



دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

**مدلسازی ریاضی احیای مستقیم اکسیدهای آهن توسط
گاز متان**

نگارش:

محمد حسین مختاری

استاد راهنما:

دکتر محمد صادق ولی پور

استاد مشاور:

دکتر بهنام خوش اندام

شهریور ماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

**مدلسازی ریاضی احیای مستقیم اکسیدهای آهن
توسط گاز متان**

نگارش:

محمد حسین مختاری

استاد راهنما:

دکتر محمد صادق ولی پور

استاد مشاور:

دکتر بهنام خوش اندام

شهریور ماه ۱۳۹۰

اینجانب بدین وسیله اظهار می‌دارم که محتوای علمی این نوشتار با

عنوان

که به عنوان پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گرایش به دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان ارائه شده است، دارای اصالت پژوهشی بوده و حاصل فعالیت علمی اینجانب می‌باشد.

این جانب می‌دانم که اگر خلاف ادعای بالا در هر زمانی محرز شود، کلیه‌ی حقوق مترتب بر این نوشتار از اینجانب سلب شده و مراتب قانونی مرتبط با آن نیز از طرف مراجع ذی‌ربط قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی و شماره‌ی دانشجویی:

تاریخ و امضا:

به نام خدا



دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی مکانیک

تأیید دفاع از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

پایان‌نامه‌ی آقای محمد حسین مختاری

برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

با عنوان:

مدلسازی ریاضی احیای مستقیم اکسیدهای آهن توسط گاز متان

در تاریخ دفاع شد و مورد تأیید قرار گرفت.

تأیید کنندگان:

(۱) استاد محترم داور امضاء:

(۲) استاد محترم داور امضاء:

(۳) استاد محترم راهنما امضاء:

تقدیم بہ پدر، مادر و خواہر عزیزم

سپاس‌گزاری

بر خود لازم می‌دانم تا بدین وسیله از زحمات استاد محترم راهنما جناب آقای دکتر محمد صادق ولی پور، استاد محترم مشاور جناب آقای دکتر بهنام خوش اندام و دوستان عزیزم در دانشکده‌ی مهندسی شیمی آقایان مهندس شیرچی و مهندس شعبانی کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه و گروه پژوهشی واکنش‌های ناهمگن به خاطر همکاری‌های بی‌دریغ ایشان در تأمین مواد اولیه و تجهیزات آزمایشگاهی و از مسئولین کارگاه‌های دانشکده‌ی مهندسی مواد و صنایع کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

در روش‌های متداول احیای مستقیم اکسیدهای آهن از گازهای هیدروژن و منوکسیدکربن به عنوان عوامل احیا کننده استفاده می‌شود. این گازها در رفرمر و از اکسایش جزئی گاز طبیعی در حضور گرما و کاتالیزور تولید می‌شوند. حال اگر در کوره‌ی احیا به طور مستقیم از گاز متان به عنوان عامل احیا کننده استفاده شود، این امر موجب حذف رفرمر و هزینه‌های مربوط به آن گشته که موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های فرایند احیا می‌گردد. بدین معنا که متان وارد کوره‌ی احیا شده و در کوره در معرض تجزیه و تبدیل قرار گیرد و گونه‌های احیا کننده شامل هیدروژن و منوکسیدکربن را تولید کند. بر این اساس، این پایان‌نامه به مدلسازی ریاضی احیای مستقیم اکسیدهای آهن توسط گاز متان می‌پردازد. مدل ریاضی توسعه داده شده، مدلی همدم و ناپایا در مقایسه گندله می‌باشد که با استخراج معادلات حاکم و حل عددی آن‌ها به دست آمده است. معادلات حاکم شامل معادله‌ی نرخ تجزیه‌ی متان، معادلات بقای جرم، معادله‌ی بقای انرژی و معادله‌ی نرخ احیا می‌باشند. حل عددی معادلات حاکم به روش حجم محدود و به صورت کاملاً ضمنی انجام گرفته است. برای اعتبارسنجی مدل از نتایج آزمایش‌های انجام شده در کارهای قبلی استفاده شده که مطابقت خوبی مشاهده می‌شود. همچنین به عنوان مرجع دیگری برای اعتبارسنجی مدل، آزمایشی از احیای هماتیت توسط گاز متان به انجام رسیده است. در پایان نیز نتایج مدل و تأثیر برخی از پارامترهای مؤثر فرایند احیا مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: احیای مستقیم، گندله‌ی هماتیتی، گاز متان، مدل ریاضی، روش حجم محدود کاملاً ضمنی.

