

ساخت بتن رسانا به عنوان مصالح نوین در حفاظت الکترومغناطیسی

محمد مردانی شهربابک^{۱*}، محسن کامیاب شریف^۲

۱- استادیار ۲- کارشناس ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۳/۰۸/۱۸، پذیرش: ۹۳/۱۰/۰۶)

چکیده

استفاده از حفاظ‌های امواج الکترومغناطیسی به عنوان یک راهکار پدافند غیرعامل به منظور کاهش خسارات در مقابل تهدیدات نوین الکترومغناطیسی از قبیل EMP^۱ و HPM^۲ ها به کار می‌رود. موادی که جهت ساخت حفاظت کننده‌ها استفاده می‌شوند باید دارای ویژگی‌های خاصی از قبیل ضرایب رسانایی و گذردهی مغناطیسی مناسب باشند. این تحقیق در خصوص ساخت بتن با ضریب هدایت الکتریکی بالا برای کاهش و حذف تهدیدات امواج الکترومغناطیسی بر قدرت به عنوان حفاظت الکترومغناطیسی در انواع تأسیسات و سایت‌های حیاتی و حساس می‌باشد. در این تحقیق ابتدا مقدار انعکاس موج در نوار X مربوط به قطعه بتنی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر با اختلاط ۵ درصد کربن سیاه با قطعه بتونی خالص مقایسه شد. سپس در آزمایش دیگر تأثیر ضخامت بتن بر مقدار عبور و تضعیف موج بررسی شد و در نهایت در آزمایش دیگری تأثیر مقدار کربن سیاه مختلط در بتن مورد بررسی قرار گرفت. بهترین تضعیف موج در قطعه با ضخامت ۲ سانتی‌متر و ۱۰ درصد کربن سیاه برابر با 35/19 dB- اندازه‌گیری شد.

کلید واژه‌ها: تهدیدات الکترومغناطیسی، بتن رسانا، حفاظت الکترومغناطیسی، کربن سیاه، EMP.

Construction of Conductivity Concrete as Modern Material in Electromagnetic Shielding

M. Mardani Shahrebabak^{*}, M. Kamyab Sharif

Imam Hossein University

(Received: 09/11/2014; Accepted: 27/12/2014)

Abstract

*Using electromagnetic waves shields is the method in passive defense that helps to reduce damages caused by modern electromagnetic threats such as EMP and HMP. The substances that are used in shields structure should have special characteristics like relevant electrical and magnetic conductivity coefficients. This research is related to the construction of special concrete having high electrical conductivity for reduction and elimination of high power electromagnetic waves threats as electromagnetic shields in any kinds of critical and infrastructural establishments. In this paper, the reflection of X-band wave on the pieces of the pure concrete is compared with its reflection on concrete block 5*5*5 cm mixed by 5 percent carbon black. In another experiment, the effect of concrete thickness on transmittance and wave attenuation is measured and finally, in another experiment, the effect of carbon black mixed concrete is investigated. The best wave absorption resulted at the 2 cm thickness and 10% carbon black equal to -19.35 dB.*

Keywords: Electromagnetic Threats, Conductive Concrete, Electromagnetic Shielding, Carbon Black, EMP.

¹ Electro Magnetic Pulse

² High Power Microwave

* Corresponding Author E-mail: Mardani_DR@yahoo.com

۱. مقدمه

گسترش روز افزون سیستم‌های الکترونیکی در حوزه‌های نظامی، غیر نظامی و تجاری باعث شده است که بسیاری از زیرساخت‌ها و ساختارهای ما وابستگی بسیار زیادی به مدارات الکترونیکی داشته باشند.

در پی این وابستگی فناوری، تهاجم به مدارات الکترونیکی در برنامه‌های نظامی و استراتژیکی حریفان، قرار گرفته است و امواج الکترومغناطیسی پر قدرت می‌توانند تجهیزات فوق را دچار اختلال موقت یا دائمی نمایند.

به طور کلی منابع تداخلی به دو گروه تقسیم می‌شوند:

- منابع طبیعی (مانند رعد و برق، طوفان‌های خورشیدی و...)

- منابع ساخته شده توسط بشر، که می‌توانند ناخواسته و یا عمدتاً ایجاد شوند؛ مانند بمب‌های الکترومغناطیسی^۱ و منابع مایکروویو پر قدرت^۲.

تمامی این منابع امواج الکترومغناطیسی هنگامی تهدید محسوب می‌شوند که بتوانند دامنه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بالاتر از سطح آستانه تحمل تجهیزات الکترونیکی و الکتریکی را ایجاد کنند [۱].

به طور کلی حفاظت‌سازی به منظور جلوگیری از نفوذ امواج از محلی به محل دیگر انجام می‌پذیرد و هدف آن حفاظت از تجهیزات حساس در مقابل نفوذ امواج الکترومغناطیسی تداخل‌گر و یا عدم تأثیرگذاری امواج الکترومغناطیسی به وجود آمده از این تجهیزات، بر روی سیستم‌های حساس مجاور می‌باشد. سیگنال‌های تداخلی تشعشعی که به وسیله میدان الکترومغناطیسی تولید می‌شوند، می‌توانند با حفاظت‌سازی الکترومغناطیسی (ایجاد سپر الکترومغناطیسی) در منبع و یا گیرنده به طور مؤثر تقلیل یابند. یک حفاظ الکترومغناطیسی، شدت میدان الکتریکی و یا مغناطیسی را بر روی سطح حفاظ دور از منبع تداخلی کاهش می‌دهد [۱].

در حال حاضر اتاق‌های حفاظت فلزی (شیلتر) و یا محفظه‌های حفاظت جهت این موضوع مورد استفاده قرار می‌گیرد که دارای معایبی از قبیل سنگین بودن، حجیم بودن (اتاق‌های آماده که برای حمل و نقل آنها نیاز به وسایل خاصی می‌باشد)، امکان وجود منافذ نفوذ امواج و یا ایجاد منافذ جدید، گران بودن و ... می‌باشند [۱].

آرمانتوربندی به وسیله فولاد در دیوارهای ساختمان‌های بتنی می‌تواند حفاظت‌سازی مناسبی برای فرکانس‌های پایین ایجاد نماید. البته باید این آرمانتوربندی در داخل بتن تشکیل یک شبکه یکپارچه نماید [۲].

این مشکلات حفاظت‌کننده‌های فلزی و اهمیت حفاظت از تأسیسات و سایت‌های حیاتی و حساس در مقابل تهدیدات

الکترومغناطیسی و همچنین استفاده از مصالح بتنی در ساخت این ابنیه‌ها نویسندگان این تحقیق را به سمت طرح اختلاط بتنی که بتواند به عنوان حفاظ الکترومغناطیسی در فرکانس بالا، به کار رود سوق داد.

۲. مبانی نظری و روش تحقیق ساختار مواد حفاظت الکترومغناطیسی

۲-۱. حفاظ‌سازی الکترومغناطیسی

کیفیت حفاظ‌سازی^۳ (SE)، به صورت نسبت شدت میدان الکتریکی ورودی (E_۱) به شدت میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده در داخل حفاظ (E_۲) بیان می‌شود و بر حسب دسی‌بل محاسبه می‌گردد.

به طور کلی سازوکار حفاظ‌سازی به سه صورت انجام می‌شود: اتلاف جذب^۴ (A)، اتلاف انعکاس^۵ (R) و اتلاف ناشی از بازتابش دوباره^۶ (B) در درون حفاظ (همگی بر حسب dB).

$$SE = A + R + B \quad (۱) \quad \text{بر حسب dB}$$

مقدار اتلاف جذب از رابطه (۲) به دست می‌آید. در این رابطه f فرکانس بر حسب هرتز، μ ضریب گذردهی مغناطیسی نسبی ماده حفاظ و σ رسانایی نسبی ماده حفاظ نسبت به مس می‌باشد.

چنانچه حفاظ دارای ضخامت t (بر حسب سانتی‌متر) باشد، اتلاف جذب عبارتست از [۳ و ۴]:

$$A = 1.31 t \cdot \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (۲)$$

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای طراحی حفاظ، ضریب گذردهی مغناطیسی و رسانایی الکتریکی مواد حفاظ می‌باشند.

۲-۲. استفاده از کربن سیاه در مواد جاذب امواج

در تحقیق به عمل آمده توسط آقای بین وین^۷ جذب امواج الکترومغناطیسی در نوار X و Ku توسط کربن سیاه مورد بررسی قرار گرفته است. پودر کربن ناشی از تجزیه کربن سیاه^۸ (CPCCB) پس از گرما دیدن کربن سیاه با آهن نانو اندازه کاتالیز در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار یک اتمسفر حاصل می‌شود. ضرایب گذردهی و دی‌الکتریک CPCCB در نوار X و Ku به وسیله روش گذردهی و انعکاس امواج به دست می‌آید [۵]. شکل‌های (۱ و ۲) ثابت دی‌الکتریک و گذردهی مغناطیسی CPCCB را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد [۵].

³ Shielding Effectiveness

⁴ Absorption Loss

⁵ Reflection Loss

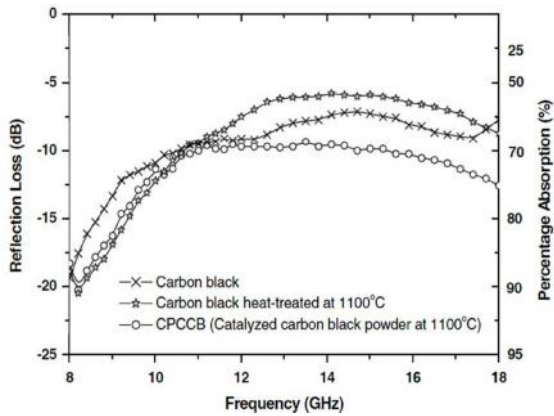
⁶ Re-Reflection

⁷ Bin Wen

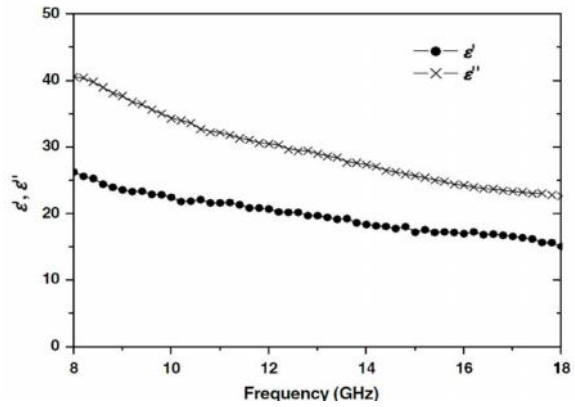
⁸ Carbon Powder from Catalyzed Carbon Black

¹ EMB

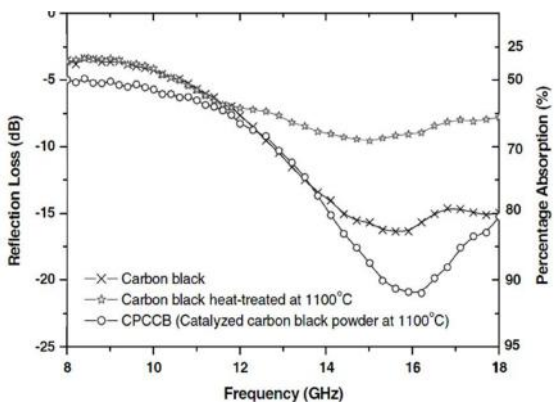
² HPM



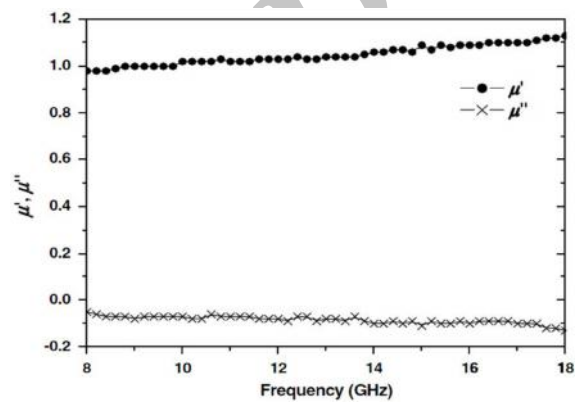
شکل ۳. افت انعکاس و درصد جذب ماده CPCCB به مقدار ۳٪ مخلوط در کامپوزیت پارافین با ضخامت ۶ میلی‌متر [۵]



شکل ۱. گذردهی مختلط نسبی ε'' و گذردهی حقیقی ε' ماده CPCCB به عنوان تابعی از فرکانس [۵]



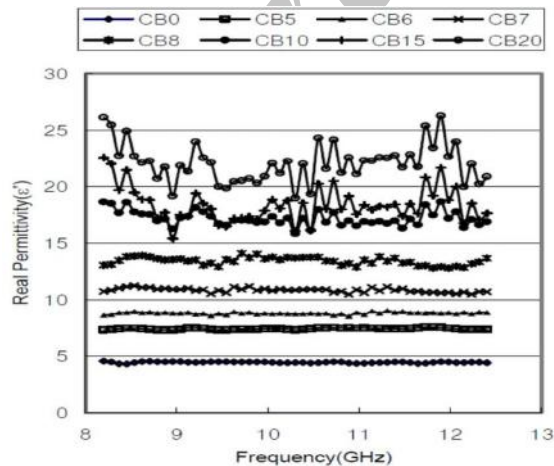
شکل ۴. افت انعکاس و درصد جذب ماده CPCCB به مقدار ۶٪ مخلوط در کامپوزیت پارافین با ضخامت ۶ میلی‌متر [۵]



شکل ۲. گذردهی مغناطیسی مختلط موهومی (μ'') و حقیقی (μ') ماده CPCCB به عنوان تابعی از فرکانس [۵]

جدول ۱. درصدهای مختلف کربن سیاه مورد تحقیق [۶]

Denotation	CB0	CB5	CB6	CB7	CB8	CB10	CB15	CB20
Contents of carbon black	0%	5%	6%	7%	8%	10%	15%	20%



شکل ۵. گذردهی حقیقی ε' ماده کامپوزیت کربن سیاه و درصدهای مختلف کربن سیاه [۶]

شکل‌های (۳) و (۴) افت انعکاس و درصد جذب CPCCB با ۳ و ۶ درصد کربن سیاه در پارافین مخلوط شده است را نشان می‌دهد.

در تحقیق دیگری که توسط آقای جانگ هون و همکاران آن در خصوص طراحی و آنالیز مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی توسط سطح کامپوزیت کربن سیاه صورت گرفته است، گذردهی (ε) کربن سیاه مورد بررسی قرار گرفت و افت انعکاس آن شبیه‌سازی شده است [۶]. نتایج حاصله به شرح شکل‌های (۵) و (۶) می‌باشد.

گذردهی مختلط نسبی (ε_r) دارای یک جزء موهومی و یک جزء حقیقی می‌باشد. با توجه به جزء استفاده شونده برای جذب موج که سازوکار جذب آن بر اساس تانژانت افت دی‌الکتریک می‌باشد (روابط (۱) و (۲))، در این صورت بزرگی قسمت موهومی گذردهی مختلط باعث افزایش جذب موج می‌شود [۷].

$$\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (1)$$

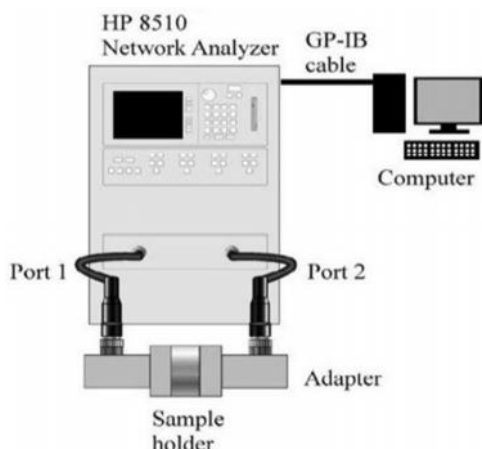
$$\tan \delta_e = \epsilon'' / \epsilon' \quad (2)$$

در روابط فوق ε_r گذردهی مختلط نسبی، ε' گذردهی حقیقی، ε'' گذردهی موهومی و tan δ_e تانژانت اتلاف موج را بیان می‌کند.

شکل (۷) شبیه‌سازی افت انعکاس سطوح با ضخامت‌های مختلف و ۶ درصد کربن سیاه مخلوط در آن را نشان می‌دهد.



شکل ۸. کربن سیاه شماره ۵۵۰N و دانه‌های به ضخامت ۵۵-۳۹ نانومتر



شکل ۹. دستگاه HP8510 Network Analyzer جهت اندازه‌گیری مقدار عبور و انعکاس امواج

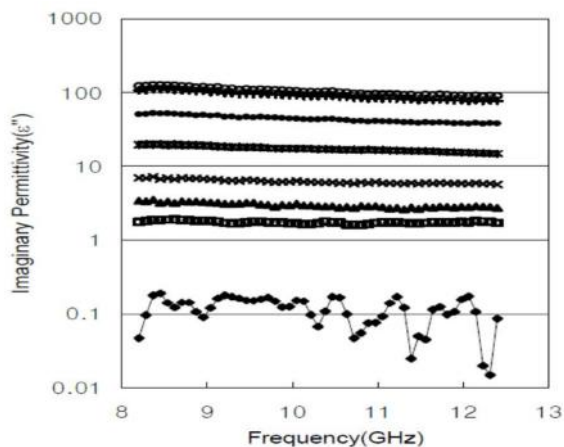
آزمایش اول: مقایسه مقدار انعکاس بتن معمولی به عنوان شاخص و بتن حاوی کربن سیاه؛ برای این منظور مقدار انعکاس موج از یک قطعه بتنی $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری (شکل ۱۰) به عنوان شاخص و یک قطعه بتن با همین ابعاد که حاوی ۵ درصد کربن سیاه می‌باشد (شکل ۱۱)، با یکدیگر مقایسه شد.



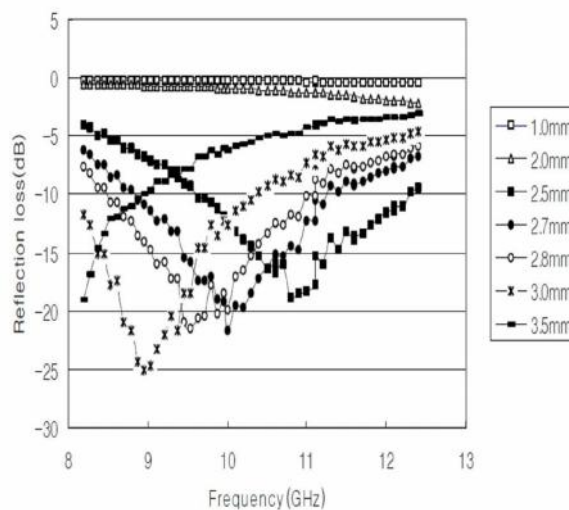
شکل ۱۰. یک قطعه بتنی $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری به عنوان شاخص در اندازه‌گیری



شکل ۱۱. یک قطعه بتنی $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری و ۵ درصد کربن سیاه مخلوط در آن



شکل ۶. گذردهی مختلط نسبی "ε" ماده کامپوزیت کربن سیاه و درصدی مختلف کربن سیاه [۶]

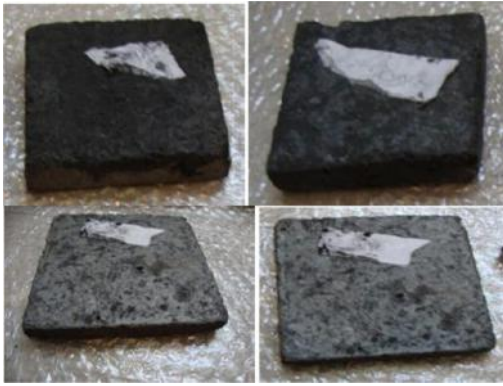


شکل ۷. افت انعکاس شبیه‌سازی شده کامپوزیت به مقدار ۶٪ کربن سیاه مخلوط در آن و ضخامت‌های مختلف [۶]

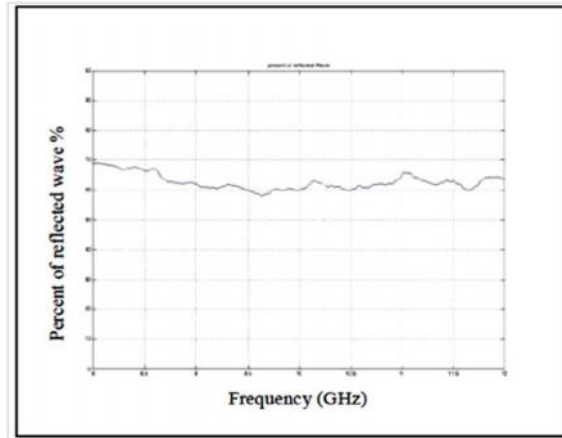
۳. نتایج و بحث

براساس تحقیق آقای بین وین در خصوص جذب امواج الکترومغناطیس در نوار X و Ku توسط کربن سیاه و نتایج حاصل از آن و همچنین تحقیق آقای جانگ هون و تحقیقات دیگر در خصوص کربن سیاه، نشان می‌دهد که کربن سیاه جهت ساخت مواد جذب امواج الکترومغناطیسی مناسب می‌باشد. بنابراین نویسندگان این پژوهش اقدام به بررسی و تحلیل طرح اختلاط‌های متفاوتی از بتن جهت ساخت بتنی رسانا با استفاده از کربن سیاه که توانایی جذب و انعکاس مناسب امواج را داشته باشد، نمودند.

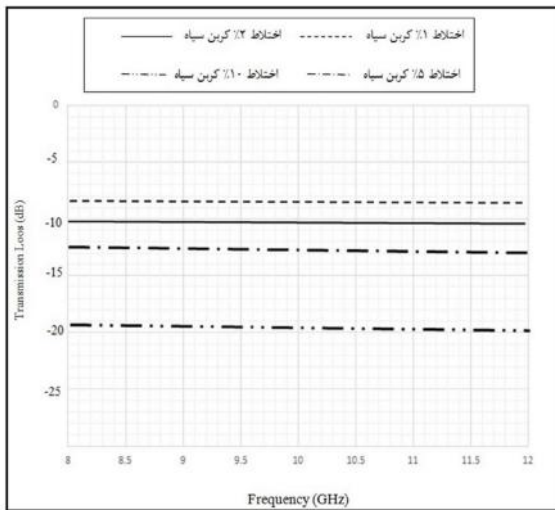
کربن سیاه به کار رفته در این تحقیق دارای شماره ۵۵۰N و ذره‌هایی به اندازه قطر ۵۵-۳۹ نانومتر (شکل ۸) می‌باشد. این آزمایشات در فرکانس ۸GHz تا ۱۲GHz که نوار X از طیف امواج راداری می‌باشد، و توسط دستگاه Network Analyzer HP8510C مطابق شکل (۹) اندازه‌گیری شد که نتایج آن به شرح ذیل است:



شکل ۱۴. قطعات بتنی ۱۰×۱۰×۲ با درصدهای مختلف کربن سیاه



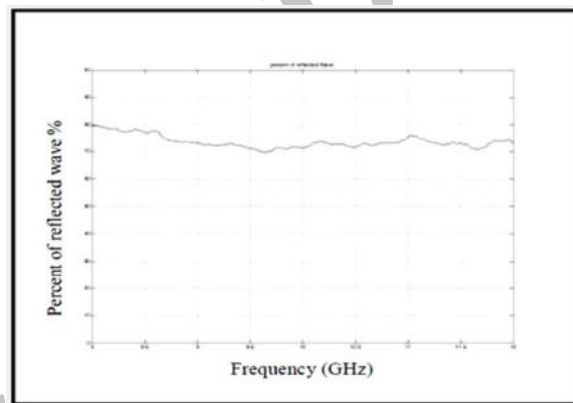
شکل ۱۲. نمودار مقدار درصد انعکاس امواج از قطعه بتنی شاخص



شکل ۱۵. نمودار مقدار تضعیف موج از بتن ۱۰×۱۰×۲ سانتی متری با درصدهای مختلف کربن سیاه بر حسب dB- (نتایج اندازه گیری شده)

آزمایش سوم: تأثیر ضخامت بتن بر مقدار تضعیف امواج در حالت مقدار ثابت کربن سیاه. در این آزمایش تأثیر ضخامت بتن بر مقدار عبور امواج مورد بررسی قرار گرفت. یک گرم کربن سیاه در قطعات بتنی ۱۰×۱۰ با ضخامت‌های متفاوت ۱، ۲، ۵ سانتی متر اضافه شد (شکل (۱۶))، و سپس نمودار تضعیف آن‌ها مقایسه گردید و نتیجه ذیل حاصل شد:

- قطعه بتنی با ضخامت ۱ سانتی متر حدود ۵/۵ dB - افت انتقال دارد و با افزایش ضخامت مقدار افت بیشتر شده به طوری که در ضخامت ۵ سانتی متر حدود ۱۹/۵ dB - افت می‌باشد. این مطلب نشان دهنده تأثیر مستقیم ضخامت بتن بر مقدار حفاظت‌سازی می‌باشد. به نحوی که با افزایش ضخامت بتن مقدار تضعیف اندازه‌گیری شده بیشتر می‌شود.



شکل ۱۳. نمودار مقدار درصد انعکاس امواج از قطعه بتنی با ۵٪ کربن سیاه

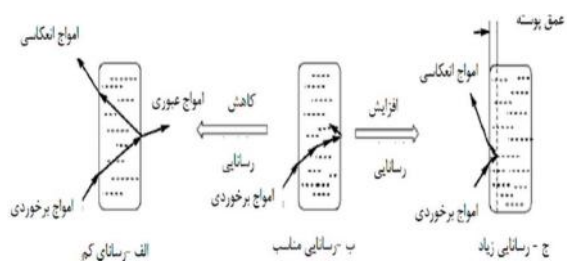
از مقایسه نمودارهای شکل (۱۲ و ۱۳) نتیجه ذیل به دست آمد:
- با افزایش ۵ درصد کربن سیاه به یک قطعه بتنی مقدار انعکاس موج در نوار X از حدود ۶۰٪ به حدود ۷۵٪ در بتن با ابعاد مشابه افزایش می‌یابد.

آزمایش دوم: تأثیر مقدار تضعیف عبور امواج در قطعات بتنی با ضخامت ۲ سانتی متر و مقادیر متغیر کربن سیاه؛ در این آزمایش تأثیر مقدار کربن سیاه مخلوط در بتن و اثر آن بر مقدار تضعیف موج مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش یک بتن ۱۰×۱۰ سانتی متری با ضخامت ۲ سانتی متر و ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد کربن سیاه مورد آزمایش قرار گرفت (شکل (۱۴))، و نتیجه ذیل حاصل شد:

- قطعه بتنی با ۱ درصد کربن سیاه دارای حدود ۸/۵ dB - افت انتقال است (شکل (۱۵)) و هر چه مقدار کربن سیاه اضافه می‌گردد عبوردهی امواج کمتر می‌شود و در حالت ۱۰ درصد کربن سیاه به کمترین مقدار عبوردهی امواج یعنی افت انتقال ۱۹/۳۵ dB - می‌رسد.

سیاه اضافه می‌گردد عبوردهی امواج کمتر می‌شود. در حالت ۱۰ درصد کربن سیاه مخلوط در آن به کمترین مقدار عبوردهی امواج یعنی افت انتقال ۱۹/۳۵ dB می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد قطعه بتنی فوق می‌تواند به عنوان حفاظ الکترومغناطیسی استفاده شود.

بررسی سازوکارهای جذب و انعکاس موج نشان می‌دهد که با افزایش کربن سیاه و به طبع افزایش رسانایی بتن، افت رسانایی افزایش می‌یابد. در این صورت عمق نفوذ موج خیلی کم بوده و تقریباً بیشتر موج الکترومغناطیسی به وسیله بتن رسانا منعکس یا جذب می‌شود (شکل (۱۸)).



شکل ۱۸. عبور موج الکترومغناطیسی از مواد با رسانایی متفاوت [۸]

همچنین در طی آزمایش‌های فوق مشاهده شد که افزایش کربن سیاه شماره ۵۵۰N که دارای ذرات بسیار ریزی است، باعث استحکام و مقاومت فشاری بتن می‌شود.

در آزمایش ۴۲ روزه نمونه‌ها و مقایسه آن با قطعه بتنی بدون کربن سیاه نشان داد که کربن سیاه تأثیر زیادی در مقاومت فشاری آن دارد. البته استفاده بیشتر از ۲ درصد کربن سیاه با کمک روان‌کننده‌های بتن مقدور است. شایان ذکر است که استفاده بیشتر از کربن سیاه ممکن است خواص بتن را تغییر دهد. البته می‌توان از کربن سیاه به صورت‌های دیگری در مصالح ساختمانی استفاده کرد، مانند لایه‌هایی به شکل بتونه ساختمان و یا مخلوط در رنگ به دیواره‌ها کشید و اگر پیوستگی کامل در آن رعایت شود به عنوان حفاظ الکترومغناطیسی می‌تواند به کار رود. به کارگیری این مورد نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

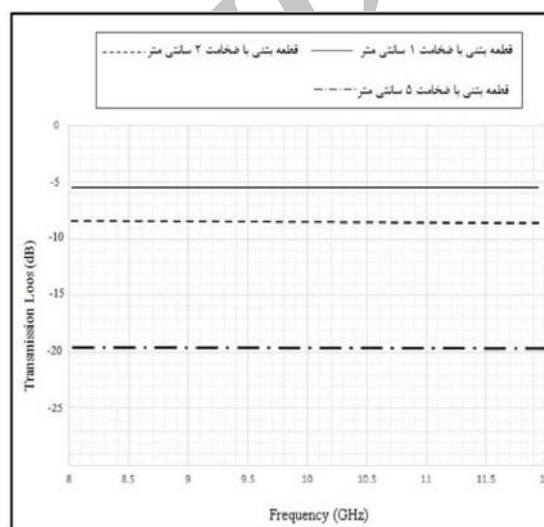
بتن رسانا پیشنهادی توسط نویسندگان جهت حفاظ الکترومغناطیسی دارای محاسن ذیل است:

- حفاظسازی فضاهای زیرساختی مراکز حیاتی و حساس با استفاده از مصالح بتنی رسانا و کاهش اثر امواج الکترومغناطیسی تا سطح dB -۵۰ (حدود ۹۹,۹۹۹ درصد) به آسانی و توانمندی در ایجاد لایه‌های متعدد و ضخیم‌تر برای مکان‌های خیلی حیاتی تا سطح dB -۹۰ و بالاتر.

- کاهش هزینه بسیار زیاد به نسبت مواد فلزی متداول که در حفاظسازی فضاها استفاده می‌شود. کربن سیاه مورد استفاده قیمت بسیار پایین‌تری نسبت به محافظ فلزی دارد.



شکل ۱۶. قطعات بتنی ۱۰×۱۰ با قطرهای ۱,۲ و ۵ سانتی‌متری و ۱ درصد کربن سیاه



شکل ۱۷. نمودار مقدار تضعیف موج از بتن ۱۰×۱۰ با ضخامت‌های مختلف ۱، ۲، ۵ سانتی‌متر و ۱ درصد کربن سیاه مخلوط در آن بر حسب dB- (نتایج اندازه‌گیری شده)

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های به عمل آمده نتایج ذیل حاصل شد:

- با افزایش ۵ درصد کربن سیاه به یک قطعه بتنی مقدار انعکاس موج در نوار X از حدود ۶۰٪ در یک قطعه بتنی با ابعاد مشابه به حدود ۷۵٪ افزایش می‌یابد.

- با افزایش ضخامت بتن و بالا بردن مقدار کربن سیاه می‌توان مقدار انعکاس و جذب امواج را افزایش داد و در نهایت ضریب حفاظسازی بتن را افزایش داد. رابطه (۲) نیز که در خصوص اتلاف جذب می‌باشد، نمایانگر آن است که مقدار جذب رابطه مستقیم با ضخامت قطعه دارد.

- قطعه بتنی با ضخامت ۲ سانتی‌متر و ۱ درصد کربن سیاه مخلوط در آن دارای حدود dB -۸/۵ افت انتقال است و هرچه مقدار کربن

۵. مراجع

- [1] Mardani Shahrehabak, M. "Study of Electromagnetic Threats and Provide Solutions to Collate IT"; Research Project, Imam Hossein University, 2012, Vol. I, 4 (In Persian).
- [2] Danaee, M. M. "Retrofit Solutions and Introduce Standards in the Field of Electromagnetism"; Islamic Azad University Publishing, Electronic Unit, Page 92-93, 2010 (In Persian).
- [3] Hemming, L. H. "Architectural Electromagnetic Shielding Hand Book"; IEEE Press., 1991.
- [4] Clayton R, Paul. "Introduction to Electromagnetic Compatibility"; Simultaneously in Canada, Second Ed., 733, 2006
- [5] Bin W. "Electromagnetic Wave Absorption Properties of Carbon"; Natural Science Foundation of China, April 2006.
- [6] Jung-Hoon, Oh.; Kyung-Sub, Oh. "Design and Analysis of Electromagnetic Wave Absorbing Structure using Layered Composite Plates"; Publisher ACCM, Jul-2002
- [7] Huber, T.; Saville, P.; Edwards, D. "Investigations into the Polyaniline and Polypyrrole Families of Conducting Polymers for Application as Radar Absorbing Materials"; Defence R&D Canada, 2003.
- [8] Huo, J.; Wang, L.; Haojie, Y. "Polymeric Nanocomposites for Electromagnetic Wave Absorption"; J. of Materials Science 2009, 44, 3917-3927.

- حمل و اجرای آسان و قابلیت عملیاتی کردن در محیطها و شرایط مختلف.

- امکان استتار تجهیزات فرستنده و گیرنده رادیویی.

- در دسترس بودن مواد ساخت بتن رسانا.

- عدم وجود درز و یا شکاف در حفاظ الکترومغناطیسی و همچنین ایجاد درز و شکاف در آن به راحتی نمی‌باشد.

- امکان ایجاد شکلها و اندازه‌های مختلف متناسب با تجهیزات و تأسیسات موجود.

- افزایش مقاومت بتن و در نتیجه استحکام ابنیه.

Archive of SID