

بررسی کاربرد نانوهماتیت بازیافتی از پسماند معادن در صنعت بتن

معصومه افشار^۱، پویا شکیبآ^۲، غلامرضا کریمی^۳، عزت اله مظفری^۴

^۱مدیر فنی آزمایشگاه، مجتمع تحقیقاتی تولیدی ایران فریمکو

^۲مدیر کنترل کیفیت و تحقیق و توسعه، مجتمع تحقیقاتی - تولیدی ایران فریمکو

^۳استادیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین

^۴استادیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین

چکیده:

در این پژوهش، نانوذرات هماتیت در مقیاس آزمایشگاهی از پسماند معادن آهن طی روشی آسان، اقتصادی و زیست محیطی بازیابی شده و تاثیر آن بر روی مقاومت فشاری بتن بررسی شد. ابتدا پودر نانوهماتیت با ترکیب دو روش رسوبی- سونوشیمی از باطله معدن آهن تهیه شد. نتایج آنالیزهای SEM و XRD بر روی پودر حاصل نشان داد که نانوذرات اکسید آهن از نوع هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) با ابعاد تقریبی ۴۵ نانومتر و آرایش بلوری کروی تشکیل شده‌اند. طبق بررسی‌های طیف EDS خلوص نانوذرات حاصل از پسماند حدود ۹۰ درصد و تنها ناخالصی مشاهده شده نیز سیلیس بود. در مرحله دوم، نانوذرات هماتیت حاصل از پسماند با نسبت‌های ۳ و ۵ درصد جایگزین سیمان شد و مقاومتهای ۳ و ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوذرات هماتیت نسبت به نمونه‌های شاهد، افزایش ۳۴-۱۷ درصدی را نشان داد. از سوی دیگر با توجه به نتایج آنالیزهای XRF و EDS ترکیب شیمیایی پسماند و نانوذرات حاصل از پسماند به ترکیب سیمان شبیه بوده و بنابراین از پتانسیل مناسبی برای کاربرد در صنعت سیمان و بتن برخوردار می باشد.

کلمات کلیدی: نانو هماتیت- بتن - مقاومت فشاری - پسماند معدنی

Investigation on application of hematite nano particles recovered from mining waste in concrete

Abstract:

In this study a facile, feasible and environmentally friendly method was used for the recycling of hematite nano particles from mining waste and their effect on the compressive strength of concrete was investigated. Firstly hematite nano powder was prepared by combination of sono-chemical and precipitation methods. XRD and SEM results shown that iron oxide nano-particles in type of hematite (α -Fe₂O₃) was formed with average size of 45 nm and spherical shape.

According to EDS Spectrum, the purity of obtained nano particles from waste was 90% and Silica was only observed impurity. In second Stage, hematite nano particles obtained from waste was added to the cement paste with ratios of 3 and 5% and were measured compressive strength of samples in 3 and 7 and 28 days. Comparison between samples containing hematite nanoparticles and control samples, indicated 17-34 percent increase in compressive strength of samples containing nano particle. On the other hand, due to XRF and EDS results the chemical composition of waste and obtained nano particles from waste are similar to cement composition. Therefore their potential is suitable for application in the cement and concrete industry.

Keywords: Nano Hematite – Concrete - Compressive Strength - Mining waste

۱- مقدمه

نانوفناوری توانمندی تولید مواد، ابزارها و سیستم‌های جدیدی است که با کنترل کردن مولکول‌ها و اتم‌ها خواص جدیدی ظهور می‌یابد. باید توجه داشت که نانوفناوری یک رشته نیست؛ بلکه رویکرد جدیدی در تمام رشته‌ها است. در سالهای اخیر فناوری نانو به عنوان یک فناوری بین رشته‌ای پیشرفت زیادی داشته و با سرعت چشمگیری در حوزه‌های مختلف صنعت، کشاورزی، محیط زیست، پزشکی و ... وارد شده است [۱]. در میان مصالح مختلف ساختمانی که کاربرد نانوذرات در آنها تثبیت شده است؛ بتن از جمله مواد و مصالح ساختمانی است که فناوری امید بخش نانو، قدری دیرتر به قلمروی آن نفوذ کرده است. این تاخیر را می‌توان به دو عامل نسبت داد. یکی فقدان درک و دانش کامل و اساسی از ساز و کارهای فیزیکی و شیمیایی این ماده در مقیاس نانو و دلیل دیگر عدم وجود درک صحیح نسبت به اینکه بهبود و ارتقای کیفی در ماده‌ای مانند بتن با ساختار مایع- جامد، بوسیله نانوفناوری به چه معناست [۲].

