

ارزیابی تاثیر خاکستر بادی بر هدایت الکتریکی، مقاومت ویژه الکتریکی و شاخص نفوذ یون

کلرید در بتن (RCPT)

محسن تدین^۱، مصطفی خانزادی^۲، محمد سعید ملکی^۳، سجاد ذهبی^۳، محمد جواد ملکی^۴

۱- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- کارشناس ارشد عمران- مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- کارشناس ارشد عمران، سرپرست اداره بحران، بهداشت، ایمنی و محیط زیست شرکت آبفای استان همدان

E-Mail: S_maleki@civileng.iust.ac.ir

چکیده

با افزایش میزان ساخت سازه های بتنی در کشورهای در حال توسعه اهمیت موضوع دوام بتن نسبت به گذشته بیشتر شده است. کاهش هزینه های مربوط به تعمیر و بازسازی سازه های بتنی و توجه به مباحث توسعه پایدار، لزوم توجه هرچه بیشتر به پارامتر های دوام بتن را مشخص می کند. خوردگی آرماتور از اصلی ترین دلایل کاهش دوام بتن است که معمولاً توسط نفوذ عوامل مهاجم از طریق منافذ به داخل بتن اتفاق می افتد. افزایش دوام بتن به ویژه در محیط های خورنده می تواند نقش عمده ای در توسعه پایدار داشته باشد. همچنین در جهت توسعه پایدار و حفظ محیط زیست و منابع طبیعی تجدید ناپذیر نیاز به کاهش تولید و مصرف کلینکر یا سیمان است. یکی از راه های کاهش مصرف سیمان، استفاده از مواد مکمل سیمانی و پوزولان ها است. در این تحقیق با ساخت طرح های حاوی خاکستر بادی و طرح های شاهد، تاثیر خاکستر بادی بر برخی پارامتر های دوام بتن از جمله مقاومت الکتریکی، هدایت الکتریکی، شاخص نفوذ یون کلرید، مقاومت فشاری و جذب آب بررسی خواهد شد. مشاهده گردید که استفاده از خاکستر بادی موجب بهبود پارامتر های دوام بتن از جمله مقاومت ویژه الکتریکی، هدایت الکتریکی و شاخص نفوذ یون کلرید در بتن میگردد و بر میزان جذب آب بتن در سن ۲۸ روزه تاثیر ندارد. همچنین خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه و بلند مدت خواهد شد.

کلمات کلیدی: هدایت الکتریکی بتن، مقاومت الکتریکی بتن، خاکستر بادی، خوردگی، دوام بتن

۱- مقدمه

بتن خوب تحت انواع وسیعی از شرایط محیطی متنوع، ماده‌ای نسبتاً بادوام است. اصولاً در هر سازه بتنی لازم است عملکردی که برای آن در نظر گرفته شده است تداوم یابد، به این معنا که مقاومت و بهره‌دهی آن در عمر مشخصی که برای آن منظور شده است، حفظ گردد. عمر خدمت‌دهی طولانی مترادف بادوام در نظر گرفته می‌شود. بر طبق تعریف کمیته ۲۰۱ انستیتوی بتن آمریکا، دوام بتن سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقاومت در برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و یا هر فرآیندی که موجب آسیب‌دیدگی شود، گفته می‌شود؛ بنابراین بتن بادوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت‌دهی خود را در شرایط محیطش حفظ کند. آنچه مسلم است دوام بتن به معنای عمر بینهایت آن نیست و همچنین به این معنی نیست که بتن می‌تواند هرگونه شرایطی را تحمل کند. اصولاً هیچ مصالحی ذاتاً بادوام نیست و در نتیجه عوامل محیطی، ریزساختار مصالح، متعاقب آن، خواص این مصالح باگذشت زمان تغییر می‌کند. یک ماده وقتی به پایان عمر خدمت‌دهی خود می‌رسد که خواصش، تحت شرایط مفروض استفاده از آن، به حدی آسیب‌دیده باشد که ادامه استفاده از مصالح نایمن یا غیراقتصادی شناخته شود. از جمله ویژگی‌های فیزیکی بتن می‌توان به مقاومت ویژه الکتریکی آن اشاره نمود. مقاومت ویژه الکتریکی بتن شاخصی برای تعیین میزان مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی است. این شاخصه از بتن در سازه‌های بتن مسلح واقع در معرض خوردگی کاربردی می‌شود. در روند خوردگی بر سطح میلگرد دو منطقه آندی و کاتدی به وجود می‌آید که دارای اختلاف پتانسیل هستند. انتقال یون‌های هیدروکسیل از کاتد به آند تحت تأثیر مقاومت ویژه الکتریکی بتن صورت می‌گیرد. هر چه مقاومت ویژه الکتریکی بتن بیشتر باشد از شدت خوردگی کاسته می‌شود. به عبارت دیگر خوردگی نسبت مستقیم با جریان بین آند و کاتد داشته و با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد [۱]. مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند به عنوان مقاومت الکتریکی یک هادی با حجم واحد و سطح مقطع ثابت که در آن جریان پیوسته و یکنواخت توزیع شده، تعریف شود [۲]. هدایت الکتریکی به معنای رسانایی و عکس مقاومت الکتریکی است. بتن متشکل از سنگدانه‌ها، با اندازه‌های متفاوت و خمیر سیمان است. بر این اساس مسیرهایی که جریان الکتریکی از داخل بتن عبور می‌کنند عبارت‌اند از: [۳]

