

## بررسی نتایج آزمایش هدایت الکتریکی و مقاومت فشاری در بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان خاش

### و سرباره کوره آهن‌گدازی

امیرخانی، محسن تدین؛ محمدابراهیم کیانی فر؛ سید محمد سجادی عطار<sup>۴</sup>

- ۱- کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی شاهرود- دفتر فنی پروژه خط ۳ مترو مشهد
- ۲- عضو هیئت علمی بازنشسته دانشگاه بوعلی سینا همدان - رییس هیئت مدیره مهندسی مشاور سیناب غرب
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست دانشگاه خاوران- مسئول آزمایشگاه بتن صنایع شیمیایی ژیکوآوا
- ۴- مربی دانشکده شهید منتظری مشهد و مدیر آزمایشگاه کنترل کیفیت خط دوقطار شهری مشهد

### چکیده

بتن خودتراکم می‌تواند به عنوان یکی از بتن‌های نوینی مطرح شود که بدون جداشدگی سنگ دانه یا آب انداختگی و بدون نیاز به عمل تراکم، قابلیت پرکنندگی فضاهای خالی میان آرماتورها را دارد. این نوع بتن به دلیل قابلیت‌های صنعتی و اقتصادی می‌تواند به کمک مواد پوزولانی که خود نقش مهمی در افزایش مقاومت و دوام سازه‌های بتنی دارند، ساخته شود. در تحقیق حاضر ۱۸ طرح مخلوط بتن خودتراکم با جایگزینی‌های دو نوع پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی در سه نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۴۰، ۰٫۴۵، ۰٫۵۰ به همراه طرح مخلوط شاهد ساخته شد و سپس نمونه‌ها مورد آزمایش‌های هدایت الکتریکی و مقاومت فشاری قرار گرفتند و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی سبب افزایش مقاومت فشاری و کاهش هدایت الکتریکی در نمونه‌های بتن خودتراکم گردیده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد جایگزینی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان ماده جایگزین سیمان سبب بهبود رفتار مکانیکی و دوام در بتن‌های خودتراکم گردیده است.

**کلمات کلیدی:** بتن خودتراکم، دوام بتن، هدایت الکتریکی، مقاومت فشاری

amirkhani62@yahoo.com

### ۱. مقدمه

در اوایل دهه هشتاد میلادی به دنبال کاهش نیروی کار ماهر و تراکم نامناسب ناشی از افزایش حجم آرماتورهای مصرفی به تبع عملکرد بهتر سازه‌ای که باعث کاهش کیفیت کارهای اجرایی شد، باعث شد تا نظریه بتن خودتراکم به عنوان راه حلی برای رفع مشکل دوام سازه‌های بتنی به وسیله اوکامورا در سال ۱۹۸۶ مطرح شود [۱].

استفاده از انواع پوزولان به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین بالا و دوام بتن نظیر نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد [۲].

Diamantonis و همکاران تاثیر مواد پوزولانی را در ویسکوزیته بتن خودتراکم بررسی کرده و نشان دادند که افزودن مواد پوزولانی سبب بهبود رفتار

مشخصات بتن تازه می‌گردد [۳].

Deboucha و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیرات پوزولان طبیعی و خاکستر کوره آهن گدازی به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که جایگزین کردن این مواد با بخشی از سیمان مصرفی علاوه بر کاهش هزینه‌ها، ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشد. [۴].

بنابراین می‌توان گفت که استفاده کمتر از سیمان به منظور کاهش آلاینده‌ها مفید به نظر می‌رسد. البته کاهش سیمان می‌تواند اثر قابل توجهی در مشخصات مکانیکی و دوامی بتن داشته و باید در استفاده سیمان و پوزولان در کنار یکدیگر توجه ویژه‌ای به عمل آید.

