نشریه علمی – پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

سال چهل و پنج، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۳ تا ۲۳
Vol. 45, No.1, Summer 2013, pp. 13-23

دوام بتن‌های حاوی خاکستر پوسته برنج در برابر حمله سولفاتی

علی‌اکبر رمضانیانپور[۱*]، پویا پوربیک[۲]، فرامرز مودی[۳]

۱ [i] استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر و [ii] رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن
۲ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳ استادیار مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۸۸/۱۱/۶، پذیرش ۹۱/۸/۱۶)

چکیده

خرابی سازه‌های بتنی در محیط‌های سولفاتی پدیده‌ای شناخته شده می‌باشد. شیمی سیمان عاملی بسیار مهم برای مقابله با حمله سولفاتی است. C_3A و هیدروکسید کلسیم باعث انبساط، ایجاد ترک و کاهش مقاومت در بتن می شود. استفاده از خاکستر پوسته برنج می‌تواند باعث بهبود دوام در برابر حمله سولفاتی شود. دوام سیمان‌های آمیخته به‌طور چشم‌گیری در محیط‌های سولفاتی نسبت به بتن‌های کنترل افزایش می‌یابد.

در این کار تحقیقاتی دوام بتن‌های حاوی خاکستر پوسته برنج ارزیابی شده‌است. سه درصد جایگزینی ۷، ۱۰ و ۱۵ خاکستر پوسته برنج در نظر گرفته شد. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، نمونه‌های بتنی در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم قرار گرفتند. میزان حمله سولفاتی به وسیله اندازه-گیری افت وزن و مقاومت فشاری در اثر حمله سولفاتی دائم و دوره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند.

میزان انبساط در نمونه‌های منشوری ملات کنترل بیش از نمونه‌های سیمان آمیخته بود. علاوه بر این ریز ساختار نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات نیز با دستگاه میکروسکوپ الکترونی بررسی شد.

کلمات کلیدی

خاکستر پوسته برنج، دوام بتن، حمله سولفاتی، انبساط ملات‌های منشوری، ریزساختار

[*] نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: aaramce@aut.ac.ir

۱- مقدمه

سالیان متمادی است که بتن به عنوان یکی از مصالح مصرفی ساخت دست بشر جایگاه ویژه‌ای در بین مهندسین عمران یافته‌است. در طول این سال‌ها ویژگی‌های گوناگونی در مورد بتن بررسی شده‌است. از جمله این عوامل می‌توان به دوام بتن، اشاره نمود که نقش مهم و موثری در طول عمر مفید سازه‌های بتنی دارد. مواد پوزولانی مصنوعی در بتن به عنوان یک جایگزین مناسب به سیمان از جمله مواردی است که در افزایش دوام نمونه‌های بتنی نقش مهمی دارد. خرابی سولفاتی یکی از جدی‌ترین مشکلاتی است که عمر سرویس‌دهی سازه‌های بتنی را کاهش می‌دهد. نمک‌های سولفات موجود در خاک، آب‌های زیرزمینی و آب دریا با فازهای مختلف خمیر سیمان هیدراته شده مانند هیدرات مونو سولفات و هیدروکسید کلسیم واکنش داده و بلورهای سوزنی شکل اترینگایت و سولفات کلسیم (گچ) را تولید می‌نمایند. حجم این بلورها از حجم مواد اولیه تشکیل‌دهنده بیشتر است و این موضوع سبب ایجاد فشار در حفرات بتن و در نتیجه بروز ترک‌هایی در آن می‌شود. رفته رفته این ترک‌ها گسترش یافته و کاهش مقاومت را در بتن سبب می‌شوند [۱] .

چت‌ورا و همکاران [۲] نمونه‌های ملاتی با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵۵ و ۰/۶۵ با دو نوع خاکستر پوسته برنج ساختند. در این تحقیق دیده شد که برخلاف این که نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته برنج در محلول سولفات سدیم عملکرد خوبی از خود نشان داده‌بودند در برابر محلول سولفات منیزیم عملکرد ضعیفی دارند.

در تحقیق دیگری چینداپراسیت و همکاران [۳] اثر استفاده از خاکستر پوسته برنج در دوام ملات‌ها مقابل حمله سولفات‌ها را بررسی نمودند. نتایج نشان‌دهنده کاهش انبساط ملات‌های منشوری با جایگزینی خاکستر پوسته برنج بوده‌است.

جیاچو و همکاران [۴] در تحقیقی دیگر، نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۸، ۰/۳۲، ۰/۴ و ۰/۵ با درصدهای جایگزینی خاکستر پوسته برنج ۰ و ۱۰ درصد ساخته شدند. نتایج حاکی از آن است که با جایگزینی خاکستر پوسته برنج، مقاومت نمونه‌های بتنی افزایش می‌یابد.

چینداپراسیت و همکاران [۵] تحقیقاتی بر روی ملات‌های حاوی خاکستر پوسته برنج انجام دادند.

نتایج نشان می‌دهند که استفاده از خاکستر پوسته برنج اثر چشم‌گیری در افزایش مقاومت ملات‌ها نداشته‌است.

در این تحقیق اثر خاکستر پوسته برنج بر دوام در برابر حمله سولفاتی در بتن‌ها و ملات‌های حاوی خاکستر پوسته برنج بررسی شده است.

