

## Investigation of mechanical properties and permeability of concrete containing metakaolin, zeolite and fly ash with two and three compounds

Nozar Moradi<sup>1</sup>, Mohammad Hadi Tavana<sup>2\*</sup>, Mohammad Reza Habibi<sup>2</sup>, Moslem Amiri<sup>2</sup>

1- Ph.D. candidate, dept. civil engineering, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

2- Assistant Professor, dept. civil engineering, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

### ABSTRACT

In this study, different combinations of replacement of metakaolin, zeolite and fly ash in single, binary, and ternary mix designs were investigated in order to determine the optimal amount of suitable pozzolans. Fifty mix designs with constant water to cement ratio were made and the results of compressive strength, tensile strength, slump, specific gravity, water absorption, and electrical resistivity of concrete were recorded in order to evaluate the effect of type and amount of pozzolans and the effect of their compositions. The results showed that the highest amount of compressive strength was related to the ternary composition, and the amount of replacement was 3% (M3Z3F3). 3-, 7-, 28- and 90-days compressive strength increased by 14.8%, 24.1%, 41.1%, and 54.1% compared to the reference sample, respectively. The compressive strength of samples containing single, binary, and ternary mixes with a total of up to 45% will increase the compressive strength by different percentages and will have a further downward trend. The tensile strength of concrete in all samples containing binary and tertiary compounds of pozzolanic materials was higher than the reference sample with the highest increase related to M5Z5, M5F5, Z5F5 with 84.2%, and M3Z3F3 with 94.7%. The maximum reduction of water absorption is in the ternary mix designs M13Z13F13 and M15Z15F15 with a decrease of 75.8% compared to the reference sample. In all samples containing pozzolanic materials, the amount of volumetric electrical resistance of concrete has increased compared to the reference sample (from 1.3 to 9.1 times). The amount of volumetric electrical resistivity of concrete samples containing ternary pozzolan composition was higher than binary and single compounds. The maximum is related to M13Z13F13 and M15Z15F15 designs, which increased 9.1 times more than the reference sample. The presence of more than 40% pozzolanic values has almost no effect on the mechanical properties of concrete.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 February 2022

**Revise Date:** 14 April 2022

**Accept Date:** 21 April 2022

### Keywords:

Metakaolin

Zeolite

Fly ash

Compressive strength

Electrical resistivity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.330111.2736>

\*Corresponding author: Mohammad Hadi Tavana.

Email address: m.h.tavana@iauksh.ac.ir

## بررسی خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن حاوی متاکائولین، زئولیت و خاکستر بادی به همراه ترکیبات دو و سه تایی

نوذر مرادی<sup>۱</sup>، محمدهادی توانا<sup>۲\*</sup>، محمدرضا حبیبی<sup>۲</sup>، مسلم امیری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

### چکیده

در این تحقیق ترکیب‌های مختلف از جایگزینی پوزولان‌های متاکائولین، زئولیت و خاکستر بادی به صورت تکی، دوتایی و سه تایی مطابق استاندارد ACI-211 مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان میزان بهینه از پوزولان مناسب را تعیین نمود. پنجاه طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ثابت ساخته شده و نتایج مقاومت فشاری، مقاومت کششی برزیلی، اسلامپ، وزن مخصوص، جذب آب و مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن به منظور ارزیابی تاثیر نوع و میزان مصرف پوزولان و اطلاع از تاثیر ترکیب‌های آنها ثبت شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به ترکیب سه تایی پوزولان‌ها و مقدار جایگزینی ۳ درصد (M3Z3F3) بود. مقاومت فشاری ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۱۴٪، ۲۴٪، ۴۱٪ و ۵۴٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشت. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ترکیب‌های تکی، دوتایی و سه تایی با مجموع حداکثر تا ۴۵٪، باعث افزایش مقاومت فشاری با درصد‌های مختلف می‌شود و بیشتر از آن روند نزولی خواهد داشت. مقاومت کششی بتن در تمامی نمونه‌های حاوی ترکیب‌های دوتایی و سه تایی مواد پوزولانی بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M5Z5، M5F5، Z5F5 با ۸۴٪ و M3Z3F3 با ۹۴٪ بوده است. حداکثر کاهش جذب آب در ترکیب‌های سه تایی M13Z13F13 و M15Z15F15 با کاهش ۷۵٪ نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. در تمامی نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی مقدار مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است (از ۱/۳ تا ۹/۱ برابر). مقدار مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن نمونه‌های حاوی ترکیب سه تایی پوزولان، از ترکیب‌های دوتایی و تکی بیشتر بود. حداکثر آن مربوط به طرح‌های M13Z13F13 و M15Z15F15 می‌باشد که ۹/۱ برابر نمونه مرجع افزایش داشت. وجود مقادیر بیشتر از ۴۰٪ پوزولانی تقریباً تاثیری بر روی خصوصیات مکانیکی بتن نمی‌گذارد.

کلمات کلیدی: متاکائولین، زئولیت، خاکستر بادی، مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.330111.2736	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.330111.2736	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۰۲/۰۱	۱۴۰۱/۰۲/۰۱	۱۴۰۱/۰۱/۲۵	۱۴۰۰/۱۲/۰۴
محمدهادی توانا m.h.tavana@iauksh.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

بتن به عنوان دومین ماده‌ی پر مصرف دنیا (بعد از آب) شناخته می‌شود. امروزه سازه‌های بسیاری در سرتاسر دنیا با این مصالح ساخته می‌شود و همین امر نیاز به بهبود و بهینه‌سازی این ماده را نمایان می‌سازد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی بهبود کیفیت بتن انجام شده است که اکثر آن‌ها تغییر در ترکیب بتن را بررسی کرده‌اند، با این حال استفاده از افزودنی‌ها و همچنین جایگزین کردن مصالح متداول مورد استفاده در بتن با مصالح جدید همیشه مورد توجه بوده است. مواد جدیدی که توانسته‌اند خواص مکانیکی و فیزیکی بتن را ارتقاء دهند [۱]. از طرف دیگر، بر اساس تحقیقات صورت گرفته، در حدود ۵ تا ۸ درصد سهم تولید گاز دی‌اکسید کربن در دنیا مربوط به فرآیند تولید سیمان است. علاوه بر آن، صنعت سیمان موجب تولید گازهای  $SO_3$  (گوگرد تری‌اکسید) و  $NO_x$  (مجموع اکسیدهای نیتروژن شامل  $NO$  و  $NO_2$  این دو گاز اصطلاحاً گاز  $NO_x$  می‌گویند) نیز می‌شود که تاثیر مخربی بر محیط زیست به جای می‌گذارند [۲]. بنابراین نیاز است به گونه‌ای میزان مصرف سیمان در بتن کاهش یافته به نحوی که تاثیرات منفی این کار از منظر مقاومت و دوام قابل قبول باشد. یکی از این راه‌ها، استفاده از پوزولان و یا مواد شبه سیمانی می‌باشد.

پوزولان‌ها موادی سیمانی و یا شبه سیمانی هستند که به تنهایی ارزش چسبانندگی نداشته ولی زمانیکه به شکل ذرات بسیار ریز درآیند در مجاورت رطوبت و دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهند و تشکیل مواد پایدار و نامحلول داده که ساختار آنها تا حدودی مشابه ترکیباتی است که بر اثر هیدراسیون سیمان پرتلند تولید می‌شود. استفاده از مواد پوزولانی در بتن طی سال‌های اخیر گذشته افزایش چشمگیری داشته است [۳ و ۴]. در این میان، پوزولان‌هایی مانند متاکائولین، زئولیت و خاکستر بادی به دلیل وفور مناسب در ایران، هزینه کمتر تولید و همچنین کارایی مناسب، می‌توانند مورد توجه و بررسی بیشتر قرار گیرند. از طرفی، هر یک از این پوزولان‌ها به دلیل مشخصات شیمیایی و مکانیکی منحصر به فرد خود، خصوصیات مثبت و منفی دارند که باید در هنگام جایگزینی با سیمان در نظر گرفته شود. بعلاوه، جایگزینی این مواد با سیمان می‌تواند منجر به ایجاد تغییراتی مثبت و یا گاه منفی در بتن شده که این امر ممکن است کاربرد بیشتر آنها را تحت الشعاع قرار دهد. با بررسی خصوصیات مثبت و منفی این پوزولان‌ها و سعی در به کارگیری ترکیباتی از آنها به نحوی که هر پوزولان بتواند تا حدودی خصوصیات منفی و یا نقاط ضعف پوزولان دیگر را پوشش دهد، می‌توان انتظار داشت میزان کاربرد این مواد افزایش یافته و در نتیجه عملکرد بتن ساخته شده با آنها بهبود یابد.

از طرف دیگر، نیاز است میزان بهینه به کارگیری این مواد تعیین گردد. تحقیقات پیشین نشان داده است که برای هر ماده شبه سیمانی، میزان بهینه‌ای از مصرف وجود داشته که به عوامل متعددی بستگی دارد. با این حال، تحقیقی جامع در زمینه میزان بهینه به کارگیری ترکیبات دو و سه تایی از پوزولان‌های پرمصرف و جدیدی مانند متاکائولین، زئولیت و خاکستر بادی در دسترس نیست. از تحقیقات محققین می‌توان دریافت که مواد پوزولانی مانند متاکائولین، زئولیت و خاکستر بادی می‌توانند خیلی موثر باشند، کما اینکه ترکیب دوتایی و سه تایی (اندرکنش) آنها با توجه به مشخصات فیزیکی و شیمیایی این مواد می‌تواند بسیار مفیدتر و کارآمدتر باشد. در ضمن متاکائولین یک ماده پوزولانی است که بر خلاف اکثر پوزولان‌های دیگر توانایی تسریع هیدراسیون را دارد در حالیکه پوزولانی مانند خاکستر بادی مشکلاتی مانند کاهش مقاومت اولیه بتن دارند [۵]. زئولیت به مراتب پوزولانی فعال‌تر از خاکستر بادی است. همچنین زئولیت در مورد افزایش مقاومت فشاری و کاهش جذب اولیه و پخش کلراید از خاکستر بادی موثرتر است [۶]. بعلاوه، مشاهده شده است که مشخصات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی متاکائولین تاثیری چشمگیر بر عملکرد این پوزولان خواهند داشت [۷]. بنابراین نیاز است تاثیرات هر یک از این پوزولان‌ها و همچنین ترکیبات آنها به منظور اطلاع از میزان بهینه مصرف تعیین گردد.

تاکنون تحقیقاتی در زمینه استفاده همزمان از چندین نوع مختلف پوزولان در بتن و به صورت جایگزین سیمان صورت گرفته است. اهم نتایج به دست آمده از این تحقیقات در صورتیکه از دو و یا سه نوع پوزولان استفاده شده باشد، در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اکثر موارد، استفاده ترکیبی از پوزولان‌ها موجب بهبود برخی از خصوصیات مکانیکی و یا دوام بتن شده است. با این حال، همانطور که مشاهده می‌شود، تحقیقات صورت گرفته به صورت جامع نبوده و می‌توان گفت نیاز است که تحقیقات بیشتری در این زمینه و علی‌الخصوص بر روی پوزولان‌های کمتر کار شده‌ای مانند زئولیت صورت گیرد. از طرف دیگر، تاکنون تحقیقی در

زمینه پیش بینی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن حاوی ترکیبی از سه نوع پوزولان مختلف با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی صورت نگرفته است. در این تحقیق مطابق استاندارد ACI-211 50 طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ثابت و برابر ۰/۴۶ با جایگزینی مواد پوزولانی به صورت تکی، ترکیب دوتایی و سه‌تایی با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ درصد ساخته شده و به بررسی و مقایسه مقاومت فشاری، مقاومت دینیم شدگی، اسلامپ، وزن مخصوص، جذب آب و مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن با نمونه مرجع پرداخته شده است. در ادامه، خصوصیات مصالح استفاده شده در بخش ۲ تشریح شده و پس از آن در بخش ۳ نتایج تحقیق آزمایشگاهی در زمینه خصوصیات مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی پوزولان‌های ترکیبی ارائه می‌گردد.

