

Investigating The Behavior Of Heavy Concrete With Different Volume Ratios Of Ilmenite Powder And Its Protective Effect Against Ionizing Radiation

Abbas azimi¹, Amirhossein Bazae², Babak Mansouri^{3*}

1- Master's degree in Civil Engineering, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sepidan Branch, Sepidan, Iran

2- Instructor, Department Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (Tvu), Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Firoozabad Branch, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran

ABSTRACT

Today, all hospitals are equipped with laboratories or radiation therapy departments, and the patient should take advantage of new treatment methods. Also, the construction of atomic and nuclear power plants and laboratories has contributed to the country's progress, and having technology and knowledge is important in the development of the country's infrastructure. Also, the people working in these centers are mainly doctors, nurses, and atomic physics engineers, who are considered geniuses and human capital, and it is necessary to reduce the amount of dangers caused by dangerous rays such as gamma rays and X-rays. Currently, thick and high-density concrete walls or reinforced concrete with one or more layers of lead tape are used to prevent the passage of dangerous rays. Considering that Iran has a lot of ilmenite mines, it is necessary to check how much ilmenite can be added in concrete in order to reduce the price and use domestic materials to save and find jobs and develop domestic mines. Dangerous to be effective. In this research, 10%, 20%, 30% and 40% ilmenite was used instead of sand to make heavy concrete. ACI-304.3R heavy concrete construction standard was determined by volumetric method. To investigate the characteristics of heavy concrete from slump tests, the specific weight of fresh concrete, compressive strength and X-ray and gamma penetration measurements of concrete were investigated. The results of this research showed that adding 20% by volume of ilmenite instead of sand can increase the 90-day compressive strength of concrete by 47%. Also, adding 40% by volume of ilmenite in concrete can weaken the amount of x-ray and gamma rays by 24.77% and 18.16%, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 March 2023

Revise Date: 19 June 2023

Accept Date: 12 July 2023

Keywords:

Heavy Concrete

Gamma-Ray

X-Ray

Ilmenite

Protective Concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.389367.3060>

*Corresponding author: Babak Mansoori
Email address: Babak.mansoori@iau.ac.ir

بررسی رفتار بتن سنگین دارای نسبت‌های مختلف حجمی پودر ایلمنیت و تاثیر

محافظتی آن در برابر تشعشعات یونیزان

عباس عظیمی^۱، امیرحسین بازایی^۲، بابک منصوری^{۳*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران

۲- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد فیروزآباد، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران

چکیده

امروزه کلیه بیمارستان‌ها مجهز به آزمایشگاه و یا بخش‌های پرتودرمانی می‌باشند و بیمار ناچار است تا از مزایای روش‌های نوین پرتو درمانی بهره‌گیرد. همچنین ساخت نیروگاه‌ها و مراکز اتمی و هسته‌ای جز زمینه‌های پیشرفت کشور تلقی می‌شود و داشتن تکنولوژی و دانش فنی در توسعه زیرساخت‌های کشور اهمیت بسزایی دارد. از طرفی افراد مشغول بکار در این مراکز عمدتاً پزشکان، پرستاران و مهندسين فیزیک اتمی و هسته‌ای هستند که جزء سرمایه‌های انسانی و ملی محسوب می‌شوند و ضرورت دارد تا با ایجاد تمهیداتی میزان خطرات ناشی از تشعشعات مضر نظیر اشعه گاما و ایکس را به حداقل رسانند. در حال حاضر برای جلوگیری از عبور پرتوهای مضر از دیوارهای عریض و چگال بتنی یا بتن مسلح شده با پوشش یک یا چند لایه سرب استفاده می‌شود. با توجه به اینکه کشور ایران از معادن ایلمنیت غنی می‌باشد ضرورت دارد تا جهت ارزان‌سازی و استفاده از مصالح بومی جهت ارزآوری و اشتغال‌زایی و توسعه معادن بومی، تاثیر استفاده از ایلمنیت برای ساخت بتن سنگین بررسی شود. در این تحقیق برای ساخت بتن سنگین از پودر ایلمنیت در نسبت‌های مختلف حجمی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ به جای ماسه استفاده شد. مبنای طرح مخلوط بتن سنگین، استاندارد ACI-304.3R به روش حجمی تعیین شد. سپس برای بررسی خصوصیات رفتاری بتن نیز آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص بتن تازه، مقاومت فشاری و میزان نفوذ پرتو ایکس و گاما انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۲۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه می‌تواند تا ۴۷٪ مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن را افزایش دهد. همچنین افزودن ۴۰٪ حجمی ایلمنیت در بتن می‌تواند میزان پرتو عبوری ایکس و گاما را به ترتیب تا ۲۴/۷۷٪ و ۱۸/۱۶٪ کاهش و تضعیف نماید.

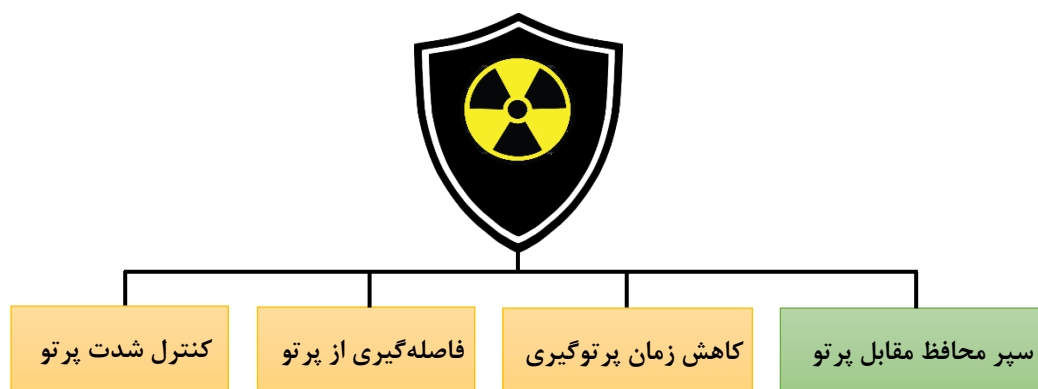
کلمات کلیدی: بتن سنگین، پرتو گاما، پرتو ایکس، ایلمنیت، بتن محافظ.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.389367.3060	۱۴۰۱/۱۲/۲۴	۱۴۰۲/۰۳/۲۹	۱۴۰۲/۰۴/۲۱	۱۴۰۲/۰۴/۲۱	۱۴۰۲/۰۱/۳۱
	10.22065/jsce.2023.389367.3060					
		*نویسنده مسئول:		بابک منصوری		
		پست الکترونیکی:		Babak.mansoori@iau.ac.ir		

۱- مقدمه

پرتو یا تشعشعات حالتی از انرژی هستند که به صورت امواج یا ذرات در محیط منتشر می‌شوند. پرتوها به دو دسته یونیزان (یونساز) و غیر یونیزان (غیر یونساز) دسته‌بندی می‌شوند. اشعه‌ی ایکس و گاما، پرتو یونیزان هستند و دارای انرژی الکترومغناطیس می‌باشند. پرتو ایکس و گاما طول موج کوتاهی دارند و انرژی زیادی را با خود حمل می‌کنند. این امواج می‌توانند به درون اجسام نفوذ کنند [۱]. اشعه-های یونیزان می‌توانند به DNA انسان آسیب برسانند. اگرچه سلول‌های انسان بیشتر آسیب‌ها را ترمیم می‌کند، اما گاهی اوقات کار به‌طور ناقص انجام می‌شود که نتیجه آن جهش DNA است و ممکن است طی گذشت چندین سال، زمینه پیدایش سرطان فراهم شود. تابشی که از اشعه ایکس، سی‌تی‌اسکن^۱ و تصویربرداری هسته‌ای ساطع می‌شود، در دسته پرتوهای یونیزان قرار دارند [۲]. قرار گرفتن انسان‌ها در معرض پرتوهای یونیزان از منابع طبیعی یا زمینه‌ای مانند نور خورشید یا عوامل جوی از حدود سال ۱۹۸۰ تاکنون تغییری نکرده، اما میزان سرانه تابشی کل دنیا تقریباً دو برابر شده که دلیل اصلی آن افزایش استفاده از تصویربرداری پزشکی است. بطوریکه نسبت قرارگیری در معرض تابش در اوایل دهه ۱۹۸۰ تنها ۱۵٪ بوده که این میزان تا پایان سال ۲۰۲۱ به بیش از ۵۰٪ تخمین زده شده [۳]. تصویربرداری با اشعه ایکس توسط سازمان بهداشت جهانی^۲ به عنوان یک منبع سرطان‌زا معرفی شده است [۵]. انتظار می‌رود که این آمار به موازات افزایش استفاده از سی‌تی‌اسکن در روش‌های پزشکی مختلف افزایش یابد. علاوه بر آن خطر پرتوگیری در فضایی که مواد رادیواکتیو نگهداری و یا دفع می‌شوند، وجود دارد. بنابراین کارکنان شاغل در بیمارستان‌ها، مراکز تصویربرداری پزشکی، آزمایشگاه‌های هسته‌ای و نیروگاه‌های اتمی ممکن است در معرض پرتوگیری ایکس یا گاما قرار گیرند. شورای ملی حفاظت و ارزشیابی پرتو (NCRP)^۳ حداکثر میزان دوز مجاز سالانه پرتوهای یونساز را برای مواجهه کل بدن، ۵ رم در سال و ۳ رم در طول مدت ۱۳ هفته تعیین کرده. هدف نهایی NCRP در مورد محدودیت تابش اشعه، جلوگیری از آسیب‌هایی مانند: آب مروارید، آریتما و کاهش احتمال ابتلا به سرطان می‌باشد [۶].

لازم به ذکر است که نوع منبع تولید کننده اشعه برای مقابله با کاهش خطرات جانی مهم است. علاوه بر آن تعداد دفعات قرارگیری در معرض پرتو یونیزان هم دارای اهمیت است. بطور خلاصه روش‌های کنترل مواجهه با پرتوهای یونیزان شامل محدود کردن زمان پرتوگیری، افزایش فاصله از منبع پرتوساز، ایزوله نمودن منبع پرتوساز توسط مواد حفاظتی و پرهیز از مواجهه‌های غیرضروری می‌باشد. همچنین استفاده از تجهیزات مناسب، ارتقاء سطح دانش و آگاهی کارکنان می‌تواند خطرات ناشی از پرتوگیری را کاهش می‌دهد. کارکنانی که به طور مستقیم با پرتوهای یونیزان در تماس هستند باید از پیش‌بیند سربی، دستکش و عینک ضد اشعه استفاده نمایند و تمامی وسایل حفاظتی باید به منظور بررسی هرگونه شکاف و سایر علائم خرابی سالانه مورد بازرسی قرار گیرند [۷]. شکل شماره ۱ تمهیدات لازم برای جلوگیری از جذب بیش از حد مجاز پرتو را نشان می‌دهد. در این تحقیق نسبت به ساخت و امکان‌سنجی ساخت سپر محافظ بتنی برای جلوگیری یا تضعیف پرتوهای عبوری اقدام می‌گردد.



شکل ۱ انواع روش مقابله با پرتوهای یونیزان. ماخذ [نگارندگان]

¹ C.T Scan

² WHO

³ National Committee For Responsive Philanthropy

سپر محافظ یا شیلد^۴ عبارت است از ایجاد جسمی در برابر پرتو یونیزان بطوریکه مانع عبور به محیط بیرون شود و یا انرژی آن را جذب و تضعیف نماید. میزان جذب یا تضعیف پرتو توسط محافظ، بستگی به دو فاکتور چگالی و ضخامت دارد [۶]. بنابراین در قطعه نازکتر پرتو بیشتری عبور کرده و هرچه چگالی یا ضخامت بیشتر باشد جذب توسط قطعه بیشتر شده و پرتو ضعیفتر خواهد شد. نوع سپر محافظ با توجه به فاصله و محل قرارگیری منبع پرتو تعیین می‌شود [۷]. روش‌های مرسوم جلوگیری از تشعشع پرتو به بیرون از اتاق روش سرب کوبی یا ساخت دیوار بتنی چگال (بتن سنگین) استفاده می‌شود [۱۱].

سرب کوبی و ایزولاسیون مراکز بعنوان محافظی در مقابل پرتوهای اشعه ایکس است که از عبور پرتوها جلوگیری می‌کند. اما استفاده از این روش معایبی نیز دارد. از آنجا که سرب استفاده شده برای طراحی اتاق‌های پرتوزا باید دارای خلوص ۹۹٪ باشد، اهمیت این موضوع بخوبی نمایان می‌شود که هر نوع سربی با هر درجه خلوصی مناسب ایزوله نمودن اتاق‌های پرتوزا نیست [۸]. در کشور ایران سرب‌های تولیدی از این درجه خلوص برخوردار نیستند و حتی ممکن است در عملیات ذوب سرب از ضایعات محصولات دیگر استفاده شود [۹]. از طرفی عوارض سرب بر بدن بسیار مخرب و در برخی موارد کشنده است. بروز انواع بیماری‌های کلیوی، قلبی و عصبی و انواع سرطان‌ها از عوارض جبران‌ناپذیر سرب بر روی بدن انسان می‌باشد. مطابق با آمار ارائه شده از سوی سازمان بهداشت جهانی، سرب جزء ۱۰ ماده سمی اول در دنیا است [۸]. بنابراین بدلیل مخاطرات سرب ضرورت دارد تا استفاده از این ماده سمی تا حد امکان کاهش یافته و یا با مواد کم خطری جایگزین گردد.

یکی دیگر از روش‌های استفاده از سپر محافظ، بتن سنگین است. غالباً از بتن سنگین با هدف محافظت در برابر تشعشعات استفاده می‌شود. این بتن‌ها بدلیل داشتن وزن مخصوص بالا و استفاده از افزودنی‌هایی که عمدتاً از جنس فلزات سنگین هستند جاذب امواج و پرتوهای زیان‌بار می‌باشند. در ابتدا بتن‌های سنگین در ساخت و ساز نیروگاه‌های هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گرفت اما امروزه در سازه‌های مختلف نظیر اتاق رادیولوژی، اتاق تصویربرداری پزشکی، سنگرهای نظامی، سدهای وزنی، دیوارهای موج شکن دریایی، نیوجرسی، وزنه تعادل تاورکرین و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰]. طبق تعریف استاندارد ACI، بتنی که دارای وزن مخصوص بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر وزن مخصوص بتن معمولی باشد، بتن سنگین تلقی می‌شود. مطابق با تعریف مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، بتنی که دارای وزن مخصوص بالای ۳۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب باشد بتن سنگین نامیده می‌شود [۱۱]. در ساخت بتن سنگین به جای شن و ماسه از انواع سنگین‌دانه‌های فلزی یا معدنی استفاده می‌شود. با افزایش چگالی بتن، ممکن است خصوصیات رفتاری یا مکانیکی بتن دچار تغییرات محسوسی گردد. 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 مراجع، حداقل وزن مخصوص مجاز مبنا قرار می‌گیرد [۱۰]. استفاده از طرح مخلوط به روش وزنی که اساس روش ACI برای مخلوط‌های بتنی با وزن معمولی را تشکیل می‌دهد، برای بتن سنگین مناسب نیست. زیرا با توجه به وزن مخصوص بالای سنگین‌دانه‌ها جهت ساخت بتن سنگین نمی‌توان آن را جایگزین وزنی سیمان یا سنگدانه بتن نمود. بنابراین می‌بایست افزودنی‌های چگال را جایگزین حجمی سیمان یا سنگدانه بتن نمود. همچنین روانی بتن تازه‌ای که با استفاده از سنگدانه‌های سنگین تهیه شده است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لازم به ذکر است که سنگدانه‌ها، در طرح مخلوط‌هایی که دارای قوام بیشتری هستند، تمایل به جدا شدن دارند و در مخلوط بتن ته‌نشین می‌شوند. به جهت جبران این عارضه، در اکثر مواقع نیاز است تا حداقل اسلامپ مورد نظر واقع گردد و یا از سایر مواد افزودنی استفاده شود [۱۱]. رایج‌ترین سنگدانه‌هایی که برای ساخت بتن سنگین به کار می‌رود شامل باریت، لیمونیت، هماتیت، فروسفر، ایلمنیت، مگنتیت و ساچمه‌های فولادی هستند [۱۲-۱۵]. این سنگدانه‌ها دارای استانداردهای متفاوتی هستند و ویژگی‌های متمایزی را برای بتن سنگین به وجود می‌آورند. برای ساخت دیوار محافظ در اتاق‌های پرتوزا می‌توان با افزایش وزن مخصوص بتن، ضخامت دیوارها یا کف را کاهش داد که این مهم باعث می‌شود تا فضای ساخت بیشتری در دسترس قرار گیرد [۱۳]. بنابراین هنگامی که فضای قابل استفاده محدود باشد یا در مواردی که شدت و انرژی پرتوها افزایش می‌یابد، ضخامت المان بتنی می‌تواند با استفاده از بتن سنگین کاهش یابد.

⁴ Shield

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 با ایلمنیت صورت گرفته، ثابت شده که استفاده از ایلمنیت مقاومت فشاری، خمشی و میزان جذب آب بتن را افزایش می‌دهد [۱۱، ۱۰]. بازاریا و همکاران در سال ۱۴۰۰ به بررسی رفتار و دوام یخ‌زدگی بتن سنگین دارای پودر ایلمنیت و ژل نانو سیلیس پرداختند. مبنای طرح مخلوط بتن در این تحقیق استاندارد ACI-211 به روش حجمی تعیین شد که با جایگزین نمودن پودر ایلمنیت به جای بخشی از ماسه و جهت افزایش کیفیت و دوام بتن سنگین از ژل نانو سیلیس استفاده گردید. در ادامه جهت بررسی خصوصیات رفتاری بتن سنگین، آزمایش‌ها مقاومت فشاری، مقاومت کششی و دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد مطابق با استاندارد ASTM-C666 انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۲۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه، پس از ۳۰۰ چرخه انجماد باعث آفت وزنی و مقاومتی به ترتیب به میزان ۳/۴٪ و ۵/۱٪ خواهد شد که در مقایسه با سایر طرح مخلوط‌ها نیز دارای بیشترین دوام خواهد بود [۱۰].

لهراسبی و همکاران در سال ۱۴۰۰ به بررسی تاثیر نفوذیون کلراید به روش RCMT در بتن سنگین دارای پودر ایلمنیت پرداختند. در این تحقیق نمونه‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ACI-211 به روش حجمی و بهینه‌یابی آزمایشگاهی بر اساس نوع و خصوصیات مصالح مورد استفاده تهیه شد. 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 به جای ماسه در بتن نیز ضریب نفوذیون کلراید را به ترتیب به میزان ۲۷٪ و ۲۲٪ کاهش می‌یابد [۱۱]. سهرابی و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی متغیرهای ضریب تضعیف خطی و مقاومت فشاری بتن سنگین با سنگدانه‌ی باریتی حاوی پودر بیسموت و پودر میکروسیلیس در برابر اشعه گاما پرداختند. در این تحقیق هدف بررسی ضریب تضعیف خطی و مقاومت فشاری بتن گزارش شد. بنابراین بتن سنگین با ترکیبات سنگدانه معمولی، سنگدانه باریت، پودر فلز بیسموت، پودر میکروسیلیس و فوق روان کننده تهیه شد. نتایج نشان داد که میزان ضریب تضعیف خطی نمونه‌ها در برابر اشعه گامای چشمه‌ی سزیم ۱۳۷، رابطه‌ی مستقیم با درصد ترکیبات استفاده شده در ساخت نمونه‌ها دارد. اما در مورد متغیر مقاومت فشاری بتن اینگونه نیست [۱۲]. برنجیان و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی و تضعیف‌کنندگی بتن سنگین مورد استفاده در حفاظ 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 نسبت آب به سیمان مختلف استفاده شد. همچنین میزان شار عبوری و ضریب تضعیف بتن سنگین در برابر چشمه‌های کبالت ۶۰ و سزیم ۱۳۷ از قانون بیرلمبرت آزمایش و محاسبه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نسبت آب به سیمان، چگالی و خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته) کاهش می‌یابد. همچنین میزان ضریب تضعیف خطی پرتو گاما در هر سه انرژی ۱۳۳۲، ۱۱۷۳ و ۶۶۲ کیلو الکترون ولت، کاهش یافت. در نتایج این تحقیق گزارش شد که در ساخت حفاظ بتنی در برابر پرتو گاما اگر با محدودیت فضایی مواجه باشیم باید نسبت w/c را به حداقل رساند [۱۳]. اسن و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی و ساخت بتن سنگین با نسبت‌های مختلف حجمی لیمونیت پرداختند. در این تحقیق نسبت‌های مختلف حجمی ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ لیمونیت جایگزین شن و ماسه در بتن شد. در نتایج این تحقیق گزارش شد با افزایش لیمونیت در بتن مقاومت فشاری، کششی، خمشی و وزن مخصوص بتن افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش لیمونیت در بتن میزان عبور اشعه ایکس و گاما بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۴]. خلف و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی خواص مکانیکی بتن سنگین با سه افزودنی معدنی همتایت، ایلمنیت، دولومیت در نسبت‌های مختلف حجمی پرداختند. همچنین جهت بهبود عملکرد بتن نیز ۱۰٪ فوم سیلیکا به جای بخشی از سیمان استفاده شد. آزمایش‌های این تحقیق شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و سایر مشخصات مکانیکی بتن بود. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ایلمنیت در بتن تاثیر بهتری در مشخصات مکانیکی در مقایسه با سایر مواد معدنی دیگر خواهد داشت. همچنین در نتایج این تحقیق گزارش شد که افزودن ۲۰٪ سنگدانه ایلمنیت جایگزین ماسه در بتن می‌تواند تا ۳۶٪ مقاومت فشاری و ۱۴٪ مقاومت کششی را افزایش دهد [۱۶]. عبدالگوادم و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی میزان تضعیف تشعشعات هسته‌ای در برابر بتن سنگین به عنوان مواد محافظ راکتور اتمی پرداختند. در این تحقیق، بتن سنگین با استفاده از سنگین‌دانه‌های درشت و ریز باریت، گوتیت و تورمالین با نسبت‌های وزنی ۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ به منظور بررسی خواص تضعیف تشعشعات هسته‌ای ساخته شد. در ادامه آزمایش‌ها کارایی (اسلامپ)، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب، دوام در برابر حرارت و میرایی تشعشع

هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن سنگ معدن تورمالین به طور قابل توجهی خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد. همچنین این سنگدانه توانایی زیادی در تضعیف نوترون‌های انرژی گاما دارد. در نهایت مخلوط بتن حاوی ۵۰٪ وزنی تورمالین به عنوان یک بتن مقاوم در برابر حرارت (تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد) برای استفاده در راکتورهای هسته‌ای توصیه گردید [۵۰]. فرخ زادر و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی اثر سنگدانه فروفسفر بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سنگین پرداختند. همچنین جهت افزایش بیشتر وزن مخصوص بتن سنگین و بهبود کیفیت آن از پودر فولاد و نانو سیلیس استفاده شد. در این تحقیق مجموعاً ۶۰ نمونه مکعبی بتن ساخته شد و در سن ۲۸ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری و تضعیف انرژی در برابر پرتو گاما قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری با افزودن ۱۰۰٪ فروفسفر، ۲۰٪ پودر فولاد و ۵٪ نانو سیلیس با مقاومت ۵۲ مگاپاسکال حاصل می‌شود. همچنین بیشترین میزان تضعیف انرژی پرتو گاما با افزودن ۱۰۰٪ فروفسفر، ۳۰٪ پودر فولاد و ۵٪ نانو سیلیس بدست می‌آید [۵۱].

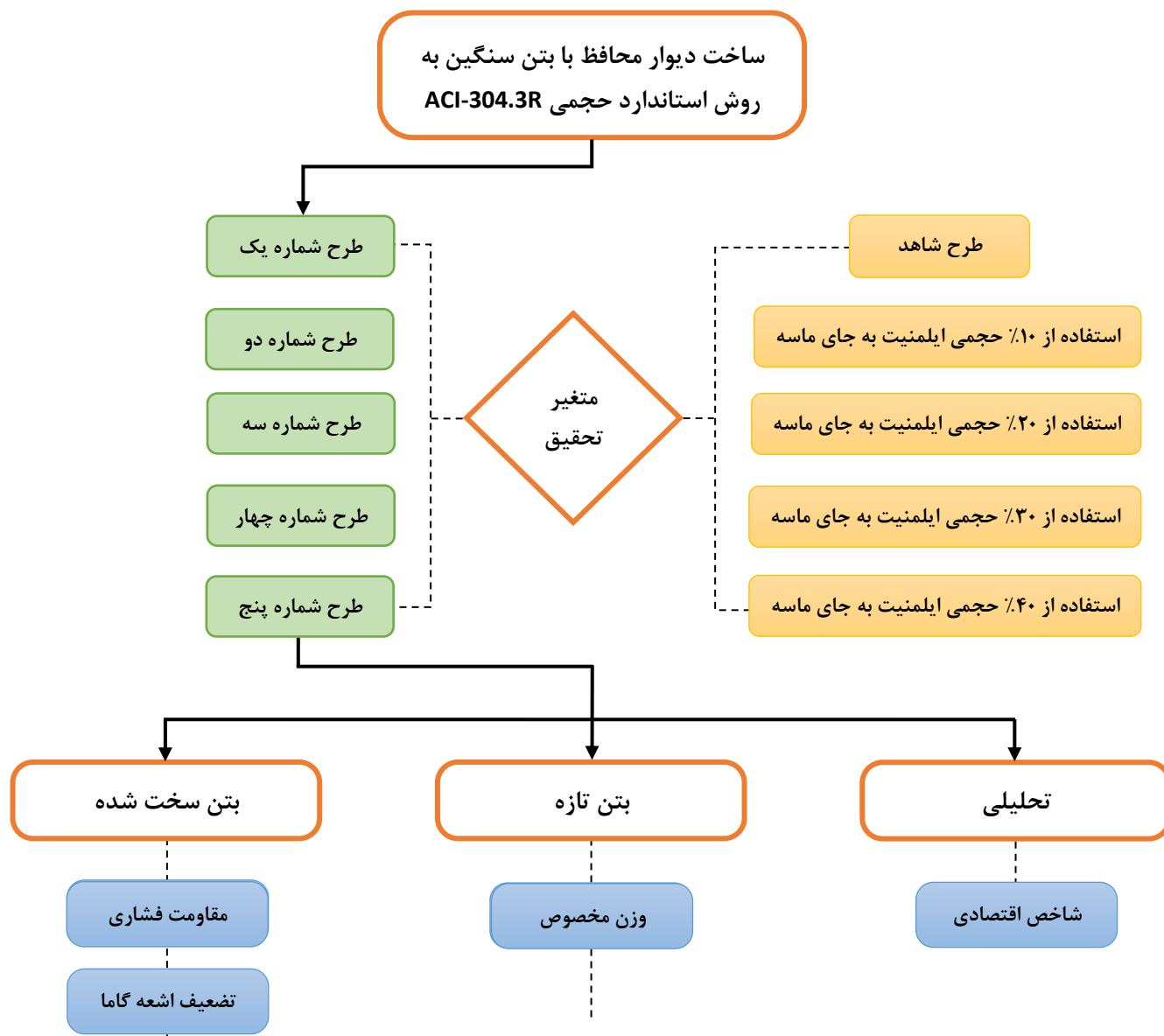
پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که افزودن ایلمنیت باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن سنگین می‌گردد [۱۰-۱۲]. بنابراین با توجه به افزایش تراکم و چگالی بتن سنگین انتظار می‌رود تا ایلمنیت مورد استفاده تشعشعات ساطع شده را به خود جذب نماید.

برخی از ضوابط ساخت بتن سنگین به استناد از استاندارد بتن آمریکا (ACI) و مبحث نهم مقررات ملی به شرح زیر می‌باشد [۵۰، ۱۰]:

۱. نسبت آب به مواد سیمانی حداقل ۰/۳۷ و حداکثر ۰/۶ باشد.
۲. میزان روانی یا اسلامپ بتن باید بین ۵۰ تا ۹۵ میلیمتر باشد.
۳. در ساخت بتن سنگین باید نسبت ماسه به شن را افزایش داد و یا از ماسه با مدول نرمی بالا استفاده شود.
۴. در صورت استفاده از روان کننده، حداکثر میزان مجاز آن ۳٪ وزنی سیمان می‌باشد.
۵. 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.
۶. استفاده از خاکستر بادی با توجه به استاندارد ASTM-C618 مجاز است.
۷. استفاده از پوزولان طبیعی، ژل میکروسیلیس و نانو سیلیس مطابق با استاندارد ASTM-C1240 مجاز است.
۸. برای ساخت بتن سنگین حداقل عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد.
۹. انتخاب نوع سنگین دانه و تعیین مقدار سیمان و آب در طرح مخلوط باید بر اساس خواص مورد نظر بتن تازه و سخت شده بر مبنای شرایط خاص سازه انجام گیرد.
۱۰. برای دیوارهای چگال، مقاومت فشاری بیشتر از ۱۵ مگاپاسکال ضرورت ندارد و برای بتن‌های سازه‌ای، مقاومت فشاری بین ۲۰ تا ۳۵ مگاپاسکال کفایت می‌کند.

امروزه کلیه بیمارستان‌ها مجهز به آزمایشگاه و یا بخش‌های پرتودرمانی می‌باشند و بیمار ناچار است تا از مزایای روش‌های نوین پرتو درمانی بهره بگیرد. همچنین ساخت نیروگاه‌ها و مراکز اتمی و هسته‌ای جز زمینه‌های پیشرفت کشور تلقی می‌شود و داشتن تکنولوژی و دانش فنی در توسعه زیرساخت‌های کشور اهمیت بسزایی دارد. از طرفی افراد مشغول بکار در این مراکز عمدتاً پزشکان، پرستاران و مهندسين فیزیک اتمی و هسته‌ای می‌باشند که به نوعی سرمایه‌های انسانی و ملی محسوب می‌شوند و ضرورت دارد تا با ایجاد سازوکار و تمهیداتی میزان خطرات ناشی از تشعشعات مضر نظیر اشعه گاما و ایکس را به حداقل رساند. لذا با توجه به اینکه کشور ایران غنی از معادن ایلمنیت و تیتانیوم می‌باشد ضرورت دارد تا جهت ارزان‌سازی و استفاده از مصالح بومی جهت ارزآوری و اشتغال‌زایی و توسعه معادن بومی بررسی گردد که ترکیب ایلمنیت در بتن تا چه میزان می‌تواند میزان تشعشعات یونیزان را تضعیف نماید. هدف از انجام این تحقیق نیز ساخت بتن سنگین و بهینه سازی طرح مخلوط مورد نیاز با افزودن پودر ایلمنیت می‌باشد. نوآوری موجود در این تحقیق شامل استفاده از ماده ارزان قیمت کنسانتره معدنی ایلمنیت به عنوان عنصر سنگین وزنی که باعث افزایش وزن مخصوص بتن می‌گردد و بررسی نقش این ماده در افزایش چگالی بتن می‌باشد. شیوه تحقیق مبتنی بر روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. بطوریکه از پودر ایلمنیت در نسبت‌های مختلف

حجمی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ بجای ماسه استفاده خواهد شد و آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص، مقاومت فشاری و بررسی میزان تضعیف تششعات یونیزان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ساختار مراحل انجام تحقیق و آزمایش‌ها به شرح شکل شماره ۲ می‌باشد.



شکل ۲ فلوجارت مراحل انجام آزمایش و ساختار تحقیق

۲- مواد و مصالح

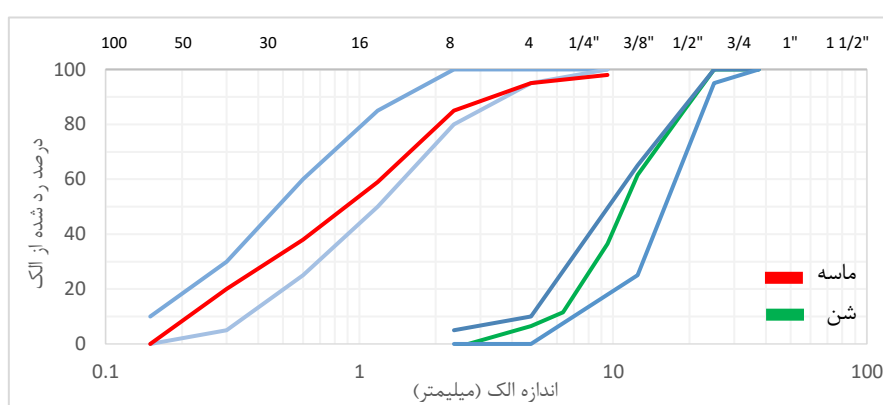
۲-۱- سنگدانه

سنگدانه مورد استفاده جهت ساخت بتن سنگین در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر می‌باشد که از معادن منطقه دوکوهک استان فارس تهیه گردیده. همچنین ماسه از نوع ۰۶ شسته بکار رفته. مشخصات فیزیکی این سنگدانه مطابق با شرح جدول شماره ۱ می‌باشد. مدول نرمی ماسه طبق استاندارد ASTM-C136 نیز ۲/۹ بدست آمد.

جدول ۱ مشخصات شن و ماسه مصرفی

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه mm	مدول نرمی	وزن مخصوص خشک kg/m ³	جذب آب %
ماسه	۴/۷۵	۲/۹	۱۶۵۰	۱/۵۷
شن	۱۹	-	۱۳۵۰	۲/۳

دانه بندی سنگدانه و طبقه بندی الک های شماره بندی شده، مطابق با استاندارد ASTM-C136 می باشد. همچنین میزان وزن و اندازه سنگدانه ها با الگوی پیشنهادی استاندارد ASTM-C33 مقایسه و تطبیق داده شد. در شکل شماره ۳ منحنی قرمز رنگ الگوی دانه بندی ماسه، منحنی سبز رنگ الگوی دانه بندی شن و منحنی آبی رنگ محدوده حداقل و حداکثر میزان مجاز دانه بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM-C33 مشخص شده.



شکل ۳ منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی

۲-۲- سیمان

سیمان مصرفی در مخلوط های آزمایشی از نوع سیمان تپ دو سپاهان می باشد. آنالیز شیمیایی این سیمان که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده آن می باشد، به شرح جدول شماره ۲ است. این سیمان مطابق با مشخصات مطروحه در استاندارد ملی ایران به شماره ISIRI-389 تولید شده و دارای حداکثر C₃A به میزان ۸٪ می باشد [۴۹].

جدول ۲ خصوصیات شیمیایی سیمان تپ دو سپاهان [۴۹]

C ₃ A	I.R	L.O.I	OS ₃	MgO	FE ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	SiO ₄
۸٪	۰/۷۵٪	۳٪	۳٪	۵٪	۶٪	۶٪	۲۰٪

جدول ۳ خصوصیات فیزیکی سیمان تپ دو سپاهان [۴۹]

وزن مخصوص	مقاومت فشاری kg/cm ²	زمان گیرش دقیقه	انقباض اولیه (اتوکلاو)	سطح مخصوص (بلین)
gr/cm ³	روزه ۲۸	روزه ۷	روزه ۳	اولیه
۳/۱	۴۲۰	۳۰۴	۱۸۵	۱۸۵
			۱۵۰	۰/۰۷٪
				۲۸۵۰ cm ² /gr

۲-۳- ایلمنیت

ایلمنیت، اولین بار در کشور روسیه در منطقه کوهستانی ایلمنیت^۵ کشف شد که نام آن برگرفته از همین منطقه می‌باشد. ایلمنیت یا اکسید تیتانیوم^۶ از معدن تیتانیوم استخراج می‌شود. در واقع ایلمنیت همان تیتانیوم ناخالص یا نامرغوب (اکسید شده) می‌باشد که از آن بعنوان زباله تیتانیوم یاد می‌شود. عمده ساختار شیمیایی تشکیل دهنده ایلمنیت، اکسید سوم تیتانیوم و آهن می‌باشد و سایر عناصر دیگر سهم کمتری دارند. 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 آن به پودر در اندازه‌های متفاوت با مشخصات و خلوص گوناگون، در صنایع مختلف به کار برده می‌شود. ایلمنیت دارای سختی و چگالی بالایی است و اغلب در صنایع برای افزایش دوام سایشی یا افزایش وزن مخصوص مورد استفاده قرار می‌گیرد. سختی موهس^۷ ایلمنیت معمولاً بین ۵ تا ۵/۵ و وزن مخصوص آن بسته به نوع خلوص آن بین ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب می‌باشد. متداول‌ترین موارد مصرف ایلمنیت، استفاده در لنت ترمز اتومبیل، صفحه سنگ فرز، سیمان چاه نفت می‌باشد. ایلمنیت به رنگ‌های سیاه یا قهوه‌ای تیره در محدوده کشورهای روسیه، مصر، اوکراین و ایران یافت می‌شود. مهم‌ترین معادن ایلمنیت و تیتانیوم در ایران در منطقه قره‌آغاج 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 شهرستان کهنوج کرمان بزرگترین معدن خاورمیانه و یکی از مرغوب‌ترین و بزرگترین معادن ایلمنیت دنیا می‌باشد. معدن ایلمنیت و تیتانیوم کهنوج سالانه ۱۳۰ هزار تن کنسانتره و ۷۰ هزار تن سرباره تولید می‌کند. ذخیره قطعی معدن تیتانیوم کهنوج ۱۵۰ میلیون تن و ذخیره احتمالی آن ۴۰۰ میلیون تن برآورد شده است [۴۸، ۳۵، ۳۲، ۱۱، ۱۰].

ایلمنیت مصرفی در این تحقیق از نوع معدنی با حداکثر اندازه ۰/۵ میلیمتر می‌باشد. این سنگین‌دانه مستخرج از معادن ایلمنیت منطقه کهنوج استان کرمان و فرآوری شده در کارخانه صنعتی دلجان می‌باشد. سایر مشخصات شیمیایی و فیزیکی ایلمنیت مصرفی به شرح جدول شماره ۴ و ۵ می‌باشد [۴۸]. شکل شماره ۴ پودر ایلمنیت خالص و فرآوری شده مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ مشخصات فیزیکی ایلمنیت مصرفی [۴۸]

نماد شیمیایی	حداکثر اندازه اسمی	سختی	وزن مخصوص	جذب آب
	mm	موهس	kg/m ³	%
FeTiO ₃	۱	۵/۵-۵	۴۲۴۰	۲/۲

^۵ Ilmenite^۶ Titanium dioxide

^۷ میزان مقاومت یک ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک در سطح آن سختی گویند و سختی موهس یک روش برای اندازه‌گیری سختی مواد معدنی می‌باشد. پ.ن: میزان سختی موهس پودر آهن ۴ و سختی تیتانیوم ۹ می‌باشد [۲۳].

جدول ۵ ساختار شیمیایی ایلمنیت مصرفی [۴۸]

مقدار %	ساختار شیمیایی	نام عنصر
۴۸/۱	TiO ₂	اکسید تیتانیوم
۳۱/۲	Fe ₂ O ₃	اکسید سوم آهن
۰/۱۲	CaO	آهک
۱۱/۹	FeO	اکسید آهن
۲/۴	SiO ₂	سیلیس
۱/۵۲	Al ₂ O ₃	اکسید آلومینیوم
۲/۲۳	BaSO ₄	اکسید باریم
۱/۷۲	BaO	سولفات باریم



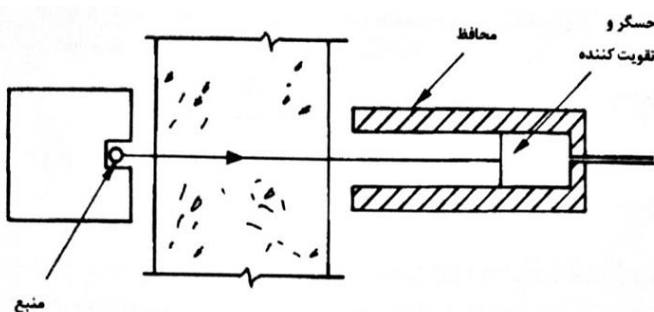
شکل ۴ پودر ایلمنیت مصرفی جهت ساخت بتن سنگین

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن سنگین با ایلمنیت مجموعاً متشکل از ۵۵ نمونه می‌باشد که جهت بررسی برخی خصوصیات رفتاری آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص بتن تازه، مقاومت فشاری و پرتونگاری با اشعه ایکس و گاما بر روی این نوع بتن انجام شده است. برای تعیین میزان مقاومت فشاری از هر رده سنی، سه نمونه شکسته شد و میانگین مقاومت فشاری آن بعنوان مقاومت نهایی در نظر گرفته شد. نام آزمایش‌ها صورت گرفته به استاندارد روش آزمایش، تعداد نمونه و اندازه قالب نمونه‌ها به شرح جدول شماره ۶ می‌باشد. ساخت، قالب‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها با همکاری آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد واحد شیراز و آزمایش اندازه‌گیری میزان تضعیف پرتوهای یونیزان با همکاری مرکز تابش دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز انجام پذیرفت.

جدول ۶ نوع آزمایش، تعداد نمونه و شماره استاندارد آزمایش‌ها

ردیف	شرح آزمایش	نوع نمونه	ابعاد نمونه (میلیمتر)	تعداد نمونه	سن نمونه (روز)	شماره استاندارد
۱	اسلامپ	-	-	-	بتن تازه	ASTM C143
۲	وزن مخصوص	-	-	-	بتن تازه	ASTM C138
۳	مقاومت فشاری	مکعبی	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۴۵	۷-۲۸-۹۰	BS EN 12390
۴	پرتونگاری با اشعه ایکس	مکعبی	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۵	۹۰	
۵	پرتونگاری با اشعه گاما	مکعبی	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۵	۹۰	



۴- طرح مخلوط

مطابق با بند ۱-۱-۶-۹-۶-۶ 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 نرمی بالاتر استفاده شود و یا نسبت ماسه به شن افزایش یابد [۵۰]. مبنای طرح مخلوط در این تحقیق استاندارد ACI-304.3R به روش حجمی می‌باشد که با توجه به نوع مصالح مصرفی به روش سعی و خطا و نیز به استناد از نتایج سایر تحقیقات صورت گرفته در آزمایشگاه بهینه‌یابی شده و بهترین آن از منظر کسب مقاومت فشاری ۷ روزه بعنوان طرح مخلوط نمونه شاهد انتخاب گردید. متغیر طرح مخلوط ایلمنیت می‌باشد که برای افزایش وزن مخصوص بتن از نسبت‌های مختلف حجمی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ بجای ماسه (ریزدانه) استفاده و جایگزین شد. همچنین حداکثر اندازه اسمی درشت دانه (شن) ۱۹ میلی‌متر و عیار سیمان ۵۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴ در نظر گرفته شد. در جدول شماره ۷ مقادیر مصالح مصرفی برای تهیه یک متر مکعب بتن به ازای طرح مخلوط‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۷ طرح مخلوط مورد استفاده جهت آزمایش

شماره	نام انحصاری	سیمان kg/m ³	شن kg/m ³	ماسه kg/m ³	ایلمنیت kg/m ³	آب lit/m ³
۱	CONTROL	۵۰۰	۸۲۰	۱۲۲۰	۰	۲۰۰
۲	HC-IL-10%	۵۰۰	۸۲۰	۱۰۸۸	۴۴۳	۲۰۰
۳	HC-IL-20%	۵۰۰	۸۲۰	۹۵۶	۸۸۶	۲۰۰
۴	HC-IL-30%	۵۰۰	۸۲۰	۸۲۴	۱۳۳۰	۲۰۰
۵	HC-IL-40%	۵۰۰	۸۲۰	۶۹۲	۱۷۷۲	۲۰۰

در این آزمایش برای ساخت بتن سنگین، کلیه سنگدانه‌ها پس از آبکش کردن و رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک (حالت SSD) به همراه ماسه طبیعی به داخل میکسر ریخته شده و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. در ادامه سیمان و ایلمنیت و نیمی از آب اضافه و به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. در انتها باقیمانده آب اضافه و به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شدند. در پایان، آزمایش اسلپ و وزن مخصوص بتن تازه برای تمامی نمونه‌ها انجام شد. قابل ذکر است که سرعت دوران میکسر بتن ۱۵ دور در دقیقه بوده است.

۵- روش آزمایش پرتونگاری

روش‌های آزمایش عبور پرتو از بتن در طول سال‌های اخیر پیشرفت‌های مداومی داشته است. در حال حاضر سه روش اساسی برای آزمودن بتن وجود دارد که شامل پرتونگاری اشعه ایکس، پرتونگاری اشعه گاما و رادیومتری امواج الکترومغناطیسی می‌باشد [۱۵]. اشعه‌های ایکس و گاما هر دو دارای انرژی بالاتری در مقایسه با طیف الکترومغناطیس می‌باشند و در ماده رسوخ می‌کنند، اما با توجه به طبیعت و ضخامت ماده ممکن است دچار کاهش و تنزل شوند. میزان انرژی اشعه ایکس معمولاً بین ۳۰ تا ۱۲۵ کیلو الکترون ولت^۸ و برای اشعه گاما

^۸ KeV

بین ۳/۰ تا ۳/۱ میلیون الکترون ولت^۹ می باشد [۱۶]. پرتونگاری، اشعه ایکس و گاما توسط رادیوایزوتوپ^{۱۰} مناسب به سمت بتن هدایت می شود. در این مورد شدت تابش وارده توسط شمارشگر گایگر^{۱۱} اندازه گیری می شود. این رویکرد اصولاً برای اندازه گیری چگالش درونی بتن استفاده می شود. هنگامی که تابش با انرژی بالا به سمت بتن هدایت می شود مقداری از آن جذب بتن شده، مقداری به طور کامل از بتن می گذرد و مقدار قابل ملاحظه ای در تلاقی با الکترون های درون بتن پراکنده می شوند. این پراکندگی ها روش های پراکنش برگشتی را ایجاد می کنند که ممکن است برای امتحان خواص مواد نزدیک به سطح و به عنوان جایگزینی برای اندازه گیری های مستقیم انرژی کاملاً رد شونده از عضو عمل کند. در تمامی آزمایش ها دستگاه اصلی شامل یک منبع رادیواکتیو جاسازی شده، همراه با ردیاب تشکیل می شود. ردیاب معمولاً شامل یک شمارشگر جاساز شده در پوششی است که راهی برای ورود امواج متفرقه جز امواج ساطع شده از منبع اصلی را نخواهد داشت [۱۲]. شکل شماره ۵ شماتیک نحوه قرارگیری منبع پرتو، نمونه بتن، شمارشگر و محفظه اطراف آن را نشان می دهد.

۵-۱- پرتونگاری با اشعه گاما

پرتونگاری با اشعه گاما بوسیله آشکارساز گازی تلکتور (دزیمتر) انجام شد. این آزمایش با استفاده از دزیمتر محیطی مدل 6112B ساخت تلکتور آلمان با محدوده اندازه گیری انرژی ۸۰ کیلو الکترون ولت تا ۲ میلیون الکترون ولت و محدوده اندازه گیری آهنگ پرتو ۰/۲ تا ۵۰۰۰۰ میلی ریم بر ساعت^{۱۲} انجام گردید. در این روش سزیم ۱۳۷ و دکتور گازی با قطر کولیماتور ۲ سانتیمتر استفاده شده است.



شکل ۶ اندازه گیری بوسیله آشکارساز گازی تلکتور (دزیمتر)

۵-۲- پرتونگاری با اشعه ایکس

پرتونگاری با اشعه ایکس بوسیله آشکارساز یدور سدیم NaI و شمارشگر مدل MC-123 انجام شد. این آزمایش با حداکثر میزان انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت، آشکارساز NaI مدل NT با حداقل میزان انرژی ۶۰ کیلو الکترون ولت و شمارنده MC با قابلیت اندازه گیری بر حسب شمارش نمونه در زمان CPS به مدت ۳۰۰ ثانیه انجام پذیرفت. در این روش کالیماتور با روزه ۳ میلیمتر جلوی دهانه چشمه قرار داده شد.

⁹ MeV

¹⁰ Radioisotope

¹¹ Geiger Counter

¹² mR/h



شکل ۷ اندازه‌گیری بوسیله آشکارساز یدور سدیم NaI و شمارشگر MC

در هر دو روش آزمایش، ضریب خطی از رابطه شماره ۱ بدست می‌آید. برای این منظور باید بیم فرودی از چشمه و بیم اندازه‌گیری شده با دکتور کولیمه شده باریک شده باشد و نمونه به حد کافی باریک باشد تا حاصلضرب μx کمتر از یک باشد. همچنین تخمین ضریب μ با خطا همراه است و نیاز به تصحیح ضریب افزایشی بیلداپ دارد.

(۱)

μ = ضریب تضعیف خطی

I_0 = شمارش اولیه بدون قرارداد بتن

I_e = شمارش ثانویه بعد از قرارداد بتن

X = ضخامت بتن (سانتیمتر)

۶- یافته‌ها

۶-۱- اسلامپ

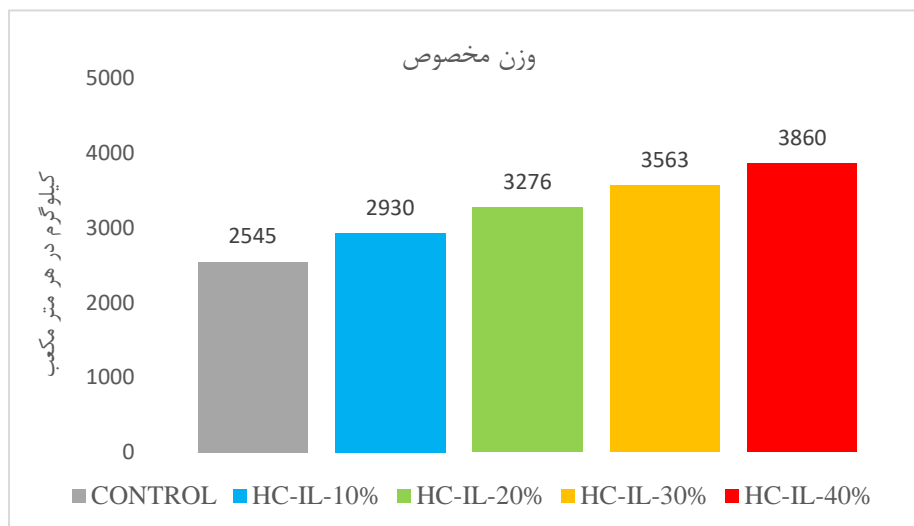
میزان روانی بتن، پارامتری برای بررسی جریان‌پذیری بتن تازه پیش از استفاده در محل مورد نیاز می‌باشد. به استناد از ضوابط تهیه و ساخت بتن سنگین نیز میزان کارایی لازم باید بین ۵۰ تا ۹۵ میلیمتر باشد [۱۰]. مطابق آنچه از نتایج آزمایش اسلامپ بدست آمد، مشخص گردید که ایلمنیت بدلیل جذب آب بالاتری که در مقایسه با ماسه دارد، باعث جذب آب بتن تازه و کاهش میزان روانی بتن خواهد شد. اما با تامل بر روی نتایج طرح دارای ۴۰ درصد ایلمنیت مشاهده گردید که میزان اسلامپ افزایش و بعضاً ریزشی خواهد شد. این مهم در اثر مدول نرمی بالا، وزن مخصوص زیاد و سطح مخصوص کروی شکل ایلمنیت می‌باشد که باعث لغزش ذرات روی یکدیگر شده و میزان اسلامپ را افزایش می‌دهد. بطوریکه میزان اسلامپ طرح مخلوط دارای ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ ایلمنیت نسبت به طرح شاهد به ترتیب به میزان

۱۵/۴٪، ۲۳/۱٪، ۲۶/۹٪ و ۱۷/۹٪ کاهش یافته است. شکل شماره ۸ میزان روانی نمونه‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر را نشان می‌دهد.

۶-۲- وزن مخصوص

یکی از اساسی‌ترین معیارهای مورد نظر در توجیه ساخت بتن سنگین، افزایش وزن مخصوص آن می‌باشد. میزان وزن مخصوص هر طرح مخلوط به شرح شکل شماره ۹ می‌باشد. قابل ذکر است که طرح مخلوط HC-II-10% با وجود جایگزینی ۱۰٪ حجمی ایلمنیت به

جای ماسه، با وزن مخصوص ۲۹۳۰ کیلوگرم در هر متر مکعب در زمره بتن‌های سنگین قرار نمی‌گیرد. اما با افزودن مقادیر بیش از ۲۰٪ حجمی ایلمنیت بجای ماسه وزن مخصوص بتن به بیش از ۳۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب رسیده و با ضوابط آئین نامه ای مطابقت پیدا خواهد نمود. بطوریکه میزان وزن مخصوص طرح دارای ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ ایلمنیت نسبت به طرح شاهد به ترتیب به میزان ۱۳/۱٪، ۲۲/۳٪، ۲۸/۶٪ و ۳۴/۱٪ افزایش داشته است.

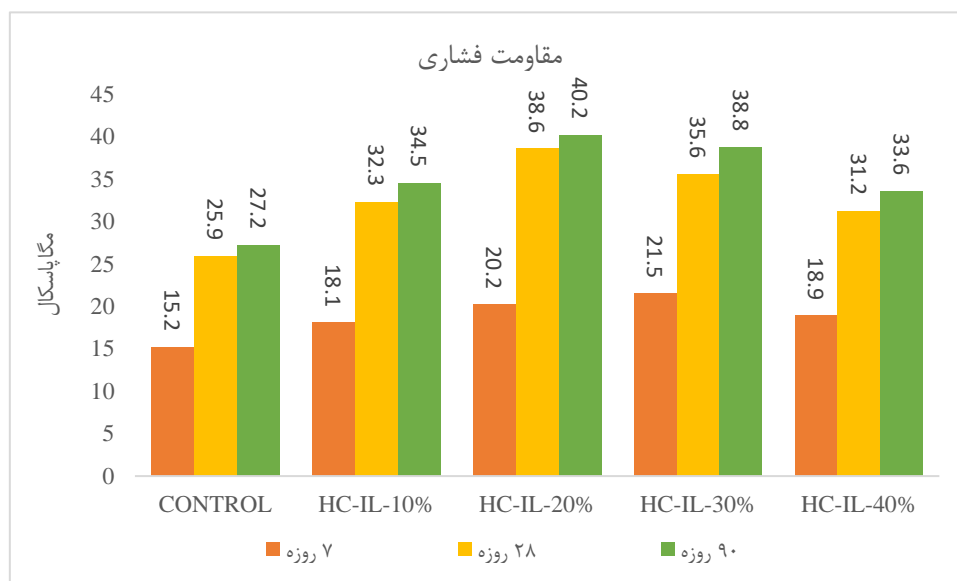


شکل ۸ مقایسه وزن مخصوص بتن در تمامی طرح مخلوطها

۳-۶ - مقاومت فشاری

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که استفاده از سنگین دانه ایلمنیت در بتن علاوه بر افزایش وزن مخصوص نیز باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. این افزایش مقاومت متأثر از سه عامل ریز دانه بودن، سختی و مقاومت بالای ایلمنیت ایجاد خواهد شد. پودر ایلمنیت مصرفی در این تحقیق باعث افزایش تراکم و کاهش تخلخل بتن گردیده که انسجام و مقاومت بالاتری را ایجاد خواهد کرد. دومین عامل مهم در افزایش میزان مقاومت فشاری بتن دارای ایلمنیت نیز سختی و مقاومت بالای این ماده است. بنابراین با جایگزین نمودن ایلمنیت بجای بخشی از ماسه مقاومت فشاری بتن افزایش قابل توجهی می‌یابد. سومین عامل تاثیر گذار در رشد مقاومت فشاری بتن استفاده بهینه از ایلمنیت در بتن است. مطابق شکل شماره ۱۰ که مقایسه بین نتایج مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف با توجه به حجم جایگزینی ایلمنیت را نشان می‌دهد، مشخص گردید که استفاده از حداکثر میزان ۲۰٪ حجمی ایلمنیت بجای ماسه مقاومت بتن را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. اما با افزایش مقادیر بیشتر از آن بدلیل برهم خوردن نظم دانه بندی بتن ناشی از حذف ماسه، انسجام بین ذرات و دانه بندی پیوسته از بین رفته و مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. افزودن مقادیر حجمی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ ایلمنیت نسبت به طرح شاهد در سن ۷ روز به ترتیب به میزان ۱۹/۱٪، ۳۲/۹٪، ۴۱/۴٪، ۲۴/۳٪ و در سن ۲۸ روز به ترتیب ۲۴/۷٪، ۴۹/۰٪، ۳۷/۵٪، ۲۰/۵٪ و در سن ۹۰ روز به ترتیب ۲۶/۸٪، ۴۷/۸٪، ۴۲/۶٪ و ۲۳/۵٪ مقاومت فشاری را افزایش خواهد داد.

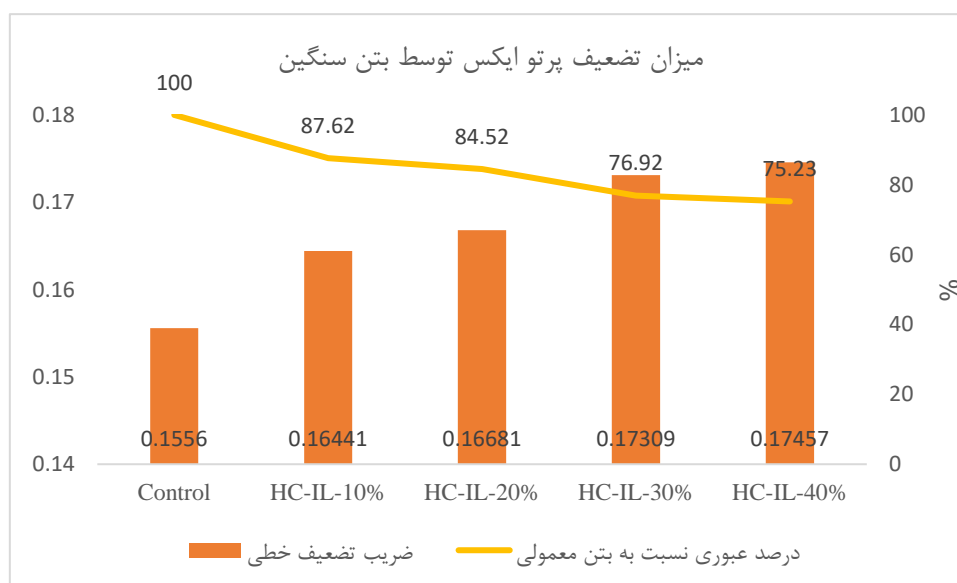
از طرفی با توجه به کسب مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف و آهنگ گیرش سیمان در بتن مشخص گردید که سنگین دانه ایلمنیت در بتن تاثیری در روند گیرش سیمان نداشته و اخلاقی در روند هیدراتاسیون آن ایجاد نخواهد کرد. بطوریکه آهنگ گیرش سیمان در طرح شاهد و در تمامی طرح‌های دارای سنگین دانه ایلمنیت رفتار یکسانی خواهند داشت. گفتنی است که این مهم بر خلاف انتظار و شواهد موجود از یافته‌های مشابه می‌باشد. زیرا در سایر منابع گزارش شده که افزودن ایلمنیت در اختلاط اجزای بتن سبب افزایش روند کسب مقاومت بتن تا سن ۹۰ روز می‌گردد یا اصطلاحاً بتن دیرگیر می‌شود [۳۵، ۳۴، ۳۳].



شکل ۹ مقایسه مقاومت فشاری بتن در تمامی طرح مخلوطها

۴-۶- میزان تضعیف اشعه

نتایج بدست آمده از آزمایش تضعیف اشعه ایکس توسط بتن سنگین مطابق با جدول شماره ۱۰ می باشد. طبق این نتایج، میزان پرتو عبوری با افزودن حداقل ۱۰٪ ایلمنیت در بتن ۱۲/۳۸٪ و با افزودن حداکثر ۴۰٪ ایلمنیت در بتن، ۲۴/۷۷٪ کاهش می یابد.

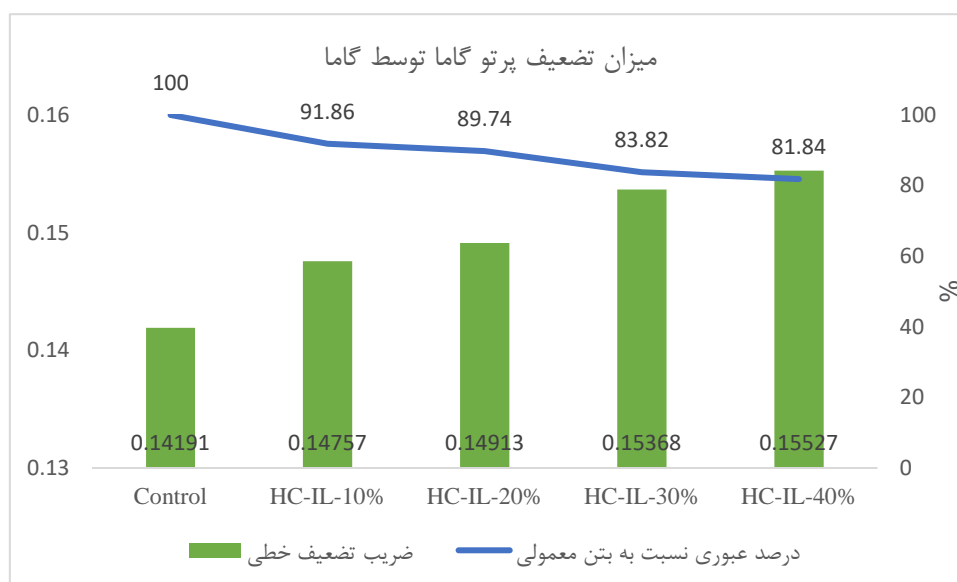


شکل ۱۰ مقایسه میزان تضعیف پرتو ایکس عبوری در بتن تمامی طرح مخلوطها

جدول ۸ مقایسه میزان تضعیف پرتو ایکس عبوری در بتن تمامی طرح مخلوطها

ردیف	نام طرح مخلوط	شمارش	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	ضریب تضعیف خطی	درصد کاهش نسبت به بتن معمولی	درصد عبوری نسبت به بتن معمولی
۱	Control	۱۰/۶۶	۰/۰۹۶۹۰۹۱	۲/۳۳۳۹۸	۰/۱۵۵۵۶	۰	۱۰۰
۲	HC-IL-10%	۹/۳۴	۰/۰۸۴۹۰۹۱	۲/۴۶۶۱۷	۰/۱۶۴۴۱	۱۲/۳۸	۸۷/۶۲
۳	HC-IL-20%	۹/۰۱	۰/۰۸۱۹۰۹۱	۲/۵۰۲۱۵	۰/۱۶۶۸۱	۱۵/۴۵	۸۴/۵۲
۴	HC-IL-30%	۸/۲	۰/۰۷۴۵۴۵۵	۲/۵۹۶۳۵	۰/۱۷۳۰۹	۲۳/۰۸	۷۶/۹۲
۵	HC-IL-40%	۸/۰۲	۰/۰۷۴۲۹۰۹۱	۲/۶۱۸۵۴	۰/۱۷۴۵۷	۲۴/۷۷	۷۵/۲۳

نتایج بدست آمده از آزمایش تضعیف اشعه گاما توسط بتن سنگین مطابق با جدول شماره ۹ می باشد. طبق این نتایج، میزان پرتو عبوری با افزودن حداقل ۱۰٪ ایلمنیت در بتن ۸/۱۴٪ و با افزودن حداکثر ۴۰٪ ایلمنیت در بتن، ۱۸/۱۶٪ کاهش می یابد.



شکل ۱۱ مقایسه میزان تضعیف پرتو گاما عبوری در بتن تمامی طرح مخلوطها

جدول ۹ مقایسه میزان تضعیف پرتو گاما عبوری در بتن تمامی طرح مخلوطها

ردیف	نام طرح مخلوط	شمارش	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	ضریب تضعیف خطی	درصد کاهش نسبت به بتن معمولی	درصد عبوری نسبت به بتن معمولی
۱	Control	۶۳۰۳۹	۰/۱۰۲۹۵۵	۲/۱۲۸۶	۰/۱۴۱۹۱	۰	۱۰۰
۲	HC-IL-10%	۵۷۹۰۸	۰/۱۰۹۳۰۹	۲/۲۱۳۵۸	۰/۱۴۷۵۷	۸/۱۴	۹۱/۸۶
۳	HC-IL-20%	۵۶۵۷۳	۰/۱۱۳۸۲۲	۲/۲۳۶۹	۰/۱۴۹۱۳	۱۰/۲۶	۸۹/۷۴
۴	HC-IL-30%	۵۲۸۲۷	۰/۱۰۲۵۵۳	۲/۳۰۵۲۲	۰/۱۵۲۶۸	۱۶/۱۸	۸۳/۸۲
۵	HC-IL-40%	۵۱۵۹۱	۰/۰۹۳۳۶۲	۲/۳۲۹۰۹	۰/۱۵۵۲۷	۱۸/۱۶	۸۱/۸۴

طبق نتایج بدست آمده، هر چه میزان ایلمنیت در بتن بیشتر باشد، میزان کاهش ضریب تضعیف خطی نیز بیشتر خواهد شد که این مهم بیانگر کاهش عبور پرتو ایکس و گاما با افزایش ایلمنیت در بتن می باشد. بنابراین می توان دریافت که با افزایش چگالی بتن و نیز افزودن ماده ایلمنیت در بتن می توان میزان پرتو ایکس و گاما عبوری در بتن را تضعیف نمود.

۷- شاخص اقتصادی

یکی از ارکان های اصلی که در بهینه سازی و توسعه پایدار طرح مخلوط بتن باید مورد توجه قرار گیرد، شاخص اقتصادی است. با عنایت به رویکرد کاربردی این تحقیق، در این بخش اقدام به بررسی شاخص اقتصادی و مقایسه هزینه ساخت هر طرح مخلوط نسبت به وزن مخصوص بتن تازه گردید. البته گفتنی است که هزینه های ساخت بتن در آزمایشگاه بیشتر از ساخت همان بتن در مقیاس کارگاه یا کارخانه می باشد. هزینه ساخت و شاخص اقتصادی بر اساس مقاومت فشاری ۹۰ روزه و نیز بر اساس وزن مخصوص هر طرح مخلوط مطابق با جدول شماره ۱۰ محاسبه شده است. گفتنی است که هر چه میزان شاخص اقتصادی طرح مخلوط کم تر باشد، ساخت آن طرح از نظر اقتصادی، توجیه پذیرتر خواهد بود. طبق نتایج بدست آمده در این بخش مشخص گردید که با افزایش مقادیر حجمی ایلمنیت، هر دو شاخص اقتصادی مقاومت/وزن مخصوص، افزایش می یابد. اما با مقایسه سایر طرح مخلوط های مورد بررسی می توان ادعان داشت که طرح HC-IL-20% توجیه اقتصادی بیشتری برای ساخت دارد. البته قابل ذکر است که در ساخت بتن سنگین، افزایش وزن مخصوص بتن و سایر پارامترهای مکانیکی و دوام در مقایسه با هزینه ساخت از اولویت بیشتری برخوردار می باشند و صرفاً هزینه ساخت نمی تواند به تنهایی معیاری برای رد یا تایید طرح مخلوط بتن باشد.

جدول ۱۰ مقایسه شاخص اقتصادی بر اساس هزینه ساخت هر متر مکعب بتن / وزن مخصوص بتن تازه و مقاومت فشاری ۹۰ روزه

ردیف	نام	هزینه ساخت طرح	شاخص اقتصادی طرح بر اساس مقاومت فشاری	شاخص اقتصادی طرح بر اساس وزن مخصوص
۱	CONTROL	۱/۱۱۸/۱۰۰	۴/۱۱	۴/۳۹
۲	HC-IL-10%	۱/۳۹۹/۸۲۰	۴/۰۶	۴/۷۸
۳	HC-IL-20%	۱/۶۸۱/۵۴۰	۴/۱۸	۵/۱۳
۴	HC-IL-30%	۱/۹۶۳/۹۶۰	۵/۰۶	۵/۵۱
۵	HC-IL-40%	۲/۲۴۴/۹۸۰	۶/۶۸	۵/۸۲
		هر کیلو سیمان ۱۴۰۰ تومان هر کیلو ایلمنیت ۷۰۰ تومان		هر کیلو شن ۱۹۰ تومان هر کیلو ماسه ۲۱۵ تومان

۸- بحث

نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ایلمنیت باعث افزایش مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن خواهد شد. علاوه بر آن میزان پرتوهای یونیزان عبوری را نسبت به نمونه شاهد تضعیف نمود. بنابراین طبق نتایج بدست آمده از سایر تحقیقات گذشته می توان ادعان داشت که بتن سنگین جاذب انرژی و مسبب تضعیف پرتوهای یونیزان عبوری می باشد [۱۰-۱۴]. البته میزان عبور پرتوهای یونیزان بستگی به فاصله از منبع مولد و میزان انرژی اشعه هم دارد که در شرایط آزمایشگاهی این تحقیق، میزان انرژی عبوری و فاصله مولد اشعه از بتن بسیار اغراق آمیزتر از شرایط محیطی مانندی بیمارستان ها یا نیروگاه ها در نظر گرفته شد. بطوریکه در یک اتاق پرتوزا، میزان اشعه ساطع شده از مولد ابتدا در محیط اطراف پراکنده شده و سپس با سطح وسیع تری از دیوار چگال برخورد می نماید. بنابراین شدت عبور پرتو از بتن تحت اثر کاهش میزان انرژی و افزایش فاصله، کاهش خواهد یافت و میزان انرژی یونیزان عبوری از بتن چگال کمتر خواهد شد. از طرفی صراحتاً نمی توان بیان کرد که بتن مورد تحقیق برای چه مصارف و چه کاربری مناسب است و این مهم باید توسط کارشناسان بهداشت

محیط با توجه به شرایط محیطی، تهدیدات و میزان ریسک خطرپذیری مورد ارزیابی و تصمیم‌گیری قرار گیرد. همانطور که قبلاً اشاره شد میزان تضعیف پرتوی عبوری به دو اصل چگالی و ضخامت وابسته است. بنابراین با افزایش وزن مخصوص بتن به طرق مختلف و یا افزایش ضخامت بتن همواره می‌توان میزان اشعه‌های عبوری را کاهش داده و یا ضعیف‌تر نمود.

۹- نتیجه‌گیری

۱. اضافه کردن ۲۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه می‌تواند تا ۴۷٪ مقاومت فشاری ۹۰ روزه را در بتن افزایش دهد که این میزان بالاترین مقاومت کسب شده در بین سایر طرح مخلوط‌ها می‌باشد.
۲. اضافه کردن ۴۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه بدلیل برهم خوردن نظم دانه بندی در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در تمامی سنین خواهد شد.
۳. استفاده از ۴۰٪ حجمی ایلمنیت به جای ماسه در بتن، میزان اسلامپ را افزایش داده و بعضاً ریزشی خواهد شد. این مهم ناشی از چگالی بالا و سطح کروی شکل ذرات ایلمنیت خواهد بود.
۴. 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 می‌شود که بعنوان بتن سنگین تلقی خواهد شد.
۵. استفاده از حداکثر ۴۰٪ حجمی ایلمنیت در بتن به جای ماسه، بطور میانگین تا ۲۴/۷۷٪ میزان عبور پرتو ایکس از بتن را تضعیف می‌نماید.
۶. استفاده از حداکثر ۴۰٪ حجمی ایلمنیت در بتن به جای ماسه، بطور میانگین تا ۱۸/۱۶٪ میزان عبور پرتو گاما از بتن را تضعیف می‌نماید.
۷. طرح HC-IL-20% با شاخص اقتصادی/مقاومت فشاری ۴/۱۸ و شاخص اقتصادی/وزن مخصوص ۵/۱۳ به عنوان بهینه‌ترین طرح مخلوط بتن سنگین از نظر مقاومت فشاری، وزن مخصوص و هزینه ساخت معرفی می‌گردد.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از موسسه آموزشی "ماهرشو...!" شیراز، آزمایشگاه بتن "دانشگاه آزاد اسلامی" واحد شیراز، مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز، کارخانه ساخت بتن آماده "جلالی" شیراز، کارخانه فرآوری مواد معدنی "جهان پودر دلجان"، سرکار خانم دکتر "صدیقه سینا" رئیس محترم مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز، جناب آقای مهندس "محمدرضا قنبرپور" و خانم‌ها مهندس "فاطمه نوروزعلیزاده" و "غضنفری" کارشناسان محترم مرکز تابش دانشگاه شیراز، جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن نتایج این تحقیق مبذول داشتند.

منابع

- [1] Foray, N., Bourguignon, M., & Hamada, N. (2016). Individual response to ionizing radiation. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 770, 369-386.
- [2] Hong, J. Y., Han, K., Jung, J. H., & Kim, J. S. (2019). Association of exposure to diagnostic low-dose ionizing radiation with risk of cancer among youths in South Korea. *JAMA network open*, 2(9), e1910584-e1910584.
- [3] Derer, A., Frey, B., Fietkau, R., & Gaipl, U. S. (2016). Immune-modulating properties of ionizing radiation: rationale for the treatment of cancer by combination radiotherapy and immune checkpoint inhibitors. *Cancer Immunology, Immunotherapy*, 65, 779-786.
- [4] Mccollough, C. H., Bushberg, J. T., Fletcher, J. G., & Eckel, L. J. (2015, October). Answers to common questions about the use and safety of CT scans. In *Mayo Clinic Proceedings (Vol. 90, No. 10, pp. 1380-1392)*. Elsevier.

- [5] Lopes, M. B. S. (2017). The 2017 World Health Organization classification of tumors of the pituitary gland: a summary. *Acta neuropathologica*, 134, 521-535.
- [6] Tehran university of medical sciences (2019), guidelines and comprehensive guidelines for the health of radiation workers, tehran, iran, page 87-30. (in persian)
- [7] Isiri-11591 (1387), radiation protection apparatus for industrial gamma radiography specifications for performance, design and tests, institute of standards and industrial research of iran, tehran, iran, page 11-48. (in persian)
- [8] Sharbatdar, m.k, Mehrbad, m. (2018). The effect of the combination of heavy magnetite aggregates and steel fibers in improving the mechanical properties of heavy concrete. *Civil Engineering (Faculty of Engineering)*, 32(1), 118-93. SID. <https://sid.ir/paper/195953/fa>. (in persian)
- [9] Gholipourfizi, m, Mojtahedi, a, Lotf Elahi, m.a, (2014). Testing and evaluating the mechanical properties of heavy concrete prepared from barite aggregates. *Structural Analysis - Earthquake*, 12(1), 35-42. SID. <https://sid.ir/paper/363890/fa>. (in persian)
- [10] Homayoun, M. J., Aghamajidi, R., Bazaee, A., & Mansouri, B. (2022). 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*, 7(2), 89-110. (in persian)
- [11] Lehrasbi, F, Bazaee.A, Jabari, M. (1400). Investigating The Durability Of Heavy Concrete Under The Effect Of Chlorine Ion Penetration. *Civil And Project Journal*, 3(9), 32-50. (In Persian)
- [12] Sohrabi, a, Farrokhzad, r. (2018). Investigating the variables of linear attenuation coefficient and compressive strength of heavy concrete with barite aggregate containing bismuth powder and microsilica powder against gamma rays. *Structural and Construction Engineering*, 6 (Special Issue 2 (27 consecutive)), 63-80. SID. <https://sid.ir/paper/390705/falotfi> (in persian)
- [13] Berenjani, a, hojati, m. (1398). The mechanical properties and weakening of heavy concrete used in nuclear radiation protection. *Gilan university concrete research*, pp, 25-32.
- [14] Esen. Y, Doğan. Z. M, (2018). Investigation of usability of limonite aggregate in heavy-weight concrete production. *Progress in Nuclear Energy*, 105, 185-193.
- [15] Ouda, A. S. (2015). Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. *Progress in Nuclear Energy*, 79, 48-55.
- [16] Khalaf, M. A., Ban, C. C., & Ramli, M. (2019). The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review. *Construction and building materials*, 215, 73-89.
- [17] Khan, M. U., Ahmad, S., Naqvi, A. A., & Al-Gahtani, H. J. (2020). Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation. *Progress in Nuclear Energy*, 130, 103550.
- [18] Shcherban', E. M., Stel'makh, S. A., Beskopylny, A., Mailyan, L. R., & Meskhi, B. (2021). Influence of Mechanochemical Activation of Concrete Components on the Properties of Vibro-Centrifugated Heavy Concrete. *Applied Sciences*, 11(22), 10647.
- [19] Mailyan, L. R., Beskopylny, A. N., Meskhi, B., Shilov, A. V., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., ... & El'shaeva, D. (2021). Improving the structural characteristics of heavy concrete by combined disperse reinforcement. *Applied Sciences*, 11(13), 6031.
- [20] Azeez, M. O., Ahmad, S., Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., & Naqvi, A. A. (2019). Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 224, 284-291.
- [21] Özen, S., Şengül, C., Erenoğlu, T., Çolak, Ü., Reyhancan, I. A., & Taşdemir, M. A. (2016). Properties of heavyweight concrete for structural and radiation shielding purposes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1573-1584.
- [22] Nikbin, I. M., Mohebbi, R., Dezhampanah, S., Mehdipour, S., Mohammadi, R., & Nejat, T. (2019). Gamma ray shielding properties of heavy-weight concrete containing Nano-tio2. *Radiation Physics and Chemistry*, 162, 157-167.
- [23] Chen, X., Guo, Y., Ding, S., Zhang, H., Xia, F., Wang, J., & Zhou, M. (2019). Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions. *Journal of cleaner production*, 207, 789-800.
- [24] Gökçe, H. S., Öztürk, B. C., Çam, N. F., & Andiç-Çakır, Ö. (2018). Gamma-ray attenuation coefficients and transmission thickness of high consistency heavyweight concrete containing mineral admixture. *Cement and Concrete Composites*, 92, 56-69.
- [25] Shabalala, A. N., Ekolu, S. O., Diop, S., & Solomon, F. (2017). Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage– column study. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 641-653.

- [26] Sadrumontazi, A., Lotfi-Omran, O., & Nikbin, I. M. (2019). On the fracture parameters of heavy-weight magnetite concrete with different water-cement ratios through three methods. *Engineering Fracture Mechanics*, 219, 106615.
- [27] El-Sayed, T. A. (2021). Performance of heavy weight concrete incorporating recycled rice straw ash as radiation shielding material. *Progress in Nuclear Energy*, 135, 103693.
- [28] Gwenzi, W., & Mupatsi, N. M. (2016). Evaluation of heavy metal leaching from coal ash-versus conventional concrete monoliths and debris. *Waste Management*, 49, 114-123.
- [29] Khalaf, M. A., Cheah, C. B., Ramli, M., Ahmed, N. M., & Al-Shwaiter, A. (2021). Effect of nano zinc oxide and silica on mechanical, fluid transport and radiation attenuation properties of steel furnace slag heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*, 274, 121785.
- [30] Azad, B., & Bazaei, A. (2022). Comparison Of Cost And Time Of Construction RCCP And Asphalt Surface (Case Study Of Shiraz). *Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 114-136.
- [31] Zhai, J., Chen, P., Sun, W., Chen, W., & Wan, S. (2020). A review of mineral processing of ilmenite by flotation. *Minerals Engineering*, 157, 106558.
- [32] Chen, P., Zhai, J., Sun, W., Hu, Y., Yin, Z., & Lai, X. (2017). Adsorption mechanism of lead ions at ilmenite/water interface and its influence on ilmenite flotability. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 53, 285-293.
- [33] Mehdilo, A., Irannajad, M., & Rezai, B. (2015). Effect of crystal chemistry and surface properties on ilmenite flotation behavior. *International Journal of Mineral Processing*, 137, 71-81.
- [34] Yang, S., Xu, Y., Liu, C., Soraya, D. A., Li, C., & Li, H. (2021). Investigations on the synergistic effect of combined naol/SPA collector in ilmenite flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 628, 127267.
- [35] Saxton, R., Komossa, S., Auchettl, K., & Jonker, P. G. (2020). X-ray properties of tdes. *Space Science Reviews*, 216, 1-45.
- [36] Bunaciu, A. A., udrîştioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), 289-299.
- [37] Saxton, R., Komossa, S., Auchettl, K., & Jonker, P. G. (2021). Correction to: X-Ray Properties of tdes. *Space Science Reviews*, 217, 1-47.
- [38] Yabashi, M., & Tanaka, H. (2017). The next ten years of X-ray science. *Nature Photonics*, 11(1), 12-14.
- [39] Apostolopoulos, I. D., & Mpesiana, T. A. (2020). Covid-19: automatic detection from x-ray images utilizing transfer learning with convolutional neural networks. *Physical and engineering sciences in medicine*, 43, 635-640.
- [40] Fornasa, M., & Sánchez-Conde, M. A. (2015). The nature of the diffuse gamma-ray background. *Physics Reports*, 598, 1-58.
- [41] Vetter, K., Barnowski, R., Haefner, A., Joshi, T. H., Pavlovsky, R., & Quiter, B. J. (2018). Gamma-Ray imaging for nuclear security and safety: Towards 3-D gamma-ray vision. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 878, 159-168.
- [42] Knödseder, J., Mayer, M., Deil, C., Cayrou, J. B., Owen, E., Kelley-Hoskins, N., ... & Brau-Nogué, S. (2016). Gammalib and ctools-A software framework for the analysis of astronomical gamma-ray data. *Astronomy & Astrophysics*, 593, A1.
- [43] Astm c136, (2014). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, astm international, west conshohocken, u.s.a.
- [44] Astm c143 (2015). Standard test method for slump of concrete, astm international, u.s.a.
- [45] Astm c138, (2017). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete elearning Course, astm international, west conshohocken, u.s.a.
- [46] BS EN 12390-1 (2020). BS EN 12390 - Testing of hardened concrete. Determination of electrical resistivity. Euro.
- [47] Jahan Dilijan powder, Physical and chemical properties of powder ilmenite . www.powder-delijan.ir (in persian)
- [48] Sepahan Cement Company (1401), Physical and chemical characteristics of Sepahan type 2 cement, <https://www.sepahancement.com/home/fa/> (in persian)
- [49] Topic 9 of Iran's National Building Regulations, 1392 edition (in persian)
- [50] Abdelgawad, M. A., El Shazly, R. M., Farag, A. T. M., Adam, I., & Kany, A. M. (2023). Study of mechanical, thermal, and nuclear radiation attenuation properties of tourmaline loaded heavy weight heat resistant concrete as reactor shielding materials. *Progress in Nuclear Energy*, 158, 104605.

[51] Farokhzad, R., Dadashi, A., & Sohrabi, A. (2021). The effect of ferrophosphorus aggregate on physical and mechanical properties of heavy-weight concrete. *Construction and Building Materials*, 299