علاوه بر این برای بررسی دقیق‌تر اثرات خاکستر پوسته برنج بر ریزساختار بتن، از آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های خمیر سیمان نیز استفاده شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

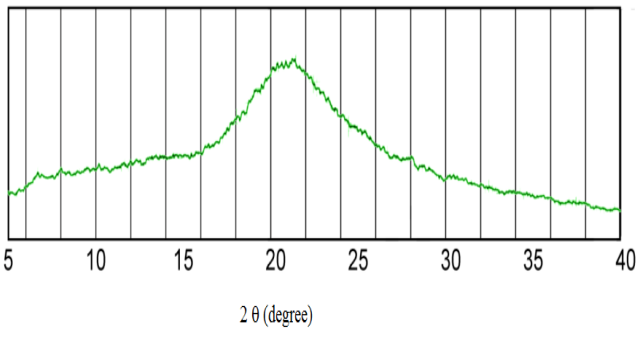
سیمان به کار رفته در این کار آزمایشی سیمان تیپ I-425 کارخانه‌ای در استان تهران بوده‌است. این سیمان به دلیل یکنواختی، کیفیت و مرغوبیت نسبی در مقایسه با سایر سیمان‌های موجود در بازار انتخاب شده‌است. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی این سیمان و خاکستر پوسته برنج در جدول (۳) آورده شده است. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی در جدول (۱) آمده‌است. این خاکستر با توجه به مطالعات قبلی انجام شده با کوره ساخته شده در دانشگاه امیرکبیر، در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت تولید شده‌است. نتایج آزمایش پراش اشعه X (شکل ۱) نشان می‌دهد که خاکستر تولید شده آمورف است.

علاوه بر این برای بررسی دقیق‌تر اثرات خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین سیمان مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز با جایگزینی ۲۰ درصد نسبت به نمونه کنترل اندازه‌گیری شد. (جدول ۲).

در این تحقیق از فوق روان‌کننده‌های نسل سوم بر پایه کربوکسیلیک اتر استفاده شده‌است. این ماده، کدر و ابری رنگ بوده و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. آب مصرفی در این پژوهش آب شرب تهران بوده است.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

سنگدانه	نوع	وزن مخصوص gr/cm3	٪SSD
شن	شکسته	۲/۵۸	۱/۷
ماسه	طبیعی	۲/۶۸	۲/۵



شکل (۱): آزمایش XRD بر روی خاکستر پوسته برنج

جدول (۲): ویژگی‌های فیزیکی پوزولان‌ها و الزامات استاندارد ISIRI 3433 / ASTMC618

ردیف	ویژگی‌های فیزیکی	نتایج آزمایش RHA	الزامات استاندارد
۱	حداکثر میزان باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون به روش تر ٪	۷	۳۴
۲	شاخص فعالیت براساس مقاومت با جایگزینی ۲۰ درصد RHA	۱۰۳	---
	حداقل مقاومت ۳ روزه نسبت به نمونه شاهد٪	۱۰۷	۷۵
	حداقل مقاومت ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد٪		
	حداقل مقاومت ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد٪	۱۱۱	۷۵

۲- ۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی و ملات

تعیین مشخصات طرح اختلاط عبارت بود از:

- روانی در حدود اسلامپ ۶ تا ۸ سانتی‌متر
- نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۵/۰
- مقدار سیمان برابر با ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب بتن

همان‌طور که جدول (۳) نشان می‌دهد ریزی پوزولان در حد ریزی سیمان است. طرح اختلاط استفاده شده در جدول (۴) آمده است.

ساخت ملات‌ها بر اساس استاندارد ۳۹۳ ایران انجام شد. ماسه طبق استاندارد ایران الک و آماده شده (استاندارد ۳۰۴۰) و نمونه‌های مکعبی با بعد ۵ سانتی‌متر طبق استاندارد ساخته شدند.

روانی ملات‌ها با استفاده از میز سیلان بین ۱۰ تا ۱۲ سانتی-متر ثابت شد.

۲- ۲- ساخت، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌های بتنی

در سری دیگری از ساخت ملات برای آزمایش تغییر طول در حمله سولفات سدیم و منیزیم، ملات‌هایی با درصدهای جایگزینی ۷، ۱۰ و ۱۵ خاکستر پوسته برنج ساخته شد و در قالب‌های منشوری ریخته شدند.

در هر سری ساخت ابتدا مصالح ریزدانه و درشت دانه در مخلوط‌کن قرار داده می‌شدند و پس از مخلوط شدن سنگدانه‌ها بصورت خشک توسط مخلوط‌کن، مقداری از آب طرح به مصالح اضافه شده و ادامه اختلاط انجام شد و سپس در دو مرحله سیمان و لجن پوزولان (شکل ۲) (مخلوط پوزولان و مقداری از آب طرح و فوق روان‌کننده که با مخلوط‌کن ملات همزمان با ساخت بتن تهیه می‌شد) و آب باقی‌مانده به مخلوط اضافه شده و ادامه اختلاط با مخلوط‌کن انجام شد. پس از اختلاط کامل بتن، آزمایش روانی اسلامپ بر روی بتن تازه طبق استاندارد ASTM C143 انجام شد و در صورت مناسب بودن اسلامپ (اسلامپ بین ۶ تا ۸ سانتی‌متر)، بتن در قالب‌های تهیه شده ریخته شد. تراکم بتن در قالب‌ها با استفاده از میز لرزه آزمایشگاه انجام شد. در نمونه‌های با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، بتن در دو مرحله در قالب ریخته و متراکم شد و در قالب‌های با ارتفاع بیشتر بتن در سه مرحله در قالب ریخته و متراکم شد.

پس از قالب‌گیری بتن تازه، قالب‌های حاوی بتن تازه در آزمایشگاه قرار داده شدند و روی آنها گونی تر و روی گونی تر نایلون کشیده شد تا عمل‌آوری نمونه‌ها بطور کامل انجام شود. قالب‌های نمونه‌های بتن شاهد پس از ۲۴ ساعت یا ۳۶ ساعت و قالب‌های نمونه‌های دارای پوزولان پس از ۳۶ ساعت باز شده و پس از نامگذاری در محلول آب آهک اشباع تا سن آزمایش نگاه داشته شدند.

