازیکدیگر ، آورده شده است .

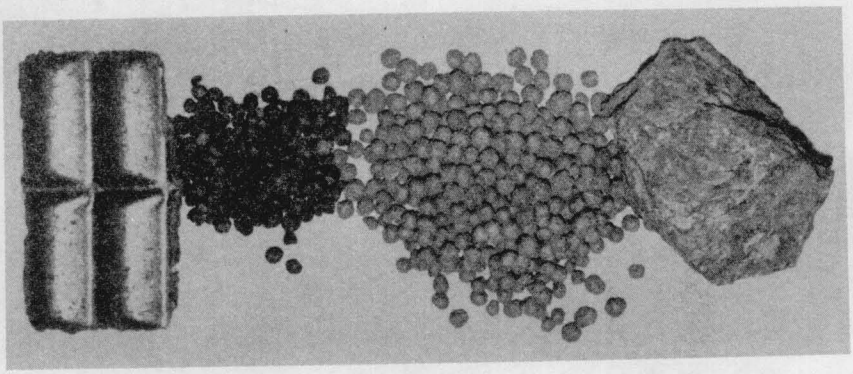
گرچه تحقیقات بر روی پلت ها و بریکت هایی انجام گرفته که به روش صحیح نمونه برداری شده اند ، ولی چون ویژگیهای آنها تابع شرائط تولید در واحد پوروفر اهواز ، بوده و نیز تابع تغییر و تحولات فیزیکی‌و شیمیایی در طول‌مدت انبار کردن آنها در هوای آزاد می‌باشد ، لذا این نتایج ممکن است با متوسط نتایج بررسی های سالیانه در آن واحد ،متفاوت باشد .لازم به‌تذکراست‌که اعداد ارائه شده در این بخش ، میانگین حداقل ده آزمایش می‌باشد .

### ۱/۱– تخلخل پلت ها و بریکت ها

میزان تخلخل پلت هاو بریکت های آهن اسفنجی به روش متعارفی و یک روش ابداعی به وسیلهٔ بررسی های متالوگرافی ، اندازه گیری شده است . در این روش ابداعی ، پس ازپرداخت سطح مقطع پلت هاو بریکت ها و عکس‌برداری از آنها ، با اندازه گیری سطوح حفره ها از یک سطح هندسی مشخص ، به روش سطح سنجی ،در صد تخلخل ، محاسبه‌شده ا ست . هر دو روش اندازه گیری تخلخل ، نتایج تقریبا" یکسانی داده اند . حد متوسط تخلخل برای پلت های‌احیا شده ( آهن اسفنجی ) ، ۳۶/۵۷ درصد و برای بریکت های آهن‌اسفنجی ، ۲۵/۷۱ درصد می‌باشد .

### ۱/۲ ـ پلت های ترک دار

پلت‌های پخته ، درفرایندا‌حیا و تبدیل به آهن اسفنجی ، شکل ظاهری خود را حفظ می‌کنند ، ولی به‌دلیل تغییر ساختمان شبکه بلوری ، درجه تراکمشان افزایش یافته ،



شکل ۳– از راست به چپ ، قطعه ای کانهٔ آهن مانیتیتی ، پلت های پخته ، پلت های احیا شده ( آهن اسفنجی ) ، و چهار بریکت جدا نشده از یکدیگر (آهن اسفنجی ) که‌در واحد پوروفر در مجتمع فولاد اهواز ، تولید شده اند .
(بزرگ نمایی : $\frac{۱}{۵}$ )

کم و بیش ترک برمی‌دارند . جهت مقایسه پلت ها ، قبل و پس از احیا ، در شکل ۴ ، تصویر پلت های پخته قبل از احیا و در شکل ۵ تصویر پلت های احیا شدهٔ (آهن اسفنجی ) واحد پوروفر اهواز ،نشان داده شده‌است .درشکل ۵ ،چندین پلت ترک دار نیز دیده می‌شود .

میزان عددی پلت های (آهن اسفنجی ) ترک دار از کل پلت ها ، ۳۷/۴۱ درصد و میزان وزنی آنها ۳۹/۳۲ درصد می‌باشد .

**۱/۳ ـ مقاومت پلت ها در برابر اصطکاک**

غبار ناشی از اصطکاک پلت های آهن اسفنجی با یکدیگر ، در آسیای میله ای گردان ، اندازه گیری شده است . این آسیا دارای محفظه یی فولادی با قطر ۳۰ سانتیمتر وطول ۵۰ سانتیمتر بوده و حاوی ۱۰ میلهٔ فولادی با قطر ۱/۵ سانتیمتر و طول ۴۵ سانتیمتر می‌باشد . سرعت چرخش این آسیا ، سه دور در دقیقه است .

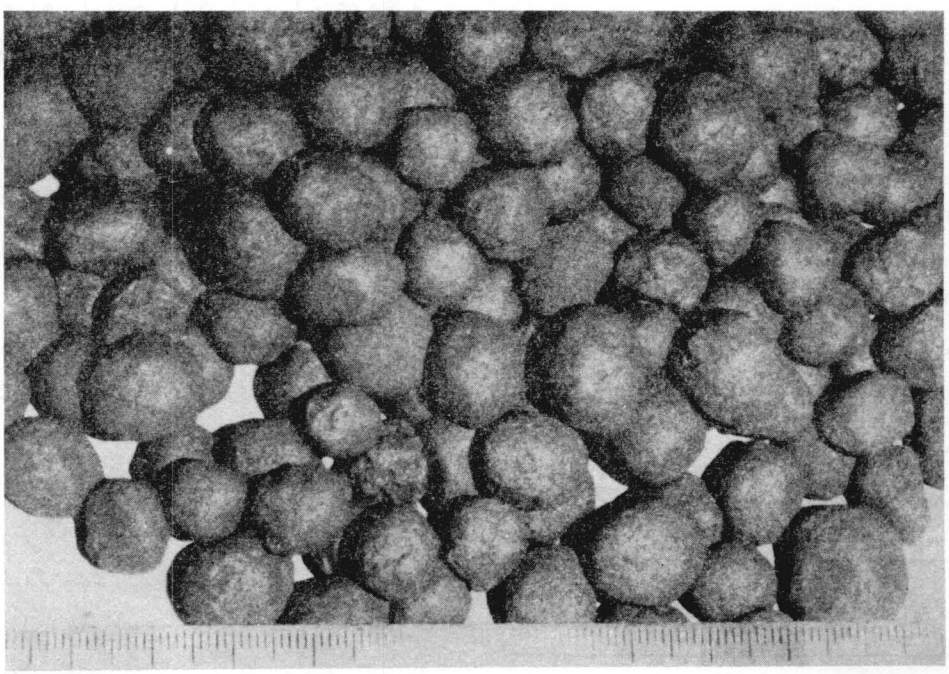
میزان غبارتولید شده در اثر چهار ساعت چرخش ۴/۳۳ درصد و پس ازشش ساعت چرخش ۵/۷۵ درصد ، اندازه‌گیری شده است .

**۱/۴ ـ مقاومت پلت ها در برابر فشار بار**

نیروی متوسط، جهت خرد کردن یک پلت آهن اسفنجی (شکل ۵) ، ۴۵۶ کیلوگرم می‌باشد . طبق محاسبات، ستون بارورد بر یک پلت در کورهٔ انتخابی سانیو (Sanyo) ، ۴۵۶ کیلوگرم است . این مقدار کمی بالا به نظر می‌رسد .

**۱/۵ ـ وزن مخصوص پلت ها و بریکت ها**

همانطور که قبلا " اشاره شد ، پلت های آهن اسفنجی در واحدپوروفر اهواز ، به دلائل مختلف که ذکر آنها در اینجا لازم نیست ، فشرده شده وبه شکل بریکت در می‌آیند . در شکل ۶ تصویر چهار بریکت آهن اسفنجی جدا نشده از یکدیگر ،دیده می‌شود .گرچه شکل هندسی بریکت‌ها به طور کلی با پلت ها متفاوت است ، مع الوصف شکل هندسی پلت ها در داخل بریکت ، کاملا " محفوظ مانده و فقط پلت های سطح خارجی بریکت تغییر شکل اساسی ، کرده اند . در شکل ۷ تصویر مقطع یک بریکت آهن اسفنجی تولید شده در واحد پوروفر مجتمع فولاد اهواز ، دیده می‌شود .



**شکل ۴ ـ تصویر پلت های پختهٔ واحد پوروفر در مجتمع فولاد اهواز**

( بزرگنمایی : $\frac{۱}{۱}$ )

شکل ۵ ــ تصویر پلت های احیا شدهٔ (آهن اسفنجی) واحد پوروفر در مجمع فولاد اهواز
(بزرگنمایی : $\frac{1}{1}$)

وزن مخصوص ظاهری پلت های پخته (شکل۴) ، ۴/۱۳ ،پلت های احیاشده به صورت آهن‌اسفنجی (شکل۵) ، ۴/۷۶ و بریکت های آهن اسفنجی (شکل۶) ،برابر ۵/۳ گرم برسانتیمتر مکعب بدست آمده است .