فهرست مطالب

فصل ۱- روش‌های تولید آهن ۱

۱-۱- تاریخچه‌ی روش‌های تولید آهن ۲

۱-۱-۱- روش احیای سستی در کوره‌ی بلند ۲

۱-۱-۲- روش احیای مستقیم ۳

۲-۱- احیای مستقیم به روش میدرکس ۵

۱-۲-۱- تولید گاز احیا کننده به روش میدرکس ۶

۲-۲-۱- احیای اکسیدهای آهن در کوره‌ی احیا ۷

۳-۱- احیا با متان ۸

فصل ۲- مطالعات انجام شده در زمینه‌ی احیای مستقیم با گاز متان و ضرورت انجام

کار ۹

۱-۲- مطالعات آزمایشگاهی ۱۰

۱-۱-۲- تولید پودر آهن به وسیله‌ی احیای مستقیم با گاز طبیعی ۱۰

۲-۱-۲- احیای گندله‌ی هماتیته به وسیله‌ی گاز متان ۱۳

۳-۱-۲- آنالیز سینتیکی احیای وستیت کروی حمل شده توسط گاز متان ۱۶

۴-۱-۲- ترموشیمی خورشیدی دما بالا: تولید آهن و گاز سنتز از طریق احیای ماگنتیت به وسیله‌ی متان ۱۹

۵-۱-۲- فرایند احیای مستقیم با سینتیک بالای دانارکس ۲۲

۲-۲- مدلسازی ریاضی ۲۴

فصل ۳- مدلسازی ریاضی احیای اکسیدهای آهن توسط متان ۲۷

۱-۳- تشریح مسئله و فیزیک آن ۲۸

۲-۳- پارامترهای مؤثر در فرایند احیا ۲۹

- ۲۹-۲-۱- خواص فیزیکی گندله
- ۳۰-۲-۲- خواص ترموفیزیکی گاز احیا کننده
- ۳۱-۳-۳- مدل مفهومی
- ۳۳-۱-۳-۳- واکنش‌های احیای مستقیم
- ۳۴-۲-۳-۳- سینتیک واکنش‌های احیا
- ۳۶-۴-۳- معادلات حاکم
- ۳۷-۱-۴-۳- معادله‌ی نرخ تجزیه‌ی متان
- ۳۷-۲-۴-۳- معادله‌ی پیوستگی گونه‌های شیمیایی
- ۳۸-۳-۴-۳- معادله‌ی انرژی
- ۳۹-۴-۴-۳- معادله‌ی سرعت واکنش‌های احیای مستقیم
- ۴۰-۵-۴-۳- معادله‌ی نرخ احیای اکسیدهای آهن
- ۴۱-۵-۳- روابط کمکی
- ۴۱-۶-۳- شرایط مرزی و مقادیر اولیه
- ۴۲-۷-۳- محاسبه‌ی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی
- ۴۳-۸-۳- حل معادلات
- ۴۳-۱-۸-۳- گسسته سازی معادلات
- ۴۸-۲-۸-۳- الگوریتم حل معادلات
- ۵۰-۴- آزمایش‌های انجام شده
- ۵۱-۱-۴- مواد اولیه
- ۵۲-۲-۴- ساخت قرص هماتیتهی
- ۵۷-۳-۴- احیای قرص هماتیتهی در راکتور
- ۵۸-۱-۳-۴- آنالیز گرما وزن‌سنجی

۶۰	..... روش انجام آزمایش ۲-۳-۴
۶۱	..... آزمایش شماره ۱: احیای هماتیت توسط متان ۴-۴
۶۴	..... نرخ احیا ۱-۴-۴
۶۸	..... تحلیل نتایج ۲-۴-۴
۶۹	..... آزمایش شماره ۲: احیای قرص هماتیستی توسط کرین ۵-۴
۷۲	..... نرخ احیا ۱-۵-۴
۷۵	..... تجزیه و تحلیل نتایج ۲-۵-۴
۷۶	..... نتیجه گیری ۶-۴
۷۸	..... فصل ۵- نتایج مدل ریاضی
۷۹	..... ۱-۵- اعتبار سنجی مدل
۸۱	..... ۲-۵- نتایج مدل ریاضی
۸۶	..... ۳-۵- تأثیر پارامترهای مؤثر فرایند احیا
۸۶	..... ۱-۳-۵- تأثیر پارامترهای مربوط به گندله
۸۸	..... ۲-۳-۵- تأثیر پارامترهای مربوط به گاز احیا کننده
۹۱	..... فصل ۶- نتیجه گیری
۹۲	..... ۱-۶- پیشنهاد کارهای آینده
۹۴	..... پیوست- محاسبه‌ی خواص ترموفیزیکی و ترموشیمیایی
۱۱۴	..... منابع و مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- طرح کلی تولید آهن در کوره‌ی بلند و فولاد در کنورتور [۱]. ۳.....
- شکل ۲-۱- طرح کلی روش‌های احیای مستقیم و کوره‌ی الکتریکی [۱]. ۵.....
- شکل ۳-۱- روند اکسایش جزئی گاز طبیعی و نیز احیای سنگ آهن به روش میدرکس. ۶.....
- شکل ۱-۲- واکنش‌های شیمیایی لازم در احیا با متان [۴]. ۱۱.....
- شکل ۲-۲- نمای ظاهری دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌های گش و همکاران [۶]. ۱۳.....
- شکل ۳-۲- نمای شماتیک دستگاه مورد استفاده توسط تکیوشی و همکارانش [۷]. ۱۷.....
- شکل ۴-۲- رابطه‌ی بین زمان احیای ذره‌ی وستیت با ۱۱٪ حجمی متان-نیتروژن و کسر احیا در محدوده‌ی ۱۳۷۳-۱۵۷۳ درجه‌ی کلوین [۷]. ۱۷.....
- شکل ۵-۲- مکانیزم ساخت آهن به وسیله‌ی متان در محدوده‌ی دمایی ۱۳۷۳-۱۵۷۳ درجه‌ی کلوین [۷]. ۱۸.....
- شکل ۶-۲- مقطع عرضی نمونه‌ی احیا شده با ۲/۶٪ حجمی متان-نیتروژن در دمای ۱۵۷۳ درجه‌ی کلوین (f : کسر احیا و t_p : زمان سپری شده) [۷]. ۱۹.....
- شکل ۷-۲- نمای شماتیک از دستگاه آزمایشگاهی استفاده شده توسط استینفلد و همکارانش [۸]. ۲۰.....
- شکل ۸-۲- ترکیب تعادلی اجزای اصلی $Fe_3O_4 + CH_4$ در فشار ۱ اتمسفر. محلول‌های فاز چگال و سمانتیت از بررسی‌ها حذف شده و از اجزائی که کسر مولی آن‌ها از 10^{-5} کمتر است، چشم‌پوشی شده است [۸]. ۲۱.....
- شکل ۹-۲- نمایش روشی برای تولید هیدروژن و گاز سنتز از آب و متان در یک فرایند دو مرحله‌ای. ماگنتیت در مرحله‌ی اول به آهن احیا می‌شود؛ آهن در مرحله‌ی دوم به ماگنتیت اکسید می‌شود [۸]. ۲۲.....
- شکل ۱۰-۲- طرح کلی فرایند دانارکس [۱۰]. ۲۳.....
- شکل ۱۱-۲- نمودارهای مصرف فرایند دانارکس در مقایسه با میانگین سایر فرایندها [۱۰]. ۲۴.....
- شکل ۱-۳- طرحواره‌ی گندله‌ی متخلخل هماتیته در تماس با گاز احیا کننده. ۲۹.....
- شکل ۲-۳- بزرگنمایی قسمتی از گندله در تماس با گاز احیا کننده. ۳۲.....
- شکل ۳-۳- نمودار تعادلی سیستم آهن-اکسیژن-هیدروژن. ۳۴.....
- شکل ۴-۳- شبکه‌ی حل. ۴۳.....
- شکل ۵-۳- الگوریتم حل معادلات. ۴۸.....
- شکل ۱-۴- پودر هماتیت به رنگ قرمز مایل به سیاه [۲۹]. ۵۲.....
- شکل ۲-۴- وسایل مورد نیاز برای ساخت قرص. ۵۲.....