شکل (۲): افزودن خاکستر پوسته برنج به صورت لجن

برای ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی، نمونه‌هایی با ابعاد مورد نیاز بر اساس استانداردهای مربوط، و به شرح زیر ساخته شده است:

نمونه‌های بتنی مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰cm: این نمونه‌ها برای آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری درنظر گرفته شدند.

نمونه‌های ملات مکعبی ۵×۵×۵cm: این نمونه‌ها برای آزمایش‌های دوام در برابر حملات دوره‌ای سولفات ساخته شدند.

نمونه‌های ملات منشوری با ابعاد ۲/۵×۲/۵×۲۸/۵ cm: این نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری انبساط نمونه‌های ملات قرار گرفته در محلول سولفات ساخته شدند.

نمونه‌ها پس از باز شدن قالب‌ها، بلافاصله در شرایط عمل‌آوری، در محیط آب آهک اشباع قرار می‌گیرند. دمای میانگین محیط آزمایشگاه در این مدت در حدود ۱۹ الی ۲۳ درجه سانتی‌گراد بوده است.

جدول (۳): ترکیبات شیمیایی سیمان و دودهٔ سیلیسی مصرفی

	مشخصات فیزیکی		آنالیز شیمیایی (٪)								قانون بوگ (٪)			
	وزن ویژه (gr/cm^3)	بلین (cm^2/gr)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	SO_3	LOI	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
خاکستر پوسته برنج	۲/۱۵	۳۷۰۰	۸۹/۴	۰/۲۷	۰/۳۴	۱/۴۶	۰/۵۲	۰/۱۱	۲/۵	۴/۵۸	—	—	—	—
سیمان	۳/۲۱	۳۲۰۰	۲۱/۵	۳/۶۸	۲/۷۶	۶۱/۵	۴/۸	۰/۱۲	۲/۵	۱/۳۵	۵۱/۱	۲۳/۱	۵/۱	۸/۴

جدول (۴): طرح اختلاط نمونه‌های مختلف بتنی

نام طرح	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	پوزولان (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	درصد وزنی جایگزینی	نسبت آب به مواد سیمانی	روانی (آزمایش اسلامپ) (cm)
Control	۷۹۶	۹۶۰	۱۷۵	۰	۳۵۰	۰	۰/۵	۶-۸
٪۷ RHA	۷۹۶	۹۶۰	۱۷۵	۲۴/۵	۳۲۵/۵	۷	۰/۵	۶-۸
٪۱۰ RHA	۷۹۶	۹۶۰	۱۷۵	۳۵	۳۱۵	۱۰	۰/۵	۶-۸
٪۱۵ RHA	۷۹۶	۹۶۰	۱۷۵	۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۵	۰/۵	۶-۸

۲- ۳- ساخت، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌های ملات سیمان برای بررسی با دستگاه میکروسکوپ الکترونی

برای آماده‌سازی نمونه‌های ملات سیمان برای آزمایش SEM، در ابتدا نمونه‌هایی از ملات سیمان که بخشی از آن با مقادیر ۰، ۷ ، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج جایگزین شده تهیه شدند. برای این منظور ملات سیمان طبق استاندارد ASTM C109 ساخته شد و نسبت آب به مواد سیمانی برای این ملات با جایگزینی‌های ۰، ۷، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج به ترتیب برابر با ۰/۴۸۵، ۰/۴۹۵، ۰/۵ و ۰/۵۱ بدست آمد. هدف از انجام این آزمایش بررسی ریزساختار سیمان‌های دارای خاکستر پوسته برنج است.

عکس‌های میکروسکوپ الکترونی در سنین ۷ و ۲۸ روز برای بررسی هیدراتاسیون تهیه شد. برای دستیابی به این هدف نمونه-ها تا سن موردنظر درون آب آهک اشباع عمل‌آوری شدند، سپس از آب آهک خارج شده و به قطعات کوچک شکسته شده و برای توقف هیدراتاسیون به مدت ۳ تا ۴ ساعت درون استون نگهداری شد. پس از خارج نمودن از استون، نمونه‌ها درون محفظه‌هایی در بسته با تعیین مشخصات تا زمان ارسال به آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی نگهداری شدند.

۳- ارائه نتایج آزمایش

۳- ۱- آزمایش مقاومت فشاری ملات و بتن

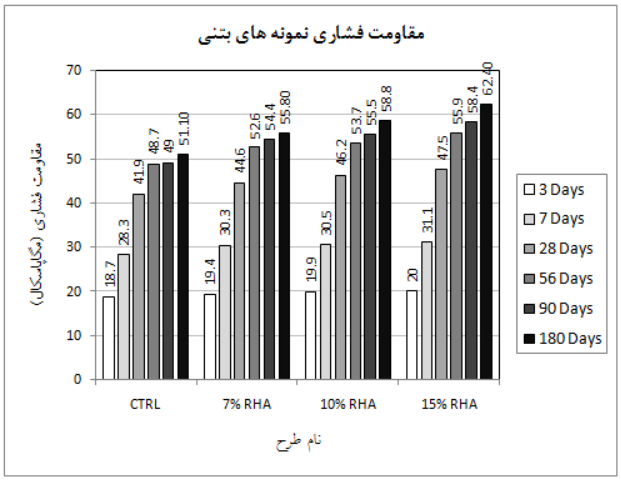
برای ۴ طرح اختلاط، آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روزه با شکستن ۳ نمونه درهر سن انجام گردید. نتایج این آزمایش در جدول (۵) آورده شده است. از نتایج آزمایش دیده می‌شود که در تمام سنین، افزودن خاکستر پوسته برنج به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شده و این افزایش مقاومت با افزایش میزان خاکستر پوسته برنج در نمونه بیشتر می‌شود. نتایج نشان‌دهنده فعالیت پوزولانی در بتن حاوی خاکستر پوسته برنج با گذشت زمان است، بطوریکه نسبت مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج به بتن کنترل در سن ۳ روزه برابر با ٪۱۰۷ است که در سن ۱۸۰ روزه این نسبت به ٪۱۲۲ بالغ می‌شود. همان‌طور که قبلا اشاره شد نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ در محلول اشباع آب آهک نگهداری شدند.

آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف ملات در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز انجام شد. در هر سن سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ملات به عنوان مقاومت فشاری نمونه در سن مشخص شده تعیین شد. دیده می‌شود با افزایش جایگزینی خاکستر پوسته برنج، به علت انجام واکنش‌های پوزولانی و کاهش حفرات موئینه، مقاومت فشاری افزایش یافته و پس از ۹۱روز از مقدار ۶/۴۶ مگاپاسکال در بتن کنترل به مقدار ۷/۵۱ مگاپاسکال رسیده‌است (نمودار ۱).

جدول (۵): مقاومت فشاری نمونه‌های ملات در سنین مختلف

مقاومت فشاری نمونه‌های ملات در سنین مختلف (مگاپاسکال)

	3	7	28	56	91
CTRL	۲۱/۱	۲۷/۸	۴۲/۳	۴۵/۹	۴۶/۶
7% RHA	۲۱/۳	۲۸/۶	۴۴/۴	۴۸/۶	۴۹/۴
10% RHA	۲۱/۳	۲۸/۹	۴۴/۶	۴۹/۱	۵۰/۳
15% RHA	۲۱/۵	۲۹/۵	۴۵/۳	۵۰	۵۱/۷



نمودار (۱): نتایج مقاومت فشاری بتن

۳- ۲- تغییر وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم و منیزیم

دیده می‌شود که همه نمونه‌ها تا سن ۶۰ روز در محلول سولفات، افزایش وزن داشته‌اند. این نتیجه طبیعی است و به‌طور معمول اثر کاهش وزن بتن در سولفات پس از چند ماه دیده می‌شود. افزایش وزن موجود در نمونه‌های بتنی ناشی از تشکیل اترینگایت و گچ در اثر واکنش‌های سولفات سدیم با هیدروکسیدکلسیم و نیز C_3A است. این محصولات در فضاهای خالی بتن جای می‌گیرند و به وزن نمونه بتنی می‌افزایند. در دراز مدت به دلیل اینکه این محصولات حجم بیش‌تری نسبت به مواد اولیه دارند، موجب ترک‌خوردگی در ماتریس سیمان و تخریب بتن و کاهش وزن می‌شوند. اما از نتایج تا سن ۱۸۰ روز نیز می‌توان استفاده نمود. مشاهده می‌شود که پس از ۹۰ روز، نمونه‌های کنترل قرار گرفته در سولفات منیزیم کاهش وزن داشته‌اند. این بدین معناست که اترینگایت و گچ بیش‌تری در این نمونه‌ها تولید شده است. در واقع فضاهای خالی این نمونه‌ها پر شده و ایجاد انبساط سبب ترک‌خوردگی نمونه‌ها شده‌است. البته در همین سن و در نمونه‌های قرار گرفته در سولفات سدیم کاهش وزن دیده نشده‌است و این موضوع به دلیل تخریب کم‌تر نمونه‌ها در اثر سرعت تخریب کم‌تر در سولفات سدیم است. به‌طور کلی عامل دیگری که موجب تخریب کم‌تر و در نتیجه کاهش وزن کم‌تر نمونه‌های پوزولانی در محلول‌های سولفاتی است، کم‌تر شدن مقدار C_3A و $Ca(OH)_2$ در این نمونه‌ها است که منجر به کم‌تر شدن پتانسیل تولید اترینگایت و گچ در نمونه‌ها می‌شود. در سن ۱۸۰ روز اثر این عامل در نتایج دیده می‌شود. با مراجعه به نتایج سن ۱۸۰ روز در آزمایش در می‌یابیم که در این سن درصد کاهش وزن همه نمونه‌های حاوی پوزولان کمتر از نمونه شاهد است. در این سن به وضوح اثر پوزولان‌ها در کاهش پتانسیل تشکیل اترینگایت و گچ دیده می‌شود.

همچنین با جایگزینی ۷ و ۱۰ درصد خاکستر پوسته برنج از میزان کاهش وزن کاسته شده اما با جایگزینی ۱۵ درصد به علت کاهش C_3A و هیدروکسید کلسیم نه تنها امکان تولید اترینگایت و گچ کاهش می‌یابد بلکه به علت کاهش نفوذپذیری، یون‌های سولفات کم‌تری می‌توانند به داخل نمونه‌ها نفوذ یابند و در نتیجه دارای کم‌ترین تغییر وزن است.

جدول(۶): تغییر وزن نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم ۵٪

تغییر وزن نمونه‌های بتن نسبت به وزن اولیه در سولفات سدیم ۵٪ (مگاپاسکال)

	وزن اولیه (گرم)	درصد تغییر وزن پس از ۱ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۲ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۳ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۴ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۵ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۶ ماه نسبت به وزن اولیه
CTRL	۲۳۲۶/۵	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۱۷	-۱/۳۵	-½	-۲/۶
7% RHA	۲۴۰۰/۵	۰/۱۵	۰/۴۳	۰/۲۹	-۱/۱	-۱/۳	-۱/۷
10% RHA	۲۴۰۷	۰/۲۱	۰/۴۴	۰/۲۹	-۰/۷۳	-۱/۲	-۱/۹
15% RHA	۲۳۵۷	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۱۹	-۰/۵۵	-۱	-۱/۵

جدول (۷): تغییر وزن نمونه‌ها در محلول سولفات منیزیم ۵٪

تغییر وزن نمونه‌های بتن نسبت به وزن اولیه (درصد) در سولفات منیزیم ۵٪ (مگاپاسکال)