**۱/۶ــ رطوبت پلت ها**

آگاهی از میزان رطوبت پلت های پخته ، در فرایند احیا و رطوبت پلت‌های احیا شده درفرایندذوب و پالایش ، بسیار مهم می‌باشد . میزان رطوبت پلت های پخته حدود ۱/۰۳ درصد و میزان رطوبت پلت های احیا شده (آهن اسفنجی) ، حدود ۰/۰۵ درصد اندازه گیری شده است .

**۱/۷ــ دمای جوش خوردن پلت ها به یکدیگر**

درجهٔ حرارتی که پلت های پخته ، در بستری ثابت و محفوظ ازهوا به یکدیگر جوش می‌خورند حدود ۱۰۱۰درجه سانتیگراد ودر مورد پلت های آهن اسفنجی ۱۰۰۵ تا ۱۰۱۰ درجه سانتیگراد ، اندازه گیری شده است . گرچه شرایط جوش خوردن پلت ها به یکدیگر در کورهٔ احیای واحد پوروفر اهواز ، که پلت ها دائم در حرکتند ، با شرائط فوق الذکر ، اساسا " متفاوت است ،مع الوصف آگاهی از این دما برای ارزیابی مرغوبیت پلت ها ، مهم می‌باشد .

**۱/۸ــ سختی بریکت ها**

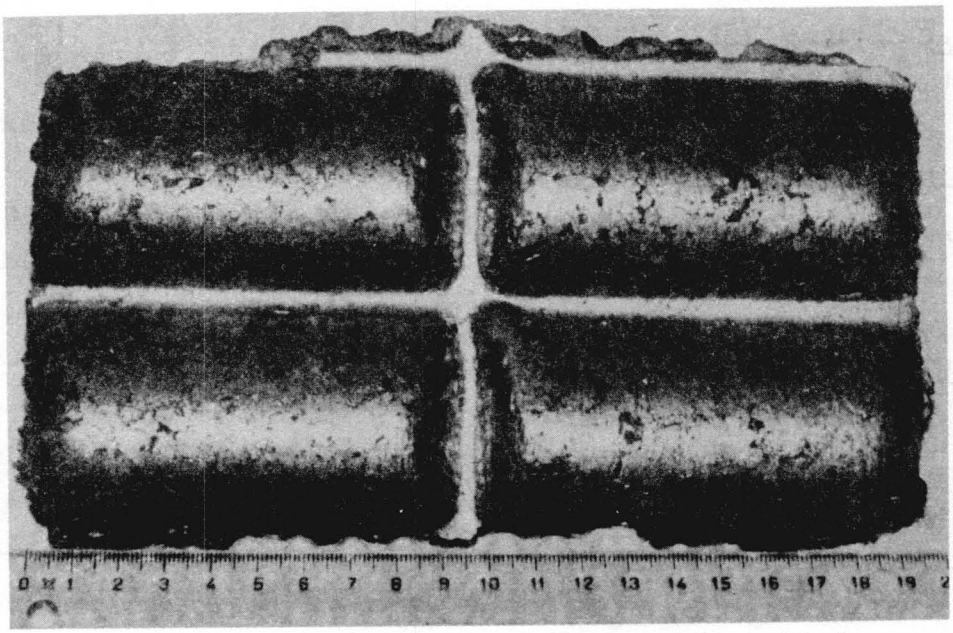
میانگین سختی پلت های وسط بریکت ( شکل ۷) ، ۱۰۲/۳ ، در مرز مشترک دو پلت ، ۸۱/۰۷ و در مرز مشترک سه پلت ، کمتر از ۴۰ ویکرز (Vickers) می‌باشد .

**۱/۹ــ ترکیب شیمیایی پلت آهن اسفنجی**

درصد متوسط ترکیب شیمیایی پلت ها ، به قرار جدول زیر می‌باشد :

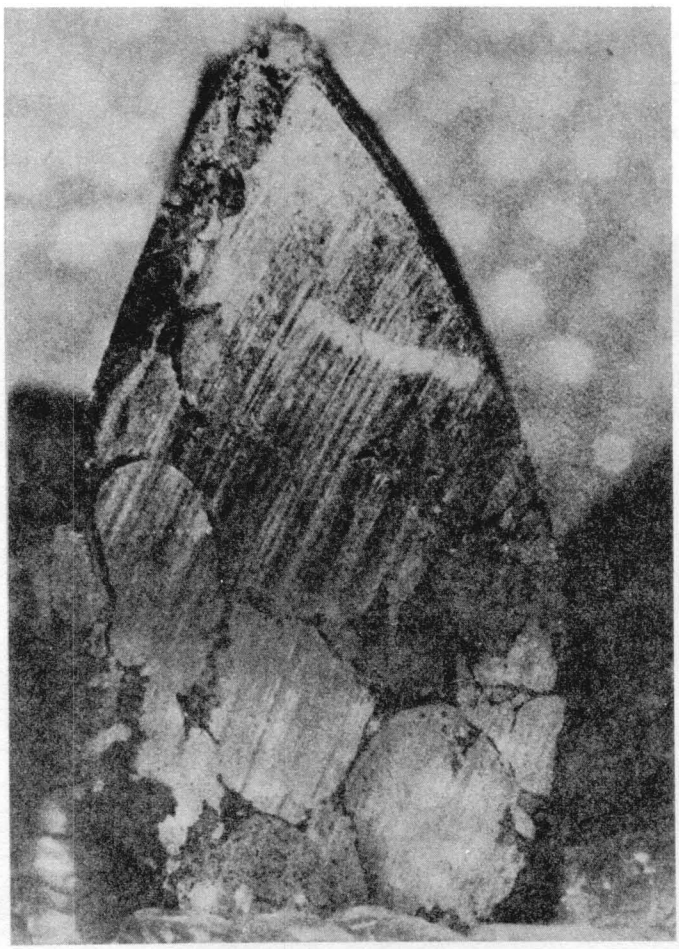
| درجهٔ فلز شدن | آهن کل | آهن فلزی | کربن | گوگرد |
|---|---|---|---|---|
| ۹۲/۲۳ | ۹۱/۸۶ | ۸۴/۶۶ | ۱/۴۷۳۸ | ۰/۰۰۳۱ |

توضیح اینکه درجهٔ فلز شدن (Metalization) پلت ، نسبت آهن فلزی به آهن کل در پلت ، می‌باشد .




**شکل ۶ ـ تصویر چهار بریکت جدا نشده از یکدیگر که درواحد پوروفر مجتمع فولاد اهواز تولید شده است .**

**( بزرگنمایی : $\frac{۱}{۱/۵}$ )**



شکل ۷ ـ تصویر مقطع یک بریکت آهن اسفنجی ، که در واحد پوروفر مجتمع فولاد اهواز تولید شده است .

( بزرگنمایی : $\frac{۲}{۱}$ )

