به نام خدا

رفتار حرارتی ملات‌های سیمانی اصلاح‌شده با پوزولان‌ها از ریزساختار تا مدل‌سازی هوشمند

مولفان :

دکتر مطهره ناصحی گشوییه

دکتر محسن ملکی نژاد

دکتر محمد امیری

دکتر محسن محمدی زاده

انتشارات ارسطو

(سازمان چاپ و نشر ایران – ۱۴۰۵)

نسخه الکترونیکی این اثر در سایت سازمان چاپ و نشر ایران و اپلیکیشن کتاب رسان موجود می باشد

Chaponashr.ir

سرشناسه : ناصحی گشوییه ، مطهره ، ۱۳۶۴
عنوان و نام پدیدآورگان: رفتار حرارتی ملات‌های سیمانی اصلاح‌شده با پوزولان‌ها از ریزساختار تا مدل‌سازی هوشمند/ مولفان: دکتر مطهره ناصحی گشوییه ، دکتر محسن ملکی نژاد ، دکتر محمد امیری ، دکتر محسن محمدی زاده
مشخصات نشر : انتشارات ارسطو (سازمان چاپ و نشر ایران)، ۱۴۰۵.
مشخصات ظاهری : ۲۱۰ ص.
شابک : ۴-۹۹۰-۱۲۹-۶۲۲-۹۷۸
شناسه افزوده : ملکی نژاد ، محسن ، ۱۳۶۳
شناسه افزوده : امیری ، محمد ، ۱۳۶۳
شناسه افزوده : محمدی زاده ، محسن ، ۱۳۴۹
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
یادداشت : کتابنامه.
موضوع : رفتار حرارتی ملات‌های سیمانی
رده بندی کنگره : TP ۹۸۳
رده بندی دیویی : ۶۶۸/۵۵
شماره کتابشناسی ملی : ۸۴۵۶۱۳
اطلاعات رکورد کتابشناسی : فیپا

نام کتاب : رفتار حرارتی ملات‌های سیمانی اصلاح‌شده با پوزولان‌ها از ریزساختار تا مدل‌سازی هوشمند
مولفان : دکتر مطهره ناصحی گشوییه - دکتر محسن ملکی نژاد - دکتر محمد امیری - دکتر محسن محمدی زاده
ناشر : انتشارات ارسطو (سازمان چاپ و نشر ایران)
صفحه آرایی، تنظیم و طرح جلد: الهام غفاری
تیراژ : ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ : اول ــ ۱۴۰۵
چاپ : زبرجد
قیمت : ۴۵۰۰۰۰ تومان
فروش نسخه الکترونیکی - کتاب‌رسان :
https//:chaponashr.ir/ketabresan
شابک :۴-۹۹۰-۱۲۹-۶۲۲-۹۷۸
تلفن مرکز پخش : ۰۹۱۲۰۲۳۹۲۵۵
www.chaponashr.ir

هر پژوهشی، حاصل تلاش فردی نیست.
بلکه در پرتوی همراهی و همدلی کسانی شکل می گیرد که هر یک به گونه ای روشنی بخش مسیر هستند.
این کتاب نیز از این قاعده مستثنا نیست.

تقدیم به

خانواده مهربانم
که با حضور و همراهی و حمایت هایتان، همواره مایه دلگرمی ام در این مسیر بودید.
اساتید فرهیخته ام
که با دلسوزی های صمیمانه، چراغ علم را فروزان نگه داشتید و از انتقال تجربیات ارزشمندتان دریغ نورزیدید.
و
تمامی مخاطبان این کتاب؛
مهندسان، پژوهشگران و دانشجویانی که در مسیر علم و دانش گام برمی‌دارید.

فهرست مطالب

پیشگفتار ۱۳

ساختار کتاب ۱۵

مقدمه ۱۷

فصل اول: بتن، حرارت و دوام سازه‌های سیمانی ۱۹

مقدمه ۱۹

۱-۱- تاریخچه سیمان و بتن ۲۱

۱-۲- سیمان پرتلند و ترکیبات آن ۲۱

۱-۳- فرآیند هیدراتاسیون سیمان ۲۲

۱-۴- نانوساختار C-S-H؛ قلب تپنده بتن ۲۳

۱-۴-۱- ویژگی‌های منحصربه‌فرد C-S-H ۲۳

۱-۵- ناحیه انتقالی بین سطحی ۲۴

۱-۶- تاریخچه شناخت بتن و مقاومت در برابر آتش ۲۵

۱-۷- مکانیزم‌های تخریب بتن در دمای بالا ۲۵

۱-۷-۱- تغییرات فیزیکی ناشی از حرارت ۲۵

۱-۷-۲- تغییرات شیمیایی ناشی از حرارت ۲۷

۱-۸- پیامدهای تخریب حرارتی بر خواص مهندسی بتن ۲۸

۱-۹- راهبردهای بهبود عملکرد حرارتی بتن ۲۹

۱-۱۰- جمع‌بندی فصل اول ۳۰

۱-۱۱- منابع فصل اول ۳۲

فصل دوم: مبانی نانوساختارهای سیمانی، فناوری نانو و پوزولان‌های نوین ۳۵

مقدمه ۳۵

۲-۱- ضرورت استفاده از مواد مکمل سیمانی ۳۷
۲-۲- پوزولان؛ تعریف و تاریخچه ۳۹
۲-۳- مزایای استفاده از بتن پوزولانی ۴۱
۲-۴- مکانیزم شیمیایی واکنش پوزولانی ۴۲
۲-۵- طبقه‌بندی مواد مکمل سیمانی ۴۳
۲-۶- ضرورت استفاده از فناوری نانو در کامپوزیت‌های پایه سیمانی ۴۵
۲-۷- نانوسیلیس؛ از تولید تا عملکرد در مواد سیمانی ۴۷
۲-۷-۱- معرفی کلی و ویژگی‌های بنیادین ۴۷
۲-۷-۲- اجزای تشکیل دهنده نانوسیلیس ۴۹
۲-۷-۳- ویژگی‌های بتن با ذرات نانو سیلیس ۵۰
۲-۷-۴- تأثیر نانوسیلیس بر خواص بتن در دمای محیط ۵۰
۲-۷-۵- تأثیر نانوسیلیس بر خواص بتن در معرض حرارت ۵۴
۲-۸- متاکائولین ۵۴
۲-۸-۱- معرفی کلی متاکائولین ۵۴
۲-۸-۲- تولید متاکائولین ۵۵
۲-۸-۳- مکانیزم تبدیل کائولین به متاکائولین ۵۶
۲-۸-۴- تأثیر متاکائولین بر خواص بتن در دمای محیط ۵۹
۲-۸-۵- تأثیر متاکائولین بر خواص بتن در معرض حرارت ۶۱
۲-۹- زئولیت ۶۲
۲-۹-۱- کلیات زئولیت ۶۲
۲-۹-۲- کانی‌های زئولیتی ۶۳
۲-۹-۳- ترکیب شیمیایی زئولیت ۶۴

۲-۹-۴- نحوه تشکیل زئولیت‌ها ۶۴
۲-۹-۵- طبقه‌بندی زئولیت‌ها ۶۴
۲-۹-۶- خواص زئولیت‌ها ۶۵
۲-۹-۷- کاربرد زئولیت ۶۸
۲-۹-۸- تأثیر زئولیت بر خواص بتن در دمای محیط ۶۹
۲-۹-۹- تأثیر زئولیت بر خواص بتن در معرض حرارت ۷۰
۲-۱۰- تحلیل مقایسه‌ای عملکرد نانوسیلیس، متاکائولین و زئولیت در بتن ۷۱
۲-۱۰-۱- مقایسه بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۷۱
۲-۱۰-۲- مقایسه بر اساس مکانیزم عملکرد ۷۲
۲-۱۰-۳- مقایسه بر اساس تأثیر بر خواص بتن در دمای محیط ۷۴
۲-۱۰-۴- مقایسه بر اساس تأثیر بر خواص بتن در معرض حرارت ۷۵
۲-۱۰-۵- جدول مقایسه تطبیقی پوزولان‌ها ۷۶
۲-۱۱- جمعبندی فصل دوم ۷۸
۲-۱۲- منابع فصل دوم ۸۰
فصل سوم: مصالح، روش‌های آزمایشگاهی و تکنیک‌های ارزیابی ریزساختار ۸۵
مقدمه ۸۵
۳-۱- معیارهای انتخاب مصالح و روش‌های آزمایش ۸۷
۳-۲- مصالح مصرفی ۹۰
۳-۱-۱- سنگدانه ۹۰
۳-۲-۲- سیمان ۹۱
۳-۲-۳- مواد افزودنی ۹۲
۳-۳- آماده‌سازی آزمونه‌ها ۹۵

۳-۳-۱- اختلاط ملات ماسه-سیمان ۹۵
۳-۳-۲- قالب گیری و آماده سازی آزمونه‌ها ۹۸
۳-۴- روش‌شناسی ۱۰۳
۳-۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری (ASTM C۳۹) ۱۰۳
۳-۴-۲- آزمایش افت وزنی (ASTM C۱۷۹۲-۱٤) ۱۰۳
۳-۴-۳- آزمایش تعیین درصد جذب حجمی آب (ASTM C٦٤۲) ۱۰۳
۳-۴-۴- آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) ۱۰۴
۳-۴-۵- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ۱۰۴
۳-۵- جمعبندی فصل سوم ۱۰۴
۳-۶- منابع فصل سوم ۱۰۷
فصل چهارم: نتایج آزمایشگاهی و تحلیل رفتار مکانیکی و ریزساختاری ۱۰۹
مقدمه ۱۰۹
۴-۱- ملات ماسه-سیمان در معرض حرارت ۱۱۱
۴-۱-۱- بررسی پراش پرتو ایکس (XRD) آزمونه‌های فاقد افزودنی در معرض حرارت ۱۱۱
۴-۱-۲- ریخت‌شناسی آزمونه‌های فاقد افزودنی در معرض حرارت ۱۱۳
۴-۱-۳- بررسی مقاومت فشاری آزمونه‌های فاقد افزودنی در معرض حرارت ۱۱۵
۴-۱-۴- بررسی تغییرات وزنی آزمونه‌های فاقد افزودنی در معرض حرارت ۱۱۶
۴-۲- ملات ماسه-سیمان حاوی نانوسیلیس در معرض حرارت ۱۱۸
۴-۲-۱- بررسی پراش پرتو ایکس (XRD) آزمونه‌های حاوی نانوسیلیس در معرض حرارت ۱۱۸
۴-۲-۲- ریخت‌شناسی آزمونه‌های حاوی نانوسیلیس در معرض حرارت ۱۲۰
۴-۲-۳- بررسی مقاومت فشاری آزمونه‌های حاوی نانوسیلیس در معرض حرارت ۱۲۱
۴-۲-۴- بررسی تغییرات وزنی آزمونه‌های حاوی نانوسیلیس در معرض حرارت ۱۲۳

۴-۲-۵- بررسی جذب آب آزمونه‌های حاوی نانوسیلیس ۱۲۵
۴-۳- ملات ماسه-سیمان حاوی متاکائولین در معرض حرارت ۱۲۶
۴-۳-۱- بررسی پراش پرتو ایکس (XRD) آزمونه‌های حاوی متاکائولین در معرض حرارت ۱۲۶
۴-۳-۲- ریخت‌شناسی آزمونه‌های حاوی متاکائولین در معرض حرارت ۱۲۹
۴-۳-۳- بررسی مقاومت فشاری آزمونه‌های حاوی متاکائولین در معرض حرارت ۱۳۳
۴-۳-۴- بررسی تغییرات وزنی آزمونه‌های حاوی متاکائولین در معرض حرارت ۱۳۵
۴-۳-۵- بررسی جذب آب آزمونه‌های حاوی متاکائولین ۱۳۷
۴-۴- ملات ماسه-سیمان حاوی زئولیت در معرض حرارت ۱۳۸
۴-۴-۱- بررسی پراش پرتو ایکس (XRD) آزمونه‌های حاوی زئولیت در معرض حرارت ۱۳۸
۴-۴-۲- ریخت‌شناسی آزمونه‌های حاوی زئولیت در معرض حرارت ۱۴۱
۴-۴-۳- بررسی مقاومت فشاری آزمونه‌های حاوی زئولیت در معرض حرارت ۱۴۴
۴-۴-۴- بررسی تغییرات وزنی آزمونه‌های حاوی زئولیت در معرض حرارت ۱۴۶
۴-۴-۵- بررسی جذب آب آزمونه‌های حاوی زئولیت ۱۴۷
۴-۵- تحلیل مقایسه‌ای پوزولانها و ارتباط ریزساختار با خواص مهندسی ۱۴۸
۴-۵-۱- مقایسه تأثیر پوزولان‌ها بر تغییرات ریزساختاری(XRD) ۱۴۸
۴-۵-۲- مقایسه تأثیر پوزولان‌ها بر مقاومت فشاری ۱۵۰
۴-۵-۳- ارتباط تغییرات ریزساختاری و رفتار مکانیکی ۱۵۱
۴-۵-۴- مکانیزم کلی تخریب و بهبود حرارتی ۱۵۲
۴-۶- جمعبندی فصل چهارم ۱۵۴
۴-۷- منابع فصل چهارم ۱۵۶
فصل پنجم: مدل‌سازی رفتار کامپوزیت‌های پایه سیمانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۶۱

مقدمه ۱۶۱
۵-۱- مبانی نظری مدل‌های رایانه‌ای هوشمند ۱۶۳
۵-۱-۱- تعریف و فلسفه وجودی ۱۶۳
۵-۱-۲- ساختار و اجزای تشکیل‌دهنده ۱۶۳
۵-۱-۳- فرآیند یادگیری و آموزش ۱۶۴
۵-۱-۴- مفاهیم کلیدی در ارزیابی مدل ۱۶۵
۵-۱-۵- مزایا و محدودیت‌ها ۱۶۶
۵-۱-۶- کاربرد در پژوهش حاضر ۱۶۶
۵-۲- داده‌های ورودی آموزش مدل ۱۶۶
۵-۳- ساختار شبکه عصبی ۱۶۹
۵-۴- نتایج مدل پیش‌بینی مقدار بهینه افزودنی با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات ۱۷۲
۵-۵- جمعبندی فصل پنجم ۱۷۶
۵-۶- منابع فصل پنجم ۱۷۸
فصل ششم: تلفیق یافته‌ها؛ از ریزساختار تا مدل‌سازی هوشمند ۱۷۹
مقدمه ۱۷۹
۶-۱- جمع‌بندی کلی یافته‌ها ۱۸۱
۶-۲- مکانیزم‌های تخریب حرارتی ۱۸۴
۶-۳- تأثیر پوزولان‌ها بر مقاومت حرارتی ملات ۱۸۶
۶-۴- تأثیر پوزولان‌ها بر ریزساختار و دوام ۱۸۸
۶-۵- نتیجه‌گیری مدل‌سازی هوشمند ۱۸۹
۶-۶- عملکرد پوزولان‌ها ۱۹۱

۶-۷- کاربردهای عملی نتایج پژوهش ۱۹۲
۶-۸- پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده ۱۹۶
۶-۹- محدودیت‌های پژوهش ۱۹۸
۶-۱۰- جمعبندی فصل ششم ۲۰۱
۶-۱۱- منابع فصل ششم ۲۰۳
سخن پایانی ۲۰۵
واژه نامه ۲۰۷

پیشگفتار

بتن، بی‌منازع‌ترین و پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی جهان، ستون فقرات تمدن مدرن را تشکیل می‌دهد. از سدها و پل های عظیم گرفته تا بلندمرتبه‌ترین آسمان‌خراش‌ها و عمیق‌ترین تونل‌های شهری، همگی بر پایه‌ی این ماده‌ی شگفت‌انگیز بنا شده اند. با این حال، علیرغم مزایای بی‌شمار بتن از جمله مقاومت فشاری مناسب، دوام مطلوب، قابلیت شکل‌پذیری و صرفه‌ی اقتصادی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی مهندسان و پژوهشگران، عملکرد این ماده در دماهای بالا و آتش‌سوزی است. حریق‌های مهیب در ساختمان‌ها، تونل‌ها، پارکینگ‌های طبقاتی و تأسیسات صنعتی، هر ساله خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد و ضرورت شناخت دقیق رفتار بتن در شرایط حرارتی و ارائه راهکارهای مؤثر برای بهبود پایداری حرارتی آن را دوچندان می‌سازند.

آنچه در نگاه اول تخریب ساده و سطحی در بتن به نظر می‌رسد، در واقع نتیجه‌ی زنجیره‌ای از تغییرات پیچیده در مقیاس‌های میکرو و نانو است. تخریب نانوساختار کلسیم سیلیکات هیدراته که قلب تپنده‌ی مقاومت و دوام بتن محسوب می‌شود و تجزیه‌ی پرتلندیت در دماهای بالا، منشأ اصلی کاهش خواص مهندسی بتن است. از این‌رو، هرگونه راهکار مؤثر برای بهبود عملکرد حرارتی بتن، باید بر حفظ پایداری این نانوساختارها یا جایگزینی آن‌ها با فازهای مقاوم‌تر متمرکز باشد. درک این واقعیت، نقطه‌ی عطفی در نگرش به رفتار حرارتی مصالح سیمانی ایجاد کرده و رویکرد پژوهش‌های نوین را از بررسی صرفاً درشت‌ساختاری به تحلیل‌های ریزساختاری سوق داده است. پژوهش حاضر، حاصل سال‌ها مطالعه، آزمایش و تفکر عمیق در این حوزه است. آنچه در این کتاب تقدیم خوانندگان گرامی می‌شود، تلاشی است برای ایجاد پلی میان دانش بنیادین بتن در مقیاس نانو و کاربردهای عملی آن در مقیاس مهندسی. در این مسیر، از یک سو به بررسی عمیق مکانیزم‌های تخریب حرارتی ملات ماسه-سیمان در سطح ریزساختار پرداخته شده و از سوی دیگر، تأثیر سه پوزولان مهم و پرکاربرد (نانوسیلیس، متاکائولین و زئولیت طبیعی) بر بهبود پایداری حرارتی این مصالح بررسی شده است. انتخاب این سه ماده، به‌دلیل تفاوت‌های بنیادین آن‌ها از نظر منشأ، ساختار، ترکیب شیمیایی و سازوکار عملکرد، امکان مقایسه‌ای جامع و علمی را فراهم آورده است. همچنین، با بهره‌گیری از روش‌های نوین هوش مصنوعی، یک مدل پیش‌بینی

کننده‌ی کارآمد تهیه شده تا بتواند مهندسان را در طراحی بهینه‌ی مخلوط‌های سیمانی مقاوم در برابر حرارت یاری رساند.

مخاطبان اصلی این کتاب، مهندسان عمران، پژوهشگران حوزه‌ی مصالح ساختمانی، دانشجویان تحصیلات تکمیلی و تمامی علاقه‌مندانی هستند که در جست‌وجوی درکی عمیق‌تر از رفتار بتن در شرایط حرارتی و راهکارهای نوین برای ارتقای دوام و ایمنی سازه‌ها هستند. امید است که مطالب این کتاب، ضمن غنی‌سازی دانش فنی مخاطبان، بتواند نقشی مؤثر در ارتقای کیفیت و ایمنی پروژه‌های عمرانی و کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی ایفا کند.

نگارش این کتاب، همانند هر اثر علمی دیگر، حاصل تلاش جمعی و همراهی اساتید، همکاران و عزیزانی است که هر یک در جایگاه خود، چراغی در این مسیر پرفراز و نشیب افروختند.

در پایان، امیدوارم که این کتاب بتواند گامی هرچند کوچک در جهت اعتلای دانش مهندسی عمران و بهبود عملکرد سازه‌های سیمانی در برابر تهدیدات حرارتی بردارد و راهنمای راه پژوهشگران و مهندسان آینده باشد. از تمامی کسانی که این اثر را مطالعه می‌کنند و با نگاه نقادانه‌ی خود به غنای آن می‌افزایند، صمیمانه سپاسگزارم.

مطهره ناصحی گشوییه

تابستان ۱۴۰۵

ساختار کتاب

این کتاب در شش فصل تدوین شده است که هر یک حلقه‌ای از زنجیره‌ی پژوهشی را تشکیل می‌دهد. فصل اول به معرفی بتن، حرارت و دوام سازه‌های سیمانی اختصاص دارد و مبانی بنیادین رفتار حرارتی این مصالح، از جمله تاریخچه، ترکیبات سیمان پرتلند، فرآیند هیدراتاسیون، ویژگی‌های نانوساختار C-S-H و ناحیه انتقال بین‌سطحی (ITZ) را تشریح می‌کند. فصل دوم، به مبانی نانوساختارهای سیمانی، فناوری نانو و پوزولان‌های نوین می‌پردازد و ضمن معرفی ضرورت استفاده از مواد مکمل سیمانی، واکنش پوزولانی و طبقه‌بندی آن‌ها، ویژگی‌های سه پوزولان اصلی پژوهش (نانوسیلیس، متاکائولین و زئولیت طبیعی) و تأثیر هر یک بر خواص بتن در دمای محیط و معرض حرارت را به صورت تحلیلی بررسی می‌کند. فصل سوم، روش‌شناسی آزمایشگاهی و تکنیک‌های ارزیابی ریزساختار را به تفصیل معرفی می‌کند و شامل مشخصات مصالح مصرفی، طرح اختلاط، فرآیند ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌ها، برنامه اعمال حرارت و اصول آزمون‌های مکانیکی و ریزساختاری است. فصل چهارم، به ارائه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی اختصاص دارد و رفتار مکانیکی و ریزساختاری ملات‌های سیمانی شاهد و حاوی پوزولان را در دماهای مختلف مورد بررسی قرار می‌دهد. فصل پنجم، مدل‌سازی رفتار کامپوزیت‌های پایه سیمانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی را تشریح می‌کند و مبانی نظری، داده‌های ورودی، ساختار شبکه و نتایج پیش‌بینی مقاومت فشاری را ارائه می‌دهد. فصل ششم، به تلفیق یافته‌ها، نتیجه‌گیری نهایی، کاربردهای عملی نتایج پژوهش، پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده و محدودیت‌های پژوهش می‌پردازد.