۱ - سنگدانه و خمیر سیمان

۲ - سنگدانه‌ها که همگی با یکدیگر در تماس هستند

۳ - داخل خمیر سیمان

مقاومت الکتریکی بتن به ریزساختار ماتریس سیمان، خلل و فرج آن، تخلخل و اندازه حفرات وابسته است. مقاومت الکتریکی همچنین تابعی از غلظت و تحرک یون‌ها در منافذ است. شیمی سیمان، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و استفاده مواد افزودنی و مکمل‌های سیمانی، فاکتورهایی هستند که بر ریزساختار ماتریس سیمانی بتن و منافذ آن اثرگذارند؛ بنابراین بر مقاومت الکتریکی بتن نیز تأثیرگذارند [۴ و ۵].

خاکستر بادی^۱، میکروسیلیس^۲ و سربراره کوره آهن‌گدازی^۳ از رایج‌ترین مکمل‌های سیمانی مورد استفاده در تولید بتن هستند. همچنین این مواد به عنوان افزودنی‌های معدنی شناخته شده‌اند و در مقادیر زیاد برای: افزایش کارایی بتن تازه؛ افزایش مقاومت بتن نسبت به ترکهای حرارتی، انبساط سنگدانه‌های قلیایی و حمله سولفاتی؛ افزایش مقاومت بتن و امکان کاهش میزان مصرف سیمان استفاده می‌شوند. این مواد به دلیل تأثیر پوزولانی و ویژگی‌های فیزیکی‌شان، بر ریزساختار ماتریس سیمان و تحرک یون‌ها در خلل و فرج اثر می‌گذارند؛ بنابراین بر مقاومت الکتریکی بتن نیز تأثیرگذارند. این مکمل‌ها

۱- Fly Ash

۲- Silica Fume

۳- GGBFS

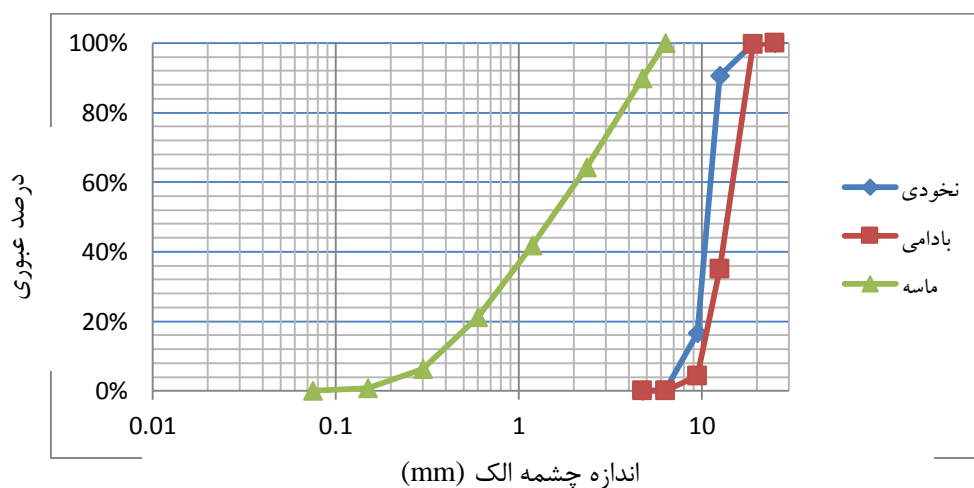
در اغلب موارد منجر به توزیع ظریفتر اندازه حفرات و غلظت یونی کمتر شده، لذا باعث افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به بتن با سیمان پرتلند معمولی می‌شوند [۶].

خاکسترهای بادی، بقایای بسیار ریز حاصل از سوخت پودر زغال‌سنگ هستند. آن‌ها عموماً ریزتر از سیمان هستند و عمدتاً شامل ذرات کرووی شیشه‌ای، همچنین بقایای هماتیت^۴ و مگنتیت^۵، زغال و برخی از قسمت‌های بلورین شکل گرفته در حین خنک‌سازی هستند [۷]. اکثر مطالعات پیرامون تأثیر خاکستر بادی یا دیگر مکمل‌های سیمانی بر مقاومت الکتریکی بتن، با بررسی تأثیر این مواد بر خوردگی میلگرد بتنی همراه بوده است. به دلیل رابطه قابل توجه بین مقاومت الکتریکی و خوردگی، محققان عملکرد مکمل‌ها را با توجه به مقاومت الکتریکی با جزییات بیشتری مورد بررسی قرار داده‌اند. اثر خاکستر بادی بر مقاومت الکتریکی عمدتاً مربوط به تغییر ریزساختار بتن است. احتشام^۶ تغییر در شیمی حفرات و پالایش ساختمان حفرات و اثر آن‌ها بر مقاومت الکتریکی را مطالعه کرد. با جایگزینی ۳۰٪ از سیمان با خاکستر بادی، غلظت یون‌های هیدروکسید^۷ کاهش یافته و توزیع حفرات نسبت به بتن ساده، ظریف‌تر می‌گردد. متوسط شعاع حفره‌ها در ماتریس سیمان خاکستر بادی، ۳۰٪ کوچک‌تر نسبت به ماتریس سیمان ساده است. به همین دلیل مقاومت الکتریکی بتن با خاکستر بادی حدود ۲/۲ برابر بتن معمولی است [۸].

۲- مصالح مصرفی و نسبت مخلوط‌ها

۱-۲ مصالح مصرفی

ماسه مصرفی در این پژوهش از نوع طبیعی با وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ۲/۵۸ گرم بر سانتیمتر مکعب و جذب آب ۲/۸٪ بوده و نتایج دانه بندی آن در شکل ۱ آمده است. شن ریز (نخودی) مصرفی در این پژوهش از نوع شکسته با وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ۲/۶۸ گرم بر سانتیمتر مکعب و جذب آب ۰/۶۶٪ بوده و نتایج دانه بندی آن در شکل ۱ آمده است. شن درشت (بادامی) مصرفی در این پژوهش از نوع شکسته با وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ۲/۶۸ گرم بر سانتیمتر مکعب و جذب آب ۰/۴۸٪ بوده و نتایج دانه بندی آن در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- نمودار دانه بندی مصالح سنگی

۴-hematit

۵-magnetit

۶ Ehtesham

۷ OH

سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه سیمان هگمتان می باشد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جداول ۱ و ۲ ارائه می گردد. همچنین مشخصات شیمیایی و فیزیکی خاکستر بادی مصرفی در این پژوهش در جدول ۳ آمده است و طبق استاندارد ASTM C618 در رده کلاس F قرار می گیرد.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%SO ₃	%K ₂ O	%Na ₂ O	%LOI	%C ₃ A
۲۲/۲	۴/۹	۳/۹	۶۴/۵	۱/۷	۲/۳	۰/۷	۱/۵	۱/۵	۶/۵

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

ریزی Cm ² /gr	زمان گیرش (دقیقه)		مقاومت فشاری ملات استاندارد Kg/cm ²			
	اولیه	نهایی	۲روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه
۳۰۰۰	۲۰۰	۲۴۰	۱۷۰	۲۲۰	۳۰۰	۴۲۰

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاکستر بادی

ردیف	ترکیب	خاکستر بادی
۱	SiO ₂ (%)	۵۳/۶
۲	Al ₂ O ₃ (%)	۲۶/۰
۳	Fe ₂ O ₃ (%)	۳/۱۰
۴	CaO(%)	۱۱/۱۷
۵	MgO(%)	۲/۳۴
۶	SO ₃ (%)	۰/۴۹
۷	ریزی بلین (cm ² /gr)	۴۰۰۰
۸	چگالی (gr/cm ³)	۲/۳۷

آب مصرفی از محل آب شرب شهر همدان تامین گردید و جهت تامین روانی مورد نظر از فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی استفاده گردید.

۲-۲ نسبت مخلوط ها

در این پژوهش مجموعاً ۶ طرح اختلاط شامل ۳ طرح با عیار مواد سیمانی ۳۷۵kg/m³ با نسبت های آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۴۵ و ۰/۵ و ۳ طرح با عیار مواد سیمانی ۳۷۵kg/m³ و با جایگزینی ۲۰٪ خاکستر بادی با سیمان و با نسبت های آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۴۵ و ۰/۵ ساخته شد. محاسبات طرح اختلاط ها با روش ملی طرح مخلوط ایران انجام شد.

جدول ۴- نسبت اجزا مخلوط بتن

کد مخلوط	W/C	سیمان ($\frac{kg}{m^3}$)	آب ($\frac{kg}{m^3}$)	شن بادامی ($\frac{kg}{m^3}$)	شن نخودی ($\frac{kg}{m^3}$)	ماسه ($\frac{kg}{m^3}$)	خاکستر بادی ($\frac{kg}{m^3}$)
c-0.5-375	۰/۵	۳۷۵	۱۸۸	۳۶۱	۲۶۹	۱۱۲۹	۰
c-0.45-375	۰/۴۵	۳۷۵	۱۶۹	۳۷۱	۲۷۷	۱۱۶۱	۰
c-0.4-375	۰/۴	۳۷۵	۱۵۰	۳۸۱	۲۸۴	۱۱۹۲	۰
k-0.5-375	۰/۵	۳۰۰	۱۸۸	۳۵۸	۲۶۷	۱۱۲۱	۷۵
k-0.45-375	۰/۴۵	۳۰۰	۱۶۹	۳۶۸	۲۷۵	۱۱۵۳	۷۵
k-0.4-375	۰/۴	۳۰۰	۱۵۰	۳۷۸	۲۸۲	۱۱۸۴	۷۵

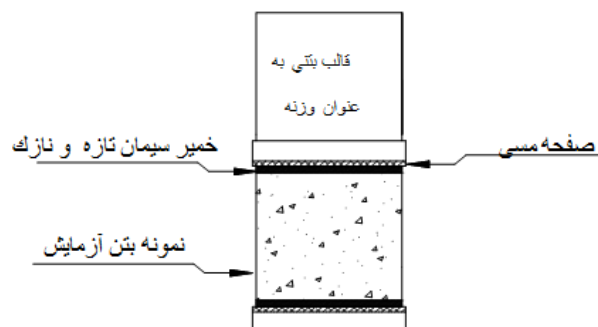
۳- برنامه آزمایشگاهی

آزمایشهای اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی و هدایت الکتریکی در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز بر روی آزمونهای استوانه ای با ابعاد ۱۰*۲۰ سانتی متر انجام گردید. آزمایش تعیین شاخص نفوذ یون کلرید در سن ۹۰ روز بر روی آزمونهای استوانه ای استاندارد آزمایش انجام گردید. همچنین آزمایش های جذب آب بلند مدت و جذب آب نیم ساعته در سن ۲۸ روزه انجام گرفت. آزمایش تعیین مقاومت فشاری نیز در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بر روی آزمونهای مکعبی با بعد ۱۰ سانتی متر انجام گرفت.

۳-۱- روش انجام آزمایش

۳-۱-۱- آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی بتن سخت شده

برای تعیین مقاومت الکتریکی بتن سخت شده دستورالعمل استاندارد در BS و ASTM و استانداردهای معتبر، وجود ندارد لذا برای تعیین این مقاومت از وسایل و روش خاصی استفاده شده است که به روش حجمی معروف است. در ادامه شرح مختصری از این روش ارائه می شود. بدین منظور نمونه های استوانه ای را بین دو صفحه مسی قرار داده و قرائت انجام میگیرد. برای اینکه صفحات مسی هیچ گونه اتصالی با زمین و میز کار نداشته باشند به صفحات پلاستیکی چسبانده شدند. برای اتصال کامل صفحات مسی با سطح بتن نیازمند یک ماده رسانا هستیم. بدین منظور از خمیر سیمان استفاده شد. خمیر سیمان از یک سو دارای یونهای آزاد زیادی می باشد که هادی الکتریکی است و از سویی دیگر سبب اتصال کامل بین سطح بتن با صفحات مسی می شود. برای آنکه از اتصال کامل مطمئن شویم از یک وزنه بر روی صفحه فوقانی استفاده شده است. (شکل ۲) با استفاده از رابطه ۱ مقدار مقاومت ویژه الکتریکی بتن محاسبه می شود.



شکل ۲- نحوه آماده سازی آزمون برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی

$$\rho = Z \frac{A}{L}$$

رابطه (۱)

ρ = مقاومت ویژه الکتریکی بتن ($\Omega \cdot m$)

Z = مقاومت ظاهری بتن (Ω)

A = سطح مقطع آزمون بتن (m^2)

L = طول آزمون بتن (m)

۳-۱-۲ آزمایش تعیین هدایت الکتریکی بتن سخت شده

این آزمایش بر اساس روش استاندارد ASTM C1760 بر روی آزمون‌های استوانه‌ای شکل با ابعاد 10×20 سانتی‌متر انجام گرفت. در این روش جریان الکتریکی عبوری از نمونه بتنی تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت مستقیم، در مدت یک دقیقه از اعمال ولتاژ به دو سر نمونه، اندازه‌گیری می‌شود. آزمون آزمایش از نوع استوانه‌ای و به قطر ۱۰ cm و ارتفاع 20 cm می‌باشد. نمونه بتن بین دو سلول قرار گرفته و سلول‌ها با محلول NaCl با غلظت 0.3% پر می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه ۳ هدایت الکتریکی نمونه بتنی محاسبه می‌شود [۹].

$$\sigma = k \frac{I_1}{V} \frac{L}{D^2}$$

رابطه (۳)

σ = هدایت الکتریکی بتن (ms/m)

K = ضریب ثابت = ۱۲۷۳,۲

I_1 = جریان عبوری در یک دقیقه (mA)

V = ولتاژ اعمالی (V)

L = طول آزمون (mm)

D = قطر آزمون (mm)

۳-۱-۳ آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید (RCPT)

این آزمایش بر اساس روش استاندارد ASTM C1202 بر روی دیسکی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر انجام گرفت. دیسک از نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰ و طول ۲۰ سانتی‌متر تهیه شده و در شرایط خلأ اشباع می‌شود. در این روش یک سمت آزمون در معرض محلول سدیم کلرید^۸ با غلظت ۳٪ و سمت دیگر آزمون در معرض محلول ۰/۳ نرمال سود سوزآور^۹ قرار گرفته و میزان شار عبوری در مدت زمان ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت DC اندازه‌گیری می‌شود [۱۰].

۳-۱-۴ آزمایش تعیین جذب آب کوتاه مدت و نهایی

آزمایش تعیین جذب آب کوتاه مدت بر اساس BS 1881: PART 122 و جذب آب بلندمدت بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM C642 و به صورت درصد وزنی به دست آمد. با این تفاوت که به جای مغزه گیری از نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری استفاده گردید. نتایج جذب آب به صورت درصد وزنی با استفاده از میانگین گیری نتایج ۳ آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری به دست آمد. نحوه آماده‌سازی آزمون‌ها برای انجام این آزمایش به این صورت بود که پس از خارج شدن از قالب، ابتدا به مدت ۲۷ روز به داخل حوضچه آب منتقل شدند. سپس از آن خارج و برای خشک شدن به درون گرمخانه با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد انتقال یافتند و به مدت حداقل ۴۸ ساعت در گرمخانه قرار داده شدند. بعد از آن نمونه‌ها توزین شدند و دوباره در گرمخانه قرار داده شدند. توزین آزمون‌ها تا جایی ادامه پیدا کرد که اختلاف جرم دو اندازه‌گیری متوالی در فاصله ۲۴ ساعت کمتر از ۰/۵

^۸ NaCl

^۹ NaOH

درصد جرم کمتر شود. پس از رسیدن آزمون‌ها به جرم ثابت (m_d) و ثبت آن، نمونه‌ها غرقاب شدند و پس از 0.5 ± 30 دقیقه، آزمون‌ها از آب خارج شده و سطح آن‌ها با پارچه خشک گردید و دوباره توزین شدند. با قرار دادن جرم خشک و جرم نمونه پس از نیم ساعت قرارگیری در آب در رابطه (۳-۳) جذب آب اولیه (نیم‌ساعته) به دست آمد. پس از غوطه‌ور ساختن آزمون‌ها به مدت حداقل ۴۸ ساعت، آن‌ها را از آب خارج کرده و سطح آن‌ها با پارچه خشک گردید و توزین شدند و دوباره در آب قرار گرفتند تا در روز بعد نیز توزین شوند. این اندازه‌گیری تا جایی انجام شد که اختلاف جرم دو اندازه‌گیری متوالی بافاصله زمانی ۲۴ ساعت کمتر از 0.5 درصد جرم بیشتر نمونه باشد. پس از رسیدن به جرم ثابت (m_t) درصد جذب آب نهایی از رابطه (۳) به دست آمد:

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{جذب آب در زمان } t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100$$

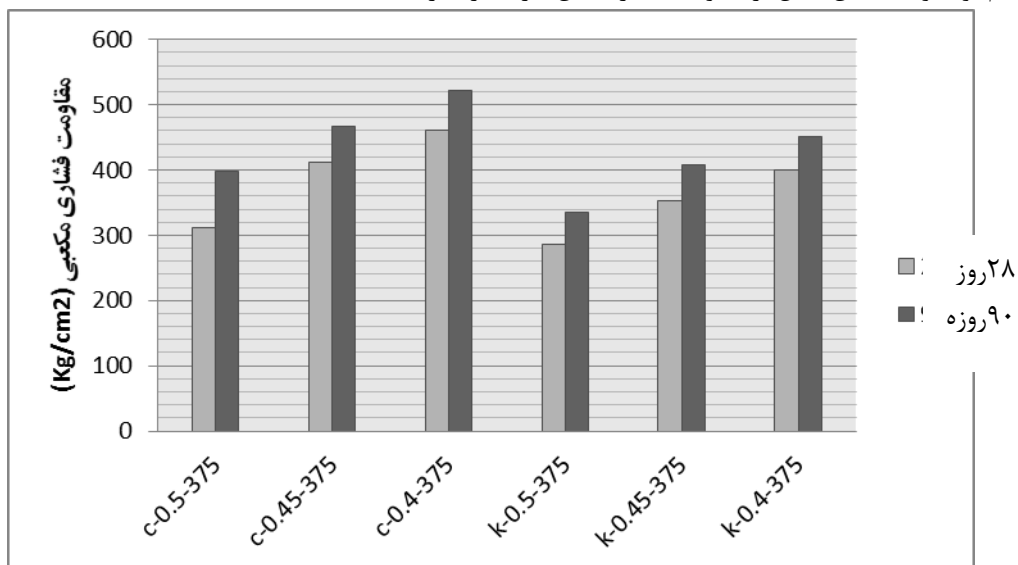
که در آن:

m_t = وزن آزمون مرطوب در زمان t

m_d = وزن آزمون خشک‌شده در گرمخانه

۴- نتایج و تفسیر

نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری طرح‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۳ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو نوع طرح بتن معمولی و بتن حاوی خاکستربادی، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در مقایسه طرح‌های حاوی خاکستربادی و طرح‌های بتن معمولی مشاهده می‌گردد که در یک نسبت آب به مواد سیمانی برابر، مقاومت فشاری بتن‌های معمولی بیشتر از بتن حاوی خاکستربادی است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار اختلاف مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستربادی و بتن معمولی در سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز کمتر شده است. استفاده از مواد پوزولانی به طور کلی باعث کاهش سرعت واکنش هیدراسیون سیمان شده و در نتیجه سرعت رشد مقاومت بتن حاوی خاکستربادی نسبت به بتن معمولی را کاهش داده است. علاوه بر اینها جنس C-S-H تولید شده توسط خاکستر بادی و سیمان متفاوت از هم بوده و به همین دلیل بر مقاومت فشاری بتن نیز تاثیرگذار است.



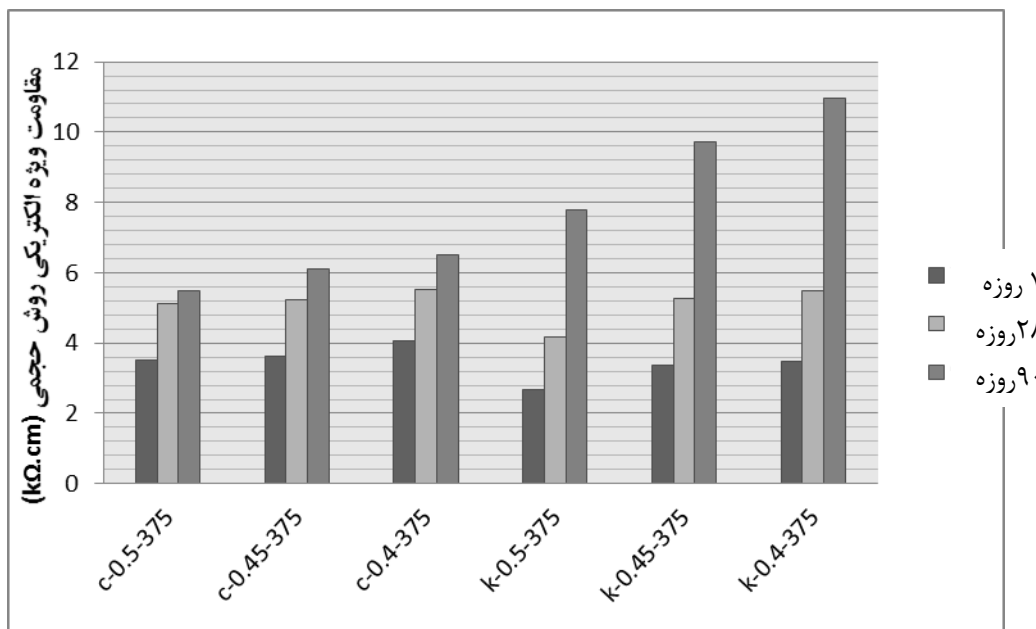
شکل ۳- نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری

در شکل ۴ نتایج آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی طرح‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روز آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سن آزمون‌ها، مقاومت ویژه الکتریکی نیز افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که

کاهش نسبت آب به مواد سیمانی باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی در تمامی سننن آزمایش گردیده است که دلیل این امر کاهش حجم خمیر سیمان در بتن است. به طور کلی هر عاملی که باعث کاهش حجم خمیر سیمان در بتن شود، موجب افزایش مقاومت الکتریکی بتن خواهد شد زیرا در صورت کاهش حجم خمیر سیمان حجم سنگدانه در بتن بیشتر خواهد شد و از آنجا که مقاومت الکتریکی سنگدانه در مقایسه با خمیر سیمان بسیار بیشتر است، این امر باعث افزایش مقاومت الکتریکی بتن خواهد شد، همچنین کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از طریق کاهش حجم حفرات موئینه نیز بر مقاومت الکتریکی بتن اثر مطلوب میگذارد. در مقایسه بتن حاوی خاکستربادی و بتن معمولی مشاهده می شود که طرح های حاوی خاکستربادی نسبت به تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی حساسیت بیشتری از خود نشان داده و میزان تغییرات بیشتری را نسبت به طرح های بتن معمولی در آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی از خود نشان دادند. همچنین دیده می شود که مقدار مقاومت ویژه الکتریکی طرح های حاوی خاکستربادی در سننن ۷ و ۲۸ روز نسبت به طرح های بتن معمولی کمتر است اما در سن ۹۰ روز طرح های حاوی خاکستربادی مقاومت ویژه الکتریکی بیشتری را نسبت به بتن معمولی کسب کرده اند. در جدول ۵ میانگین درصد افزایش مقاومت ویژه الکتریکی طرح های ساخته شده آورده شده است. مشاهده میشود که رشد مقاومت الکتریکی هر دو نوع طرح بتن معمولی و بتن حاوی خاکستربادی در بازه سنی ۷ روز تا ۲۸ روز تقریباً برابر بوده اما در بازه سنی ۲۸ روز تا ۹۰ روز میزان رشد مقاومت الکتریکی طرح های حاوی خاکستربادی نسبت به طرح های بتن معمولی بسیار بیشتر بوده است.

جدول ۵ - میزان افزایش مقاومت ویژه الکتریکی

نوع بتن	درصد افزایش مقاومت ویژه الکتریکی		
	۷ روز به ۲۸ روز	۲۸ روز به ۹۰ روز	۷ روز به ۹۰ روز
بتن معمولی	۴۲	۱۴	۶۲
بتن حاوی خاکستربادی	۵۶	۹۰	۱۹۸



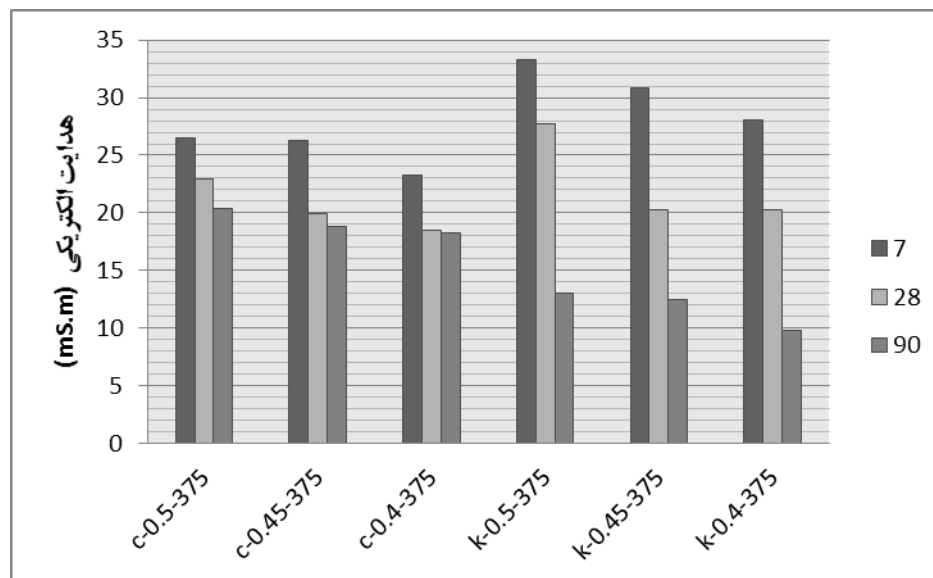
شکل ۴ - نتایج آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی

در شکل ۵ نتایج آزمایش هدایت الکتریکی بتن در سننن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز آورده شده است. مشاهده می شود که با افزایش سن نمونه ها در بتن معمولی و بتن حاوی خاکستر بادی میزان هدایت الکتریکی بتن کاهش می یابد و این روند کاهشی برای

بتن معمولی در سن ۲۸ روز تقریباً به پایان می‌رسد اما برای بتن حاوی خاکستر بادی این روند تا سن ۹۰ روز نیز ادامه دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی هدایت الکتریکی بتن نیز کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که هدایت الکتریکی طرح‌های حاوی خاکستر بادی در سنین ۷ و ۲۸ روزه بیشتر از طرح‌های بتن معمولی است اما در سن ۹۰ روزه این امر برعکس شده و هدایت الکتریکی طرح‌های حاوی خاکستر بادی کمتر از طرح‌های بتن معمولی می‌شود. در جدول ۶ میزان کاهش هدایت الکتریکی طرح‌های ساخته شده در طول زمان آورده شده است. در این جدول می‌بینیم که میزان کاهش هدایت الکتریکی طرح‌های بتن معمولی و بتن حاوی خاکستر بادی از سن ۷ روز تا ۲۸ روز تقریباً یکسان بوده و از سن ۲۸ تا ۹۰ روز میتوان گفت که کاهش هدایت الکتریکی طرح‌های بتن معمولی با کندی صورت گرفته اما میزان کاهش هدایت الکتریکی طرح‌های حاوی خاکستر بادی چشمگیر بوده. علت این امر را می‌توان کند بودن سرعت واکنش هیدراسیون خاکستر بادی بیان کرد.

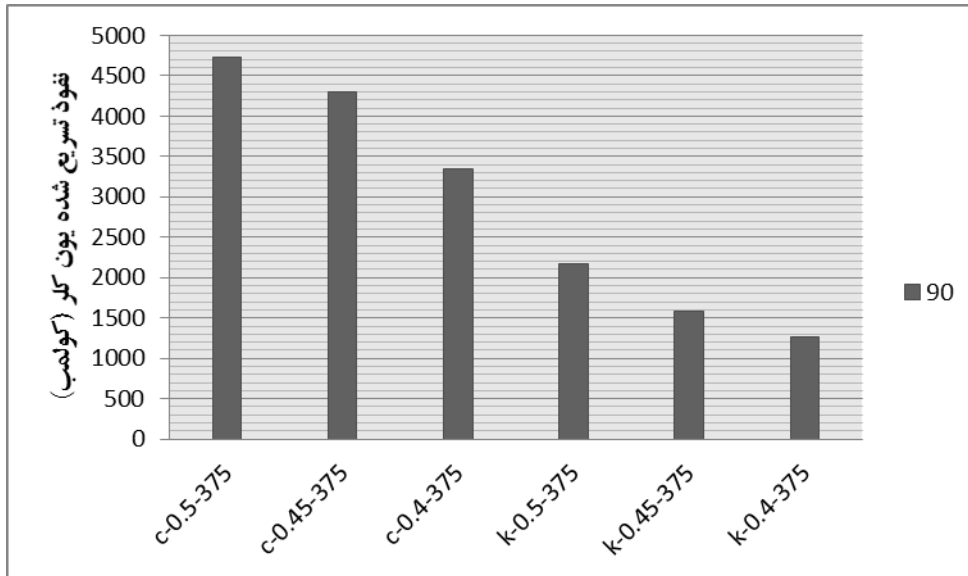
جدول ۶ - میزان کاهش هدایت الکتریکی

نوع بتن	درصد کاهش هدایت الکتریکی		
	۷ روز به ۲۸ روز	۲۸ روز به ۹۰ روز	۷ روز به ۹۰ روز
بتن معمولی	۱۸	۸	۲۵
بتن حاوی خاکستر بادی	۲۶	۶۳	۷۲



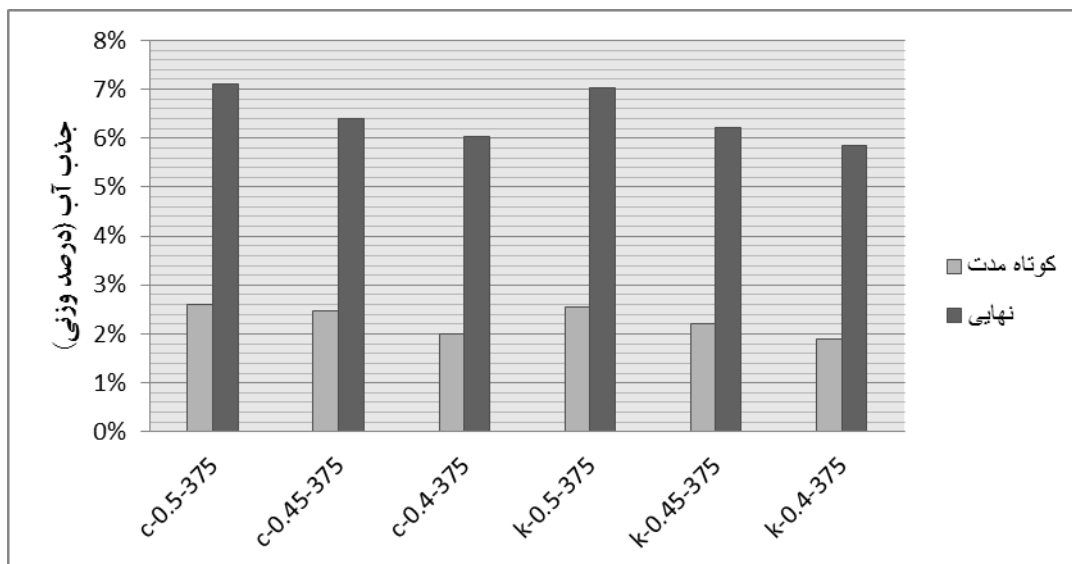
شکل ۵- نتایج آزمایش تعیین هدایت الکتریکی

در شکل شماره ۶ نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید (RCPT) در سن ۹۰ روز آورده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در طرح‌های بتن معمولی و طرح‌های حاوی خاکستر بادی میزان شار عبوری از نمونه‌ها کاسته می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از خاکستر بادی باعث کاهش چشمگیر میزان شار عبوری از بتن در مقایسه با بتن معمولی خواهد شد. این میزان کاهش به طور متوسط ۶۰٪ بوده است. کاهش حجم و قطر حفرات موئینه و همچنین کاهش غلظت یونی الکترولیت بتن در اثر استفاده از خاکستر بادی باعث بهبود شاخص نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلرید و در نتیجه بهبود دوام بتن در برابر خوردگی و یون کلرید خواهد شد.



شکل ۶- نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید (RCPT)

در شکل ۷ نتایج آزمایش جذب آب کوتاه مدت و نهایی طرح های ساخته شده در سن ۲۸ روز نشان داده شده است. مشاهده می شود که در هر دو نوع بتن معمولی و بتن حاوی خاکستریادی با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقدار جذب آب کوتاه مدت و نهایی کاهش می یابد. در مقایسه طرح های حاوی خاکستریادی و طرح های بتن معمولی مشاهده می شود که نتایج جذب آب کوتاه مدت و نهایی هر دو نوع بتن در سن ۲۸ روز تقریباً برابر است. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که استفاده از خاکستریادی بر نتایج جذب آب کوتاه مدت و نهایی در سنین اولیه تاثیرگذار نخواهد بود و نتایجی مشابه بتن معمولی بدست خواهد آمد.



شکل ۷- نتایج آزمایش جذب آب کوتاه مدت و نهایی در سن ۲۸ روز

۵- جمع بندی نتایج

به طور خلاصه نتایج زیر در محدوده مطالعه صورت گرفته در این پژوهش بیان میگردد:

استفاده از ۲۰٪ خاکستربادی جایگزین سیمان در سنین اولیه باعث کاهش مقاومت ویژه الکتریکی (۱۵٪ میانگین) و افزایش هدایت الکتریکی (۲۰٪ میانگین) و در سنین بلند مدت باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی (میانگین ۵۶٪) و کاهش هدایت الکتریکی (میانگین ۶۰٪) و کاهش شار عبوری از بتن به مقدار میانگین ۶۰٪ نسبت به بتن معمولی خواهد شد. همچنین خاکستربادی باعث کاهش مقاومت فشاری به مقدار ۱۳٪ به طور میانگین در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نسبت به بتن معمولی شده است. همچنین مشاهده گردید که استفاده از خاکستربادی بر جذب آب کوتاه مدت و نهایی در سن ۲۸ روز تاثیر چشمگیری نخواهد داشت. بنابراین جایگزینی مقداری از سیمان با خاکستر بادی علاوه بر مزیت های زیست محیطی، باعث بهبود دوام بتن در مقابل عوامل مهاجم خورنده خواهد شد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از مساعدت و همکاری مدیر عامل، مدیر بخش ژئوتکنیک و مقاومت مصالح و پرسنل شرکت مهندسیین مشاور سیناب غرب کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [۱] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس - آسیب شناسی بتن و ارزیابی آن، تهران، ۱۳۷۸
- [2] Esbach, O.E. and Souders, M., Handbook of Engineering Fundamentals, John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [3] Ghodousi, P., "Effects of on corrosion the Bond and strength of Reinforced concrete Beams", ph.d Thesis, Leeds University, 1992.
- [4] Bürchler, D., Elsner, B., and Böhni, H., Electrical Resistivity and Dielectric Properties of Hardened Cement and Mortar, Institute of Materials Chemistry and Corrosion, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Hönggerber, CH-8093 Zurich, Switzerland, 1996
- [5] Hunkeler, F., "The Resistivity of Pore Water Solution - A Decisive Parameter of Rebar Corrosion and Repair Methods," Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, pages 381 to 389, 1996.
- [6] Whiting, D., Todres, A., and Nagi, M., *Synthesis of Current and Projected Concrete Highway Technology*, SHRP-C-345, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1993.
- [7] Ehtesham, S. and Rasheeduzzafar, H., "Corrosion Resistance Performance of Fly Ash Blended Cement Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 3, pages 264 to 271, May-June 1994.
- [8] Ehtesham, S. and Rasheeduzzafar, H., "Corrosion Resistance Performance of Fly Ash Blended Cement Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 3, pages 264 to 271, May-June 1994.
- [9] ASTM C 1760- 12 Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete
- [10] ASTM C1202-12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org