البته در یک نگاه کلی تر می‌توان عدم توجیه اقتصادی کاربرد محصولات نانویی را در بتن به عنوان یک مانع اصلی در این زمینه دانست. زیرا در حال حاضر هزینه تولید نانوذرات گران می‌باشد که بخش اصلی هزینه‌ها ناشی از مواد اولیه مصرفی در ساخت نانوذرات است.

با اینکه فناوری نانو قدری دیرتر از سایر مصالح ساختمانی به قلمرو بتن ورود کرده است؛ اما پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی افزودن نانوذرات مختلف بر بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به افزودن نانو سیلیس، نانو اکسید تیتانیوم، نانو اکسیدهای آهن از نوع هماتیت و مگنتیت [۴و۵] نانو اکسید آلومینیوم و همچنین نانولوله‌های کربنی اشاره کرد [۳].

از بین نانوافزودنی‌های فوق، بیشترین سهم پژوهش‌ها مربوط به نانو سیلیس و نانوالیاف کربنی می‌باشد. در حالیکه تاثیر مثبت سایر نانوذرات بر خواص مکانیکی و دوام بتن نیز به اثبات رسیده است. یکی از نانوذراتی که می‌توان به سیمان و بتن افزود؛ نانو ذرات هماتیت است. استفاده از نانو ذرات هماتیت در سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری سیمان می‌شود. البته برای استفاده از این نانو ذرات در سیمان حد بهینه وجود دارد. زیرا مقدار بیشتر از حد بهینه باعث کاهش مقاومت خواهد شد. سیمان‌های حاوی کمتر از ۱۰٪ نانوذرات هماتیت از لحاظ مقاومتی مناسبتر می‌باشند [۶].

همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داده که در صورت افزودن نانوذرات هماتیت به ترکیب بتن علاوه بر افزایش مقاومت، می‌توان میزان تنش خستگی بتن را با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی برشی بررسی و پایش کرد [۷].

در این پژوهش تلاش شده تا نانوذرات هماتیت طی روشی آسان، بدون استفاده از پیشماده‌های خالص آزمایشگاهی و از باطله‌های صنایع آهن تهیه شده و سپس کاربرد این نانوذرات در بتن بررسی شود.

۲- مواد و روش‌های آزمایش

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

باطله‌ی مورد استفاده جهت سنتز نانوذرات هماتیت از معدن آهن گل گهر تهیه شد. ترکیب شیمیایی این نمونه به منظور شناسایی نوع و میزان عناصر همراه آهن توسط آنالیز XRF تهیه شد و نتایج آن طبق جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی نمونه باطله براساس آنالیز XRF

ترکیب	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	سایر
درصد	۲۸/۶۳	۵/۷۳	۲۸/۶	۹/۳۲	۱۴/۱	۰/۸۵	۰/۴۲	۲/۰۲	۰/۲۹	۱۰/۰۴

در جدول (۱) مشاهده می‌شود که اکسید آهن درصد قابل توجهی از باطله را به خود اختصاص داده که این خود توجیهی منطقی برای بازیافت آن از باطله مورد نظر می‌باشد.

¹Monitoring

نمونه‌ی باطله به صورت پودر قهوه‌ای رنگی بود که به منظور آماده‌سازی جهت استفاده در آزمایش‌های سنتز نانوذرات، ابتدا در آسیای گلوله‌ای به روش خشک تا ابعاد ۱۰۰ میکرون خرد شد. سپس برای خلوص هرچه بیشتر آهن موجود در این نمونه، در جداکننده مغناطیسی شدت بالا مورد جدایش مغناطیسی قرار گرفت.

در آزمایش‌های مربوط به تاثیر نانوذرات هماتیت بر سیمان، از سیمان پرتلند تیپ ۲ محصول شرکت سیمان آبیگ و ماسه سیلیسی محصول شرکت آمیتیس آزما و فوق روانساز پایه کربوکسیلاتی استفاده شد.

۲-۲- روش سنتز آزمایشگاهی نانوذرات هماتیت از باطله

۲-۲-۱- تهیه محلول پیش‌ماده از باطله

برای تهیه نانوذرات از باطله، ابتدا می‌بایست محتوای آهن موجود در باطله به صورت محلول جدا می‌شد. به همین منظور و براساس نتایج حاصل از پژوهش‌های مشابه، نمونه باطله‌ی آماده‌سازی شده توسط اسید هیدروکلریک فروشویی شد. پارامترهای مختلفی از قبیل ترکیب شیمیایی باطله، محلول فروشویی، نسبت جامد به مایع، زمان، pH و اندازه ذرات بر شرایط فروشویی تاثیرگذارند [۸]. حد بهینه پارامترهای موثر بر شرایط فروشویی با مطالعه منابع موجود در این زمینه طبق جدول (۲) انتخاب شد [۹-۱۱].

نمونه‌ی باطله به حلال افزوده شد. با استفاده از دستگاه همزن - گرمکن^۲ دمای واکنش بر روی ۸۰°C و سرعت بر روی ۴۰۰ rpm تنظیم شد. عمل همزدن به مدت یک ساعت در زیر هود آزمایشگاهی و با نسبت جامد به مایع ۱ به ۶ انجام شد. با گذشت زمان، تغییر رنگ مشهودی در رنگ محلول مشاهده شد که نشان دهنده انجام واکنش و ورود Fe به فاز محلول بود. در پایان زمان واکنش و پس از خنک شدن، محلول حاصل از کاغذ صافی عبور داده شد تا بخش جامد نامحلول از بخش محلول جدا شد.

جدول (۲) شرایط مناسب فروشویی نمونه‌ی باطله

اندازه ذرات	نسبت جامد به مایع	سرعت همزن	دما	زمان	غلظت حلال (HCl)
۱۰۰ میکرون	۱ به ۶	۴۰۰ rpm	۸۰°C	۱ ساعت	۸ مولار

۲-۲-۲- سنتز نانو ذرات هماتیت از محلول پیش ماده

با توجه به اینکه تاکنون گزارش قابل توجهی مبنی بر سنتز نانوذرات هماتیت از باطله دریافت نشده است؛ در این بخش از آزمایش‌ها شرایط سنتز از قبیل غلظت محلول‌های پایه، دمای رسوب‌گیری، دمای مربوط به عملیات حرارتی و ... بر اساس تست‌های آزمون و خطای اولیه و همچنین منابع موجود در مورد سنتز نانو ذرات هماتیت از مواد شیمیایی خالص انتخاب شد [۱۲-۱۵].

برای سنتز نانو ذرات هماتیت مقدار ۵۰ میلی لیتر از محلول پیش‌ماده توسط دستگاه همزن فراصوت^۳ تحت همزدن قرار گرفت. مقدار ۵۰ میلی لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۱ مولار در بورت ریخته شد و بصورت تدریجی و قطره قطره در طی ۳۰ دقیقه به محلول پیش‌ماده که همچنان تحت امواج فراصوت قرار داشت؛ افزوده شد. رسوب قرمز مایل به قهوه‌ای رنگی تشکیل شد که با قطع امواج فراصوت شروع به ته نشینی کرد. پس از ته نشینی کامل رسوب که حدود دو ساعت طول کشید؛ مایع زلال فوقانی سرریز شد. با توجه به ابعاد ریز ذرات رسوب که باعث عبور آنها از کاغذ صافی می‌شد، از دستگاه سانتریفیوژ برای جدایش و شست شوی رسوب به مدت ۱۵ دقیقه و ۳۰۰۰ rpm استفاده شد.

طبق مطالعات انتظار می‌رفت که رسوب حاصل، فازهای ناقصی از اکسیدها یا هیدروکسیدهای آهن باشد، به همین دلیل مقداری از رسوب مورد آنالیز حرارتی قرار گرفت تا دمای لازم برای رسیدن به فاز هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) مشخص شد. پس از مشخص شدن نتایج آنالیز حرارتی، رسوب به مدت یک ساعت در کوره تا دمای ۵۰۰ حرارت داده شد. پودر قرمز مایل به قهوه‌ای رنگ حاصل از عملیات حرارتی کوره مورد آنالیزهای XRD و SEM و EDS قرار گرفت که در قسمت نتایج و یافته‌ها بررسی خواهند شد.

^۲Heater- Stirrer

^۳Sonicator



ب- پودر خشک شده نانوهماتیت



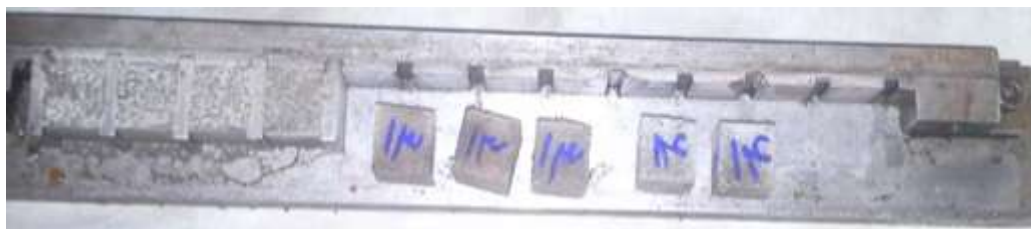
شکل (۲) الف- رسوب قهوه ای رنگ نانوهماتیت در حال ته نشینی

۲-۳- کارایی نانوذرات هماتیت سنتز شده در بهبود خواص بتن

پس از سنتز نانوذرات هماتیت از باطله، آزمایش‌های مربوط به بررسی تاثیر این نانوذرات بر بتن انجام شد. به دلیل اینکه میزان نانوذرات سنتز شده در مقیاس آزمایشگاهی کم بود و در صورت افزودن این نانوذرات به نمونه‌های بتن در ابعاد بزرگ نیاز به تکرار مرحله سنتز برای بیش از ده بار بود؛ آزمایش‌های این مرحله بر روی قالب‌های کوچک مقیاس با ابعاد (۱/۵*۱/۵*۱/۵) سانتی متر انجام شد.



شکل (۳- الف) قالب های مورد استفاده در ساخت نمونه های بتنی حاوی نانو هماتیت



شکل (۳- ب) نمونه های بتنی ساخته شده حاوی نانوهماتیت

با انجام تست‌های اولیه سعی و خطا برای تعیین نسبت مناسب سنگدانه به سیمان و همچنین تعیین دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها از نسبت $\frac{2.7}{1}$ ماسه : سیمان استفاده شد. نسبت آب به سیمان نیز در تمام نمونه‌ها ۰/۵ در نظر گرفته شد. نانو هماتیت نیز با نسبت‌های جایگزینی ۳ و ۵ درصد وزنی سیمان به مخلوط افزوده شد.

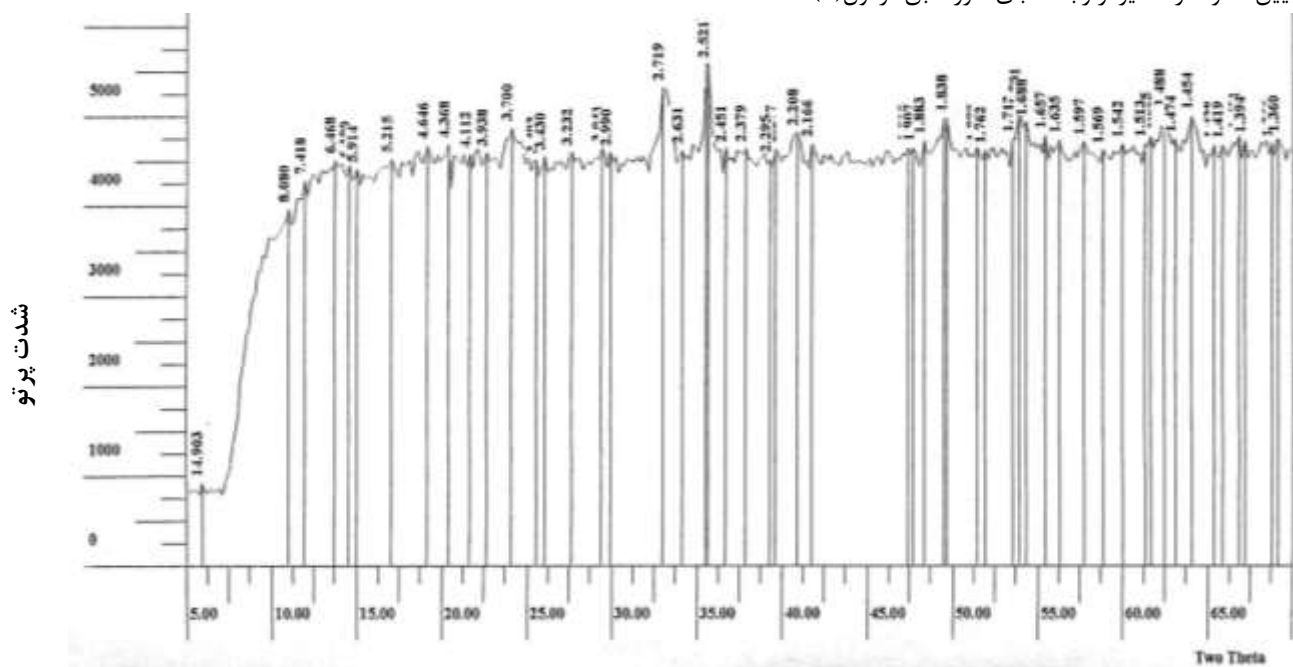
به منظور مقایسه‌ی نتایج، نمونه‌های شاهد نیز بدون افزودن نانوهیاتیت تهیه شد. از هر نمونه نیز سه نمونه برای اندازه‌گیری مقاومت‌های ۳ و ۷ و ۲۸ روزه ساخته شد. بدین ترتیب ۱۲ نمونه شامل چهار نمونه شاهد، چهار نمونه حاوی ۳ درصد نانوذرات هماتیت و چهار نمونه حاوی ۵ درصد نانوذرات هماتیت ساخته شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری در اتاق رطوبت، از قالبها خارج شده و در آب با دمای استاندارد نگهداری شد. مقاومت‌های فشاری ۳ روزه، ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌ها توسط دستگاه جک فشاری اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و یافته‌ها

۳-۱- خصوصیت سنجی نانوذرات هماتیت حاصل از باطله

پس از سنتز نانوهیاتیت از باطله، خواص کاربردی آن شامل خلوص، شکل بلوری، اندازه و توزیع ابعادی ذرات بر اساس نتایج حاصل از آنالیزهای SEM، EDS، XRD و تیتراسیون مورد بررسی قرار گرفت.

نمودار XRD نانوذرات هماتیت در شکل (۴) نشان داد که ذرات دارای فاز $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ هستند و سنتز نانوذرات با موفقیت انجام شده است. برای تعیین اندازه ذرات نیز از رابطه دبی شرر طبق فرمول (۱) استفاده شد.



زاویه پراش (درجه)

شکل (۴) نمودار XRD نانوذرات هماتیت سنتز شده از باطله

رابطه "دبی-شرر" وابستگی اندازه ذره به گستردگی و پهن شدن خطوط پراش را بصورت معادله (۱) نشان می‌دهد که در این رابطه:

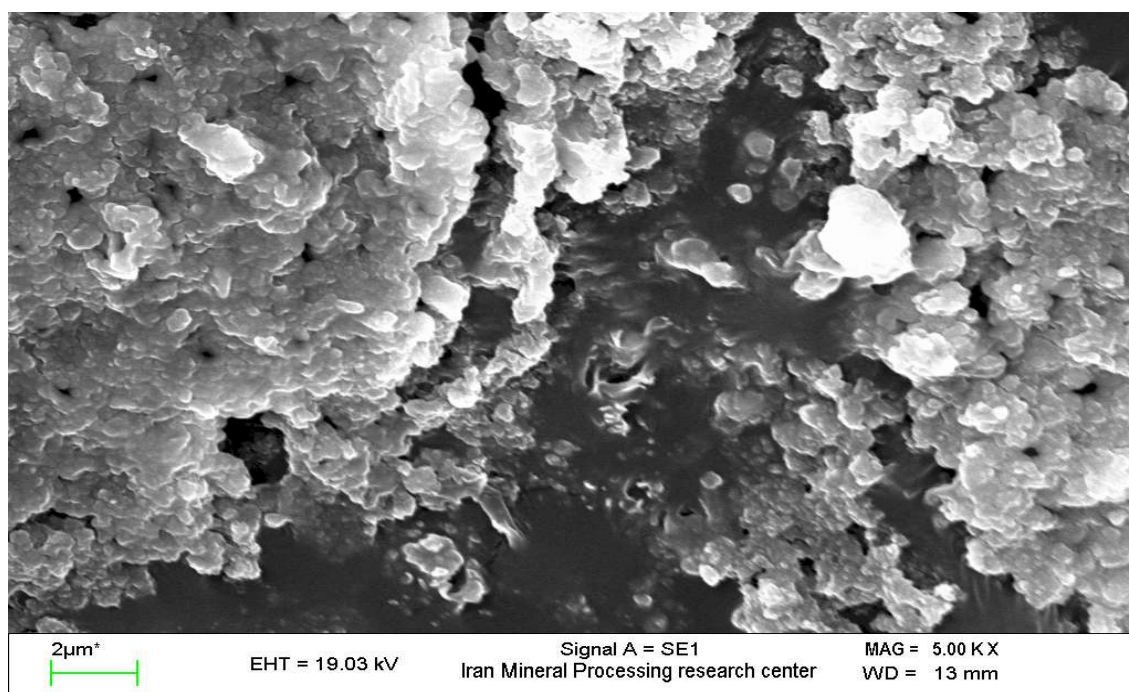
$$D = K\lambda / \beta \cos\theta$$

(۱)

K ثابت شکل (تقریباً برابر ۰/۹)، λ طول موج اشعه ایکس تابیده شده بر حسب آنگستروم، θ زاویه پراش بر حسب درجه و β پهنای پرتو در نصف شدت بیشینه پرتوافکنی بر حسب رادیان می‌باشند. اندازه ذرات (D) نیز بر حسب آنگستروم به دست می‌آید که پس از ضرب شدن در عدد ۱۰ به مقیاس نانومتر تبدیل خواهد شد [۱۶].

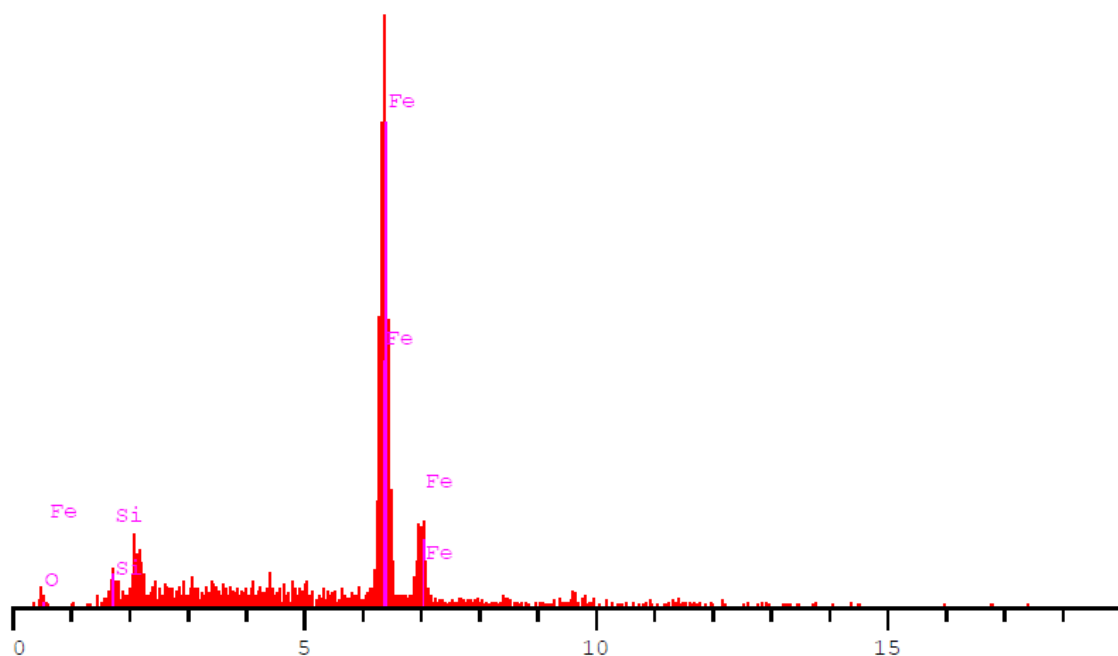
میانگین اندازه نانوذرات طبق رابطه دمای شرر ۴۵ نانومتر به دست آمد که نسبت به نانوذرات سنتز شده از مواد خالص در پژوهش‌های مشابه از توزیع ابعادی مناسبی برخوردار بود.

شکل (۵) نیز تصویر SEM نانوذرات هماتیت سنتز شده را در مقیاس ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. همانطور که از این تصویر پیداست، شکل بلوری ذرات کروی بود که در آنها توزیع یکنواخت ابعاد ذرات مشهود است. با توجه به اینکه مورفولوژی کروی بیشترین نسبت سطح مخصوص را دارد؛ بنابراین نانو هماتیت حاصل از این روش کیفیت مطلوبی نسبت به موارد مشابه حاصل از مواد خالص دارد.



شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نانوذرات هماتیت سنتز شده از باطله

طیف EDS نانوذرات هماتیت طبق شکل (۶) به دست آمد. در این طیف نیز حضور آهن و اکسیژن به عنوان اجزای اصلی ساختار هماتیت در کنار مقدار محدودی سیلیس، خلوص این نانوذرات را نشان داد. نتایج تیتراسیون نیز خلوص این نانوذرات را ۹۰ درصد نشان داد. نانوذرات افزودنی به سیمان هم می‌تواند از نوع ترکیبات تشکیل دهنده خود سیمان مانند اکسید سیلیس، اکسید آهن و آلومینا باشند و هم از ترکیباتی دیگر از قبیل نانولوله‌های کربن که در جهت ایجاد خواصی مشخص و معین در سیمان، کاربرد دارند [۳]. بر همین اساس وجود این مقدار سیلیس عامل منفی محسوب نمی‌شود.



شکل (۶) نمودار EDS نانوذرات هماتیت

۳-۲- نتایج تاثیر نانوذرات هماتیت بر مقاومت بتن

مقاومت‌های ۳ و ۷ و ۲۸ روزه اندازه گیری شده برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانوذرات هماتیت در جدول (۳) ارائه شده است. نمودار (۷) نیز مقایسه بین میزان افزایش مقاومت این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۳) مقاومت نمونه های بتن

کد نمونه	مقدار نانوذرات	مقاومت نمونه (MPa)		افزایش مقاومت (%)
S-1	بدون افزودنی (شاهد)	۳ روزه	۱۸/۳۱	شاهد
		۷ روزه	۲۷/۷	شاهد
		میانگین ۲۸ روزه	۴۱/۳۸	شاهد
S-2	۳ درصد نانوهیاتیت	۳ روزه	۲۲/۸	۲۴/۵
		۷ روزه	۳۴/۹	۲۵/۹
		میانگین ۲۸ روزه	۴۹/۸	۲۰/۴
S-3	۵ درصد نانوهیاتیت	۳ روزه	۲۴/۶	۳۴/۳
		۷ روزه	۳۲/۹	۱۸/۷
		میانگین ۲۸ روزه	۴۸/۷	۱۷/۶



شکل (۷) مقایسه افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی نانوهما تیت

همانطور که نتایج مقاومت‌های فشاری نشان می‌دهد؛ افزودن نانوهما تیت به نمونه‌های بتنی، موجب افزایش مقاومت آنها به میزان ۱۷ الی ۳۴ درصد شد. این یافته با نتایج سایر پژوهش‌ها که تاثیر نانو ذرات هماتیت خالص را بر بتن مورد بررسی قرار داده‌اند؛ مطابقت قابل توجهی داشت. زیرا طبق نتایج گزارش شده در پژوهش‌های مشابه، با افزودن ۳٪ نانوذرات اکسید آهن، مقاومت سیمان حدود ۲۸٪ رشد می‌یابد. ولی نکته حائز اهمیت این است که میزان مفید افزودن نانوذرات هماتیت برای هر طرح اختلاطی متغیر است. وقتی مقدار نانو هماتیت مصرفی از ۱۰٪ افزایش می‌یابد، نانوذرات به خوبی در مخلوط سیمان پراکنده نمی‌شود و از تجمع آنها مناطق ضعیف و ناهمگنی در مخلوط سیمان تشکیل می‌شود. به طور کلی بهترین حالت افزودن نانوذرات اکسید آهن کمتر از ۱۰٪ است [۳].

طبق نمودار مقایسه‌ای شکل (۷) نیز در ابتدا بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد نانو هماتیت در سن ۳ روزه بود. اما با افزایش سن نمونه‌ها بیشترین مقاومت در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوهما تیت مشاهده شد. تجمع نانوذرات بر اثر حالت آگلومره شدن ناشی از نیروهای بین مولکولی قوی در نانوذرات و پراکنده نشدن کامل نانوذرات می‌توانند عوامل عمده‌ای باشند که موجب ایجاد مناطق ضعیف در ملات و کاهش مقاومت آنها در مقدار ۵٪ افزودنی شد. بر همین اساس بهترین حالت افزودن نانو ذرات هماتیت به بتن به این صورت است که نانوذرات توسط دستگاه دستگاه همزن فراصوت در آب اختلاط پراکنده شده و سپس به مخلوط بتن اضافه شود.

۴- نتیجه گیری

با وجود کاربردهای مفید و متنوعی که برای نانوذرات اکسید آهن در صنعت بتن به اثبات رسیده است؛ استفاده از مواد شیمیایی خالص در فرایند تولید این نانو ذرات کاربرد انبوه آنها را در این صنعت با محدودیت اقتصادی مواجه ساخته است. به منظور غلبه بر این محدودیت، نیاز به توسعه‌ی روشی کم هزینه برای تولید این نانوذرات می‌باشد. استفاده از پسماندهای صنایع آهن محور به جای مواد شیمیایی خالص در فرایند تولید نانو ذرات اکسید آهن می‌تواند راهکار مناسبی در این زمینه باشد.

همانطور که در این پژوهش نشان داده شد؛ می‌توان نانوذرات هماتیت را طی روشی آسان از پسماندهای معدنی تهیه کرد و بعنوان افزودنی تاثیر گذار بر خواص مکانیکی بتن استفاده نمود. بدیهی است که تهیه‌ی نانوذرات اکسید آهن از منابع ثانویه‌ای چون باطله و پساب، علاوه بر مزایای اقتصادی به مزایای زیست محیطی نیز منجر می‌شود. جنبه‌ی زیست محیطی این فرایند از دو دیدگاه قابل توجه است. در نگاه اول با توجه به حجم فزاینده‌ی پسماندهای صنایع آهن- محور گامی مثبت در جهت مدیریت این پسماندها و رفع عواقب ناشی از دفع و رهاسازی آنها در طبیعت خواهد بود. از سوی دیگر جایگزین شدن مواد شیمیایی اولیه توسط این پسماندها منجر به کاهش و حتی حذف میزان مواد شیمیایی مصرفی در تولید نانوذرات خواهد شد.

روشن‌ترین مسیری که در استفاده از نانوذرات در بهبود خواص بتن وجود دارد، در مراحل ساخت بتن است که علاوه بر سهولت فرایند ساخت، تاثیر منفی بر ویژگی نهایی بتن سخت شده نیز نداشته باشد. فناوری نانو این مزیت را دارد که ضمن اصلاح ضعف‌ها، مشکلاتی در زمینه دیگر ویژگی‌های بتن ایجاد نکند.

سپاسگزاری:

از ستاد توسعه فناوری نانو ریاست جمهوری و سازمان توسعه و نوسازی صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) به جهت حمایت مالی این پژوهش سپاسگزاری می‌شود. ضمن اینکه از همکاری کارشناسان محترم مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران و مرکز تحقیق و توسعه صنعت سیمان در زمینه انجام آنالیزهای دستگاهی نیز قدردانی می‌شود.

مراجع:

- [۱] صلواتی نیاسری، م. و فرشته، ز. (۱۳۹۱) "نانو شیمی؛ روش‌های ساخت، بررسی خواص و کاربردها" (چاپ دوم)، نشر سخنوران.
 - [۲] گلابچی، م. تقی زاده، ک. سروش نیا، ا. (۱۳۹۰) "نانوفناوری در معماری و مهندسی ساختمان"، انتشارات دانشگاه تهران.
 - [۳] کالوندی، م. (۱۳۸۷) "کاربرد ذرات نانودر بهسازی و ترمیم سازه‌های بتنی"، کنفرانس بین‌المللی مقاوم سازی لرزه‌ای، ۲۹ مهر الی ۱ آبان، تبریز.
 - [۴] نجات، م. اسماعیلی، ا. منصوری، ا. رونقی، ا. دیمه، ف. " سنتز و کاربرد نانوذرات مگنتیت در بهبود خواص مکانیکی بتن"، کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین در عمران، معماری، محیط زیست و مدیریت شهری، ۲۵ خرداد ۹۴، تهران.
 - [5] Shekari, A. H., Razzaghi M.S., "Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete " *Procedia Engineering* 14 (2011) 3036–3041
 - [۶] جمشیدی، ح.، قدسی، ن. و غیوری، خ. (۱۳۹۰) "مروری بر اثر نانوذرات در بتن"، همایش بین‌المللی بتن‌های ناتراوا و مخازن ذخیره آب شرب، رشت.
 - [7] Aiu, M. (2006) 'The Chemistry and Physics of Nano-Cement', University of Delaware.
 - [8] Vitkova, M., Ettler, V., Mihaljevi, M. and Sebek, R. (2011) 'Effect of sample preparation on contaminant leaching from copper smelting slag', *Journal of Hazardous Materials*, 197, 417– 423.
 - [9] Alafra, A., Adekola, F.A., Folashade, A. O., (2005) 'Quantitative Leaching of a Nigerian Iron Ore in Hydrochloric Acid', *J. Appl. Sci. Environ. Mgt.* 9: 3, 15 – 20.
 - [10] Swain, R. and Rao R.B. (2010) 'Leaching kinetics for iron from partially laterised khondalite rocks by hydrochloric acid solution K', *International Seminar on Mineral Processing Technology* , 839–847
 - [11] Swanepoel, J.J., Vuuren, D.S. and Heydenrych, M. (2011) 'Leachability of nitrated ilmenite in hydrochloric acid', 111, 137-140.
 - [12] Darezereshki, E., Bakhtiari, F., Alizadeh, M., Behrad, A., Ranjbar, M., (2012) 'Direct thermal decomposition synthesis and characterization of hematite(α -Fe₂O₃) nanoparticles', *Materials Science in Semiconductor Processing* , 15, 91-97.
 - [13] Hassanjani-Roshan, A., Vaezib, M., Shokuhfar, A. and Rajabali, Z. (2011) 'Synthesis of iron oxide nanoparticles via sonochemical method and their characterization', *Particuology*, 9, 95–99.
 - [14] Liu, H., Wei, Y., Li, P., Zhang, Yanfeng. And Sun, Y. (2007) 'Catalytic synthesis of nanosized hematite particles in solution', *Materials Chemistry and Physics* 102 , 1–6.
 - [15] Machala, L., Zboril, R. and Gedanken, A. (2007) 'Amorphous Iron(III) Oxides: A Review', *J. Phys. Chem. B*, 111, 4003-4018.
- (۱۶) گلستانی‌فرد، ف.، بهره‌ور، م.، صلاحی، ا. (۱۳۸۳) "روش‌های شناسایی و آنالیز مواد"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت.