Iranian Concrete Society

Studying the Behavior and the Freezing Endurance of Heavy Concrete with Nano-Silica Gel and Ilmenite Powder in Different Volume Ratios

***Amirhossein Bazaee*[1*], *Mohammad Javad Homayoun*[2], *Roozbeh Aghamajidi*[3], *Babak Mansouri*[4]**
1-Instructor, Department Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran
2-PhD Student In Civil Engineering, Faculty Of Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, Fars, Iran
3- Assistant Professor, Faculty Of Engineering, Islamic Azad University, Sepidan Unit, Fars, Iran
4-Assistant Professor, Faculty Of Civil Engineering, Islamic Azad University, Firoozabad Branch, Meymand Center, Fars, Iran
Amirhosseinbazaee@gmail.com

Research paper

Abstract
Basically, heavy concrete has the specific weight of about 1.5 to 2.5 times of the normal concrete. Materials with high specific weight are employed as a part of used aggregate to make heavy concrete. Heavy concrete is utilized as a protective shield against radiation. Heavy concrete is applied in the structure of nuclear infrastructures or hospitals. Ilmenite is a type of mineral that is also considered as mineral waste. Ilmenite is extracted directly from titanium mine and is found plentifully in Iran. In this study, Ilmenite is used in different volume ratios of 10%, 20%, 30%, and 40% instead of sand to make heavy concrete. Moreover, nano-silica gel, is used at the rate of 1% by weight of cement, to increase the quality and durability of concrete against the cycle of melting and freezing. The tests performed in this research include compressive strength test, tensile strength test, defining the primary and secondary water absorption rate and determination of concrete melting and freezing durability, according to ASTM-C666 standard. Results depicted that, the specific weight of heavy concrete would meet the regulations, by adding at least 20% of ilmenite instead of sand in concrete mixture. Also, adding 30% by volume of ilmenite, instead of sand, will increase the final compressive strength (90 days) by 33%. Finally, applying nano-silica gel in the heavy concrete mixture, makes the concrete stable against the melting and freezing cycles.

***Keywords**: Heavy Concrete, Durability Freezing, Ilmenite, Titanium Oxide, Nano Silica Gel.*

***Corresponding Author:** Amirhossein Bazaee*
Homayoun, M. J., Aghamajidi, R., Bazaee, A., mansouri, B. Studying the Behavior and the Freezing Endurance of Heavy Concrete with Nano-Silica Gel and Ilmenite Powder in Different Volume Ratios. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; (): 89-110.
http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.330682.1259
2538-5828/ *© 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society*
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

دریافت مقاله: ۱۸-۰۴-۱۴۰۱
پذیرش مقاله: ۲۰-۱۲-۱۴۰۱

انجمن علمی بتن ایران

بررسی رفتار و دوام یخ زدگی بتن سنگین دارای ژل نانو سیلیس و پودر ایلمنیت در نسبت‌های مختلف حجمی

امیرحسین بازایی
مربی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
Amirhosseinbazaee@gmail.com
(نویسنده مسئول)

محمدجواد همایون
دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، فارس، ایران

روزبه آقامجیدی
استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان، فارس، ایران

بابک منصوری
استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزآباد مرکز میمند، فارس، ایران

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

چکیده

اساساً بتن با وزن مخصوص حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر بتن معمولی بتن سنگین تلقی می‌شود. برای ساخت بتن سنگین از مصالحی با وزن مخصوص بالا به جای بخشی از سنگدانه در بتن استفاده می‌شود. بتن سنگین به عنوان سپر محافظ در مقابل تشعشعات به کار می‌رود و اصولاً در سازه تاسیسات اتمی و یا بیمارستان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایلمنیت یک نوع ماده معدنی است که بعنوان زباله معدنی هم از آن یاد می‌شود. ایلمنیت بطور مستقیم از معدن تیتانیوم استخراج می‌گردد و به وفور در ایران یافت می‌شود. در این تحقیق برای ساخت بتن سنگین از ایلمنیت در نسبت‌های مختلف حجمی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ به جای ماسه استفاده شده است. همچنین جهت افزایش کیفیت و دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد از ژل نانو سیلیس به میزان ۱٪ وزنی سیمان استفاده شده است. آزمایشات انجام شده در این تحقیق شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب اولیه و ثانویه، تعیین دوام ذوب و انجماد مطابق با استاندارد *ASTM-C666* می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که حداقل افزودن ۲۰٪ ایلمنیت به جای ماسه در بتن، باعث قرار گیری وزن مخصوص بتن سنگین در زمره ضوابط آیین نامه‌ای خواهد شد. همچنین افزودن ۳۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه، تا ۳۳٪ میزان مقاومت فشاری نهایی (۹۰روزه) را افزایش خواهد داد. در نهایت افزودن ژل نانو سیلیس در ترکیب بتن سنگین باعث گردید تا رفتار بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد از پایداری مطلوبی برخوردار گردد.

کلمات کلیدی: بتن سنگین، دوام یخ زدگی، ایلمنیت، اکسید تیتانیوم، ژل نانو سیلیس.

۱-مقدمه

پیشرفت دانش در به کارگیری مصالح بتنی و الزام به ویژگی‌های خاص باعث شده که انواع مختلف بتن در ساخت سازه‌های ویژه و محیط‌های مختلف به بکار برده شود. بتن سنگین یکی از انواع بتن است که برای ساخت سازه‌های دارای کاربری خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن سنگین از انواع ریز دانه یا درشت دانه معدنی یا فلزی با وزن مخصوص و چگالی بالا ساخته می‌شود که بعنوان جایگزین تمام یا بخشی از سنگدانه معمولی در بتن قرار می‌گیرند. به همین دلیل وزن مخصوص بتن سنگین نسبت به بتن‌های معمولی بیشتر است. همچنین وزن بتن‌های سنگین نیز بر اساس مقدار و نوع سنگدانه‌ی به کار رفته در تولید آن‌ها متفاوت خواهد بود. مطابق با تعریف استاندارد بتن آمریکا ACI[1] بتن با وزن مخصوص حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر بتن معمولی نیز بتن سنگین تلقی می‌شود[۱]. همچنین به استناد از تعریف مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، بتنی که دارای وزن مخصوص بالای ۳۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب باشد بتن سنگین نام دارد[۲۰]. در طرح مخلوط بتن‌های سنگین، مهم‌ترین هدف دستیابی به وزن بالا است و میزان مقاومت آن در اولویت‌های بعدی قرار دارد. به همین منظور در اکثر آیین نامه‌ها، حداقل وزن مخصوص مجاز را مبنا قرار می‌دهند.[۲]. رایج‌ترین سنگدانه‌هایی که برای ساخت بتن سنگین به کار می‌رود شامل باریت، لیمونیت، هماتیت، فروسفر، ایلمنیت، مگنتیت و ساچمه‌های فولادی می‌باشند[۳,۱]. این سنگدانه‌ها دارای استانداردهای متفاوتی هستند و ویژگی‌های متفاوتی را برای بتن سنگین به وجود می‌آورند.

مقاومت فشاری بتن‌های سنگین بدلیل استفاده از افزودنی‌ها معدنی معمولاً بالا می‌باشد. همچنین در برابر شرایط محیطی ناپایدار، از مقاومت قابل قبولی برخوردار خواهند بود[۴]. یکی از معایبی که بتن سنگین دارد، بالا بودن هزینه تولید و ساخت آن است. زیرا استفاده از ذرات فلزی در ساخت این نوع بتن هزینه را تا حد زیادی افزایش می‌دهد[۵]. همچنین سنگدانه‌هایی که در ساخت این نوع بتن به کار می‌روند دارای ویژگی‌ها و استانداردهای خاصی می‌باشند و تنها از معادن خاصی استخراج می‌شوند که دسترسی به آن‌ها ممکن است دشوار باشد.

بتن سنگین به طور ویژه به عنوان سپر محافظ در مقابل تشعشعات به کار می‌رود و اصولاً در سازه تاسیسات اتمی و یا بیمارستان‌ها و هر جا که امکان تشعشعات رادیواکتیو یا پرتوهای X، گاما و آلفا وجود دارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که در ایران در ساخت نیروگاه‌های اتمی بوشهر و نیروگاه آب سنگین اراک، از بتن سنگین استفاده شده است[۱]. همچنین در ساخت بتن‌های وزنی مانند وزنه تعادل تاورکرین‌ها[2] یا ساخت نیوجرسی[3] در آزادراه‌ها کاربرد فراوان دارد. استفاده از بتن سنگین در سازه‌های نظامی جهت ساخت سنگرهای نظامی و یا ساخت پناهگاه‌های زیر زمینی یا ساخت انبارهای مقاوم در برابر انفجار مانند دیواره‌های گاوصندوق از دیگر مصارف خاص آن است. همچنین استفاده از بتن سنگین برای ساخت سدهای وزنی یا سازه‌های دریایی و هیدرولیکی نظیر انواع پایه‌های پل، دیوار موج شکن، فانوس دریایی به دلیل صلبیت و کنترل جابجایی در اثر امواج دریا مرسوم است [۳,۱]. شکل شماره ۱ برخی از کاربردهای بتن سنگین وزن را در مصارف گوناگون نشان می‌دهد.

