



The effect of Minoodasht region calcined clay of Golestan province and silica fume on the mechanical properties of concrete

Hassan Ghezelsofla *, Amir Tarighat

Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this research, calcined clay was used as pozzolan, first the soil was heated to 700 degrees Celsius to be calcined, then it was replaced with cement with lime powder. In this research, 10 mixed designs were used in 2 ratios of w/c, 0.35, and 0.4. In each proportion of clay at 0, 10, and 20%, limestone powder at 0, 30, and 20%, respectively, and microsilica along with the combination of soil and lime at 0 and 7% by weight as powder materials were replaced by cement. To check the properties of the prepared soil, XRF and XRD tests were performed on it. To investigate and analyze the mechanical properties of concrete from compressive strength tests on 10 cm cube samples at 4 ages of 3, 7, 28, and 90 days, tensile strength on cylindrical samples and flexural strength on prismatic samples at 28 years of age. Fasting was used. Over time and reaching the age of 90 days, designs containing 20% calcined clay and 20% lime Mix3 and Mix8 have more resistance in pozzolanic designs and are introduced as optimal pozzolanic designs.

Review History:

Received: Aug. 15, 2023

Revised: Aug. 01, 2024

Accepted: Sep. 14, 2024

Available Online: Oct. 03, 2024

Keywords:

Calcined Clay

Pozzolan

Compressive Strength

Tensile Strength

Bending Strength

1- Introduction

Cement and concrete are essential for the infrastructure of the modern world, no other material can satisfy the ever-increasing demand for structural materials with the same low environmental impact. The wide availability and low price of cement has made it the most widely used material on earth, which with reinforced concrete includes more than half of the factory production that humans produce. This large volume of cement and concrete production includes about 5-8% of CO₂ emissions caused by human activity[1]. Pozzolan is a material with the combination of Al₂O₃ and SiO₂, which does not have cement value by itself, but if it is fine crystal or amorphous, it will have cement properties in the vicinity of lime water. This silicon or silicon-aluminum material reacts with calcium hydroxide caused by cement hydration in the presence of moisture and produces cement products [2]. Substituting 5 to 20% of calcined kaolin (metakaolin) instead of cement in concrete increased its compressive, tensile, and bending strength, and at the replacement of 15%, the compressive strength became optimal [3]. Since the replacement of metakaolin as a part of cement improved the mechanical properties of concrete, the researchers concluded that there are three effective factors in improving the mechanical properties and durability of concrete: filler effect, acceleration of cement hydration (in high degrees),

and the pozzolanic reaction of metakaolin with calcium hydroxide[4,5]]. The effect of metakaolin on improving the tensile strength of concrete is greater, also, the replacement of metakaolin in concrete has increased the flexural strength of concrete compared to the control sample in low water-to-cement ratios [5]. Due to the filling effect, acceleration of hydration, and pozzolanic reaction with CH in the form of C-S-H, metakaolin increases the compressive strength of concrete, reduces permeability and porosity, and improves the pore structure [6]. In more recent studies based on different percentages of metakaolin in calcined clay, it was observed that the higher the amount of metakaolin in calcined clay, the more compressive strength concrete samples made with it[7]. The results of research on 4 types of LC3 concrete that were made using two types of soil and two types of lime, 30% calcined clay and 15% limestone powder were replaced by cement and were made in two water-to-cement ratios of 0.475 and 0.5. It shows that their compressive, tensile, and bending resistances are also high and they have performed well[8].

2- Materials and methods

The characteristics of the chemical composition of cement materials including cement, clay, and limestone powder used in this research are given in Table 1. The calcination process of clay including kaolinite occurs at a temperature between

*Corresponding author's email: hassan.ghezel@sru.ac.ir



Table 1. Characteristics of chemical compounds of cement materials

%Weight	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	FreeCaO	IR	LOI	Total
Cement	20.8	5.2	3.65	62.1	1.8	2.5	0.55	0.3	1.2	0.3	1.5	99.9
Silica fume	93.95	0.9	0.8	1	1.25	0.06	0.25	0.4			1	99.61
Clay	57.6	17.7	5.6	6.3	3.3	0.03					9.68	99.67
Limestone	5.6		0.05	51.7	1.4						41.15	99.9

Table 2. Specifications of the concrete mix design made in the research

Mix Design	w/c	Cement %	Clay %	Lime stone %	Silica Fume %	Coarse Agg (kg/m ³)	Fine Agg (kg/m ³)	Free Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Clay (kg/m ³)	Limestoe (kg/m ³)	Silica Fume (kg/m ³)
C0L0	0.35	100	0	0	0	744	1116	140	400	0	0	0
C10L30	0.35	60	10	30	0	744	1116	140	240	40	120	0
C20L20	0.35	60	20	20	0	744	1116	140	240	80	80	0
C10L30SF7	0.35	55.8	10	30	4.2	744	1116	140	223.2	40	120	16.8
C20L20SF7	0.35	55.8	20	20	4.2	744	1116	140	223.2	80	80	16.8
C0L0	0.4	100	0	0	0	736	1104	160	400	0	0	0
C10L30	0.4	60	10	30	0	736	1104	160	240	40	120	0
C20L20	0.4	60	20	20	0	736	1104	160	240	80	80	0
C10L30SF7	0.4	55.8	10	30	4.2	736	1104	160	223.2	40	120	16.8
C20L20SF7	0.4	55.8	20	20	4.2	736	1104	160	223.2	80	80	16.8

550 and 900 degrees Celsius, which results in the production of an amorphous silica compound called metakaolin, which is an aluminosilicate pozzolan, and this reaction is shown in formula 1 [9].



3- Results and Discussion

With increasing age, the compressive strength of the samples has increased. The reason for this is that with increasing age, the hydration between cement and water has increased, causing the reduction of lime water in concrete and the increase of silicate gel in it. The compressive strength of the pozzolanic samples is lower than that of the control concrete, the reason for this is the incompleteness of the pozzolanic reactions and their diluting properties (not having enough calcium hydroxide for the pozzolanic reaction). But with the passage of time and the samples reaching the age of 28 days and 90 days, this lack of resistance has been compensated to a large extent and the resistance of the design samples has reached close to the resistance of the control samples, which indicates the beginning of pozzolanic reactions of calcined clay after the initial ages. The tensile strength values have decreased with the increase in the ratio of water to cement materials from 0.35 to 0.4 at the age of 28 days, which is due to the increase in the thickness of the surface transition zone (ITZ) following the increase in the amount of water consumed in concrete. As a result, the increase in the thickness of the surface transfer zone in concrete causes an

increase in the porosity of the concrete and a decrease in the tensile strength of the samples. Concretes made with calcined clay have higher ductility than normal concretes, and for this reason, they have accepted more cracks during bending tests and have endured a relatively good load, but in the control designs, due to brittleness after reaching the critical load With the first microcracks, the test beam was destroyed.

4- Conclusion

1- The mechanical properties of all designs improve over time, which is more noticeable in the designs containing pozzolan and causes these designs to become denser than the control design.

2- The 28-day compressive strength of designs was lower than the control design's compressive strength, but with the passage of time and reaching the age of 90 days, a large part of This reduction has been compensated.

3- The values of compressive strength in designs in which calcined clay, limestone powder and microsilica were used at the same time were very suitable and after 90 days, it obtained the highest values of compressive strength in pozzolanic designs.

4- samples reaching the age of 90 days, the designs containing 20% calcined clay and 20% lime have the highest resistance in pozzolanic designs and the pozzolanic reactions in them are more complete and are introduced as optimal pozzolanic designs.

5- In the tensile strength test, the process of gaining strength is the same as the compressive strength test, and the optimal amount of calcined clay is 20%, and the

highest amount of tensile strength for pozzolanic designs is assigned to the design containing 20% calcined clay and 7% microsilica.

6- In the modulus of rupture test, from the point of view of the amount of applied load, the designs had a trend similar to the compressive and tensile strength, but in a range very close to the control design, but from the point of view of the amount of spring created, they acted completely opposite to the resistance behavior.

7- According to the load capacity of designs including soil, which is in a range close to the control designs and at the same time, the flexibility is higher than the control design, it can be concluded that concretes made with calcined clay have higher ductility than normal concretes.

