بررسی مقاومت فشاری و نفوذ پذیری بتن خود تراکم با جایگزینی پوزولان های طبیعی، مصنوعی و سرباره

محمد حسین خزعلی[۱]، امیر انصاری[۲]، آرش گوهری[۲]
[۱]سرپرست واحد بتن کارخانه تولید قطعات بتنی شهید رجایی(گروه تخصصی شهید رجایی)، کارشناس ارشد عمران گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[۲]کارشناس واحد بتن کارخانه تولید قطعات بتنی شهید رجایی(گروه تخصصی شهید رجایی)
(مولف مرتبط: Eng.amir.ansari@outlook.com)

چکیده:

امروزه درکنار مقاومت فشاری بتن، دوام بتن در برابر شرایط محیطی مخرب از جمله عوامل مهم در طراحی سازه ها به شمار می آید. یکی از شاخصه های دوام در سازه های بتنی، نفوذپذیری آن در برابر عوامل مهاجم بیرونی می باشد. نفوذپذیری نه تنها به اجزا و نسبت های طرح اختلاط بلکه به عملیات اجرایی نیز بستگی دارد[1]. بنابراین دست یافتن به بتنی که از این نظر نیز مورد قبول باشد اهمیت پیدا می کند. با پر رنگ تر شدن این مسئله استفاده از پوزولان های مختلف به عنوان جایگزین سیمان برای نیل به این هدف در دستور کار قرار می گیرد[2].روشن است که در این جایگزینی مسائل اقتصادی و دوام بتن عواملی حائز اهمیت می باشند. این مقاله به بررسی اثر استفاده از ۴ پوزولان مختلف بر روی مقاومت فشاری ونفوذپذیری بتن در سنین مختلف می پردازد. مواد جایگزین سیمان شامل میکروسیلیس (پوزولان مصنوعی)، تراس جاجرود، پومیس خاش و سرباره ذوب آهن اصفهان با درصد جایگزینی ثابت ۱۰٪ مورد استفاده می باشد. علاوه بر مقاومت فشاری ، مقاومت الکتریکی سطحی وآزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلراید(RCMT) برای بررسی نفوذپذیری بتن های ساخته شده مورد استفاده قرار گرفته است.با توجه به استفاده از بتن خودتراکم به صورت مختصر توضیحاتی در مورد خواص بتن تازه تولید شده نیز ارائه می گردد. در پایان خواهیم دید که بتن ساخته شده با میکروسیلیس دارای بهترین نتایج هم در خواص بتن تازه و هم بتن سخت شده می باشد و همچنین می‌توان رابطه خوبی بین آزمایش غیر مخرب مقاومت الکتریکی سطحی و آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلراید پیدا کرد و از آن به عنوان ملاک اولیه قضاوت در مورد نفوذپذیری بتن استفاده نمود.

کلمات کلیدی : بتن خود تراکم، مواد جایگزین سیمان، مقاومت فشاری، نفوذ پذیری، مقاومت الکتریکی سطحی، عمق نفوذ یون کلراید.

۱- مقدمه :

یکی از انواع بتن از دیدگاه تکنولوژی ساخت ، بتن خودتراکم یا SCC می باشد. بتن خود تراکم به بتنی اطلاق می شود که به علت داشتن روانی زیاد ، بدون نیاز به تراکم (انجام ویبره) به راحتی در اشکال مختلف قالب و با تراکم آرماتور بالا جای گرفته و با پر کردن تمامی فضای قالب ، بتنی با تراکم بالا ایجاد می نماید[3]. بتن خودتراکم در عین دارا بودن کارپذیری و روانی زیاد ،مقاومت کافی در برابر جداشدگی و آب انداختگی داشته و می تواند مخلوطی همگن و متراکم فراهم نماید[4].از دیگر مزایای بتن خود تراکم می توان به کاهش نیروی انسانی، قابلیت اجرای قطعات بتنی با تراکم بالای آماتور، کاهش زمان و هزینه ساخت، کاهش آلودگی صوتی و ... اشاره کرد[5]. به دلیل خصوصیات منحصر به فرد بتن خودتراکم از این نوع بتن در انجام آزمایش های استفاده گردید. طرح اختلاط مورد استفاده نیز برای رسیدن به جریان اسلامپ در رده SF2 طراحی گردید. دلیل انتخاب این رده، روانی مناسب آن و کاهش احتمال جداشدگی و آب انداختگی می باشد. همچنین سعی گردید بتن های تولید شده به بتن هایی با قابلیت اجرا در ابعاد پروژه های عمرانی نزدیک شود. بنابراین افت جریان اسلامپ بتن های تولیدی پس از ۳۰ دقیقه ثبت گردیده تا بتن ها از لحاظ شرایط کارگاهی مورد بررسی قرار گیرند.

۲- مصالح مورد استفاده :

۲-۱- سیمان :

کیفیت سیمان یکی از عوامل اصلی تعیین کیفیت بتن تولید شده با آن می باشد. کیفیت سیمان چه در مقاومت های اولیه و نهایی و چه در دوام قطعات ساخته شده با این سیمان تاثیر بسزایی دارد. سیمان مورد استفاده در طرح ها از نوع ۴۲۵-۱ می باشد. آنالیز شیمیایی این سیمان که به روش xrf نیمه کمی انجام گرفته است در زیر درج گردیده است :

جدول ۱-آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند

Unit	درصد
L.O.I	۰,۶۱
Cao	۶۳,۳۹
Sio2	۲۰,۶
Al2o3	۳,۸۹
Fe2o3	۳,۱۵
So3	۳,۸۷
Mgo	۴,۳۲
Sro	۰,۱
P205	۰,۰۷