- شکل ۴-۳- ترتیب قرار گرفتن لوازم برای ساخت قرص. ۵۳.....
- شکل ۴-۴- اندازه‌گیری جرم پودر هماتیت. ۵۴.....
- شکل ۴-۵- ریختن پودر در ماتریس. ۵۴.....
- شکل ۴-۶- فشرده کردن پودر با استفاده از سمبه و به وسیله‌ی دست. ۵۵.....
- شکل ۴-۷- قرار دادن مجموعه‌ی سمبه‌ها و ماتریس درون گیره. ۵۵.....
- شکل ۴-۸- خارج کردن قرص از ماتریس. ۵۶.....
- شکل ۴-۹- نمایی از قرص آماده شده. ۵۷.....
- شکل ۴-۱۰- نمایی کلی از راکتور احیا. ۵۷.....
- شکل ۴-۱۱- شکل شماتیک دستگاه آنالیز گرما وزن‌سنجی [۳۰]. ۵۸.....
- شکل ۴-۱۲- نمایی از راکتور مورد استفاده برای فرایند احیا. ۵۹.....
- شکل ۴-۱۳- نمایی از سبد حاوی قرص. ۶۰.....
- شکل ۴-۱۴- دبی گازهای ورودی به کوره با استفاده از حباب محلول آب و صابون تعیین می‌شوند. ۶۲.....
- شکل ۴-۱۵- نمودار تغییرات جرم مجموعه‌ی قرص، سبد و سیم در آزمایش ۱. ۶۳.....
- شکل ۴-۱۶- نمودار تغییرات جرم از نمایی نزدیک‌تر. ۶۳.....
- شکل ۴-۱۷- قرص هماتیتی پس از احیا. ۶۴.....
- شکل ۴-۱۸- نمودار اولیه‌ی تغییرات جرم. ۶۴.....
- شکل ۴-۱۹- اصلاح خطای ترازو در نمودار تغییرات جرم. ۶۵.....
- شکل ۴-۲۰- تغییرات جرم قرص. ۶۶.....
- شکل ۴-۲۱- حذف قسمت‌های اضافی نمودار. ۶۷.....
- شکل ۴-۲۲- نمودار نرخ احیا برای آزمایش شماره‌ی ۱. ۶۸.....
- شکل ۴-۲۳- نمودار تغییرات وزن حاصل از آزمایش شماره‌ی ۲. ۷۲.....
- شکل ۴-۲۵- نمودار اصلاح شده‌ی تغییرات وزن قرص. ۷۳.....
- شکل ۴-۲۴- بخش‌های نمودار تغییرات وزن آزمایش ۲. ۷۳.....
- شکل ۴-۲۶- حذف قسمت‌های اضافی نمودار. ۷۴.....
- شکل ۴-۲۷- نمودار نرخ احیا. ۷۵.....
- شکل ۴-۲۸- تغییرات وزن قرص با دما. ۷۶.....
- شکل ۵-۱- مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی گُش و همکارانش [۶]. ۷۹.....
- شکل ۵-۲- مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایش فصل ۴. ۸۰.....