جدول ۱: تحقیقات صورت گرفته در زمینه کاربرد ترکیبی دو و سه تایی پوزولان‌های مختلف

نام محقق	سال	مرجع	نوع پوزولان مصرفی	نتیجه در صورت استفاده همزمان
بورج آکسای و همکاران	۲۰۱۸	[۴]	MK SF	کاهش تمایل به تمایل به ترک خوردگی
محمد صدیق و همکاران	۲۰۱۸	[۸]	MK SF	بهبود مقاومت در برابر سیکل ذوب شدن و انجماد
اس ساج وانیچ و همکاران	۲۰۱۷	[۹]	MK FA	بهبود دوام، مقاومت سایشی، و نفوذپذیری کلراید
بینگ یانا و همکارانش	۲۰۱۶	[۱۰]	MK FA	افزایش چشمگیر مقاومت ۷ روزه
شاکای چنگ و همکاران	۲۰۱۶	[۱۱]	MK FS	کاهش ضریب نفوذ کلرید و جمع شدگی
چی چن و همکارانش	۲۰۱۸	[۱۲]	ZE SF	افزایش مقاومت فشاری، افزایش چگالی بتن، کاهش نفوذپذیری
شهااتا و توماس	۲۰۲۱	[۱۳]	SF FA	

در جدول ۱، MK به معنی متاکائولین، SF، دوده سیلیس، FA خاکستر بادی، ZE ژئولیت می باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- سیمان

در این پروژه تحقیقاتی، سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند تپ I-425 (سیمان معمولی) کارخانه سیمان ایلام می‌باشد، که بر روی آن آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی، طبق استانداردهای ملی ایران صورت گرفته است. نتایج این آزمایش‌های نشان می‌دهد که سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نظر مرغوبیت و سلامت در محدوده قابل قبول قرار دارد. در این تحقیق از آب شرب استفاده شد که PH آن بین ۸ و ۸/۵ بود.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	L.O.I	IR	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	C3S	C2S	C3A	C4AF
شیمیایی	۲۱/۶	۵/۸	۳/۱	۶۱/۴	۴	۲	۰/۲	۱	۰/۶	۰/۲۱	۴۷/۲۴	۲۵/۰۲	۸/۲۶	۱۲/۱
مشخصات فیزیکی	نرمی سیمان (cm <sup>2</sup> /g)	باقیمانده روی الک ۹۰۰	باقیمانده روی الک ۴۵۰۰	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش نهایی (دقیقه)	مقاومت ۲ روزه	مقاومت ۷ روزه	مقاومت ۲۸ روزه	درصد اتوکلاو					
	۳۵۰۰	۱/۳	۸/۱	۱۰۰	۱۹۸	۱۷۵	۳۵۰	۴۹۰	۰/۰۴					

### ۲-۲- متاکائولین

طبق کاتالوگ کارخانه متاکائولین با راندمان یا واکنش‌پذیری بالا به عنوان یک افزودنی بتن با نام تجاری "METACEM" در هند توسط شرکت "KaoMin Industries LLP" در هند تولید می‌شود. مشخصات شیمیایی بر حسب درصد و مشخصات فیزیکی متاکائولین در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی و شیمیایی متاکائولین مصرفی

Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	مشخصات شیمیایی
۰/۱	۰/۰۳	۰/۶۵	۱	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۹	۴۵	۵۳	
رنگ	PH	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	نرمی متاکائولین (cm <sup>2</sup> /g)	مشخصات فیزیکی					
سفید	۵-۴	۲۶۰۰	۲۲۰۰۰						

## ۲-۳- زئولیت

زئولیت‌ها معمولاً به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. در این پروژه از زئولیت طبیعی سمنان استفاده شده است که مشخصات مکانیکی و شیمیایی (بر حسب درصد) این پوزولان در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت مصرفی

Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	مشخصات شیمیایی
۰/۰۲	۳/۱۲	۰/۲۱	۱۰/۸۸	۱/۲	۱/۶۸	۱/۴۴	۱۳/۶۶	۶۷/۷۹	
رنگ	PH	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	نرمی زئولیت (cm <sup>2</sup> /g)	مشخصات فیزیکی					
سفید	۵-۴	۲۳۰۰	۱۸۰۰۰						

## ۲-۴- خاکستر بادی

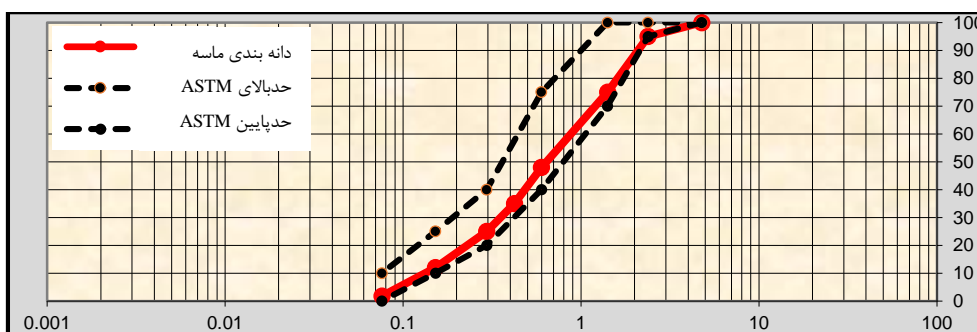
خاکستر بادی استفاده شده در این پروژه متعلق به شرکت DRIK یک شرکت خصوصی متعلق به شرکت ACL هند است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن بر حسب درصد در جدول ۵ آورده شده است. پودر Pozzocrete 63 یک پوزولان از مواد نوع Pzzolanic F تایید شده توسط BS 3892 [۱۴] می‌باشد، Pozzocrete Fly Ash یک پوزولان مصنوعی است که به طور خاص برای دستیابی به عملکرد مطلوب در بسیاری از کاربردهای سیمان و بتن طراحی شده است. پودر Pozzocrete 63 به صورت صنعتی با کیفیت بالا به منظور به دست آوردن حداکثر عملکرد به عنوان یک محصول جایگزینی سیمان تولید شده است. نام تجاری آن POZZOCRETE و مطابق با مشخصات استاندارد ۳۸۱۲ هند [۱۵]، استاندارد اروپایی [۱۶] EN450 رده S و استاندارد آمریکایی [۱۷] ASTM 618 می‌باشد.

جدول ۵: مشخصات فیزیکی و شیمیایی (بر حسب درصد) خاکستر بادی مصرفی

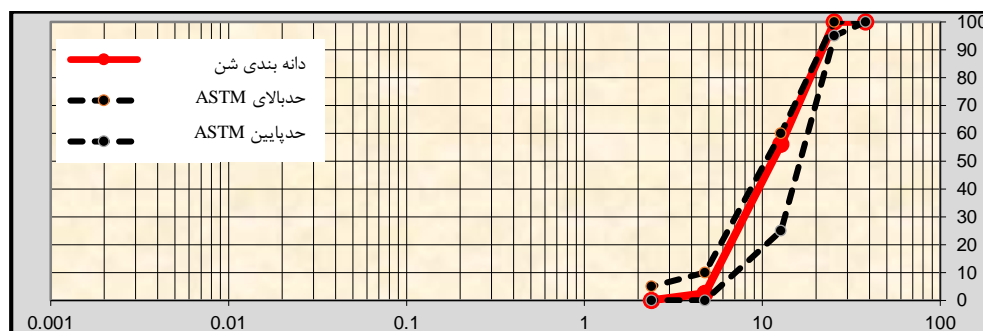
Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	مشخصات شیمیایی
۰/۴۸	۰/۰۳	۰/۲۸	۱/۱	۲/۹۲	۲/۳۸	۵/۹۶	۲۲/۱۸	۶۴/۳۳	
رنگ	PH	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	نرمی خاکستر بادی (cm <sup>2</sup> /g)	مشخصات فیزیکی					
خاکستری روشن	۵-۴	۲۳۰۰	۶۰۰۰						

## ۲-۵- مصالح دانه‌ای و آزمایش‌های مرغوبیت مصالح

در این پروژه تحقیقاتی، از شن و ماسه معادن میان‌راهان مربوط به کارخانه بتن‌آماده، فرآمان غرب استفاده می‌شود. لازم به ذکر است آزمایش‌های مرغوبیت شامل آزمایش‌های مرغوبیت مصالح شامل: دانه‌بندی مکانیکی شن و ماسه طبق استاندارد [۱۸] ASTM-D422، آزمایش افت وزنی شن و ماسه در مقابل سولفات سدیم بر طبق استاندارد [۱۹] ASTM-C88، آزمایش عبوری الک نمره ۲۰۰ شن و ماسه طبق استاندارد [۲۰] ASTM-C117، آزمایش وزن مخصوص و جذب آب شن و ماسه طبق استاندارد [۲۱] ASTM-C127-128، آزمایش ارزش ماسه‌ای (SE) طبق استاندارد [۲۲] ASTM-D2419، آزمایش تطویل و تورق شن طبق استاندارد [۲۳] ASTM-D4791، آزمایش لس‌آنجلس شن طبق استاندارد [۲۴] ASTM-C535، وزن واحد حجم آزاد و متراکم [۲۵] ASTM-C29 و تعیین مدول نرمی ماسه طبق استاندارد [۲۶] ASTM-C136 انجام شد.



شکل ۱: دانه بندی ماسه



شکل ۲: دانه بندی شن مخلوط

## ۲-۶- فوق روان کننده

در این پروژه از فوق روان کننده نرمال MERQUA شرکت آبادگران استفاده شده است. مشخصات ذکر شده در استاندارد ASTM C494 / C494M-17 می باشد [۲۷].

## ۲-۷- طرح اختلاط بتن طبق استاندارد ACI- 211

بعد از انجام آزمایش‌های مرغوبیت مصالح بتن و کنترل آن‌ها با مشخصات ذکر شده در استانداردهای مربوطه نوبت به طرح اختلاط و ساخت نمونه‌های استوانه‌ای بتن طبق استاندارد [۲۸] ACI- 211 از بتن با مواد پوزولانی شامل متاکائولین، زئولیت و خاکستر بادی و ترکیب آنها و سپس عمل‌آوری نمونه‌ها در حوض نگهداری بتن می‌شود. در هر طرح تعداد ۱۰ عدد نمونه استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵ cm و ارتفاع ۳۰ cm ساخته می‌شود که تعداد ۸ عدد از آن‌ها برای تعیین مقاومت فشاری در سنین مختلف و ۲ عدد برای تعیین مقاومت الکتریکی بتن و سپس بر روی این دو نمونه آزمایش مقاومت دونیم شدگی انجام می‌گیرد. آزمایش‌های صورت گرفته برای تعیین خصوصیات مکانیکی بتن در آزمایشگاه مکانیک خاک جهاد دانشگاهی کرمانشاه انجام گرفت. طرح اختلاط بتن مصرفی در تغییر در میزان پوزولان‌های آن در جدول ۶ و جدول معرفی نمونه‌های ساخته شده به همراه میزان پوزولان مصرفی در هر یک در جدول ۷ آورده شده است. در شکل ۳ نیز نمونه‌های ساخته شده آورده شده است.

