

بِحَدِيثِ الْأَنْبِيَاءِ الْأَكْبَرِ



دانشگاه عمران

# استفاده از خاک لتریت در آجر و بهبود خواص آن

نگارش

ساناز مودن چی

استاد راهنما: دکتر امیر طریقت

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته عمران سازه

دی ماه ۱۳۹۲

باسمه تعالی

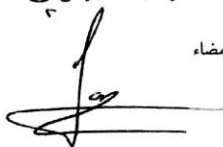


### تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب ساناز موذن چی متعهد می‌شوم که مطالب منسدرج در این پایان‌نامه/رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات، ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه/رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی است.

نام و نام خانوادگی دانشجو ساناز موذن چی

امضاء  


شماره: ۱۵۰۰۰۰۵۶۰۷  
تاریخ: ۹۳/۰۴/۰۹  
پوست: .....



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

به نام خدا

### صور تجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم ساناز موذنچی دانشجوی رشته مهندسی عمران - سازه تحت عنوان " استفاده از لتریت در آجر و بهبود خواص آن " در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی برگزار و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.

قبول (بادرجه ۵۰)..... امتیاز (۱۹/۹۲)  دفاع مجدد  مردود.

۱ - عالی (۲۰ - ۱۹)

۲ - بسیار خوب (۹۹/۱۸ - ۱۸)

۳ - خوب (۹۹/۱۷ - ۱۶)

۴ - قابل قبول (۹۹/۱۵ - ۱۴)

۵ - غیر قابل قبول (کمتر از ۱۴)

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضاء
	استادیار	دکترامیر طریقت	استاد راهنما
	---	-----	استاد راهنما
	---	-----	استاد مشاور
	استادیار	دکتر محمدعلی ارجمند	استاد داور داخلی
	استادیار	دکتر فریدون رضایی	استاد داور خارجی
	استادیار	دکتر محمدعلی ارجمند	نماینده تحصیلات تکمیلی

دکتر محمد علی ارجمند

رئیس دانشکده مهندسی عمران

تهران، لویزان، کد پستی: ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸  
صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۸۵  
تلفن: ۹-۰۶۰-۲۲۹۷۰۰۶۰ فکس: ۲۲۹۷۰۰۳۳  
Email: sru@sru.ac.ir  
www.srttu.edu

پس خدای را که هر چه دارم از اوست

تقدیم به:

همسرم

که صمیمانه مرایاری نمود

## شکر و قدردانی

شکر و سپاس ویژه از استاد دانشمند و پرمایه ام **جناب آقای دکتر امیر طریقت** که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کجی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و از محضر پر فیضان بهره‌مندم.

باشکر از استاد محترم **جناب آقای دکتر ارجمند** که زحمت داورسی این پژوهش را متقبل نمودند و راهنمایی‌های ارزشمندی را ارائه فرمودند.

باشکر از استاد ارجمند **جناب آقای دکتر فریدون رضایی** که زحمت ارزیابی پژوهش حاضر را به عنوان داور خارجی تقبل نمودند.

شکر و سپاس از مسئولین کارگاه و آزمایشگاه **عمران آقایان نریمانی، مهدوی و شمس** که در انجام این پژوهش مرایاری نمودند.

همچنین از دوست گرانقدرم خانم **سمیرا نردانی** که در انجام این تحقیق مرا صمیمانه و مشفقانه یاری نمودند شکر و قدردانی می‌نمایم.

و در پایان از پدر و مادر و خانواده‌ی عزیزم و همسر مهربانم که همواره مدیون زحماتشان هستم شکر می‌نمایم.