در تحقیق حاضر سعی شد تا با مبنای قرار دادن دو شاخص مهم از خصوصیات مکانیکی و خصوصیات دوامی بتن، ضمن بررسی تأثیر سرباره کوره آهن گدازی و پوزولان خاش در بتن خودتراکم، آلاینده‌گی هر یک از طرح‌ها رو بررسی کرده و طرح‌های منتخب گزارش شوند.

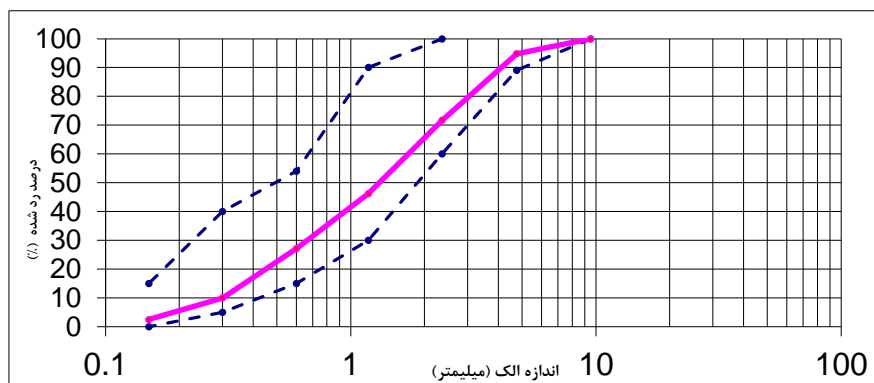
## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح مصرفی

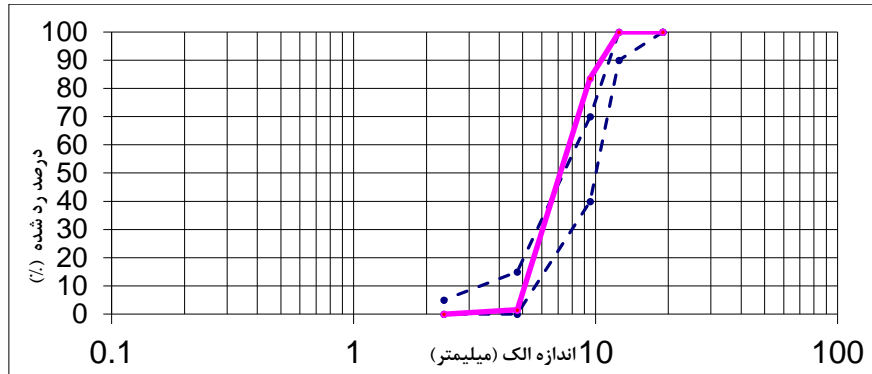
#### ۱.۱.۲. سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه‌ها نسبتاً ارزان‌اند و با آب واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌ای برقرار نمی‌سازند؛ بنابراین مرسوم است که سنگ‌دانه‌ها به عنوان پرکننده خنثی در بتن تلقی گردند. سنگ‌دانه‌های معدنی طبیعی مهم‌ترین طبقه‌ی سنگ‌دانه‌ها را برای ساخت بتن سیمان پرتلندی تشکیل می‌دهند [۵].

درشت‌دانه مصرفی در این پژوهش از نوع شکسته با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه با وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه‌بادی با وزن مخصوص ۲۶۸۵ استفاده شد. همچنین از پودر سنگ آهکی با وزن مخصوص ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز استفاده گردید. در نمودار ۱ و ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه و شن نخودی و در نمودار ۳ منحنی ترکیبی دانه‌بندی و همچنین در جدول شماره ۱ سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی نیز آورده شده است.