جدول ۶: مصالح مورد نیاز در حالت خشک و اشباع با سطح خشک (SSD) در یک متر مکعب و ساخت ۱۰ قالب آزمایشگاهی برای نمونه مرجع

ردیف	مصالح	وزن خشک مصالح در $\text{kg m}^3$	وزن SSD مصالح در $\text{kg m}^3$	وزن آزمایشگاهی برای ۱۰ قالب (kg)
۱	شن پادامی	۴۵۰	۴۵۶	۲۳/۸۵
۲	شن نخودی	۴۵۰	۴۵۶	۲۳/۸۵
۳	ماسه	۹۵۴	۹۷۱	۵۰/۶۲
۴	سیمان	۳۵۰	۳۵۰	۱۸/۵۵
۵	آب	۱۶۰	۱۶۰	۸/۴۸
۶	فوق روان کننده	۳/۵	۳/۵	۰/۱۹
۷	جذب آب	۲۹	-	۱/۵۴
۸	مجموع	۲۳۹۷	۲۳۹۷	۱۲۷/۱

جدول ۷: مصالح جایگزین سیمان در یک متر مکعب بر حسب کیلوگرم

شماره طرح	% متاکائولین (MK)	% زئولیت (Z)	% خاکستر بادی (FA)	% سیمان پرتلند (PC)	وزن متاکائولین	وزن زئولیت	وزن خاکستر بادی	وزن سیمان پرتلند
M5	۵	۰	۰	۹۵	۱۷/۵	۰	۰	۳۳۲/۵
M10	۱۰	۰	۰	۹۰	۳۵	۰	۰	۳۱۵
M15	۱۵	۰	۰	۸۵	۵۲/۵	۰	۰	۲۹۷/۵
M20	۲۰	۰	۰	۸۰	۷۰	۰	۰	۲۸۰
M25	۲۵	۰	۰	۷۵	۸۷/۵	۰	۰	۲۶۲/۵
M35	۳۵	۰	۰	۶۵	۱۲۲/۵	۰	۰	۲۲۷/۵
M45	۴۵	۰	۰	۵۵	۱۵۷/۵	۰	۰	۱۹۲/۵
Z5	۰	۵	۰	۹۵	۰	۱۷/۵	۰	۳۳۲/۵
Z10	۰	۱۰	۰	۹۰	۰	۳۵	۰	۳۱۵
Z15	۰	۱۵	۰	۸۵	۰	۵۲/۵	۰	۲۹۷/۵
Z20	۰	۲۰	۰	۸۰	۰	۷۰	۰	۲۸۰
Z25	۰	۲۵	۰	۷۵	۰	۸۷/۵	۰	۲۶۲/۵
Z35	۰	۳۵	۰	۶۵	۰	۱۲۲/۵	۰	۲۲۷/۵
Z45	۰	۴۵	۰	۵۵	۰	۱۵۷/۵	۰	۱۹۲/۵
F5	۰	۰	۵	۹۵	۰	۰	۱۷/۵	۳۳۲/۵
F10	۰	۰	۱۰	۹۰	۰	۰	۳۵	۳۱۵
F15	۰	۰	۱۵	۸۵	۰	۰	۵۲/۵	۲۹۷/۵
F20	۰	۰	۲۰	۸۰	۰	۰	۷۰	۲۸۰
F25	۰	۰	۲۵	۷۵	۰	۰	۸۷/۵	۲۶۲/۵
F35	۰	۰	۳۵	۶۵	۰	۰	۱۲۲/۵	۲۲۷/۵
F45	۰	۰	۴۵	۵۵	۰	۰	۱۵۷/۵	۱۹۲/۵
M2.5Z2.5	۲/۵	۲/۵	۰	۹۵	۸/۷۵	۸/۷۵	۰	۳۳۲/۵
M5Z5	۵	۵	۰	۹۰	۱۷/۵	۱۷/۵	۰	۳۱۵
M7.5Z7.5	۷/۵	۷/۵	۰	۸۵	۲۶/۲۵	۲۶/۲۵	۰	۲۹۷/۵
M10Z10	۱۰	۱۰	۰	۸۰	۳۵	۳۵	۰	۲۸۰
M15Z15	۱۵	۱۵	۰	۷۰	۵۲/۵	۵۲/۵	۰	۲۴۵
M20Z20	۲۰	۲۰	۰	۶۰	۷۰	۷۰	۰	۲۱۰
M25Z25	۲۵	۲۵	۰	۵۰	۸۷/۵	۸۷/۵	۰	۱۷۵
M2.5F2.5	۲/۵	۰	۲/۵	۹۵	۸/۷۵	۰	۸/۷۵	۳۳۲/۵
M5F5	۵	۰	۵	۹۰	۱۷/۵	۰	۱۷/۵	۳۱۵
M7.5F7.5	۷/۵	۰	۷/۵	۸۵	۲۶/۲۵	۰	۲۶/۲۵	۲۹۷/۵
M10F10	۱۰	۰	۱۰	۸۰	۳۵	۰	۳۵	۲۸۰
M15F15	۱۵	۰	۱۵	۷۰	۵۲/۵	۰	۵۲/۵	۲۴۵
M20F20	۲۰	۰	۲۰	۶۰	۷۰	۰	۷۰	۲۱۰
M25F25	۲۵	۰	۲۵	۵۰	۸۷/۵	۰	۸۷/۵	۱۷۵
Z2.5F2.5	۰	۲/۵	۲/۵	۹۵	۰	۸/۷۵	۸/۷۵	۳۳۲/۵
Z5F5	۰	۵	۵	۹۰	۰	۱۷/۵	۱۷/۵	۳۱۵
Z7.5F7.5	۰	۷/۵	۷/۵	۸۵	۰	۲۶/۲۵	۲۶/۲۵	۲۹۷/۵
Z10F10	۰	۱۰	۱۰	۸۰	۰	۳۵	۳۵	۲۸۰
Z15F15	۰	۱۵	۱۵	۷۰	۰	۵۲/۵	۵۲/۵	۲۴۵
Z20F20	۰	۲۰	۲۰	۶۰	۰	۷۰	۷۰	۲۱۰
Z25F25	۰	۲۵	۲۵	۵۰	۰	۸۷/۵	۸۷/۵	۱۷۵
M2Z2F2	۲	۲	۲	۹۴	۷	۷	۷	۳۲۹
M3Z3F3	۳	۳	۳	۹۱	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	۳۱۸/۵
M5Z5F5	۵	۵	۵	۸۵	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۵	۲۹۷/۵
M7Z7F7	۷	۷	۷	۷۹	۲۴/۵	۲۴/۵	۲۴/۵	۲۷۶/۵
M10Z10F10	۱۰	۱۰	۱۰	۷۰	۳۵	۳۵	۳۵	۲۴۵
M13Z13F13	۱۳	۱۳	۱۳	۶۱	۴۵/۵	۴۵/۵	۴۵/۵	۲۱۳/۵
M15Z15F15	۱۵	۱۵	۱۵	۵۵	۵۲/۵	۵۲/۵	۵۲/۵	۱۹۲/۵



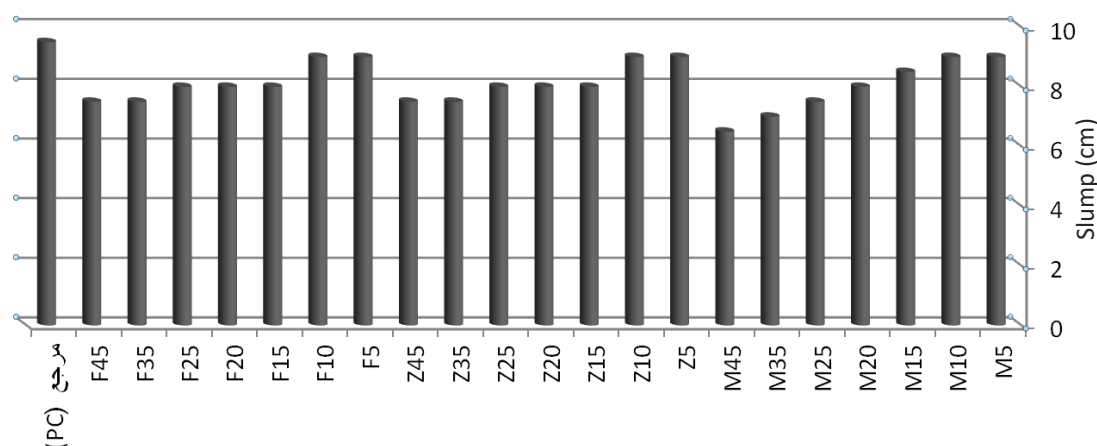
شکل ۳: مخزن نگهداری نمونه‌های استوانه‌ای

### ۳- نتایج

هدف از انجام این تحقیق ضمن تلاش برای بالا بردن مقاومت فشاری بتن، کاهش نفوذپذیری بتن در محیط‌های مهاجم و خوردنه و به دنبال صرفه‌جویی در مصرف سیمان، به عنوان یک محصول استراتژیک با استفاده از مواد جایگزین سیمان از قبیل متاکائولین، زئولیت، خاکستر بادی و یا ترکیب آنها می‌باشد.

#### ۳-۱- کارایی بتن

کارایی به صورت مقدار کار مفید داخلی لازم برای ایجاد تراکم کامل بیان شده است. کار داخلی مفید یکی از خواص فیزیکی بتن است و در واقع کار یا انرژی لازم برای غلبه بر اصطکاک داخلی بین ذرات تشکیل دهنده بتن می‌باشد. در عمل انرژی بیشتری لازم است تا بر اصطکاک سطحی بین بتن و قالب‌ها یا آرماتورها غلبه شود. همچنین انرژی تلف شده‌ای جهت لرزاندن قالب‌ها و بتنی که متراکم شده، مصرف می‌شود بنابراین در عمل اندازه‌گیری کارایی طبق تعریف فوق مشکل بوده و چیزی که اندازه‌گیری می‌شود روش ابداعی مخصوص در آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM - C143 می‌باشد [۲۹]. با توجه به اعداد اسلامپ در نمونه‌های حاوی ترکیب‌های تکی، دوتایی و سه‌تایی و ثابت بودن نسبت آب به سیمان در تمام طرح اختلاط‌ها، هر چه درصد پوزولان بیشتر باشد، آب بیشتری را جذب خواهد نمود و اسلامپ کمتری خواهیم داشت.

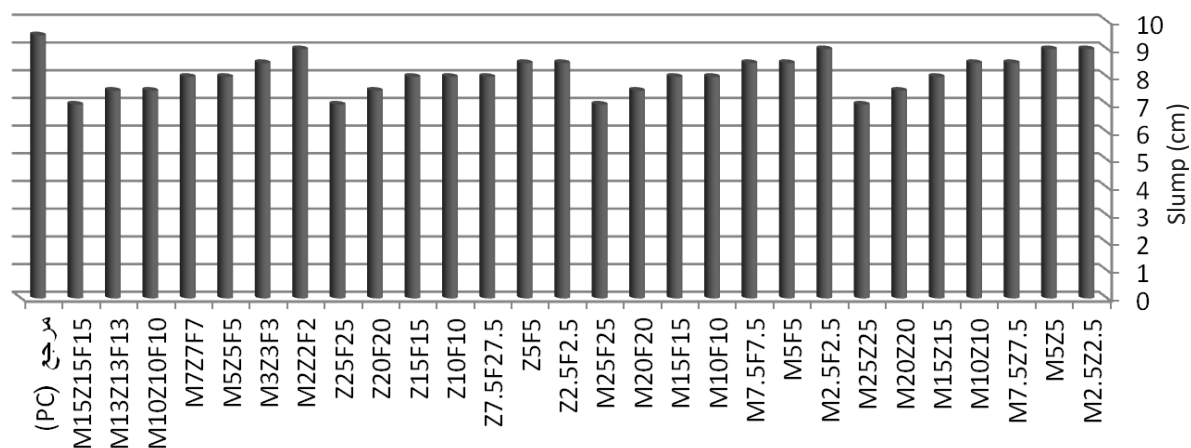


شکل ۴: خلاصه نتایج آزمایشگاهی اسلامپ نمونه‌های تکی



جدول ۳: نتایج آزمایش اسلامپ

اسلامپ (cm)	شماره طرح	اسلامپ (cm)	شماره طرح
۹	M2.5Z2.5	۹	M5
۹	M5Z5	۹	M10
۸/۵	M7.5Z7.5	۸/۵	M15
۸/۵	M10Z10	۸	M20
۸	M15Z15	۷/۵	M25
۷/۵	M20Z20	۷	M35
۷	M25Z25	۶/۵	M45
۹	M2.5F2.5	۹	Z5
۸/۵	M5F5	۹	Z10
۸/۵	M7.5F7.5	۸	Z15
۸	M10F10	۸	Z20
۸	M15F15	۸	Z25
۷/۵	M20F20	۷/۵	Z35
۷	M25F25	۷/۵	Z45
۸/۵	Z2.5F2.5	۹	F5
۸/۵	Z5F5	۹	F10
۸	Z7.5F27.5	۸	F15
۸	Z10F10	۸	F20
۸	Z15F15	۸	F25
۷/۵	Z20F20	۷/۵	F35
۷	Z25F25	۷/۵	F45
۹	M2Z2F2	۹/۵	مرجع (PC)
۸/۵	M3Z3F3		
۸	M5Z5F5		
۸	M7Z7F7		
۷/۵	M10Z10F10		
۷/۵	M13Z13F13		
۷	M15Z15F15		



شکل ۵: خلاصه نتایج آزمایشگاهی اسلامپ نمونه‌های ترکیبی

## ۳-۲- مقاومت فشاری نمونه‌ها

به منظور بررسی تاثیر پوزولان‌های مختلف و هم چنین میزان مختلفی از به کارگیری آنها، از مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه استفاده شد. بعلاوه، تلاش شد تاثیر به کارگیری مقادیر مختلفی از پوزولان‌های ترکیبی نیز تعیین شده تا بتوان به میزان بهینه استفاده از این مواد دست یافت. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به دیرگیر بودن مواد پوزولانی و کاهش روند هیدراسیون مقاومت

فشاری نمونه‌ها در سنین پایین‌تر (۳ و ۷ روزه) بعضاً کمتر و یا رشد کمی نسبت به نمونه مرجع دارد. با توجه به واکنش‌پذیری بالای متاکائولین نسبت به زئولیت و خاکستر بادی نمونه‌های حاوی متاکائولین به تنهایی از روند رشد بیشتری برخوردار هستند. دلیل این امر را می‌توان به سطح مخصوص بیشتر ذرات متاکائولین نسبت داد. نتایجی مشابه در تحقیق دونگ و همکاران مشاهده شد [۳۰]. از طرف دیگر، مجموع  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  در متاکائولین برابر ۹۷/۸۳٪ می‌باشد که از زئولیت (۸۲/۸۹٪) و خاکستر بادی (۹۴/۵۷٪) بیشتر است.

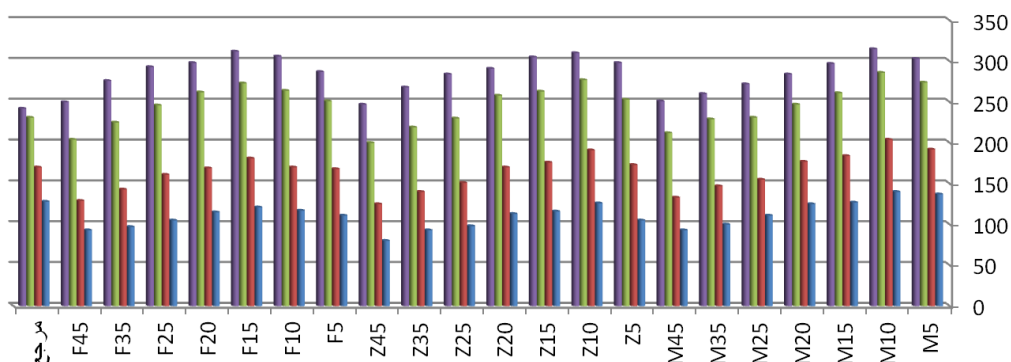
مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های M5 و M10 به ترتیب ۷٪ و ۹٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته و در سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری ۳ روزه کمتر از نمونه مرجع جواب داده است. مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی با مجموع تا ۱۵٪ بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M5Z5 با ۱۱٪، M5F5 با ۲۲٪، Z5F5 با ۷٪ و M2Z2F2 با ۲۱٪ بوده است. بیشترین مقاومت فشاری ۷ روزه مربوط به نمونه‌های M10 با ۲۰٪، Z10 با ۱۲٪ و F15 با ۶٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.

مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی با مجموع تا ۱۵٪ بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M5Z5 با ۳٪، M5F5 با ۱۴٪، Z5F5 با ۷٪ و M3Z3F3 با ۲۴٪ بوده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های تا حداکثر ۲۵٪ بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M10 با ۲۳٪، Z10 با ۲۰٪ و F15 با ۱۸٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی با مجموع حداکثر تا ۲۵٪ بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M5Z5 با ۱۸٪، M5F5 با ۲۵٪، Z5F5 با ۱۷٪ و M3Z3F3 با ۴۱٪ بوده است. روند و دلیلی مشابه با آنچه برای تعیین مقاومت در سن ۳ روزه عنوان شد، برای نمونه‌های ۷ روزه نیز صادق می‌باشد زیرا که عملکرد و تاثیر مثبت پوزولان‌ها از سنین بالاتر چشم‌گیرتر می‌باشد.

مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های تا حداکثر ۴۵٪ بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M10 با ۳۰٪، Z10 با ۲۸٪ و F15 با ۲۹٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی با مجموع حداکثر تا ۴۵٪ بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M5Z5 با ۳۴٪، M5F5 با ۳۸٪، Z5F5 با ۳۱٪ و M3Z3F3 با ۵۴٪ بوده است.

با بررسی نتایج می‌توان گفت مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ترکیب‌های سه‌تایی مواد پوزولانی، از ترکیب‌های دوتایی و تکی با درصد‌های عددی مشابه، منتج به مقاومت‌های فشاری بیشتری شده است. بیشترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به طرح M3Z3F3 می‌باشد که مقاومت فشاری ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۱۴٪، ۲۴٪، ۴۱٪ و ۵۴٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است. با توجه به مقاومت فشاری ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های تکی، دوتایی و سه‌تایی با مجموع حداکثر تا ۴۵٪، باعث افزایش مقاومت فشاری با درصد‌های مختلف می‌شود و بیشتر از آن روند نزولی خواهد داشت که این نکته در نمونه‌های M25Z25، M25F25 و Z25F25 (۵۰٪ پوزولان) مشخص شده است. یکی از دلایل مهم موثر بر این رفتار را می‌توان به خاصیت کلوخه شدن ذرات پوزولان و افزایش میزان به کارگیری آن به دلیل ریزی بیش از حد عنوان کرد.

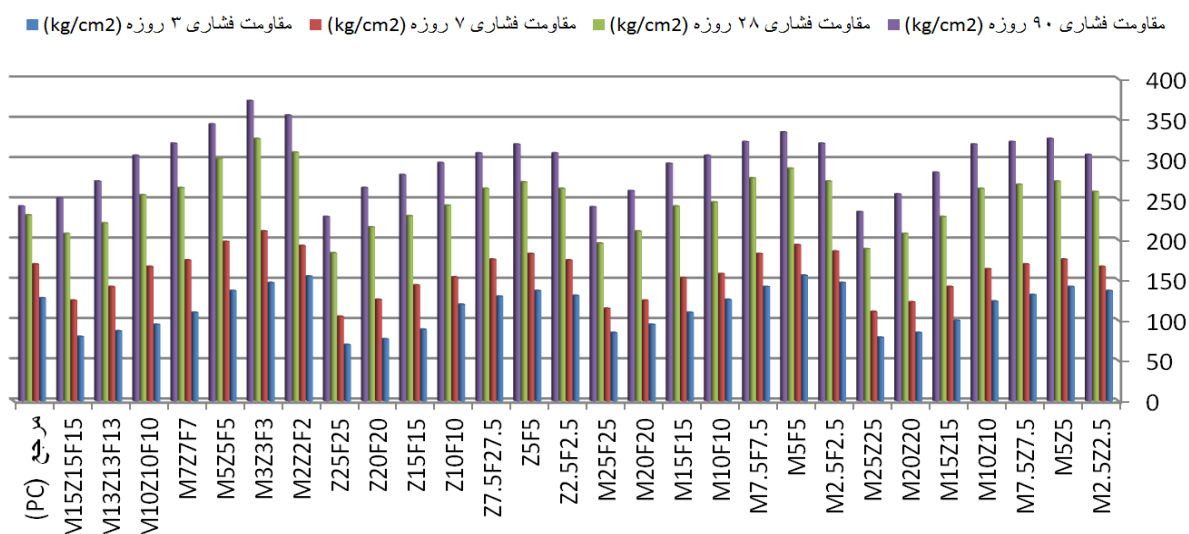
■ مقاومت فشاری ۹۰ روزه (kg/cm2) ■ مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm2) ■ مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm2) ■ مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm2)



شکل ۶: خلاصه نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نمونه‌های تکی در سنین مختلف

جدول ۴: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

شماره طرح	مقاومت فشاری ۳ روزه	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت فشاری ۹۰ روزه	شماره طرح	مقاومت فشاری ۳ روزه	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت فشاری ۹۰ روزه
M5	۱۳۷	۱۹۲	۲۷۴	۳۰۳	M2.5Z2.5	۱۴۷	۱۸۶	۲۷۳	۳۲۰
M10	۱۴۰	۲۰۴	۲۸۶	۳۱۵	M5Z5	۱۵۶	۱۹۴	۲۸۹	۳۳۴
M15	۱۲۷	۱۸۴	۲۶۱	۲۹۷	M7.5Z7.5	۱۴۲	۱۸۳	۲۷۷	۳۲۲
M20	۱۲۵	۱۷۷	۲۴۷	۲۸۴	M10Z10	۱۰۰	۱۴۲	۲۲۹	۲۸۴
M25	۱۱۱	۱۵۵	۲۳۴	۲۷۲	M15Z15	۸۵	۱۲۱	۲۰۸	۲۵۷
M35	۱۰۰	۱۴۷	۲۲۹	۲۶۰	M20Z20	۷۹	۱۱۱	۱۸۹	۲۳۵
M45	۹۳	۱۳۳	۲۱۲	۲۵۱	M25Z25	۱۴۷	۱۸۶	۲۷۳	۳۲۰
Z5	۱۰۵	۱۷۳	۲۵۳	۲۹۸	M2.5F2.5	۱۵۶	۱۹۴	۲۸۹	۳۳۴
Z10	۱۲۶	۱۹۱	۲۷۷	۳۱۰	M5F5	۱۴۲	۱۸۳	۲۷۷	۳۲۲
Z15	۱۱۶	۱۷۶	۲۶۳	۳۰۵	M7.5F7.5	۱۲۶	۱۵۸	۲۴۷	۳۰۵
Z20	۱۱۳	۱۷۰	۲۵۸	۲۹۱	M10F10	۱۱۰	۱۵۳	۲۴۲	۲۹۵
Z25	۹۸	۱۵۱	۲۳۰	۲۸۴	M15F15	۹۵	۱۲۵	۲۱۱	۲۶۱
Z35	۹۳	۱۴۰	۲۱۹	۲۶۸	M20F20	۸۵	۱۱۵	۱۹۶	۲۴۱
Z45	۸۰	۱۲۵	۲۰۰	۲۴۷	M25F25	۱۳۱	۱۷۵	۲۶۴	۳۰۸
F5	۱۱۱	۱۶۸	۲۵۱	۲۸۷	Z2.5F2.5	۱۳۷	۱۸۳	۲۷۲	۳۱۹
F10	۱۱۷	۱۷۰	۲۶۴	۳۰۶	Z5F5	۱۳۰	۱۷۶	۲۶۴	۳۰۸
F15	۱۲۱	۱۸۱	۲۷۳	۳۱۲	Z7.5F7.5	۱۲۰	۱۵۴	۲۴۳	۲۹۶
F20	۱۱۵	۱۶۹	۲۶۲	۲۹۸	Z10F10	۸۹	۱۴۴	۲۳۰	۲۸۱
F25	۱۰۵	۱۶۱	۲۴۶	۲۹۳	Z15F15	۷۷	۱۲۶	۲۱۶	۲۶۵
F35	۹۷	۱۴۳	۲۲۵	۲۷۶	Z20F20	۷۰	۱۰۵	۱۸۴	۲۲۹
F45	۹۳	۱۲۹	۲۰۴	۲۵۰	Z25F25	۱۵۵	۱۹۳	۳۰۹	۳۵۵
مرجع (PC)	۱۲۸	۱۷	۲۳۱	۲۴۲	M2Z2F2	۱۴۷	۲۱۱	۳۲۶	۳۷۳
					M3Z3F3	۱۳۷	۱۹۸	۳۰۱	۳۴۴
					M5Z5F5	۱۱۰	۱۷۵	۲۶۵	۳۲۰
					M7Z7F7	۹۵	۱۶۷	۲۵۶	۳۰۵
					M10Z10F10	۸۷	۱۴۲	۲۲۱	۲۷۳
					M13Z13F13	۸۰	۱۲۵	۲۰۸	۲۵۲
					M15Z15F15				



شکل ۷: خلاصه نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نمونه‌های ترکیبی در سنین مختلف

### ۳-۳- مقاومت دونیم شدگی نمونه‌ها

این آزمایش با نام مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن<sup>۱</sup> یا آزمایش دونیم شدگی طبق استاندارد ملی ایران با شماره ۶۰۴۷ در آزمایشگاه مکانیک خاک جهاد دانشگاهی کرمانشاه انجام شده است. اگر چه معمولاً بتن به گونه‌ای طراحی نمی‌گردد که تنش کششی مستقیم را تحمل نماید، ولی دانستن مقاومت دونیم شدگی در تخمین باری که ترک‌ها در آن توسعه می‌یابند، با ارزش است. عدم وجود ترک در حفظ تداوم سازه‌های بتنی و در بسیاری موارد در جلوگیری از خوردگی میلگردهای فولادی در محیط‌های خورنده حائز اهمیت و قابل توجه است. با اعمال بار فشاری بر ارتفاع نمونه‌های استوانه‌ای، می‌توان به مقاومت کششی بر اساس رابطه زیر دست یافت.

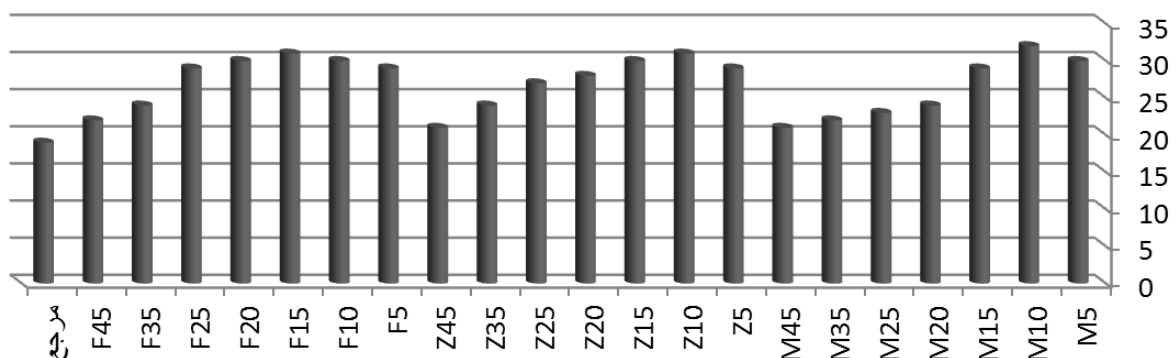
$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

که در رابطه ۱،  $\sigma_t$  مقاومت دونیم شدگی (MPa)،  $P$  حداکثر بار اعمال شده، نیوتن،  $L$  طول آزمون (mm)، و  $D$  قطر آزمون (mm) می‌باشد.



<sup>1</sup> Splitting tensile strength

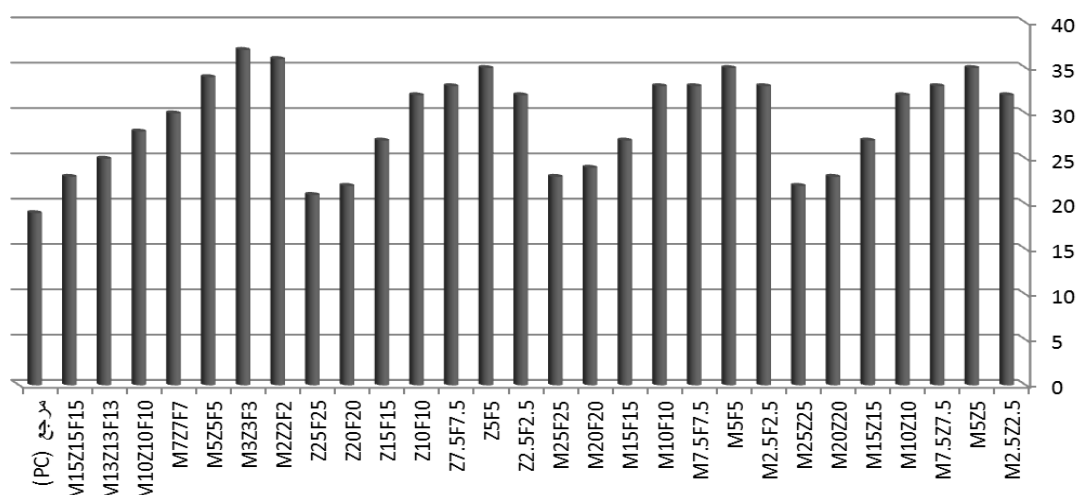
شکل ۸: قالب آزمایش دونیم شدگی



شکل ۹: خلاصه نتایج آزمایشگاهی دونیم شدگی نمونه‌های تکی در سن ۹۰ روزه

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت دونیم شدگی

مقاومت دونیم شدگی (kg/cm <sup>2</sup> ) $\sigma_t$	نیروی گسیختگی (kg) P	شماره طرح	مقاومت دونیم شدگی (kg/cm <sup>2</sup> ) $\sigma_t$	نیروی گسیختگی (kg) P	شماره طرح
۲۲	۲۳۳۵۰	M2.5	۳۰	۲۱۹۱۵	M5
۳۵	۲۵۰۵۰	M5Z5	۳۲	۲۲۹۵۰	M10
۳۳	۲۴۰۵۰	M7.5Z7.5	۲۹	۲۱۱۵۰	M15
۳۲	۲۳۴۹۰	M10Z10	۲۴	۱۷۵۰۰	M20
۲۷	۱۹۴۴۲	M15Z15	۲۳	۱۶۷۰۰	M25
۲۳	۱۶۸۸۵	M20Z20	۲۲	۱۶۱۰۰	M35
۲۲	۱۵۸۸۵	M25Z25	۲۱	۱۵۲۰۰	M45
۳۳	۲۴۱۰۰	M2.5F2.5	۲۹	۲۱۱۰۰	Z5
۳۵	۲۵۱۰۰	M5F5	۳۱	۲۲۲۰۰	Z10
۳۳	۲۴۱۰۰	M7.5F7.5	۳۰	۲۲۱۰۰	Z15
۳۳	۲۳۸۰۰	M10F10	۲۸	۲۰۵۵۰	Z20
۲۷	۱۹۷۰۰	M15F15	۲۷	۱۹۸۵۰	Z25
۲۴	۱۷۰۰۰	M20F20	۲۴	۱۷۷۵۰	Z35
۲۳	۱۶۵۰۰	M25F25	۲۱	۱۵۳۲۰	Z45
۳۲	۲۳۳۵۰	Z2.5F2.5	۲۹	۲۱۱۵۰	F5
۳۵	۲۵۱۵۰	Z5F5	۳۰	۲۱۸۵۰	F10
۳۳	۲۴۲۵۰	Z7.5F7.5	۳۱	۲۲۷۵۰	F15
۳۲	۲۳۴۵۰	Z10F10	۳	۲۱۸۵۰	F20
۲۷	۱۹۴۴۲	Z15F15	۲۹	۲۱۱۵۰	F25
۲۲	۱۶۲۸۵	Z20F20	۲۴	۱۷۵۰۰	F35
۲۱	۱۵۲۸۵	Z25F25	۲۲	۱۵۶۰۰	F45
۳۶	۲۶۲۰۰	M2Z2F2	۱۹	۱۶۱۰۰	مرجع (PC)
۳۷	۲۷۲۰۰	M3Z3F3			
۳۴	۲۴۴۰۰	M5Z5F5			
۳۰	۲۱۶۳۰	M7Z7F7			
۲۸	۲۰۰۰۰	M10Z10F10			
۲۵	۱۷۸۵۰	M13Z13F13			
۲۳	۱۶۸۵۰	M15Z15F15			



شکل ۱۰: خلاصه نتایج آزمایشگاهی مقاومت دونیم شدگی نمونه‌های ترکیبی در سن ۹۰ روزه

همانطور که از اشکال ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، مقاومت دونیم شدگی بتن در تمامی نمونه‌های حاوی ترکیب‌های مواد پوزولانی بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M10 با ۶۸٪، Z10 و F15 با ۶۳٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. مقاومت دونیم شدگی بتن در تمامی نمونه‌های حاوی ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی مواد پوزولانی بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M5Z5، M5F5، Z5F5 با ۸۴٪، M3Z3F3 با ۹۵٪ بوده است. یکی از خواص مواد پوزولانی در بتن تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H gel)، بیشتر و در نتیجه افزایش قدرت بیشتر ناحیه انتقال می‌شود که خود باعث افزایش مقاومت دونیم شدگی در بتن می‌گردد.

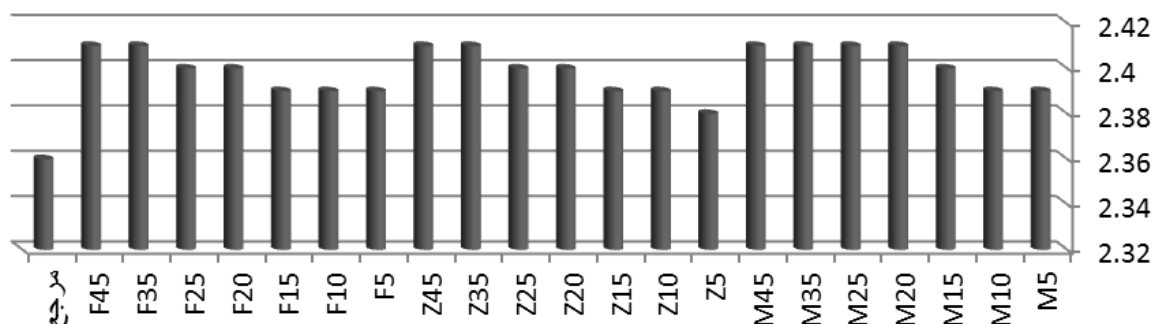
### ۳-۴- وزن مخصوص نمونه‌ها

آزمایش وزن مخصوص نمونه بتن سخت شده طبق استاندارد [۳۱] ASTM C642، در آزمایشگاه مکانیک خاک جهاد دانشگاهی کرمانشاه انجام گردید. جهت به دست آوردن وزن مخصوص، قبل از تعیین مقاومت فشاری بتن، نمونه‌ها از حوض عمل‌آوری بیرون آورده و با یک حوله آب مازاد سطحی آن خشک شده (حالت اشباع با سطح خشک) سپس با ترازو وزن و عدد وزن بر حسب گرم یادداشت می‌شود. بعد از توزین نمونه، ابعاد آن با کولیس اندازه‌گیری شده و بر حسب سانتیمتر یادداشت می‌گردد. سپس از رابطه ۲ مقدار وزن مخصوص ( $g/cm^3$ ) به دست می‌آید.

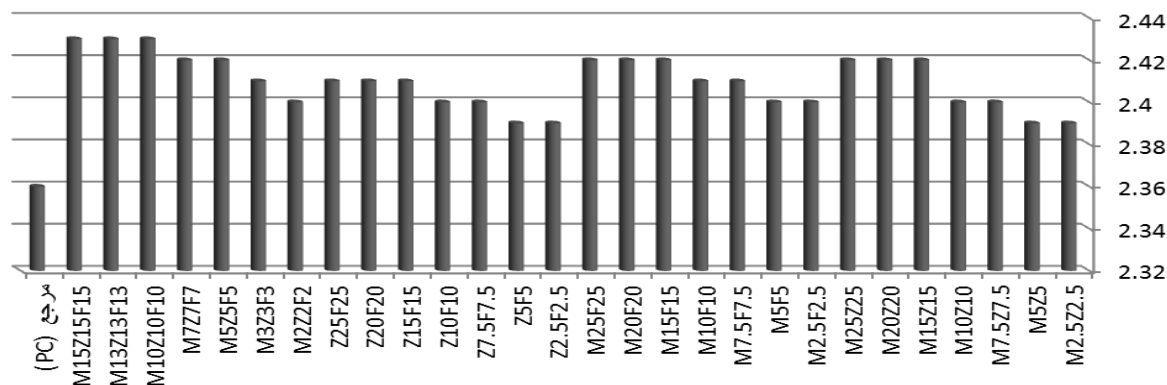
$$\rho = \frac{4m}{\pi D^2 L} \quad (2)$$

در رابطه فوق، P: وزن مخصوص ( $g/cm^3$ )، m: جرم آزمونه در حالت اشباع با سطح خشک، (gr)، L: طول آزمونه، (cm)، و D:

قطر آزمونه، (cm) می‌باشد.



شکل ۱۱: خلاصه نتایج آزمایشگاهی وزن مخصوص نمونه‌های ترکیبی



شکل ۱۲: خلاصه نتایج آزمایشگاهی وزن مخصوص نمونه‌های ترکیبی

جدول ۶: نتایج آزمایش وزن مخصوص

وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	شماره طرح	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	شماره طرح
۲/۳۹	M2.5Z2.5	۲/۳۹	M5
۲/۳۹	M5Z5	۲/۳۹	M10
۲/۴۰	M7.5Z7.5	۲/۴۰	M15
۲/۴۰	M10Z10	۲/۴۱	M20
۲/۴۰	M15Z15	۲/۴۱	M25
۲/۴۲	M20Z20	۲/۴۱	M35
۲/۴۲	M25Z25	۲/۴۱	M4
۲/۴۰	M2.5F2.5	۲/۳۸	Z5
۲/۴۰	M5F5	۲/۳۹	Z10
۲/۴۱	M7.5F7.5	۲/۳۹	Z15
۲/۴۱	M10F10	۲/۴۰	Z20
۲/۴۲	M15F15	۲/۴۰	Z25
۲/۴۲	M20F20	۲/۴۱	Z35
۲/۴۲	M25F25	۲/۴۱	Z45
۲/۳۹	Z2.5F2.5	۲/۳۹	F5
۲/۳۹	Z5F5	۲/۳۹	F10
۲/۴۰	Z7.5F7.5	۲/۳۹	F15
۲/۴۰	Z10F10	۲/۴۰	F20
۲/۴۱	Z15F15	۲/۴۰	F25
۲/۴۱	Z20F20	۲/۴۱	F35
۲/۴۱	Z25F25	۲/۴۱	F45
۲/۴۰	M2Z2F2	۲/۳۶	مرجع (PC)
۲/۴۱	M3Z3F3		
۲/۴۲	M5Z5F5		
۲/۴۲	M7Z7F7		
۲/۴۳	M10Z10F10		
۲/۴۳	M13Z13F13		
۲/۴۳	M15Z15F15		

همانطور که مشاهده می‌شود، در تمام نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی، به علت پر شدن خلل و فرج بتن، افزایش وزن مخصوص نسبت به نمونه مرجع مشاهده شده است. این روند رشد در نمونه‌های با ترکیب‌های تکی از ۳۵٪ بیشتر، بی‌تاثیر و در ترکیب‌های سه‌تایی و دوتایی از ۳۰٪ بیشتر، بی‌تاثیر و یکسان می‌باشد. حداکثر افزایش وزن مخصوص در ترکیب‌های سه‌تایی M10Z10F10، M13Z13F13 و M15Z15F15 با افزایش ۳٪ نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.

## ۳-۵- جذب آب نمونه‌ها

آزمایش جذب آب نمونه بتن سخت شده طبق استاندارد [۳۱] ASTM - C642، انجام می‌شود. جهت به دست آوردن جذب آب، قبل از تعیین مقاومت فشاری بتن، نمونه‌ها را از حوض عمل‌آوری بیرون می‌آوریم و با یک حوله آب مازاد سطحی آن را خشک می‌کنیم (حالت اشباع با سطح خشک) سپس با ترازو آن را وزن می‌کنیم و عدد وزن را بر حسب گرم یادداشت می‌کنیم ( $m_1$ ). بعد از توزین نمونه، آن را به داخل گرمخانه با دمای  $5 \pm 110$  درجه سانتیگراد انتقال می‌دهیم به مدت ۲۴ ساعت سپس آن را از گرمخانه بیرون می‌آوریم و بعد از سرد شدن در دمای محیط آن را وزن کرده و بر حسب گرم یادداشت می‌کنیم ( $m_2$ ). سپس از فرمول زیر مقدار جذب آب (%) به دست می‌آید. در صورتی نمونه خشک تلقی می‌گردد که اگر نمونه را در دو فاصله زمانی وزن کردیم، اختلاف آنها از  $0.5\%$  وزن بیشتر نشود. در غیر این صورت نمونه باید به مدت ۲۴ ساعت دیگر در گرمخانه بماند و خشک شود.

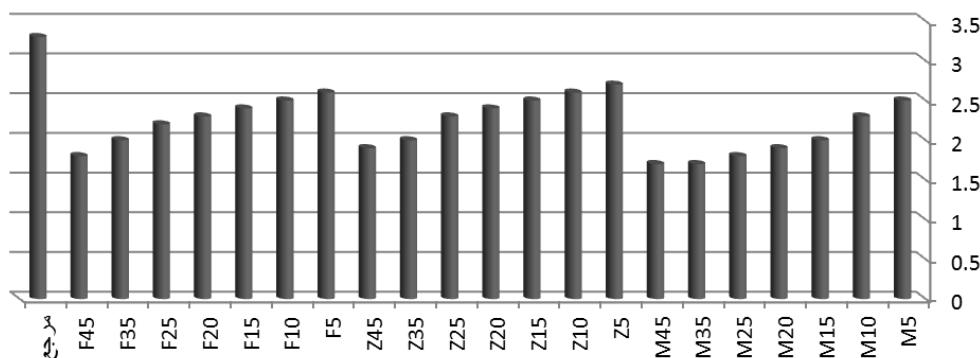
$$\omega = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

که در رابطه فوق،  $\omega$  جذب آب (%)،  $m_1$ : جرم آزمونه در حالت اشباع با سطح خشک (gr)،  $m_2$ : جرم آزمونه در حالت خشک، (gr) می‌باشد.

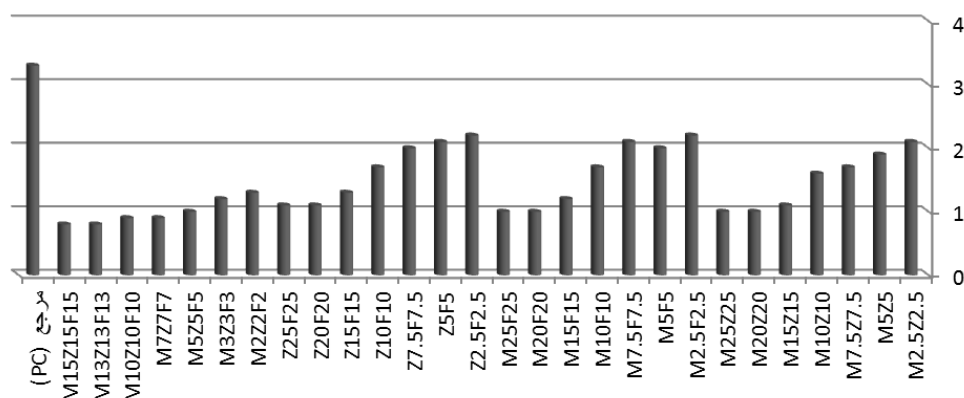
جدول ۷: نتایج آزمایش جذب آب

شماره طرح	وزن نمونه تر $m_1$ (g)	وزن نمونه خشک $m_2$ (g)	درصد جذب آب $\omega$ (%)	شماره طرح	وزن نمونه تر $m_1$ (g)	وزن نمونه خشک $m_2$ (g)	درصد جذب آب $\omega$ (%)
M5	۱۳۱۳۰	۱۲۸۰۲	۲/۵	M2.5Z2.5	۱۳۱۰۰	۱۲۸۲۵	۲/۱
M10	۱۳۱۲۵	۱۲۸۲۳	۲/۳	M5Z5	۱۳۱۸۰	۱۲۹۳۰	۱/۹
M15	۱۳۲۴۵	۱۲۹۸۰	۲/۱۰	M7.5Z7.5	۱۳۰۵۰	۱۲۸۲۵	۱/۷
M20	۱۳۲۵۰	۱۲۹۹۸	۱/۹	M10Z10	۱۳۲۶۰	۱۳۰۴۸	۱/۶
M25	۱۳۲۳۵	۱۲۹۹۷	۱/۸	M15Z15	۱۳۲۸۰	۱۳۱۳۴	۱/۱
M35	۱۳۲۲۰	۱۲۹۹۸	۱/۷	M20Z20	۱۳۳۴۵	۱۳۲۱۰	۱/۰
M45	۱۳۲۲۵	۱۲۹۹۷	۱/۷	M25Z25	۱۳۳۴۱	۱۳۲۱۰	۱/۰
Z5	۱۳۱۲۲	۱۲۷۶۸	۲/۷	M2.5F2.5	۱۳۲۳۵	۱۲۹۴۴	۲/۲
Z10	۱۳۱۷۰	۱۲۸۲۱	۲/۶	M5F5	۱۳۲۰۵	۱۲۹۴۱	۲/۰
Z15	۱۳۱۷۰	۱۲۸۲۱	۲/۵	M7.5F7.5	۱۳۲۲۵	۱۲۹۴۴	۲/۱
Z20	۱۳۱۵۰	۱۲۸۳۱	۲/۴	M10F10	۱۳۲۹۰	۱۳۰۶۴	۱/۷
Z25	۱۳۲۰۲	۱۲۸۹۸	۲/۳	M15F15	۱۳۳۵۳	۱۳۱۹۳	۱/۲
Z35	۱۳۲۲۰	۱۲۹۵۶	۲/۱۰	M20F20	۱۳۳۵۰	۱۳۲۱۷	۱/۰
Z45	۱۳۲۳۰	۱۲۹۷۹	۱/۹	M25F25	۱۳۳۵۲	۱۳۲۱۷	۱/۰
F5	۱۳۱۱۵	۱۲۷۷۴	۲/۶	Z2.5F2.5	۱۳۱۸۰	۱۲۸۹۰	۲/۲
F10	۱۳۱۹۰	۱۲۸۵۴	۲/۵	Z5F5	۱۳۱۶۰	۱۲۸۸۴	۲/۱
F15	۱۳۱۷۰	۱۲۸۵۴	۲/۴	Z7.5F7.5	۱۳۱۵۰	۱۲۸۹۰	۲/۰
F20	۱۳۱۶۰	۱۲۸۵۴	۲/۳	Z10F10	۱۳۲۴۱	۱۳۰۱۶	۱/۷
F25	۱۳۲۴۰	۱۲۹۴۹	۲/۲	Z15F15	۱۳۲۵۵	۱۳۰۸۳	۱/۳
F35	۱۳۲۵۰	۱۲۹۸۵	۲/۱۰	Z20F20	۱۳۲۷۵	۱۳۱۲۹	۱/۱
F45	۱۳۲۵۰	۱۳۰۱۵	۱/۸	Z25F25	۱۳۲۷۰	۱۳۱۲۹	۱/۱
مرجع (PC)	۱۳۰۳۰	۱۲۵۹۶	۳/۳	M2Z2F2	۱۳۳۱۰	۱۳۱۴۷	۱/۳
				M3Z3F3	۱۳۲۹۷	۱۳۱۴۷	۱/۲
				M5Z5F5	۱۳۲۸۰	۱۳۱۴۷	۱/۰
				M7Z7F7	۱۳۳۶۲	۱۳۲۴۲	۰/۹
				M10Z10F10	۱۳۳۷۶	۱۳۲۵۹	۰/۹
				M13Z13F13	۱۳۳۶۵	۱۳۲۵۳	۰/۸
				M15Z15F15	۱۳۳۶۵	۱۳۲۵۳	۰/۸





شکل ۱۳: خلاصه نتایج آزمایشگاهی جذب آب نمونه‌های نکی در سن ۹۰ روزه



شکل ۱۴: خلاصه نتایج آزمایشگاهی جذب آب نمونه‌های ترکیبی در سن ۹۰ روزه

در تمام نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی، به علت پر شدن خلل و فرج بتن، کاهش جذب آب نسبت به نمونه مرجع مشاهده شده است. این روند رشد در نمونه‌های با ترکیب‌های سه‌تایی و دوتایی از ۴۰٪ بیشتر، بی‌تاثیر و یکسان می‌باشد. حداکثر کاهش جذب آب در ترکیب‌های سه‌تایی M15Z15F15 و M13Z13F13 با کاهش ۷۶ درصدی نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.

### ۳-۶- تعیین مقاومت الکتریکی بتن

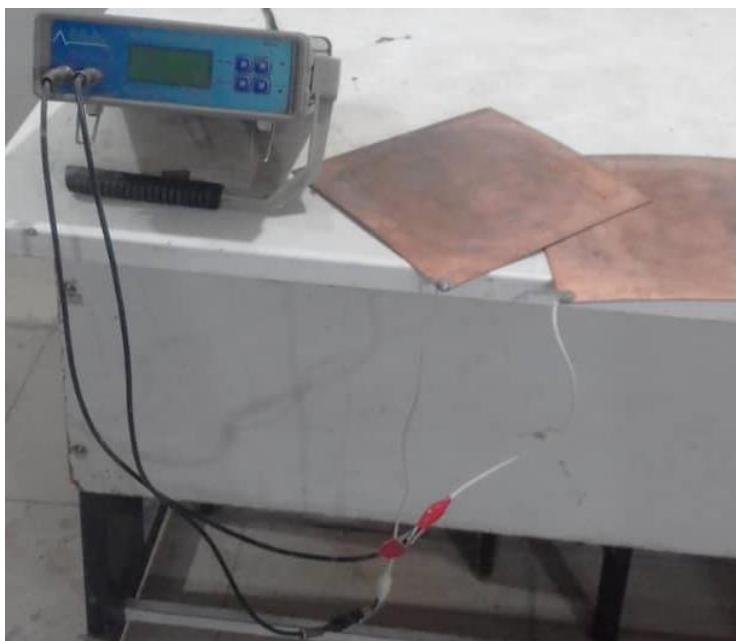
یکی از عوامل اصلی خرابی در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی میلگردها می‌باشد و مهمترین عامل در افزایش سرعت این تخریب نفوذپذیری بتن به شمار می‌رود. مقاومت الکتریکی بتن شاخصی مناسب برای ارزیابی نفوذپذیری بتن و مقاومت آن در مقابل نفوذ یون کلراید می‌باشد. این روش کاملاً غیر مخرب است و سادگی، سرعت بالا و اقتصادی بودن آن بر کاربرد این روش می‌افزاید. با افزایش مقاومت الکتریکی، جریان عبوری از میلگرد کاسته می‌شود، بنابراین مقاومت الکتریکی بتن می‌تواند به عنوان یک وسیله سنجش غیرمستقیم برای میزان توانایی بتن در مقابله با خوردگی به کار رود. متداول‌ترین روش اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقاومت ویژه الکتریکی بتن به روش حجمی می‌باشد. آزمایش‌های صورت گرفته در آزمایشگاه مهندسی مشاور سیناب همدان انجام گرفت.

برای تعیین مقاومت الکتریکی بتن سخت شده به روش حجمی تک محوری، دستورالعمل و استاندارد در BS و ASTM و استانداردهای معتبر، وجود ندارد لذا برای تعیین این مقاومت از وسایل و روش متداول حجمی استفاده شده است. در این روش نمونه‌ی بتنی بین دو الکترود (معمولاً دو صفحه‌ی مسی موازی) قرار می‌گیرد. برای اینکه صفحات هیچ گونه اتصالی با زمین و میز کار نداشته باشند به صفحات پلاستیکی چسبانده می‌شوند. برای اتصال کامل صفحات مسی با سطح بتن نیازمند یک ماده‌ی رسانا هستیم. بدین منظور از خمیر سیمان یا اسفنج مرطوب استفاده می‌شود که در این آزمایش از خمیر سیمان استفاده شده است. خمیر سیمان از یک سو دارای یون‌های آزاد زیادی می‌باشد که هادی الکتریکی با مقاومت پایین است و از سوی دیگر سبب اتصال کامل بین سطح بتن با صفحات مسی می‌شود. برای

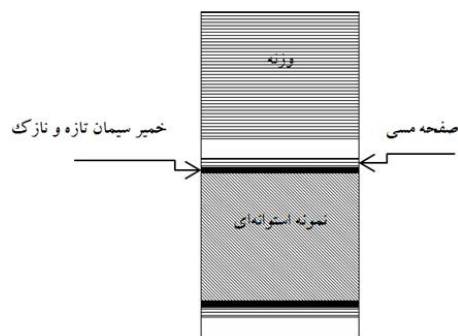
آنکه از اتصال کامل مطمئن شویم از یک وزنه بر روی صفحه فوقانی استفاده شده است. یک جریان متناوب با فرکانس 1 kHz به نمونه اعمال شده و اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود اندازه گیری می شود. از رابطه زیر مقدار مقاومت ویژه الکتریکی حجمی تک محوری بتن محاسبه می شود.

$$\rho = ZK = Z \frac{A}{L} \quad (5)$$

که در رابطه ۵،  $\rho$ : مقاومت ویژه الکتریکی ( $\Omega\text{-m}$ )،  $Z$ : مقاومت الکتریکی ( $\Omega$ )،  $K=A/L$ : ضریب هندسی نمونه ( $m$ )،  $A$ : سطح مقطع نمونه ( $m^2$ )، و  $L$ : ارتفاع نمونه استوانه‌ای ( $m$ ) می باشد. روش تک محوری یک شیوه آسان برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن در آزمایشگاه است. همان نمونه‌ی مورد استفاده برای ارزیابی مقاومت فشاری را می توان برای سنجش مقاومت الکتریکی به کار برد. استفاده از روش تک محوری برای ارزیابی در محل پروژه دارای محدودیت بوده و نیازمند مغزه گیری است.



ب

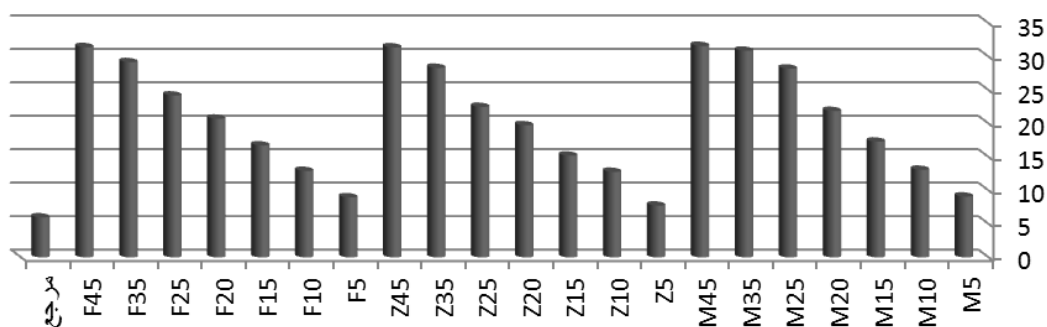


الف

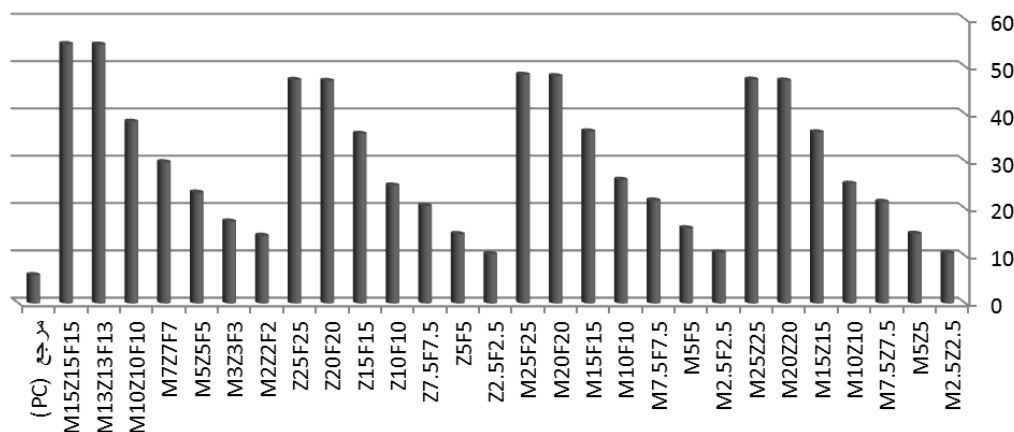
شکل ۱۵: الف) نحوه آماده سازی آزمونه برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی، ب) دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی حجمی

جدول ۸: خلاصه نتایج آزمایشگاهی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه

شماره طرح	مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ-cm)	شماره طرح	مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ-cm)
M5	۹/۱۰	M2.5Z2.5	۱۰/۶۳
M10	۱۳/۱۱	M5Z5	۱۴/۷۳
M15	۱۷/۳۱	M7.5Z7.5	۲۱/۴۹
M20	۲۱/۹	M10Z10	۲۵/۳
M25	۲۸/۲۲	M15Z15	۳۶/۱۷
M35	۳۰/۹۰	M20Z20	۴۷/۱۱
M45	۳۱/۶۲	M25Z25	۴۷/۳۱
Z5	۷/۷۶	M2.5F2.5	۱۰/۷۷
Z10	۱۲/۷۹	M5F5	۱۵/۹
Z15	۱۵/۲۲	M7.5F7.5	۲۱/۷۷
Z20	۱۹/۷۶	M10F10	۲۶/۱۴
Z25	۲۲/۵۱	M15F15	۳۶/۳۷
Z35	۲۸/۳۴	M20F20	۴۸/۰۴
Z45	۳۱/۴	M25F25	۴۸/۳۴
F5	۸/۹۸	Z2.5F2.5	۱۰/۴۳
F10	۱۲/۹۴	Z5F5	۱۴/۶۷
F15	۱۶/۷۴	.5 Z7.5F	۲۰/۶۳
F20	۲۰/۷۴	Z10F10	۲۴/۹۳
F25	۲۴/۲۱	Z15F15	۳۵/۸۵
F35	۲۹/۲	Z20F20	۴۷/۰۴
F45	۳۱/۴۴	Z25F25	۴۷/۲۴
مرجع (PC)	۵/۹۹	M2Z2F2	۱۴/۳۲
		M3Z3F3	۱۷/۳۲
		M5Z5F5	۲۳/۴۴
		M7Z7F7	۲۹/۸۵
		M10Z10F10	۳۸/۴۱
		M13Z13F13	۵۴/۷۱
		M15Z15F15	۵۴/۸۲



شکل ۱۶: خلاصه نتایج آزمایشگاهی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های تکی در سن ۹۰ روزه



شکل ۱۷: خلاصه نتایج آزمایشگاهی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های ترکیبی در سن ۹۰ روزه

جایگزین کردن مواد پوزولانی بجای درصدی از مواد سیمانی، از جمله راه‌کارهای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، نسبت به نمونه‌های معمولی و رایج می‌باشد. مواد پوزولانی موجب کنترل تجزیه شیمیایی ناشی از C-S-H، که در اثر نشست کلسیم در آب رخ می‌دهد، شده و همچنین موجب جلوگیری از نفوذ آب به داخل بتن می‌شود که هر دوی این موارد دوام بتن را افزایش می‌دهند.

واکنش تدریجی مواد پوزولانی با هیدروکسید کلسیم و قلیایی‌های حاصل از آگیری سیمان موجب ایجاد ژل بیشتر و مسدود شدن فضاهای خالی و در نتیجه کاهش نفوذپذیری، در بتن می‌شود. در تمامی نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی مقدار مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است (از ۱/۳ تا ۹/۱ برابر). مقدار مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن نمونه‌های حاوی ترکیب سه‌تایی مواد پوزولانی، از ترکیب‌های دوتایی و تکی بیشتر بوده که حداکثر آن مربوط به طرح‌های M15Z15F15 و M13Z13F13 می‌باشد. این مقدار برابر ۹/۱ برابر نمونه مرجع افزایش داشته است و وجود ۴۰٪ بیشتر مواد پوزولانی تقریباً بی‌اثر می‌باشد و مقاومت الکتریکی در این مقدار ثابت می‌شود.

#### ۴- نتیجه گیری

۱- در نمونه‌های حاوی ترکیب‌های تکی، دوتایی و سه‌تایی و ثابت بودن نسبت آب به سیمان در تمام طرح اختلاط‌ها، هر چه درصد پوزولان بیشتر باشد، آب بیشتری را جذب خود خواهد نمود و نمونه‌ها اسلامپ کمتری خواهند داشت.

۲- با توجه به دیرگیر بودن مواد پوزولانی مخصوصاً در سنین پایین‌تر، در برخی نمونه‌ها خصوصیات مکانیکی افت داشته و یا رشد کمی نسبت به نمونه مرجع دارد. با توجه به واکنش‌پذیری بالای متاکائولین نسبت به زئولیت و خاکستر بادی نمونه‌های حاوی این پوزولان به تنهایی از روند رشد بیشتری برخوردار هستند. دلیل این امر را می‌توان به سطح مخصوص بیشتر ذرات متاکائولین نسبت داد. از طرف دیگر، مجموع  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  در متاکائولین برابر ۹۸٪ می‌باشد که از زئولیت (۸۳٪) و خاکستر بادی (۹۵٪) بیشتر است.

۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ترکیب‌های سه‌تایی مواد پوزولانی، از ترکیب‌های دوتایی و تکی با درصد‌های عددی مشابه، منتج به مقاومت‌های فشاری بیشتری شده است. بیشترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به طرح M3Z3F3 می‌باشد که مقاومت فشاری ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۱۴٪، ۲۴٪، ۴۱٪ و ۵۴٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است.

۴- با توجه به مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی ترکیب‌های تکی، دوتایی و سه‌تایی با مجموع حداکثر تا ۴۵٪، باعث افزایش مقاومت فشاری با درصد‌های مختلف می‌شود و بیشتر از آن روند نزولی خواهد داشت که این نکته در نمونه‌های M25F25، M25Z25 و

Z25F25 (۵۰ درصد پوزولان) مشخص شده است. یکی از دلایل مهم موثر بر این رفتار را می‌توان به خاصیت کلوخه شدن ذرات پوزولان و افزایش میزان به کارگیری آن به دلیل ریزی بیش از حد عنوان کرد.

۵- مقاومت کششی بتن در تمامی نمونه‌های حاوی ترکیب‌های مواد پوزولانی بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M10 با ۶۸٪، Z10 با ۶۳٪ و F15 با ۶۳٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. مقاومت کششی بتن در تمامی نمونه‌های حاوی ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی مواد پوزولانی بیشتر از نمونه مرجع بوده است که بیشترین افزایش مربوط به نمونه‌های M5F5، M5Z5، Z5F5 با ۸۴٪ و M3Z3F3 با ۹۵٪ بوده است. یکی از خواص مواد پوزولانی در بتن تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته، بیشتر و در نتیجه افزایش قدرت بیشتر ناحیه انتقال می‌شود که خود باعث افزایش مقاومت کششی در بتن می‌گردد.

۶- در تمام نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی، به علت پر شدن خلل و فرج بتن، افزایش وزن مخصوص نسبت به نمونه مرجع مشاهده شده است. این روند رشد در نمونه‌های با ترکیب‌های تکی از ۳۵٪ بیشتر، بی‌تاثیر و در ترکیب‌های سه‌تایی و دوتایی از ۳۰٪ بیشتر، بی‌تاثیر و یکسان می‌باشد. حداکثر افزایش وزن مخصوص در ترکیب‌های سه‌تایی M10Z10F10، M13Z13F13 و M15Z15F15 با افزایش ۳٪ نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.

۷- در تمام نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی، به علت پر شدن خلل و فرج بتن، کاهش جذب آب نسبت به نمونه مرجع مشاهده شده است. این روند رشد در نمونه‌های با ترکیب‌های سه‌تایی و دوتایی از ۴۰٪ بیشتر، بی‌تاثیر و یکسان می‌باشد. حداکثر کاهش جذب آب در ترکیب‌های سه‌تایی M13Z13F13 و M15Z15F15 با کاهش ۷۵ درصدی نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.

۸- در تمامی نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی مقدار مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است (از ۱/۳ تا ۹/۱ برابر). مقدار مقاومت ویژه الکتریکی حجمی بتن نمونه‌های حاوی ترکیب سه‌تایی مواد پوزولانی، از ترکیب‌های دوتایی و تکی بیشتر بود که حداکثر آن مربوط به طرح‌های M13Z13F13 و M15Z15F15 می‌باشد. این مقدار برابر ۹/۱ برابر نمونه مرجع افزایش داشته است و وجود ۴۰٪ بیشتر مواد پوزولانی تقریباً بی‌اثر می‌باشد و مقاومت الکتریکی در این مقدار ثابت می‌شود.

## مراجع

- [1] Mustafa, Sarıdemir., Murat, Çiflikli, Faruk, Soysat., (2018) "Mechanical and microstructural properties of HFRHSCs containing metakaolin subjected to elevated temperatures and freezing-thawing cycles", *Construction and Building Materials* 158, 11–23
- [2] Adel, Al Menhosh., Yu, Wanga. Yan, Wang., (2018) "Long term durability properties of concrete modified with metakaolin and polymer admixture", *Construction and Building Materials* 172, 41–51
- [3] M.S, Morsy., H, Shoukry., M.M, Mokhtar., (2018) "Facile production of nano-scale metakaolin: An investigation into its effect on compressive strength, pore structure and microstructural characteristics of mortar", *Construction and Building Materials* 172, 243–250
- [4] Burcu, Akcay., Mehmet Ali, Tasdemir., (2018) "Performance evaluation of silica fume and metakaolin with identical finenesses in self compacting and fiber reinforced concretes", *Construction and Building Materials* 185, 436–444.
- [5] Babak Ahmadi, Mohammad Shekarchi. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*. Vol: 32. Pages: 134–141.
- [6] Caputo D, Liguori B, Colella C. (2008). Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: the effect of zeolite structure. *Cem Concr Compos*. Vol: 30. Issue: 5. Pages :455–62.
- [7] Moradi, M. J., Khaleghi, M., Salimi, J., Farhangi, V., & Ramezani-pour, A. M. (2021). Predicting the compressive strength of concrete containing metakaolin with different properties using ANN. *Measurement*, 183, 109790.
- [8] Mohammed Seddik, Meddah., Mohamed A, Ismail., Sherif El, Gamal., Heni, Fitriani., (2018) "Performances evaluation of binary concrete designed with silica fume and metakaolin", *Construction and Building Materials* 166, 400–412.

- [9] S, Sujjavanich., P, Suwanvitaya., D, Chaysuwan., G, Heness., (2017) “Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete”, *Construction and Building Materials* 155 830–837
- [10] Bing, Yana., Ping, Duana., Daming, Rena., (2016) “Mechanical strength, surface abrasion resistance and microstructure of fly ash-metakaolin-sepiolite geopolymer composites”, *Ceramics International*.
- [11] Shukai, Cheng., Zhonghe, Shui., , Qiu, Li., Tao, Sun., Ronghui Yang., (2016) “Properties, microstructure and hydration products of lightweight aggregate concrete with metakaolin and slag addition”, *Construction and Building Materials* 127 59–67.
- [12] J.J, Chen., P.L, Ng., L.G, Li., A.K.H, Kwan., (2018) “Use of Superfine Zeolite in Conjunction with Silica Fume Effects on Rheology and Strength of Cementitious Paste”, *To appear in: Powder Technology-5*.
- [13] Shehata, M. H., & Thomas, M. D. (2021). Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali–silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 341-349.
- [14] BS 3892-1, “Pulverized-fuel ash. Specification for pulverized-fuel ash for use with Portland cement”, 31 October 2007.
- [15] IS 3812-1, “Specification for Pulverized Fuel Ash, Part 1: For Use as Pozzolana in Cement, Cement Mortar and Concrete”, 2013.
- [16] BS EN 450-1, “Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria ”, 13 June 2018.
- [17] ASTM 618, “ Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing ”, 2013.
- [18] ASTM - D422, “ Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”, 2016.
- [19] ASTM - C88, “ Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate ”, 2018.
- [20] ASTM - C117, “ Materials Finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing ”, 2017.
- [21] ASTM - C127- 128, “ Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate ”, 2015.
- [22] ASTM - D2419-14, “ Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate ”, 2014.
- [23] ASTM - D4791, “ Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate (Withdrawn 2019) ”, 2019.
- [24] ASTM- C535, “ Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine ”, 2016.
- [25] ASTM -C29, “ Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate ”, 2017.
- [26] ASTM -C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates ”, 2014.
- [27] ASTM C494 / C494M - 17, “ Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete ”, 2017.
- [28] ACI-211, “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) ”, ACI-211, Reported by ACI Committee 211, Published: 25 August 2016.
- [29] ASTM – C143/ C143M-15a, “ Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [30] Dong, Y., Pei, L., Fu, J., Yang, Y., Liu, T., Liang, H., & Yang, H. (2022). Investigating the Mechanical Properties and Durability of Metakaolin-Incorporated Mortar by Different Curing Methods. *Materials*, 15(6), 2035.
- [31] ASTM – C642, “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org).