## ۲ــ بررسی علل تغییر ویژگیهای مکانیکی پلت ها در روند احیا

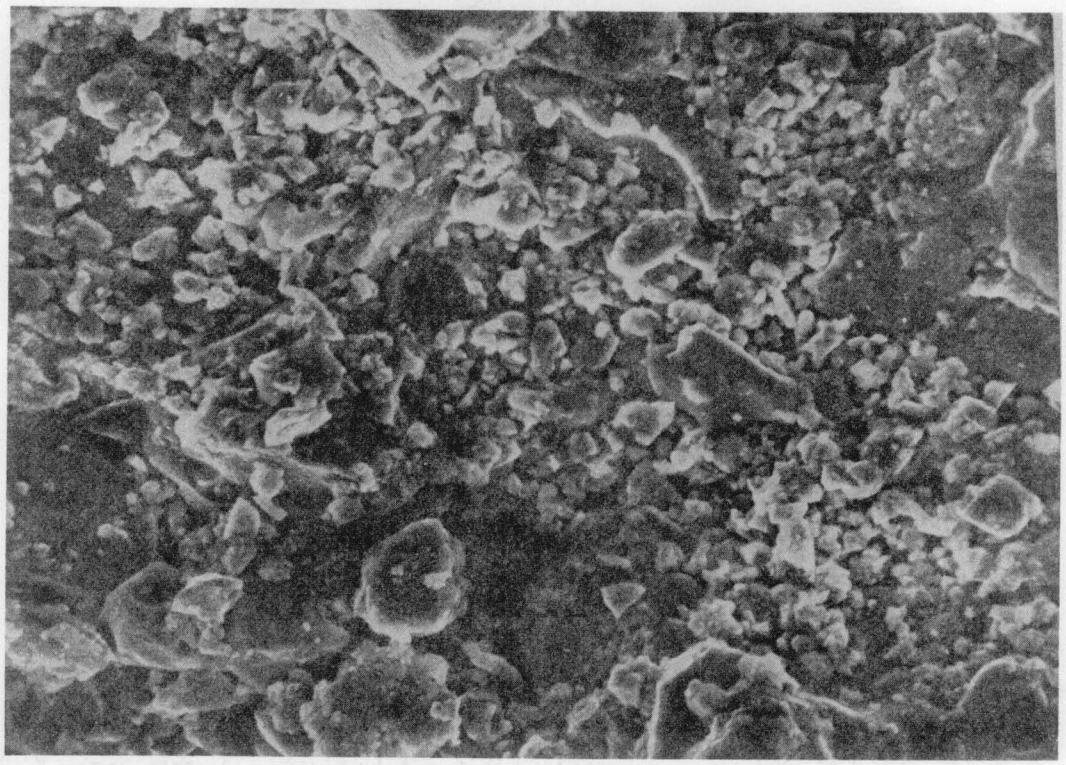
می‌دانیم که پلت ها از ذرات کانه های آهن دانه بندی شده، ناخالصی (گانگ) های کانه، مواد کمک ذوب، مواد چسبنده وغیره، تشکیل شده اند. در فرایند پلت سازی، آب جذب شده باعث پیوستن ذرات پلت به یکدیگر می‌شود ولی در فرایند پختن پلت ها، مواد چسبنده عامل جوش خوردن ذرات پلت ها به یکدیگر و درنتیجه افزایش مقاومت مکانیکی پلت ها، می‌باشند. این عملکرد، علت تغییرخواص فیزیکی ــ شیمیایی پلت ها می‌باشد.

شکل های ۸و۹ تصویر بافت پلت های پخته را در سطح خارجی پلت نشان می‌دهد که به وسیله میکروسکوپ الکترونی‌روبیدنی (Scanning)ءگرفته شده است. ملاحظه می‌گردد که ذرات پلت، در ظاهر به صورت مجزا در روی یکدیگر قرار دارند در صورتی که در حقیقت کم و بیش به یکدیگر جوش خورده اند.

در اینجا لازم است اشاره گردد که در روند احیا، اکسیژن اکسیدهای آهن حذف و فقط آهن و ناخالصی های کانه، باقی می‌مانند. توضیح اینکه نوع بافت آهن‌اسفنجی حاصل ازاحیای پلت پخته، تابع روند احیا، دینامیک جریان گاز، فشار گاز و فشار بار کوره، نوع گاز احیا کننده، ترکیب شیمیایی و شکل بلوری مواد اولیهٔ پلت و غیره، می‌باشد.

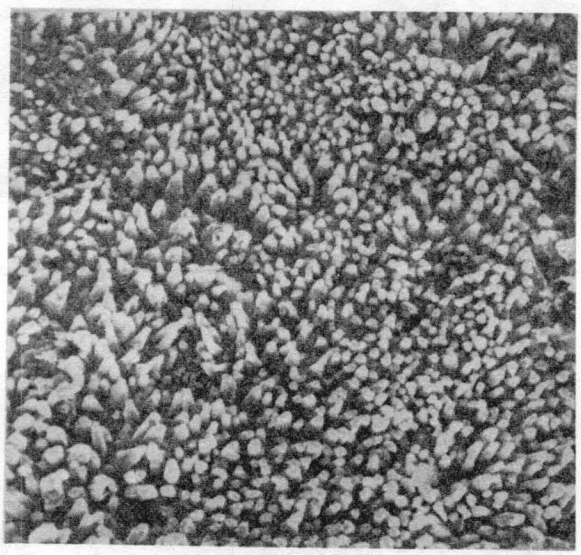
در شکل های ۱۰ و ۱۱ تصویر بافت آهن اسفنجی سطح خارجی پلت ها را نشان می‌دهد، که از نوع بخصوصی پلت خام، ساخته و پخته شده و سپس تحت شرایط‌ویژه یی، درفرایند احیا به آهن اسفنجی، تبدیل شده است. ازمقایسهٔ شکل‌های ۸و۹ با شکل های ۱۰و ۱۱، وجه تمایز بافت ذرات سطح خارجی پلت پخته، قبل از احیا با بافت پلت آهن اسفنجی پس ازاحیا، مشخص می‌گردد. تغییر بافت ذرات‌پلت درفرایند پخت و نیزاحیا، خود دلیل دیگری برای تغییر ویژگی های پلت می‌باشد.

آنچه از مقایسه این تصاویر نمیتوان برداشت کرد، تغییر شکل شبکهٔ بلوری و انبساط و انقباض ناشی از تغییر ساختمان‌بلوری مانیتیت به هماتیت در روند پخت پلت خام وتغییر شبکه بلوری هماتیت به مانیتیت، مانیتیت به وستیت (Wustite) و وستیت به آهن، در روند احیا می‌باشد که در مقاومت پلت ها تاثیر زیادی برجامی‌گذارد. ترک‌هایی که درصورت‌ظاهرپلت‌هامشاهده می‌گردند (شکل۵)، و ناءثیر



شکل ۸ ــ تصویر بافت ذرات پلت پخته ( بزرگنمایی: $\frac{1000}{1}$ ).

شکل ۹ ـ تصویر بافت ذرات پلت پخته ( بزرگنمایی : $\frac{5000}{1}$ )



شکل ۱۰ ـ تصویر بافت آهن اسفنجی ( بزرگنمایی $\frac{1000}{1}$ )

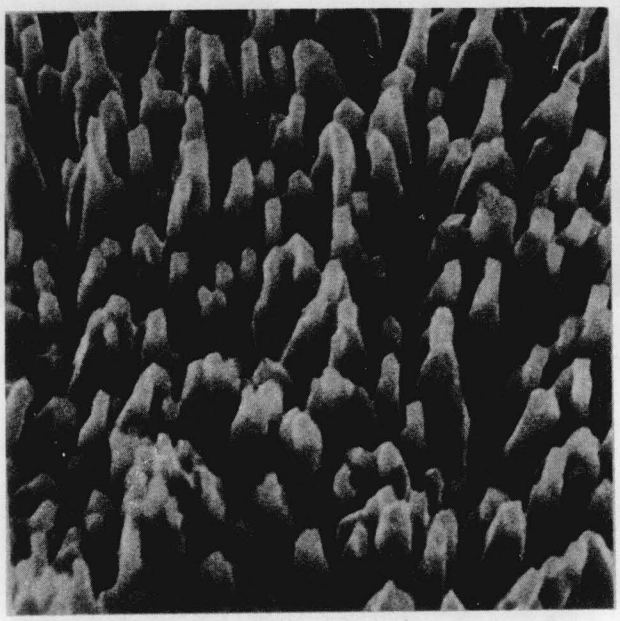
نامطلوبی در مقاومت مکانیکی پلت ها دارند ، براساس نظریه ای ، به علت تغییر ساختمان بلوری فوق الذکر ، پدید می‌آیند .

**۳ـ بررسی اکسیداسیون پلت ها و بریکت ها**

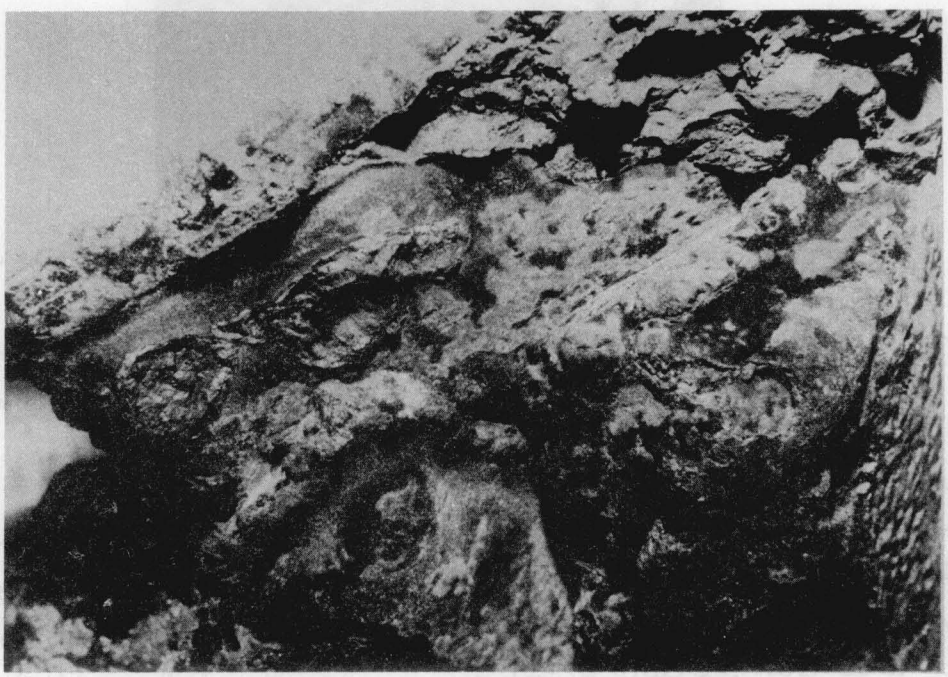
میزان‌اکسیداسیون پلت‌هاو بریکت های‌آهن اسفنجی واحد پوروفر ،در مجتمع فولاد اهواز ، در حین خروج از کورهٔ احیا ، هنگام بارگیری در کورهٔ ذوب و پالایش و بالاخره در هنگام‌حمل ونقل و انباشت و برداشت ،مهم بوده و دربرآورد هزینهٔ تولید فولاد ، عامل شایان توجهی است.در صورت‌اکسیداسیون آهن اسفنجی ،اکسیژن اضافی می‌بایستی در فرایند پالایش مجددا " احیا شده و طولانی شدن زمان پالایش،باعث افزایش مصرف‌عامل‌احیا کنندهضروری ،فزونی افت های حرارتیو بالاخره افزایش هزینه تولید فولاد ، می‌گردد . گرچه بریکت های آهن اسفنجی از نقطه نظر ، قابلیت اکسیداسیون نسبت به پلت ها ، مقاوم(Passive) ترمی‌باشند ،مع الوصف بعضی اوقات آنها نیز حتی درهوای معمولی و دمای محیط، خودبه خود سوخته و اکسیده

می‌گردند، در شکل ۱۲ تصویر یک چنین نمونه یی از بریکت های آهن اسفنجی واحد پوروفر، در مجتمع اهواز دیده می‌شود.

برای کُند کردن واحتمالا " جلوگیری از اکسیده شدن آهن اسفنجی، باید نخست سرعت اکسیداسیون پلت و بریکت آهن اسفنجی را مورد آزمون قرار داد تا به علل مکانیسمهی برد. در آن صورت است که می‌توان پدیدهٔ اکسیداسیون آهن اسفنجی را کنترل نمود.



شکل ۱۱– تصویر بافت آهن اسفنجی ( بزرگنمایی : $\frac{5000}{1}$ )



شکل ۱۲ – تصویر سطح بیرونی بریکت آهن اسفنجی اکسیده شده در هوا ( بزرگنمایی : $\frac{5}{1}$ )

### ۳/۱ـ روش سنجش سرعت اکسیداسیون

برای‌بررسی سرعت‌اکسیداسیون پلت هاو بریکت‌های آهن اسفنجی ، به علت محدودیت ابعاد هندسی نمونه هـا و نیز تجهیزات آزمایشگاهی ، تغییرات وزنی برحسب زمـان اکسیداسیون ،درکوره های مقاومت الکتریکی‌و کوره های‌القائی انجام شده است . در شکل ۱۳ طرح چگونگی سنجش تغییرات وزنی بریکت ها در کورهٔ القائی و در شکل ۱۴ طرح چگونگی سنجش تغییرات وزنی پلت ها در کورهٔ مقاومت الکتریکی‌رسم گردیده است . گرچه سنجش سرعت اکسیداسیون نمونه ها در دو کورهٔ مذکور از نقطه نظر اصولی یکسان است ولی اندازه گیری اکسیداسیون پلت ها ، فقط در کورهٔ مقاومت الکتریکی‌و اندازه گیری اکسیداسیون بریکت ها ، فقط در کورهٔ القائـی امکانپذیر بوده است .

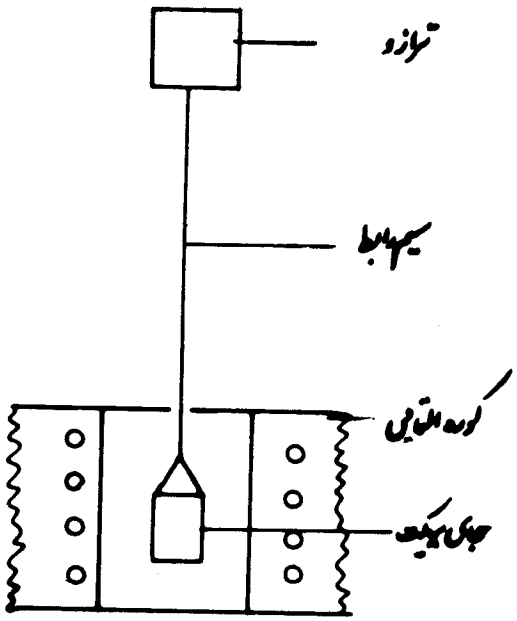
درهر دو کوره اکسیداسیون به طور دائم اندازه‌گیری شده است . البته به منظور کنترل سرعت اکسیداسیون ، چند نمونه به طور غیرمداوم در کورهٔ مقاومتی‌نیز اکسیده شده کـه نتایج تقریبا " یکسانی داشته است .

### ۳/۲ـ نتایـــج آزمایش ها :

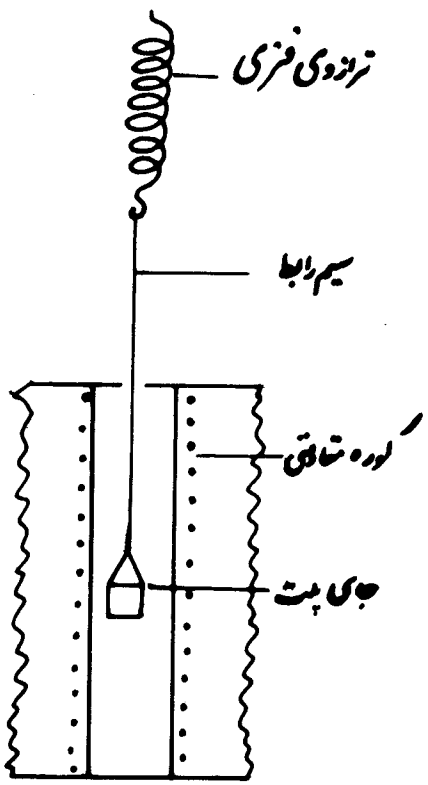
با آگاهی از وزن اولیه ($m^{o}$)و سطح هندسی($S^{o}$)و با اندازه گیری تغییرات وزنی پلت و یا بریکت آهن اسفنجی برحسب زمان (t) ، در هوا و در درجات مختلف حرارت، مقدار اکسیداسیون نمونه ها ،اندازه گیری شده است . درشکل ۱۵ طرح تغییرات وزنی یک نمونه برحسب زمان ، رسم‌گردیده است .

پیش بینی می‌شده که‌افزایش وزن نمونه ، از ابتدای انجام آزمایش، همانند منحنی خط چین برحسب زمان تغییر کند ،در صورتی که می‌بینیم چنین نبوده و افزایش وزن نمونه پس‌از مدتی ،شروع گردیده است (منحنی پیوستهٔ شکل۱۵) . به عبارت دیگر علی رغم‌تاءمین شرایط‌اکسیداسیون ،افزایش وزن نمونه ، پس‌از مدتی و بر طبق قانون مندی خاصی‌انجام می‌گردد . نظر به اینکه در لحظات نخست آزمایش ،به علـت وجود بخار آب ، مشکل تولید جوانهٔ آهن و غیره،اعـداد اندازه گیری شده قابل اطمینان نمی‌باشند ، لذا از ارزیابـی سرعت اکسیداسیون در لحظات نخست آزمایش، چشم پوشی شده است .