Unit	درصد
C3S	٥٩,٨٢
C2S	١٣,٩٢
C3A	٤,٩٧
C4AF	٩,٥٨

مقاومت فشاری ملات این سیمان در سنین مختلف به شرح ذیل می باشد (ASTM C109/C 109M-02)

جدول ۲-مقاومت فشاری ملات سیمان

سن آزمایش(روز)	1	3	7	28
مقاومت فشاری (kg/cm2)	144	282	357	430
درصد مقاومت نهایی	33.4	65.5	83	100

غلظت نرمال این سیمان برابر ۰,۲۲ و زمان گیرش اولیه آن ۱۱۵ دقیقه و گیرش نهایی آن ۲۳۵ دقیقه می باشد. ریزی این سیمان نیز برابر۳۱۰۰ Cm2/gr می باشد.(ASTM C191 -04 ، ASTM C 187-98، ASTM C 204)

۲-۲- مصالح سنگی :

– **ماسه :** ماسه مورد استفاده در این طرح ها از نوع طبیعی و در اندازه ۶-۰ میلیمتر می باشد. همچنین به علت تامین خواص رئولوژی بتن خود متراکم از ماسه پر فیلر استفاده گردید. وزن مخصوص این ماسه برابر ۲,۵۳ تن بر متر مکعب و جذب آن ۳,۱ درصد می باشد.

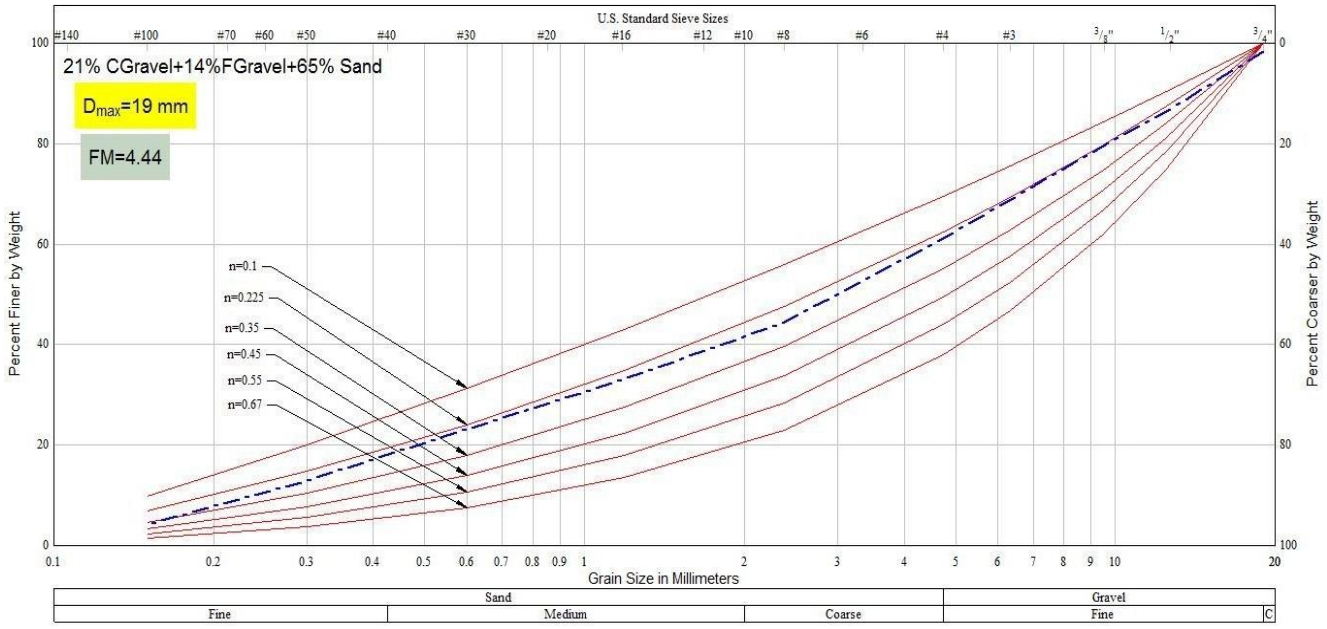
– **شن نخودی :** برای رسیدن به دانه بندی یکنواخت و یکدست از یک نوع شن نخودی با اندازه ۱۲-۶ میلیمتر و به علت تامین خواص بتن تازه در رنج کاملاً طبیعی انتخاب گردید. وزن مخصوص این شن برابر ۲,۵۸ تن بر متر مکعب و جذب آب آن ۲,۲ درصد می باشد.

– **شن بادامی :** شن مورد استفده با شکستگی بالای ۷۰ درصد و همچنین اندازه ۱۹-۱۲ میلیمتر می باشد. وزن مخصوص این شن برابر ۲,۵۹ تن بر متر مکعب و جذب آب آن برابر ۱,۷ درصد می باشد.

جدول ۳-دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک	درصد عبوری			
	ماسه	شن بادامی	شن نخودی	مخلوط
3/4" (19.0 mm)	-	91.7	-	98.26
1/2" (12.5 mm)	-	35.7	100	86.5
3/8" (9.5 mm)	100	7.7	91.8	79.47
3/16" (4.75 mm)	92.3	1.6	5.9	61.16
# 8 (2.38 mm)	67	1.6	2.6	44.25
# 16 (1.19 mm)	50.7	0	0	32.96
# 30 (0.590 mm)	35.6	-	-	23.14
# 50 (0.300 mm)	19.8	-	-	12.87
# 100 (0.150 mm)	6.3	-	-	4.1

نمودار ۱- دانه بندی مخلوط سنگدانه ها



۲-۳- افزودنی کاهنده آب:

افزودنی از نوع فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر می باشد. این افزودنی دارای وزن مخصوص ۱,۱ تن بر متر مکعب می باشد و از افزودنی های نوع G(مطابق با استاندارد ASTM C494) می باشد. دلیل انتخاب این نسل از افزودنی قدرت روانی بیشتر و تامین خواص بهتر بتن تازه مانند چسبندگی می باشد. سازگاری این افزودنی با سیمان مورد استفاده و عدم هوازایی آن نیز مورد نظر قرار گرفته است .