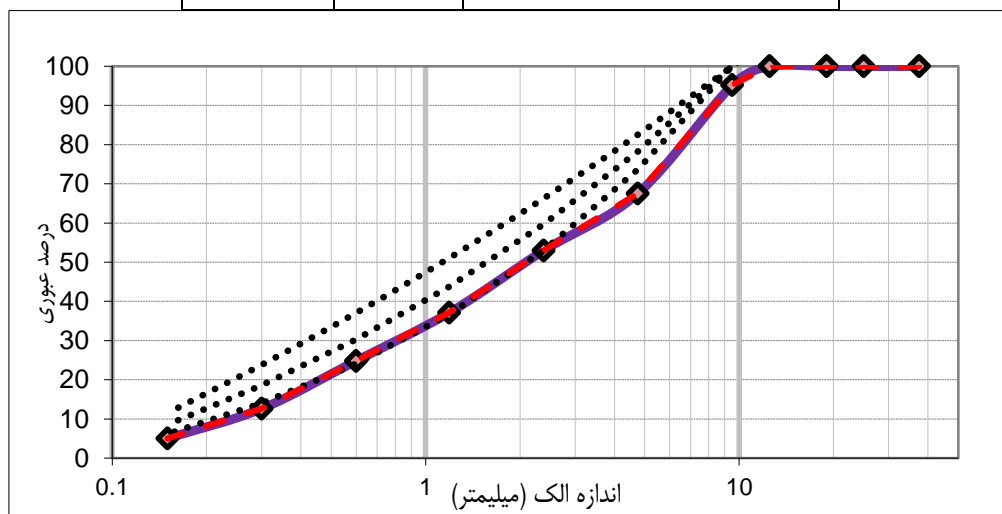
نمودار ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه



نمودار ۲: منحنی دانه‌بندی شن نخودی

جدول ۱: سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی مصالح

مدول نرمی	سهم	مصالح
FM		
۷,۰۹	۰,۰۰	شن متوسط (بادامی)
۶,۱۳	۳۰	شن ریز (نخودی)
۳,۴۸	۶۰	ماسه
۱,۳۹	۴	ماسه‌بادی
۱,۰۷	۶	پودر سنگ
۴,۰۵	۱۰۰	ترکیب سنگ‌دانه‌ها



نمودار ۳: منحنی دانه‌بندی ترکیبی مصالح

### ۲.۱.۲ آب

آب مصرفی جهت ساخت بتن از آب آشامیدنی شهر چناران با  $PH=7.5$  استفاده گردید.

### ۳.۱.۲ فوق روان کننده

فوق روان کننده مصرفی در این پژوهش از نوع پلی کربوکسیلات بوده و مشخصات دقیق آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات فوق روان کننده

کد تجاری	PH	درصد مواد خشک	چگالی	رنگ
ZP-PF2	۴,۹۸	۴۹,۵٪	۱,۰۹	قهوه‌ای

### ۴.۱.۲ پوزولان

پوزولان‌های استفاده شده در این پژوهش از مناطق مختلف ایران تهیه شده‌اند و آنالیز شیمیایی هر یک از مواد سیمانی در جدول ۳ مشخص شده است.

جدول ۳: آنالیز شیمیایی مواد سیمانی

نام	$SiO_2\%$	$Al_2O_3\%$	$Na_2O\%$	$K_2O\%$	CaO%	$Fe_2O_3\%$	L.O.I
پوزولان خاش	۵۷,۹۸	۱۶,۸۹	۲,۹۲	۱,۹۶	۱۰,۰۲	۴,۵۱	۲,۳۲
سرباره	۳۷,۹۵	۱۱,۰۲	۰,۶۵	۱,۱۲	۳۷,۴۲	۰,۷۹	۰,۰۱

### ۵.۱.۲ سیمان

سیمان پرتلند مصرف شده در این پروژه، پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان بجنورد است که ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی آن در جدول ۴ درج شده است.