- شکل ۳-۵- مقایسه‌ی نمودار احیای شکل ۲-۵ با نتایج آزمایشی از گُش و همکارانش در دمای ۱۱۴۸ کلوین [۶]..... ۸۱
- شکل ۴-۵- تغییرات احیای کلی گندله و احیای هر یک از گونه‌های اکسید آهن نسبت به زمان..... ۸۲
- شکل ۵-۵- تغییرات دما در سه موقعیت مختلف درون گندله نسبت به زمان..... ۸۲
- شکل ۶-۵- تغییرات کسر مولی هیدروژن نسبت به زمان، در سه موقعیت مختلف در درون گندله. ۸۳
- شکل ۷-۵- تغییرات نرخ احیای کلی نسبت به موقعیت شعاعی درون گندله، در زمان‌های مختلف. ۸۴
- شکل ۸-۵- تغییرات کسر مولی هیدروژن نسبت به موقعیت درون گندله، در زمان‌های مختلف. ۸۵
- شکل ۹-۵- تغییرات دما نسبت به موقعیت درون گندله، در زمان‌های مختلف. ۸۵
- شکل ۱۰-۵- تأثیر قطر گندله بر نرخ احیا..... ۸۶
- شکل ۱۱-۵- تأثیر تخلخل بر نرخ احیا..... ۸۷
- شکل ۱۲-۵- تأثیر تورچ‌یاسیتی بر نرخ احیا..... ۸۸
- شکل ۱۳-۵- تأثیر دمای گاز احیا کننده بر نرخ احیا..... ۸۹
- شکل ۱۴-۵- تأثیر فشار کل بر نرخ احیا..... ۸۹
- شکل ۱۵-۵- تأثیر کسر مولی متان ورودی بر نرخ احیا..... ۹۰
- شکل پ- ۱- تغییرات آنتالپی واکنش‌های احیا با هیدروژن بر حسب دما..... ۱۰۸
- شکل پ- ۲- تغییرات آنتالپی واکنش‌های احیا با منوکسید کربن بر حسب دما..... ۱۰۸
- شکل پ- ۳- ثابت‌های نرخ واکنش تجزیه‌ی حرارتی متان در محدوده‌های دمایی مختلف [۲۷]. ۱۱۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- خلاصه‌ای از مدل‌های ریاضی انجام شده برای بررسی فرایند احیا در مقیاس گندله [۲].
۲۶.....
- جدول ۱-۳- ترکیب گندله‌ی اکسیدی LKAB مورد استفاده در فرایندهای احیای مستقیم [۲۲].
۲۸.....
- جدول ۲-۳- ترکیب تقریبی از گاز احیا کننده‌ی ورودی به کوره [۲۲].
۲۸.....
- جدول ۳-۳- ضرایب معادله‌ی کلی گسسته شده‌ی (۳-۳) $(\phi=y_i, i=H_2)$ *.
۴۵.....
- جدول ۴-۳- ضرایب معادله‌ی کلی گسسته شده‌ی (۳-۳) $(\phi=T)$.
۴۶.....
- جدول ۵-۳- ضرایب معادله‌ی کلی گسسته شده‌ی (۳-۳) $(\phi=f_i)$.
۴۷.....
- جدول ۱-۴- مشخصات قرص مورد استفاده در آزمایش شماره‌ی ۱.
۶۱.....
- جدول ۲-۴- ترکیب گازهای ورودی به کوره.
۶۲.....
- جدول ۳-۴- محاسبه‌ی جرم آهن تولید شده از احیای هماتیت در شرایط احیای ۱۰۰٪.
۶۷.....
- جدول ۴-۴- محاسبه‌ی نرخ احیا بر اساس کاهش جرم نسبت به جرم اولیه.
۶۸.....
- جدول ۵-۴- جرم قرص در صورت احیای کامل هماتیت به ماگنتیت، ماگنتیت به وستیت و وستیت به آهن.
۶۹.....
- جدول ۶-۴- مشخصات کربن مورد استفاده در آزمایش شماره‌ی ۲.
۶۹.....
- جدول ۷-۴- مشخصات قرص قبل از انجام آزمایش.
۷۰.....
- جدول ۱-۵- مشخصات گندله و جریان به کار رفته در اعتبارسنجی با نتایج گش و همکارانش [۶].
۷۹.....
- جدول ۲-۵- مشخصات قرص و جریان احیا کننده مربوط به آزمایش فصل ۴.
۸۰.....
- جدول ۳-۵- مشخصات گندله و گاز احیا کننده در بررسی اثر پارامترها.
۸۱.....
- جدول پ-۱- برخی از خواص ترموشیمیایی گونه‌های گاز احیا کننده در شرایط استاندارد.
۹۶.....
- جدول پ-۲- ضرایب رابطه‌ی (پ-۱) مربوط به ظرفیت گرمایی ویژه‌ی اکسیدهای آهن.
۹۷.....
- جدول پ-۳- ضرایب رابطه‌ی (پ-۱) مربوط به ظرفیت گرمایی ویژه‌ی گونه‌های شیمیایی گاز احیا.
۹۷.....
- جدول پ-۴- چگالی اکسیدهای آهن.
۹۹.....
- جدول پ-۵- ضرایب رابطه‌ی (پ-۱۱) مربوط به هدایت حرارتی گونه‌های شیمیایی گاز احیا.
۱۰۰.....
- جدول پ-۶- ضریب هدایت حرارتی اکسیدهای آهن.
۱۰۱.....

جدول پ-۷- ضرایب مربوط به معادله‌ی (پ-۱۳) برای محاسبه‌ی ضریب هدایت حرارتی آهن.	۱۰۱.....
جدول پ-۸- ضرایب مربوط به معادله‌ی (پ-۳۲) برای احیای اکسیدهای آهن با هیدروژن. ...۱۰۷	۱۰۷.....
جدول پ-۹- ضرایب مربوط به معادله‌ی (پ-۳۲) برای احیای اکسیدهای آهن با منوکسید کربن.	۱۰۷.....
جدول پ-۱۰- حجم نفوذ برای گونه‌های مختلف گازی. ....۱۱۰	۱۱۰.....
جدول پ-۱۱- ثابت تعادل و داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ی آرنیوس مربوط به واکنش‌های احیا	[۱۴]. ۱۱۲.....
جدول پ-۱۲- روابط مربوط به محاسبه‌ی ثابت نرخ واکنش تجزیه‌ی حرارتی متان در محدوده‌های	۱۱۳.....
دمایی مختلف.	۱۱۳.....

فهرست علائم

a	ضریب معادله‌ی گسسته‌ی کلی (۳-۳۰) (-)
a^0	ضریب معادله‌ی گسسته‌ی کلی (۳-۳۰) در گام زمانی قبل (-)
C_i	غلظت i امین جزء از گاز احیا کننده (mol/m^3)
C_i^e	غلظت i امین جزء از گاز احیا کننده در شرایط تعادل (mol/m^3)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (J/kg/K)
d_p	قطر گندله (m)
D	ضریب نفوذ گونه‌های گازی (m^2/s)
D_{ij}	نفوذ دوتایی (m^2/s)
E_a	انرژی فعالسازی واکنش (J/mol)
f_l	درصد احیای محلی گونه‌ی l در یک دانه (-)
f	نرخ احیای کلی در مقیاس یک دانه (-)
F	نرخ احیای کلی گندله (-)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{W/m}^2/\text{K}$)
$(-\Delta H)_{Rr,i,l}$	گرمای واکنش احیا با i امین جزء گاز در سطح l (J/mol)
$k_{m,i}$	ضریب انتقال جرم جزء i ام در قشرگازی (m/s)
$k_{Rr,i,l}$	ثابت نرخ واکنش برای جزء i ام، در سطح l (m/s)
k_{De}	ثابت نرخ واکنش تجزیه‌ی حرارتی متان (1/s)
$k_{0,Rr}$	ضریب فراوانی واکنش احیا (m/s)

$Ke_{Rr,i,l}$	ثابت تعادل واکنش با جزء i ام در سطح l (-)
M	وزن مولکولی (g/mol)
$Nu = hd_p / \lambda_g$	عدد نوسلت (-)
P_t	فشار کل (atm)
$Pr = \mu_g c_{Pg} / \lambda_g$	عدد پرانتل (-)
r	جهت شعاعی در گندله (m)
r_g	شعاع دانه (m)
r_l	شعاع سطح واکنش درون دانه (m)
R_G	ثابت عمومی گازها (J/mol/K)
R_p	شعاع گندله (m)
$Re = d_p \rho_g u_b \mu_g^{-1}$	عدد رینولدز (-)
$Sc = \mu_g \rho_g^{-1} D_{eff}^{-1}$	عدد اشمیت (-)
$Sh = d_p k_m D_{eff}^{-1}$	عدد شروود (-)
t	زمان (s)
T	دما (K)
$\dot{n}_{Rr,i,l}$	نرخ واکنش احیا برای جزء i ام، در سطح l (mol/m ³ /s)
y	کسر مولی گونه‌های گازی (-)
S_u, S_p	ترم‌های چشمه در معادله‌ی گسسته‌ی کلی (۳-۳۰) (-)
\bar{A}, \bar{B}	پارامترهای به کار رفته در ضریب‌های معادله‌ی گسسته در جدول ۳-۵

\bar{F}, \bar{K}	پارامترهای به کار رفته در ضریب‌های معادله‌ی گسسته در جدول ۳-۳
α_1	درصدی از اکسیژن دانه است که در اثر تبدیل هماتیت به ماگنتیت، ماگنتیت به وستیت و وستیت به آهن احیا می‌شود. (-)
$\beta = H_2/CO$	نسبت گاز احیا کننده (-)
ε	تخلخل گندله (-)
$\gamma = \frac{H_2 + CO}{H_2O + CO_2}$	کیفیت گاز احیا کننده (-)
λ	ضریب هدایت حرارتی (W/m/K)
ν	ضریب استوکیومتری (-)
ρ	چگالی (kg/m^3)
$\rho_{O,l}$	غلظت مولی اکسیژن موجود در کانه‌ی l ($g\text{-atom O}/m^3$)
τ	تورچیا سیتی (-)

زیر نویس‌ها

b	مربوط به جریان اصلی گاز احیا
eff	پارامترهای مؤثر
e, w	مربوط به سطوح سمت راست و سمت چپ حجم کنترل
E, P, W	مربوط به حجم کنترل در همسایگی راست، حجم کنترل مرکزی و حجم کنترل در همسایگی چپ
h, m, w	به ترتیب مربوط به سطوح هماتیت- ماگنتیت، ماگنتیت- وستیت و وستیت- آهن