References

- [1] Karen I. scrivener “options for the future of cement” the indian concrete journal july 2014 vol 88 issue 7
- [2] Morsy, M. S., and S. S. Shebl. 2007. “Effect of silica fume and metakaolin pozzolana on the performance of belend cement paste analys fire”. *Ceramics – silikaty*51(1):40-44
- [3] Nasir, S.h., F. N. Muhd., U.K. Sadaqat., A. Tehmina. 2015. “Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete”. *Construction and Building Materials*(81): 313-323
- [4] Kadri, El-Hadj., S. Kenai., K. Ezziane., R. Siddique., and G. Schutter. 2011. “Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar”. *Applied clay science*53:704-708.
- [5] Justice, J. M., L. H. Kennison., B. J. Mohr., S. L. Beckwith., J. E. McCormick., B. Wigginz., Z. Z. Zhang., K. E. Kurtis. 2005. “Comparision of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitious materials”. international symposion on utizilation of high-strength/ high performance concrete. Washington D.C. June. 20-24.
- [6] Wild, S., J. M. Khatibe., and A. Jones. 1996. “Relative Strength, Pozalanic activity and cement hydration in super plasticised metakaolin concrete”, *cement and concrete research*26:1537-1544
- [7] Scrivener K, Avet F, Maraghechi H et al. (2019) Impacting factors and properties of limestone calcined clay cement (LC3). *Green Materials* 7(1): 3–14, <https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00029>
- [8] Shashank bishoni, Amit mallik, Oumen Maity, Shiju Joseph and Sreejith Krishnan “Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement” *The Indian Experience* April 2017
- [9] AlejandraTironiaMónica, A.TrezzaaAlberto N.ScianbEdgardo F.Irassara Kaolinitic calcined clays: “Factors affecting its performance as pozzolans”.



تأثیر خاک رس کلسینه منطقه مینودشت استان گلستان و میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن

حسن قزلسلفی^{*}، امیر طریقت

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

خاک رس کلسینه
پوزولان
مقاومت فشاری
مقاومت کششی
مقاومت خمشی

خلاصه: حجم گسترده تولید سیمان حدود ۸ تا ۵٪ انتشار CO₂ را شامل می‌شود. آثار سوء زیست محیطی گاز CO₂ و همچنین نیاز به افزایش مقاومت و دوام بتن منجر به معرفی پوزولان گردید. افزودن متاکائولین باعث کاهش تخلخل در بتن می‌گردد، در نتیجه بتن‌های حاوی متاکائولین در مقایسه با بتن‌های معمولی نفوذپذیری کمتری دارند. در این تحقیق از خاک رس کلسینه شده به عنوان پوزولان استفاده شد، ابتدا خاک تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده می‌شود تا کلسینه شود سپس با پودر سنگ آهک جایگزین سیمان می‌گردد. در این تحقیق ۱۰ طرح مخلوط در ۲ نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و ۰/۴ ساخته شد. خاک رس کلسینه در درصدهای صفر، ۱۰ و ۲۰٪، پودر سنگ آهک به ترتیب در درصدهای صفر، ۳۰ و ۲۰٪ و میکروسیلیس نیز به همراه ترکیب خاک و آهک در درصدهای صفر و ۷٪ وزنی به عنوان مواد پودری جایگزین سیمان شدند. جهت بررسی خواص خاک رس تهیه شده بر روی آن آزمایش XRF و خهت اطمینان از آمورف بودن رس کلسینه آزمایش XRD انجام گرفت. برای بررسی و تحلیل خواص مکانیکی بتن از آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های منشوری در سن ۲۸ روزه استفاده شد. با گذشت زمان و رسیدن نمونه‌ها به سن ۹۰ روزه طرح‌های شامل ۲۰٪ رس کلسینه و ۲۰٪ آهک Mix3 و Mix8 دارای بیشترین مقاومت در طرح‌های پوزولانی هستند و به عنوان طرح‌های بهینه پوزولانی معرفی می‌گردند.

۱- مقدمه

بلور و یا آمورف بودن در مجاورت آب آهک خاصیت سیمانی خواهد داشت. پوزولان برای اولین بار در دهکده پوزولی در جنوب غرب آفریقا کشف شد. این ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی در حضور رطوبت با هیدروکسید کلسیم ناشی از هیدراسیون سیمان وارد واکنش شده و محصولات سیمانی تولید می‌کند [۲]. پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی مانند کائولن، هالوزیت، ژئولیت و میکروسیلیس، به صورت فراوان و بلااستفاده در دسترس ما هستند که می‌توان با جایگزینی سهم مناسبی از آنها در سیمان، علاوه بر کاهش مصرف سیمان، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشید. استفاده از پوزولان یکی از راه‌های رایج افزایش عمر بتن است. پوزولان‌ها با بهبود منافذ بتن منجر به قدرت بالاتر و نفوذپذیری کمتر بتن می‌شوند [۳-۴]. استفاده از پوزولان به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلیل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت است. گرچه ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد [۵]. از پوزولان‌های نام‌برده و همچنین پوزولان‌هایی مانند سرباره

سیمان و بتن برای زیرساخت‌های جهان مدرن ضروری هستند، هیچ ماده دیگری قادر نیست تقاضای روز افزون مصالح سازه‌ای را با همان اثرات زیست محیطی پایین ارضا نماید. دسترسی گسترده و قیمت پایین سیمان را پر استفاده ترین متریال روی زمین گردانده است که با بتن مسلح بیشتر از نصف تولیدات کارخانه‌ای که بشر تولید میکند را شامل می‌شوند. این حجم گسترده تولید سیمان و بتن حدود ۸ تا ۵٪ انتشار CO₂ ناشی از فعالیت بشر را شامل می‌شود [۱]. آثار سوء زیست محیطی گاز CO₂ و همچنین نیاز به افزایش مقاومت و دوام بتن و نیز کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌ها، جامعه مهندسين را به جایگزین کردن موادی با خواص مشابه به جای سیمان تشویق کرد. این موارد موجب معرفی گروه خاصی از مواد افزودنی به بتن به نام پوزولان‌ها گردید. پوزولان ماده‌ای است با ترکیب SiO₂ و Al₂O₃ که به خودی خود ارزش سیمانی ندارد ولی در صورت ریز

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hassan.ghezel@sr.u.ac.ir



۸۰۰ در زمان یک ساعت اعمال شد. محقق اشاره می‌کند که کائولن مرند در طی این فرآوری به بالاترین میزان واکنش پوزولانی خود رسیده است و در ادامه مطالعات خود، با مقایسه و بررسی اثر متاکائولن تولید شده، بر اساس استاندارد ASTM-C618 محصول نهایی را از لحاظ ترکیب در ردیف N مواد پوزولانی معرفی کرده است [۱۰]. در تحقیق مشابهی از آزمایش XRD (پراش اشعه X) جهت مقایسه کائولن (رس کائولینی خام) و متاکائولن (رس کائولینی کلسینه) استفاده شده است. کانی‌های موجود در کائولین و متاکائولین به وضوح مشاهده شده‌اند [۱۱]. XRD یک آزمایش غیر مخرب است و اطلاعات دقیقی درباره ترکیبات شیمیایی، ریز ساختار هندسی مواد طبیعی و صنعتی ارائه می‌دهد. متاکائولن به علت اثر پرکنندگی، شتاب هیدراسیون و واکنش پوزولانی با CH به شکل C-S-H، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن، کاهش نفوذپذیری و تخلخل و اصلاح ساختار منافذ می‌شود [۱۲]. نتیجه پژوهش‌های کابرا^۲ و فریاس^۳ را نشان می‌دهد که با گذشت زمان هرچه مقدار درصد متاکائولن در نمونه بتنی بیشتر باشد، مقدار هیدروکسید کلسیم باقی مانده در آن نمونه کمتر می‌شود، همچنین در فرآیند هیدراسیون متاکائولن با پرتلن‌دایت تولیدی وارد واکنش می‌شود و ژل اضافی C-S-H که شامل آلومینیوم و محصولات کریستالین مثل هیدرات‌های آلومینات کلسیم و سیلیکات آلومینیوم است، تشکیل می‌شود [۱۳]. مطالعات دیگری بیان می‌کند که C-S-H اضافی (ثانویه) تشکیل شده طی واکنش‌های پوزولانی نسبت به C-S-H معمولی (اولیه) قابلیت بیشتری برای نگه داشتن یون‌های قلیایی در حفرات دارد [۱۴ و ۱۵]. ژل ثانویه تولید شده دارای چگالی کمتری نسبت به ژل معمولی است ولی در پر کردن و تقسیم حفرات موئینه بزرگ به حفرات موئینه کوچک‌تر و غیر ممتد، مؤثر است و اندازه حفرات را کاهش می‌دهد. در نتیجه انتظار می‌رود متاکائولن نفوذپذیری را کاهش داده و با مترکم کردن ساختار خمیر سیمان، دوام بتن را بهبود بخشد. [۱۶ و ۱۷]. در مطالعات جدید تر نیز که بر اساس درصدهای مختلف متاکائولین در رس کلسینه انجام شده نیز مشاهده گردید که هر چه میزان متاکالین موجود در رس کلسینه بیشتر باشد نمونه‌های بتنی ساخته شده توسط آن مقاوت فشاری بیشتری دارند [۱۸]. نتایج تحقیقات بر روی ۴ نوع بتن LC³ که که با استفاده از دو نوع خاک و دو نوع آهک که ۳۰٪ رس کلسینه شده و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان شده و در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۴۷۵ و ۰٫۵ ساخته شدند نشان می‌دهد که مقاومت فشاری، کششی و خمشی آن‌ها نیز بالا بوده و عالی عمل کرده‌اند [۱۹].

