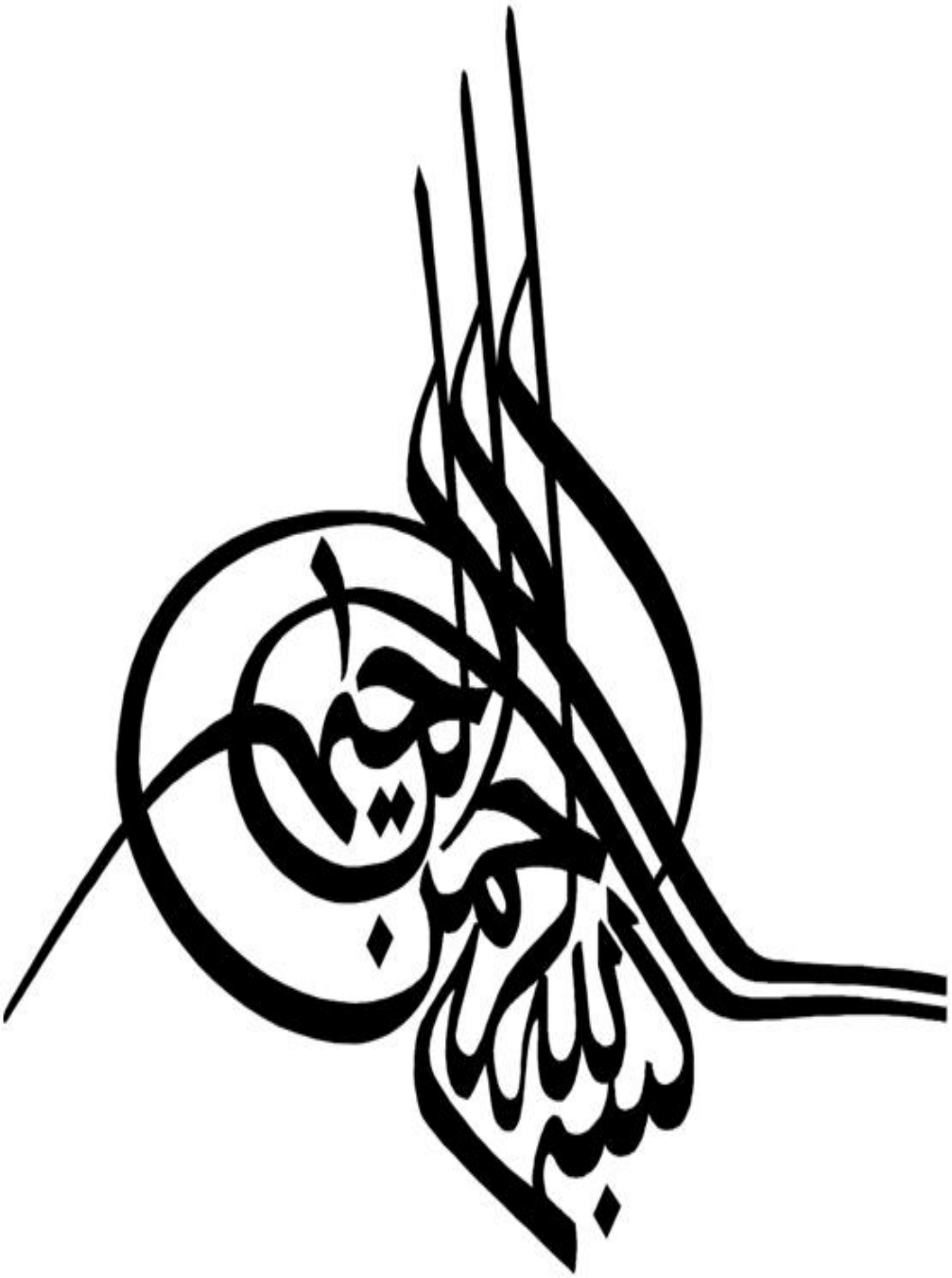
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی معدن

# پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی فرآوری مواد معدنی

**عنوان:**

# بهینه‌سازی مدار خردایش نهایی کارخانه سیمان مازندران

**اساتید راهنما:**

دکتر اکبر فرزانگان
دکتر علی‌اکبر عبداله زاده

**به وسیله:**

آرین عظیمی

شهریور ماه ۱۳۹۲

# تقدیم به :

به پاس تعبیر عظیم و انسانیشان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید
و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند
این مجموعه را به پدر و مادر عزیز و همسر گرامی‌ام تقدیم می‌نمایم.

# تشکر و قدردانی :

سپاس از ایزد منان که بخت یادگیری را به بنده اعطا نمود. اینجانب بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار بویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد، آقایان **دکتر اکبر فرزانگان، دکتر علی اکبر عبدالله‌زاده** که همواره از ایشان ادب و آداب و علم آموخته‌ام و از تمام پرسنل و کارکنان کارخانه سیمان مازندران بلاخص جناب **مهندس پرتوی** که راهنمای بنده در انجام مراحل پایان‌نامه بوده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از تشریک مساعی آقای **دکتر سعید سلطان‌محمدی** به عنوان استاد داور داخل دانشگاه و آقای **دکتر علی احمدی** بعنوان استاد داور مدعو خارج از دانشگاه که این پایان‌نامه را مورد لطف قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده‌اند، تشکر می‌نمایم.