جدول ۴: مشخصات سیمان مصرفی

آنالیز شیمیایی (%)								مشخصات فیزیکی	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	LOI	بلین (Cm <sup>2</sup> /g)	وزن ویژه
۲۱,۵۷	۴,۶۴	۳,۶۳	۶۴,۰۸	۱,۹۶	۱,۸۱	-	-	۳۱۶۳	۳,۱۵

## ۲.۲. طرح مخلوط و نحوه ساخت و عمل آوری

طرح مخلوط بتن باید به گونه‌ای طراحی گردد که بتواند تمامی ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را برآورده نماید. در ابتدای هر روز درصد رطوبت مصالح گرفته شده و پس از توزین مصالح، ابتدا سنگ‌دانه‌ها و پودر سنگ آهکی درون مخلوط کن ریخته شد و پس از یک دقیقه چرخیدن مخلوط کن و یکنواخت شدن مصالح، سیمان و پوزولان و در انتها آب نیز به طرح اضافه گردید. فوق روان کننده به عنوان تنها پارامتر متغیر طرح‌ها با توجه به رسیدن اسلامپ فلو در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتیمتر به طرح‌ها اضافه می‌گردید. سپس آزمایش‌های اسلامپ فلو، T50، حلقه لوجبه L نیز صورت گرفتند. همچنین جدایش‌های دانه‌ها و آب انداختگی بتن به صورت چشمی کنترل گردید. نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C192 پس از ۲۴ ساعت عمل آوری در قالب و با یک لایه روکش پلاستیکی بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه‌های آب با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند. طرح‌های مخلوط در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: طرح مخلوط نمونه‌ها

نام طرح مخلوط	نسبت آب به سیمان	نام پوزولان	درصد جایگزینی نسبت به سیمان	عیار سیمان $Kg/m^3$	مقدار فوق روان کننده $gr/m^3$
N ۱	۰.۴۰	خاش	۱۵٪	۴۵۰	۲۱۸۷.۵
N ۲	۰.۴۵	خاش	۱۵٪	۴۵۰	۱۵۶۲.۵
N ۳	۰.۵۰	خاش	۱۵٪	۴۵۰	۱۳۱۲.۵
N ۴	۰.۴۰	خاش	۲۵٪	۴۵۰	۲۸۱۲.۵
N ۵	۰.۴۵	خاش	۲۵٪	۴۵۰	۲۰۳۱.۲۵
N ۶	۰.۵۰	خاش	۲۵٪	۴۵۰	۱۷۱۸.۷۵
N ۷	۰.۴۰	خاش	۳۵٪	۴۵۰	۵۶۲۵
N ۸	۰.۴۵	خاش	۳۵٪	۴۵۰	۳۱۲۵
N ۹	۰.۵۰	خاش	۳۵٪	۴۵۰	۱۸۷۵
N ۱۰	۰.۴۰	سرباره	۲۵٪	۴۵۰	۳۱۵۶.۲۵
N ۱۱	۰.۴۵	سرباره	۲۵٪	۴۵۰	۲۵۰۰
N ۱۲	۰.۵۰	سرباره	۲۵٪	۴۵۰	۱۸۷۵

N ۱۳	۰،۴۰	سرباره	۳۵٪	۴۵۰	۳۷۵۰
N ۱۴	۰،۴۵	سرباره	۳۵٪	۴۵۰	۳۷۵۰
N ۱۵	۰،۵۰	سرباره	۳۵٪	۴۵۰	۲۱۸۷،۵
N ۱۶	۰،۴۰	سرباره	۱۵٪	۴۵۰	۱۷۸۱،۲۵
N ۱۷	۰،۴۵	سرباره	۱۵٪	۴۵۰	۱۷۸۱،۲۵
N ۱۸	۰،۵۰	سرباره	۱۵٪	۴۵۰	۱۸۷۵
N ۱۹	۰،۴۰	شاهد	-	۴۵۰	۱۴۶۸،۷۵
N ۲۰	۰،۴۵	شاهد	-	۴۵۰	۱۲۵۰
N ۲۱	۰،۵۰	شاهد	-	۴۵۰	۵۶۲،۵

### ۳. بحث و بررسی

#### ۱.۳. خواص بتن تازه

به منظور بررسی ویژگی های رئولوژی بتن خودتراکم؛ آزمایش های جریان اسلامپ، T50، حلقه J و جعبه L نیز انجام پذیرفت. همچنین نتایج آن در جدول ۶ ارائه گردیده است.