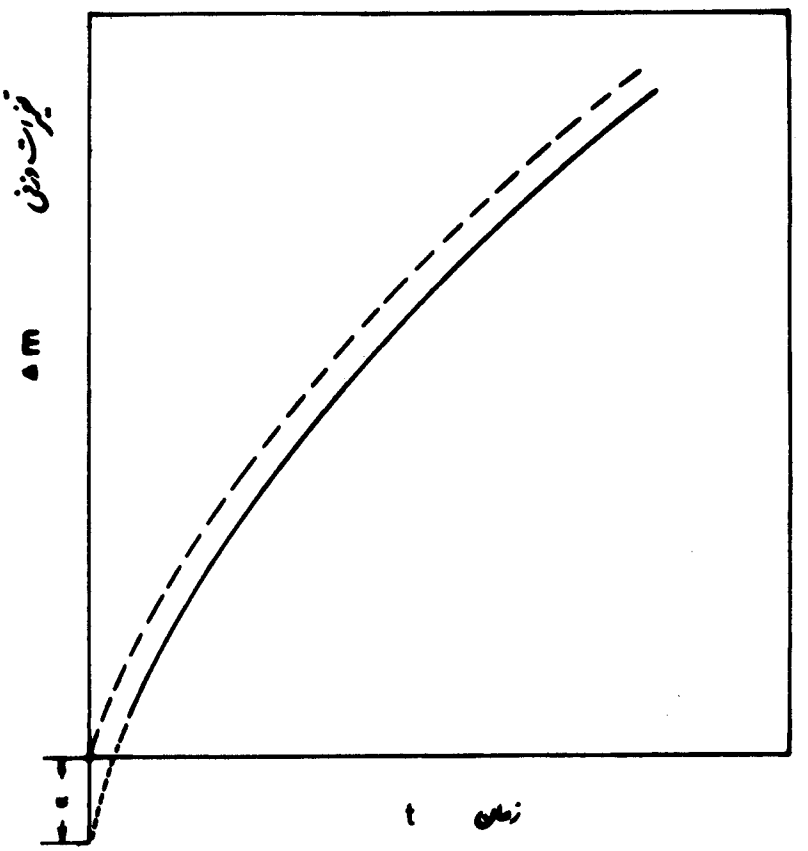
با در نظر گرفتن اینکه در عمل ، مدت زمـان اکسیداسیون پلت هاو بریکت ها ،طولانی ولی درجه حرارت پائین است ، لذا میزان اکسیداسیون ، چندان زیادنیست و بدینجهت است که آزمایش ها تا درجه اکسیداسیون بـالا ، ادامه داده نشده است .




شکل ۱۳ ـ طرح چگونگی سنجش تغییرات وزنی بریکـت برحسب زمان در کورهٔ القائی .




شکل ۱۴ـ طرح چگونگی سنجش تغییرات وزنی پلت برحسب زمان در کورهٔ مقاومت الکتریکی .




شکل ۱۵ ــ طرح تغییر وزن نمونه ها برحسب زمان در دما و فشار ثابت .

چون سطح ویژهٔ نمونه ها در سرعت اکسیداسیون موءثر و ضمناً کمیت آن نامعلوم بوده است ، لذا تغییرات وزنی ، برحسب‌وزن اولیه و سطح هندسی نمونه ها برحسب زمان یعنی :

$$\frac{\Delta m}{m^o} \; 100 \quad \frac{1}{S^o} = f\,(t),$$

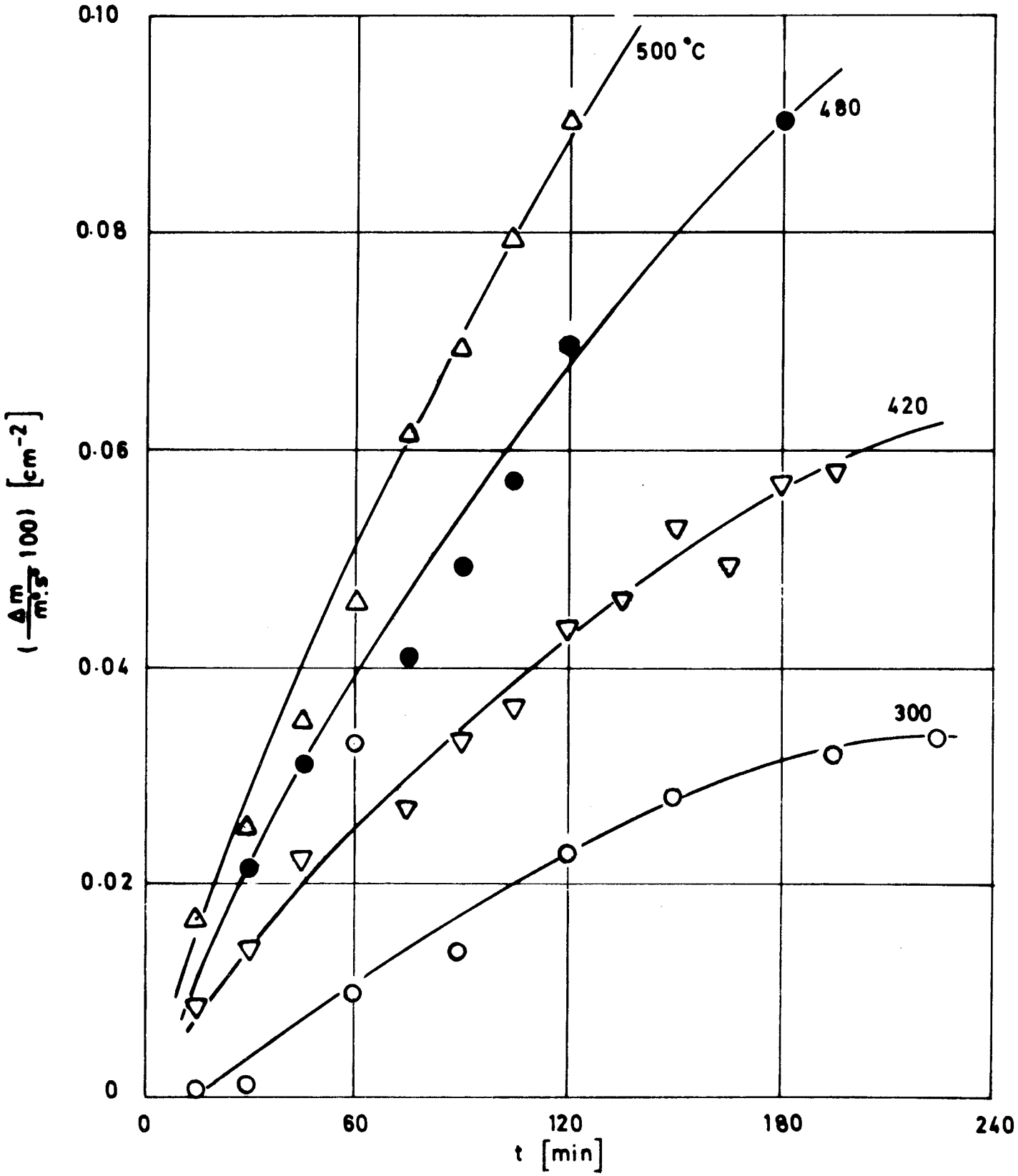
محاسبه و رسم گردیده است .

شکل۱۶ ،منحنی تغییرات درصدافزایش وزن‌بریکت‌های آهن اسفنجی ،بازاء واحد سطح هندسی برحسب زمان‌در هوا برای درجات مختلف حرارت،رسم گردیده است . شکل ۱۷منحنی تغییرات‌درصد افزایش وزن‌پلت‌های آهن‌اسفنجی ، بازاءواحد سطح هندسی برحسب زمان‌در هوابرای درجات مختلف حرارت را نشان می‌دهد . از مقایسهٔ شکل های ۱۶ و ۱۷برداشت می‌گردد که ظاهراً سرعت اکسیداسیون بریکت‌ها از سرعت اکسیداسیون‌پلت ها بازاء واحد سطح در دما و فشار هوای یکسان ،بیشتر است .این تضاداز آنجا ناشی می‌شود که در محاسبهٔ‌سرعت ،سطح هندسی بریکت ها و پلت ها ،منظور شده است .

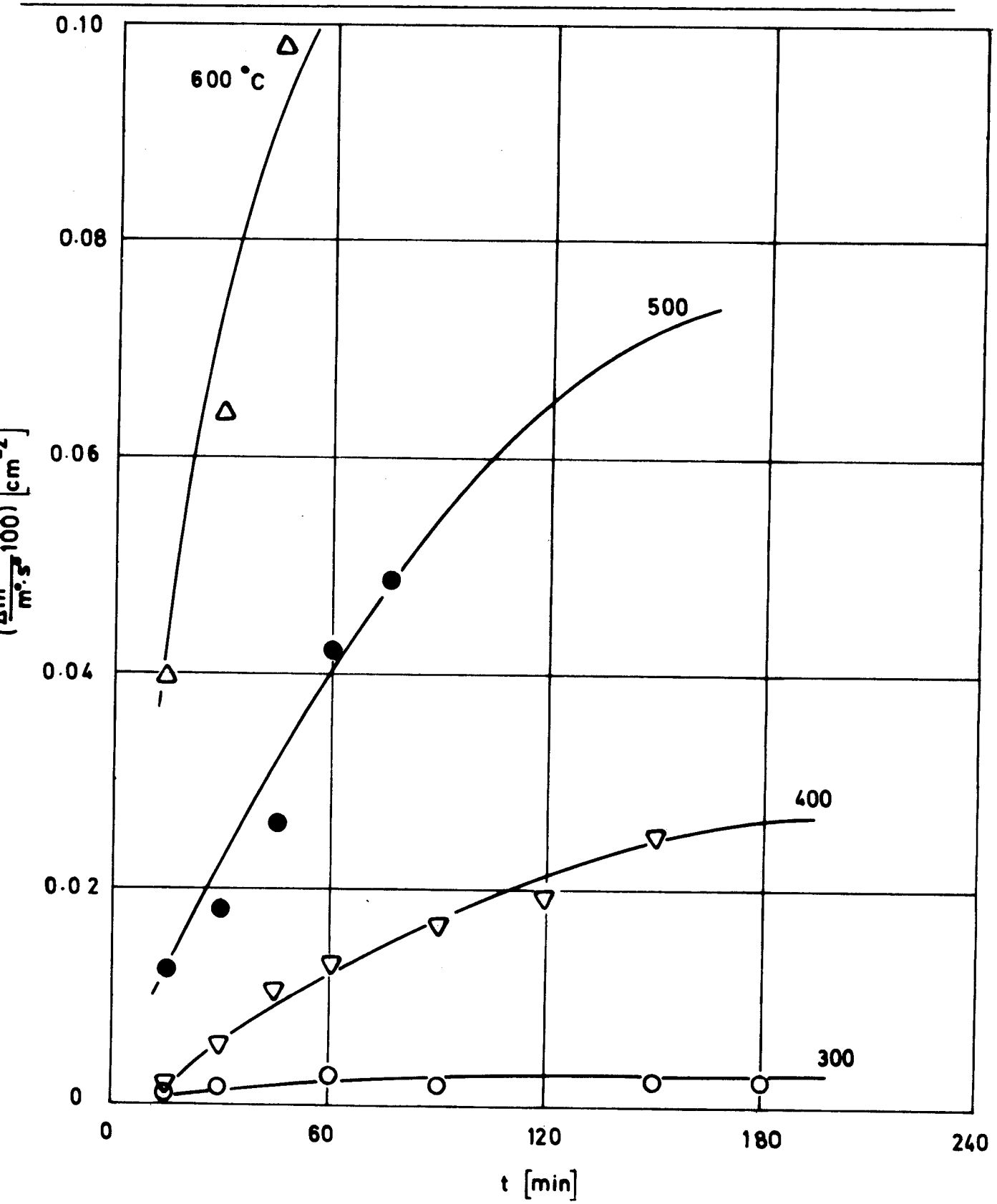
بدیهی است سرعت اکسیداسیون بریکت ها به‌مراتب کمتر از سرعت اکسیداسیون پلت ها می‌باشد (۸) .

### ۳/۲ ــ قانون مندی روند سرعت اکسیداسیون پلت هاو بریکت های آهن اسفنجی

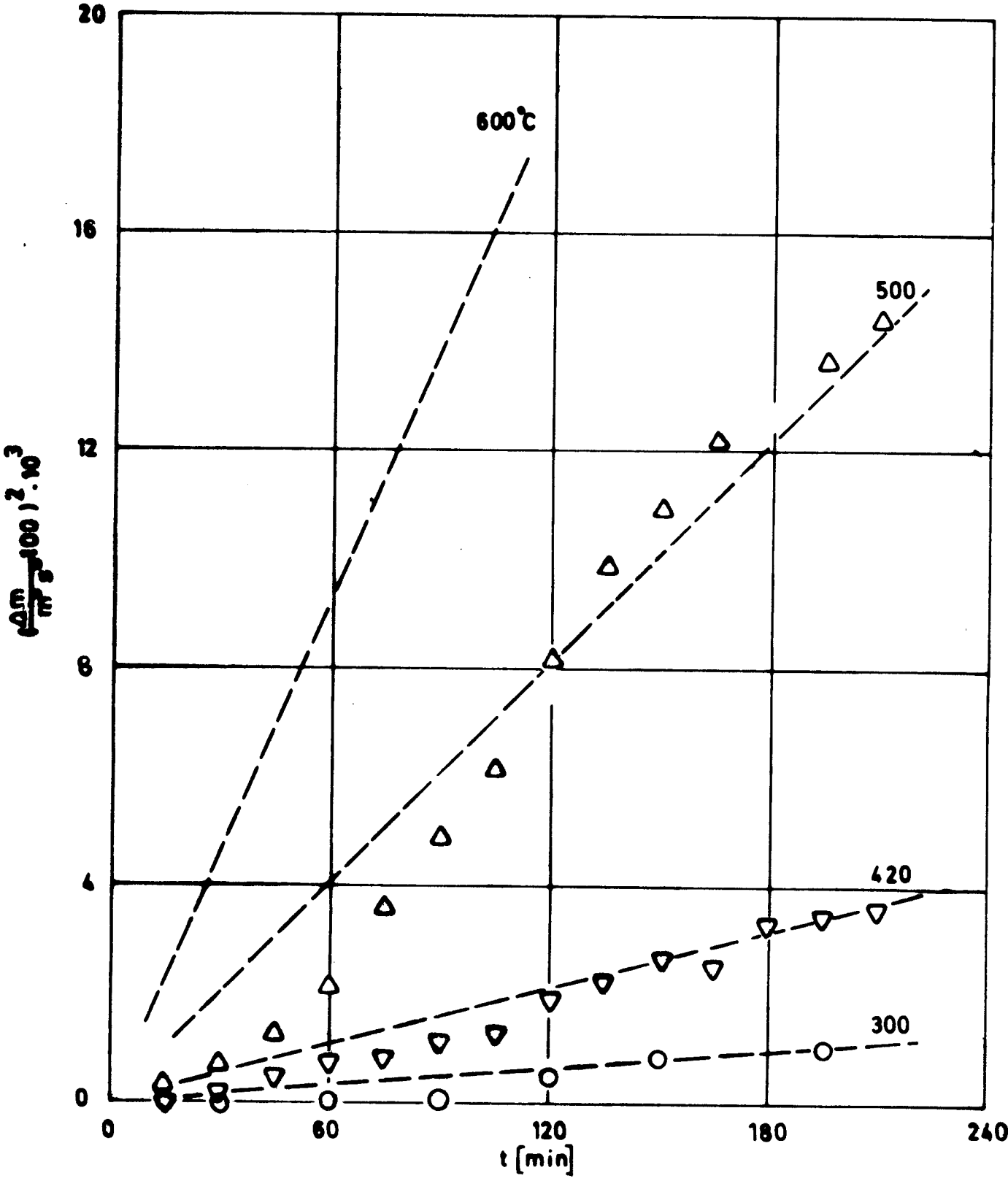
با مطالعه نتایج آزمایش ها در شکل های ۱۶و ۱۷ پی میبریم که سرعت اکسیداسیون یک نمونه در دما و فشار هوای ثابت ( تغییرات وزنی برحسب زمان ) ، به مرور زمان کاهش می‌یابد .کاهش سرعت اکسیداسیون می‌تواند دلایل زیادی داشته باشد که فرصت‌تجزیه و تحلیل آن در این مقاله نیست . هدف این بررسی ، تعیین قانون مندی سرعت اکسیداسیون‌نمونه‌های آهن‌اسفنجی ،برحسب زمان می‌باشد . بدین جهت درصد تغییرات وزنی پلت ها و یا بریکت ها بازاء یک سانتیمتر مربع سطح هندسی نمونه ،محاسبه و رسم گردیده‌است .سپس‌یاآگاهی‌ازکمیت $\left(\frac{\Delta m}{m^o} \; 100 \quad \frac{1}{S^o}\right)$ که در زمان های مختلف $(t)$ ، اندازه‌گیری‌شده‌ساده ترین معادلهٔ‌پوششی منحنی های فوق ، استخراج گشته است . این بررسی برای تمام آزمایش ها انجام‌و نتیجه گیری شده است که مناسبترین معادلهٔ ساده‌ٔ



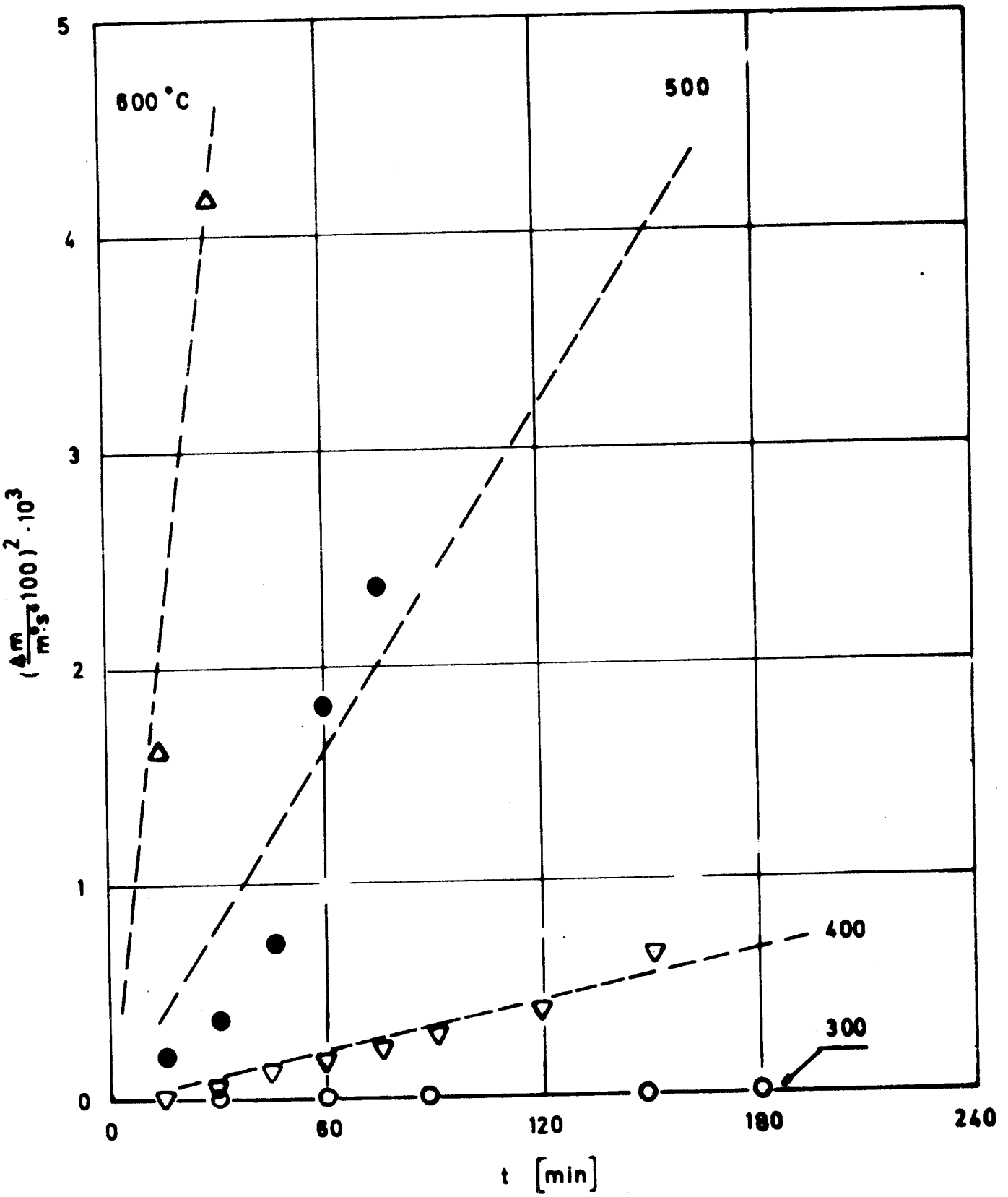

شکل ۱۶ ـ درصد تغییرات وزن بریکت های آهن اسفنجی بازاء واحد سطح هندسی برحسب زمان در هـــوا و درجـــات مختلـــف حـــرارت .




شکل ۱۷ ــ درصد تغییرات وزن پلت های آهن اسفنجی بازاء واحـــد سطـــح هندسی برحسب زمان درهوا و در درجات مختلـــف حـــرارت .




شکل ۱۸ ـ تغییرات وزنی اندازه گیری شده و همچنین نتایج نظری براساس معادلهٔ تامان برحسب زمان برای بریکت ها در هوا و درجات مختلف حرارت .




شکل ۱۹ ــ تغییرات وزنی اندازه گیری شده و همچنین نتایج نظری براساس معادلهٔ تامان برحسب زمان برای بریکت ها در هوا و درجات مختلف حرارت.

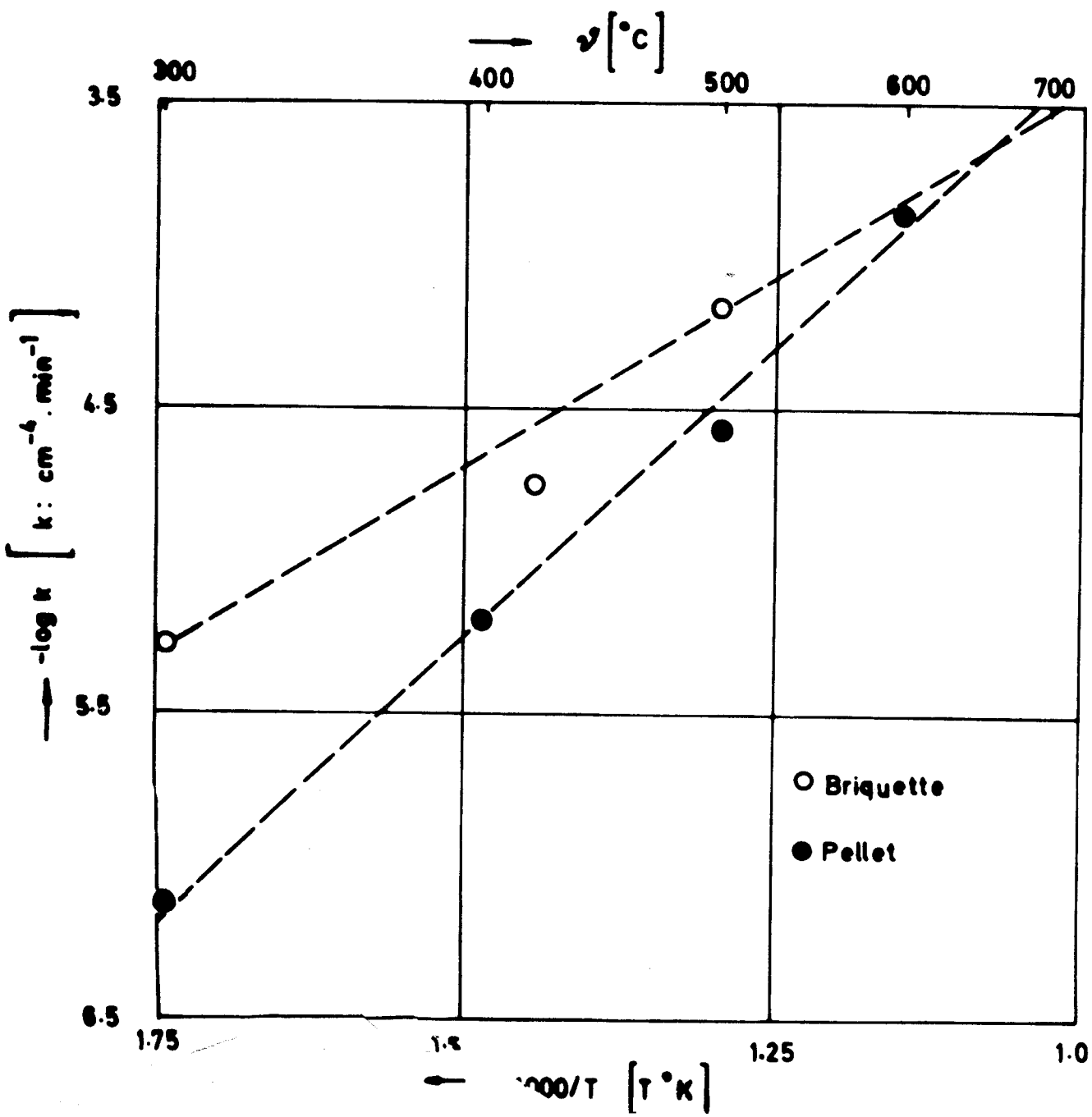
پوششی در محدوده اندازه گیری شده به صورت :

$$\left(\frac{\Delta m}{m^{o}}\ \frac{1}{s^{o}}\ 100\right)^{2} = k\ t$$

است که نظیر معادلهٔ تامان (Tamann) می‌باشد .

برای تطبیق معادلهٔ مفروض و نقاط اندازه گیری‌شده درشکل ۱۸ و ۱۹ تابع : $\left(\frac{\Delta m}{m^{o}}\ \frac{1}{s^{o}}\ 100\right) = f(t)$ برای بریکت ها و پلت ها محاسبه و رسم شده است . مضافا" اینکه ، تابع ثابت معادلهٔ مفروض (k) ، برحسب درجه‌حرارت نیز ازشکل های ۱۸و ۱۹ استخراج و در شکل ۲۰ رسم گردیده است .

ملاحظه می‌گردد که نقاط اندازه گیری شده با تقریب کافی ، بر روی خطوطی که براساس معادله مفروض بدست‌آمده قرار دارند . لذا نتیجه گیری می‌شود که سرعت اکسیداسیون بریکت ها و پلت های آهن اسفنجی با تقریب خوبی از قانون تامان که‌در مورد اکسیداسیون آهن خالص ،به اثبات رسیده است ، تبعیت می‌کند .



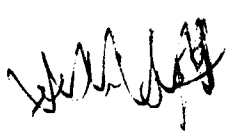

شکل ۲۰ـ تابع ثابت معادله تامان ، K ، برای پلت ها و بریکت ها برحسب درجهٔ حرارت .

## ۴ـ بحـــث و نتیجه گیـــــری

در دهه اخیر سرمایه گذاری های زیادی درایران در زمینهٔ تولید آهن و فولاد به روش های احیای مستقیم شده و مجتمع تولید فولاد اهواز نیز تاٴسیس شده و چندین مجتمع نیز در دست بررسی قرار گرفته اند . به موازات احداث ایـن واحدها ، یک رشته تحقیقات در مراکز آموزشی و پژوهشی از جمله دانشکدهٔ فنی ، گروه مهندسی متالورژی و گداز فلزات در رابطه با احیای مستقیم کانه های آهن ایران ، انجام شده است . چون آگاهی از خواص فیزیکی شیمیایی کانه های آهن و نیز آهن اسفنجی تولید شده به شکل پلت و یا بریکت برای این واحدها بسیار مهم می‌باشد ، لذا در این مقاله نتایج یک رشته آزمایش هایی‌که در این زمینه انجام شده ، از جملـــه مقاومت پلت ها در برابر اصطکاک و فشار بار ، دربارهٔ وزن مخصوص ، رطوبت ، میزان تخلخل و دمای‌جوش‌خوردن پلت‌ها به یکدیگر ، ارائه شده است . چون آگاهی از اکسیداسیون‌آهن اسفنجی در هوا ، از نقطه نظر اقتصادی‌بسیار مهم است،لـذا سرعت اکسیداسیون پلت ها وبریکت های آهن اسفنجی تولید شده در واحد پوروفر مجتمع فولاد اهواز ، نیز اندازه‌گیـری شده است . آنچه قابل توجه می‌باشد ترک داشتن حدود ۳۸ درصدپلت های آهن اسفنجی است که علت آن تغییر و تحول شبکه های بلوری و انقباض عوامل تشکیل دهندهٔ پلت ها در فرایندهای احیاست . عامل دیگری که از نقطه نظر اقتصادی حائز اهمیت است ، نرمهٔ آهن اسفنجی حاصل از اصطکاک بار کوره در حین احیا و نزول بار،در کوره می‌باشد . این نرمـــه حدود ۵ درصد اندازه گیری شده که قسمت کمی از آن ، ناشی از ترک پلت ها و قسمت بیشترش مربوط به نوع بافت آهـــن اسفنجی ، است . بررسی تصاویر بافت های آهن در سطـــح پلت ها نشان می‌دهد که این بافت ها ، در مورد پلت هـای مورد آزمایش ، اسفنج مانند نبوده بلکه کم و بیش سوزنـــی هستند . نتیجه گیری اینکه بافت های آهن اسفنجی که تابع ویژگی های پلت اولیه و نیز شرایط احیا می‌باشد ضرورتـــا " نباید اسفنج مانند باشند .

یکی‌از ویژگیهای تولید آهن اسفنجی‌به روش پوروفر ، پرس‌کردن پلت های آهن اسفنجی و تبدیل آنها به بریکـت میباشد که با این عمل ، تراکمشان حدود ۱۱ درصد افـزایش می‌یابد . تراکم در سطح بیرونی بریکت ها به‌مراتب بیش از درون بریکت هابوده و این خود علت اصلی کمتر بودن‌سرعت اکسیداسیون بریکت هااز پلت هاست و این از نقطه نظـــر اقتصادی بسیار مطلوب نیز می‌باشد.در بررسی سرعـــــت اکسیداسیون پلت هاو بریکت های آهن اسفنجی در هوا و دمای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد ، نتیجه گیری شده کـه درصد افزایش وزن نمونه بازاء یک سانتیمتر مربع سطـــح هندسی ، در اثر اکسیداسیون ضمن اینکه به مرور زمان کاهش میابد ، از معادلهٔ: $(\frac{\Delta m}{m_0}\ \frac{1}{S_0}\ 100)^2 = kt$ نیز تبعیت می‌کند . به عبارت دیگر هرچه قشر اکسیدپوششی سطح پلت و بریکت آهن اسفنجی ضخیم تر شود ، سرعـــت اکسیداسیون طبق رابطهٔ فوق ، کاهش می‌یابد .

از این تحقیقات به این نتیجه میرسیم که بـــــا بریکت کردن پلت آهن اسفنجی‌می‌توان‌به نتایج بسیـــــار مطلوب در زمینهٔ جلوگیری از سرعت اکسیداسیون آهـــن اسفنجی و نیز در مورد ذوب و پالایش آهن اسفنجی‌رسید .



بدینوسیله ازهمکاران طرح آقایان دکتر رامز وقار ، ولی الله جعفری و سید مهدی طاهری به خاطر بحث‌وگفتگـو تشکر گردد .

در اینجا لازم میدانم که از خانم مهندس زهـــرا غلامی و آقایان مهندس غفارزاده ، اخوت ، هاشمی ، جعفرـ زاده مرندی ، غلامـی ، اخلاقی ، یعقوبیان ، دادرس ، لویـ حیم و رضائیان که سهم عمده ای در انجام آزمایش هـــای مربوط به این تحقیقات را داشته اند ونیز آقای دکتـــــر فیعیها به خاطر ویرایش این‌مقاله ، صمیمانه تشکر کنم .

## فهرست مآخذ

۱ـ ناصر توحیدی: بررسی خواص کانه های آهن ایران از نقطه نظر احیای مستقیم ،پژوهنده مهندسی ، شماره دهم ، مهندسی ۲ ، شهریور ماه ۱۳۵۴،صفحه ۹ تا ۴۹.

۲ـ ناصر توحیدی: دورنمای عرضه و تقاضای انرژی درایران و جهان،نشریهٔ دانشکده فنی ، شماره ۴۲ ، فروردین ماه ۱۳۶۰ ، صفحه ۲۳ تا ۳۹.

۳ـ مقاله آماده برای چاپ:

3- N. TOWHIDI

Iron and Steel making in Iran

۴ـ ناصر توحیدی: تکنولوژی تولید آهن اسفنجی به روشهای احیای مستقیم ،نشریهٔ دانشکده فنی ، شماره ۳۷ ، مهر۱۳۵۶صفحه ۶۴ تا ۸۳.

۵ ـ ناصر توحیدی: برآورد انرژی و هزینهٔ تولید آهن خام و فولاد ، نشریهٔ دانشکده‌فنی ، شمارهٔ آینده.

۶ـ محمدرضا ابراهیم زاده ، احمد پاکزاد ، ناصر توحیدی وایرج صیرفیانپور: سمینار تکنولوژی تولید آهن‌خام و فولاد ،گروه مهندسی متالورژی و گدازفلزات دانشکده فنی ، دانشگاه تهران ، ۳۰ اردیبهشت ۱۳۵۷.

۷ ـ ناصر توحیدی: احیای مستقیم کانه های آهن: نظری ـ فنی ـ اقتصادی (کتاب در دست تهیه) دانشکدهٔ فنی ، دانشگاه تهران.

8- N. TOWHIDI*

OXIDATION RATE OF SPONGE IRON PELLETS,BRIQETTS AND IRONPOWDER UNDER VARIUS COMPRESIBILITY IN AIR BETWEEN 300 AND 500 °C.

9- N.TOWHIDI* AND J. SZEKELY

THE REDUCTION KINETICS OF COMMERCIAL LOW SILICA HEMATITE PELLETS WITH HYDROGEN OVER THE TEMPERTURE RANGE 600 - 1350 °C.

10-N. TOWHIDI* AND J. SZEKELY

THE REDUCTION KINETICS OF COMMERCIAL LOW SILICA HEMATITE PELLETS WITH $H_2$/CO MIXTURES OVER THE TEMPERTURE RANGE 775-1236°C.

11-N.TOWHIDI* AND J. SZEKELY

THE REDUCTION OF COMMERCIAL GRADE LOW SILIGA HEMATITE PELLETS WITH CO/$CO_2$AND $N_2$ MIXTURES OVER THE TEMPERTURE RANGE 800-1100 °C.

12-N.TOWHIDI* AND J.SZEKELY

THE INFLUENCE OF THE CARBON DEPOSITION ON THE REDUTION KINETICS OF COMMERCIAL GRADE HEMATITE PELLETS WITH CO,$H_2$ AND $N_2$ MIXTURES

13-N.TOWHIDI* AND J. SZEKELY

NON ISOTHERMAL REDUCTION KINETICS OF COMMERCIAL LOW SILICA HEHATITE PELLETES IN $H_2$/CO MIXTURES OVER TEMPERTURE RAVGE 600-1300°C.

* آماده برای چاپ