# چکیده:

کارخانه‌ی سیمان مازندران دارای دو خط تولید می‌باشد که برای خردایش کلینکر در بخش پایانی مدار، ۴ آسیای لوله‌ای دوخانه‌ای بکار گرفته شده است. آسیاها در مدار بسته با یک جداکننده‌ی هوایی قرار دارند. مدار شماره ۴ خردایش کلینکر، به تولید سیمان صادراتی اختصاص داده شده است، ظرفیت ورودی به این مدار ۱۰۵ تن در ساعت است، که با ظرفیت طراحی‌شده برای این مدار اختلاف دارد ( ظرفیت اولیه مدار ۱۲۰ تن در ساعت بوده است که به مرور زمان کاهش یافت )، در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از شبیه‌سازی به این موضوع پرداخته شود که به چه میزان می‌توان به افزایش ظرفیت ورودی پرداخت تا جائیکه به کیفیت محصول نهایی لطمه‌ای وارد نشود و بلین دانه‌های سیمان در حد استاندارد باقی بماند (حد پائین برای این نوع سیمان طبق استاندارد AASHTO و ASTM ۲۶۰۰ $cm^2/gr$ است)؛ برای شبیه‌سازی مدار خردایش پایانی، نمونه‌های بسیاری از جریان‌های موجود در مدارها برداشته شد. همچنین از داخل آسیاها و در امتداد محور طولی، از نقاط با فاصله‌ی یکسان از یکدیگر، نمونه‌برداری شد. سپس دانه‌بندی نمونه‌ها با استفاده از آنالیز سرندی و پراش‌سنجی لیزری به دست آمد و به همراه دبی جریان‌های مختلف موازنه جرم شدند. اندیس کار باند و تابع شکست نمونه‌ی بار ورودی به آسیا (مخلوط کلینکر، پوزولان و گچ) در آزمایشگاه تعیین شد. از این داده‌ها برای کالیبراسیون مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی استفاده شد. برای شبیه‌سازی مدارها از نرم‌افزار BMCS که قادر است مدارهای مختلف خردایش را شبیه‌سازی کند استفاده گردید. برنامه‌ی BMCS در شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای از مدل موازنه جمعیت برای توصیف ریاضی فرآیند شکست و مدل مخازن به دنبال هم برای توصیف ریاضی توزیع زمان ماند و در شبیه‌سازی دیافراگم میانی و جداکننده هوایی از مدل وایتن برای توصیف ریاضی منحنی کارآیی جدایش استفاده می‌کند. پارامترهای مدل وایتن نیز با استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار MATLAB تعیین شد. همخوانی نزدیک نتایج شبیه‌سازی و داده‌های واقعی نشان‌دهنده دقت نمونه‌برداری، مدل‌های مورد استفاده و کالیبراسیون آن‌ها است. در انتها با تغییر پارامترهای مختلف و شبیه‌سازی‌های جدید بر اساس این پارامترها، شرایط بهینه آسیا تعیین شد و پیشنهاد گردید تا ظرفیت به ۱۱۸ تن در ساعت ارتقا پیدا کند.



کلمات کلیدی: آسیای سیمان، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، کارخانه سیمان مازندران، BMCS، الگوریتم ژنتیک

# فهرست

صفحه

**فصل اول: مفاهیم پایه**


۱-۱- پیشگفتار ۲
۱-۲- تاریخچه ۴
۱-۲-۱- تاریخچه سیمان در ایران ۶
۱-۳- شیمی سیمان ۷
۱-۳-۱- ترکیبات سازنده سیمان ۷
۱-۳-۱-۱- آهک زنده یا اکسید کلسیم ($CaO$) ۷
۱-۳-۱-۲- سیلیس ($SiO_2$) ۷
۱-۳-۱-۳- آلومینا ($Al_2O_3$) ۷
۱-۳-۱-۴- اکسید آهن ($Fe_2O_3$) ۸
۱-۳-۱-۵- اکسید منیزیم ($MgO$) ۸
۱-۳-۱-۶- قلیائی‌ها ۸
۱-۳-۲- فازهای عمده مینرالی تشکیل‌دهنده سیمان ۸
۱-۳-۲-۱- تری‌کلسیم سیلیکات(آلیت) ۸
۱-۳-۲-۲- دی‌کلسیم سیلیکات(بلیت) ۹
۱-۳-۲-۳- تری‌کلسیم آلومینات(آلومینات) ۹
۱-۳-۲-۴- تتراکلسیم آلومینوفریت(فریت) ۹
۱-۴- فرآیند تولید سیمان ۱۰
۱-۴-۱- انتخاب محل برای احداث کارخانه ۱۱
۱-۴-۲- استخراج و انتقال مواد اولیه ۱۱
۱-۴-۳- خردایش مواد اولیه ۱۱
۱-۴-۴- دپوی مصالح ۱۲
۱-۴-۵- آسیای اولیه ۱۳
۱-۴-۶- تهیه خوراک کوره ۱۴
۱-۴-۶-۱- روش تر ۱۴
۱-۴-۶-۲- روش نیمه تر ۱۵
۱-۴-۶-۳- روش نیمه خشک ۱۵
۱-۴-۶-۴- روش خشک ۱۵
۱-۴-۷- سیستم پخت ۱۵
۱-۴-۷-۱- پیش گرم‌کن ۱۶
۱-۴-۷-۲- پیش‌کلسینه‌کن ۱۶
۱-۴-۷-۳- کوره ۱۶
۱-۴-۷-۳-۱- کوره قائم ۱۷