## چکیده

در سال‌های اخیر به دلیل پیچیدگی و تحولات روز افزون جامعه جهانی، عامل انرژی و محیط زیست نقش اساسی در اقتصاد و سیاست هر ملت ایفا می‌کند. به همین دلیل شناخت و تولید مصالحی که باعث کاهش هزینه‌های ساخت و همچنین کاهش مصرف انرژی و کمک به محیط زیست گردند مورد توجه می‌باشد. این پایان نامه امکان استفاده از خاک لتریت را برای تولید آجرهای سازگار با محیط زیست بر پایه‌ی فناوری ژئوپلیمریزاسیون مورد مطالعه قرار می‌دهد. روش تولید این نوع آجر، اختلاط خاک لتریت با محلول قلیایی، ماسه، آب، تحت فشار قرار دادن مخلوط در قالب و در نهایت عمل آوری در گرمخانه می‌باشد. این روش بر خلاف روش سنتی نیاز به حرارت بالای کوره برای پخت آجر ندارد که این مساله خود، منافع زیست محیطی زیادی را موجب می‌گردد. در این تحقیق دو نوع مخلوط ساخته و آزمایش شدند. در مخلوط اول مواد سیمانی و ژئوپلیمری شامل سیمان، لتریت و میکروسیلیس بوده و در مخلوط دوم فقط از لتریت و میکروسیلیس برای ایجاد چسبندگی با استفاده از روش ژئوپلیمریزاسیون استفاده شده است. تاثیر پنج عامل مقدار لتریت، نوع محلول قلیایی، جایگزینی میکروسیلیس در مخلوط، دمای عمل آوری و سن نمونه روی مشخصات آجر بررسی و با استفاده از آزمون‌های مقاومت فشاری، جذب آب و التراسونیک نتایج مورد تحلیل قرار گرفتند. با توجه به نتایج می‌توان گفت که خاک لتریت به کار رفته در این پژوهش که از معادن شمال غرب ایران تهیه شده است، می‌تواند برای تولید آجرهای سازگار با محیط زیست بر پایه‌ی فناوری ژئوپلیمریزاسیون بر اساس استانداردهای شماره ۷ ملی ایران و ASTM C62 مربوط به آجرهای رسی مورد استفاده قرار گیرد.

### کلمات کلیدی:

آجر ژئوپلیمری، خاک لتریت، آجر سازگار با محیط زیست، مقاومت فشاری، جذب آب، التراسونیک

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
.....	چکیده
.....	فهرست مطالب
.....	فهرست جداول
.....	فهرست اشکال
.....	فهرست نمودارها

### فصل اول : طرح مسأله

.....	۱-۱- مقدمه
.....	۲-۱- بیان مسأله
.....	۳-۱- شرح فصول

### فصل دوم : مروری بر ادبیات موضوع

.....	۱-۲- مقدمه
.....	۲-۲- لتریت
.....	۱-۲-۲- فرآیند تشکیل خاک لتریت
.....	۲-۲-۲- انواع خاک لتریت
.....	۳-۲-۲- ارتباط کیفیت خاک لتریت به عمق زمین
.....	۴-۲-۲- اثر خیس شدن لتریت در محلول‌های اسیدی و بازی
.....	۵-۲-۲- تثبیت خاک لتریت با خاکستر رس-آهک
.....	۶-۲-۲- کاربردهای دیگر خاک لتریت
.....	۱-۶-۲-۲- لتریت در ساخت جاده
.....	۲-۶-۲-۲- لتریت در آجر معمولی
.....	۳-۲- آجر
.....	۱-۳-۲- تاریخچه و مصارف
.....	۲-۳-۲- طبقه بندی آجر
.....	۱-۲-۳-۲- طبقه بندی آجر از لحاظ کاربرد و ترکیب شیمیایی
.....	۲-۲-۳-۲- طبقه بندی آجر بر اساس روش ساخت
.....	۳-۲-۳-۲- طبقه بندی آجر از لحاظ رنگ



## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱۱	..... ۴-۲-۳-۲- انواع آجر از نظر نوع مصرف
۱۱	..... ۱-۴-۲-۳-۲- آجر معمولی
۱۱	..... ۲-۴-۲-۳-۲- آجر نما
۱۱	..... ۳-۴-۲-۳-۲- آجر مهندسی مرغوب
۱۲	..... ۵-۲-۳-۲- انواع آجر از نظر کیفیت
۱۲	..... ۶-۲-۳-۲- انواع آجر از نظر شکل
۱۲	..... ۳-۳-۲- آجر رسی
۱۲	..... ۱-۳-۳-۲- تولید آجر رسی
۱۳	..... ۱-۱-۳-۳-۲- تهیه و آماده نمودن ماده اولیه معدنی
۱۴	..... ۲-۱-۳-۳-۲- اختلاط و ترکیب مواد
۱۴	..... ۳-۱-۳-۳-۲- تهیه خشت
۱۴	..... ۴-۱-۳-۳-۲- خشک کردن
۱۴	..... ۵-۱-۳-۳-۲- پخت آجر :
۱۵	..... ۴-۳-۲- خصوصیات آجر ساختمانی
۱۵	..... ۱-۴-۳-۲- تخلخل و نفوذ پذیری کم
۱۵	..... ۲-۴-۳-۲- ترک در سطح آجر
۱۵	..... ۳-۴-۳-۲- عایق حرارتی
۱۶	..... ۴-۴-۳-۲- مقاومت خراشیدگی و سایشی
۱۶	..... ۵-۴-۳-۲- پایایی در برابر اسیدها
۱۶	..... ۶-۴-۳-۲- مقاومت فشاری مناسب
۱۶	..... ۷-۴-۳-۲- مقاومت خمشی مناسب
۱۶	..... ۸-۴-۳-۲- نداشتن ناخالصی‌های زیاد
۱۶	..... ۹-۴-۳-۲- وزن مخصوص
۱۷	..... ۱۰-۴-۳-۲- تاب نداشتن ، فرورفتگی و برآمدگی
۱۷	..... ۱۱-۴-۳-۲- دارا بودن شکل منظم
۱۷	..... ۱۲-۴-۳-۲- مقاومت دیوار آجری در برابر آتش سوزی
۱۷	..... ۱۳-۴-۳-۲- عایق صوتی
۱۷	..... ۱۴-۴-۳-۲- رنگ آجرها
۱۸	..... ۵-۳-۲- طبقه بندی آجر بر حسب محل مصرف طبق استاندارد شماره ۷ ملی ایران [۱۳]

## فهرست مطالب

۱۸	۲-۳-۵-۱- آجر توکار
۱۸	۲-۳-۵-۲- آجر نما
۱۸	۲-۳-۵-۳- آجر مهندسی
۱۸	۲-۳-۶- مزایای آجر
۱۸	۲-۳-۷- آجر و محیط زیست
۱۹	۲-۳-۸- وضعیت مصرف انرژی در صنعت آجر ایران
۲۲	۲-۴-۴- ژئوپلیمر
۲۲	۲-۴-۱- امتیازات بتن و آجر ژئوپلیمری
۲۲	۲-۴-۲- فرآیند تولید
۲۲	۲-۴-۳- انتخاب پیش ماده
۲۳	۲-۴-۴- انتخاب محلول فعال کننده‌ی قلیایی
۲۳	۲-۴-۵- عملیات فعال‌سازی قلیایی
۲۳	۲-۴-۶- طرح اختلاط
۲۳	۲-۴-۷- طبقه بندی ساختمان ژئوپلیمرها
۲۴	۲-۴-۸- مکانیسم گیرش و سخت شدن ژئوپلیمرها
۲۵	۲-۴-۹- ساختار
۲۸	۲-۴-۱۰- کاربردهای ژئوپلیمر بر اساس نسبت سیلیسیم به آلومینیوم
۲۸	۲-۵-۵- آجر ژئوپلیمری
۲۹	۲-۵-۱- نتایج تحقیقات محققین دیگر روی آجر ژئوپلیمری
۲۹	۲-۵-۱-۱- مطالعه ی دیویدویس روی آجرهای ژئوپلیمری [۳]:
۲۹	۲-۵-۱-۱-۱- تاثیر دماهای عمل‌آوری مختلف روی این نوع آجر
۲۹	۲-۵-۱-۱-۲- مزایای این آجر
۲۹	۲-۵-۱-۳- تاثیر افزودن مقادیر مختلف محلول قلیایی روی نمونه‌های آجر
۲۹	۲-۵-۱-۴- مقاومت به دست آمده در دماهای مختلف
۳۱	۲-۵-۱-۱-۵- چگالی
۳۱	۲-۵-۱-۲- نتایج مطالعه ای دیگر با استفاده از بقایای معدن مس [۳۳]
۳۵	۲-۵-۱-۳- مطالعه روی آجر ژئوپلیمری با خاکستر بادی [۳۵]
۳۸	۲-۵-۱-۴- مطالعه روی آجر ژئوپلیمری با استفاده از مصالح سنگال [۳۶]
۳۹	۲-۵-۱-۵- مطالعه روی تولید آجر با استفاده از بقایای معدن [۳۷]
۴۲	۲-۵-۱-۶- تحقیقی دیگر روی آجر ژئوپلیمری با خاکستر بادی [۳۸]
۴۴	۲-۵-۱-۷- مطالعه روی ساخت آجر بدون سیمان [۳۹]

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۴۷	۸-۱-۵-۲- مطالعه روی تولید آجر با رس عمل آوری شده [۴۲]
۴۹	۶-۲- هیدراتاسیون سیمان
۴۹	۱-۶-۲- تفاوت سیمان پرتلند و سیمان ژئوپلیمری
۵۰	۲-۶-۲- تفاوت سیمان ژئوپلیمری و پوزولان
۵۰	۷-۲- استانداردهای آجر
۵۰	۱-۷-۲- استاندارد شماره ۷ استاندارد ملی ایران برای آجرهای رسی [۱۳]
۵۱	۲-۷-۲- استاندارد ASTM C62 برای آجر [۴۹]

### فصل سوم : مصالح، نحوه‌ی ساخت نمونه‌ها و شرح آزمایش‌ها

۵۴	۱-۳- مقدمه:
۵۴	۲-۳- مصالح مصرفی:
۵۴	۱-۲-۳- سیمان:
۵۶	۲-۲-۳- لتريت
۵۹	۳-۲-۳- سنگدانه
۶۰	۴-۲-۳- محلول‌های قلیایی
۶۱	۵-۲-۳- آب مصرفی
۶۱	۶-۲-۳- میکروسیلیس
۶۲	۳-۳- طرح اختلاط نمونه‌ها
۶۵	۴-۳- ساخت نمونه‌های آجر
۶۵	۱-۴-۳- نحوه‌ی اختلاط
۶۶	۲-۴-۳- عمل آوری
۶۷	۵-۳- روش انجام آزمایش‌ها
۶۷	۱-۵-۳- آزمایش مقاومت فشاری
۶۸	۲-۵-۳- آزمون جذب آب ۵ ساعت جوشاندن
۶۹	۳-۵-۳- آزمایش التراسونیک

### فصل چهارم : نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

۷۱	۱-۴- مقدمه
۷۱	۲-۴- بخش اول
۷۲	۱-۲-۴- مقاومت فشاری ۷ روزه

## فهرست مطالب

۷۳	۱-۲-۴-۱- مقایسه ی تاثیر نوع محلول قلیایی در مقاومت فشاری
۷۵	۲-۲-۴-۱- مقایسه ی تاثیر افزودن میکروسیلیس روی مقاومت فشاری ۷ روزه
۷۶	۳-۲-۴-۱- تاثیر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری
۷۸	۴-۲-۴-۱- تاثیر جایگزینی لتريت روی مقاومت فشاری
۷۹	۲-۲-۴-۲- ارتباط مقاومت فشاری ۷ روزه به چگالی
۸۰	۳-۲-۴-۳- التراسونیک ۷ روز
۸۱	۴-۲-۴-۴- مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۸۱	۱-۴-۲-۴- مقایسه ی مقاومت فشاری نمونه‌ها با دو محلول قلیایی
۸۳	۲-۴-۲-۴- اثر افزودن میکروسیلیس روی مقاومت فشاری نمونه‌ها
۸۴	۳-۴-۲-۴- اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری نمونه‌ها
۸۶	۴-۴-۲-۴- مقایسه ی درصد جایگزینی لتريت
۸۷	۵-۲-۴-۵- ارتباط مقاومت فشاری ۲۸ روزه به چگالی
۸۷	۶-۲-۴-۶- التراسونیک
۸۸	۷-۲-۴-۷- مقایسه ی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روز
۸۹	۸-۲-۴-۸- مقایسه ی چگالی ۷ و ۲۸ روزه
۹۰	۹-۲-۴-۹- درصد جذب آب
۹۱	۳-۴-۳-۴- بخش دوم
۹۱	۱-۳-۴-۱- مقاومت فشاری ۷ روزه
۹۲	۱-۱-۳-۴-۱- مقایسه ی مقاومت فشاری ۷ روزه با دو محلول سود و هیدروکسید کلسیم
۹۳	۲-۱-۳-۴-۲- اثر افزودن میکروسیلیس روی مقاومت فشاری ۷ روزه
۹۳	۳-۱-۳-۴-۳- اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری ۷ روزه
۹۴	۲-۳-۴-۲- التراسونیک ۷ روزه
۹۵	۳-۳-۴-۳- مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۹۷	۱-۳-۳-۴-۱- تاثیر دو محلول قلیایی سود و هیدروکسید کلسیم روی مقاومت فشاری
۹۸	۲-۳-۳-۴-۲- اثر جایگزینی میکروسیلیس روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۹۹	۳-۳-۳-۴-۳- اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۱۰۰	۴-۳-۴-۴- اثر مقدار مواد آلومینوسیلیکاتی (لتريت و میکروسیلیس) روی نمونه‌های ژئوپلیمری
۱۰۱	۵-۳-۴-۵- التراسونیک ۲۸ روزه
۱۰۲	۶-۳-۴-۶- مقایسه ی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه
۱۰۲	۷-۳-۴-۷- مقایسه ی چگالی ۷ و ۲۸ روزه

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱۰۳.....	۸-۳-۴- درصد جذب آب .....
۱۰۴.....	۴-۴- بررسی نتایج با استفاده از برنامه ی آماری Minitab .....
۱۰۵.....	۱-۴-۴- بررسی اثر زمان در طرح دوم کاملاً ژئوپلیمری بدون سیمان .....
۱۰۶.....	۲-۴-۴- بررسی اثر میکروسیلیس در طرح دوم .....
۱۰۷.....	۳-۴-۴- بررسی اثر محلول قلیایی .....
۱۰۹.....	۴-۴-۴- بررسی اثر زمان در طرح اول (نمونه‌های حاوی سیمان).....
۱۱۰.....	۵-۴- مد شکست نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری .....
۱۱۰.....	۶-۴- مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در این تحقیق با تحقیقات دیگر محققین روی آجرهای ژئوپلیمری .....
۱۱۱.....	۷-۴- مطابقت نتایج با مقادیر مورد انتظار استانداردهای ایران و ASTM .....

## فصل پنجم : نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۱۱۴.....	۱-۵- نتیجه گیری .....
۱۱۵.....	۲-۵- پیشنهادها .....
۱۱۶.....	منابع و مراجع .....

## فهرست جداول

جدول ۱-۲- آنالیز شیمیایی لتزیت با توجه به سنگ مادر آن [۲۴]	۷
جدول ۲-۲- کاربردهای ژئوپلیمر با توجه به نسبت Si/Al [۳۰]	۲۸
جدول ۳-۲- مقاومت فشاری در زمان‌های مختلف [۳]	۳۰
جدول ۴-۲- مقاومت فشاری در دما و درصد‌های محلول قلیایی متفاوت [۳]	۳۰
جدول ۵-۲- آنالیز شیمیایی بقایای معدن مس [۳۳]	۳۱
جدول ۶-۲- مشخصات نمونه‌های آزمایش شده [۳۳]	۳۳
جدول ۷-۲- مشخصات نمونه‌های ساخته شده [۳۵]	۳۶
جدول ۸-۲- درصد جذب آب نمونه‌ها [۳۵]	۳۸
جدول ۹-۲- آنالیز شیمیایی رس مورد استفاده [۳۶]	۳۸
جدول ۱۰-۲- ترکیب شیمیایی مصالح خام [۳۷]	۴۰
جدول ۱۱-۲- نتایج آزمایش‌ها نمونه‌ها [۳۷]	۴۰
جدول ۱۲-۲- طرح اختلاط نمونه‌های آزمایش شده [۳۸]	۴۳
جدول ۱۳-۲- طرح اختلاط نمونه‌ها [۳۹]	۴۵
جدول ۱۴-۲- نتایج آزمایش‌های انجام شده در سن ۲۸ روز [۳۹]	۴۵
جدول ۱۵-۲- نتایج به دست آمده توسط محققان دیگر روی آجرهای شامل خاکستر بادی [۳۹،۴۰،۴۱]	۴۷
جدول ۱۶-۲- آنالیز شیمیایی مصالح خام [۴۲]	۴۸
جدول ۱۷-۲- ابعاد ترجیحی آجر طبق استاندارد ملی آجرهای رسی ایران [۱۳]	۵۰
جدول ۱۸-۲- مقاومت فشاری آجر طبق استاندارد ملی آجرهای رسی ایران [۱۳]	۵۰
جدول ۱۹-۲- درصد جذب آب آجر طبق استاندارد ملی آجرهای رسی ایران [۱۳]	۵۱
جدول ۲۰-۲- مشخصات آجر برای کاربردهای مختلف آجر طبق استاندارد ASTM	۵۱
جدول ۳-۱- ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان ۴۲۵-۱ تهران	۵۵
جدول ۳-۲- مقایسه مشخصات شیمیایی سیمان ۴۲۵-۱ تهران با محدودیت‌های استاندارد ۳۸۹ ایران	۵۶
جدول ۳-۳- آنالیز شیمیایی (XRF) خاک لتزیت	۵۸
جدول ۴-۳- مشخصات ماسه‌ی مصرفی	۵۹
جدول ۵-۳- آنالیز شیمیایی میکروسلیس (XRF)	۶۱
جدول ۶-۳- طرح اختلاط ۲۴ طرح اولیه (طرح‌های حاوی سیمان)	۶۳
جدول ۷-۳- طرح اختلاط ۸ طرح دوم (طرح‌های کاملاً ژئوپلیمری بدون سیمان)	۶۴
جدول ۱-۴- مشخصات نمونه‌های ساخته شده در طرح اول حاوی سیمان	۷۱
جدول ۲-۴- مشخصات نمونه‌های ساخته شده در طرح دوم کاملاً ژئوپلیمری بدون سیمان	۹۱
جدول ۳-۴- مقایسه‌ی مقاومت فشاری این تحقیق و سایر تحقیق‌ها	۱۱۱
جدول ۴-۴- مقایسه‌ی نتایج با مقادیر مجاز استانداردها	۱۱۲

