

شماره درخواست : ۱۴۳۸۳۵۱

تاریخ : ۹۵، ۸، ۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مواد جابگزين سيمان (پوزولان ها)؛

خواص، دوام و توسعه پايدار

صدا :

پروفسور علي اكبر رضانيانپور

عضو هيات علمي دانشگاه صنعتي اميركبير (ملي تكنيك تهران)

تايستان ۱۳۹۵

سرشناسه	رمضانیانپور، علی اکبر، ۱۳۳۰ -
عنوان و نام پدیدآور	مواد جایگزین سیمان (پوزولان ها)؛ خواص، دوام و توسعه پایدار / تألیف علی اکبر رمضانیانپور.
مشخصات نشر	تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	۵۲۲ ص.
شابک	978-964-463-649-3
وضعیت فهرست نویسی	فیپا
یادداشت	واژه نامه:
یادداشت	کتاب نامه:
موضوع	پوزولان ها
موضوع	Pozzolans
موضوع	بتن -- افزوددها
موضوع	Concrete -- Additives
شناسه افزودده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
رده بندی کنگره	TP۸۸۱/۸م۸ ۱۳۹۵
رده بندی دیویی	۶۶۰/۹۲
شماره کتابشناسی ملی	۴۳۴۰۰۵۹



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

این کتاب در جلسه مورخ ۱۳۹۴/۰۹/۲۲ شورای چاپ و
نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسیده است.

عنوان کتاب	مواد جایگزین سیمان (پوزولان ها)؛ خواص، دوام و توسعه پایدار
تصنیف	پروفسور علی اکبر رمضانیانپور
ناشر	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ اول	تابستان ۱۳۹۵
تیراژ	۳۰۰ نسخه
قیمت	۲۸۰۰۰ تومان
شابک	۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۶۴۹-۳
	ISBN : 978-964-463-649-3

آدرس مرکز بخش: خیابان ولیعصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) - تلفن: ۶۶۴۹۸۸۶۸

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این کتاب برای جلوگیری از انتشار غیرمجاز رمزگذاری شده است.

فهرست

صفحه

عنوان

پیشگفتار

۱	فصل اول: پوزولان‌های طبیعی
۱	مقدمه
۲	طبقه‌بندی پوزولان‌های طبیعی
۳	تولید
۳	پوزولان سنگ‌های آتش‌فشانی
۶	خواص فیزیکی، شیمیایی و معدنی
۶	خواص فیزیکی
۸	خواص شیمیایی و معدنی
۱۱	فعالیت پوزولانی پوزولان‌های طبیعی
۱۱	ارزیابی فعالیت پوزولانی
۱۲	واکنش‌های هیدراسیون و محصولات هیدراته
۱۳	عوامل مؤثر بر فعالیت پوزولانی
۱۴	واکنش‌پذیری پوزولان‌های حرارت دیده
۱۵	هیدراسیون پوزولان‌های طبیعی با آهک
۱۵	هیدراسیون پوزولان‌های طبیعی با کلینکر
۱۷	هیدراسیون مخلوط پوزولان - سیمان
۱۸	تأثیر پوزولان‌های طبیعی بر خواص بتن تازه
۱۹	تأثیرات پوزولان‌های طبیعی بر خواص مکانیکی بتن سخت شده
۱۹	مقاومت ملات‌ها و بتن‌ها
۲۵	مدول ارتجاعی
۲۵	اثر بر تغییرات حجم (انقباض و خزش)
۲۷	ریزساختار، تخلخل و نفوذپذیری
۳۲	تأثیر پوزولان‌های طبیعی بر دوام بتن
۳۳	تأثیر پوزولان طبیعی بر کربناته شدن ملات‌ها و بتن‌ها
۳۶	تأثیر یون‌های کلرید بر دوام ملات‌ها و بتن‌های با سیمان پوزولانی
۳۸	مقاومت در برابر سولفات ملات‌ها و بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی

۴۰	تهاجم ترکیبی سولفات و کلرید توسط آب دریا
۴۱	تأثیر پوزولان‌های طبیعی بر کنترل واکنش قلیایی سنگدانه
۴۵	دوام در یخ زدن-آب شدن بتن‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی
۴۶	کاربرد پوزولان‌های طبیعی در ملات‌ها و بتن‌ها
۴۸	مراجع

فصل دوم: خاکستر بادی

۵۷	مقدمه
۵۷	خواص فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاکستر بادی
۵۹	نرمی (ریزی ذرات)
۶۱	مساحت سطح مخصوص
۶۲	چگالی مخصوص
۶۴	ترکیب شیمیایی
۶۷	ترکیب کانی‌شناسی
۶۸	واکنش‌های هیدراسیون خاکستر بادی
۶۸	اثر خاکستر بادی بر هیدراسیون ترکیب بادی
۷۴	عوامل مؤثر بر واکنش پوزولانی خاکسترهای بادی
۷۵	اثرات خاکستر بادی بر خواص بتن تازه
۷۶	اثر خاکستر بادی بر زمان گیرش بتن سیمان پرتلندی
۷۷	اثر خاکستر بادی بر کارایی، نیاز آب و آب انداختگی بتن
۸۳	اثر خاکستر بادی بر افزایش دمای بتن تازه
۸۵	اثر خاکستر بادی بر خواص مکانیکی بتن سخت‌شده
۸۶	ایجاد مقاومت در بتن خاکستر بادی
۸۷	اثر نوع خاکستر بادی بر مقاومت بتن
۹۰	اندازه ذرات و مقاومت بتن‌های با خاکستر بادی
۹۴	اثرات دما و رژیم عمل‌آوری بر ایجاد مقاومت در بتن‌های خاکستر بادی
۹۸	اثر خاکستر بادی بر خواص ارتجاعی بتن
۱۰۰	اثر خاکستر بادی بر خواص خزشی بتن
۱۰۳	اثر خاکستر بادی بر تغییرات حجمی بتن
۱۰۹	اثر خاکستر بادی بر نفوذپذیری بتن
۱۱۴	اثر خاکستر بادی بر کربناسیون بتن

۱۲۴	اثر خاکستر بادی بر دوام بتن در معرض چرخه‌های یخ زدن و آب شدن
۱۳۴	اثرات خاکستر بادی بر دوام بتن در معرض دماهای بالا
۱۳۴	سایش و فرسایش بتن حاوی خاکستر بادی
۱۳۶	اثرات خاکستر بادی بر دوام بتن در معرض تهاجم شیمیایی
۱۳۸	اثرات خاکستر بادی بر مقاومت بتن در برابر سولفات
۱۴۸	اثرات خاکستر بادی بر واکنش قلیائی سنگدانه‌ها در بتن
۱۶۰	اثرات خاکستر بادی بر خوردگی فولاد بتن مسلح
۱۶۳	اثرات خاکستر بادی بر بتن در معرض آب دریا
۱۶۶	توسعه انبساط در زمینه دوام بتن‌های حاوی خاکستر بادی
۱۶۹	کاربرد خاکستر بادی در بتن
۱۶۹	بتن با مقاومت بالا
۱۷۴	بتن غلتکی (متراکم شده غلتد)
۱۸۰	مراجع

۲۰۹	فصل سوم: سرباره دانه‌ای کوره آهن پاز
۲۰۹	مقدمه
۲۰۹	تولید
۲۱۲	خواص فیزیکی، شیمیایی و معدنی
۲۱۲	خواص فیزیکی
۲۱۲	ترکیب شیمیایی
۲۱۳	خواص معدنی
۲۱۴	ساختار سرباره‌های شیشه‌ای
۲۱۶	خواص هیدرولیکی سرباره‌ها
۲۱۸	هیدراسیون مخلوط سرباره-سیمان
۲۲۰	اثر فراوری حرارتی
۲۲۱	اثرات سرباره بر خواص بتن تازه
۲۲۱	کارایی
۲۲۲	آب‌انداختگی و جداسازی
۲۲۳	زمان گیرش
۲۲۴	اثرات سرباره بر خواص مکانیکی بتن سخت‌شده
۲۲۴	خواص مقاومتی

۲۲۷	ضریب ارتجاعی
۲۲۹	اثر سرباره بر تغییر حجم بتن
۲۳۲	ریزساختار، تخلخل و نفوذپذیری
۲۳۳	اثر سرباره بر دوام بتن
۲۴۳	اثر سرباره بر کرناسیون ملات‌ها و بتن
۲۴۴	اثر یون‌های کلرید بر دوام بتن‌های حاوی سرباره
۲۴۶	مقاومت سولفاتی ملات‌ها و بتن‌های حاوی سرباره
۲۳۸	اثر سرباره بر جلوگیری از واکنش قلیایی سنگدانه
۲۴۱	یخ زدن، آب شدن بتن‌های حاوی سرباره
۲۴۳	کاربرد سرباره در بتن
۲۴۵	مراجع
۲۵۱	فصل چهارم: دوده سیلیس (میکروسیلیس)
۲۵۱	مقدمه
۲۵۱	تولید
۲۵۳	خواص فیزیکی، شیمیایی و معدنی
۲۵۳	خواص فیزیکی
۲۵۴	خواص شیمیایی و معدنی
۲۵۵	واکنش‌های هیدراسیون و فعالیت پوزولانی
۲۵۵	هیدراسیون دوده سیلیس با آهک
۲۵۶	فعالیت پوزولانی
۲۵۶	هیدراسیون دوده سیلیس با کلینکر
۲۵۷	اثر دوده سیلیس بر خواص بتن تازه
۲۵۷	کارایی
۲۵۸	جداسازی و آب انداختگی
۲۵۸	زمان گیرش
۲۵۹	اثر دوده سیلیس بر خواص مکانیکی بتن سخت‌شده
۲۵۹	مقاومت ملات و بتن
۲۶۲	ضریب ارتجاعی
۲۶۳	اثر دوده سیلیس بر تغییر حجم بتن
۲۶۳	جمع‌شدگی

۲۶۶	خزش
۲۶۷	ریزساختار، تخلخل و نفوذپذیری
۲۶۹	اثر دوده سیلیس بر دوام بتن
۲۶۹	اثر دوده سیلیس بر کرناسیون ملات‌ها و بتن
۲۷۰	اثر یون‌های کلرید بر دوام بتن‌های حاوی دوده سیلیس
۲۷۲	مقاومت سولفاتی ملات‌ها و بتن‌های حاوی دوده سیلیس
۲۷۴	اثر دوده سیلیس بر جلوگیری از واکنش قلیایی سنگدانه
۲۷۶	یخ زدن و آب شدن بتن‌های حاوی دوده سیلیس
۲۷۸	کاربرد دوده سیلیس در ملات‌ها و بتن‌ها
۲۸۱	مراجع

۲۸۷	فصل پنجم: متاکائولین
۲۸۷	مقدمه
۲۸۸	تولید
۲۹۱	خواص فیزیکی، شیمیایی و معدنی
۲۹۱	خواص فیزیکی
۲۹۲	خواص شیمیایی و معدنی
۲۹۲	فعالیت پوزولانی
۲۹۵	اثرات متاکائولین بر خواص بتن تازه
۲۹۷	اثرات متاکائولین بر خواص مکانیکی بتن سخت شده
۲۹۷	مقاومت ملات‌ها و بتن
۳۰۱	ضریب ارتجاعی
۳۰۲	اثر بر تغییرات حجمی بتن
۳۰۴	ریزساختار، تخلخل و نفوذپذیری
۳۰۶	اثر متاکائولین بر دوام بتن
۳۰۷	اثر متاکائولین بر کرناسیون ملات‌ها و بتن‌ها
۳۰۸	اثر یون‌های کلرید بر دوام ملات‌ها و بتن‌های حاوی متاکائولین
۳۰۹	مقاومت سولفاتی ملات‌ها و بتن‌های حاوی متاکائولین
۳۱۳	اثر متاکائولین بر کاهش واکنش قلیایی سنگدانه
۳۱۵	یخ زدن و آب شدن بتن‌های حاوی متاکائولین

۳۱۷	 کاربرد متاکائولین در ملات‌ها و بتن
۳۱۹	 مراجع
۳۲۷	 فصل ششم: خاکستر پوسته برنج
۳۲۷	 مقدمه
۳۲۸	 تولید
۳۲۸	 سبوس برنج
۳۲۹	 کاربرد پوسته برنج
۳۲۹	 شیمی
۳۲۹	 فیبر غذای حیوانات خانگی
۳۲۹	 مصالح بنایی
۳۲۹	 کود
۳۳۰	 تولید SIC
۳۳۰	 سوخت
۳۳۰	 عوامل مؤثر بر استفاده از پوسته برنج
۳۳۱	 تولید خاکستر پوسته برنج
۳۳۳	 بهینه سازی خاکستر پوسته برنج (RHA)
۳۳۸	 خواص فیزیکی و شیمیایی خاکستر پوسته برنج (RHA)
۳۳۸	 خواص فیزیکی
۳۳۸	 ترکیب شیمیایی
۳۳۹	 فعالیت یوزولانی
۳۴۲	 اثرات خاکستر پوسته برنج بر خواص بتن تازه
۳۴۲	 کارایی
۳۴۴	 افزودنی حباب هوازا
۳۴۵	 غلظت و زمان گیرش
۳۴۷	 اثرات خاکستر پوسته برنج بر روی خواص مکانیکی بتن سخت شده
۳۴۷	 مقاومت فشاری و کششی
۳۵۷	 تأثیر خاکستر پوسته برنج بر تغییرات حجم بتن
۳۵۷	 جمع شدگی در اثر خشک شدن
۳۵۸	 ریز ساختار ، تخلخل و نفوذپذیری
۳۶۰	 اثر خاکستر پوسته برنج بر دوام بتن

۳۶۰	کربناته شدن بتن‌های شامل خاکستر پسته برنج
۳۶۱	تأثیر یون‌های کلرید بر ملات ها و بتن‌های حاوی خاکستر پسته برنج
۳۶۷	مقاومت در برابر خوردگی
۳۶۸	مقاومت در برابر سولفات ملات ها و بتن‌های حاوی خاکستر پسته برنج
۳۷۱	اثر خاکستر پسته برنج در کنترل واکنش قلیایی سنگدانه
۳۷۳	مقاومت در برابر یخ و ذوب بتن‌های حاوی خاکستر پسته برنج
۳۷۴	مقاومت در برابر پسته پسته‌شدن ملات ها و بتن‌های حاوی خاکستر پسته برنج
۳۷۵	مراجع
۳۸۱	فصل هفتم: سنگ‌آهک
۳۸۱	مقدمه
۳۸۲	تولید و کاربرد
۳۸۴	خواص فیزیکی
۳۸۷	واکنش هیدراسیون
۳۸۹	اثر سنگ‌آهک بر خواص بتن تازه
۳۹۱	آب‌انداختگی
۳۹۱	زمان گیرش
۳۹۲	گرمای هیدراسیون
۳۹۳	اثر سنگ‌آهک بر خواص مکانیکی بتن سخت‌شده
۳۹۳	مقاومت فشاری
۳۹۵	مقاومت‌های کششی و خمشی، ضریب ارتجاعی
۳۹۵	جمع‌شدگی و خزش
۳۹۶	اثر سنگ‌آهک بر دوام بتن
۳۹۶	نفوذپذیری
۳۹۷	کربناسیون
۳۹۹	یخ زدن و آب شدن
۴۰۱	مقاومت کلردی
۴۰۴	خوردگی
۴۰۶	مقاومت سولفاتی
۴۰۸	واکنش قلیایی - سیلیسی
۴۰۸	حمله سولفات تومازایتی

۴۱۲	 مراجع
۴۱۹	 فصل هشتم: نقش مواد مکمل سیمانی در توسعه پایدار
۴۱۹	 مقدمه
۴۲۰	 انرژی نهفته
۴۲۱	 انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن زمین
۴۲۲	 سهم سیمان از انتشار گاز CO ₂
۴۲۳	 تولید بتن
۴۲۳	 کاهش انرژی انتشار گازهای گلخانه‌ای
۴۲۵	 مواد مکمل سیمانی و پایداری
۴۲۷	 افزایش دوام با کاربرد مواد مکمل سیمانی (SCM)
۴۲۸	 انرژی عملیاتی
۴۲۸	 سدها
۴۲۹	 نتیجه‌گیری
۴۳۰	 مراجع
۴۳۱	 نمایه
۴۳۷	 واژه نامه فارسی به انگلیسی
۴۷۳	 واژه نامه انگلیسی به فارسی

پیشگفتار

امروزه توسعه پایدار موضوع مهم جهان است. گاز دی‌اکسید کربن بدلیل اثر گازهای گلخانه‌ای آن معضل بزرگی شده است. در سال‌های اخیر بسیاری از کشورها توافق نموده‌اند که انتشار گاز دی‌اکسید کربن را کاهش دهند. بسیاری از ترکیبات سیمان و نیز تکنولوژی بتن در توسعه پایدار نقش دارند. صنعت سیمان و بتن تولیدکننده ۷ درصد کل گاز دی‌اکسید جهانی می‌باشند. کاربرد مواد مکمل و جایگزین سیمان، طرح مخلوط بتن با مقدار بهینه سیمان و افزایش دوام بتن قدم‌های اصلی و مؤثر در راستای توسعه پایدار در صنعت سیمان و بتن می‌باشد.

هدف از تصحیف این کتاب ارائه آخرین دست‌آوردها در تولید و کاربرد مواد جایگزین و مکمل سیمان شامل پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در صنعت بتن در ایران و جهان است. این کتاب مشتمل بر هشت فصل می‌باشد. فصل اول با پوزولان‌های طبیعی که بیش از ۲۵۰۰ سال از کاربرد آن می‌گذرد، آغاز می‌گردد. در فصل دوم خاکستر بادی که محصول فرعی احتراق ذغال سنگ و به‌عنوان پرمصرف‌ترین پوزولان مصنوعی در جهان است آورده شده است. فصل سوم به سرباره‌دانه‌ای محصول فرسایش کوره‌های ذوب‌آهن پرداخته که امروزه به‌عنوان یک ماده شبه سیمانی در پروژه‌های بتنی در مناطق خنود بکار گرفته می‌شود. در فصل چهارم از دوده سیلیس که محصول فرعی کارخانه‌های تولید سیلیسیم و آلیاژهای آن می‌باشد به‌عنوان یک پوزولان ویژه و بسیار فعال برای افزایش دوام بتن سخن به میان آمده است. فصل پنجم به متاکائولین به‌عنوان یک ماده مکمل سیمان که از سال ۱۹۹۰ به‌صورت تجاری تولید شده است پرداخته است. متاکائولین با سایر مواد مکمل بتن به‌عنوان یک سیستم نظیر خاکستر بادی، دوده سیلیس و سرباره تفاوت دارد زیرا محصول فرعی یک پالایشگاه فاضلابی نیست. این ماده از حرارت دادن کائولین که یک نوع خاک رس نسبتاً فراوان در طبیعت می‌باشد در دمای بین ۶۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بدست می‌آید. خاکستر پوسته برنج که از پوسته برنج تحت دمای کنترل شده بدست می‌آید نیز به‌عنوان یک پوزولان مصنوعی بسیار فعال در فصل ششم آورده شده است. افزایش تولید برنج و کاربرد پوسته آن برای تولید انرژی الکتریکی و استفاده از خاکستر پوسته برنج در تولید بتن‌های با دوام آینده روشن کاربرد این ماده در صنعت سیمان و بتن را نوید می‌دهد. فصل هفتم به خواص سیمان‌های پرتلند آهکی می‌پردازد. یکی از مزایای اصلی کاربرد سنگ‌آهک خام در تولید سیمان‌های آهکی افزایش تولید سیمان یا به عبارت دیگر کاهش تولید کلینکر در صنعت سیمان می‌باشد. همچنین با تولید این سیمان‌ها در مصرف سوخت برای تولید کلینکر صرفه‌جویی شده و آلاینده‌گی و ایجاد گاز دی‌اکسید کربن در اثر تولید کلینکر کاهش قابل‌ملاحظه‌ای خواهد داشت. سرانجام نقش مواد جایگزین سیمان در

توسعه پایدار در فصل هشتم آمده است. مواد مکمل سیمانی نقش عمده ای در کاهش آلودگی محیط زیستی داشته و برای تولید بتن‌های مختلف بسیار اقتصادی می‌باشند. تحقیقات گسترده تری برای کاربرد بیشتر مواد جایگزین سیمان در صنعت سیمان و بتن لازم است صورت بگیرد تا مزایای این مواد در کاهش مصرف انرژی در تولید کلینکر سیمان و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در تولید سیمان روشن گردد.

هر فصل این کتاب با مقدمه‌ای آغاز می‌گردد و سپس به تولید، خواص فیزیکی، خواص شیمیایی، خواص معدنی، واکنش‌های هیدراسیون و فعالیت پوزولانی، تأثیر بر خواص بتن تازه، تأثیر بر خواص مکانیکی بتن سخت شده، تأثیر بر دوام بتن و کاربرد این مواد در بتن پروژه‌های مختلف پرداخته شده است.

مؤلف کتاب سعی نموده است نتایج کارهای تحقیقاتی و تجربی خود طی ۴۰ سال گذشته در زمینه تکنولوژی بتن و خصوصاً خواص مهندسی و دوام بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های پوزولانی و مواد جایگزین سیمان را در این مجموعه در اختیار جامعه جهانی قرار دهد. نتایج یافته‌های مؤلف در خواص و کاربرد پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در پروژه‌های ایران و تجربه‌های دیگران در جهان در فصول مختلف این کتاب به بحث گذاشته شده است.

در خاتمه بر خود واجب می‌دانم از همه همکاران، آقایان دکتر امیر محمد رمضانیان پور، پروفسور هوتن، دکتر مهدی مهدیخانی، مهندس بهرامی جوی، مهندس جلال در تهیه برخی از فصول این کتاب و خانمها قیطرانیه و هاشمی برای تألیف و ویراستاری آن سپاس ویژه داشته و آرزو نمایم اثر فوق برای جویندگان علم و دانش و دانشجویان در صنعت سیمان و بتن سودمند باشد.

علی‌اکبر رمضانیان پور

بهمن ۱۳۹۴