۲-۳-۷-۴-۱- کوره گردنده افقی ۱۷
۴-۷-۴-۱- خنک‌کننده ۱۹
۱-۴-۷-۴-۱- خنک‌کننده مشبک ۲۰
۲-۴-۷-۴-۱- خنک‌کننده اقماری ۲۰
۸-۴-۱- خردایش کلینکر ۲۲
۱-۸-۴-۱- آسیای لوله‌ای ۲۳
۲-۸-۴-۱- جداکننده هوائی ۲۵
۱-۲-۸-۴-۱- جداکننده هوایی ایستا ۲۵
۲-۲-۸-۴-۱- جداکننده هوایی پویا ۲۷
۱-۲-۲-۸-۴-۱- جداکننده هوایی نسل سوم ۲۷
۲-۸-۴-۱-۳- منحنی کارایی ۲۸
۲-۸-۴-۱-۱-۳- پدیده میان‌بر زدن و قلاب ماهی ۲۹
۲-۳-۲-۸-۴-۱- شاخص ریزی یا بلین ۳۱
۳-۸-۴-۱- سیکلون هوایی ۳۲
۹-۴-۱- سیلوهای سیمان و بارگیرخانه ۳۲
۵-۱-کارخانه سیمان مازندران ۳۳
۱-۵-۱- تاریخچه ۳۳
۲-۵-۱- مواد اولیه کارخانه ۳۶
۳-۵-۱- نگاه کلی به بخش‌های اصلی کارخانه سیمان ۳۶
**فصل دوم: مدل‌سازی مدار خردایش کلینکر**
۲-۱- پیش‌گفتار ۴۰
۲-۲- مروری بر مطالعات گذشته ۴۱
۲-۳- مدل آسیای گلوله‌ای ۴۷
۲-۴- مدل منحنی کارآیی ۴۸
۲-۵- مراحل شبیه‌سازی ۵۱
۲-۵-۱- نمونه برداری ۵۲
۲-۵-۲- موازنه جرم ۵۲
۲-۵-۳- تابع شکست ۵۳
۲-۵-۳-۱- روش‌های مبتنی بر آزمایش‌های شکست تک ذره ۵۵
۲-۵-۳-۲- روشهای مبتنی بر آزمایش های آسیا کردن نمونه ۵۵
۲-۵-۳-۳- روشهای مبتنی بر محاسبات برگشتی ۵۶
۲-۵-۳-۴- برازش (مدل سازی ریاضی) داده های تابع شکست ۵۶
۲-۵-۳-۵- نرم افزار تعیین تابع شکست ۵۷
۲-۵-۴- تابع انتخاب ۵۷

۵-۵-۲- پارامترهای مدل توزیع زمان ماند ۵۹
۶-۵-۲- پارامترهای مدل وایتن ۵۹
۷-۵-۲- شبیه‌سازی ۶۰
**فصل سوم: مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدار خردایش کلینکر کارخانه سیمان مازندران**
۱-۳- معرفی نرم‌افزارBMCS ۶۲
۲-۳- روش استفاده از نرم‌افزار BMCS ۶۴
۱-۲-۳- نحوه‌ی ساخت فایل تعریف برگه جریان در BMCS ۶۴
۲-۲-۳- نحوه‌ی ایجاد فایل داده برای نرم‌افزار BMCS ۷۰
۳-۳- مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدار خردایش کلینکر کارخانه سیمان مازندران ۷۳
۱-۳-۳ -نمونه‌برداری از کارخانه ۷۴
۱-۱-۳-۳- نمونه‌برداری از خوراک تازه ورودی به آسیا ۷۴
۲-۱-۳-۳- نمونه برداری از جریان های ورودی و خروجی جداکننده هوایی ۷۵
۳-۱-۳-۳- نمونه برداری از داخل آسیا ۷۶
۲-۳-۳- آزمایش‌های دانه‌بندی ۸۰
۳-۳-۳- موازنه جرم ۸۲
۴-۳-۳- تعیین اندیس کار باند و تابع شکست ۸۸
۱-۴-۳-۳- روش تعیین اندیس کار باند ۸۸
۲-۴-۳-۳- تعیین تابع شکست ۸۹
۵-۳-۳ -تعیین تابع انتخاب ۹۳
۶-۳-۳ -مدل‌سازی آسیای لوله‌ای ۹۳
۷-۳-۳ -مدل‌سازی جدا کننده‌های هوایی و دیافراگم‌ها ۹۴
۱-۷-۳-۳ -الگوریتم ژنتیک ۹۵
۲-۷-۳-۳ -تابع برازندگی در محیط متلب ۹۶
۸-۳-۳- نتایج مرحله ی مدل سازی مدارهای خردایش ۱۰۲
۹-۳-۳- شبیه‌سازی مدار خردایش کارخانه سیمان مازندران ۱۰۴
۱۰-۳-۳- بهینه‌سازی ۱۰۵
**فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد**
نتیجه‌گیری و پیشنهاد ۱۰۹
**منابع** ۱۱۱
**پیوست** ۱۱۷

## فهرست جدول‌ها

صفحه


جدول ۱-۳ کد مربوط به گره‌ها در ماتریس ارتباط ۶۷
جدول ۲-۳ کدهای مربوط به وضعیت ارتباط گره‌ها با شاخه‌ها ۶۷
جدول ۳-۳ مشخصات دستگاه‌های موجود در مدار خردایش کلینکر کارخانه سیمان مازندران ۷۳
جدول ۴-۳ ترکیب گلوله های آسیای باند- نعمت اللهی ۸۸
جدول ۵-۳ تابع شکست نرمال‌شونده کلینکر سیمان مازندران ۹۲
جدول ۶-۳ پارامترهای مدل وایتن جداکننده‌ی هوایی به دست آمده از الگوریتم ژنتیک ۹۹
جدول ۷-۳ پارامترهای مدل وایتن دیافراگم میانی، به دست آمده از الگوریتم ژنتیک ۱۰۲
جدول ۸-۳ مقایسه نتایج خروجی از BMCS با مقادیر اندازه‌گیری شده ۱۰۳
جدول ۹-۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقادیر واقعی دبی جریان‌ها ۱۰۵

## فهرست شکل‌ها

صفحه


شکل ۱-۱ سالن اختلاط مواد ۱۳
شکل ۱-۲ آسیای غلطکی قائم ۱۴
شکل ۱-۳ کوره افقی ۱۸
شکل ۱-۴ پیش‌گرم‌کن ۱۸
شکل ۱-۵ پیش‌گرم‌کن، پیش‌کلسینه‌کن و کوره ۱۹
شکل ۱-۶ نحوه جریان مواد، هوا و سوخت در مدار پخت کلینکر ۲۱
شکل ۱-۷ خنک‌کننده مشبک ۲۱
شکل ۱-۸ خنک‌کننده اقماری ۲۲
شکل ۱-۹ آسیای دوخانه‌ای ۲۴
شکل ۱-۱۰ جداکننده هوایی ایستا ۲۶
شکل ۱-۱۱ مدار خردایش کلینکر ۲۶
شکل ۱-۱۲ مقایسه ته‌ریز دانه‌درشت جداکننده نسل سوم با نسل‌های ماقبل ۲۷
شکل ۱-۱۳ جداکننده نسل سوم (راندمان بالا) ۲۹
شکل ۱-۱۴ شمای کلی کارخانه سیمان ۳۲
شکل ۱-۱۵ عکس ماهواره ای کارخانه سیمان مازندران ۳۵
شکل ۱-۲ رویکرد شبیه‌سازی آسیای لوله‌ای دوخانه‌ای ۴۴
شکل ۲-۲ نقاط مورد نیاز برای نمونه‌برداری از مدار خردایش به منظور مدل‌سازی ۴۵
شکل ۲-۳ قسمت‌های دیافراگم میانی ۴۹
شکل ۲-۴ جلوگیری از فضای مرده در طراحی‌های جدید دیافراگم ۴۹
شکل ۲-۵ مراحل انجام یک پروژه شبیه‌سازی توسط BMCS ۵۱
شکل ۲-۶ الف) نقاط نمونه‌برداری داخل آسیا ب) مراحل نمونه برداری داخل آسیا ۵۴
شکل ۲-۷ نحوه ترکیب ظروف واکنش ایده‌آل در مدل ولر ۵۹
شکل ۳-۱ نمودار جریان عملیات نرم‌افزار ۶۳
شکل ۳-۲ مدار بسته خردایش کلینکر که شامل آسیای لوله‌ای و جداکننده هوائی است ۶۵
شکل ۳-۳ شبکه گره و جریان مدار خردایش کلینکر ۶۶
شکل ۳-۴ نمونه‌برداری از بار ورودی به آسیا ۷۵
شکل ۳-۵ نمونه‌برداری از ورودی و خروجی‌های جداکننده هوائی ۷۶
شکل ۳-۶ نمونه‌گیری از داخل آسیا ۷۹
شکل ۳-۷ دستگاه و سرندهای آنالیز ابعاد نمونه‌ها در دانشگاه کاشان ۸۰
شکل ۳-۸ مرکز تحقیقات فرآوری کرج ۸۰
شکل ۳-۹ پنجره‌ی بهینه‌سازی متلب ۹۷
شکل ۳-۱۰ پنجره‌ی اطلاعات مربوط به اجرای الگوریتم ژنتیک ۹۸

**فهرست نمودارها**

**صفحه**


نمودار ۱-۱ منحنی کارایی یک جداکننده هوایی نسل سوم ۳۰
نمودار ۲-۱ پدیده قلاب ماهی ۳۰
نمودار ۱-۲ توزیع اندازه ذرات نقاط نمونه‌برداری شده از خانه اول و اولین نقطه از خانه دوم آسیا ۴۵
نمودار ۲-۲ توزیع اندازه ذرات مربوط به نقاط نمونه‌برداری شده از خانه دوم و خروجی آسیا ۴۶
نمودار ۳-۲ رابطه خطی خردایش مواد یک فراکسیون بر حسب زمان ۵۸
نمودار ۱-۳ توزیع دانه‌بندی خوراک ۸۱
نمودار ۲-۳ توزیع دانه‌بندی خانه‌ی اول آسیا ۸۱
نمودار ۳-۳ توزیع دانه‌بندی خانه‌ی دوم آسیا ۸۱
نمودار ۴-۳ توزیع دانه‌بندی اطراف جداکننده‌ی هوا ۸۲
نمودار ۵-۳ توزیع دانه‌بندی اطراف شبکه میانی ۸۲
نمودار ۶-۳ تابع شکست نرمال کلینکر سیمان مازندران ۹۱
نمودار ۷-۳ تابع شکست غیرنرمال کلینکر سیمان اردبیل ۹۱
نمودار ۸-۳ مقایسه دانه‌بندی مدل‌سازی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری شده ۱۰۳
نمودار ۹-۳ مقایسه مقادیر مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌شده جریان‌های اطراف جداکننده‌ی هوایی ۱۰۵
نمودار ۱۰-۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقادیر واقعی دانه‌بندی جریان‌های اصلی ۱۰۵
نمودار ۱۱-۳ نمودار دانه‌بندی جریان‌های اطراف جداکننده‌ی هوایی حاصل از شبیه‌سازی ۱۰۷
نمودار ۱۲-۳ کارایی جدایش جداکننده‌ی هوایی ۱۰۷

# فصل اول

# مفاهیم پایه

# ۱–۱– پیش‌گفتار:

انرژی ارتباط تنگاتنگی با توسعه اقتصادی و اجتماعی دارد و بدلیل محدود بودن منابع انرژی توجه به امر استفاده منطقی و بهینه، ضروری می باشد.کشورهای در حال توسعه به علت محدودیت در تامین انرژی مورد نیاز صنایع از یک سو و نیاز به تولید با قیمت تمام شده معقول برای حضور رقابتی در بازارهای جهانی از سوی دیگر همواره در تلاشند تا اطلاعات بیشتر در زمینه افزایش راندمان تولید و مصرف انرژی کسب کنند. در صنعت سیمان نیز مانند هر بنگاه اقتصادی دیگر مباحث صرفه اقتصادی افزایش راندمان و بهره‌وری و استفاده بهینه از منابع مالی از اهمیت تعیین‌کننده‌ای در حفظ و بقا سازمان برخوردار است. صنعت سیمان به همراه صنایعی مانند فولاد، کاغذ و پتروشیمی از جمله صنایع پرمصرف انرژی هستند. این صنعت حدود ۲ درصد از انرژی کل جهانی و ۵ درصد از کل انرژی صنعتی جهان را مصرف می‌کند این رقم در ایران ۱۵ درصد انرژی تولیدی است [۲،۱]. مصرف سالیانه سیمان در حال حاضر در حدود ۷۳/۳ میلیارد تن می‌باشد که با نرخ ۷/۴ درصد سالیانه در حال رشد می‌باشد [۳]. ۵۰ الی ۶۰ درصد هزینه نهایی تولید مربوط به هزینه انرژی می باشد [۴]. مصرف انرژی در کارخانجات سیمان در حدود ۱۲۰-۱۱۰ kWh به ازای هر تن است [۵].۶۰ درصد از مصرف انرژی الکتریکی در کارخانه سیمان مربوط به خردایش می باشد که از این مقدار ۴۰ درصد به خردایش نهایی کلینکر[1] مربوط می‌شود [۶]. همچنین صنعت سیمان در بهترین حالت با کارایی ۶۰ الی ۷۰ درصد، صنعتی کم بازده به حساب می‌آید [۸،۷]. کاهش راندمان مدارهای آسیاکنی منجر به افزایش هزینه تولید شده و بر عکس، با چند درصد افزایش راندمان در مدارهای آسیای سیمان، هزینه‌های تولید به طور چشمگیری کاهش می‌یابد، پتانسیل‌هایی وجود دارد که بوسیله آنها می‌توان مدارهای سایش معمولی سیمان را بهینه کرد. در دهه‌های گذشته پیشرفت‌های چشم‌گیری در این زمینه صورت گرفته است. تقاضاهای جهانی برای تولید سیمان نرم و نیاز به کاهش در مصرف انرژی برای تولید سیمان ضرورت بهینه سازی را تقویت

[1] Clinker

کرده است. کارخانه سیمان مازندران دارای ۴ مدار خردایش کلینکر می باشد که از آسیای لوله‌ای دو خانه‌ای در مدار بسته با جداکننده هوایی هوایی تشکیل شده است. فضای خانه‌ها بوسیله یک دیافراگم از هم جدا شده است. شبیه سازی آسیاها با ایجاد سیستم مجازی متشکل از چند آسیا که به‌صورت سری قرار گرفته‌اند و یک کلاسیفایر انجام می‌شود [۹،۱۰]. این روش در شبیه‌سازی کارخانجات سیمان در کشور ترکیه توسط بنزر[1] و همکاران با موفقیت اجرا شد [۹،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴]. در این الگو دیافراگم میانی با استفاده از مدل وایتن[2] که بر مبنای منحنی کارایی جدایش می‌باشد به خوبی شبیه‌سازی گردید [۹،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸]. پژوهش های دیگری که توسط موسسه JKMRC[3]، لینچ[4] و همکارانش انجام گرفت کاربرد مدل وایتن برای شبیه‌سازی جداکننده هوایی با موفقیت به اثبات رسید [۱۹]؛ بنابراین در این تحقیق نیز برای شبیه‌سازی جداکننده هوایی در مدار بسته با آسیای لوله ای از این روش استفاده می‌شود. شبیه سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز BMCS[5] انجام شد. نسخه اولیه این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۸ به عنوان قسمتی از پایان‌نامه دکترای اکبر فرزانگان در دانشگاه مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه مک‌گیل[6] دانشگاه کانادا به پایان رسید. نسخه‌ی چهارم از این نرم‌افزار که برای شبیه سازی بکار رفته است شبیه‌ساز با ساختار پی در پی[7] است که دارای یک برنامه اصلی و چندین برنامه فرعی است. این نرم افزار از مدل موازنه جمعیت و مدل توزیع زمان ماند ولر[8] برای شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای و برای شبیه سازی جداکننده هوایی و شبکه میانی آسیا از مدل وایتن بر مبنای منحنی کارایی استفاده می‌کند.

در فصل اول به معرفی سیمان و نحوه تولید آن، کارخانه سیمان مازندران و بخش‌های مختلف آن پرداخته شده است. در فصل دوم نحوه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدار خردایش نهایی سیمان و روش مورد نظر بطور جامع آورده شده است. در فصل سوم مراحل انجام گرفته مربوط به این پایان‌نامه از جمله نمونه‌برداری‌ها، کارهای آزمایشگاهی، نرم‌افزاری و تجزیه تحلیل آن‌ها آورده شده است و در آخر فصل چهارم به نتایج و پیشنهادها اختصاص داده شده است.

---

[1] Benzer
[2] Whiten
[3] Julius Kruttschnitt Mineral Research Center
[4] Lynch
[5] BMCS-based Modular Comminution Simulator
[6] McGill University
[7] Sequential
[8] weller

## ۱-۲- تاریخچه:

وقتی صحبت از هر ماده معدنی به میان می‌آید، همواره در ابتدا این سئوال در ذهن ایجاد می‌شود که ماهیت و ساختار آن چیست؟ چه وقت و چگونه توسط بشر کشف و از چه زمان به‌کار گرفته شده؟ چه روند تکاملی را طی کرده و هم‌اکنون چه کاربردهایی دارد؟ چشم‌انداز و آینده این ماده چگونه است؟ و...

سیمان نیز مستثنی از این موارد نیست و با توجه به نقش مهم این ماده در زندگی امروز بشر، هنگامی که صحبت درباره آن به میان می‌آید، کنجکاوی درباره ماهیت، تاریخچه کشف و روند تکاملی و... آن دوچندان می‌شود. از این رو، در گزارشی مختصر و مفید، ویژگی‌ها، تاریخچه، سیر تکاملی و... سیمان را مورد بررسی قرار داده‌ایم که در زیر می‌خوانید.

سیمان یا سمنت واژه‌ای است که از لغت سمنتوم رومی گرفته شده و به معنای چسب است، قدمت استفاده از سیمان به بیش از ۲۰۰۰ سال می‌رسد. مصرف آن در ساختمان پانتئون[1] شهر رم واقع در ایتالیا که مربوط به سنه ۲۷ قبل از میلاد است دیده شده است. اما سیمانی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرید با آنچه که در آن زمان استفاده می‌شد کاملاً فرق دارد. آهک ناخالص به‌عنوان یکی از مصاح ساختمانی تاریخچه طولانی‌تر دارد فنیقی‌ها ۷۰۰ سال قبل از میلاد مسیح آهک پوزولنی را بکار می‌بردند رومی‌ها نوعی سیمان با آهک پخته شده را مصرف می‌کردند همچنین در قرون وسطی در هلند با پخت توف[2] و آهک در کوره‌های ثابت گنبدی[3] نوعی سیمان هیدرولیکی تولید و مصرف می‌شده است [۱۹،۲۰]. آنچه امروز تحت عنوان سیمان شناخته می‌شود قدمتی در حدود ۲۵۰ سال دارد، قرون ۱۸ و ۱۹ زمان کشف بسیاری از پدیده‌ها بود و توجه زیادی به پدیده‌های علمی و طبیعی توسط دانشمندان و محققان می‌شد. یکی از پدیده‌هایی که مورد توجه زیادی بود، گیرایش و سخت شدن ملات‌ها بود. در سال ۱۷۵۶ فردی انگلیسی به نام جان اسمیتون[4] به کمک پخت مواد در کوره‌ی ثابت سیمان را تولید کرد و به خواص هیدورلیکی ملات‌ها پی برد. این اکتشاف در پی تحقیقات او برای ربودن جایزه مسابقه‌ای بود که تحت عنوان بهترین ملات جهت تجدید بنای فانوس دریایی ادی استون[5] مطرح شده بود و اسمیتون طی تحقیقات خود متوجه شد که بهترین ملات از پختن نوعی سنگ آهک به دست می‌آید که در آن مخلوط سنگ، مقداری خاک رس نیز وجود داشته باشد. در سال ۱۸۰۲ میلادی اولین کارخانه سیمان در انگلیس بنا

[1] Pantheon
[2] Tuff
[3] Dome shaed
[4] John Smeaton
[5] Eddystone Lighthouse

شد که به جهت سعی و تلاش یک شیمیدان معروف به نام فردریچ جان[۱] با بالا بردن کیفیت پخت سیمان و همچنین ازدیاد درجه حرارت دمای کوره و خردایش بهتر مواد، سیمان مرغوبتری را بدست آورد [۲۱،۲۲]. پس از آن افراد دیگری مانند آقایان هیگینز[۲]، پارکر[۳] و ویکت[۴] فرانسوی تلاش‌های را در جهت بهبود کیفیت ملات سیمان انجام دادند ولی معروفترین نام در این زمینه از آن معماری به نام جوزف آسپدین[۵] است که از پختن آهک و خاک رس در حرارت بالا و آسیا کردن آن موفق شد ابتدایی ترین نوع سیمان را کشف نموده و آن را در تاریخ ۲۱ اکتبر ۱۸۲۴ بنام خود در انگلستان ثبت نماید. وی با این کشف لوح تقدیر از جرج چهارم پادشاه وقت دریافت کرد و نام محصول بدست آمده را سیمان پرتلند[۶] گذاشت. علت این این نامگذاری همانطوری که گفته شد سیمان از سمنتوم رومی گرفته شده است و پرتلند نام جزیره‌ای در انگلستان است که رنگ سیمان پس از سخت شدن به رنگ سنگ های ساحلی این جزیره در می آید به همین دلیل نام پرتلند را به دنبال سیمان برای آن انتخاب نموده اند. سیمان ساخته شده او واقعاً بهتر و عالی‌تر از تمام سیمان‌های قبلی بوده و دارای مقاومت بیشتری بود. به همین علت از آن در ساخت پارلمان جدید انگلستان که از سال ۱۸۴۰ تا ۱۸۵۲ طول کشید، استفاده گردید [۲۳]. اولین کارخانه سیمان آلمان نیز در سال ۱۸۵۵ توسط دکتر هرمان بلیب تره[۷] در اشتاین[۸] اجرا گردیده است. بدین ترتیب بشر وارد عصر تولید تولید صنعتی سیمان شد و برای اولین بار در تاریخ صنعتی، نخستین مؤسسه استاندارد تولید توسط تولیدکنندگان سیمان در کشور آلمان به وجود آمد؛ لذا سیمان اولین محصول صنعتی است که دارای استاندارد تولید شده است. در دهه ۱۸۸۰ پیشرفت دیگری در تولید سیمان افتاد و آن استفاده از کوره‌های افقی بود. کوره‌های قائم نیاز به نیروی انسانی بیشتری برای تغذیه و تخلیه مواد داشتند مضاف بر آن تغذیه و تخلیه از مناطق داغ کوره انجام می‌گرفت که بسیار طاقت‌فرسا بود. این نوع کوره‌ها هرگز بطور گسترده مورد استفاده قرار نگرفت به همین جهت و نیز به‌منظور افزایش کیفیت و کاهش هزینه تولید، تلاش‌های زیادی برای تبدیل کوره‌های قائم از حالت غیر مداوم به مداوم صورت پذیرفت. به عنوان اولین طرح در این زمینه می‌توان کوره چندطبقه‌ی دیتش[۹] را در سال ۱۸۸۳ عنوان نمود. اولین کوره دوار سیمان در دنیا در سال ۱۸۷۷ توسط فردریم رنسوم[۱۰] در انگلستان به ثبت رسید اما اولین طرح موفق

---

[1] friedrich John
[2] Higgins
[3] parker
[4] Vicat
[5] Joseph Aspdin
[6] portland cement
[7] Dr.Hermann Bleibtrev
[8] Stein
[9] dietzsch
[10] Frederick Ransome

توسط سیمن و هاری[1] در سال ۱۸۹۷ از کارخانه سیمان اطلس به بهره‌برداری رسید. بروز جنگ جهانی موجب توقف ۱۰ ساله پیشرفت این صنعت گردید؛ پس از جنگ تحولات جدیدتر مانند اختراع خنک‌کننده‌مشبک[2] صورت پذیرفت. اواخر دهه ۶۰ و ۷۰ زمان معرفی پیش‌گرم‌کن[3] و اواخر دهه ۸۰ زمان معرفی کلسینه‌کننده اولیه[4] بود. اواخر دهه ۸۰ و اولیل دهه ۹۰ تاکید بیشتری بر اتوماسیون و متمرکز کردن کنترل کارخانه برای تولید محصول با کیفیت و با ارزش مطلوب مد نظر بود [۲۱،۲۳].

## ۱-۲-۱- تاریخچه سیمان در ایران:

مطالعات تاریخی نشان می‌دهد که ایرانیان نیز همانند فینیقی‌ها و یونانی‌ها و رومی‌ها، قادر به تهیه ملات‌های آبی بوده‌اند که توانایی تحمل فشار و انسجام خود را در مجاورت آب نیز حفظ می‌کرده است، آثار باقیمانده‌ای مانند سدها و پل‌های عظیم در مناطق مختلف ایران همچون سد ایزدخواست که اولین سد قوسی جهان به‌شمار می‌رود، سد کرخه و سد شادروان، مسلم می‌سازد که ایرانی‌ها از دیرباز خواص هیدرولیک آهک را می‌شناخته‌اند، حتی پختن آهک را رومی‌ها از یونانی‌ها و یونانی‌ها از ایرانیان فرا گرفتند، زیرا قدیمی‌ترین ملات آهکی در ایران کشف شده، چینی‌ها هم پختن سنگ آهک را می‌دانستند و ۲۰۰۰ سال پیش در ساختن برج‌های دیوار چین، از ملات آهکی استفاده می‌کرده‌اند، اما ملات‌های ایران خیلی قدیمی‌تر از این زمان‌هاست. اقوام ساکن در مناطق شمالی خلیج‌فارس از نوعی ساروج استفاده می‌کردند که خواص هیدرولیکی جالب و مقاومت بالایی دارد. معروف‌ترین این ساروج‌ها، ساروج خمیر است که در بندر خمیر تهیه می‌شد و هنوز تاسیسات بندری ساخته شده با این نوع ملات در نقاطی از بندر لنگه و بندر بوشهر پابرجا هستند [۲۴].

در عصر حاضر نیز، اولین کارخانه سیمان کشور در سال ۱۳۱۲ در شهر ری در نزدیکی تهران با ظرفیت روزانه ۱۰۰ تن احداث شد. با گذشت زمان و افزایش تقاضا برای این محصول، نیاز به کارخانه‌های دیگر آشکار شد. بر این اساس در سال ۱۳۱۴، کارخانه دیگری با ظرفیت روزانه ۲۰۰ تن خریداری و در سال ۱۳۱۵ در جوار کارخانه قبلی عملیات ساختمانی آن شروع و در سال ۱۳۱۶ بهره‌برداری از واحد دوم آغاز شد. هم‌اکنون ۵۹ واحد تولید سیمان در کشور وجود دارد که ۸۹ میلیون تن سیمان در سال تولید می‌کنند. در حال حاضر سهم بخش خصوصی از تولید سیمان حدود ۱۵ درصد است، متوسط رشد مصرف در ۴۲ سال گذشته ۵/۶ درصد بوده و در ۵ سال گذشته به ۵/۸ درصد و در سه سال اخیر به ۵/۱۰ درصد ارتقا یافته

---

[1] Seaman and hurry
[2] Grate cooler
[3] preheater
[4] precalcinator

است و سرانه سالانه مصرف نیز از ۲۲۰ کیلوگرم در سال ۱۳۵۷ به ۶۵۰ کیلوگرم در پایان سال ۱۳۸۷ رسیده است. آخرین آمارهای اعلام شده نشان می‌دهد که هم‌اکنون در جهان بیش از ۹۰ کشور توانایی تولید سیمان را دارند. البته میزان تولید سیمان با توجه به امکانات موجود، زیرساخت‌ها، مواد اولیه و نیروی انسانی متخصص در کشورهای مختلف متفاوت است و از تولید سالانه بیش از یک هزار و۹۵۰ میلیون تن تا تنها یک میلیون تن را دربرمی‌گیرد. در این بین ایران با تولید بیش از ۶۶ میلیون تن سیمان در سال و ظرفیت اسمی تولید بیش از ۸۰ میلیون تن، در رده هفتم کشورهای تولیدکننده سیمان با ظرفیت بالا قرار دارد [۲۵،۲۶].

## ۱–۳– شیمی سیمان:

سیمان پودری است جاذب آب و چسباننده خرده سنگ (شن و ماسه)که از ترکیب , پختن و گداختن اکسید کلسیم با اکسیدهائی نظیر اکسید آلومینیوم , سیلسیم, آهن , منیزیم و... بدست می آید [۲۷].

### ۱–۱–۳– ترکیبات سازنده سیمان:

### ۱–۱–۳–۱– آهک زنده یا اکسید کلسیم (CaO):

آهک مهمترین ماده اولیه برای تولید سیمان می‌باشد، این ماده از پختن سنگ آهک (کربنات کلسیم) که ۸۵٪ خوراک را تشکیل می‌دهد در حرارت حدود هزار درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. در حرارت بیش‌تر با اکسید سیلیسیم، آلومینیوم و آهن ترکیب شده و فازهای سیمان تشکیل می‌دهد.

### ۲–۱–۳–۱– سیلیس ($SiO_2$):

این ماده در اغلب سنگ‌های طبیعی یافت می‌شود و با سهم ۱۷ تا ۲۶ درصد وزنی سیمان یکی از مواد اصلی در ساخت سیمان پرتلند است که از خاک رسی تأمین می‌شود که ۱۳ درصد خوراک را تشکیل می‌دهد. سیلیس در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با آهک ترکیب شده و دو کلسیم و سه کلسیم سیلیکات را ایجاد می‌کند.

### ۳–۱–۳–۱– آلومینا ($Al_2O_3$):

آلومینا یا اکسید آلومینیوم خالص، نقش کمک ذوب را در هنگام پخت سیمان ایفا می‌کند و درجه حرارت پخت مواد خام را کاهش می‌دهد. این ماده در کوره با آهک ترکیب شده و سه کلسیم آلومینات را تشکیل می‌دهد که باعث زودگیر شدن سیمان می‌گردد. خوراک تأمین‌کننده این ماده خاک رس است. خالص‌ترین نوع خاک رس، کائولینیت می‌باشد که در آن آلومینا در حدود ۴۰ درصد وزن مولکولی را تشکیل می‌دهد. آلومینات بیش‌ترین حرارت را در

میان فازهای تشکیل‌دهنده سیمان به خود اختصاص می‌دهد. اگر درصد این اکسید در سیمان نهایی کمتر از ۵ درصد باشد آنگاه بتن در مقابل آب دریا و سایر آب‌های سولفات‌دار مقاوم خواهد بود.

### ۴-۱-۳-۱- اکسید آهن ($Fe_2O_3$):

اکسید آهن کم و بیش در اغلب کانی‌ها به خصوص کانی‌های خاک رس و دیگر مواد اولیه سیمان وجود دارد. این اکسید نقش کمک ذوب را بازی می‌کند و با آهک وآلومینا در کوره ترکیب می‌شود و اکسید مرکب چهار کلسیم آلومینوفریت را تولید می‌کند که گیرایی سیمان را به تأخیر می‌اندازد و رنگ سیمان را تیره می‌کند به همین علت سیمان سفید فاقد اکسید آهن است.

### ۵-۱-۳-۱- اکسید منیزیم (MgO):

این اکسید کمک ذوب است اما مقدار آن نباید از ۵ درصد تجاوز کند زیرا میل ترکیبی کمی با آب دارد و به علت انبساط حجمی زیادی که ایجاد می‌کند ترک‌های موئی در بتن بوجود می‌آورد که به مرور باعث سست شدن آن می‌شود.

### ۶-۱-۳-۱- قلیائی‌ها:

سدیم و پتاسیم نقش روانساز را دارند، مقدار این دو عنصر در سیمان نباید بیش از ۱ درصد وزن سیمان باشد زیرا زمان گیرائی سیمان را دچار اختلال می‌کند. مقدار کلر در کلیه سیمان‌ها به جهت نقش تخریبی آن باید کمتر از ۱/۰ درصد آن‌ها باشد. این مواد طی فرآیندی تا دمای ۱۴۰۰ الی ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شوند تا به دانه‌های کلینکر تبدیل شود سپس به همراه ۳ الی ۴ درصد گچ که برای کنترل زمان گیرایش سیمان به آن اضافه می‌شود وارد آسیا شده تا در نهایت تبدیل به سیمان شود.

## ۱-۲-۳- فازهای عمده مینرالی تشکیل‌دهنده سیمان:

### ۲-۳-۱-۱- تری‌کلسیم سیلیکات(آلیت[1]) $(CaO)_3.SiO_2$ یا به اختصار $C_3S$ – ۲۰ ۷۵ درصد

چه از نظر مقدار (درصد تشکیل دهنده) و چه از نظر تاثیر روی خواص سیمان، فاز آلیت دارای بیشترین سهم می باشد و بیشتر خواص سیمان تابع این فاز است. خصوصاً اثر بارز این

[1] alit

ترکیب تاثیر روی مقاومت سیمان است. این فاز بصورت خالص در کلینکر وجود ندارد و حدود ۲ درصد ناخالصی دارد که شامل اکسیدهای $Fe_2O_3$، $Al_2O_3$، $MgO_3$ و $TiO_2$ می‌شود. درصد هر یک از این اکسیدها به درصد آنها در مواد اولیه، درجه حرارت پخت و نحوه سرد کردن کلینکر بستگی دارد. برای بوجود آمدن این ترکیب بایستی حالت گداختگی (ذوب شدن) در منطقه پخت ایجاد شود .

### ۲-۳-۱-۲- دی‌کلسیم سیلیکات(بلیت[1]) $(CaO)_2.SiO_2$ یا به اختصار $C_2S$ ۱۵- ۴۶ درصد

بلیت خالص در کلینکر سیمان یافت نمی‌شود و همراه با مقادیری از سایر اکسیدها می‌باشد. این ترکیب در ضمن پختن کلینکر و در حالت جامد تشکیل می‌گردد. در مواقعی که ضریب اشباع آهک بالاست، مقادیر خیلی کمی از این ترکیب در کلینکر وجود خواهد داشت. گسترش و افزایش مقاومت بلیت آهسته است، اما در دراز مدت تقریباً به مقاومت آلیت می‌رسد. درصدی از بلیت با تغییر در ساختار کریستال از فرم ب-بتا به فرم ب-گاما می‌رسند که فاقد خاصیت هیدرولیکی است و باعث افت کیفیت کلینکر[2] می‌شود. با اضافه کردن یون‌های خارجی و یا تسریع در سرد کردن می‌توان از این روند پیشگیری کرد.

### ۲-۳-۱-۳- تری‌کلسیم آلومینات(آلومینات[3]) $(CaO_3).\ Al_2O_3$ یا به اختصار $C_3A$ ۱۳-۴ درصد

فاز آلومینات نیز مشابه دو فاز فوق به همراه عناصر خارجی است. اکسیدهای سدیم و پتاسیم قادرند تا حد ۵ درصد وزنی جای گیرند. میل ترکیبی این جزء با آب بسیار بالاست که با حضور اکسیدهای قلیایی شدیدتر نیز می‌گردد؛ به همین علت و برای جلوگیری از گیرش سریع سیمان در مراحل خردایش نهایی مقداری سنگ گچ (سولفات‌کلسیم) به عنوان عامل بازدارنده و کندکننده گیرش به سیمان افزوده می‌شود.

### ۲-۳-۱-۴- تتراکلسیم آلومینوفریت(فریت[4]) $(CaO)_4.Al_2O_3.Fe_2O_3$ یا به اختصار $Ca_4AF$ ۱۲-۸ درصد

فاز فریت دارای ترکیب مشخصی نمی‌باشد و ترکیب آن بستگی به مقدار آلومینیم و آهن موجود در کلینکر دارد. این فاز در محدوده بین $C_2F$ و $C_2A$ قرار دارد و می‌تواند شامل ترکیبات $C_6AF$، $C_4AF$ و $C_6A_2F$ باشد. حدوداً ترکیب فاز فریت در کلینکر سیمان پرتلند

[1] belit
[2] falling
[3] aluminat
[4] ferrit