جدول ۶: نتایج آزمایش های بتن تازه

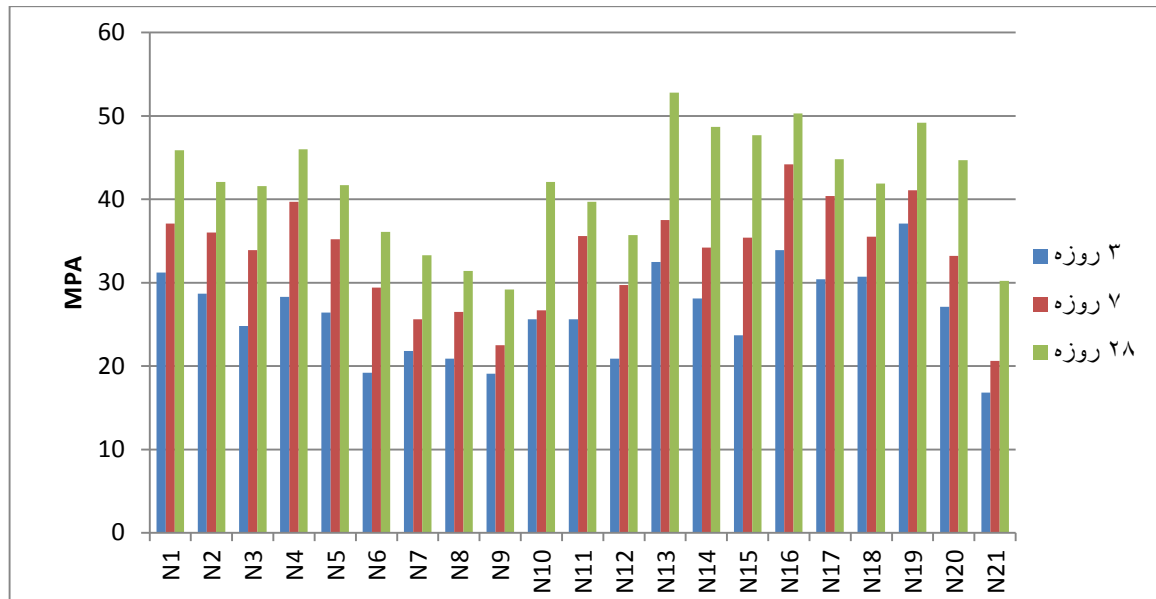
نام طرح	جریان اسلامپ (cm)	T50(sec)	حلقه J (cm)	جعبه L
N۱	۷۶	۴۰۷	۶۹	۰،۹۴
N۲	۶۰،۵	۳۰۷	۵۳	۰،۸۹
N۳	۵۸	۳۰۳	۵۲،۵	۰،۸۸
N۴	۷۴،۵	۴۰۴	۶۸،۵	۰،۹۵
N۵	۷۴	۳۰۷	۶۵	۰،۹۱
N۶	۷۲،۵	۳۰۱	۶۱	۰،۸۹
N۷	۷۰	۳۰۸	۶۳	۰،۹۷

N۸	۷۰،۵	۳،۲	۶۱	۱
N۹	۶۷	۳،۱	۵۸	۰،۸۴
N۱۰	۷۰	۴،۶	۶۷	۰،۹۲
N۱۱	۶۷،۵	۴،۸۵	۶۱	۰،۸۷
N۱۲	۶۰	۵،۲	۵۷	۰،۸۲
N۱۳	۶۸،۵	۴،۷	۶۴	۰،۸۹
N۱۴	۵۷	۴،۸	۵۳	۰،۸۰
N۱۵	۵۵	۴،۶	۵۱	۰،۷۶
N۱۶	۶۶	۴،۷	۵۸	۰،۹۰
N۱۷	۷۳	۳،۵	۶۹	۰،۸۶
N۱۸	۶۰	۵،۱	۵۳	۰،۷۹
N۱۹	۶۶	۳،۲	۵۵	۰،۸۴
N۲۰	۵۷	۳،۵	۴۸	۰،۹۲
N۲۱	۵۶	۳،۸	۴۷،۵	۰،۸۴

