

بررسی مقابله با حمله سولفاتی داخلی به بتن

مجید احمدخانیها

کارشناس ارشد مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

کارشناس مؤلف طرح تکنولوژی بتن شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

Email : m_ahmadkhaniha@yahoo.com

چکیده :

در دو دهه اخیر پدیده حمله سولفاتی داخلی به بتن به طور گسترده ای مورد توجه قرار گرفته و در این زمینه مطالعات فراوانی انجام شده است ولی علیرغم تمامی این تلاش ها، تاکنون در استانداردها یا آیین نامه های معتبر بین المللی حدود مجازی برای کنترل آن تعیین نشده است. این پدیده که از آن به تشکیل اترینگایت ثانویه (DEF) نیز نام برده می شود در مناطق گرمسیر و نفت خیز مانند مناطق جنوب و غربی ایران به شدت محتمل است. بنابراین به سبب وجود پتانسیل بالای اقلیمی این مناطق جهت بروز این پدیده و همچنین وقوع طرح ویژه گرمسیری در این ناحیه از کشور (استان کرمانشاه و ایلام) برای مطالعات تکنولوژی بتن این طرح، برنامه ریزی گسترده ای صورت پذیرفت که مقاله حاضر نتیجه این بررسی می باشد.

در این تحقیق پس از شناسایی این پدیده و مکانیسم آسیب به بتن، عوامل مؤثر در بروز این پدیده دمای بالای هوا، مقدار فراوان سولفات در مخلوط بتن، درصد بالای C_3A در سیمان مصرفی، نفوذپذیری بالای بتن و همچنین تماس آب با بتن، معرفی می گردد. به این ترتیب جهت کنترل انبساطهای ناشی از این حمله، راهکارهایی که منجر به نتیجه مطلوب می شوند، ارائه می گردد. این راهکارها عبارتند از کاهش دمای بتن و مقدار سولفات موجود در مخلوط بتن و همچنین جایگزین نمودن بخشی از سیمان در طرح اختلاط با مواد افزودنی معدنی که حاوی مقادیر معینی Al_2O_3 است.

واژه های کلیدی : حمله سولفاتی داخلی بتن، اترینگایت تأخیری، اترینگایت ثانویه، پوزولان، سرباره، خاکستر بادی

۱- مقدمه

همانگونه که انتظار داریم در دماهای معمولی و در حین واکنش هیدراتاسیون سیمان، سولفات موجود در مخلوط بتن با C_3A سیمان و آب باعث ایجاد اترینگایت می‌شوند. این در حالی است که در دماهای بالا (معمولاً بیش از $70^\circ C$) [1] به دلیل ناپایدار بودن اترینگایت ترکیب شیمیایی کم سولفات تری به نام مونوسولفات تشکیل می‌گردد. [2] مابقی سولفات‌ها در فضای میان لایه‌های C-S-H باقی می‌مانند. [3] زمانیکه دما پایین می‌آید به دلیل عدم پایداری مونوسولفات، سولفات‌های باقیمانده با مونوسولفات تشکیل شده، وارد واکنش شده و باعث ایجاد اترینگایت و انبساط‌های مربوط به آن می‌شود. از این پدیده که در دو دهه اخیر به طور گسترده‌ای پیرامون اجرای کارهای بتنی شناسایی شده و مورد توجه قرار گرفته است با عنوان‌هایی مانند "تشکیل تاخیری اترینگایت"، "تشکیل اترینگایت ثانویه" و یا "تشکیل مجدد اترینگایت" نام برده می‌شود که در متون فنی و تخصصی با علامت اختصاری (D.E.F (delayed ettringite formation) شناخته می‌شود.

وقوع این پدیده پیچیده و تاحدودی ناشناخته، در شرایطی تشدید می‌گردد. از جمله این شرایط می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱- دمای بالا (بیش از $70^\circ C$ درجه سانتیگراد)