۲-۴- مواد پرکننده و جایگزین سیمان :

۲-۴-۱- پرکننده(فیلر): پودر سنگ ساوه که تنها در طرح شاهد استفاده گردیده است، جایگزین ماسه می باشد و جنس آن کربنات کلسیم با خلوص بالای ۹۰ درصد می باشد. این پودر با ۶۰ درصد عبوری از الک ۷۵ میکرون به عنوان لزجت دهنده استفاده شده است.

۲-۴-۲-میکروسیلیس: دوده سیلیسی محصول فرعی کوره های قوس الکتریکی القایی در صنایع تولید فلز سیلیسیم و آلیاژهای فروسیلیسیم ازنا می باشد. وزن مخصوص آن برابر ۲,۲۷ تن بر متر مکعب و ریزی آن بر اساس روش DET ، ۲۰۰۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم می باشد.

۲-۴-۳- پومیس: پوزولان طبیعی مربوط به جنوب شرق کشور (منطقه خاش) می‌باشد. وزن مخصوص آن برابر ۲,۶۶ تن بر متر مکعب و ریزی آن ۵۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم می‌باشد.

۲-۴-۴- سرباره: محصول جانبی کارخانه ذوب آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲,۸۹ تن بر متر مکعب و ریزی ۴۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۴-۵- تراس: پوزولان طبیعی توف از معدن جاجرود تهران با وزن مخصوص ۲,۲۲ تن بر مترمکعب و ریزی ۴۸۵۰ سانتیمتر مربع بر گرم در طرح اختلاط بکار گرفته شده است.

۳- طرح اختلاط و وزن مخصوص محاسباتی:

برای اینکه نتایج آزمایش های قابل مقایسه باشد در تمامی طرح ها از نسبت های آب به سیمان، مصالح و درصد جایگزینی ثابت استفاده گردیده و رده بتن مورد نظر SF2 در نظر گرفته شده است. درصد جایگزینی بصورت وزنی بوده و با لحاظ شدن وزن مخصوص مواد جایگزین سیمان تغییرات جزئی در دیگر مصالح سنگی به شرح ذیل خواهیم داشت.

جدول ۴-طرح اختلاط

مواد سازنده	شاهد	میکروسیلیس	سرباره	تراس	پومیس
سیمان پرتلند(kg/m3)	450	405	405	405	405
ماسه(kg/m3)	1015	1116	1121	1114	1120
شن نخودی(kg/m3)	243	240	242	240	241
شن بادامی(kg/m3)	364	360	362	360	362
جایگزین سیمان(kg/m3)	0	45	45	45	45
w/c	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
فیلر(پودر سنگ)(kg/m3)	113	0	0	0	0

جدول ۵ –وزن مخصوص محاسباتی

کد طرح	ماده جایگزین	وزن مخصوص(ton/m3)
1	شاهد	2.360
2	میکروسیلیس	2.341
3	سرباره	2.350
4	تراس	2.339
5	پومیس	2.348

۴- خواص بتن تازه :

خواص تازه بتن های تولید شده به صورت خلاصه شامل آزمایش جریان اسلامپ اولیه و ثانویه (زمان ۳۰ دقیقه)، T50 ، وزن مخصوص و همچنین میزان مصرف افزودنی فوق روان کننده در جدول شماره ۵ نشان داده شده است.

جدول ۶-خواص بتن تازه

کد طرح	ماده جایگزین	میزان پخش شدگی در آزمایش جریان اسلامپ اولیه(cm)	میزان پخش شدگی در آزمایش جریان اسلامپ ۳۰دقیقه(cm)	T50(s)	وزن مخصوص (ton/m3)	مصرف روان کننده (درصد مواد سیمانی)
1	شاهد	65	60	2.2	2.37	0.6
2	میکروسیلیس	67	62	2.3	2.34	0.71
3	سرباره	67	63	2	2.36	0.62
4	تراس	65	53	2.5	2.33	0.9
5	پومیس	65	60	2.2	2.35	0.58

کلیه بتن ها دارای شکل ظاهری مناسب و لزجت قابل قبولی بوده و وزن مخصوص بتن ها تفاوت محسوسی با وزن مخصوص محاسباتی ندارند. افت جریان اسلامپ بتن ها در زمان ۳۰ دقیقه مشابه می باشد به استثنا بتن تولید شده با تراس که افت جریان اسلامپ زیادی را نشان می دهد. به طوری که از همان ابتدا می توان افت جریان اسلامپ را در آن مشاهده نمود. دلیل این افت را می توان در جنس کانی تراس و نیاز آبی زیاد آن جستجو نمود. در مورد میزان مصرف روانساز بتن های شاهد ، ساخته شده با پومیس و سرباره دارای مصرف تقریبا مشابهی می باشند. بعد از آن بتن ساخته شده با میکروسیلیس قرار می گیرد و در انتها بتن ساخته شده با تراس بالاترین مصرف روانساز را دارا می باشد. بتن ساخته شده با تراس علاوه بر افت زیاد، در جریان اسلامپ های بالای ۶۵ سانتیمتر دچار حالت آب انداختگی و جدایش می گردد و ظرفیت افزایش جریان اسلامپ را ندارد.پیشنهاد می گردد در مورد استفاده از تراس برای رسیدن به خواص بتن تازه بهتر، از عیار سیمان بالاتر به همراه درصد جایگزینی کمتر استفاده گردد و یا از نسبت های آب به سیمان بالاتر استفاده شود. که این دو مورد می تواند خواص دوامی و مقاومت فشاری بتن را دچار افت نماید. در مورد بتن های ساخته شده با میکروسیلیس به نظر می رسد می توان با کاهش نسبت آب به سیمان، ظرفیت بتن برای رسیدن به جریان اسلامپ های بیشتر را افزایش داد و همچنین باعث افزایش لزجت بتن گردید. در مورد بتن های ساخته شده با سرباره و پومیس می توان با کاهش نسبت آب به سیمان و همچنین افزایش درصد مواد جایگزین بتنی با ظرفیت و لزجت بیشتر تولید نمود.

۵- مقاومت فشاری :

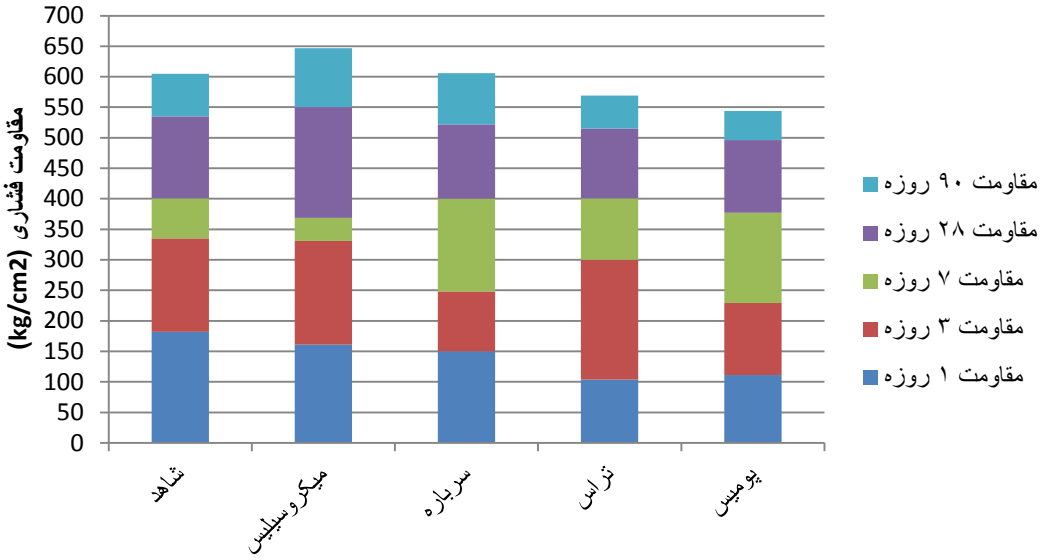
مقاومت فشاری طرح ها در سنین ۱روزه ، ۳ روزه ، ۷ روزه ، ۲۸ روزه و ۹۰ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت.

لازم به ذکر است که آزمونه های مقاومت فشاری به صورت مکعبی و به ابعاد ۱۰*۱۰*۱۰ سانتیمتر می باشند. نتایج مقاومت فشاری آزمونه‌ها در جدول شماره ۷ به شرح ذیل می باشد.

جدول ۷-نتایج مقاومت فشاری

کد طرح	ماده جایگزین	مقاومت ۱ روزه (kg/cm2)	مقاومت ۳ روزه (kg/cm2)	مقاومت ۷ روزه (kg/cm2)	مقاومت ۲۸ روزه (kg/cm2)	مقاومت ۹۰ روزه (kg/cm2)
1	شاهد	182	335	401	534	12
2	میکروسیلیس	161	331	369	549	647
3	سرباره	150	247	400	522	607
4	تراس	104	300	402	535	569
5	پومیس	112	229	377	496	544

نمودار ۲- مقاومت فشاری نمونه ها



با بررسی نتایج مقاومتی در جدول شماره ۷ و نمودار شماره ۲ به این نتیجه می رسیم که روند رشد مقاومت در بتن شاهد و بتن ساخته شده با میکروسیلیس از تمامی بتن های دیگر سریع تر می باشد. همچنین بتن شاهد در مقاومت اولیه بالاترین نتایج را به دست می دهد. بعد از ان بتن ساخته شده با میکروسیلیس و سرباره در مکان بعد قرار می گیرند که می توان دلیل آن را فعالیت پوزولانی بیشتر میکروسیلیس و خاصیت سیمانی سرباره دانست. رشد مقاومتی بتن ساخته شده با سرباره در سنین اولیه کمتر از بتن شاهد و بتن دارای میکروسیلیس بوده ولی از سن ۷ روز تا۹۰ روز با شیب بیشتری در رشد این اختلاف را جبران می نماید. رشد مقاومتی این دو بتن در سن ۲۸ روز متوقف نشده و تا سن ۹۰ روز نیز شاهد رشد مقاومتی آن ها می باشیم که نشانگر این مطلب می باشد که فعالیت پزولانی میکروسیلیس و سرباره کماکان بعد از سن ۲۸ روز نیز ادامه دارد. در نهایت مقاومت فشاری بتن دارای میکروسیلیس از سن ۲۸ روز از بتن شاهد و بتن ساخته شده با سرباره پیشی گرفته و تا سن ۹۰ روز بالاترین مقاومت را کسب می نماید. مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سرباره نیز همزمان با بتن شاهد به رشد خود ادامه داده و در سن ۹۰ روز مقاومت یکسانی با بتن شاهد کسب می کند. در مرحله بعد بتن های ساخته شده با پومیس و تراس قرار می گیرند که بتن ساخته شده با تراس از لحاظ روند رشد مقاومتی از بتن ساخته شده با پومیس سریع تر می باشد لیکن روند رشد مقاومتی آن از سن ۲۸ تا۹۰ روز کاهش می یابد. در حالی که بتن ساخته شده با پومیس در کلیه سنین روند رشد مقاومتی آن ثابت بوده ولی از سن ۲۸ تا ۹۰ روز روند رشد مقاومت آن کاهش می یابد. در نهایت بتن ساخته شده با تراس با اختلاف کمی در بالای بتن ساخته شده با پومیس قرار می گیرد.نکته جالب در باب مقاومت فشاری به بتن شاهد مربوط می گردد که با وجود اینکه فاقد پوزولان می باشد روند رشد مقاومتی آن در سن ۲۸ روز متوقف نشده و تا ۹۰ روز نیز ادامه می یابد. به نظر می رسد که پودر سنگ اهک موجود در آن باعث این موضوع بوده و فعالیت آهکی ان باعث ادامه رشد مقاومتی بعد از سن ۲۸ روز باشد.