کوره آهن گدازی، خاکستر بادی و نانوسیلیس تا کنون در تحقیقات مختلفی استفاده شده و میزان تاثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی و شیمیایی و دوام بتن بررسی شده و نتایج ارزشمندی حاصل گشته است اما در این تحقیق از خاک رس کلسینه شده به عنوان پوزولان و جایگزین کردن آن تا ۴۰٪ به جای سیمان با هدف کاهش استفاده از سیمان و کاهش آلاینده‌گی محیط زیستی ناشی از تولید سیمان است بدین گونه که ابتدا خاک از منطقه مورد نظر تهیه می‌شود سپس در کوره در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس حرارت می‌بیند تا کلسینه شود سپس به همراه درصدی از پودر آهک جایگزین سیمان می‌شود. با جایگزینی ۵ تا ۲۰٪ کائولین کلسینه شده (متاکائولین) به جای سیمان مقاومت فشاری، کششی و خمشی بالاتری مشاهده شده و در جایگزینی ۱۵٪ مقاومت فشاری در حالت بهینه قرار می‌گیرد [۶]. استفاده از متاکائولین به عنوان بخشی از سیمان، خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد. محققین نتیجه گرفتند که سه فاکتور مؤثر در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، اثر فیلری، تسریع‌کنندگی هیدراسیون سیمان (در درجات بالا) و واکنش پوزولانی متاکائولین با هیدروکسید کلسیم است [۷ و ۸]. در تحقیق مشاهده شد که مصرف متاکائولین مقاومت کششی بتن را به نسبت نمونه شاهد افزایش داده و استفاده از میکروسیلیس تأثیر کمتری بر مقاومت کششی بتن داشته است. در این تحقیق برای سه نسبت آب به سیمان ۰٫۴، ۰٫۵ و ۰٫۶ مقاومت‌های کششی ۲۸ روزه از ۳ تا ۴ مگاپاسکال بوده است و افزودن متاکائولین در این سن باعث افزایش مقاومت کششی بتن شده است. همچنین به نظر می‌رسد در سنین اولیه و با نسبت‌های بالاتر آب به سیمان تاثیر متاکائولین بر بهبود مقاومت کششی بتن بیشتر است، همچنین جایگزینی متاکائولین در بتن موجب افزایش مقاومت خمشی بتن در مقایسه با نمونه شاهد شده است و این تأثیر در نسبت‌های پایین آب به سیمان ملموس‌تر است [۸]. درصد کائولین مورد نیاز در خاک رس مورد استفاده برای ترکیب پودر سنگ آهک، خاک رس کلسینه و سیمان (LC³) بسیار کمتر از رس کائولینیتی خالص مورد استفاده در صنایع سرامیک و کاغذ سازی است این موضوع به این معناست که استفاده از چنین خاکی با درصد پایین کائولین هیچ گونه رقابتی با سایر صنایع در تقاضا برای تامین منابع ایجاد نخواهد کرد [۱]. همچنین استفاده از ۱۵٪ پودر سنگ آهک در بتن مقاومت بتن در برابر حمله شیمیایی یون سولفات که از جمله عوامل مخرب بتن می‌باشد را افزایش می‌دهد [۹]. برای بررسی تاثیر کائولن معدن زوز (واقع در شهرستان مرند) بر روی دوام بتن، فعال سازی حرارتی لازم (کلسینه شدن) در دمای ۲۰۰°C

2 Cabrera

3 Frías

1 limestone Calcined clay cements

جدول ۱. مشخصات ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی

Table 1. Specifications of chemical compounds of cement materials

درصد وزنی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	FCaO	IR	LOI	Total
سیمان	۲۰/۸	۵/۲	۳/۶۲	۶۲/۱	۱/۸	۲/۵	۰/۵۵	۰/۳	۱/۲	۰/۳	۱/۵	۹۹/۹
میکروسیلیس	۹۳/۹۵	۰/۹	۰/۸	۱	۱/۲۵	۰/۰۶	۰/۲۵	۰/۴			۱	۹۹/۶۱
خاک رس	۵۷/۶	۱۷/۷	۵/۶	۶/۳	۳/۳	۰/۰۳					۹/۶۸	۹۹/۶۷
پودر آهک	۵/۶		۰/۰۵	۵۱/۷	۱/۴						۴۱/۱۵	۹۹/۹

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی در تحقیق

۲-۱-۱- مواد سیمانی

مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان، خاک رس و پودر آهک مصرفی در تحقیق در جدول ۱ ملاحظه میشود.

۲-۱-۲- خاک رس کلسینه

کائولینیت دارای ترکیب آلومینوسیلیکاتی است بطوری که ورقه‌های هشت وجهی آلومینا با ورقه‌های چهار وجهی سیلیکا به صورت متناوب روی هم قرار گرفته‌اند [۲۰]. فرمول شیمیایی کائولن به عنوان کائولینیت $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ می‌باشد. به فرآیند شکل‌گیری کائولن، کائولینیزیشن گفته می‌شود. مرغوب‌ترین کائولن‌ها ۲۰٪ ناخالصی دارند که برای کاهش این ناخالصی‌ها به طرق مختلف فرآوری می‌گردد و در هر روش نوعی خاص از این ماده حاصل می‌شود که هر کدام کاربرد خود را دارد [۲۱].

فرآیند کلسینه شدن خاک رس شامل کائولینیت در دمای بین ۵۵۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد که نتیجه‌ی آن تولید یک ترکیب سیلیسی آمورف به نام متاکائولین می‌باشد که یک پوزولان آلومینوسیلیکاتی است که این واکنش در فرمول ۱ نشان داده شده است [۲۲].



برای اطمینان از صحت فرآیند کلسینه سازی و کریستاله نشدن ناشی

از حرارت زیاد و اطمینان از آمورف بودن ذرات آزمایش XRD بر روی رس کلسینه انجام شد با مشاهده نتایج آزمایش XRD و اطمینان از آمورف بودن ذرات خاک و حضور ترکیبات پوزولانی در آن می‌توان از آن به عنوان جایگزین درصد قابل توجهی از سیمان و تولید بتنی با عملکرد سازه‌ای استفاده کرد. در شکل ۱ نتایج حاصل از آزمایش XRD ارائه شده است.

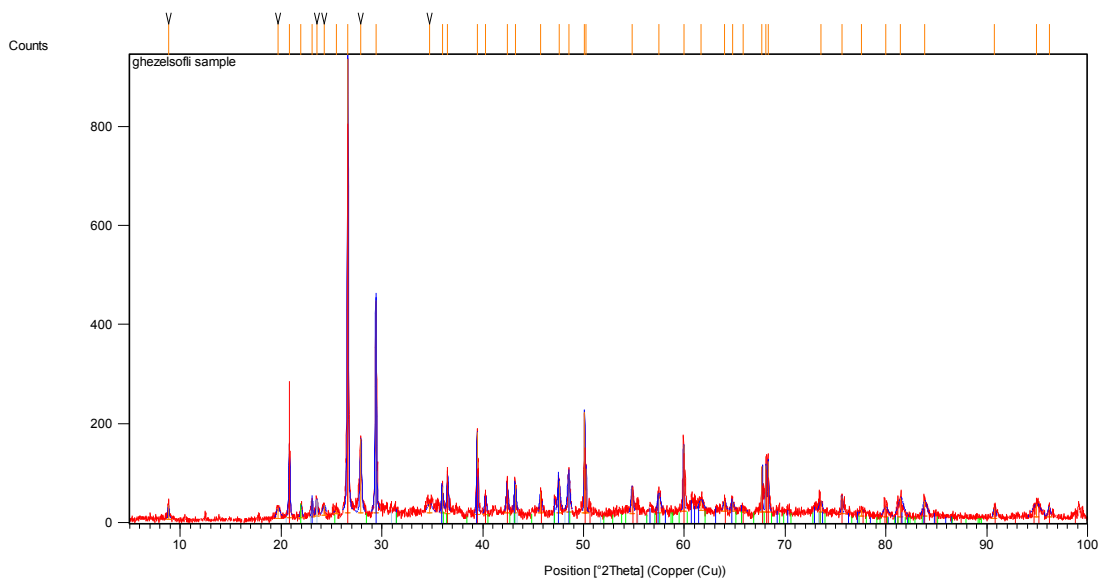
در نمودار شدت امواج بازتابی حاصل از آزمایش XRD هرچه قله‌ها بلند تر و نوک تیزتر باشند ترکیبات شناسایی شده کریستالی تر می‌باشند و برعکس پس با توجه به شکل فوق و وجود نوسانات ریز و پائین در آن می‌توان برداشت کرد که ترکیبات شناسایی شده آمورف می‌باشند که برای واکنش‌های سیمانی مناسب می‌باشد.

۲-۱-۳- سنگدانه

مشخصات مربوط به اندازه و درصد جذب رطوبت این سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C33 [۲۳] در ادامه آورده شده است (جدول ۴-۲).