۲- مقدار زیاد یون سولفات موجود در مخلوط بتن

۳- فراوانی C_3A سیمان

۴- نفوذپذیری بالای بتن

پدیده تشکیل اترینگایت ثانویه (DEF) در مناطق گرمسیر و نفت خیز مانند مناطق جنوب و غربی ایران به شدت محتمل است. زیرا سازندهای زمین شناسی در مناطق با منشأ نفتی دارای سولفات فراوان می‌باشد که این میزان بالای سولفات در مجاورت گرمای شدید مناطق گرمسیر واقع در جنوب و غرب ایران سبب وجود پتانسیل بالای اقلیمی این مناطق جهت بروز پدیده حاضر می‌باشد. بنابراین وقوع طرح ویژه گرمسیری در این ناحیه از کشور (استان کرمانشاه و ایلام) و اهمیت فراوان این طرح در زمینه ساماندهی و مدیریت آبهای مرزی به همراه رعایت الزامات پدافند غیر عامل موجب شد تا به منظور جلوگیری از وقوع این پدیده در مطالعات تکنولوژی بتن طرح گرمسیری، برنامه‌ریزی گسترده‌ای صورت پذیرفت و امکانات آزمایشگاهی مناسب و فراوانی برای بررسی‌های لازم اختصاص داده شود.

به منظور جلوگیری از وقوع پدیده حمله سولفاتی داخلی یا تشکیل اترینگایت تاخیری در مناطقی که پتانسیل ایجاد این انبساط‌ها وجود دارد، لازم است پیش نیازهای این پدیده کنترل گردد. بنابراین هر کدام از عوامل مؤثر بصورت جداگانه بررسی می‌گردد.

یکی از راهکارهای جلوگیری از آسیب‌های وقوع این پدیده، کنترل مقدار یون سولفات موجود در مخلوط بتن می‌باشد. در این راه می‌بایست در ساخت بتن از مصالح سنگی و آب با مقادیر کم سولفات استفاده نمود تا میل به واکنش با مونوسولفات کاهش یابد و در نتیجه مقدار اترینگایت تاخیری کاسته شود. در مناطقی که آب دارای یون سولفات زیادی است می‌بایست از سیستم‌های فرآوری و تصفیه آب استفاده نمود، تا میزان یون سولفات موجود در آب کاسته گردد.

از سوی دیگر با توجه به پراکندگی طبیعی آرایش زونهای سولفات‌دار در یک منبع قرضه، می‌توان بر اساس نتایج آنالیزهای شیمیایی گسترده در مرحله اجرا (برداشت از منبع قرضه) مناطقی که دارای یون سولفات بیشتری است شناسایی شوند.

با توجه به اینکه در دماهای بالا سولفات موجود در مخلوط بتن در ترکیب با C_3A سیمان سبب ایجاد ترکیب مونوسولفات می‌شود بنابراین در جهت مقابله با وقوع این پدیده می‌توان از کاهش مقدار C_3A سیمان استفاده گردد. به این ترتیب مقدار مونوسولفات و پیرو آن مقدار اترینگایت تاخیری کاهش می‌یابد. [4] توصیه می‌گردد برای ساخت بتن مسلح در مناطقی که شرایط

محیطی از لحاظ یون مهاجم کلر خطرناک نمی‌باشد از سیمان پرتلند تیپ ۵ و در شرایطی که حضور یون مهاجم کلر محتمل است از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده گردد.

جهت کنترل و جلوگیری از تجربه دماهای بالای بتن می‌بایست راهکارهای ذیل رعایت گردد:

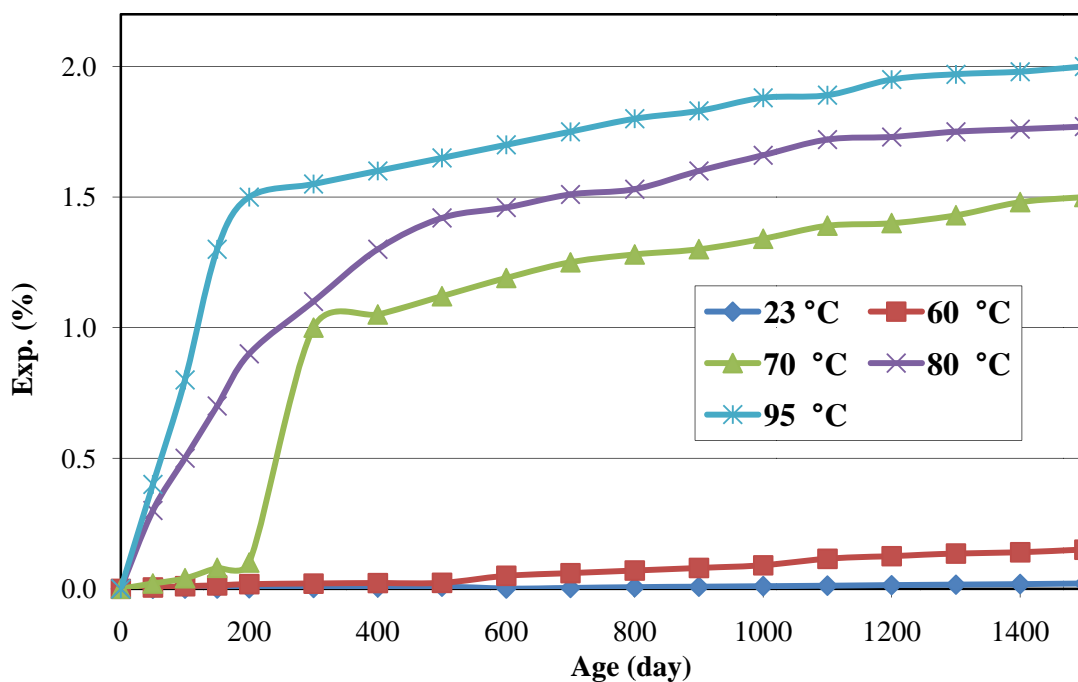
- دمای بتن تازه هنگام بتن‌ریزی زیر ۲۵ درجه سانتیگراد حفظ گردد. با توجه به گرمسیر بودن منطقه در این راه می‌توان با اضافه کردن یخ به جای بخشی از آب در ساخت بتن، کاهش دمای مصالح سنگی و سیمان به هدف رسید.
- از عمل‌آوری تسریع شده یا با بخار برای بتن‌ها (مخصوصاً بتن‌های پیش ساخته) جلوگیری گردد. [5]
- در بتن‌ریزی‌های حجیم، از لایه بندی‌های مناسب براساس نتایج حاصل از آنالیز حرارتی استفاده نمود تا دمای مغزه بتن در هیچ زمانی از ۷۰ درجه سانتیگراد افزایش نیابد.

با کاهش نفوذپذیری بتن، تا حدودی از مجاورت یونهای سولفات با مونوسولفات و تشکیل اترینگایت تاخیری جلوگیری می‌شود. همچنین جذب آب توسط اترینگایت تاخیری با مشکل مواجه می‌گردد. جهت کاهش نفوذپذیری بتن می‌توان از مواد افزودنی معدنی در ساخت بتن و همچنین کاهش نسبت آب به سیمان استفاده نمود. به طور کلی می‌بایست نفوذ آب خارجی به بتن را کاهش داد و همچنین از حرکت آب داخلی در جسم بتن نیز جلوگیری نمود زیرا هرگونه واکنشی در بتن بوسیله حضور آب انجام می‌شود.

۲- بررسی آزمایشگاهی اثر دمای بالا بر وقوع پدیده

دمای بالا در هنگام گیرش و عمل‌آوری بتن از پیش نیازهای مهم وقوع این پدیده قلمداد می‌شود. [1] در این بررسی سعی گردید تا اثر دمای بتن در هنگام گیرش و عمل‌آوری مطالعه شود. برای این کار در آزمایشگاه واقع در کارگاه تعدادی نمونه ملات سیمان ساخته شد. در ساخت نمونه‌های ملات سیمان از قالبهای استاندارد ASTM به ابعاد ۲۵×۲۵×۸۵ میلی‌متر استفاده گردید. طرح اختلاط ملات سیمان شامل سیمان پرتلند تیپ I، نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ و نسبت ماسه استاندارد (۳۰-۲۰ مطابق با ASTM C778) به سیمان ۲/۷۵ بود. بنابراین کنترل دمای مخلوط بتن در جلوگیری از تشکیل ترکیبات مونوسولفات و بالتبع آن انبساطهای ثانویه حاصل از شکل‌گیری اترینگایت تاخیری (ثانویه) بسیار با اهمیت می‌باشد. سپس قالبها آب بند گردید و در محفظه‌ای که قادر به کنترل دما و رطوبت است، قرار گرفت و پس از ۵ ساعت زمان برای نگهداشت ملاتها در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد، دما با نرخ ۲۰ درجه سانتیگراد در ساعت افزایش داده شد تا به دماهای ۶۰ و ۷۰ و ۸۰ و ۹۵ درجه سانتیگراد رسید و در این دما ۱۲ ساعت باقی ماند و سپس دما با نرخ ۲۰ درجه سانتیگراد در ساعت کاهش داده شد تا به دمای ۲۳ درجه سانتیگراد برسد. [6] برای یک نمونه نیز بدون افزایش و کاهش در همان دمای ۲۳ درجه سانتیگراد عمل‌آوری انجام گرفت. در تمام مدت عمل‌آوری نمونه‌ها، رطوبت ۱۰۰٪ تامین گردید. پس از این مرحله نمونه‌های ملات سیمان از قالبها خارج شده و در آب آهک اشباع و در شرایط محیط معمولی نگهداری گردید و در دوره‌های زمانی مشخص انبساطها قرائت گردید که نمودار ذیل نتایج انبساطها را تا ۱۵۰۰ روز به تصویر کشیده است.

مطابق با نتایج بدست آمده که در نمودار ذیل به تصویر کشیده شده است، نمونه‌هایی که در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و بیشتر عمل‌آوری شده است به وضوح دارای انبساطهای چشمگیری می‌باشد. بنابراین جهت جلوگیری از وقوع انبساطهای حاصل از تشکیل اترینگایت ثانویه می‌بایست دمای بتن در هنگام گیرش و عمل‌آوری را کنترل نمود تا همیشه زیر ۷۰ درجه سانتیگراد نگهداری شوند. افزایش روند انبساطها با عمل‌آوری در ۷۰ درجه سانتیگراد به وضوح قابل مشاهده است. از این رو بتن‌ریزی در مناطق گرمسیر دارای اهمیت ویژه‌ای است و لازم است تمهیدات لازم برای کنترل دمای بتن انجام گردد.



نمودار شماره ۱- انبساط نمونه‌های ملات ماسه سیمان در طول زمان برای دماهای مختلف

۳- جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی معدنی

با توجه به اهمیت کنترل انبساط‌های حاصل از تشکیل اترینگایت ثانویه، تاکنون مطالعات گسترده‌ای در این باره انجام شده است. نتایج نشان دهنده آن است که جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی معدنی مناسب، مؤثر خواهد بود. [7] قابل ذکر است تمامی این نتایج به صورت تجربی تایید شده است و تاکنون حد مجازی در آیین نامه ها و استانداردهای معتبر ذکر نشده است.

در جدول ذیل آنالیز شیمیایی چندین مواد افزودنی معدنی که در این بررسی به جای بخشی از سیمان جایگزین شده است، ارائه گشته است. قابل ذکر است در این بررسی از دو نمونه خاکستر بادی کلاس C استفاده شده که به ترتیب C1 و C2 نامگذاری گردیده‌اند :

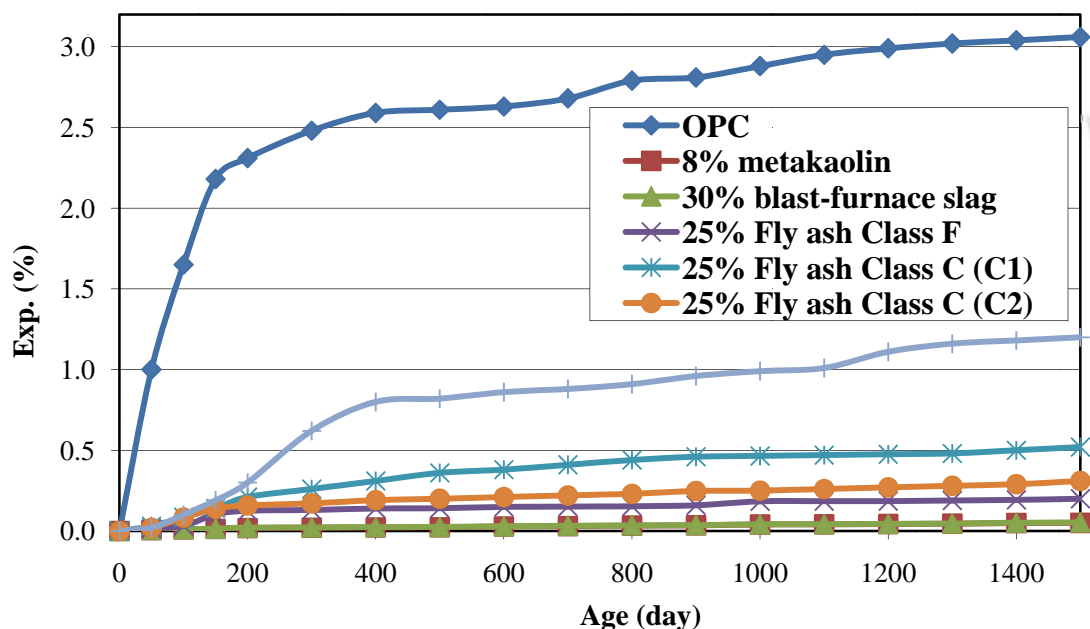
جدول شماره ۱- آنالیز شیمیایی مواد افزودنی معدنی

Compounds	Silica fume	Metakaolin	Blast-furnace slag	Fly ash Class F	Fly ash Class C (C1)	Fly ash Class C (C2)
SiO ₂	95.5	51.5	36.11	65.83	33.72	35.24
Al ₂ O ₃	0.15	45.1	9.43	18.25	17.51	19.49
TiO ₂	0.01	1.71	0.86	1.26	1.47	1.33
P ₂ O ₅	0.15	0.1	0	0.05	1.29	0.56
Fe ₂ O ₃	0.05	0.6	0.46	2.71	6.16	8.59
CaO	0.35	0.06	37.45	7.9	27.37	16.98
SrO	0.01	0.1	0.01	0.14	0.27	0.98

MgO	0.18	0	11.08	1.9	6.23	3.72
Mn ₂ O ₃	0.02	0.03	0.87	0.09	0.04	0.05
Na ₂ O	0.15	0.24	0.41	0.43	2.49	6.71
K ₂ O	0.79	0.18	0.49	0.84	0.35	0.84
LSO ₃	0.29	0	3.56	0.23	1.75	3.76
LOI	2.15	0.54	-1.1*	0.15	0.46	0.77
Total	99.8	100.16	100.73	99.78	99.11	99.02

* به دلیل حضور سولفید در سرباره، این سولفیدها در حین حرارت دادن اکسید شده و برخلاف شرایط عادی، سبب افزایش وزن نمونه می‌شوند.

برای مطالعه اثر مطلوب جانشینی مواد افزودنی معدنی به جای بخشی از سیمان در آزمایشگاه واقع در کارگاه تعدادی نمونه ملات سیمان ساخته شد. در ساخت نمونه‌های ملات سیمان از قالبهای استاندارد ASTM به ابعاد ۲۵×۲۵×۸۵ میلیمتر استفاده گردید. طرح اختلاط ملات سیمان شامل سیمان پرتلند تیپ I، نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ و نسبت ماسه استاندارد (۲۰-۳۰) مطابق با ASTM C778) به سیمان ۲/۷۵ بود. نکته مهم آن است که در ملاتهای شامل دوده سیلیسی و متاکائولین تلاش شد تا روانی ملات با استفاده از کاهنده‌های آب به روانی ملات‌های کنترلی (بدون دوده سیلیسی و متاکائولین) برسد. سپس قالبها آب‌بند گردید و در محفظه‌ای که قادر به کنترل دما و رطوبت قرار گرفت و پس از ۵ ساعت زمان برای نگهداشت ملات‌ها در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد، دما با نرخ ۲۰ درجه سانتیگراد در ساعت افزایش داده شد تا به دمای ۹۵ درجه سانتیگراد رسید و در این دما ۱۲ ساعت باقی ماند و سپس دما با نرخ ۲۰ درجه سانتیگراد در ساعت کاهش داده شد تا به دمای ۲۳ درجه سانتیگراد برسد. در تمام مدت عمل‌آوری با حرارت رطوبت ۱۰۰٪ تامین گردید. پس از این مرحله نمونه‌های ملات سیمان از قالبها خارج شده و در آب آهک اشباع و در شرایط محیط معمولی نگهداری گردید و در دوره‌های زمانی مشخص انبساطها قرائت گردید که نمودار ذیل نتایج انبساطها را تا ۱۵۰۰ روز به تصویر کشیده است.



نمودار شماره ۲- انبساط نمونه‌های ملات ماسه سیمان با مواد افزودنی معدنی در طول زمان

واضح است که استفاده از میکرو سیلیس تنها می تواند شروع انبساطها را به تاخیر بیندازد ولی در جلوگیری از تشکیل انبساطهای حاصل از اترینگایت ثانویه نقش مؤثری را بازی نمی نماید. ولی جانشینی سیمان با سرباره، خاکستر بادی و متاکائولین برای کنترل انبساطها مفید است. نکته قابل توجه آن است که به نظر می رسد مقدار اکسید آلومینیوم، سولفات و قلیایی ها در این مواد افزودنی معدنی نقش تعیین کننده ای در کنترل انبساطها دارد. به طوریکه هرچه نسبت SO_3/Al_2O_3 و یا مقدار سولفات و قلیایی ها در طرح اختلاط بتن افزایش یابد، انبساط نمونه ها نیز افزایش می یابد. [8] بنابراین اگر در مخلوط بتن عاملی مانند MgO وجود داشته باشد که موجب چسبیدن Al_2O_3 شوند باعث می شود که مقدار Al_2O_3 آزاد که قابلیت واکنش پذیری را دارد کاهش می یابد، لذا نسبت SO_3/Al_2O_3 در طرح اختلاط بتن افزایش پیدا می کند که این موضوع نیز باعث افزایش ریسک انبساطها می گردد. [5]

۴- نتیجه گیری

در مناطقی که شرایط برای وقوع حمله سولفاتی داخلی (DEF) فراهم می باشد، برای کنترل انبساطهای ناشی از تشکیل اترینگایت ثانویه در بتن لازم است در ساخت بتن به استفاده از سیمان با C_3A کم و آب با سولفات پایین، پهنه بندی منابع قرضه براساس مقدار سولفات جهت برداشت مصالح، پایین آوردن نفوذپذیری بتن، کنترل دمای بتن به گونه ای که هیچ وقت دمای بیش از ۷۰ درجه سانتیگراد را تجربه نکند و همچنین جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی معدنی مناسب توجه گردد.

با توجه به شرایط اقلیمی ایران تامین خاکستر بادی و متاکائولین دشوار است و برای جلوگیری از خروج ارز، این گزینه ها در طرح گرمسیری از اولویت خارج گردید. از سوی دیگر با توجه به عملکرد ضعیف دوده سیلیسی در کنترل انبساطهای حمله سولفاتی داخلی این گزینه نیز کاربرد مفیدی نداشت. بنابراین با توجه به تولید سرباره آهن گدازی در ایران که دارای کیفیت مطلوب نیز می باشد، این ماده افزودنی معدنی برای جایگزینی بخشی از سیمان به عنوان تنها گزینه بومی مورد توجه قرار گرفت. از آنجا که استفاده از سرباره باعث کند شدن روند مقاومت گیری بتن می شود، در تعیین درصد جایگزینی سرباره به جای سیمان، می بایست الزامات مقاومتی بتن در کنار تامین مقدار کافی اکسید آلومینیوم آزاد و فعال مورد توجه قرار گیرد. براساس بررسی انجام شده لازم است حداقل ۷ درصد اکسید آلومینیوم آزاد در سیمان سرباره ای موجود باشد. ولی به هر ترتیب برای اطمینان از کارایی سیمان سرباره ای لازم است حداقل ۳۰ درصد جایگزینی برای سرباره به جای سیمان رعایت گردد.

۶- مراجع:

- [1] P.W. Brown, J.V. Bothe, The stability of ettringite, Adv. Cem. Res. 3 (18) (1993) 47-63.
- [2] M. Collepari, Damage by delayed ettringite formation, Concr. Int. 21 (1) (1999) 69-74.
- [3] K.L. Scrivener, H.F.W. Taylor, Delayed ettringite formation; a microstructural and microanalytical study, Adv. Cem. Res. 5 (20) (1993) 139-146
- [4] C.D. Lawrence, Mortar expansion due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature, CEM. Concr. Res. 25 (4) (1995) 904-914.

- [5] M.D.A. Thomas, Delayed ettringite formation in concrete: recent developments and future directions, in: J.Skalny (Ed.), Material Science of Concrete, vol. VI, American Ceramic Society, Westerville, OH, 2000, pp. 435-482.
- [6] S.Kelham, The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite formation, Cem. Concr. Compos. 18 (3) (1996) 171-179.
- [7] D. Heinz, U. Ludwig, I. Rudiger, Delayed ettringite formation in heat treated mortars and concretes, Concr. Precast Plant Technol. 11 (1989) 56-61.
- [8] D. Heinz, U. Ludwig, Mechanism of secondary ettringite formation in mortars and concretes subjected to heat treatment, in: J.M. Scanlon (Ed.), Concrete Durability, Katherine and Bryant Mather Int. Conf., ACI SP-100, vol. 2, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 2059-2071.