۶- نفوذ پذیری :

نفوذپذیری بتن ها را با اندازه گیری دو مولفه مقاومت الکتریکی سطحی و آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلراید(RCMT) برای تمامی طرح ها مورد بررسی قرار می دهیم. این دو آزمایش به ریزساختار بتن مرتبط می باشد و رابطه مستقیم با نفوذپذیری بتن و یا به تعبیری دوام بتن دارد.

۶-۱- مقاومت الکتریکی سطحی:

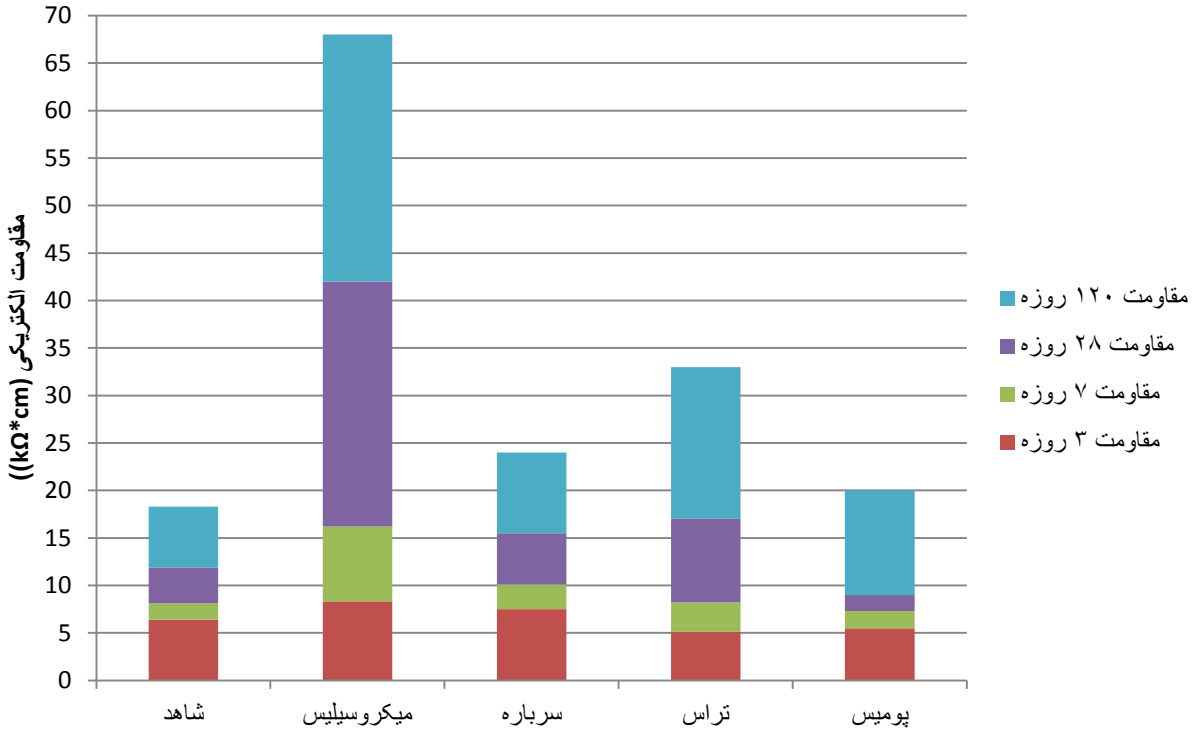
مقاومت الکتریکی سطحی آزمونه ها در سنین ۳ روزه ، ۷ روزه ، ۲۸ روزه و ۱۲۰ روزه آزمایش گردیده که میزان آن برای هر طرح در جدول شماره ۸ درج گردیده است. دستگاه مقاومت الکتریکی از نوع چهار پراپ بوده که در شکل شماره ۲ نمایش داده شده است.

شکل ۲-دستگاه مقاومت الکتریکی سطحی

جدول ۸ – نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی

کد طرح	ماده جایگزین	مقاومت الکتریکی ۳ روزه (cm*kΩ)	مقاومت الکتریکی۷ روزه (cm*kΩ)	مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه (cm*kΩ)	مقاومت الکتریکی۱۲۰ روزه (cm*kΩ)
1	شاهد	6.4	8.1	11.9	18.3
2	میکروسیلیس	8.3	16.2	42	68
3	سرباره	7.5	10.1	15.5	24
4	تراس	5.1	8.2	17	33
5	پومیس	5.5	7.3	9	20

نمودار ۳ – مقاومت الکتریکی سطحی



طبقه بندی ارائه شده توسط FM 5-578 [6] برای مقاومت الکتریکی های مختلف را در جدول شماره ۹ مشاهده می کنیم.

جدول ۹-طبقه بندی نفوذ پذیری

مقاومت الکتریکی (kΩ*cm)	نفوذپذیری
<12	زیاد
12-21	متوسط
21-37	کم
37-254	خیلی کم
>254	قابل صرف نظر

با بررسی جداول شماره ۸ و ۹ و نمودار شماره ۳ در خصوص مقاومت الکتریکی می توان گفت که بتن ساخته شده با میکروسیلیس با اختلاف زیاد در تراز بتن های با نفوذپذیری خیلی کم نسبت به سایر بتن ها قرار می گیرند. دلیل این امر کوچکی زیاد ابعاد ذرات میکروسیلیس در مقایسه با سیمان و سایر مواد جایگزین و همچنین فعالیت پوزولانی بالای این ماده می باشد[7,8]. در بتن ساخته شده با میکروسیلیس مقاومت الکتریکی با شیب زیاد به عدد ۴۲ در سن ۲۸ روز رسیده و بعد از آن با شیب ملایمی به رشد خود ادامه می دهد. می توان اینگونه نتیجه گیری نمود که میکروسیلیس تا سن ۲۸ روز به فعالیت بالای ۶۰ درصدی خود رسیده است. در گام بعد تراس قرار می گیرد که با روند خطی تا سن ۱۲۰ روز رشد مقاومت الکتریکی آن ادامه دارد. به نظر می رسد که تراس در سن ۲۸ روز به حدود ۵۰ درصد فعالیت خود رسیده است. این روند رشد در مورد بتن ساخته شده با سرباره ، پومیس و بتن شاهد نیز صادق می باشد. بتن ساخته شده با پومیس در سنین اولیه دارای مقاومت الکتریکی سطحی کمتری نسبت به نمونه شاهد می باشد ولی از سن ۲۸ روز به بعد از بتن شاهد پیشی می گیرد .

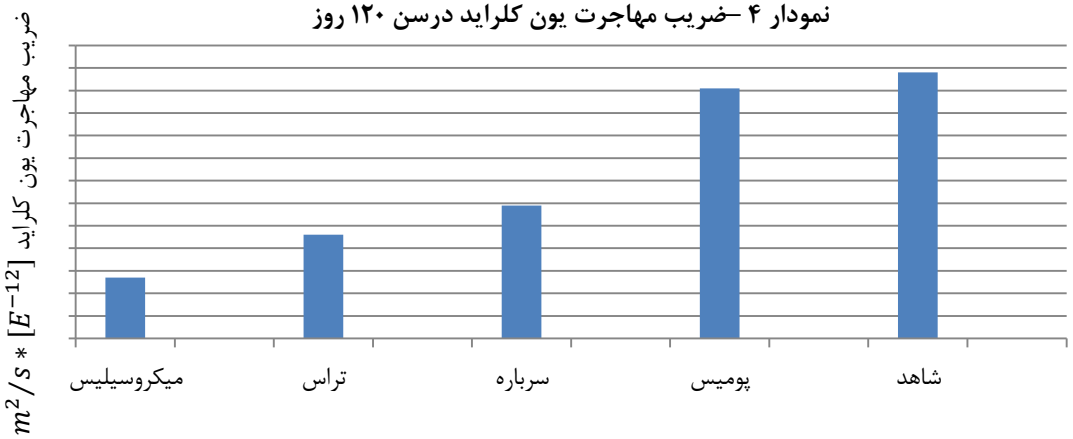
۶-۲- آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلراید(RCMT) :

آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلراید(RCMT) فقط در سن ۱۲۰ روز برروی نمونه ها انجام گرفت. دلیل انتخاب سن ۱۲۰ روز برای انجام آزمایش RCMT فعالیت پوزولانی بیشتر مواد جایگزین می باشد. ضریب انتشار غیر استاتیک که در جداول و نمودارهای مرتبط به اختصار ضریب مهاجرت نامیده می شود بر اساس استاندارد NT BUILD 492 [7] محاسبه و نتایج آن درج گردیده است.

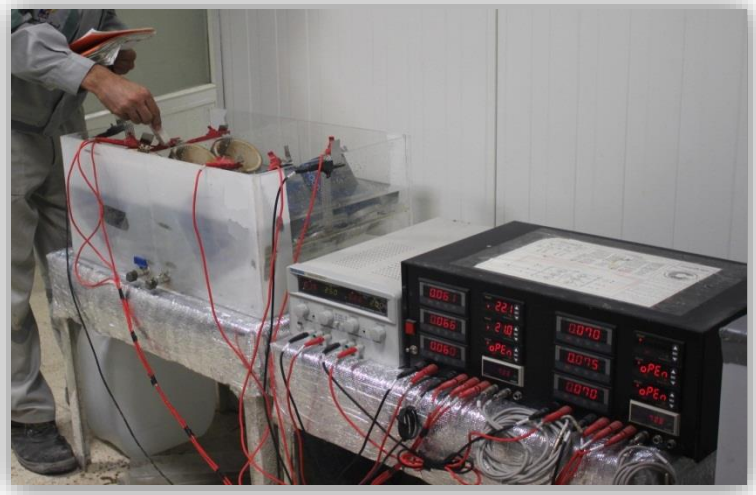
جدول ۱۰- نتایج آزمایش RCMT

کد طرح	ماده جایگزین	ضریب مهاجرت $m^2/s * [E^{-12}]$
1	شاهد	1.18
2	میکروسیلیس	0.27
3	سرباره	0.59
4	تراس	0.46
5	پومیس	1.11

نمودار ۴ –ضریب مهاجرت یون کلراید درسن ۱۲۰ روز



شکل ۳-دستگاه آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلراید(RCMT)



هر چه ضریب مهاجرت یون کلراید در بتن کمتر باشد به این معنی است که برای رسیدن به عمق نفوذ یون کلراید ثابت، نیاز به صرف زمان بیشتری می باشد که این همان مفهوم طول عمر سازه از منظر دوام می‌باشد.

۷- مدل پیش‌نهادی برای ارتباط دو آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی و RCMT:

در گذشته آزمایش های مقاومت الکتریکی و RCMT برای بتن های مختلف با فرضیات زیر در سنین مختلف از ۲۸ تا ۱۸۰ روز در این واحد آزمایشگاهی انجام شده و از آن مدل زیر بدست آمده است. حال با بررسی این مدل بر روی نمونه های این مقاله به این نتیجه می‌رسیم که مدل ارایه شده با خطای ٪۱۵± مدل قابل قبولی است و احتمالا بتوان از آن برای پیش بینی عدد ضریب مهاجرت یون کلراید با در اختیار داشتن مقاومت الکتریکی سطحی استفاده کرد. تنها سرباره به درستی از این مدل پیروی نمی‌کند که شاید دلیل آن وجود آلومینیوم در سرباره باشد.

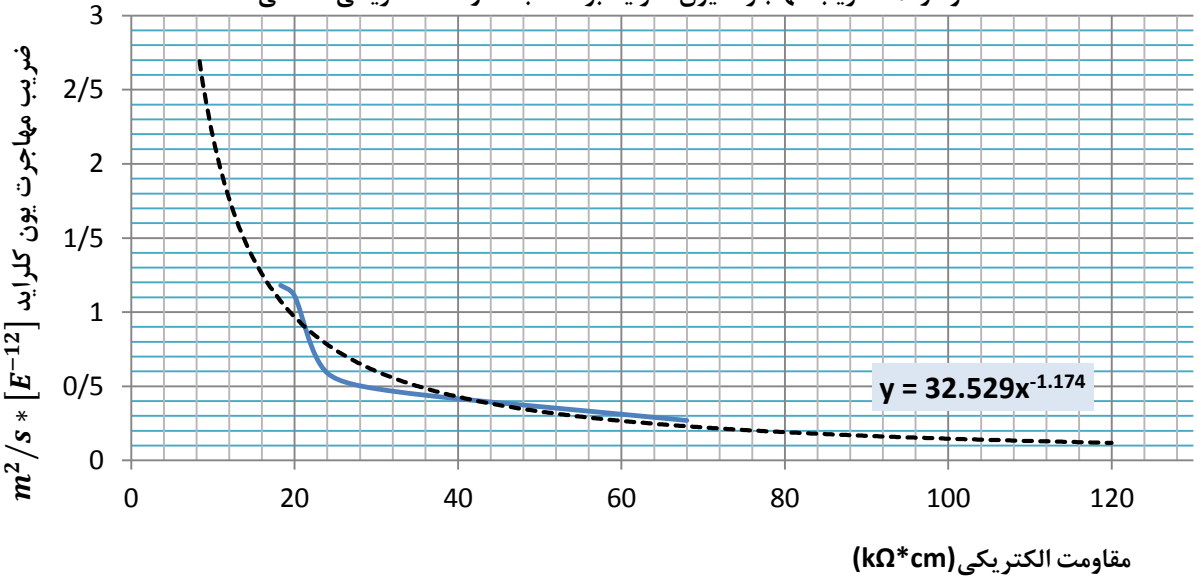
فرضیات مدل ارایه شده: سیمان ۴۲۵- ۱، نسبت آب به سیمان از ۰,۳۴ تا ۰,۴ ، بتن خودتراکم.

مدل پیشنهادی:

$$Y = 32.529X^{-1.174}$$

Y= ضریب مهاجرت یون کلراید ، X= مقاومت الکتریکی

نمودار ۵- ضریب مهاجرت یون کلراید بر حسب مقاومت الکتریکی سطحی



در نمودار شماره ۵ منحنی نقطه چین بیانگر مدل پیشنهادی است و نمودار دوم نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این مقاله می‌باشد. قسمتی از نمودار دوم که انحراف بیشتری از مدل ارایه شده دارد مربوط به جایگزینی سرباره بوده است. این موضوع بیانگر این مطلب است که اگر مقاومت الکتریکی بتن سرباره ای پایین باشد بر خلاف انتظار از مدل ارایه شده دارای ضریب مهاجرت یون کلراید کمتری می باشد. این نشان دهنده عملکرد خوب سرباره در محیط های مهاجم کلرایدی است.

سهولت، غیر مخرب بودن و امکان استفاده از یک سری نمونه بتنی تا پایان دوره آزمایش از ویژگی های خوب آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی است که مدل ارایه شده می‌تواند میزان نفوذ یون کلراید در بتن را با صرف زمان و هزینه کمتر، پیش‌بینی نماید.

۸- تفسیر نتایج :

- مقاومت فشاری بتن های تولید شده به علت دارا بودن نسبت آب به سیمان یکسان تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند. بین بالاترین مقاومت کسب شده در سن ۹۰ روز و کمترین مقاومت بدست آمده ۱۰۰ $kg/cm2$ اختلاف وجود دارد. تفاوت مقاومت بین سایر بتن ها نیز کمتر از این مقدار می باشد.

- مقاومت الکتریکی سطحی بدست آمده برای میکروسیلیس در مقایسه با سایر نتایج نشان از فعالیت پوزولانی زیاد میکروسیلیس داشته و بعد از آن پوزولان های دیگر فعالیت پوزولانی در تراز ۵۰ درصد میکروسیلیس و کمتر از آن دارند.

– در بررسی ضرایب مهاجرت یون کلر بتن های تولیدی، روند نتایج بدست آمده برای مقاومت الکتریکی سطحی تکرار می گردد و می توان گفت که بین نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی و آزمایش RCMT رابطه عکس وجود دارد. در صورت استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان با در نظر گرفتن خطای کمی و استفاده از نتایج مقاومت الکتریکی به میزان نفوذ یون کلراید دست یافت. بتن ساخته شده با میکروسیلیس دارای کمترین مقدار نفوذپذیری بوده و بعد از آن به ترتیب تراس جاجرود، سرباره، پومیس و در آخر بتن شاهد نفوذپذیرترین بتن می باشد.

۹- نتیجه گیری وپیشنهادهای آتی :

- با جمع بندی نتایج خواص بتن تازه و سخت شده می توان به این نتیجه رسید که در بین مواد جایگزین سیمان استفاده شده، میکروسیلیس در مجموع خواص بتن تازه و سخت شده بهترین نتایج را داشته و در صورتی که از مشکلات حمل و نقل و تخلیه و هزینه تمام شده آن صرف نظر شود گزینه اول می باشد. تراس جاجرود در خواص بتن سخت شده در رتبه دوم قرار می گیرد ولی با توجه به مشکلات ذکر شده در بخش بتن تازه و ایجاد مشکلات اجرایی ، باید برای استفاده از آن دست به تغییراتی در طرح اختلاط زد. بتن تولید شده با سرباره از نظر خواص بتن تازه در محدوده قابل قبول بوده و درمورد خواص بتن سخت شده نیز نمره متوسطی کسب می نماید. بتن تولید شده با پومیس بهترین خواص بتن تازه را در بین سایر بتن ها دارا می باشد ولی از نظر خواص بتن سخت شده در رتبه آخر قرار می گیرد. می توان با افزایش درصد جایگزینی سرباره و پومیس در بتن تولیدی، خواص دوامی این بتن ها را نیز بهبود بخشید.

- پیشنهاد می‌گردد در طرح های آتی میزان بهینه جایگزینی پوزولان‌های مختلف با یکدیگر مقایسه گردد و مقاومت الکتریکی سطحی و RCMT آن‌ها با رابطه ارایه شده بررسی و نهایتا رابطه جامع تری ارایه گردد.درصد جایگزینی استفاده شده در مورد میکروسیلیس و تراس جاجرود تقریبا بهینه بوده و احتمالا در مورد پومیس خاش جایگزینی ۲۰ تا ۲۵ درصد و سرباره ۲۵ تا ۳۰ درصد بهینه باشد.

۱۰- تشکر و قدردانی

نگارندگان در پایان از زحمات مدیر عامل محترم گروه تخصصی شهید رجایی، جناب آقای عباس اکبری و سرپرست محترم کارگاه پل بزرگراه طبقاتی شهید صدر، مهندس جواد فلاح و سرپرست محترم کارخانه تولید قطعات بتنی شهید رجایی، مهندس موسی نجفی و همچنین آقایان مهندس علی کاظمیان، مهندس محمد سیفی و مهندس مسلم درویشی که ما را در تهیه این مقاله یاری نموده اند تشکر می‌نمایند.

۱۱- منابع :

[1] رمضانیان پور، ع.، کاظمیان، ع. "مروری بر نفوذناپذیری و مقاومت بتن خودتراکم در برابر نفوذ یون کلراید در مقایسه با بتن معمولی"، چهارمین سمینار ملی بتن خودتراکم ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، اسفند ۱۳۹۱ (ارایه شفاهی)

[2] P.K.Mehta "siliceous ashes and hydraulic cements prepared therefrom" , us patent , 4105459 , august1978

[3] ACI237R-07 , "Self-consolidating Concrete", American Concrete Institute, 2007.

[4] شکرچی زاده، م.،علی لیبر،ن. ،خوش نظر، راحیل. ،کمالی نژاد ،اسرا.،" بررسی روش های متداول طرح مخلوط بتن خود تراکم"، چهارمین سمینار بتن خودتراکم ایران، اسفند ۱۳۹۱

[5] Nagataki, S., Kawat, T., Fujiwara, H., "State of the Art Report on SCC in japan",6th International RILEM Symposium on self Compacting Concrete, Montreal, Canada, 2010

[6] FM 5-578. (2004). "Florida mettod of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability

[7] CONCRETE, MORTAR AND CEMENT-BASED REPAIR MATERIALS: UDC 691.32/691.53/691.54 CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS

[8]رمضانیان پور، ع.،کاظمیان،ع ،" کاربرد مواد جایگزین سیمان در بتن خودتراکم و نقش آنها در توسعه پایدار"، چهارمین سمینار بتن خودتراکم ایران، اسفند ۱۳۹۱

[9]رمضانیان پور، ع.، کاظمیان، ع. "مروری بر جایگاه مواد جایگزین سیمان بر دوام بتن خودتراکم"، چهارمین سمینار ملی بتن خودتراکم ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، اسفند ۱۳۹۱ (ارایه شفاهی)