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- خاک لتریت ..... ۷
- شکل ۲-۲- درصد تولید انواع آجر در کشور [۲] ..... ۲۰
- شکل ۳-۲- سهم استان‌های مختلف در مصرف سوخت [۲] ..... ۲۱
- شکل ۴-۲- مقایسه مصرف انرژی حرارتی در تولید آجر ماشینی در ایران و برخی کشورهای اروپایی [۲] ..... ۲۱
- شکل ۵-۲- ساختار کریستالی ژئوپلیمرهای اولیه [۱۹] ..... ۲۴
- شکل ۶-۲- مکانیزم گیرش و سخت شدن ژئوپلیمرها [۲۳، ۲۵] ..... ۲۵
- شکل ۷-۲- ساختار ژئوپلیمر [۳] ..... ۲۷
- شکل ۸-۲- واکنش‌های ژئوپلیمر [۳۰، ۳۱] ..... ۲۷
- شکل ۹-۲- آجر ژئوپلیمری [۳] ..... ۲۸
- شکل ۱۰-۲- نمودار درصد ماده ی فعال کننده به مقاومت فشاری [۳] ..... ۳۰
- شکل ۱۱-۲- اثر غوطه وری و عمل آوری نمونه‌ها روی مقاومت فشاری [۳] ..... ۳۱
- شکل ۱۲-۲- رابطه ی مقاومت و دمای عمل آوری [۳۳] ..... ۳۲
- شکل ۱۳-۲- اثر فشار قالب‌گیری روی مقاومت فشاری در درصد‌های آب مختلف [۳۳] ..... ۳۴
- شکل ۱۴-۲- تاثیر فشار روی چگالی [۳۳] ..... ۳۵
- شکل ۱۵-۲- تاثیر افزودن آهک روی مقاومت فشاری [۳۵] ..... ۳۶
- شکل ۱۶-۲- اثر افزودن ماسه کوارتزی روی مقاومت فشاری [۳۵] ..... ۳۶
- شکل ۱۷-۲- اثر فشار قالب‌گیری روی مقاومت فشاری [۳۵] ..... ۳۷
- شکل ۱۸-۲- اثر مدت زمان عمل آوری روی مقاومت فشاری [۳۵] ..... ۳۷
- شکل ۱۹-۲- نمودارهای مقاومت فشاری نمونه‌ها [۳۶] ..... ۳۹
- شکل ۲۰-۲- تاثیر فشار قالب‌گیری روی مقاومت فشاری [۳۷] ..... ۴۱
- شکل ۲۱-۲- اثر آب اختلاط روی مقاومت فشاری [۳۷] ..... ۴۱
- شکل ۲۲-۲- اثر فشار اتوکلاو روی مقاومت فشاری [۳۷] ..... ۴۲
- شکل ۲۳-۲- اثر زمان نگهداری در دما روی مقاومت فشاری [۳۷] ..... ۴۲
- شکل ۲۴-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط عمل آوری مختلف [۳۸] ..... ۴۳
- شکل ۲۵-۲- چارت تولید آجر بدون سیمان [۳۹] ..... ۴۴
- شکل ۲۶-۲- اثر گذشت زمان روی مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف [۳۹] ..... ۴۶
- شکل ۲۷-۲- اثر گذشت زمان روی مقاومت خمشی نمونه‌های مختلف [۳۹] ..... ۴۶
- شکل ۱-۳- نتیجه ی آزمایش پراش اشعه ی ایکس سیمان (XRD) ..... ۵۷
- شکل ۲-۳- نتیجه ی آزمایش پراش اشعه ی ایکس (XRD) لتریت مصرفی ..... ۵۸
- شکل ۳-۳- پراش اشعه ی ایکس (XRD) یک نمونه لتریت [۵۲] ..... ۵۹
- شکل ۴-۳- شعاع اتمی و یونی سدیم و کلسیم ..... ۶۱
- شکل ۵-۳- بخشی از آزمون‌های ساخته شده ..... ۶۵

## فهرست اشکال

صفحه

عنوان

۶۶	شکل ۳-۶- مخلوط ریخته شده در قالب
۶۶	شکل ۳-۷- تحت فشار قرار دادن نمونه
۶۷	شکل ۳-۸- عمل آوری نمونه‌ها در اون
۶۸	شکل ۳-۹- آزمایش مقاومت فشاری
۶۹	شکل ۳-۱۰- دستگاه التراسونیک
۱۰۵	شکل ۴-۱- نتیجه ی مربوط به بررسی زمان در طرح‌های حاوی هیدروکسید کلسیم
۱۰۶	شکل ۴-۲- نتیجه ی مربوط به بررسی زمان در طرح‌های حاوی محلول سود
۱۰۶	شکل ۴-۳- بررسی اثر میکروسیلیس در نمونه‌های حاوی هیدروکسید کلسیم
۱۰۷	شکل ۴-۴- بررسی اثر میکروسیلیس در نمونه‌های حاوی سود
۱۰۸	شکل ۴-۵- بررسی اثر محلول قلیایی در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد
۱۰۸	شکل ۴-۶- بررسی اثر محلول در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد
۱۰۹	شکل ۴-۷- بررسی اثر زمان در نمونه‌های طرح اول حاوی سیمان
۱۱۰	شکل ۴-۸- نحوه ی شکستن نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری



## فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۱-۳ - نمودار دانه بندی ماسه .....	۶۰
نمودار ۱-۴ - مقاومت فشاری ۷ روزه ی نمونه‌ها .....	۷۲
نمودار ۲-۴ - مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه ی نمونه‌ها با دو محلول در ۲۵٪ جایگزینی لتريت .....	۷۳
نمودار ۳-۴ - مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها با دو محلول در ۵۰٪ جایگزینی لتريت .....	۷۴
نمودار ۴-۴ - مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها با دو محلول در ۱۰۰٪ جایگزینی لتريت .....	۷۵
نمودار ۵-۴ - اثر افزودن میکروسیلیس روی نمونه‌های حاوی سود .....	۷۶
نمودار ۶-۴ - اثر افزودن میکروسیلیس روی نمونه‌های حاوی هیدروکسید کلسیم .....	۷۶
نمودار ۷-۴ - اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری ۷ روزه با محلول سود .....	۷۷
نمودار ۸-۴ - اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری ۷ روزه با محلول هیدروکسید کلسیم .....	۷۸
نمودار ۹-۴ - تاثیر جایگزینی لتريت روی مقاومت فشاری ۷ روزه با محلول سود .....	۷۸
نمودار ۱۰-۴ - تاثیر جایگزینی لتريت روی مقاومت فشاری ۷ روزه با محلول هیدروکسید کلسیم .....	۷۹
نمودار ۱۱-۴ - رابطه ی مقاومت فشاری ۷ روزه و چگالی .....	۸۰
نمودار ۱۲-۴ - ارتباط مقاومت فشاری و نتایج التراسونیک .....	۸۰
نمودار ۱۳-۴ - مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها .....	۸۱
نمودار ۱۴-۴ - مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها با دو محلول در ۲۵٪ جایگزینی لتريت .....	۸۲
نمودار ۱۵-۴ - مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها با دو محلول در ۵۰٪ جایگزینی لتريت .....	۸۲
نمودار ۱۶-۴ - مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها با دو محلول در ۱۰۰٪ جایگزینی لتريت .....	۸۳
نمودار ۱۷-۴ - اثر افزودن میکروسیلیس روی نمونه‌های حاوی سود .....	۸۴
نمودار ۱۸-۴ - اثر افزودن میکروسیلیس روی نمونه‌های حاوی هیدروکسید کلسیم .....	۸۴
نمودار ۱۹-۴ - اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با محلول سود .....	۸۵
نمودار ۲۰-۴ - اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با محلول هیدروکسید کلسیم .....	۸۵
نمودار ۲۱-۴ - تاثیر جایگزینی لتريت روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با محلول سود .....	۸۶
نمودار ۲۲-۴ - تاثیر جایگزینی لتريت روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با محلول هیدروکسید کلسیم .....	۸۶
نمودار ۲۳-۴ - ارتباط مقاومت فشاری به چگالی .....	۸۷
نمودار ۲۴-۴ - ارتباط مقاومت فشاری به التراسونیک .....	۸۸
نمودار ۲۵-۴ - مقایسه ی مقاومت ۷ و ۲۸ روزه .....	۸۹
نمودار ۲۶-۴ - مقایسه ی چگالی ۷ و ۲۸ روزه ی نمونه‌ها .....	۸۹
نمودار ۲۷-۴ - درصد جذب نمونه‌ها .....	۹۰
نمودار ۲۸-۴ - مقاومت فشاری ۷ روزه .....	۹۲
نمودار ۲۹-۴ - مقایسه ی مقاومت فشاری نمونه‌ها با دو محلول قلیایی .....	۹۲
نمودار ۳۰-۴ - اثر افزودن میکروسیلیس روی مقاومت فشاری نمونه‌ها .....	۹۳
نمودار ۳۱-۴ - اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری ۷ روزه .....	۹۴
نمودار ۳۲-۴ - رابطه‌ی مقاومت فشاری و التراسونیک ۷ روز نمونه‌ها .....	۹۴

## فهرست نمودارها

صفحه

عنوان

نمودار ۳۳-۴- مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها با روش استاندارد ایران.....	۹۵
نمودار ۳۴-۴- مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق روش استاندارد ASTM.....	۹۵
نمودار ۳۵-۴- مقایسه‌ی مقاومت فشاری با روش‌های استانداردهای ایران و ASTM.....	۹۶
نمودار ۳۶-۴- مقایسه‌ی اثر دو محلول قلیایی روی مقاومت فشاری طبق روش استاندارد ایران.....	۹۷
نمودار ۳۷-۴- مقایسه‌ی اثر دو محلول قلیایی روی مقاومت فشاری طبق روش استاندارد ASTM.....	۹۷
نمودار ۳۸-۴- اثر جایگزینی میکروسیلیس روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه طبق روش استاندارد ایران.....	۹۸
نمودار ۳۹-۴- اثر جایگزینی میکروسیلیس روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه طبق روش استاندارد ASTM.....	۹۹
نمودار ۴۰-۴- اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری طبق روش استاندارد ایران.....	۱۰۰
نمودار ۴۱-۴- اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق روش استاندارد ASTM.....	۱۰۰
نمودار ۴۲-۴- مقایسه‌ی دو طرح کاملاً ژئوپلیمری با مقادیر مختلف مواد آلومینوسیلیکاتی.....	۱۰۱
نمودار ۴۳-۴- ارتباط مقاومت فشاری به التراسونیک.....	۱۰۱
نمودار ۴۴-۴- مقایسه‌ی مقاومت ۷ و ۲۸ روزه.....	۱۰۲
نمودار ۴۵-۴- مقایسه‌ی چگالی ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها.....	۱۰۳
نمودار ۴۶-۴- درصد جذب آب نمونه‌ها.....	۱۰۴

فصل اول

طرح مسأله

## ۱-۱- مقدمه

آجرها گروهی از مصالح هستند که به صورت صنعتی تولید و جایگزین سنگ شده‌اند و درحقیقت سنگی ساخته دست بشر هستند، سنگی دگرگون که از تغییر وضعیت خشت پدید می‌آید. این گروه از مصالح که اولین تولید صنعتی و انبوه مصالح ساختمانی به دست بشر به شمار می‌آیند، براساس نوع مواد اولیه، روند تولید و محل مصرف به انواع متنوعی تقسیم می‌شوند. آجرهای رسی که اولین و فراوان‌ترین آن‌ها هستند قدمت چند هزار ساله دارند. با پیشرفت تکنولوژی و علم شیمی انواع بی شماری از آجرها با کیفیت‌های مختلف، ابعاد و شکل ظاهری متنوع راهی بازار مصرف شده‌اند [۱].

در سال‌های اخیر به دلیل پیچیدگی و تحولات روز افزون جامعه جهانی، عامل انرژی نقش اساسی در اقتصاد و سیاست هر ملت ایفا می‌کند و پیگیری دقیق دورنمای بخش انرژی و اتخاذ استراتژی مناسب از ارکان اصلی حفظ ثبات و قدرت سیاسی اقتصادی هر کشور است. همچنین، شرایط اقتصادی و بازرگانی ضرورت وجود یک طرح بهینه در مصرف منابع مختلف انرژی را هشدار می‌دهد. در این میان با توجه به اینکه صنعت آجر یکی از صنایع بزرگ و انرژی بر کشور است و در واقع یکی از معیارهای صنعتی شدن هر کشور وابسته به پیشرفت و توسعه صنعت ساختمان و آجر آن است، توجه خاص به این صنعت و بهبود و توسعه آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به مصرف روز افزون انرژی در این صنعت و همچنین نبود استانداردهای مصرف انرژی و قوانین و مقررات مدون جامع در این زمینه، اجرای پروژه‌های مختلف تدوین معیار مصرف انرژی و همچنین بهینه سازی مصرف انرژی در این صنعت را امری ضروری می‌نماید. در این روزها نگهداری از محیط زیست و توسعه‌ی آن بسیار بحرانی است. این به علت گرم شدن زمین و همچنین مقدار منابع تجدید نشدنی کاسته شده، است. در ایران حدود ۷۰۰۰ کارخانه ی فعال آجر وجود دارد که میزان تولید اسمی آن‌ها بیش از ۵۰ میلیون تن می‌باشد. سهم ۴۵ درصدی هزینه‌های انرژی در تولید آجر از دیدگاه اقتصاد ملی، خود بیانگر شدت انرژی مصرفی بسیار بالا در این صنعت و لزوم توجه به آن می‌باشد [۲].

این موضوع تولید آجرهایی با مصرف انرژی کمتر و عدم آسیب‌رسانی به محیط زیست را آشکار می‌سازد. آجر ژئوپلیمری یک فناوری ساخت ایده آل برای کشورها بخصوص کشورهای درحال توسعه است. این آجر در مقایسه با آجر سنتی که ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد گرما در کوره نیاز دارد حدود ۸ برابر انرژی کمتر مصرف می‌کند [۳]. به این منظور استفاده از خاک لتریت در آجر مورد آزمایش قرار گرفته است که خاک بسیار ارزانی است و به وفور در زمین پیدا می‌شود. همچنین این خاک، ماده‌ی