---

[1] *American Concrete Institute*
[2] *Tower Crane*
[3] *Jersey Barrier*

الف) کاربرد بتن سنگین در وزنه تعادل

ب) کاربرد بتن سنگین در ساخت

ج) کاربرد بتن سنگین در ساخت مراکز

شکل ۱ کاربردهای بتن سنگین در سازه‌های مختلف [۱, ۳]

تغییرات دمایی و چرخه ذوب و انجماد در شرایط محیطی ناپایدار یکی از عوامل خرابی بتن است. هنگامی‌که آب موجود در منافذ بتن‌یخ می‌زند، می‌تواند حجم آن را تا ۹٪ افزایش دهد. بنابراین این افزایش حجم، منجر به ترک خوردن و انفصال بتن می‌گردد. همچنین بعد از ذوب شدن یخ بتن، فضای تخلخل برای ورود مقدار آب بیشتری فراهم می‌شود که در نوبت بعدی انجماد، بتن بیش از پیش تحت آسیب قرار می‌گیرد. این چرخه مدام تکرار می‌شود و هر بار، آسیب بیشتری به بتن وارد می‌گردد[۴-۶]. بنابراین ضمن اینکه از بتن سنگین جهت کاربرهای خاص استفاده می‌شود، بررسی دوام بتن سنگین دارای پودر ایلمنیت در برابر چرخه ذوب و انجماد اهمیت بالایی دارد.

ایلمنیت، اولین بار در کشور روسیه در منطقه کوهستانی ایلمنیت[1] کشف شد که نام آن برگرفته از همین منطقه می‌باشد. ایلمنیت یا اُکسید تیتانیوم[2] یک نوع ماده معدنی چسبیده به فلز تیتانیوم است که از معدن تیتانیوم استخراج می‌شود. در واقع ایلمنیت همان تیتانیوم ناخالص یا نامرغوب (اکسید شده) می‌باشد که از آن بعنوان زباله تیتانیوم یاد می‌شود[۱]. عمده ساختار شیمیایی تشکیل دهنده ایلمنیت، اکسید سوم تیتانیوم و آهن می‌باشد و سایر عناصر دیگر سهم کمتری را به خود اختصاص دادند. میزان خلوص و مرغوبیت ایلمنیت به میزان اکسید تیتانیوم و آهن آن بستگی دارد که این میزان با توجه به نوع منطقه و معدن متفاوت است. نماد شیمیایی ایلمنیت، $FeTio_3$ است که با فرآوری و تبدیل سنگ آن به پودر در اندازه‌های متفاوت با مشخصات و خلوص گوناگون، در صنایع مختلف به کار برده می‌شود. ایلمنیت دارای سختی و چگالی بالا است و اغلب در صنایع برای افزایش دوام سایشی یا افزایش وزن مخصوص مورد استفاده قرار می‌گیرد[۴]. سختی موهس[3] ایلمنیت معمولاً بین ۵ تا ۵/۵ و وزن مخصوص آن بسته به نوع خلوص آن بین ۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب می‌باشد. برخی از متداول ترین موارد مصرف آن استفاده در لنت ترمز اتومبیل، صفحه سنگ فرز، سیمان چاه نفت و غیره می‌باشد. ایلمنیت بدلیل داشتن مقاومت، سختی، چگالی و وزن مخصوص بالا بسیار مناسب برای ساخت بتن سنگین با خواص مکانیکی و دوام مناسب است[۱, ۷, ۹, ۲۳].

ایلمنیت به رنگ‌های سیاه یا قهوه‌ای مات و کدر در محدوده کشورهای روسیه، مصر، اوکراین و ایران موجود است. مهم‌ترین معادن ایلمنیت و تیتانیوم در ایران در منطقه قره آغاج در استان آذربایجان غربی، شهرستان کهنوج در استان کرمان و منطقه فنوج در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. گفتنی است که معدن تیتانیوم و ایلمنیت

---

[1] *Ilmenite*

[2] *Titanium dioxide*

[3] میزان مقاومت یک ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک در سطح آن سختی گویند و سختی موهس یک روش برای اندازه گیری سختی مواد معدنی می‌باشد.

پ.ن: میزان سختی موهس پودر آهن ۴ و سختی تیتانیوم ۹ می‌باشد [۲۳].

شهرستان کهنوج کرمان بزرگترین معدن خاورمیانه و یکی از مرغوب ترین و بزرگترین معادن دنیا می‌باشد[۲۳,۱]. شکل شماره ۲ سنگدانه خالص و فرآوری نشده ایلمنیت را نشان می‌دهد.

شکل ۲ سنگدانه خالص و طبیعی ایلمنیت (فرآوری نشده) [۲۳]

تاکنون تحقیقات زیادی برای ارزیابی مصرف سنگدانه‌های سنگین به عنوان جایگزین بخشی از مصالح موجود در بتن انجام گرفته. اما به منظور بررسی استفاده از ضایعات اکسید تیتانیوم یا ایلمنیت در بتن نتایج زیادی منتشر نشده. طبق تحقیقات محدودی که در زمینه بتن سنگین ساخته شده با سنگین دانه ایلمنیت صورت گرفته، اثبات شده که استفاده از ایلمنیت باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن گردیده و نیز میزان جذب آب بتن را افزایش می‌دهد[۱-۸].

لهراسبی و همکاران در سال ۱۴۰۰ به بررسی تاثیر نفوذیون کلراید به روش *RCMT*[1] در بتن سنگین دارای پودر ایلمنیت پرداختند. در این تحقیق نمونه‌های ساخته شده بر اساس استاندارد *ACI-211* به روش حجمی ساخته شده است. در این تحقیق برای افزایش وزن مخصوص بتن، پودر ایلمنیت در نسبت‌های مختلف حجمی جایگزین بخشی از ماسه در بتن شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از پودر ایلمنیت در بتن سنگین باعث افزایش تراکم بتن و کاهش نرخ نفوذیون مهاجم در بتن می‌گردد بطوریکه با افزودن به ترتیب ۲۰٪ و ۳۰٪ پودر ایلمنیت در ساختار بتن نیز ضریب نفوذیون کلراید ۲۷٪ و ۲۲٪ کاهش پیدا می‌کند[۱].

برنجیان و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی و تضعیف کنندگی بتن سنگین مورد استفاده درحفاظ تابش‌های هسته‌ای پرداختند. در این تحقیق به منظور بررسی خصوصیات مکانیکی و محافظتی بتن سنگین در برابر اشعه گاما از بتن حاوی سنگدانه مگنتیت با متغییر نسبت آب به سیمان جهت ساخت طرح‌های اختلاط استفاده شد و نتایج آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بتنی نشان داد که با افزایش نسبت آب به سیمان نیز میزان وزن مخصوص بتن، خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته) و همچنین ضریب تضعیف خطی پرتو گاما کاهش می‌یابد. همچنین در نتایج این تحقیق اذعان شده که در ساخت حفاظ بتنی در برابر پرتو گاما اگر با محدودیت فضایی مواجه باشیم باید نسبت آب به سیمان را به حداقل رساند[۲].

مدانلود و همکاران در سال ۱۳۹۷ به بررسی دوام بتن سنگین ساخته شده با مگنتیت با درصدهای مختلف میکروسیلیس در برابر چرخه ذوب و انجماد پرداختند. بدین منظور نمونه‌های متفاوتی با دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ با درصدهای مختلف پوزولان (میکروسیلیس) ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ تهیه و مورد آزمایش قرارگرفته

[1] *Rapid Chloride Migration Test*

است. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش چرخه ذوب و انجماد، مدول الاستیسیته دینامیکی کاهش می‌یابد. همچنین دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵و افزودن ۵٪ میکروسیلیس بهترین عملکرد را در برابر چرخه ذوب و انجماد از خود نشان می‌دهد[۳].

ساکر[1] و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی به بررسی اثر پودر سیلیس و خاکستر پوسته برنج بر خصوصیات رفتاری بتن سنگین پرداختند. در این تحقیق تاثیر استفاده از پودر سیلیس و خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان در بتن سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سنگین‌دانه‌های ایلمنیت و باریت به عنوان سنگدانه‌های با چگالی بالا جایگزین بخشی از شن و ماسه مصرفی در بتن مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق رفتار فیزیکی و مکانیکی و دوام مانند رفتار فشاری، کششی، خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت چسبندگی نمونه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به بررسی ریز ساختار بتن با کمک تصاویر الکتریکی روبشی و تجزیه و تحلیل اثر امواج مادون قرمز و پرتو گاما و امواج حرارت زا در نمونه‌های ساخته شده پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بتن دارای سنگین‌دانه ایلمنیت به میزان ۱۵٪ جایگزینی ماسه در بتن به همراه ۱۵٪ پودر سیلیس جایگزین سیمان در بتن دارای بهترین عملکرد رفتاری و دوام خواهد بود. همچنین نمونه بتن با خاکستر پوسته برنج و سنگدانه ایلمنیت میزان جذب امواج مضر بیشتری داشته در حالیکه نمونه بتن با سیلیس، مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های مورد بررسی را از خود نشان داده است[۴].

کنتراس[2] و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی به بررسی بازیافت سنگدانه ایلمنیت (پودر ایلمنیت بازیافتی حاصل از لنت ترمز اتومبیل و گل جوش) به عنوان یک افزودنی در سیمان‌های پرتلند *OPC* پرداختند. این افزودنی در نسبت‌های وزنی ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان در بتن اضافه شده است. در این تحقیق آزمایشات مربوط به عبور تششعات گاما، ایکس و آلفا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که وجود اکسید تیتانیوم در ساختار پودر ایلمنیت موجب جذب تششعات رادیو اکتیو در بتن می‌گردد. از دیگر نتایج بدست آمده از این تحقیق نیز افزودن گل ایلمنیت به همراه سیمان *OPC* است که نقش مفیدی در جهت کاهش گرمای هیدراتاسیون، تنظیم زمان گیرش، انبساط و انقباض خطی در مقایسه با سیمان معمولی می‌گردد. علاوه بر موضوعات ذکر شده مشخص گردید که افزودن ۵٪ پودر ایلمنیت در بتن باعث کاهش عبور تششعات رادیو اکتیو و سایر تششعات زیان بار از بتن می‌گردد[۵].

استفاده از ایلمنیت در بتن بعنوان جایگزین بخشی از سنگدانه برای افزایش وزن مخصوص بتن، از نظر زیست محیطی دارای فوایدی می‌باشد زیرا ایلمنیت نوعی پسماند معدنی تلقی می‌شود و این امر موجب صرفه جویی و باریافت پسماند معدنی و نیز کاهش آلودگی محیط زیست در صنایع مختلف می‌گردد[۶,۱]. در عین حال بتن ساخته شده با ایلمنیت دارای تخلخل کمتر، مقاومت بیشتر، قیمت ارزان‌تر خواهد بود[۱]. سنگ دانه‌های معمولی حدوداً بین ۶۰ تا ۷۵ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهند از این رو با جایگزینی سنگین دانه‌های فلزی یا معدنی به جای بخشی از سنگدانه‌های معمولی باعث تغییر خواص فیزیکی، دوام و در بعضی اوقات، شیمیایی بتن خواهیم شد[۲]. از طرفی بدلیل عدم توجه به این ماده تاکنون به لحاظ تجاری به مرحله استفاده انبوه در بتن نرسیده و ضرورت دارد تا به بررسی شاخص مقاومت و دوام بکارگیری آن در بتن پرداخته شود. نوآوری این تحقیق شامل استفاده از ماده ارزان قیمت پودر معدنی ایلمنیت به عنوان عنصر سنگین وزنی که باعث افزایش وزن مخصوص بتن می‌گردد و بررسی مقاومت و دوام آن در برابر چرخه ذوب و انجماد می‌باشد.

---

[1] *K.Sakra*
[2] *M.Contreras*

۲- الزامات ساخت بتن سنگین

برخی از ضوابط ساخت بتن سنگین به استناد از استاندارد بتن آمریکا *ACI* و مبحث نهم مقررات ملی به شرح زیر می‌باشد: *[۲۱,۲۰,۱]*

- نسبت آب به مواد سیمانی حداقل ۰/۳۷ و حداکثر ۰/۶ باشد.
- میزان روانی یا اسلامپ بتن باید بین ۵۰ تا ۹۵ میلیمتر باشد.
- در ساخت بتن سنگین باید نسبت ماسه به شن را افزایش داد و یا از ماسه با مدول نرمی بالا استفاده گردد.
- در صورت استفاده از فوق روان کننده، حداکثر میزان مجاز آن ۳٪ وزنی سیمان می‌باشد.
- استفاده از مواد هوازا در صورتی که بتن در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد شدید قرار ندارد توصیه نمی‌شود. زیرا هوازا باعث کاهش وزن مخصوص بتن خواهد شد.
- استفاده از خاکستر بادی با توجه به استاندارد *ASTM-C618* مجاز است.
- استفاده از پوزولان طبیعی، ژل میکروسیلیس و نانو سیلیس مطابق با استاندارد *ASTM-C1240* مجاز است.
- برای ساخت بتن سنگین حداقل عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد.

۳- مواد و مصالح

۳-۱- ماسه

ماسه مصرفی جهت ساخت بتن در این تحقیق از معادن موجود در منطقه خرامه فارس تهیه شده است. ماسه مصرفی دارای حداکثر اندازه اسمی۰- ۴/۷۵ میلیمتر و بوده که وزن مخصوص ظاهری در حالت SSD، ۲۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب، میزان جذب آب ۲/۴۵ ٪ و مدول نرمی ۲/۸ می‌باشد.

جدول ۳ مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص SSD	جذب آب
	mm		kg/m3	٪
ماسه	۴/۷۵	۲/۸	۲۳۵۰	۲/۴۵

۳-۲-شن

شن مورد استفاده جهت ساخت بتن مورد آزمایش در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی‌با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می‌باشد که از معادن خرامه استان فارس تهیه شده است. وزن مخصوص ظاهری در حالت *SSD*، ۲۵۸۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و میزان جذب آب درشت دانه نیز برابر با ۲/۲ ٪ می‌باشد.

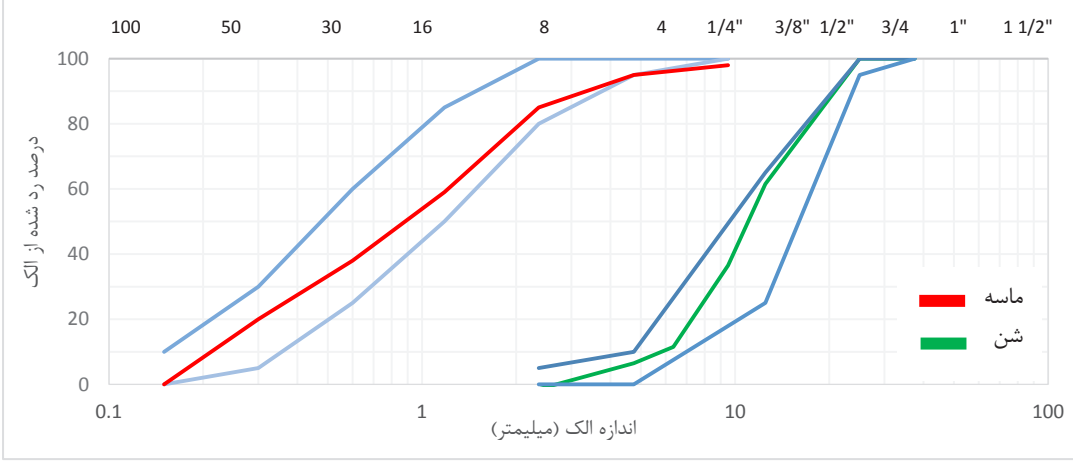
جدول ۴ مشخصات شن مصرفی مورد استفاده

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص SSD
مخلوط بادامی و نخودی	mm	%	kg/m^3
	۱۹	۲/۲	۲۵۸۰

۴-دانه بندی

در آزمایش دانه بندی سنگدانه‌ها، مصالح سنگی باایجاد لرزه توسط الک‌های مختلف شماره بندی شده عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن مشخص می‌گردد. البته قابل ذکر است که برای دانه بندی مصالح

درشت دانه یا شن از دستگاه یکنواخت کننده دانه استفاده می‌شود. مطابق با استاندارد *ASTM-C136* دانه بندی از الک‌های سیمی‌استاندارد با سوراخ‌های مربعی استفاده گردید که در نمودار شماره ۱ نشان داده شده است. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفته اند، می‌توان این مقادیر را با منحنی استاندارد *ASTM-C33* مقایسه نمود[۱۱]. در منحنی دانه بندی سنگدانه‌ها، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می‌باشد.



نمودار ۱ نمودار دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد

۵-سیمان

سیمان مصرفی در مخلوط‌های آزمایشی از نوع سیمان تیپ ۱ فیروز آباد می‌باشد. آنالیز شیمیایی این سیمان که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده آن می‌باشد، به شرح جدول شماره ۵ است. سیمان فیروزآباد تیپ ۱ مطابق با مشخصات مطرح شده در استاندارد ملی ایران به شماره *ISIRI-389* تولید شده و دارای حداکثر C_3A به میزان ۶ درصد می‌باشد[۲۲].

جدول ۵ ساختار شیمیایی سیمان تیپ یک فیروزآباد [۲۲]

C3A	I.R	L.O.I	OS3	MgO	FE2O3	AL2O3	SiO4
٪ ۵/۸۰	٪ ۰/۳۵	٪ ۱	٪ ۲/۳۵	٪ ۲/۲۰	٪ ۳/۹۵	٪ ۴/۷۰	٪ ۲۰/۹۰

جدول ۶ خصوصیات سیمان تیپ یک فیروزآباد [۲۲]

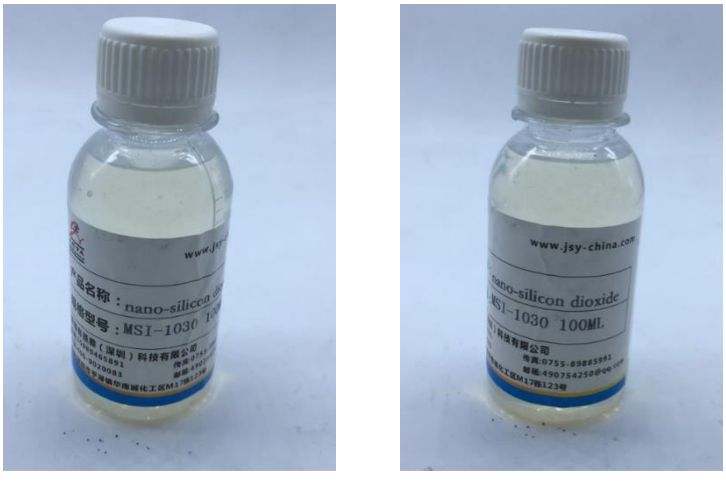
وزن مخصوص	مقاومت فشاری کیلوگرم بر سانتیمتر مربع			زمان گیرش دقیقه		انبساط اولیه (اتوکلاو)	سطح مخصوص (بلین)
gr/cm^3	۲۸روزه	۷روزه	۳روزه	نهایی	اولیه	٪	gr/cm^2
۳/۱۰	۳۱۵	۱۷۵	۱۰۰	۶۰	۴۵	۰/۸	۲۹۰۰

۶-ژل نانو سیلیس

افـزودن ژل نـانو سـیلیس در بـتن باعـث کـاهش نسـبت آب بـه سـیمان، افـزایش روانـی و کـاهش نفـوذ پـذیری در بـتن خواهـد شـد. لـذا بـا توجـه بـه هـدف تحقیـق کـه افـزایش دوام بـتن سـنگین در برابـر چرخـه ذوب و انجمـاد مـی‌باشـد و از طرفی مجاز به استفاده از ضد یخ یـا مـواد حبـاب سـاز (بـدلیل کـاهش جـرم بـتن) نخـواهیم بـود نیـز تـا از ژل نـانو سـیلیس اسـتفاده گردیـد. ژل نـانو سـیلیس در وضـعیت سـکون ژلـه‌ای و پـس از تکـان دادن بصـورت مـایع بـی رنـگ در مـی‌آیـد. ژل نانو سیلیس بکـار رفتـه در ایـن آزمـایش از نـوع *JYSA-MSI-1030* مـی‌باشـد کـه بـرای سـاخت بـتن‌هـای بـا مقاومـت و دوام بالا و بتن‌های ویژه کـاربرد دارد. ژل نـانو سـیلیس را مـی‌تـوان در هنگـام سـاخت و یـا پـس از سـاخت بـه بـتن اضـافه نمـود. زمان مورد نیاز برای اختلاط این افزودنـی در میکسـر بـین ۲ تـا ۳ دقیقـه مـی‌باشـد. مصـرف ایـن نـوع افزودنـی بـا اسـتاندارد *ASTM-C1240* مطابقـت دارد و بسـته بـه خـواص مـورد نیـاز بـین ۱ تـا ۳ درصـد وزنـی سـیمان مصـرفی توصـیه گردیـده است *[۲۶,۲۵]*.