### ۲.۳. آزمایش مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری نیز بر اساس استاندارد EN12390-3 توسط قالب‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه در شرایط استاندارد بر روی

نمونه‌ها انجام شد [۶]. نتایج آن را در شکل ۴ مشاهده می‌کنید.

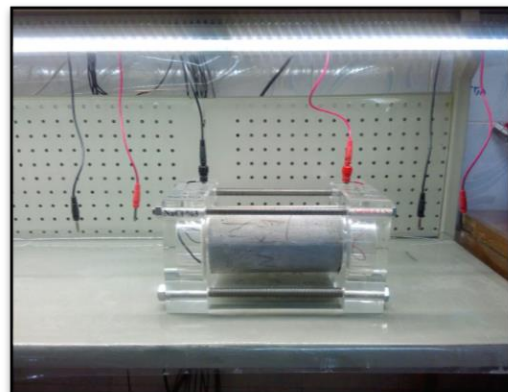


شکل ۴: مقاومت فشاری

همانطور که می دانیم با افزایش سن نمونه ها، مقاومت فشاری در نمونه ها افزایش یافته است. بیشترین نتایج مقاومت فشاری در شکل ۴ مربوط به طرح مخلوط بتن خودتراکم حاوی ۳۵ درصد سرباره کوره آهن گدازی می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد که استفاده از پوزولان خاش و سرباره کوره آهن گدازی سبب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه های شاهد می باشد و با توجه به کاهش مصرف سیمان و جایگزینی آن با پوزولان خاش و سرباره کوره آهن گدازی سبب کاهش هزینه های ساخت بتن خودتراکم نیز می گردد.

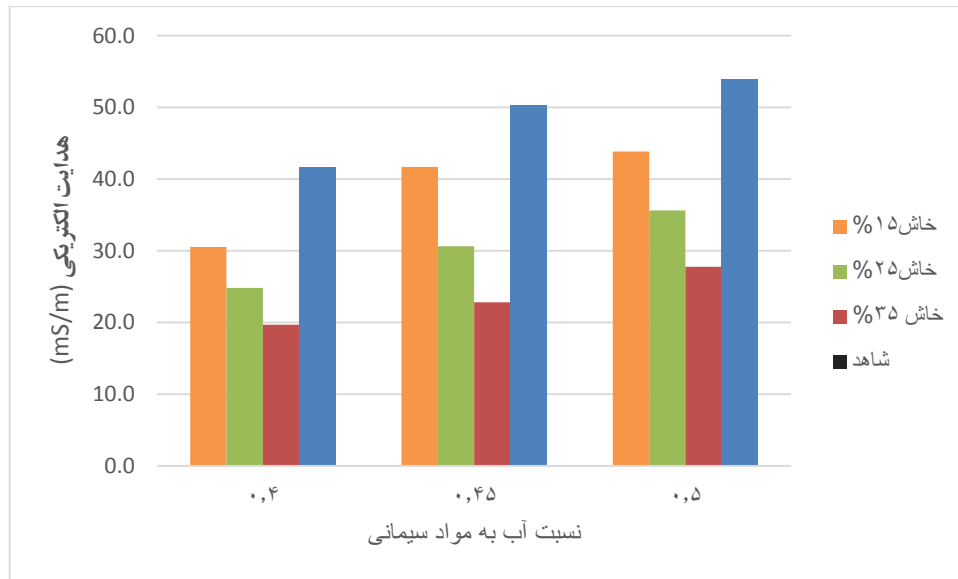
### ۳.۳. آزمایش هدایت الکتریکی

آزمایش هدایت الکتریکی طبق استاندارد ASTM C1760 انجام می شود. مقدار کل هدایت الکتریکی از یک نمونه اشباع شده بتن تحت اختلاف ولتاژ ۶۰ ولت در طی مدت ۱ دقیقه اندازه گیری می شود و فرض بر این است که عبور جریان از نمونه، از طریق محلول منفذی بتن که به عنوان الکترولیت عمل می کند، صورت می گیرد [۷]. شکل ۵ نمایی از آزمایش و دستگاه هدایت الکتریکی را نشان می دهد. شکل ۶ و ۷ بیانگر نتایج این آزمایش می باشد.

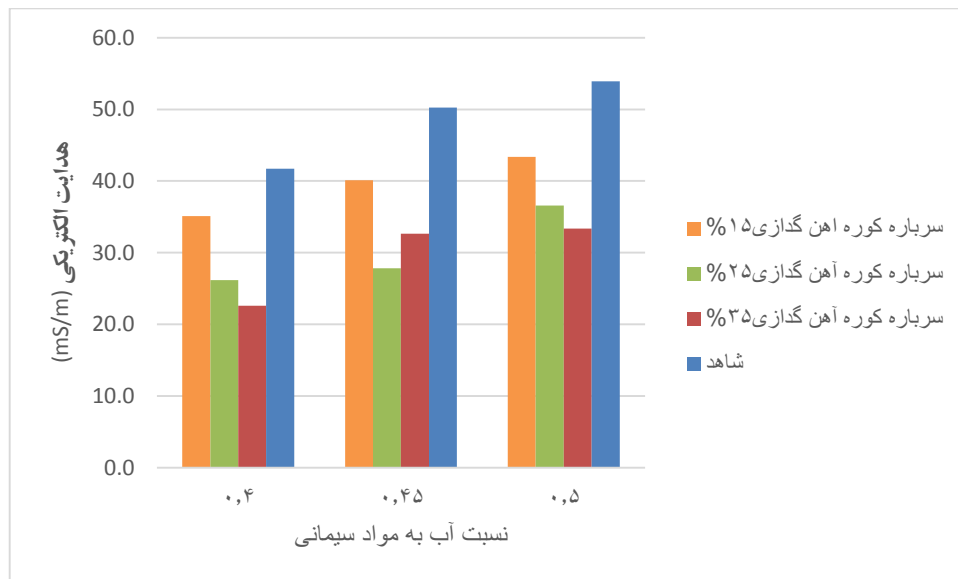


شکل ۵: دستگاه آزمایش هدایت الکتریکی





شکل ۶: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن گدازی



شکل ۷: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن گدازی

با بررسی نتایج آزمایش هدایت الکتریکی شاهد آن هستیم که استفاده از پوزولان خاش و سرباره کوره آهن گدازی سبب کاهش هدایت الکتریکی در نمونه ها گردیده است. همچنین نتایج نشان می دهد که در بتن های خودتراکم حاوی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن گدازی با افزایش مصرف پوزولان به عنوان ماده جایگزین سیمان سبب کاهش هدایت الکتریکی گردیده است و نتایج دوامی بتن بهبود یافته است. افزایش نسبت آب به مواد سیمانی سبب افزایش هدایت الکتریکی در نمونه های بتن خودتراکم گردیده است و توصیه می گردد جهت تولید بتن خودتراکم از نسبت های آب به مواد سیمانی پایین تر استفاده گردد.

#### ۴. نتیجه گیری

بر اساس آزمایش های انجام شده و با استفاده از تجزیه و تحلیل، نتیجه گرفته می شود:

- ۱- نتایج جریان اسلامپ نشان می دهد که بتن های خودتراکم در محدوده اسلامپ ۵۵ الی ۷۵ سانتی متر ساخته شده اند. به طور کلی از آزمایش های بتن تازه می توان نتیجه گرفت که استفاده از پوزولان ها سبب بهبود رئولوژی بتن نسبت به نمونه های شاهد گردیده است.
- ۲- نتایج مقاومت فشاری در بتن های خودتراکم حاوی پوزولان خاش در درصدهای مصرف ۱۵ و ۲۵ درصد دارای حدود میانگین مقاومتی یکسانی می باشد و در بتن های با مصرف ۳۵ درصد پوزولان خاش شاهد کاهش مقاومت فشاری می باشیم، لذا درصد مصرف بهینه استفاده از پوزولان خاش حدود ۲۰ درصد توصیه می گردد.
- ۳- با مقایسه نمودارهای مقاومت فشاری طرح های مخلوط حاوی سرباره کوره آهن گدازی شاهد آن هستیم که با افزایش مصرف سرباره کوره آهن گدازی مقاومت فشاری افزایش یافته و درصد مصرف بهینه استفاده از سرباره کوره آهن گدازی حدود ۲۵ درصد توصیه می گردد.
- ۴- نتایج آزمایش هدایت الکتریکی نشان می دهد که با افزایش درصد مصرف پوزولان های خاش و سرباره کوره آهن گدازی مقدار هدایت الکتریکی در نمونه ها نسبت به نمونه های شاهد کاهش یافته است.
- ۵- با بررسی کلی نتایج آزمایش هدایت الکتریکی شاهد آن هستیم که استفاده از پوزولان خاش و سرباره کوره آهن گدازی سبب کاهش مقدار هدایت الکتریکی از نمونه ها نسبت به نمونه های شاهد و بهبود مشخصات دوامی شده است.
- ۶- افزایش نسبت آب به مواد سیمانی سبب افزایش مقدار هدایت الکتریکی در نمونه ها گردیده است لذا جهت تولید بتن های خودتراکم توصیه می گردد از نسبت های آب به مواد سیمانی پایین تر استفاده گردد.
- ۷- طرح های مخلوط شامل ۳۵ درصد پوزولان سرباره کوره آهن گدازی دارای بیشترین مقاومت فشاری و همچنین کمترین مقدار هدایت الکتریکی در آزمایش هدایت الکتریکی بوده و به عنوان بهترین طرح مخلوط در این مطالعه گزارش می گردد.

#### تشکر و قدردانی

از جناب آقای مهندس محمدجواد طاهباز به خاطر راهنمایی هایشان سپاس گذاری می شود. همچنین از شرکت صنایع شیمیایی ژیکاو و تمامی کارکنان این شرکت به دلیل در اختیار گذاشتن تمامی امکانات آزمایشگاهی و انجام آزمایش ها کمال تشکر و قدردانی را داریم.

#### مراجع

[1] Skarendahl, A. and Petersson, O.(2001), "State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete", Report No.23, pp141 .

[۲] رمضانپان پور، ع.، پیدایش، م.، میرولد، س.، آرامون، ا.، مهدیخانی، م. (۱۳۸۸). " اثر انواع پوزولان طبیعی بر دوام بتن در برابر حمله کلرایدی"، اولین

کنفرانس ملی بتن، تهران.

[3] Diamantonis.N , Marinos.A , Katsiotis.M.S, Sakellariou.A , Papathanasiou.A , Kaloidas.V , Katsioti.M ,(2010), "Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self compacting concrete" , Construction and Building Materials, Article in Press.

[4] Deboucha, W., et al.(2015) "Effect of Incorporating Blast Furnace Slag and Natural Pozzolana on Compressive Strength and Capillary Water Absorption of Concrete". Procedia Engineering, 108: p 254-261.

[۵] رمضانپان پور، ع.، پیدایش، م.، (۱۳۹۲). " تکنولوژی بتن (مصالح، خواص، اجرا)"، جلد اول، چاپ اول، تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد

صنعتی امیرکبیر.

[6] BS EN12390-3.(2009), "Compressive strength of test specimens".

[7] ASTM C1760-12, "Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete".