

تأثیر خاکستر بادی و دوده سیلیسی بر خود ترمیمی بتن با اندازه گیری

مقاومت فشاری و الکتریکی

محمود نیلی^۱، سعید خدابنده لو^۲

^۱دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

^۲دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

nili36@yahoo.co.uk

khodabandehloo.saeid@gmail.com

Code : E

ترک خوردگی بتن اصولاً به دلیل تنوع رفتار فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بین محیط و بتن می باشد که ممکن است در مراحل مختلف عمر یک سازه به وقوع بپیوندد که این امر موجب کاهش مقاومت بتن و تسریع در نفوذ مواد خورنده و سولفاتی می گردد. بسیاری از محققان خود ترمیمی بتن را به هیدراسیون سیمان هیدراته نشده و تشکیل کلسیت نسبت می دهند که به وسیله انبساط و تشکیل ساختار کریستالی موجب بسته شدن ترک ها می گردد. از جمله روش هایی که در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است، می توان به استفاده از کلسیم سولفوآلومینات، افزودنی های منبسط کننده، کریستالی و میکروکپسول ها که دارای مغزه ای از روغن و روکش ژل سیلیکا می باشند اشاره نمود.

در مقاله حاضر مقدار تغییرات مقاومت فشاری و الکتریکی در هشت طرح مخلوط مورد بررسی قرار گرفته که در آن ها از دوده سیلیسی و خاکستر بادی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده که ابتدا با اعمال پیش تنش هایی به مقادیر ۳۵، ۶۰ و ۸۵ درصد مقاومت فشاری نهایی، موجب ایجاد پیش ترک در آزمون ها گردیده است و سپس با غرقاب کردن آن ها در آب حاوی آهک به مدت یک و سه ماه تحت عمل آوری قرار گرفته اند. نتایج حاکی از آن است با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی در طرح های مختلف میزان ترمیم نمونه ها افزایش یافته است در حالی که در طرح های حاوی دوده سیلیسی، میزان ترمیم بسیار کم می باشد.

واژه های کلیدی: خود ترمیمی بتن، دوده سیلیسی، خاکستر بادی، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی

۱- مقدمه

خود ترمیمی بتن (self healing) به معنی ترمیم بتن توسط خودش هنگامی که دچار ترک خوردگی می شود می باشد، که دلایل ترک خوردگی می تواند شامل مواردی از قبیل خشک شدن زود هنگام سطح بتن، بارگذاری و عدم عمل آوری صحیح باشد که اصولاً به دلیل تنوع رفتار فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بین محیط و بتن می باشد که ممکن است در مراحل مختلف عمر یک سازه به وقوع بپیوندد که این امر موجب کاهش مقاومت بتن و تسریع در نفوذ مواد خورنده و سولفاتی می گردد. به همین خاطر تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته، که مقالات موجود نشان دهنده آگاهی و توجه افراد نسبت به این موضوع می باشد که بسیاری از محققان خود ترمیمی بتن را به هیدراسیون سیمان هیدراته نشده و تشکیل کلسیت نسبت می دهند که به وسیله انبساط و تشکیل ساختار کریستالی موجب بسته شدن ترک ها می گردد. [2,1]

استفاده از کلسیم سولفوآلومینات (اترینگایت - Calcium Sulfoaluminate(CSA))، افزودنی های منبسط کننده و کریستالی (Crystalline additives(CA)) هم موجب بسته شدن سطحی ترک ها می گردد. [۱]

هانس ولف و همکارش اثر عمل آوری (curing) و نفوذپذیری را در دماهای ۲۰، ۵۰ و ۸۰ و دماهای بیشتر و تاثیر آن بر سرعت خود ترمیمی را مورد بررسی قرار داد که در دماهای بالاتر این عمل با سرعت بیشتری صورت می گیرد. [3]

علی عبدالهاکام و ژنگسیانگ و همکارانشان به بررسی روش های مختلف خودترمیمی بتن باز یافتی به وسیله غرقاب کردن نمونه ها به مدت ۳۰ روز که خصوصاً برای مقادیر کمتر سیمان تاثیر گذار تر بوده و مقاومت فشاری را ۳۰٪ بهبود بخشیده است پرداختند. افزودن دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان هم موجب کاهش حفرات می گردد. [5,4]

روش دیگر استفاده از باکتری هایی مانند باکتری های تشکیل دهنده $CaCO_3$ می باشد که با ساختار بتن سازگار است. در این روش مواد ترمیمی را از بیرون به داخل ترک نفوذ می دهند که لازم به ذکر است این روش برای ترکهای بزرگ مناسب است و برای ترک های کوچک و عمیق دشوار می باشد. [۷,۶]

یکی از جدید ترین روش ها که امروزه مورد استقبال قرار گرفته و بسیار کارآمد و مفید می باشد استفاده از میکروکپسول ها (کپسول های هوشمند) است که عموماً از مواد ترمیمی تشکیل شده که می توان به یکی از انواع آن که دارای مغزه ای از روغن و روکش ژل سیلیکا تشکیل شده است اشاره نمود که هنگامی که در بتن ترک ایجاد می گردد به صورت خودکار فعال شده و وارد واکنش شیمیایی می گردند که این امر موجب بسته شدن ترک ها می گردد. [۸,۵]

با توجه به موارد ذکر شده در فوق و مطالب مورد بررسی در مقالات، می توان پی برد که توجه بسیار کمی در بحث خود ترمیمی بتن پس از اعمال پیش ترک ها، از طریق غرقاب کردن در آب حاوی آهک، عمل آوری مناسب و بررسی میزان تغییرات و تاثیر آن ها بر ترمیم بتن از طریق اندازه گیری مقاومت فشاری و خصوصاً الکتریکی شده است، بنابراین در اینجا سعی بر این بوده است، که موارد ذکر شده مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

۲- مصالح ، وسایل مورد استفاده و طرح اختلاط

در این پروژه ۸ طرح شامل دو سری، مورد بررسی قرار گرفته که در طرح های سری اول تاثیر جایگزینی خاکستر بادی و دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان به صورت مجزا و همزمان بر مقاومت الکتریکی و فشاری مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به اینکه دوده سیلیسی تاثیر چندانی نداشته در طرح های سری دوم منحصراً تاثیر درصد های مختلف خاکستر بادی مورد تمرکز و بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که طرح های $S1_0$ و $S2_0$ فاقد مواد افزودنی می باشند ولی در طرح $S1_{15FA}$ به میزان ۱۵٪ وزنی سیمان خاکستر بادی و در طرح $S1_{8SF}$ ، ۸٪ وزنی سیمان، دوده سیلیسی و در طرح $S1_{15FA8SF}$ به صورت همزمان ۱۵٪ و ۸٪

وزنی سیمان به ترتیب از خاکستر بادی و دوده سیلیسی استفاده گردیده است. در طرح های اختلاط S2_{15FA} و S2_{25FA} و S2_{35FA} به ترتیب ۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ وزنی سیمان خاکستر بادی مورد استفاده قرار گرفته است.

طرح اختلاط و نتایج اسلامپ در جدول شماره 2 ارائه گردیده است. نوع سیمان مصرفی، پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ کارخانه سیمان هگمتان می باشد. ماسه عبدی با مدول نرمی برابر ۳٫۶۱ و چگالی ظاهری برابر ۲٫۶۵ و جذب آب ۳٫۵۲٪ استفاده گردیده است. شن متوساک با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و چگالی ظاهری ۲٫۵ و جذب آب ۱٫۸۳٪ مورد استفاده قرار گرفته است.

در طرح های اختلاط از فوق روان کننده گلیوم 110p بر پایه پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱٫۰۸ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شده است.

درصد آب به مواد سیمانی در همه طرح ها ثابت و برابر ۰٫۴۵ و میزان کل مواد سیمانی (عیار سیمان) برابر 385 کیلوگرم برای هر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان، خاکستر بادی و دوده سیلیسی در جدول شماره 1 ارائه شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان، خاکستر بادی، دوده سیلیسی

پارامترها	سیمان پرتلند ۱-۴۲۵	خاکستر بادی	دوده سیلیسی
SiO ₂	21.16	61.2	89.83
Al ₂ O ₃	4.82		1.31
Fe ₂ O ₃	3.9		1.12
CaO	63.52	12.2	
MgO	1.52		
K ₂ O	0.59	1.1	
Na ₂ O	0.4	0.82	
SO ₃	2.51	2.5	
LOI	1.32	2.49	1.59
C ₃ S	52.66		
C ₂ S	20.96		
C ₃ A	6.17		
C ₄ AF	11.87		
P ₂ O ₅			0.04
ریزی m ² /kg	۲۹۵		۲۰۷۰۰

جدول ۲- طرح های اختلاط بتن

طرح های سری دوم				طرح های سری اول				طرح اختلاط
S2 _{35FA}	S2 _{25FA}	S2 _{15FA}	S2 ₀	S1 _{15FA8SF}	S1 _{8SF}	S1 _{15FA}	S1 ₀	
۲۵۰,۲۵	۲۸۸,۷۵	۳۲۷,۲۵	۳۸۵	۲۹۶,۴۵	۳۵۴,۲	۳۲۷,۲۵	۳۸۵	سیمان پرتلند نوع ۱ kg/m ³
۱۳۴,۷۵	۹۶,۲۵	۵۷,۷۵	-	۵۷,۷۵	-	۵۷,۷۵	-	خاکستر بادی kg/m ³
-	-	-	-	۳۰,۸	۳۰,۸	-	-	دوده سیلیسی kg/m ³
۳۸۵	۳۸۵	۳۸۵	۳۸۵	۳۸۵	۳۸۵	۳۸۵	۳۸۵	مجموع مواد سیمانی kg/m ³
۰,۴۵	۰,۴۵	۰,۴۵	۰,۴۵	۰,۴۵	۰,۴۵	۰,۴۵	۰,۴۵	نسبت آب به مواد سیمانی
۱۷۳,۲۵	۱۷۳,۲۵	۱۷۳,۲۵	۱۷۳,۲۵	۱۷۳,۲۵	۱۷۳,۲۵	۱۷۳,۲۵	۱۷۳,۲۵	آب kg/m ³
۷۶۸,۱۱	۷۶۸,۱۱	۷۶۸,۱۱	۷۶۸,۱۱	۷۶۸,۱۱	۷۶۸,۱۱	۷۶۸,۱۱	۷۶۸,۱۱	شن (۴۳٪) kg/m ³
۱۰۱۸,۱۹	۱۰۱۸,۱۹	۱۰۱۸,۱۹	۱۰۱۸,۱۹	۱۰۱۸,۱۹	۱۰۱۸,۱۹	۱۰۱۸,۱۹	۱۰۱۸,۱۹	ماسه (۵۷٪) kg/m ³
۰,۳۰۸	۰,۵۷۷	۰,۵۷۷	۰,۵۷۷	۰,۵۷۷	۰,۵۷۷	۰,۵۷۷	۰,۵۷۷	فوق روان کننده kg/m ³
۵۲۰	۴۷۰	۱۳۰	۱۰۰	۷۰	۱۱۰	۱۹۰	۱۳۰	اسلامپ (جریان) اسلامپ (mm)

۳- طراحی آزمایش و نحوه اختلاط

جهت تهیه بتن همگن ترتیب اختلاط به شرح ذیل صورت گرفته است:

ابتدا ماسه و مواد سیمانی به مدت ۱ دقیقه مخلوط گردیدند. سپس آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه اختلاط ادامه یافته و پس از ۲ دقیقه با اضافه کردن مصالح سنگی درشت دانه عمل اختلاط به مدت ۳ دقیقه دیگر نیز ادامه یافته (لازم به ذکر است در طرح های شامل دوده سیلیسی، از قبل آن را با آب مخلوط نموده و ژل میکرو سیلیسی با مخلوط ترکیب گردیده است)، پس از پایان اختلاط، اسلامپ بتن و در بعضی طرح ها میزان پهن شدگی بتن (slump flow) اندازه گیری گردیده و در نهایت در طرح های سری اول برای هر یک از درصد شکست ها، ۳ نمونه و در طرح های سری دوم برای هر یک از درصد شکست ها، ۵ نمونه قالب گیری گردید که نتایج مقاومت الکتریکی و فشاری در هر یک از حالات برای دقت بیشتر به صورت میانگین مقادیر حاصل شده بیان گردیده است.

• طرح های سری اول :

پس از مراحل ساخت و آماده سازی نمونه ها، از هریک از طرح ها ۱۲ آزمون مکعبی تهیه گردید. آن ها را در حوضچه آب قرار داده و به آن، آهک اضافه شد.

پس از گذشت ۲۱ روز ابتدا مقاومت الکتریکی نمونه ها را اندازه گرفته و سپس نمونه ها در چهار گروه سه تایی دسته بندی گردیدند، که گروه اول را تحت شکست ۱۰۰٪ قرار داده و با توجه به مقاومت آن، سایر گروه ها تحت شکست ۸۵٪، ۶۰٪ و ۳۵٪ به منظور ایجاد ریز ترک در نمونه ها، قرار گرفتند. پس از اعمال شکست های فوق مجدداً مقاومت الکتریکی نمونه ها را اندازه گرفته سپس برای بار دیگر آن ها در حوضچه آب قرار داده شدند. پس از گذشت ۱ ماه دیگر (سن ۵۱ روزه نمونه ها) مقاومت الکتریکی و فشاری نمونه ها اندازه گیری گردید.

• طرح های سری دوم :

در این مرحله هم روند کار همانند ساخت های مرحله اول می باشد، با این تفاوت که در هریک از طرح ها ۱۵ نمونه مکعبی تهیه گردید و این بار پس از اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه ها در سن ۲۱ روزه، برای اندازه گیری مقاومت فشاری، آن ها را به سه دسته ۱۰۰٪، ۸۵٪ و ۳۰٪ شکست، که برای هر کدام از حالات در هر طرح ۵ نمونه اختصاص داده شد، تقسیم بندی گردیدند. پس از گذشت ۱ ماه دیگر (سن ۵۱ روزه نمونه ها) مقاومت الکتریکی و فشاری ۳ نمونه از ۵ نمونه هر حالت، اندازه گیری گردید و نمونه های باقیمانده پس از گذشت ۳ ماه (سن ۱۱۱ روزه نمونه ها) تحت آزمایش مقاومت الکتریکی و فشاری قرار گرفتند که اعداد و نمودار ها و نتایج مقایسه ای آن ها در فصل نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

۴- نتایج و بحث

۱.۴.۱. اسلامپ

نتایج حاکی از آن است برای نسبت آب به مصالح پودری و فوق روان کننده ثابت، با افزایش جایگزینی خاکستر بادی به مقدار ۰، ۱۵، ۲۵ تا ۳۵ درصد، مقدار اسلامپ و یا میزان پهن شدگی آن افزایش می یابد که دلیل این افزایش، واکنش پذیری کمتر خاکستر بادی نسبت به سیمان است که حجم قید شیمیایی و آب جذب شده کاهش می یابد و موجب آب آزاد بیشتر و سطح بیشتر روانی می گردد. [9]

ذرات کروی خاکستر بادی هم به دلیل اثر Ball Bearing Effect موجب افزایش کارایی و اصلاح تجمع سیمان و در نتیجه کاهش نیاز به آب می شود. [10,11] چون در این طرح ها میزان آب و فوق روان کننده ثابت نگه داشته شد، پس پهن شدگی طرح های حاوی خاکستر بادی به طور مستقیم افزایش پیدا کرده است.

اثر جایگزینی ۸٪ دوده سیلیسی موجب کاهش مقدار اسلامپ گردید.

۲.۴. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری طرح های مختلف همانطور که انتظار می رفت، در اولین مرحله شکست خود یعنی سن ۲۱ روزه با افزایش جایگزینی خاکستر بادی به جای سیمان، کاهش یافت و با جایگزین کردن ۸٪ دوده سیلیسی افزایش یافت. اما باید توجه داشت، هنگامی که بعد از یک ماه عمل آوری در حوضچه آب (سن ۵۱ روزه نمونه ها) مجدداً تحت آزمایش قرار گرفتند، رشد درصد افزایش مقاومت فشاری طرح های شامل خاکستر بادی با افزایش درصد جایگزینی آن با سیمان، همسو بوده به میزان قابل توجهی افزایش یافت و بر خلاف آن در طرح هایی که از دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده بود افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری نمونه ها، مشاهده نگردید.

لذا همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می گردد، کلیه طرح ها پس از یک ماه عمل آوری نمونه ها در آب، دارای درصدی رشد مقاومت فشاری می باشند، ولی طرح S15FA بیشترین میزان افزایش درصد مقاومت فشاری را نسبت به سایر طرح ها داشته و پس از آن طرح S10 بیشترین میزان افزایش را داراست.

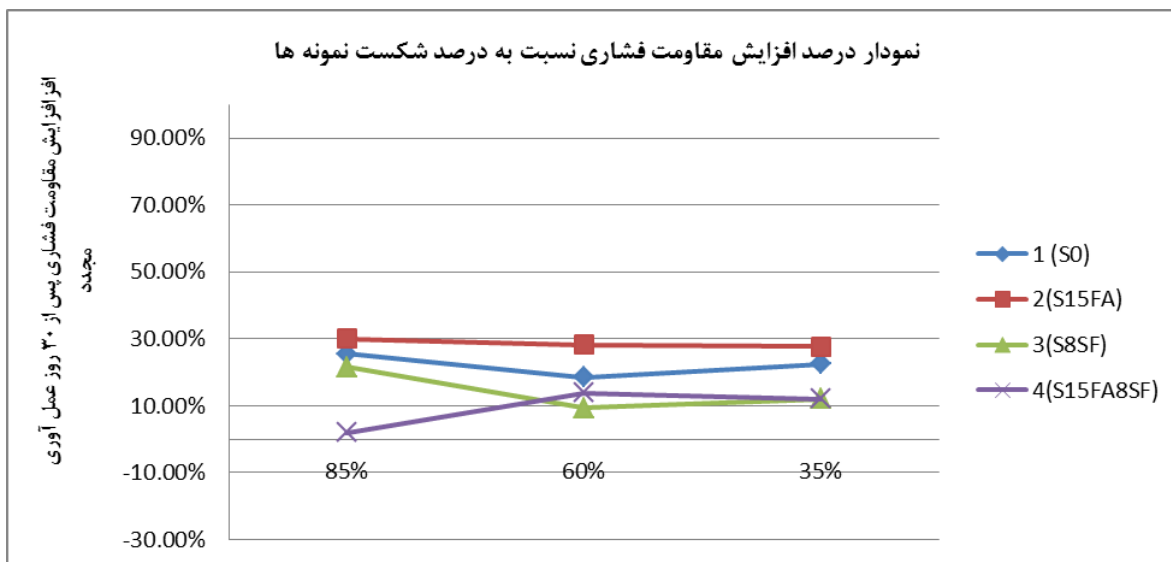
جدول ۳ نمایش دهنده نتایج مقاومت فشاری نمونه ها و شکل ۱ مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه ها پس از یک ماه عمل آوری برای طرح های سری اول می باشد.

لازم به توضیح است که در جدول ۳ منظور از MPA₂₁ و MPA_{1MONTH} مقاومت فشاری نمونه ها به ترتیب پس از ۲۱ روز و یک ماه عمل آوری می باشد.

با توجه به نتایج جداول و نمودار ارائه شده در ذیل، مشخص است که با افزایش جایگزینی خاکستر بادی به جای سیمان، به درصد افزایش مقاومت فشاری قابل ملاحظه ای نسبت به سایر طرح ها دست یافته ایم. بنابراین در طرح های سری دوم استفاده از مقادیر مختلف ۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد خاکستر بادی به عنوان جایگزین سیمان مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول ۳- مقاومت فشاری نمونه های طرح های سری اول

MPA _{1MONTH}	MPA ₂₁	طرح	
-	30.93	1 (S ₀)	A (۱۰۰٪ شکست)
-	28.71	2 (S _{15FA})	
-	37.02	3 (S _{8SF})	
-	42.15	4 (S _{15FA8SF})	
38.84	26.2	1 (S ₀)	B (۸۵٪ شکست)
37.34	24.4	2 (S _{15FA})	
45	31.45	3 (S _{8SF})	
42.96	38.68	4 (S _{15FA8SF})	
36.67	18.54	1 (S ₀)	C (60٪ شکست)
36.80	17.2	2 (S _{15FA})	
40.5	22.2	3 (S _{8SF})	
48.02	27.3	4 (S _{15FA8SF})	
37.88	10.8	1 (S ₀)	D (35٪ شکست)
36.63	10	2 (S _{15FA})	
41.46	12.95	3 (S _{8SF})	
47.22	15.92	4 (S _{15FA8SF})	



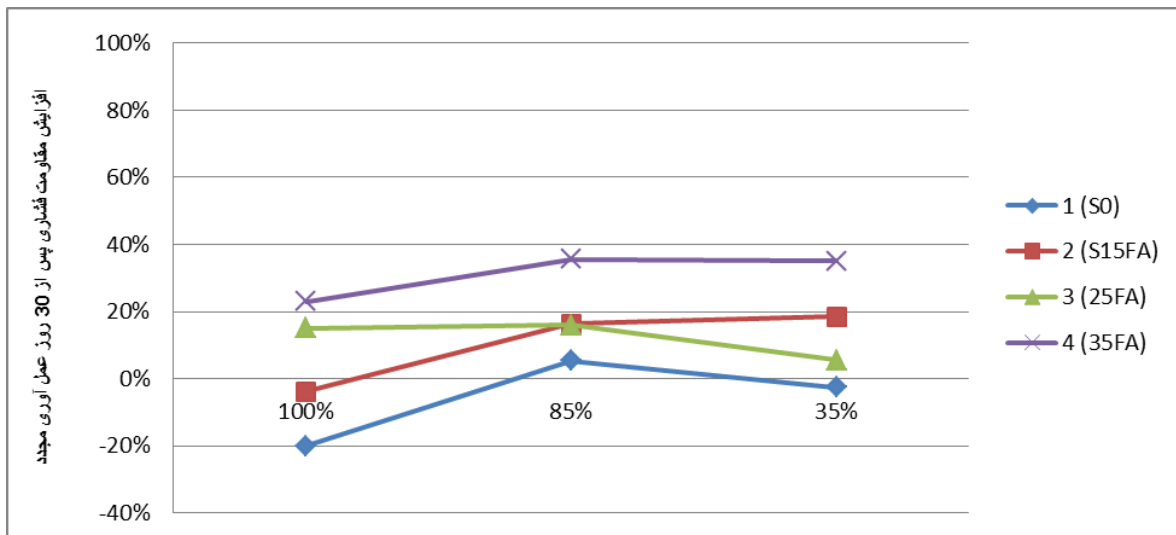
شکل ۱- نمودار درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به درصد شکست نمونه های سری اول

همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش جایگزینی خاکستر بادی به جای سیمان، درصد رشد مقاومت فشاری نمونه ها افزایش قابل ملاحظه ای نسبت به سایر طرح ها خواهد یافت.

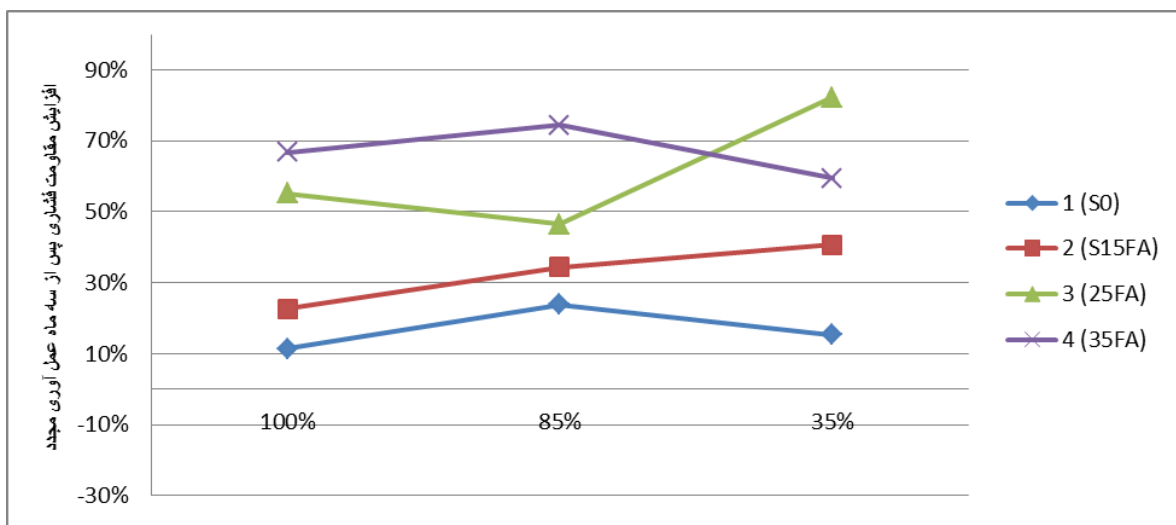
جدول ۴ نمایش دهنده نتایج مقاومت فشاری نمونه ها و شکل های ۲ و ۳ مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه ها پس از یک و سه ماه عمل آوری برای طرح های سری دوم می باشد.

جدول ۴- مقاومت فشاری نمونه های طرح های سری دوم

MPA _{3MONTH}	MPA _{1MONTH}	MPA ₂₁	طرح	
45.1	32.31	40.5	5 (S ₀)	A (100٪ شکست)
46.18	36.22	37.65	6 (S _{15FA})	
34.34	25.46	22.12	7 (S _{8SF})	
28.34	20.92	17	8 (S _{15FA8SF})	
50.16	42.68	34.42	5 (S ₀)	B (85٪ شکست)
50.61	43.79	32	6 (S _{15FA})	
32.4	25.67	18.8	7 (S _{8SF})	
29.67	23.06	14.45	8 (S _{15FA8SF})	D (35٪ شکست)
46.74	39.44	14.17	5 (S ₀)	
53	44.6	13.18	6 (S _{15FA})	
40.32	27.74	7.74	7 (S _{8SF})	
27.1	22.93	5.95	8 (S _{15FA8SF})	



شکل ۲- نمودار درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به درصد شکست نمونه ها طرح های سری دوم پس از یک ماه عمل آوری



شکل ۳- نمودار درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به درصد شکست نمونه های طرح های سری دوم پس از سه ماه عمل آوری

همانطور که از شکل های ۲ و ۳ پیداست، درصد رشد مقاومت فشاری همه طرح ها پس از سه ماه عمل آوری نسبت به یک ماه، دارای رشد مناسبی بوده که علت افزایش مقاومت فشاری آن، به دلیل ایجاد ژل C-S-H در اثر واکنش های پوزولانی و هیدراسیون است. $(\text{Fly ash} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{C-S-H})$. [12]

ضمناً باید توجه داشت وجود آهک در حوضچه آب نیز تاثیر مناسبی بر بسته شدن ترک های سطحی نیز دارد.

استفاده از خاکستر بادی هم موجب کاهش گرمایی و در نتیجه کاهش سرعت هیدراسیون می گردد. همچنین موجب دیر کندگی نسبی می شود که احتمالاً به دلیل آزاد کردن یون SO_4^{2-} از سطح ذرات خاکستر بادی می باشد. [13]

خاکستر بادی فعالیت خود را تا بعد از ۲۸ روز ادامه می دهد که موجب افزایش مقاومت فشاری طولانی مدت ، نفوذ پذیری و مقاومت در برابر پخش کلرید می شود. [14]

۳.۴. مقاومت الکتریکی

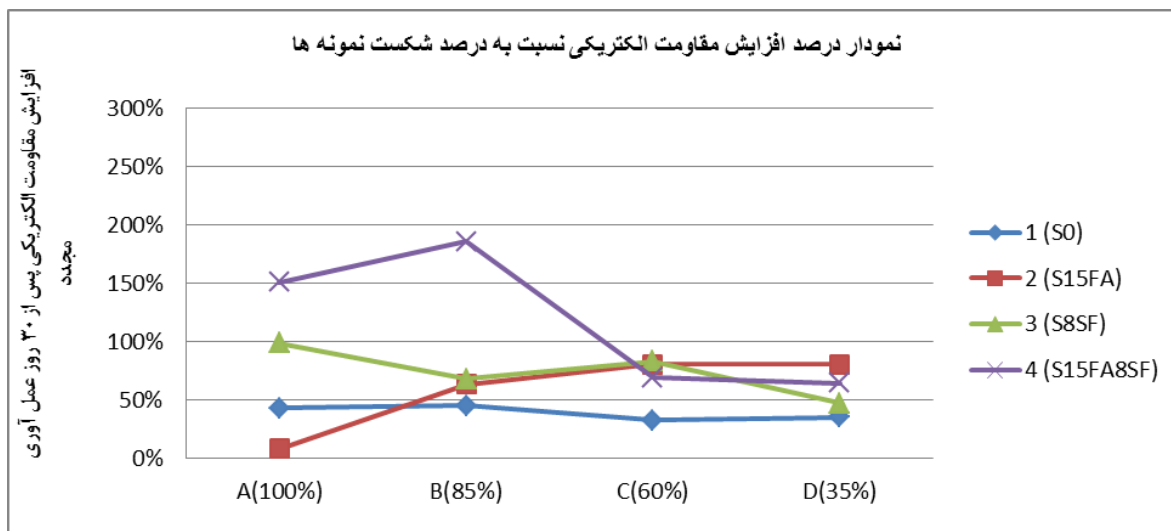
همانطور که در فصل گذشته اشاره گردید مقاومت الکتریکی نمونه ها در سن ۲۱ روزه قبل و بعد از شکست اندازه گیری شده است و در طرح های سری اول پس از یک ماه و در طرح های سری دوم پس از یک و سه ماه مجددا مقاومت الکتریکی اندازه گیری گردیده است.

نتایج حاصل شده در این قسمت نیز منطبق بر نتایج مقاومت فشاری نمونه ها می باشد و با افزایش استفاده از خاکستر بادی به عنوان جایگزین سیمان، مقاومت الکتریکی نیز پس از آزمایش یک و سه ماهه افزایش می یابد.

جدول ۵ نمایش دهنده نتایج مقاومت الکتریکی نمونه ها و شکل ۴ مقایسه درصد افزایش مقاومت الکتریکی نمونه ها پس از یک ماه عمل آوری برای طرح های سری اول می باشد.

جدول ۵- مقاومت الکتریکی نمونه های طرح های سری اول

ER 1MONTH	ER 21-2	ER 21-1	طرح	
549	383.67	440	1 (S ₀)	A (۱۰۰٪شکست)
723.33	348	520.67	2 (S _{15FA})	
1700	856	1200	3 (S _{8SF})	
2066.67	823	1466.67	4 (S _{15FA8SF})	
627	432.33	453.33	1 (S ₀)	B (۸۵٪شکست)
799	489.67	559.67	2 (S _{15FA})	
1766.67	1050	1233.33	3 (S _{8SF})	
2100	734	1466.67	4 (S _{15FA8SF})	
597.67	451	463.67	1 (S ₀)	C (60٪شکست)
939.67	521.33	541.33	2 (S _{15FA})	
1866.67	1020.67	1333.33	3 (S _{8SF})	
2200	1300	1466.67	4 (S _{15FA8SF})	
629.67	466	483	1 (S ₀)	D (35٪شکست)
940.67	521.33	545.67	2 (S _{15FA})	
1866.67	1266.67	1333.33	3 (S _{8SF})	
2300	1400	1533.33	4 (S _{15FA8SF})	



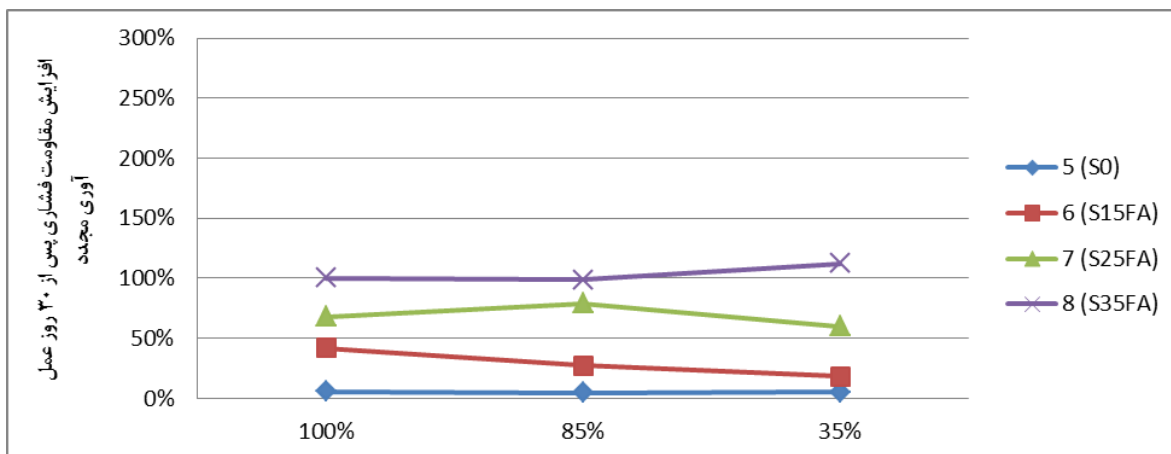
شکل ۴- نمودار درصد افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به درصد شکست نمونه ها سری اول

با توجه به جدول ۵ و شکل ۴ مشخص است مقاومت الکتریکی پس از اعمال شکست بر نمونه ها نسبت به وضعیت قبل از شکست نمونه ها، در همان سن (مثلا ۲۱ روزه) کاهش یافته ولی پس از یک ماه عمل آوری افزایش چشمگیری داشته که حتی نسبت به حالت قبل از شکست آن در سن ۲۱ روزه نیز بیشتر است.

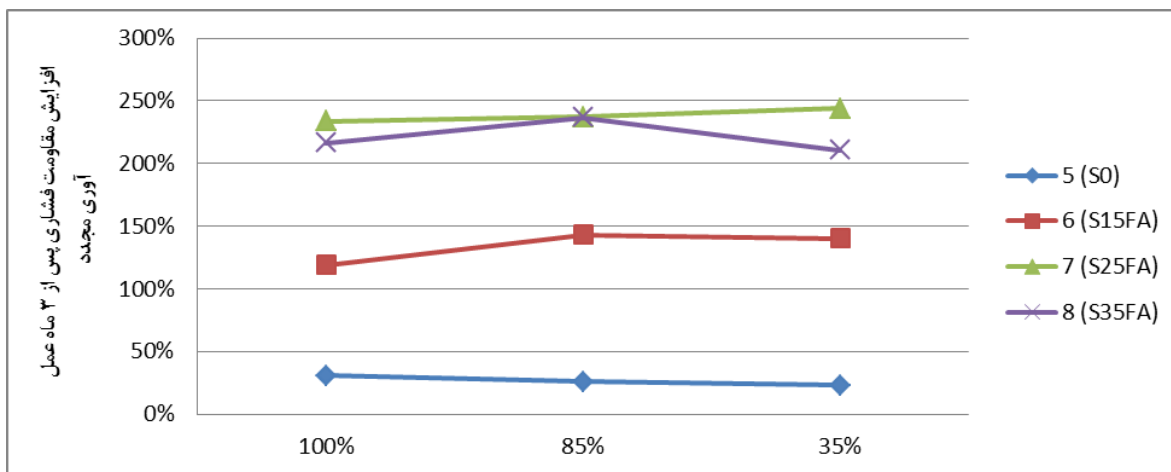
در این قسمت نیز همانند آزمایشات مقاومت فشاری استفاده از درصد های ۰،۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد خاکستر بادی به عنوان جایگزین سیمان مورد بررسی قرار گرفته که جدول ۶ نمایش دهنده نتایج مقاومت الکتریکی نمونه ها و شکل های ۵ و ۶ مقایسه درصد افزایش مقاومت الکتریکی نمونه ها پس از یک و سه ماه عمل آوری برای طرح های سری دوم می باشد.

جدول ۶- مقاومت الکتریکی نمونه های طرح های سری دوم

ER 3 MONTHS	ER 1 MONTH	ER 21-2	ER 21-1	طرح	
542	437	414.2	477	5 (S ₀)	A (100%/شکست)
906	501.33	354	413.4	6 (S _{15FA})	
1000	501.66	299	387	7 (S _{8SF})	
1250	656	327.2	394.8	8 (S _{15FA8SF})	
600.5	499.3	476.8	497.8	5 (S ₀)	B (85%/شکست)
1050	550.6	431.8	415.2	6 (S _{15FA})	
1100	583.66	326.2	407	7 (S _{8SF})	
1250	738.33	371.4	379.2	8 (S _{15FA8SF})	D (35%/شکست)
642	523	496.4	503.6	5 (S ₀)	
1100	542.6	458.4	404	6 (S _{15FA})	
1300	605	378.2	370.4	7 (S _{8SF})	
1200	821.33	386.4	398.4	8 (S _{15FA8SF})	



شکل ۵- نمودار درصد افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به درصد شکست نمونه ها سری دوم پس از یک ماه عمل آوری



شکل ۶- نمودار درصد افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به درصد شکست نمونه ها سری دوم پس از سه ماه عمل آوری

۵- بحث و بررسی نتایج

نتیجه گیری

برای مقادیر ثابت نسبت آب به مواد سیمانی و فوق روان کننده، با افزایش جایگزینی خاکستر بادی به جای سیمان اسلامپ و یا میزان پهن شدگی آن، افزایش یافت.

با جایگزینی دوده سیلیسی به میزان ۸٪ وزنی سیمان، اسلامپ و یا میزان پهن شدگی آن کاهش یافت.

مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۲۱ روزه، با افزایش جایگزینی خاکستر بادی به مقدار ۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد به جای سیمان، کاهش یافت ولی بر خلاف آن بعد از عمل آوری به مدت ۱ یا ۳ ماه با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی به جای سیمان، درصد رشد مقاومت فشاری افزایش چشمگیری یافت.

مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۲۱ روزه، با جایگزین کردن دوده سیلیسی به جای سیمان به مقدار ۸٪ نسبت به طرح شاهد دارای مقاومت بالاتری بود ولی رشد مقاومتی آن پس از یک ماه نسبت به سایر طرح ها بسیار کم بود.

مقاومت الکتریکی نمونه ها بر خلاف مقاومت فشاری در سن ۲۱ روزه، با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی به میزان ۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد به جای سیمان، افزایش یافت و پس از عمل آوری طی مدت ۱ و ۳ ماه همانند مقاومت فشاری دارای رشد مقاومتی قابل توجهی بود.

مقاومت الکتریکی نمونه ها با جایگزین کردن دوده سیلیسی به جای سیمان، همانند مقاومت فشاری در ابتدای طرح و سن ۲۱ روزه دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به طرح شاهد بود ولی رشد آن طی عمل آوری به مدت یک ماه تفاوت زیادی با طرح شاهد نداشته و فقط به مقدار کمی از آن بیشتر بود.

اندازه گیری مقاومت الکتریکی روش مناسبی جهت ارزیابی خود ترمیمی بتن می باشد.

۶- مراجع

1. K. Sisomphon, O. Copuroglu, E.A.B. Koenders, Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive, *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 566–574.
2. M. Şahmaran, G. Yıldırım, K. Ahmed, H. E. Yücel, E. Özbay, Effects of Different Environmental Exposures on Self-Healing Capacity of Cementitious Composites, 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, 17-19 October 2012.
3. Hans-Wolf Reinhardt, Martin Jooss, Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 981–985.
4. Ali Abd Elhakam, Abd Elmoaty Mohamed, Eslam Awad, Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete, *Construction and Building Materials* 35 (2012) 421–427.
5. Zhengxian Yang, John Hollar, Xiaodong He, Xianming Shi, A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules, *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 506–512.
6. Virginie Wiktor, Henk M. Jonkers, Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 763–770.
7. Jianyun Wang, Kim Van Tittelboom, Nele De Belie, Willy Verstraete, Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 532–540.
8. Kim Van Tittelboom, Nele De Belie, Denis Van Loo, Patric Jacobs, Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent, *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 497–505.
9. P. C. Aytcin, Ed., *Condensed Silica Fume*, Faculte de Sciences Appliquees, Universite de sherbrooke, 1983.
10. D. M. Roy, Hydration of Blended Cements Containing Slag, Fly Ash, or Silica Fume, Proc. of Meeting Institute of Concrete Technology, Coventry, UK, May 1987.
11. Cur Report, Fly Ash as Addition to Concrete, Centre for Civil Engineering Research and Codes, Report 144, 1991.
12. Mustafa S_ahmaran, Suleyman B. Keskin, Gozde Ozerkan, Ismail O. Yaman, Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash, *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 872–879.
13. Adam M. Neville, *Properties of Concrete*, Pearson Education Limited, Burnt Mill, England, 1995.
14. Pipat Termkhajornkit, Toyoharu Nawa, Yoichi Yamashiro, Toshiki Saito, Self-healing ability of fly ash-cement systems, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009) 195–203.

An experimental study on Self healing of cracked concrete made by fly ash and silica fume

Mahmoud Nili¹, Saeid Khodabandehlou²

¹Associate Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University

²Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University

Concrete is susceptible to cracking due to the environmental action, shrinkage and particularly loading. These normally reduce the service life of concrete structures. Self healing is considered as a valuable phenomenon which restricts crack propagation and improves mechanical properties of concrete. A lot of researchers attribute self-healing of concrete to the hydration of unhydrated cement and forming of calcite which seals the cracks by the expansion and forming crystalline structure. Utilization of Calcium Sulfoaluminate (CSA), expansive additives, crystalline additives (CA) and microcapsules with oil core and silica gel shell were also considered as the other methods for healing of concrete.

This paper investigates the self healing of specimens which were pre-loaded up to 35%, 60% and 85% of the ultimate strength at 21 days. Eight mixtures were prepared with water binder ratio of 0.45. Fly ash was used at 15%, 25% and 35% by weight of cement and silica fume was also used at 8% by weight of cement in predetermined mixtures. After pre-loading, the cracked concrete specimens were cured in water saturated by lime for one and three months; the specimens were then tested for compressive strength and electrical resistivity. It was observed that the cracked fly ash specimens were healed more than the other specimens. The healing was increased by increasing of fly ash replacement. However, silica fume had a slight effect on healing process.

The results showed that the electrical resistance measurement was a comparable testing method for strength evaluation of the cracked specimens which were healed.