جدول ۷ مشخصات فیزیکی و شیمیایی ژل نانو سیلیس MSI-1030 [۲۵]

نام محصول	فرمول شیمیایی	نام تجاری	حالت	PH	وزن مخصوص
					g/cm³
MSI-1030	$mSiO^2$-nH^2O +PC	ژل نانو سیلیس	ژله ای - مایع	۹-۸/۵	۱/۲۳



شکل ۵ ژل نانو سیلیس *MSI-1030*

۷-ایلمنیت

ایلمنیـت مـورد اسـتفاده در ایـن تحقیـق از نـوع معـدنی و حـداکثر انـدازه آن ۰/۵ میلیمتـر مـی‌باشـد. ایـن سـنگین دانـه مسـتخرج از معـادن ایلمنیـت منطقـه کهنـوج اسـتان کرمـان و فـرآوری شـده در کارخانـه صـنعتی دلیجـان مـی‌باشـد. سـایر مشخصات شیمیایی و فیزیکی ایلمنیت مورد استفاده به شرح جدول شماره ۸ و ۹ می‌باشد*[۲۳]*.

جدول ۸ مشخصات فیزیکی پودر ایلمنیت مورد استفاده [۲۳]

حداکثر اندازه اسمی	وزن مخصوص	درصد تخلخل	جذب آب	مدول نرمی
mm	Kg/m3	٪	٪	
۰/۵	۴۲۴۰	۳	۲/۲	۱/۸۵

جدول ۹ ساختار شیمیایی پودر ایلمنیت مورد استفاده [۲۳]

نام عنصر	ساختار شیمیایی	مقدار ٪
اکسید تیتانیوم	TiO_2	۴۸/۱
اکسید سوم آهن	Fe_2O_3	۳۱/۲
آهک	CaO	۰/۱۲
اکسید آهن	FeO	۱۱/۹
سیلیس	SiO_2	۲/۴
اکسید آلومینیوم	Al_2O_3	۱/۵۲
اکسید باریم	$BaSO_4$	۲/۲۳
سولفات باریوم	BaO	۱/۷۲

شکل ۶ ایلمنیت مورد استفاده جهت ساخت بتن سنگین

۸-طرح اختلاط

مطابق با بند ۱-۱-۶-۶-۹ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان نیز تعیین نسبت‌های بتن سنگین مشابه بتن معمولی است، اما به دلیل خشن بودن مخلوط بتن سنگین باید از ماسه با مدول بیشتر کمتر استفاده شود و یا نسبت ماسه به شن افزایش یابد[۲۰]. طرح مخلوط نمونه شاهد مورد استفاده در این تحقیق نیز بر مبنای استاندارد *ACI-211* به روش حجمی می‌باشد که با توجه به نوع مصالح بهینه سازی شده است. حداکثر اندازه اسمی درشت دانه ۱۹ میلیمتر و نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ (بدون در نظر گرفتن رطوبت سنگدانه) در نظر گرفته شده است. همچنین عیار سیمان مصرفی ۵۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب مفروض می‌باشد. برای افزایش وزن مخصوص بتن نیز از پودر ایلمنیت در نسبت‌های حجمی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ جایگزین بخشی از ماسه در بتن گردیده است. در این تحقیق جهت بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن نیز از ژل نانو سیلیس به میزان ۱٪ وزنی سیمان استفاده شده است. در جدول شماره ۲ مقادیر مصالح مصرفی برای تهیه یک متر مکعب بتن به ازای طرح مخلوط‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۲ طرح اختلاط مورد استفاده جهت آزمایش

طرح	ردیف	نام انحصاری	سیمان	شن	ماسه	ایلمنیت	ژل نانو سیلیس	آب	درصد جایگزینی ایلمنیت
			kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	lit/m³	
شاهد	۱	CON	۵۰۰	۷۲۰	۱۲۸۰	-	۵	۱۹۰	-
بتن سنگین	۲	CIL10%	۵۰۰	۷۲۰	۱۱۵۰	۴۳۵	۵	۱۹۰	۱۰٪
	۳	CIL20%	۵۰۰	۷۲۰	۱۰۲۴	۸۸۰	۵	۱۹۰	۲۰٪
	۴	CIL30%	۵۰۰	۷۲۰	۸۹۶	۱۳۲۵	۵	۱۹۰	۳۰٪
	۵	CIL40%	۵۰۰	۷۲۰	۷۶۸	۱۷۵۰	۵	۱۹۰	۴۰٪

در این تحقیق ابتدا کلیه سنگ‌دانه‌ها پس از آبکش کردن و رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک (حالت *SSD*) به همراه ماسه طبیعی به داخل میکسر ریخته و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. در ادامه سیمان، نیمی‌از آب و پودر ایلمنیت اضافه و پس از ۲ دقیقه اختلاط، نصف دیگر آب و ژل نانو سیلیس اضافه و به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شدند. مدت زمان کل اختلاط ۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه با سرعت دوران ۱۵ دور در دقیقه انجام گردید. شکل شماره ۴ مدت زمان و ترتیب اختلاط مصالح را با یکدیگر نشان می‌دهد.

شکل ۴ مدت زمان و ترتیب اختلاط اجزای بتن

۹-برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق برنامه آزمایشگاهی جهت ساخت بتن سنگین با ایلمنیت، مجموعاً متشکل از ۵۰ آزمونه بتن می‌باشد. آزمایشات انجام شده شامل آزمایش روانی (اسلامپ)، وزن مخصوص بتن تازه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب بتن سخت شده و تعیین دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد می‌باشد. برای آزمایش مقاومت فشاری از دو نمونه مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه استفاده گردید و میانگین آن، بعنوان مقاومت نهایی در نظر گرفته شد. همچنین جهت تعیین دوام یخ زدگی بتن نیز از میانگین دو نمونه بتن مکعبی ۲۸ روزه استفاده شد که پس از گذشت ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد، میزان اُفت وزنی و مقاومت آن مورد بررسی قرار گرفت. سایر آزمایشات مذکور بر روی‌یک نمونه بتنی با سن ۲۸ روز انجام شد. استاندارد آزمایش، اندازه و نوع نمونه به تفکیک به شرح جدول شماره ۱ می‌باشد. شکل شماره ۳ تصاویری از آزمایشات به ترتیب از راست به چپ (توزین بتن، مقاومت فشاری، توزین سنگدانه) را نشان می‌دهد.

جدول ۱ شرح و استاندارد آزمایش، نوع و تعداد نمونه به تفکیک هر آزمایش

ردیف	شرح آزمایش	نوع نمونه	ابعاد نمونه (میلیمتر)	تعداد نمونه	شماره استاندارد
۱	مقاومت فشاری	مکعبی	۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰	۳۰	ASTM C109
۲	مقاومت کششی	استوانه‌ای	۳۰۰*۱۵۰	۵	ASTM C496
۳	اسلامپ	-	-	-	ASTM C143
۴	وزن مخصوص	-	-	-	ASTM C138
۵	جذب آب بتن سخت شده	مکعبی	۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰	۵	ASTM C642
۶	ذوب و انجماد	مکعبی	۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰	۱۰	ASTM C666-B

شکل ۳ تصاویری از آزمایش بر روی نمونه‌های بتن سنگین در محیط آزمایشگاه

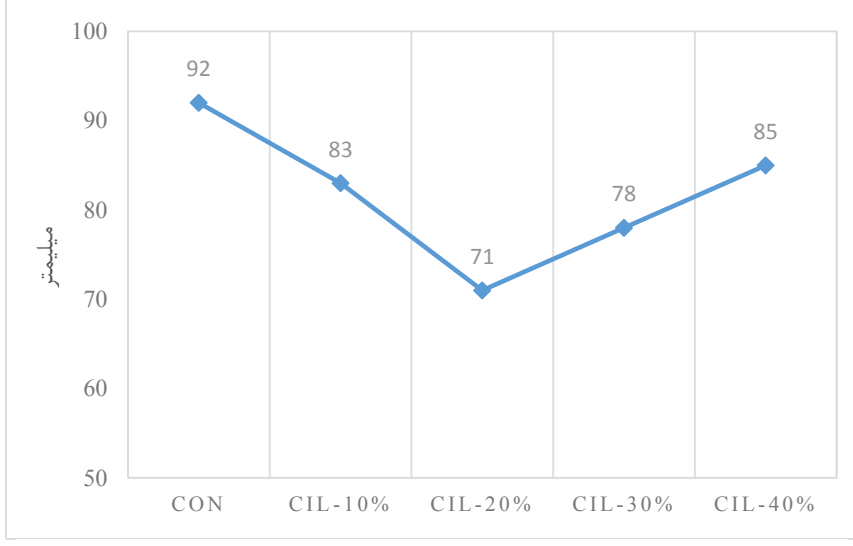
۱۰- یافته‌ها

۱۰-۱- اسلامپ

اسلامپ بتن، معیاری برای بررسی جریان پذیری بتن تازه پیش از استفاده در محل مورد نیاز می‌باشد. به استناد از ضوابط تهیه و ساخت بتن سنگین نیز میزان کارایی لازم باید بین ۵۰ تا ۹۵ میلیمتر، باشد. با توجه به اینکه در طرح مخلوط بتن سنگین، از ایلمنیت خشک (بدون رطوبت) استفاده شده بدیهی است که مقداری آب بتن را جذب نموده و میزان اسلامپ بتن را کاهش دهد. از طرفی سطح مخصوص ذرات ایلمنیت دارای ابعاد گِرد گوشه هستند که این عنصر جایگزین ماسه شکسته در بتن می‌شود. چگالی بالا و سطح مخصوص گِرد گوشه باعث لغزش ذرات ایلمنیت روی یکدیگر شده و باعث اُفت اسلامپ خواهند شد. بنابراین دو عامل: ۱-میزان جذب آب ایلمنیت در بتن باعث کاهش اسلامپ می‌شود. ۲- چگالی بالا و گرد گوشه بودن ذرات ایلمنیت باعث لغزیدن و افزایش اسلامپ بتن می‌شود. این دو عامل در تناقض با یکدیگر خواهند بود که با توجه به میزان استفاده از ایلمنیت در بتن، یکی غالب بر دیگری خواهد بود.

بنابه نتایج بدست آمده، میزان اسلامپ *CIL-10%* در مقایسه با نمونه شاهد، ۱۰٪ کاهش خواهد یافت. همچنین اسلامپ *CIL-20%* نیز در مقایسه با نمونه شاهد، اُفت ۳۰٪ را نشان می‌دهد که این افزایش اسلامپ ناشی از لغزش و چگال بودن ایلمنیت بوجود آمده است. در طرح *CIL-30%* با افزایش قابل حجم توجه حجم ایلمنیت در بتن، شاهد کاهش ۱۸٪ اسلامپ خواهیم بود. همچنین میزان اسلامپ طرح *CIL-40%* نسبت به شاهد اُفت ۸٪ را نشان می‌دهد. علرغم افزایش حجم قابل توجه ایلمنیت در بتن که انتظار می‌رفت میزان اسلامپ افزایش یابد اما بدلیل میزان جذب آب بتن تازه توسط ایلمنیت نیز میزان اسلامپ در مقایسه با طرح‌های قبلی کاهش یافته است. قابل ذکر است که میزان اسلامپ بدست آمده در تمامی طرح‌های مورد آزمایش در محدوده مجاز آیین نامه می‌باشد. این

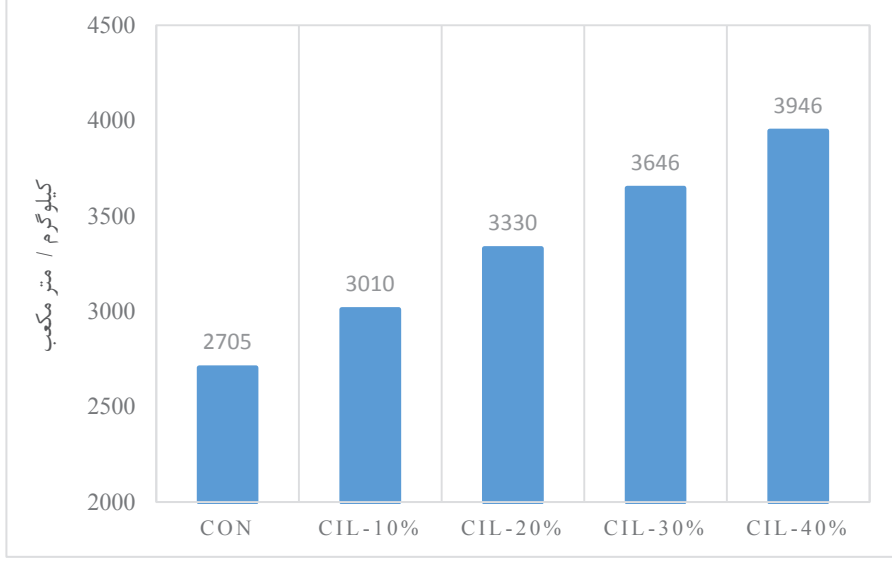
مهم بدلیل اضافه کردم ژل نانو سیلیس در بتن حاصل شده، زیرا این افزودنی نسبت آب به سیمان را کاهش داده و باعث افزایش اسلامپ بتن خواهد شد.



نمودار ۲ مقایسه میزان روانی تمامی‌نمونه‌های مورد آزمایش

۱۰-۲- وزن مخصوص

یکی از اساسی‌ترین معیارهای مورد نظر در این تحقیق، افزایش وزن مخصوص بتن برای ساخت بتن سنگین می‌باشد. میزان وزن مخصوص هر طرح اختلاط به شرح نمودار شماره ۳ است. با توجه به ضوابط و استاندارد بتن سنگین، طرح بتن شاهد و طرح *CIL-10*٪ با وزن مخصوص به ترتیب ۲۷۰۵ و ۳۰۱۰ کیلوگرم در هر متر مکعب در زمره بتن‌های سنگین قرار نمی‌گیرند. اما با این حال با افزودن حداقل ۱۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه در بتن باعث افزایش ۱۱٪ وزن مخصوص بتن خواهد شد. در طرح اختلاط *CIL-20%, 30%, 40%* نیز میزان وزن مخصوص بتن در مقایسه با طرح شاهد به ترتیب ۱۸٪، ۲۵٪ و ۴۰٪ افزایش یافته است. بنابراین با افزایش حجم ایلمنیت، به جای ماسه در بتن نیز وزن مخصوص آن افزایش پیدا خواهد کرد که این مهم بدلیل چگالی بالای ایلمنیت می‌باشد.



نمودار ۳ مقایسه وزن مخصوص تمامی‌طرح‌های مورد آزمایش

۳-۱۰ مقاومت فشاری

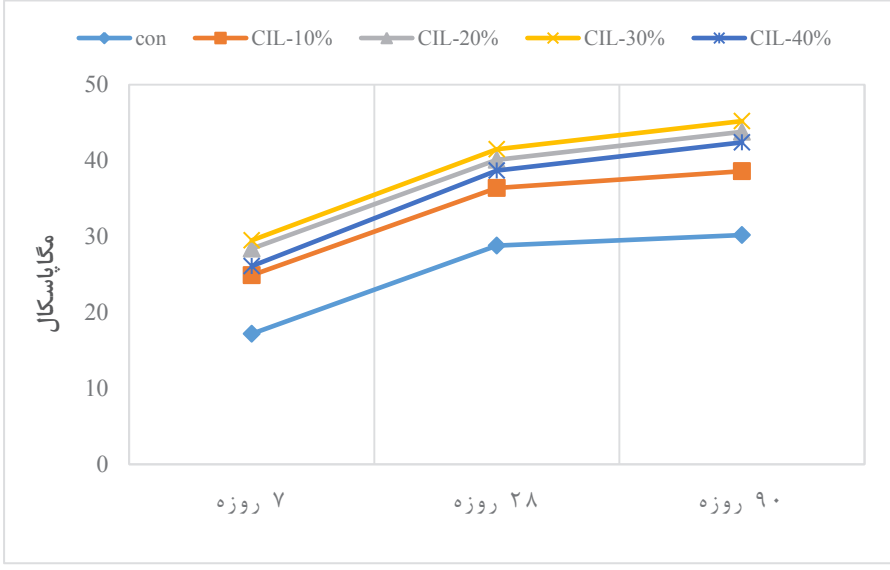
در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد *BS-EN-12390* برروی نمونه‌هایی مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. جهت انجام این آزمایش از جک هیدرولیکی دیجیتال با سرعت بارگذاری ۰/۸ بر ثانیه استفاده گردید و تا لحظه شکست نمونه بصورت ساعت شنی، اعمال نیرو ادامه یافت. نتایج حاصل از انجام این آزمایش به شرح جدول شماره ۱۲ می‌باشد. نتایج این آزمایش ثابت کرد که افزودن ایلمنیت در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری آن در تمام سنین خواهد شد و این مهم بدلیل افزایش تراکم ناشی از اندازه ریز، مقاومت و سختی بالای ایلمنیت می‌باشد. با تامل بر روی نتایج بدست آمده و با مقایسه میزان مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها مشخص گردید که بیشترین میزان مقاومت فشاری نهایی (۹۰روزه) بدست آمده مربوط به طرح مخلوط *CIL-30%* می‌باشد. اما با توجه به حجم مصرفی ایلمنیت و علرغم انتظار نیز میزان مقاومت فشاری طرح مخلوط *CIL-30%* تفاوت زیادی با طرح *CIL-20%* ندارد. بطوریکه میزان اختلاف مقاومت فشاری در این دوطرح در تمام سنین و بطور میانگین کمتر از ۳٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان اذعان کرد که بهینه‌ترین طرح اختلاط جهت ساخت بتن سنگین نیز طرح *CIL-20%* می‌باشد. در این حالت ناحیه ضعف بتن در قسمت خمیره سیمان خواهد بود. بنابراین افزودن بیش از حد ایلمنیت در بتن بدلیل برهم خوردن تناسب دانه بندی که ناشی از حذف ماسه در بتن می‌باشد، اُفت مقاومت فشاری بتن را در پی خواهد داشت.

نظر به آنچه از روند کسب مقاومت فشاری بتن و آهنگ گیرش سیمان در سنین مختلف بدست آمد مشخص شد که رشد مقاومت فشاری و عمل هیدارتاسیون سیمان روند طبیعی دارند و افزودن ایلمنیت نمی‌تواند خلال یا وقفه-ای در آن ایجاد نماید. در حالیکه این روند بر خلاف شواهد موجود از یافته‌های مشابه در سایر مراجع و پیشینه تحقیقات بوده. بطوریکه در سایر منابع اشاره به آن شده که افزودن ایلمنیت در ساختار بتن باعث افزایش روند کسب مقاومت فشاری بتن تا سن ۹۰ روز می‌گردد یا اصطلاحاً بتن دیرگیر می‌شود[۲,۱]. بنظر می‌رسد که افزودن ژل نانو سیلیس در ساختار طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در این تحقیق باعث مرتفع نمودن این عارضه گردیده است.

نمودار شماره ۴ میزان مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش و روند رشد مقاومت در سنین مختلف را نشان می-دهد.

جدول ۱۲ مقایسه مقاومت فشاری کسب شده تمامی‌نمونه‌های بتن مورد آزمایش در سنین مختلف

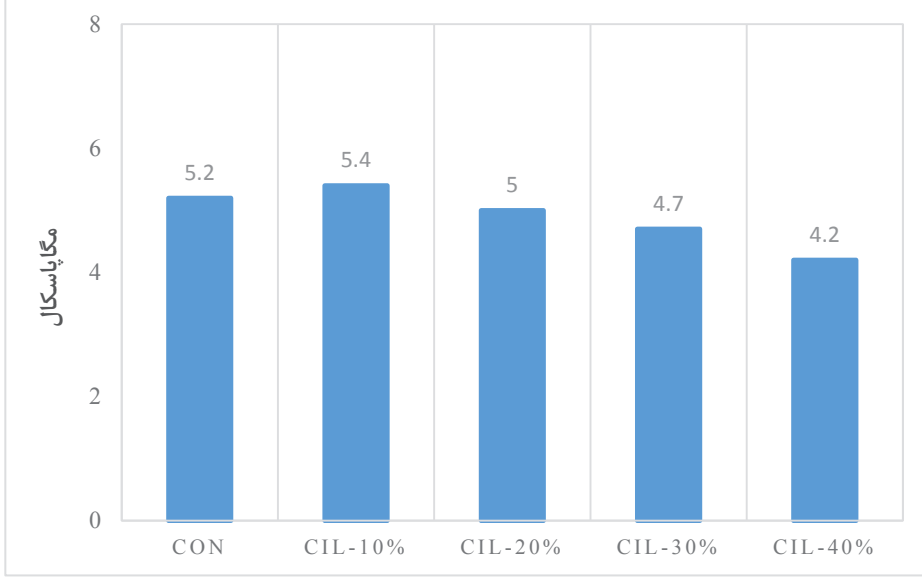
سن نمونه	CON	CIL-10%		CIL-20%		CIL-30%		CIL-40%	
	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	تغییر نسبت به نمونه شاهد	مقاومت فشاری	تغییر نسبت به نمونه شاهد	مقاومت فشاری	تغییر نسبت به نمونه شاهد	مقاومت فشاری	تغییر نسبت به نمونه شاهد
۷ روزه	17/2	24/9	٪30/9	28/4	٪39/4	29/5	٪41/7	26/1	٪34/1
۲۸ روزه	28/8	36/4	٪20/9	40/1	٪28/2	41/5	٪30/6	38/7	٪25/6
۹۰ روزه	30/2	38/6	٪21/8	43/8	٪31/1	45/2	٪33/2	42/4	٪28/8



نمودار ۴ مقایسه مقاومت فشاری کسب شده تمامی‌نمونه‌های بتن مورد آزمایش در سنین مختلف

۱۰-۴-مقاومت کششی

آزمایش تعیین مقاومت کششی مطابق با دستورالعمل استاندارد *ASTM-C496* بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰*۳۰۰ میلیمتر در سن ۲۸ روز انجام گرفت. نتایج مقاومت کششی هر طرح اختلاط به شرح جدول شماره ۱۳ می‌باشد. میزان مقاومت کششی طرح *CIL-10%* در مقایسه با نمونه شاهد، رشد ۳٪ را نشان می‌دهد. اما طرح‌های *CIL-20%, 30%, 40%* به ترتیب اُفت ۴٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ مقاومت کششی را در مقایسه با طرح شاهد نشان دادند. شایان ذکر است که از عوامل تاثیرگذار در کسب این نتایج، وجود عدم چسبندکی مناسب سنگدانه ناشی از افزودن ایلمنیت کروی شکل با دانه بندی یکنواخت به جای ماسه شکسته و دانه بندی غیریکنواخت می‌باشد که باعث دونیم شدن زود هنگام آزمونه بتن در برابر نیروی کششی خواهد شد.



نمودار ۵ مقایسه مقاومت کششی تمامی‌طرح مخلوط‌های مورد آزمایش

۱۰-۵-جذب آب در بتن سخت شده

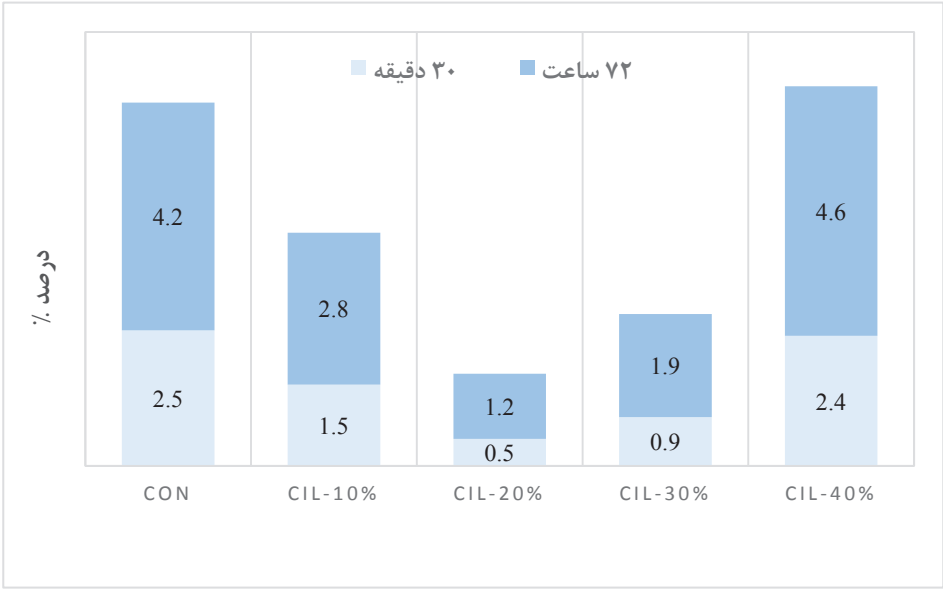
این آزمایش علاوه بر اندازه‌گیری میزان جذب آب نیز معیاری برای سنجش تخلخل در بتن می‌باشد. در این تحقیق آزمایش میزان جذب آب در بتن سخت شده مطابق استاندارد *ASTM-C642* بر روی نمونه مکعبی ۲۸ روزه انجام گرفته است. بدین ترتیب ابتدا نمونه‌های بتنی به مدت ۲۴ ساعت در آون[1] و در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته ا رطوبت بتن کاملاً گرفته و خشک شود. سپس نمونه بتنی به مدت ۳۰ دقیقه (جذب آب اولیه) و ۷۲ ساعت (جذب آب ثانویه) در حوضچه آن قرار گرفته و وزن آن اندازه گیری می‌شود.

نتایج بدست آمده از این آزمایش به شرح جدول شماره ۱۴ می‌باشد. به استناد از نتایج بدست آمده مشخص گردید که میزان جذب آب بتن در طرح شاهد و طرح *CIL-40%* تقریباً یک اندازه می‌باشد و این اثبات وجود تخلخل ناشی از برهم خوردن دانه بندی و جذب آب توسط ایلمنیت در طرح *CIL-40%* می‌باشد. اما در طرح *CIL-20%* میزان جذب آب بتن در مقایسه بدلیل بسیار اندک است. زیرا میزان تراکم بوجود آمده و انسجام دانه‌های ایلمنیت و سنگدانه باعث شده میزان تراکم به حداکثر میزان رسد. همچنین افزودن ژل نانو سیلیس در بتن باعث کاهش تخلخل و پیوستگی بیشتر عناصر بتن خواهد شد. بطوریکه در تمام طرح مخلوطها میزان جذب آب نهایی (۷۲ ساعت) کمتر از ۵ درصد می‌باشد در حالیکه پیشینیه تحقیق نشان می‌دهد که میزان جذب آب در بتن سنگین ساخته شده با ایلمنیت بیش از مقدار بدست آمده در این تحقیق می‌باشد[۱-۲].

جدول ۱۴ مقایسه میزان درصد آب جذب شده بتن سخت شده در تمامی‌طرح‌های مورد آزمایش

نام طرح	نمونه خشک شده	۳۰ دقیقه	۷۲ ساعت	وضعیت
	گرم	گرم	گرم	
CON	۲۹۸۰	۳۰۵۸	۳۰۹۲	وزن خشک
	-	۲/۵	۴/۲	درصد جذب رطوبت
CIL-10%	۳۲۹۰	۳۳۳۵	۳۳۷۲	وزن خشک
	-	۱/۵	۲/۸	درصد جذب رطوبت
CIL-20%	۳۵۴۰	۳۵۵۷	۳۵۷۹	وزن خشک
	-	۰/۵	۱/۲	درصد جذب رطوبت
CIL-30%	۳۸۲۰	۳۸۵۰	۳۸۸۷	وزن خشک
	-	۰/۹	۱/۹	درصد جذب رطوبت
CIL-40%	۴۱۴۰	۴۲۳۲	۴۳۲۲	وزن خشک
	-	۲/۴	۴/۶	درصد جذب رطوبت

[1] *Owen*



نمودار ۶ مقایسه میزان درصد آب جذب شده بتن سخت شده در تمامی‌طرح‌های مورد آزمایش

۱۰-۶ دوام یخ زدگی

برای تعیین دوام بتن در برابر چرخه یخبندان روش‌های آزمایش متعددی وجود دارد که مهم‌ترین آن دستور العمل *ASTM-C666* به دو روش *A* و *B* است. در روش *A* نمونه‌های بتن به تعداد معینی در در مجاورت آب در دمای ۱۸- تا ۴+ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد. در روش *B* روش آزمایش دقیقاً مشابه روش *A* است، با این تفاوت که یخبندان نمونه‌ها در مجاورت آب و ذوب آن در مجاورت هوا انجام می‌شود. بعد از اتمام چرخه‌های یخبندان و ذوب میزان تخریب نمونه‌ها با معیارهای مختلفی سنجیده میشود که شامل موارد عمده زیر است[۹]:

۱- تغییر در مقاومت فشاری: اُفت بیش از ۱۰٪ نشان دهنده تخریب است.

۲- تغییر در وزن نمونه: اُفت بیش از ۵٪ نشان دهنده تخریب است.

۳- تغییر در پاسخ امواج : با عبور امواج ماورای صوت از نمونه در قبل و بعد از آزمایش اگر به میزان ۴۰٪ اُفت در سرعت امواج عبوری مشاهده شود، نمونه تخریب شده است.

۴-تغییر در طول ابعادی نمونه: کرنش‌های نمونه با ابزارهای دقیق سنجیده می‌شود و در صورتی که مقدار آن از میزان توصیه شده تجاوز کند، نمونه به حالت تخریب رسیده است.

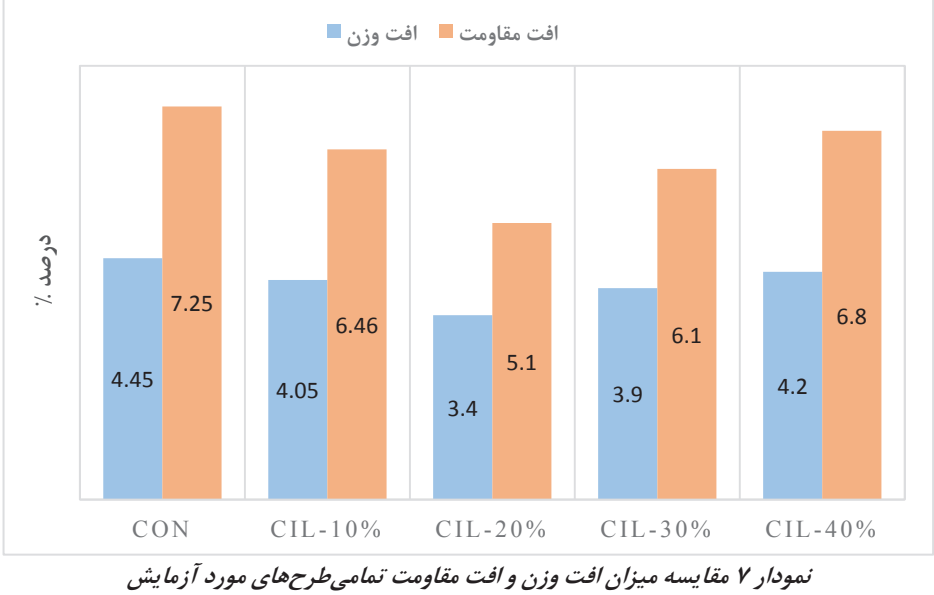
در این تحقیق برای انجام آزمایش سنجش دوام بتن در معرض سیکل انجماد و ذوب، از استاندارد *ASTM-C666-B* (حالت ذوب و انجماد سریع با فریزر) تبعیت شده است. در این روش، نمونه‌ها تحت شرایط دمای حداقل ۱۸- و حداکثر ۴+ و طی ۳۰۰ چرخه تکرار قرار گرفتند. همچنین هر چرخه ذوب و انجماد به مدت ۵ ساعت مفروض است که نمونه‌های بتنی به مدت ۲/۵ ساعت به حالت انجماد (۱۸- درجه) و ۲/۵ ساعت به حالت ذوب (۴+ درجه) قرار می‌گیرند. بعد از اتمام چرخه‌های یخبندان و ذوب نیز نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در معرض آفتاب قرار گرفته تا رطوبت سطحی آن‌ها خشک شود. در نهایت میزان تخریب نمونه‌ها با معیار اُفت وزن و اُفت مقاومت سنجیده می‌شود.

نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش به شرح جدول شماره ۱۵ و نمودار شماره ۷ می‌باشد. به استناد از نتایج بدست آمده طرح‌های *CIL-10%, 20%, 30%, 40%* در مقایسه با طرح شاهد، به ترتیب دچار اُفت وزنی به میزان ۴/۰ ٪، ۳/۴ ٪، ۳/۹ ٪و ۴/۲ ٪ و نیز با اُفت مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۶/۴ ٪، ۵/۱ ٪، ۶/۱ ٪و ۶/۸٪ همراه بودند. در تمامی‌نمونه‌ها میزان اُفت وزن و اُفت مقاومت به میزان تخلخل و نفوذ آب در منافذ بتن ارتباط

مستقیم وجود دارد که در اثر تغییرات دمایی آب موجود در بتن دچار انبساط و انقباض بتن می‌گردد و سبب افزایش و کاهش حجم مکرر بتن می‌شود که در نتیجه زوال و پوسته پوسته شدن سطح آن را بدنبال دارد. بنابراین هر چه میزان تخلخل در بتن بیشتر باشد یا به تعبیر دیگری هر چه تراکم بتن کمتر باشد، دوام آن در برابر چرخه یخ انجماد کاهش خواهد می‌یابد. البته افزودن ژل نانو سیلیس درترکیب تمامی طرح مخلوطها بی‌تاثیر نیست در نتیجه می‌توان اذعان داشت که افزودن ژل نانو سیلیس در بتن باعث افزایش دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد گردیده که این مهم متاثر از افزایش تراکم و خاصیت پرکنندگی تخلخل و ساختار بتن و نیز کاهش نسبت آب به سیمان می‌باشد.

جدول ۱۵ مقایسه میزان افت وزن و افت مقاومت بتن تحت آزمایش چرخه ذوب و انجماد

نام طرح	مقاومت نهایی	اُفت مقاومت	وزن نهایی	اُفت وزن
	مگاپاسکال	٪	گرم	٪
CON	۲۶/۷	۷/۲۵	۸۹۸۵	۴/۴۵
CIL-10%	۳۴	۶/۴۶	۹۹۹۰	۴/۰۵
CIL-20%	۳۸	۵/۱	۱۰۹۸۰	۳/۴
CIL-30%	۳۹/۱	۶/۱	۱۱۸۹۰	۳/۹
CIL-40%	۳۶	۶/۸	۱۲۸۱۰	۴/۲



نمودار ۷ مقایسه میزان افت وزن و افت مقاومت تمامی‌طرح‌های مورد آزمایش

۱۱- نتیجه گیری

در این تحقیق تلاش گردید تا در جهت حمایت از صنایع و معادن داخلی کشور، برای ساخت بتن سنگین از ایلمنیت معادن کهنوج استان کرمان که بعنوان بزرگترین معدن تیتانیوم خاورمیانه تلقی می‌شود، استفاده گردد. همچنین با توجه به ممنوعیت استفاده از مواد حباب زا در بتن سنگین برای افزایش کیفیت و دوام آن در برابر

چرخه انجماد، از ژل نانو سیلیس استفاده گردید تا با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت و دوام آن بهبود یابد. برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱- افزودن ایلمنیت در بتن، اخلالی در روند کسب مقاومت فشاری و آهنگ گیرش سیمان در سنین مختلف ایجاد نخواهد کرد. علرغم اینکه مطالعات پیشین نشان می‌دهد که افزودن ایلمنیت در بتن سبب کند گیر شدن آن در سنین اولیه بتن می‌شود.

۲- افزودن ۳۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه می‌تواند تا ۳۳٪ مقاومت نهایی (۹۰روزه) بتن را افزایش دهد که این میزان بالاترین مقاومت کسب شده در بین سایر طرح مخلوط‌ها می‌باشد.

۳- افزودن حداکثر ۱۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه می‌تواند باعث افزایش ۳٪ مقاومت کششی شود که این بالاترین میزان مقاومت بدست آمده می‌باشد.

۴- استفاده از حداکثر ۲۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه در بتن، میزان اسلامپ را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد که این مهم بدلیل لغزش ذرات ایلمنیت ناشی از چگالی بالا و سطح مخصوص گرد گوشه می‌باشد.

۵- استفاده از مقادیر بالای ۳۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه در بتن، میزان اسلامپ را کاهش می‌دهد که این مهم بدلیل میزان جذب آب بالای ایلمنیت در بتن تازه می‌باشد.

۶- استفاده از حداقل ۲۰٪ حجمی ایلمنیت در بتن به جای ماسه، باعث افزایش وزن مخصوص بتن تازه به بالای ۳۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و تامین ضابطه آیین نامه‌ای خواهد شد.

۷- استفاده از ۲۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه، پس از ۳۰۰ چرخه انجماد باعث اُفت وزنی و مقاومتی به ترتیب تا ۳/۴٪ و ۵/۱٪ خواهد شد که در مقایسه با سایر طرح مخلوط‌ها نیز دارای بیشترین دوام خواهد بود.

۸- استفاده از ژل نانو سیلیس به میزان حداکثر ۱٪ وزنی سیمان برای ساخت بتن سنگین در کسب نتایج بدست آمده، اثرگذار بوده است.

۱۲-سپاسگزاری

قدردانی فراوان از موسسه آموزشی "ماهرشو...!" شهر شیراز و آزمایشگاه "سیوان بتن" جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق مبذول داشتند.

۱۳-منابع

[1]Farzad Lohrasbi, Amir Hossein Bazaee, Mohammad Mehdi Jabbari "Investigation Of The Effect Of Chloride Ion Penetration By Rcmt Method In Heavy Concrete Containing Ilmenite Powder" Civil And Project Monthly, Volume 3, Number 9, 1400.

[2]Javad Baranjian, Omid Lotfi, Hamidreza Asadi "Laboratory Study Of Mechanical Properties And Attenuation Of Heavy Concrete Used To Protect Against Nuclear Radiation" 22nd National Festival And Annual Conference Of The International Concrete Scientific Association (Aci) Iran Branch And Annual National Conference Earthquake, 1398.

[3]Basira Madanloo, Morteza Hossein Ali Beigi, Bahram Navainia "Durability Of Heavy Concrete Made With Magnetite With Different Percentages Of Microsilica Against Glacial And Melting Cycles" Third International Conference On Civil Engineering, Architecture And Urban Design, 1397.

[4]K. Sakra, E. El-Hakim, Atomic Energy Authority, Hot Laboratory Center, Radiation Protection Department, P.O. Box135759, Kalubiuah, Cairo-A.R.E., Egypt B Metallurgy Department–Nuclear Research Center, Atomic Energy Authority, Cairo, Egypt, ''Effect Of High Temperature Or Fire On Heavy Weight Concrete Properties'' 2006.

[5] *Manuel Contreras Llanes1 & Manuel Jesús Gázquez González2 & Silvia María Pérez Moreno1 & Juan Pedro Bolívar Raya , "Recovery Of Ilmenite Mud As An Additive In Commercial Portland Cements" 2018*

[6] *Mohammed A. Khalaf, Cheah Chee Ban, Mahyuddin Ramli , School Of Housing, Building And Planning, Universiti Sains Malaysia, 11800 Usm, Malaysia, "The Constituents, Properties And Application Of Heavyweight Concrete: A Review" 2019*

[7] *Misagh Goldoost Rezaei, Hadi Tarvirdizadeh Sangari, "Study Of The Advantages And Disadvantages Of Light And Heavy Structural Concretes" Fourteenth International Congress Of Civil Engineering - Tehran, Iran , 2016 (Persian)*

[8] *Ali Yadollahi, Ali Mohammad Ajrlou, Ahmad Reza Zolfaghari ,"Protection Against Gamma Rays Using Heavy Concrete Containing Lead Slag" Journal Of Engineering Geology, Volume 9, Number 4 Winter 2015 (Persian)*

[9] *Farnaz Rathi, Mansour Razavi, Iman Mobasherpour, "The Effect Of Temperature On The Behavior Of Iron-Titanium Carbide Composite Prepared From Ilmenite Mineral By Spark Plasma Center" Quarterly Journal Of Advanced Materials And Technologies, Volume 8, Number 3 , Fall 2018, Pp. 37-3 (Persian)*

[10] *Shahriar Ghamami, Amir Kazemi, Nastrin Bagheri, "Extraction And Purification Of Titanium Dioxide Nanoparticles With Titanium Tetrachloride From Ilmenite Concentrate Of Kahnooj Mine In Kerman" Journal Of Applied Chemistry, Year 15, Issue Summer 2016 (Persian)*

[11] *Alireza Habibi, Yaser Rahmani, Sarkoot Saeedpour, "Optimization Of Heavy Concrete Mixing Design Based On Laboratory Results" Journal Of Civil Engineering Modares, Volume 18, Number 6, 2016 (Persian)*

[12] *Saeed Lisani, Ali Sadr Mumtazi "Effect Of Acid Corrosive Environments On The Performance Of Lightweight Concrete Containers Containing Silica Soot" M.Sc. Thesis In Civil Engineering, Islamic Azad University, Shahroud Branch, Faculty Of Engineering, 2016 (Persian)*

[13] *Abbas Partovi Deilami, Mirahmad Leshteh Nashaei, Mir Abdolhamid Mehrdad "Study Of The Effect Of Using Sea Salt Water Instead Of Drinking Water On The Mechanical Behavior Of Concrete" Master Thesis In Civil Engineering, University Of Guilan, University Campus, 2015 (Persian)*

[14] *Mehdi Gholipour Feizi, Alireza Mojtahedi, Mohammad Ali Lotf Elahi (2016) "Testing And Evaluation Of Mechanical Properties Of Heavy Concrete Prepared From Barite Aggregates" Quarterly Journal Of Structural Analysis - Earthquake Volume 12, Number 1, Spring 2015. (Persian)*

[15] *Ahmad Reza Pilvar, Ali Akbar Ramezanianpour, Hossein Rajaei (2016) "Laboratory Study Of Accelerated Electrical Methods For Measuring The Chloride Permeability Of Concrete" Concrete Research Year 9, Issue 2, Fall And Winter 2016. (Persian)*

[16] *Ali Delnavaz, Ali Akbar Ramezanianpour (1398) "Determination Of Chloride Ion Penetration Coefficient In Carbonated Concretes Containing Microsilica" Amirkabir Civil Engineering Journal, Volume 51, Number 2, 1398, Pages 3 To 367. (Persian)*

[17] *Alireza Bagheri, Hamed Zanganeh (2013) "Study Of Resistance And Durability Properties Against Chloride Penetration Of Three-Component High-Strength Solids Containing Smelting Furnace Slag And Silica Fume" Journal Of Civil Engineering, Volume 2, Number 4, Pp. 127-136, Technical Note. (Persian)*

[18] *Allah Dad Shababi, Mahmoud Payeh Ghadr (2012) "Rutile Concentration From Kahnooj Ilmenite Concentrate" Article 9 Of The National Building Regulations Of Iran (2013 Edition)*

[19] *Iranian Concrete Standard "Aba" (Persian)*

[20] Gaurav Tyagi, Anupam Singhal, Srikanta Routroy, (2020) "A Review On Sustainable Utilization Of Industrial Wastes In Radiation Shielding Concrete" Available Online 8 April 2020, Version Of Record 4 November 2020.

[21] K.Sargunana.Venkata Raob. Alex Rajeshc, "Experimental Investigations Of The Mechanical Strength Of Heavy Concrete Using Hematite And Ilmenite", International Conference On Emerging Trends In Material Science And Technology-(2022) 143-160

[22] Mahmoud Naderi, Alireza Kaboudan, "The Effect Of Resistance, Time And Amount Of Water Pressure For Concreting Heavy Concrete On The Permeability Of Concrete", Amirkabir Civil Engineering Journal (2020) 1-19 (In Persian)

[23] Kiachehr Behfarnia, Niloofar Salemi, "The Effects Of Lead Powder And Magnetite On The Resistance Of Heavy Concrete Against Frost", Construction And Building Materials 48 (2013) 580–584

[24] Scott Muzenski, Ismael Flores-Vivian, Konstantin Sobolev, "Examining The Durability Of Heavy Concrete Containing Ilmenite, Dolomite And Hematite On The Durability Of Concrete Against Different Temperatures", Construction And Building Materials 220 (2019) 177–186

[25] Mohsen Kalvandi, Mahla Rezaei, Mohammad Kalvandi, "The Effect Of Iron Nanoparticles, Iron Oxide, Titanium And Silica Particles On The Properties And Durability Of Heavy Concrete", 2nd National Congress Of Civil Engineering And Construction Projects (2015) 20-31

[26] R.Polder, W.Peelen, W.Courage, "Investigation And Comparison Of Compressive Strength, Tensile Strength And Specific Weight Of Heavy Concrete Containing Dolomite, Hematite, Ilmenite, Magnetite, Steel Particles", Materials And Corrosion, (2012) 1147-1153.

[27] R.Pillai, R.Gettu, M.Santhanam, S.Rengaraju, Y.Dhandapani, S.Rathnarajan, A.S. Basavaraj, "Evaluation Of Service Life And Life Cycle Of Heavy Concrete Systems Reinforced With Hematite And Ilmenite", Cement And Concrete Research, (2019) 111-119.

[28] Standard Practice For Selecting Proportions For Normal, Heavyweight, And Mass Concrete (Aci 211.1-91)

[29] Www.Farsnov.Ir To Inquire About Cement Specifications.

[30] Www.Madanpowder.Com Delijan Industrial Powder Production And Distribution Company, Markazi-Delijan-5 Km Isfahan Road Delijan Industrial Town South Talashgaran St.-Sarvestan St. 2-Sarv Alley 2.

[31] Astm C109/C109m-20, Standard Test Method For Compressive Strength Of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-In. Or [100-Mm] Cube Specimens) Www.Astm.Org

[32] Astm C779/C779m-12, Standard Test Method For Abrasion Resistance Of Horizontal Concrete Surfaces, Www.Astm.Org

[33] Astm C666-B, Standard Test Method For Resistance Of Concrete To Rapid Freezing And Thawing, Www.Astm.Org