۲-۱-۴- آب و فوق روان کننده

آب استفاده شده در این تحقیق آب قابل شرب شهر تهران بوده که دارای کیفیت مطلوب جهت ساخت بتن می‌باشد. عملکرد فوق روان کننده‌ها پخش‌کنندگی الکترواستاتیکی با اعمال نیروی دافعه بین ذرات و پراکندن دانه‌های سیمان از یکدیگر می‌باشد که علاوه بر پخش دانه‌های سیمان، آب محبوس در لخته‌های سیمانی را نیز آزاد و صرف بهبود روانی مخلوط می‌کند [۲۴]. فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق، برمبنای پلی‌کربوکسیلات



شکل ۱. نتایج حاصل از آزمایش XRD بر روی خاک رس کلسینه

Fig. 1. The XRD test results on calcined clay

جدول ۲. مشخصات سنگدانه های مصرفی

Table 2. Characteristics of aggregates used

سنگدانه	درصد جذب آب	حداکثر اندازه سنگدانه (میلی متر)	مدول نرمی
شن	۱/۸	۱۹	-
ماسه	۳/۷	-	۳/۱۳

جدول ۳. دانه بندی ماسه مصرفی

Table 3. Granulation of sand used

شماره الک (اینچ)	اندازه الک (mm)	درصد عبوری از الک	درصد عبوری مجاز طبق ASTM C33
۳/۸	۹/۵	۱۰۰	۱۰۰
۴	۴/۷۵	۹۴/۴۷	۹۵-۱۰۰
۸	۲/۳۶	۷۹/۵۱	۸۵-۱۰۰
۱۶	۱/۱۸	۵۴/۶۴	۵۰-۸۵
۳۰	۰/۶	۳۷/۵۲	۲۵-۶۰
۵۰	۰/۳	۲۲/۳۱	۱۰-۳۰
۱۰۰	۰/۱۵	۲/۰۴	۲-۱۰

جدول ۴. دانه بندی شن مصرفی

Table 4. Granulation of used sand

شماره الک (اینچ)	اندازه الک (mm)	درصد عبوری از الک	درصد عبوری مجاز طبق ASTM C33
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۳/۴	۱۹	۱۰۰	۹۰-۱۰۰
۱/۲	۱۲/۵	۷۳/۵۲	۶۰-۱۰۰
۳/۸	۹/۵	۳۸/۴۳	۲۰-۵۵
۴	۴/۷۵	۴/۳۵	۰-۱۰
۸	۲/۳۶	۰/۷	۰-۵

است این ماده دارای رنگ قهوه‌ای روشن بوده و به صورت مایع و همراه با آب در ساخت نمونه‌ها مصرف گردید میزان استفاده از آن حدود ۰/۲ تا ۱/۵٪ وزن مواد سیمانی است.

۲-۲- مشخصات طرح مخلوط بتن

در این تحقیق ۱۰ طرح مخلوط در دو نسبت آب به مواد سیمانی (سیمان، خاک رس کلسینه، آهک و میکروسیلیس) ۰/۳۵ و ۰/۴ برای بررسی تاثیر خاک رس محلی استان گلستان بر خواص مکانیکی و دوام بتن در نظر گرفته شد، این طرح مخلوط ها بر اساس استاندارد آیین نامه BS موسسه راهسازی انگلستان ساخته شده است. هر نسبت آب به مواد سیمانی شامل ۵ طرح مخلوط می‌باشد که و برای هر نسبت آب به مواد سیمانی یک طرح به عنوان طرح شاهد (بدون جایگزینی پوزولان به جای سیمان) در نظر گرفته شد. در جدول ۵ و ۶ نام طرح‌های مخلوط ساخته شده، نحوه نمایش هر یک از آن‌ها، نسبت آب به مواد سیمانی برای هر طرح و درصد جایگزینی ماده نسبت به کل مواد سیمانی برای خاک رس کلسینه، آهک، میکروسیلیس و سیمان را در هر طرح مخلوط نشان میدهد، منظور از آب در این جدول آب آزاد است و آب لازم برای رسیدن سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک (SSD) جداگانه محاسبه شده و به مخلوط اضافه شده است.

در این تحقیق خاک رس کلسینه در درصدهای ۰، ۱۰ و ۲۰، آهک در درصدهای ۰، ۱۵ و ۳۰ و میکروسیلیس نیز در درصدهای ۰ و ۷ درصد از

سیمان پرتلند در طرح مخلوط‌ها جایگزین سیمان شدند همچنین سنگدانه‌ها نیز به نسبت ۴۰ و ۶۰٪ در بتن مورد استفاده قرار گرفتند (۴۰٪ شن و ۶۰٪ ماسه). در این تحقیق برای یکسان بودن شرایط تمام طرح مخلوط‌ها و برای امکان مقایسه صحیح بین آن‌ها، اسلامپ تمامی طرح مخلوط‌ها در بازه ۸ تا ۱۲ سانتی‌متر قرار گرفت برای رسیدن به آن در طرح‌هایی که حاوی پوزولان بودند از فوق روان کننده بیشتری استفاده شد تا اسلامپ همه آن‌ها در این بازه قرار بگیرد.

عیار مواد سیمانی در این برابر 400 kg/m^3 می‌باشد و همچنین منظور از درصد جایگزینی این است که برای مثال در طرح ۸ هر یک از مواد ۲۰٪ و در مجموع ۴۰٪ جایگزین سیمان شده‌اند و برای تهیه یک متر مکعب از این طرح مخلوط، ۲۴۰ کیلوگرم سیمان، ۸۰ کیلوگرم خاک رس کلسینه و ۸۰ کیلوگرم آهک استفاده شده است.

۲-۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

۲-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

در این تحقیق باهدف ارزیابی مقاومت فشاری بتن طبق استاندارد ASTM C39 [۲۵] از نمونه‌های بتنی با ابعاد $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ استفاده شده و این آزمایش بر روی نمونه‌های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه صورت گرفت جهت اطمینان بیشتر به نایب آزمایش و کاهش خطا، برای هر سن در هر طرح مخلوط سه نمونه جهت انجام آزمایش ساخته شد و نتیجه نهایی میانگین مقاومت فشاری آن‌ها در نظر گرفته شد.

جدول ۵. مشخصات و مقدار مصالح مصرفی در طرح مخلوطها با W/C=0.35

Table 5. Specifications and quantity of materials used in the design of mixes with W/C=0.35

شناسه طرح	سیمان %	خاک %	آهک %	میکرو سیلیس %	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب آزاد (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	خاک (kg/m ³)	آهک (kg/m ³)	میکرو سیلیس (kg/m ³)	فوق روان کننده (%)
C0L0	۱۰۰	۰	۰	۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۴۰	۴۰۰	۰	۰	۰	۱
C10L30	۶۰	۱۰	۳۰	۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۴۰	۲۴۰	۴۰	۱۲۰	۰	۱/۲
C20L20	۶۰	۲۰	۲۰	۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۴۰	۲۴۰	۸۰	۸۰	۰	۱/۲
C10L30SF7	۵۵/۸	۱۰	۳۰	۴/۲	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۴۰	۲۲۳/۲	۴۰	۱۲۰	۱۶/۸	۱/۵
C20L20SF7	۵۵/۸	۲۰	۲۰	۴/۲	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۴۰	۲۲۳/۲	۸۰	۸۰	۱۶/۸	۱/۵

جدول ۶. مشخصات و مقدار مصالح مصرفی در طرح مخلوطها با W/C=0.4

Table 6. Specifications and amount of materials used in the design of mixes with W/C=0.4

شناسه طرح	سیمان %	خاک %	آهک %	میکرو سیلیس %	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب آزاد (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	خاک (kg/m ³)	آهک (kg/m ³)	میکرو سیلیس (kg/m ³)	فوق روان کننده (%)
C0L0	۱۰۰	۰	۰	۰	۷۳۶	۱۱۰۴	۱۶۰	۴۰۰	۰	۰	۰	۱
C10L30	۶۰	۱۰	۳۰	۰	۷۳۶	۱۱۰۴	۱۶۰	۲۴۰	۴۰	۱۲۰	۰	۱/۲
C20L20	۶۰	۲۰	۲۰	۰	۷۳۶	۱۱۰۴	۱۶۰	۲۴۰	۸۰	۸۰	۰	۱/۲
C10L30SF7	۵۵/۸	۱۰	۳۰	۴,۲	۷۳۶	۱۱۰۴	۱۶۰	۲۲۳/۲	۴۰	۱۲۰	۱۶/۸	۱/۵
C20L20SF7	۵۵/۸	۲۰	۲۰	۴,۲	۷۳۶	۱۱۰۴	۱۶۰	۲۲۳/۲	۸۰	۸۰	۱۶/۸	۱/۵

جدول ۷. تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده در تحقیق

Table 7. The number of laboratory samples made in the research

شناسه طرح	مکعب ۳ روزه	مکعب ۷ روزه	مکعب ۲۸ روزه	مکعب ۹۰ روزه	استوانه ۲۸ روزه	منشور ۲۸ روزه	مجموع نمونه‌های w/c=0.35	مجموع نمونه‌های w/c=0.4	مجموع نمونه‌ها برای هر طرح
C0L0	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱۸	۱۸	۳۶
C10L30	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱۸	۱۸	۳۶
C20L20	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱۸	۱۸	۳۶
C10L30SF7	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱۸	۱۸	۳۶
C20L20SF7	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱۸	۱۸	۳۶

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

با توجه به شکل ۲ و ۳ می‌توان گفت در تمام طرح‌ها، با افزایش سن، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. دلیل این موضوع آن است که با افزایش سن، هیدراتاسیون بین سیمان و آب افزایش پیدا کرده و موجب کاهش آب آهک موجود در بتن و افزایش ژل سیلیکاتی در آن گشته است. ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های پوزولانی از مقاومت بتن شاهد کمتر شده است دلیل این موضوع تکمیل نشدن واکنش‌های پوزولانی و خاصیت رقیق‌کنندگی (در دسترس نبودن هیدروکسید کلسیم کافی برای واکنش پوزولانی) آن‌ها می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ و ۷ روزه دارای خاک رس کلسینه بسیار پایین‌تر از مقاومت نمونه‌های شاهد در همان سنین می‌باشد که دلیل آن آغاز نشدن واکنش‌های پوزولانی در این سنین می‌باشد اما با گذر زمان و رسیدن نمونه‌ها به سن ۲۸ روز و ۹۰ روز این کمبود مقاومت‌ها تا حد زیادی جبران شده است و مقاومت نمونه‌های طرح به نزدیکی مقاومت نمونه‌های شاهد رسیده است که بیان‌گر آغاز واکنش‌های پوزولانی خاک رس کلسینه بعد از سنین اولیه می‌باشد که این رفتار شاهدیست بر پوزولانی بودن خاک رس مورد استفاده در تحقیق، برای بیان واضح‌تر جملات فوق یک شکل که درصد کسب

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

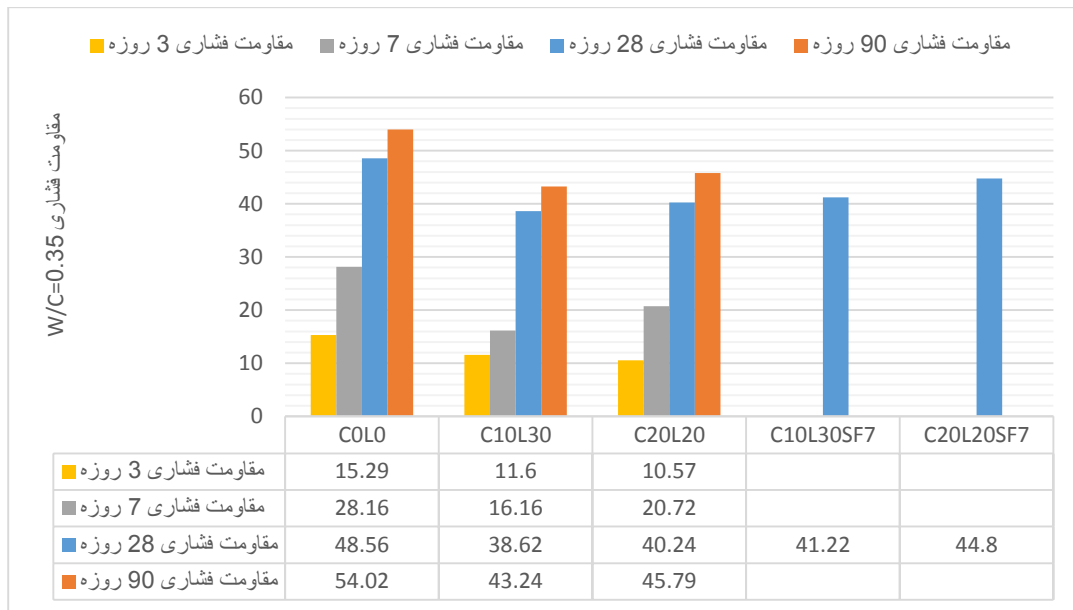
استاندارد ASTM C496 [۲۶] برای اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن تحت کشش خالص، آزمایش شکافت کششی یا آزمایش شکافت استوانه که همان آزمایش برزلی است را پیشنهاد می‌کند [۲۷]. برای انجام این آزمایش نمونه بتنی استوانه‌ای با ابعاد 10×20 cm از پهلو به صورت افقی تحت فشار قرار می‌گرفت در نتیجه وارده باعث می‌شود تا نمونه از وسط دو نیم شود.

۳-۳- آزمایش مدول گسیختگی

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C78 [۲۸]، با هدف تعیین تاب کششی بتن در سنین ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های منشوری به طول ۴۰، عرض ۱۰ ارتفاع ۱۰ سانتیمتر با استفاده از دستگاه یونیورسال انجام گرفت.

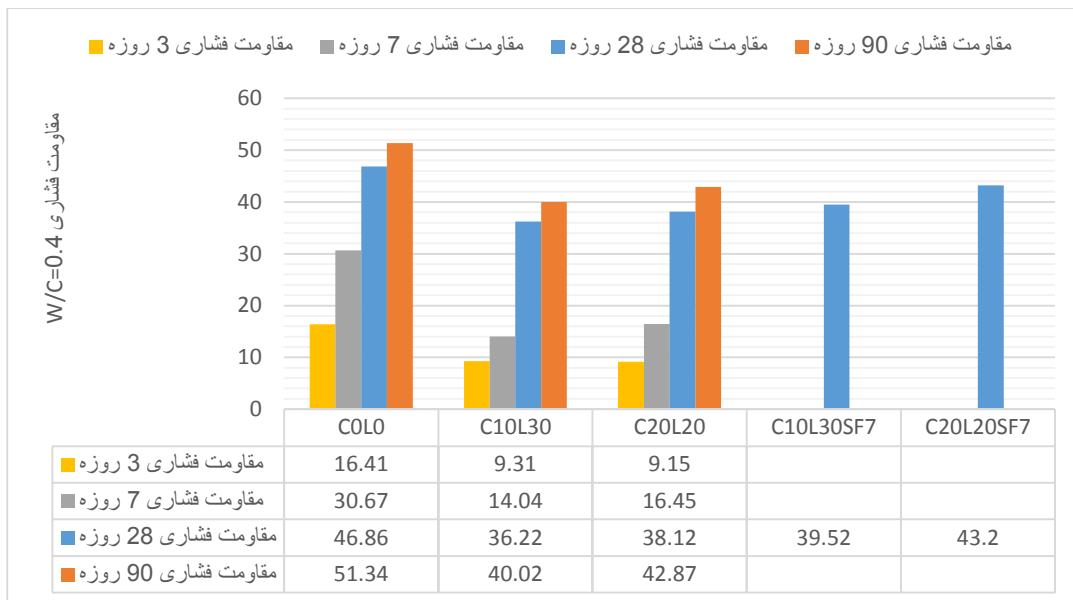
۳-۴- تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده

در جدول ۷ تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی برای هر آزمایش و بر اساس سن نمونه‌ها آورده شده است که در مجموع برای انجام تحقیق ۱۸۰ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است. مطابق جدول ۷ برای هر طرح مخلوط و هر سن ۳ نمونه بتنی ساخته شده تا با تکرار پذیری، خطای انجام آزمایش به حد اقل برسد.



شکل ۲. نمودار میله‌ای مقاومت فشاری برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵

Fig. 2. Bar graph of compressive strength for the ratio of water to cement materials of 0.35



شکل ۳. نمودار میله‌ای مقاومت فشاری برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

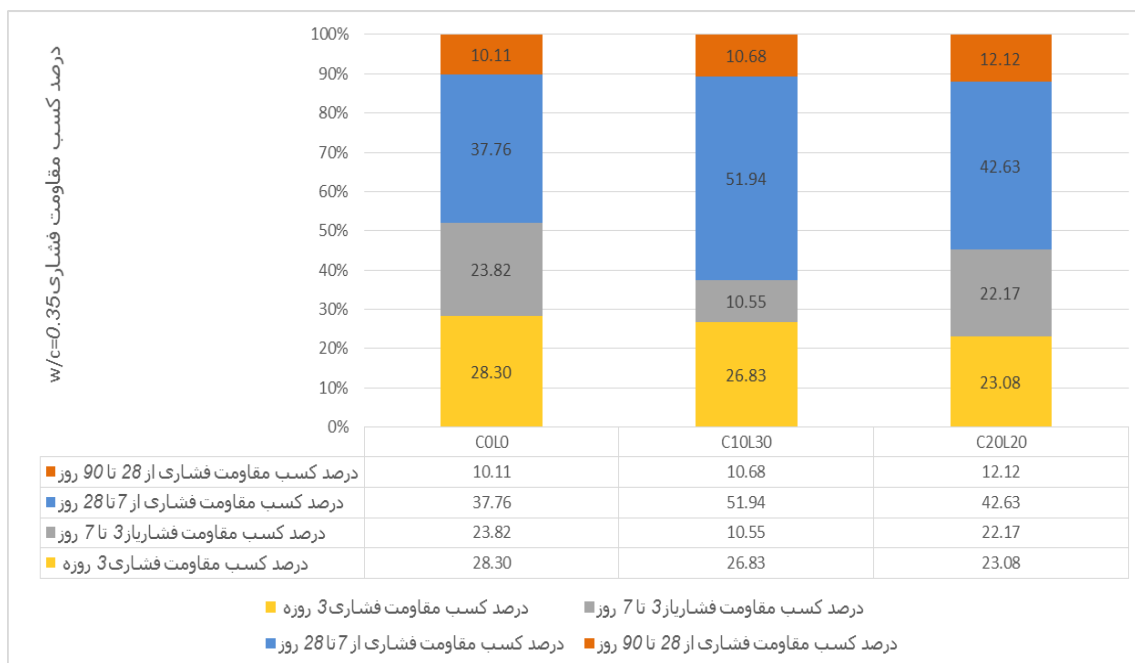
Fig. 3. Bar graph of compressive strength for the ratio of water to cement materials of 0.4

فشاری بتن را به دنبال دارد. طرح‌های شامل ۲۰٪ رس کلسینه و ۲۰٪ آهک Mix8 و Mix3 دارای بیشترین مقاومت در طرح‌های پوزولانی هستند و به عنوان طرح‌های بهینه پوزولانی معرفی می‌گردند.

با توجه به شکل ۴ در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ می‌توان گفت که در نمونه‌های شاهد حدود ۵۳٪ مقاومت نهایی (۹۰ روزه) در سن ۷ روزه کسب شده است اما مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۰٪ و ۲۰٪ رس کلسینه حدود ۳۸ تا ۴۳٪ مقاومت نهایی می‌باشد و دلیل آن همان‌طور که گفته شد آغاز نشدن فعالیت پوزولانی خاک‌رس در سنین اولیه می‌باشد که با گذشت ۲۸ روز از ساختن نمونه‌ها این روند متفاوت می‌شود و میزان کسب مقاومت در نمونه‌ها برعکس می‌شود حال طرح شامل ۱۰ و ۲۰٪ رس کلسینه که در سن ۷ روز کمترین پیشرفت را در کسب مقاومت داشته اکنون در سن ۲۸ روز بیشترین سرعت کسب مقاومت را دارند در نتیجه می‌توان گفت که این افزایش سرعت کسب مقاومت از سن ۷ تا ۲۸ روز در نمونه‌های دارای پوزولان خاک‌رس ناشی از فعالیت و عملکرد پوزولانی این خاک می‌باشد. طبق نتایج می‌توان گفت که به طور کلی درصد بالایی از مقاومت فشاری (حدود ۹۰٪) برای هر طرح در ۲۸ روز اول کسب می‌شود. که این امر می‌تواند ناشی از گیرش بتن در اثر هیدراتاسیون و شتاب بالای سخت شدن آن نسبت به سنین بالاتر

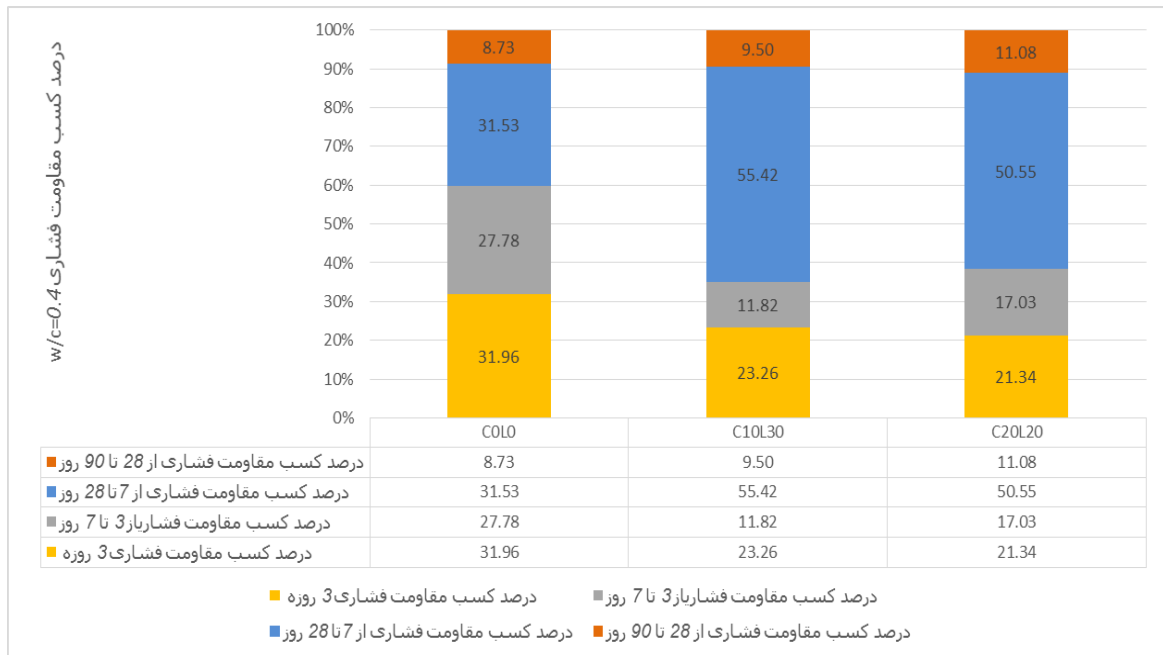
مقاومت فشاری را نسبت به سنین مختلف در هر طرح مخلوط نشان می‌دهد در زیر آورده خواهد شد. نمونه‌هایی که علاوه بر خاک و آهک از میکروسیلیس در آن‌ها استفاده شده است مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها نسبت به بتن بدون میکروسیلیس بیشتر شده است که دلیل آن وجود درصد بالای سیلیس فعال در میکروسیلیس است که موجب می‌شود واکنش‌های میکروسیلیس با سرعت بالاتری نسبت به بقیه پوزولان‌ها انجام گیرد و در نتیجه در کوتاه مدت نیز نتایج مطلوبی را رقم بزند.

از مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌هایی که با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و ۰/۴ ساخته شده‌اند (شکل‌های زیر) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. نسبت آب به مواد سیمانی یک پارامتر بسیار مهم در ساخت بتن به محسوب می‌شود و می‌توان گفت که بر روی تمامی خصوصیات بتن (در کوتاه مدت و بلند مدت) اثرگذار است و هنگامی که مقدار آب در بتن (w/c) از یک مقداری بیشتر شود، حتی بعد از سخت شدن بتن مقداری آب در آن وجود خواهد داشت که بدون استفاده باقی مانده است. این آب محبوس شده به تدریج بخار می‌شود و فضایی خالی در ساختار بتن برجای می‌گذارد که موجب افزایش تخلخل بتن می‌شود و طبیعتاً این افزایش تخلخل کاهش مقاومت



شکل ۴. نمودار میله‌ای درصد کسب مقاومت فشاری برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵

Fig. 4. Bar graph of the percentage of compressive strength obtained for the ratio of water to cement materials of 0.35



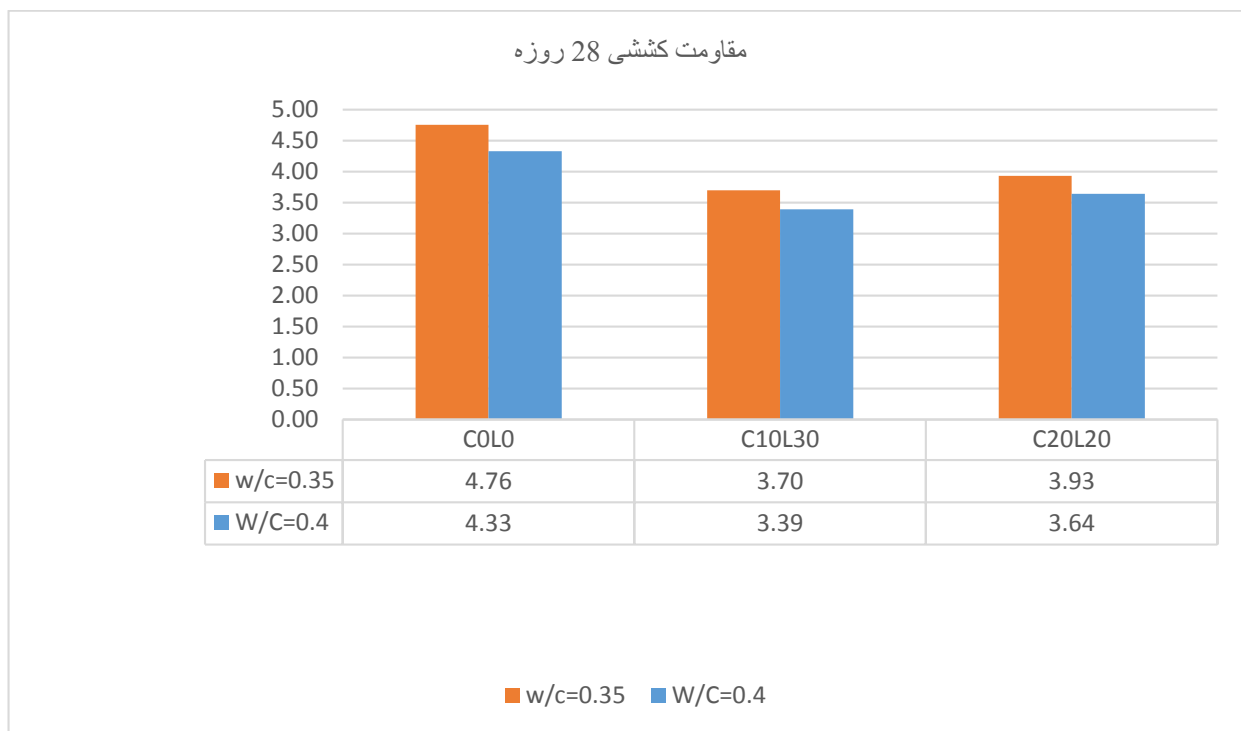
شکل ۵. نمودار میله‌ای درصد کسب مقاومت فشاری برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

Fig. 5. Bar graph of the percentage of compressive strength obtained for the ratio of water to cement materials of 0.4

هر دو آنها مواد سیمانی خاک ۱۰٪ و پودر آهک ۳۰٪ جایگزین سیمان پرتلند شده است سرعت کسب مقاومت یا به عبارتی سرعت واکنش پوزولانی از سن ۷ تا ۲۸ روز از سایر طرح‌ها بیشتر می‌باشد که این موضوع می‌تواند به علت وجود مقدار بیشتری آهک نسبت به سایر طرح‌ها و بر اثر آن در اختیار گذاشتن مقدار بیشتری آب آهک برای واکنش پوزولانی خاک رس کلسینه و در نتیجه افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی شود. طبق نتایج می‌توان گفت که به طور کلی درصد بالایی از مقاومت فشاری (حدود ۹۰٪) برای هر طرح در ۲۸ روز اول کسب می‌شود. که این امر می‌تواند ناشی از گیرش بتن در اثر هیدراتاسیون و شتاب بالای سخت شدن آن نسبت به سنین بالاتر می‌باشد. در سنین بالاتر، بتن سختی خود را به دست آورده است و عواملی چون پرمکنندگی، افزایش هیدراتاسیون و افزایش واکنش پوزولانی هستند که باعث افزایش مقاومت بتن شده‌اند. با گذشت زمان و رسیدن نمونه‌ها به سن ۹۰ روزه طرح‌های شامل ۲۰٪ رس کلسینه و ۲۰٪ آهک Mix 3 و Mix 8 دارای بیشترین مقاومت در طرح‌های پوزولانی هستند و واکنش‌های پوزولانی در آن‌ها کامل‌تر شده است و به عنوان طرح‌های بهینه پوزولانی معرفی می‌گردند.

می‌باشد. در سنین بالاتر، بتن سختی خود را به دست آورده است و عواملی چون پرمکنندگی، افزایش هیدراتاسیون و افزایش واکنش پوزولانی هستند که باعث افزایش مقاومت بتن شده‌اند.

برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ (شکل ۵) نیز می‌توان گفت که در نمونه‌های شاهد حدود ۶۰٪ مقاومت نهایی (۹۰ روزه) در سن ۷ روزه کسب شده است اما مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۰٪ و ۲۰٪ رس کلسینه حدود ۳۵ تا ۳۸٪ مقاومت نهایی می‌باشد و دلیل آن همان‌طور که گفته شد آغاز نشدن فعالیت پوزولانی خاک رس در سنین اولیه می‌باشد که با گذشت ۲۸ روز از ساختن نمونه‌ها این روند متفاوت می‌شود و میزان کسب مقاومت در نمونه‌ها برعکس می‌شود حال طرح شامل ۱۰ و ۲۰٪ خاک که در سن ۷ روز کمترین پیشرفت را در کسب مقاومت داشته اکنون در سن ۲۸ روز بیشترین سرعت کسب مقاومت را دارند در نتیجه می‌توان ادعا کرد که این افزایش سرعت کسب مقاومت از سن ۷ تا ۲۸ روز در نمونه‌های دارای پوزولان رس کلسینه ناشی از فعالیت و عملکرد پوزولانی این خاک می‌باشد. با بررسی هردو شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌کنیم که در روند کسب مقاومت Mix 2 و Mix 7 که در



شکل ۶. مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن‌های ساخته شده با $W/C=0.4$ و $W/C=0.35$

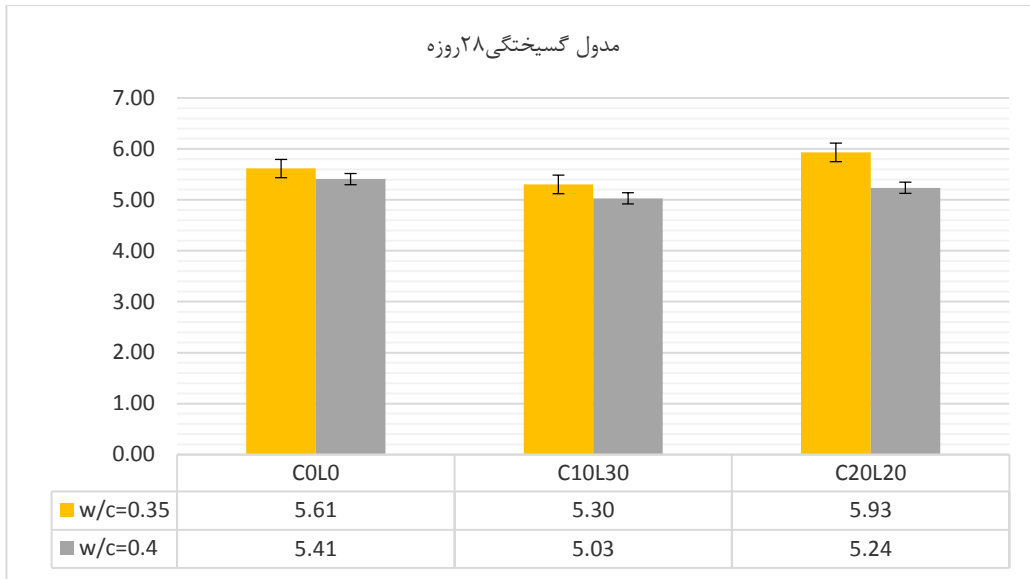
Fig. 6. The 28-day tensile strength of concretes made with $W/C=0.35$ and $W/C=0.4$

۳-۲- مقاومت کششی

در شکل ۶ مقایسه‌ای بین مقادیر مقاومت کششی در نسبت آب به مواد سیمانی $0/35$ و مقادیر مقاومت کششی در نسبت آب به مواد سیمانی $0/4$ صورت گرفته است. به ترتیبی که در این دو شکل ملاحظه می‌گردد مقادیر مقاومت کششی با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی از $0/35$ به $0/4$ ، در سن ۲۸ روزه کاهش پیدا کرده است که علت آن به افزایش ضخامت ناحیه انتقال سطحی (ITZ) در پی افزایش مقدار آب مصرفی در بتن مربوط می‌شود. در نتیجه افزایش ضخامت ناحیه انتقال سطحی در بتن موجب بیشتر شدن تخلخل بتن و کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود در طرح‌هایی که حاوی جایگزینی 20% خاک بوده اند نتایج بالاتری نسبت به طرح‌هایی که حاوی 10% خاک بوده‌اند، به دست آمده است که این رفتار همانند مقاومت فشاری این طرح‌ها شاهدیست بر پوزولانی بودن خاک رس کلسینه مورد استفاده در تحقیق.

۳-۳- مقاومت خمشی نمونه‌ها: (مدول گسیختگی)

با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت در این آزمایش از منظر میزان بار اعمال شده طرح‌ها روندی مشابه مقاومت فشاری و کششی داشته اند اما در محدوده‌ای بسیار نزدیک به طرح شاهد، ولی از منظر میزان خیز ایجاد شده کاملاً برعکس رفتار مقاومتی عمل کرده‌اند، خیز در طرح‌های 10% خاک بیشتر از طرح شاهد و خیز در طرح‌های 20% خاک بیشتر از سایر طرح‌ها بوده است در نتیجه با توجه به میزان باربری طرح‌های شامل خاک که در محدوده‌ای نزدیک به طرح‌های شاهد می‌باشد و همزمان خیزپذیری بالاتر از طرح شاهد می‌توان این نتیجه را گرفت که بتن‌های ساخته شده با خاک رس کلسینه شکل‌پذیری بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند، و به همین دلیل در هنگام تست های خمشی ترک‌های بیشتری پذیرفته و بار نسبتاً خوبی را تحمل کرده اند اما در طرح‌های شاهد به دلیل ترد بودن شیب نمودار بار تغییر مکان آن بیشتر بوده و پس از از رسیدن به بار بحرانی با اولین ریز ترک‌ها تیر مورد تست منهدم می‌شد.



شکل ۷. مدول گسیختگی ۲۸ روزه بتن‌های ساخته شده با $W/C=0.4$ و $W/C=0.35$

Fig. 7. the 28-day modulus of rupture of concretes made with $W/C=0.35$ and $W/C=0.4$

است و پس از ۹۰ روز بالاترین مقادیر مقاومت فشاری در طرح‌های پوزولانی را کسب کرد.

۴- با گذشت زمان و رسیدن نمونه‌ها به سن ۹۰ روزه طرح‌های شامل ۲۰٪ رس کلسینه و ۲۰٪ آهک Mix3 و Mix8 دارای بیشترین مقاومت در طرح‌های پوزولانی هستند و واکنش‌های پوزولانی در آن‌ها کامل‌تر شده است و به عنوان طرح‌های بهینه پوزولانی معرفی می‌گردند.

۵- در آزمایش مقاومت کششی نیز روند کسب مقاومت مانند آزمایش مقاومت فشاری بوده و مقدار بهینه رس کلسینه ۲۰٪ و بیشترین مقدار مقاومت کششی برای طرح‌های پوزولانی به طرح حاوی ۲۰٪ رس کلسینه و ۷٪ میکروسیلیس اختصاص یافت.

۶- در آزمایش مدول گسیختگی از منظر میزان بار اعمال شده طرح‌ها روندی مشابه مقاومت فشاری و کششی داشته‌اند اما در محدوده‌ای بسیار نزدیک به طرح شاهد، ولی از منظر میزان خیز ایجاد شده کاملاً برعکس رفتار مقاومتی عمل کرده‌اند.

۷- خیز در طرح‌های ۱۰٪ خاک بیشتر از طرح شاهد و خیز در طرح‌های ۲۰٪ خاک بیشتر از سایر طرح‌ها بوده است، در نتیجه با توجه به میزان باربری طرح‌های شامل خاک که در محدوده‌ای نزدیک به طرح‌های شاهد می‌باشد

در طرح‌های شامل ۱۰٪ خاک در هر دو نسبت آب به سیمان (Mix2) از طرح‌های شاهد بیشتر شده و در مجموع عملکرد خوبی داشته‌اند. در طرح‌های شامل ۲۰٪ خاک عملکرد تیرها بهتر بوده است زیرا در حین این‌که خیز بسیار خوبی پذیرفته‌اند در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ باربری بسیار خوبی حتی بهتر از طرح‌های شاهد داشته‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

۱- خواص مکانیکی کلیه طرح‌های ساخته شده با گذشت زمان بهبود پیدا می‌کند که این موضوع در طرح‌های حاوی پوزولان چشم‌گیرتر است و موجب متراکم‌تر شدن این طرح‌ها نسبت به طرح شاهد می‌گردد.

۲- مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌هایی که پوزولان رس کلسینه به تنهایی با پودر سنگ آهک در آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است از مقاومت فشاری طرح شاهد کمتر بوده است اما با گذشت زمان و رسیدن به سن ۹۰ روز، قسمت زیادی از این کاهش جبران شده است.

۳- مقادیر مقاومت فشاری در طرح‌هایی که رس کلسینه و پودر سنگ آهک و میکروسیلیس همزمان در آن‌ها به کار برده شده بسیار مناسب بوده

D.C. June. 20-24.

- [9] Davood Mostofinejad and Mohammad Raeesi “Investigation of the effect of limestone powder on the compressive strength of concrete containing microsilica and optimization of the mixing design using response curves” Isfahan University of Technology December 2013 in persian.
- [10] Ramezaniapour, A. A., and H. Bahrami. 2012. “Influence of metakaolin as supplementary as cementing material on strength and durability of concretes”. Construction and building materials 30
- [11] Konan, K. L., C. Peyratute., A. Smith., J-P. Bonnet., S. S. Rossignol., and S. Oytola. 2009. “Comparison of surface properties between kaolin and metakaolin in concentrated lime solution”. Journal of colloid and interface science 339:103-109
- [12] Wild, S., J. M. Khatibe., and A. Jones. 1996. “Relative Strength, Pozalanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete”, cement and concrete research 26:1537-1544
- [13] Siddique, R. 2008. Waste materials and by – product in concrete. patiala india: springer.
- [14] Ramlochan, T., M. Tomas., and K. A. Gruber. 2000. “The effect of metakaolin on the alkali-silica reaction in the concrete”. Cement and concrete research 30:339-344.
- [15] kostuch, J. A., V. Walters., and T. R. Jones. 2000. “High performance concrete incorporating metakaolin”: A review, concrete 2000, economic and durable concrete through excellent, R. K. Dhir and M. R. Jones, eds., E and FN spon, London, 1799-1811.
- [16] Mehta, P. K. 1986. Concrete: structure, propertiese, and materials, prentice hall, New jersey.
- [17] Samet, B., T. Mnif., and M. Chaabouni. 2007. “Use of kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements”: Formulation of blended cement, Cement and concrete composites 729:741-749.
- [18] Scrivener K, Avet F, Maraghechi H et al. (2019) Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). Green Materials 7(1): 3–14, <https://>

و همزمان خیزپذیری بالاتر از طرح شاهد می‌توان این نتیجه را گرفت که بتن‌های ساخته شده با خاک رس کلسینه شکل‌پذیری بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند.

منابع

- [1] Karen I. scrivener “options for the future of cement” the indian concrete journal july 2014 vol 88 issue 7
- [2] Morsy, M. S., and S. S. Shebl. 2007. “Effect of silica fume and metakaolin pozzolana on the performance of belend cement paste analys fire”. Ceramics – silikaty 51(1):40-44
- [3] Mangat, E. S., J. M. Khatib., B.T. Molloy. 1994. “Microstructure, chloride diffusion and reinforcement corrosion in blended cement paste and concrete”. Cem Concr Compos ;6:73–81.
- [4] Habert, G., N. Choupay., J. M. Montel., D. Guillaume., G. Escadeillas. 2008. “Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity”. Cem Concr Res ;38:963–75.
- [5] Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M (2007). “Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements”, Cement & Concrete Composites; Vol. 29 Issue 7, 2007, pp. 542–549
- [6] Nasir, S.h., F. N. Muhd., U.K. Sadaqat., A. Tehmina. 2015. “Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete”. Construction and Building Materials(81): 313-323
- [7] Kadri, El-Hadj., S. Kenai., K. Ezziane., R. Siddique., and G. Schutter. 2011. “Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar”. Applied clay science 53:704-708.
- [8] Justice, J. M., L. H. Kennison., B. J. Mohr., S. L. Beckwith., J. E. McCormick., B. Wigginz., Z. Z. Zhang., K. E. Kurtis. 2005. “Comparision of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitious materials”. international symposion on utizilation of high-strength/ high performance concrete. Washington

- [24] Irajian Mahmoud, 2010, the use of additives in dam construction projects, the fourth international conference on dam construction, Iran, Tehran in persian. doi.org/10.1680/jgrma.18.00029
- [25] ASTM (American Society for Testing and Materials) C39. 2003. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Publication.
- [26] ASTM (American Society for Testing and Materials) C496. 2003. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Publication.
- [27] Mostofi-Nejad, Dawood (2014). Reinforced concrete structures. Edition 2. The first volume. Isfahan, Arkan Danesh Publications in persian.
- [28] ASTM C78 / C78M-18, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [19] Shashank bishoni , Amit mallik , Oumen Maity, Shiju Joseph and Sreejith Krishnan “Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement” The Indian Experience April 2017
- [20] Varga, G. 2007. “The structure of kaolinite and metakaoline”. Epitoanyag.59.
- [21] National Geoscience Database of the country, Kaolin, National Geoscience Database in persian http://www.ngdir.ir/GeoportalInfo/PSubjectInfoDetail.asp?PID=281&index=0
- [22] Alejandra Tironia, Mónica A. Trezza Alberto , N. ScianbEdgardo. F. Irassara Kaolinitic calcined clays: “Factors affecting its performance as pozzolans”.
- [23] ASTM (American Society for Testing and Materials) Standard C33, 2003, “Specification for Concrete Aggregates,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/C0033-03, www.astm.org.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Ghezelsofla, A. Tarighat, The effect of Minoodasht region calcined clay of Golestan province and silica fume on the mechanical properties of concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 56(11) (2025) 1369-1386.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22611.8005](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22611.8005)