	وزن اولیه (گرم)	درصد تغییر وزن پس از ۱ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۲ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۳ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۴ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۵ ماه نسبت به وزن اولیه	درصد تغییر وزن پس از ۶ ماه نسبت به وزن اولیه
CTRL	۲۴۱۷/۵	۰/۱۶	۰/۰۲	-۰/۱	-۲/۰۴	-۲/۷	-۳/۵
7% RHA	۲۳۳۳	۰/۱۳	۰/۴۳	۰/۳۲	-۰/۸۵	-۱/۶	-۲/۴
10% RHA	۲۳۹۶	۰/۳۶	۰/۳۱	۰/۲۱	-۰/۵	-۱/۶	-۲/۲
15% RHA	۲۳۹۱	۰/۰۸	۰/۳۵	۰/۱۹	-۰/۷	-۱	-۱/۵

با توجه به نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌ها می‌توان پیش‌بینی نمود که، در طولانی مدت مقاومت فشاری نمونه شاهد در محلول سولفات سدیم و منیزیم ۵ درصد کاهش چشمگیری نسبت به نمونه عمل‌آوری شده در آب آهک خواهد یافت. افزایش مقاومت فشاری بتن شاهد در مقطع حدود ۱۲۰ روز به علت پر شدن فضاهای خالی بتن با گچ و اترینگایت است. با گذشت زمان، انبساط گچ و اترینگایت در فضاهای خالی موجب تخریب ساختار بتن می‌شود.

در نمونه‌های پوزولانی حاوی ۷، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج قرار گرفته در ۵ درصد سولفات سدیم روند افزایش مقاومت تا ۱۸۰ روز همچنان ادامه دارد. همین روند به جز نمونه‌های حاوی ۷ درصد خاکستر پوسته برنج در نمونه‌های قرار گرفته در سولفات منیزیم وجود دارد و پس از یک افزایش، مقاومت اولیه در نمونه موجود در محلول سولفات منیزیم نسبت به نمونه موجود در آب آهک، روند کاهش مقاومت بتن در حمله سولفات آغاز می‌شود (جدول ۶ و۷).

نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات به طور کلی روند افزایش مقاومتی کم‌تری نسبت به نمونه‌های قرار گرفته در آب آهک دارند. این پدیده به دلیل قطع شدن عمل‌آوری در آب آهک نیز است.

جدول (۸): مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در آب آهک

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در آب آهک (مگاپاسکال)

مخلوط	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۱۲۰ روزه	۱۸۰ روزه
CTRL	۴۱/۹	۴۹	۴۹/۲	۵۱/۱
7% RHA	۴۴/۶	۵۴/۴	۵۵	۵۵/۸
10% RHA	۴۶/۲	۵۵/۵	۵۶	۵۸/۸
15% RHA	۴۷/۵	۵۸/۴	۶۱/۱	۶۲/۴

جدول (۹): مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در سولفات سدیم ۵٪

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در سولفات سدیم ۵٪ (مگاپاسکال)

مخلوط	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۱۲۰ روزه	۱۸۰ روزه
CTRL	۴۱/۹	۴۱/۵	۴۹/۶	۴۱/۷
7% RHA	۴۴/۶	۴۹/۸	۵۸/۷	۵۶/۳
10% RHA	۴۶/۲	۴۵/۷	۵۷/۲	۵۸/۹
15% RHA	۴۷/۵	۴۷	۵۷/۲	۵۸/۸

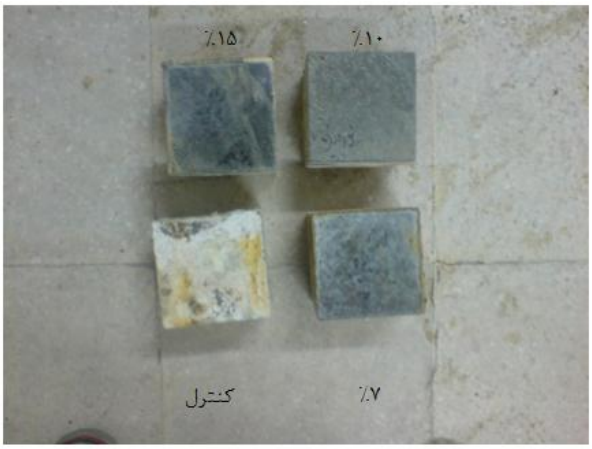
جدول (۱۰): مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در سولفات منیزیم ۵٪

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در سولفات منیزیم ۵٪ (مگاپاسکال)

مخلوط	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۱۲۰ روزه	۱۸۰ روزه
CTRL	۴۱/۹	۴۵/۵	۴۷/۶	۴۵/۵
7% RHA	۴۴/۶	۴۸/۳	۴۷/۲	۴۸/۳
10% RHA	۴۶/۲	۵۱/۵	۵۵/۹	۵۱/۵
15% RHA	۴۷/۵	۵۴/۶	۵۵/۵	۵۴/۶

همچنین همان‌طور که در شکل‌های (۳) و (۴) دیده می‌شود پس از قرارگیری نمونه‌ها به‌خصوص در محلول سولفات منیزیم تخریب سطحی در نمونه پس از مدتی آغاز می‌شود. در نمونه‌های شاهد پس از دو ماه قرارگیری آن‌ها در سولفات منیزیم این تخریب سطحی آغاز شد. این امر باعث زبر شدن سطح بتن و نمایان شدن سنگدانه‌ها می‌شود، این سطح باعث تمرکز تنش در هنگام آزمایش مقاومت فشاری شده و یکی از دلایل کاهش مقاومت فشاری است، اما موردی که قضاوت را سخت می‌نماید آن است که هنوز نمونه‌ها مقاومتی بیش از مقاومت ۲۸ روزه خود دارند.

اما همان‌طور که دیده می‌شود این نتایج نمی‌تواند ملاک مناسبی برای ارزیابی دوام بتن در کوتاه مدت باشد و روند تخریب پس از ۶ تا ۱۲ ماه آغاز خواهد شد.



شکل (۳): نمونه‌های بتنی پس از ۲ ماه قرارگیری در سولفات منیزیم

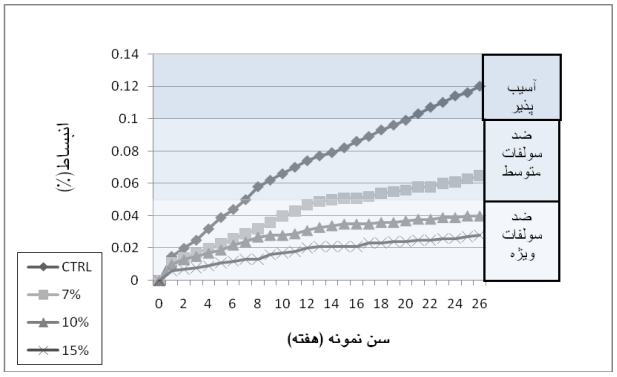
شکل (۴): نمونه‌های بتنی پس از ۴ ماه قرارگیری در سولفات منیزیم

۳- ۳- تغییر طول نمونه‌های ملات در محلول‌های سولفات سدیم، منیزیم و سدیم-منیزیم

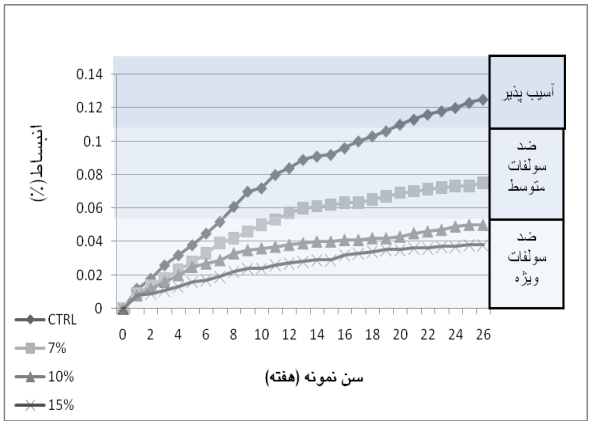
آزمایش بر روی نمونه‌های منشوری ملات درون محلول‌های ۵ و ۱۰ درصد سولفات سدیم و منیزیم انجام شده است و همچنین محلول ۵ درصد ترکیب سولفات سدیم و منیزیم و نتایج آزمایش تا ۲۶ هفته در نمودارهای (۱) تا (۵) بر حسب درصد تغییر طول آورده شده است. در این آزمایش pH محلول سولفات طبق استاندارد مربوطه بین ۶ تا ۸ ثابت شد و دمای نگهداری نمونه‌ها بین ۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد بود.

همان‌طور که گفته شد یکی از عوامل موثر در حمله سولفاتی و نیز شدت آن، میزان غلظت یون سولفات است. با توجه به نمودارها و جداول یاد شده دیده می شود در هر یک از محلول‌های سولفات با افزایش میزان غلظت سولفات از ۵ درصد (۵۰ گرم سولفات در ۱ لیتر آب مقطر) به ۱۰ درصد (۱۰۰ گرم سولفات در ۱ لیتر آب مقطر) بر میزان تغییر طول‌ها افزوده می‌شود که این موضوع به دلیل افزایش میزان غلظت سولفات است. از بین محلول‌های ۵ درصد سولفات منیزیم و سدیم طبق انتظار محلول سولفات منیزیم اثر تخریبی بیشتری بر نمونه‌ها وارد نموده و میزان انبساط‌ها نیز بیشتر است. به طور مثال پس از گذشت ۲۶ هفته، نمونه‌های حاوی ۰، ۷، ۱۰و ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج در محلول ۵ درصد سولفات منیزیم به ترتیب ۱۲۵/۰، ۰۷۵/۰، ۰۵۰/۰و ۰۳۸/۰ درصد تغییر طول داده‌اند.

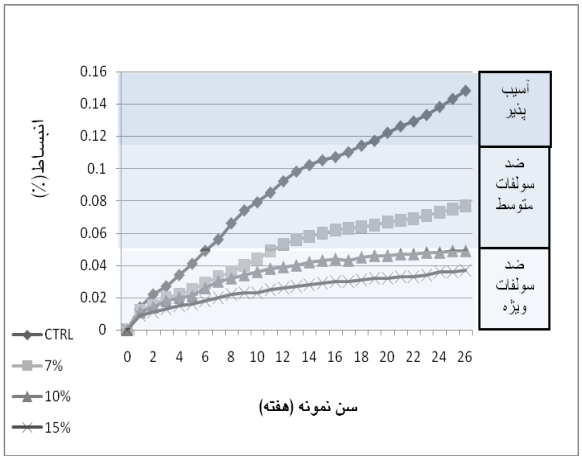
با دقت بیشتر در نمودارهای (۲) تا (۶) می‌توان دریافت که میزان تخریب و تغییر طول که با افزایش در مقدار غلظت سولفات بیشتر می‌شد، در محلول سولفات سدیم مشهودتر است، به طوری که پس از گذشت ۲۶ هفته، نمونه‌های حاوی ۰، ۷، ۱۰ و ۱۵ خاکستر پوسته برنج در محلول ۱۰ درصد سولفات سدیم نسبت به نمونه‌های مشابه آن‌ها در محلول ۵ درصد سولفات سدیم به ترتیب۱/۲۳، ۱۸/۱، ۱/۲۲ و ۱/۳۲ برابر تغییر طول داده‌اند اما همین مورد در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد نسبت به محلول سولفات منیزیم ۵ درصد به ترتیب برابر ۱/۰۷، ۱/۰۸، ۱/۰۸ و ۱/۰۵ است.



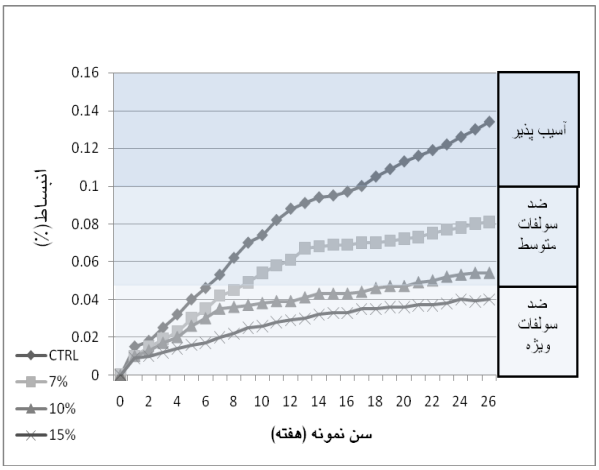
نمودار (۲): تغییر طول نمونه‌های منشوری در محلول سولفات سدیم ۵٪



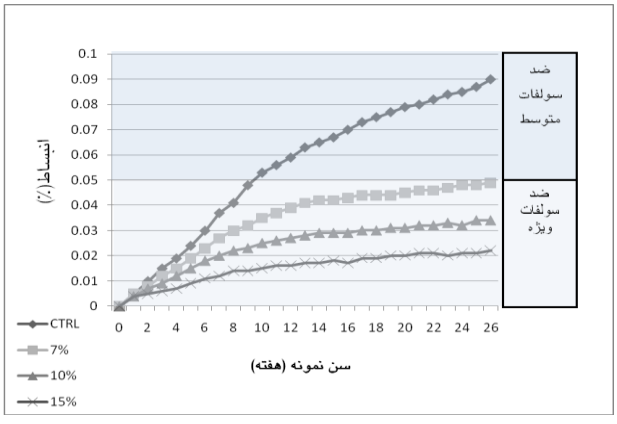
نمودار (۳): تغییر طول نمونه‌های منشوری در محلول سولفات منیزیم ۵٪



نمودار (۴): تغییر طول نمونه‌های منشوری در محلول سولفات سدیم ۱۰٪

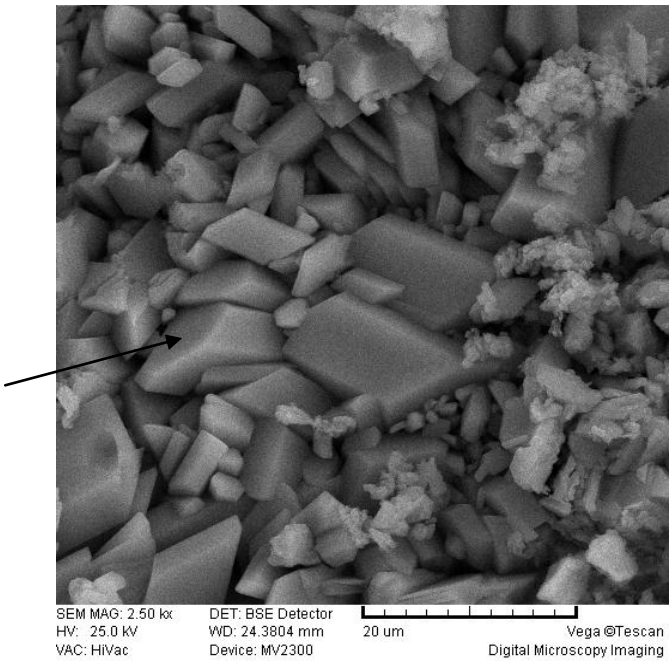


نمودار (۵): تغییر طول نمونه‌های منشوری در محلول سولفات منیزیم ۱۰٪

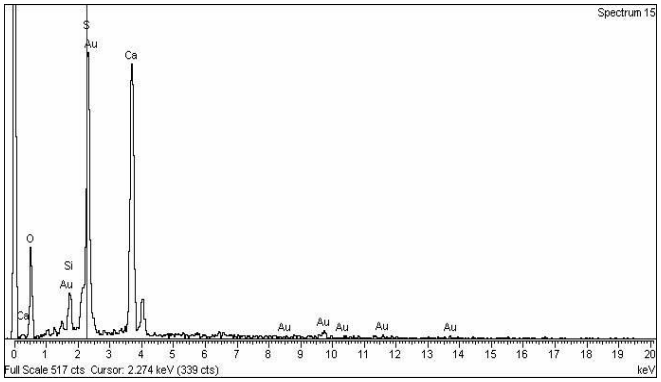


نمودار (۶): تغییر طول نمونه‌های منشوری در محلول ترکیبی سولفات سدیم و منیزیم ۵٪

۴- تفسیر نتایج با استفاده از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی

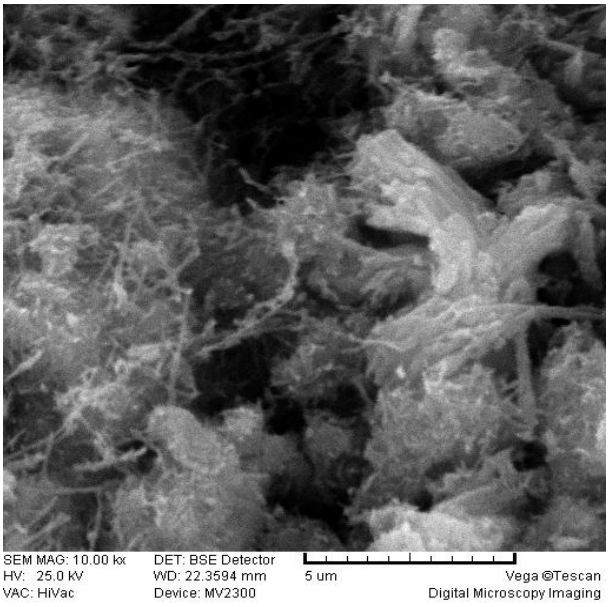


شکل (۵): بتن کنترل قرار گرفته در سولفات منیزیم به مدت ۶ ماه با بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر

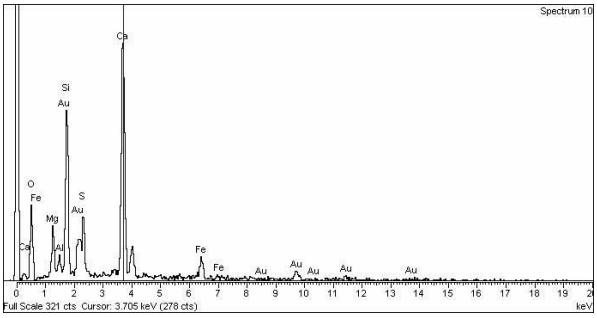


شکل (۶): طیف EDX محل مشخص شده شکل ۵ (پر شدن حفرات با گچ)

در تحلیل طیف EDX شکل (۵) و (۶) قله‌های سولفور و کلسیم دیده می‌شود که دلیل بر وجود گچ در نمونه‌ها است. ساهماران و همکاران نیز به نتایج مشابهی در بررسی ریزساختار ملات‌های قرار گرفته تحت حملات سولفاتی رسیده‌اند [۶]. در تحلیل نقطه‌ای عناصر مانند اترینگایت می‌باشد با این تفاوت که عنصر آلومینیوم در آنالیز نقطه‌ای گچ وجود ندارد. گچ با فرمول $CaSO4.2H2O$ است که در اثر واکنش هیدروکسید کلسیم با یون‌های سولفات به وجود می‌آید.



شکل (۷): ملات کنترل ۴ ماه قرار گرفته تحت چرخه سولفات منیزیم با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر



شکل (۸): طیف EDX محل مشخص شده شکل (۷) (اترینگایت)

تشکیل اترینگایت ($Ca3Al2O6.CaSO4.32H2O$) به همراه طیف EDX آن در شکل (۷) و (۸) نشان داده شده است. نقاط مشابه زیاد بوده و نشان‌دهنده وجود اترینگایت در نمونه‌های کنترل است. قله منیزیم به دلیل نفوذ یون‌های منیزیم به داخل حفرات موئینه است. (شکل ۸)

۵- نتیجه گیری

خرابی سازه‌های بتنی در محیط‌های سولفاتی پدیده‌ای شناخته شده می‌باشد. شیمی سیمان عاملی بسیار مهم برای مقابله با حمله سولفاتی است. دوام سیمان‌های آمیخته به‌طور چشم‌گیری در محیط‌های سولفاتی نسبت به بتن‌های کنترل افزایش می‌یابد. براساس تحقیقات صورت گرفته و با درنظر گرفتن این مطلب که استفاده از خاکستر پوسته برنج می‌تواند باعث بهبود دوام در برابر حمله سولفاتی شود، موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه گیری است:

۱- در حمله سولفاتی، در هر دو محلول سولفات سدیم و منیزیم با افزایش غلظت یون سولفات، شدت تخریب بیشتر می‌شود که این موضوع در محلول سولفات سدیم محسوس‌تر است.

۲- همان‌طور که دیده می‌شود نمونه‌های منشوری قرار گرفته در محلول ترکیبی سولفات سدیم و منیزیم به میزان ٪۵، کم‌ترین تغییر طول را داشته‌اند که می‌تواند به دلیل کم شدن غلظت سولفات سدیم باشد.

۳- همه نمونه‌ها تا سن ۹۰ روز در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم افزایش وزن داشته‌اند. افزایش وزن موجود در نمونه‌های بتنی ناشی از تشکیل اترینگایت و گچ در اثر واکنش‌های سولفات‌های سدیم و منیزیم با هیدروکسیدکلسیم و نیز C_3A است.

۴- در دراز مدت به علت وقوع خرابی در نمونه‌ها و پوسته پوسته شدن از وزن آن‌ها کاسته شد به‌طوری که در نمونه-های کنترل قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم این کاهش وزن به ۳/۵ درصد می‌رسد در حالی که نمونه حاوی ٪۱۵ خاکستر پوسته برنج فقط دارای ۱/۵ درصد کاهش وزن، نسبت به وزن قبل از قرار گیری در محلول سولفات است.

۶- مراجع

[۱] رمضانیانپور، علی اکبر؛ پرهیزکار، طیبه؛ قدوسی، پرویز؛ پورخورشیدی، علیرضا؛ "توصیه هایی برای پایایی بتن درسواحل جنوبی کشور (نشریه شماره ۳۹۶)"، مرکزتحقیقات ساختمان ومسکن، تهران، ۱۳۸۳.

[۲] B. Chatveera a,P. Lertwattanaruk," Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash", Journal of Environmental Management, Volume 90, Issue 3, March, Pages 1435-1441, 2009.

[۳] P. Chindaprasirt , P. Kanchanda , A. Sathonsaowaphak , H.T. Cao," Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash", Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 6, June, Pages 1356-1361,2007.

[۴] Graciela Giaccio , Gemma Rodrı´guez de Sensale , Rau´ l Zerbino, "Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash", Cement & Concrete Composites, , PP.566–574, 2007.

[۵] P. Chindaprasirt, S. Rukzon, "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar", Journal of Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 8, August, Pages 1601-1606, 2008.

[۶] M. Sahmaran, T.K. Erdem, I.O. Yaman, "Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting–drying and heating–cooling environments", Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 8, August, Pages 1771-1778, 2007.