

## بررسی تأثیر مقادیر مختلف نانولوله کربن و کیفیت پخش آن‌ها بر عملکرد دینامیک حسگرهای هوشمند بتنی

مصطفی آدرسی\*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت

مدرس، تهران

ابوالفضل حسنی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

محمدرضا سلیمانی کرمانی، استادیار، پژوهشگاه حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و

شهرسازی، تهران

علی یزدیان ورجانی، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: Mostafa.Adressi@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۶ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۶

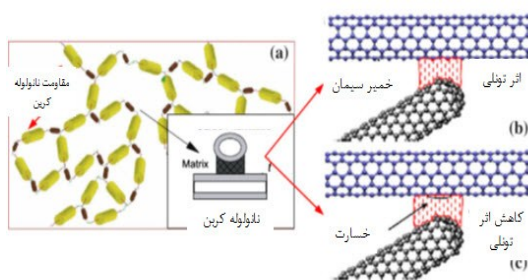
### چکیده

امروزه، ساخت و توسعه رویه‌های بتنی ارزان‌قیمت هوشمند مورد توجه قرار گرفته است. هوشمندسازی رویه بتنی به جسم روسازی این توانایی را می‌بخشد که در عین باربری، توانایی تشخیص گسترش خرابی با گذشت زمان و یا نیروهای وارده به روسازی را پیدا می‌کند. حسگرهای بتنی با استفاده از اختلاط مواد هادی، از قبیل نانولوله‌های کربنی، با بتن روسازی ساخته می‌شوند. با پایش تغییر مقاومت الکتریکی عبوری از حسگرهای جا داده شده در جسم روسازی راه، میزان تغییرات بارگذاری یا رشد خرابی مشخص می‌شود. نکته اصلی در استفاده از این حسگرها، بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر در فرایند ساخت، بر عملکرد این حسگرها است. در این تحقیق، تأثیر دو پارامتر کیفیت پخش نانولوله‌ها در حسگر و مقدار نانولوله کربن که در فرایند ساخت این حسگرها نقش اصلی را دارند، بر عملکرد حسگرها، ارزیابی شد. در این پژوهش، حسگرهای مختلف حاوی مقادیر ۰/۱، ۰/۱۲۵، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد وزنی سیمان، نانولوله کربن چنددیواره که با سطوح انرژی (یک ساعت حمام اولتراسونیک، دو ساعت حمام اولتراسونیک و یک ساعت حمام اولتراسونیک به همراه ۹۰ دقیقه اولتراسونیک میله‌ای) ساخته شدند و بر اساس معیارهای عملکردی مختلف از قبیل حساسیت، تکرارپذیری (درونی و بیرونی) و پسماند تأثیر هر یک از این عوامل تحت بارگذاری دینامیک ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از انرژی بیشتر در فرایند پخش نانولوله کربن در فاز آبی، باعث پخش همگن‌تر نانومواد در داخل حسگر شده و این پارامتر نسبت به پارامتر مقدار نانولوله کربن تأثیر بیشتری بر معیارهای حسگر بتنی خواهد داشت. همچنین، در یک سطح انرژی ثابت، با افزایش میزان نانولوله کربن، معیارهای عملکردی حسگر بهبود می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: حسگر بتنی، نانولوله کربن، کیفیت پخش، عملکرد

## ۱. مقدمه

قرارگیری شبکه نانولوله‌های کربنی و تعداد محل‌هایی که نانولوله‌ها با هم مرز مشترک دارند وابسته است. این عامل، به کیفیت پخش نانولوله‌ها وابسته است. از مقاومت خود نانولوله‌ها در مقابل مقاومت تونلی، که بسیار بیشتر از مقاومت ذاتی نانولوله‌های کربنی است، صرف‌نظر می‌شود. از این رو، مقاومت حسگرها ناشی از مقاومت تونلی آن‌هاست. مقاومت تونلی ناشی از تغییرات در میزان ضخامت سطح تماس خمیر سیمان با نانولوله‌های کربنی ناشی از بار اعمالی است. در حالتی که بار باعث فشردن ناحیه انتقالی شود، سبب نزدیک شدن دو نانولوله به هم شده و مقاومت کاهش می‌یابد. ولی در صورتی که بار باعث کشیده شدن ناحیه انتقالی شود، در این حالت تماس بین خمیر سیمان با نانولوله‌های کربنی تا حدودی کم شده و باعث افزایش مقاومت می‌شود (گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱).

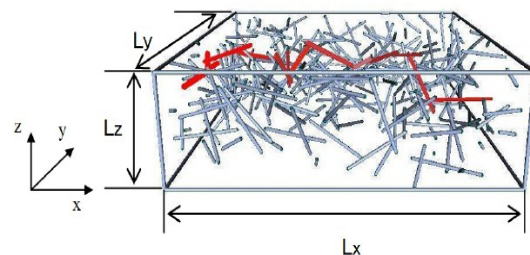


شکل ۲. مکانیزم عمل نانولوله کربن در تشخیص بار

### یا خرابی

ایجاد خاصیت رسانایی الکتریکی در مصالح می‌تواند از جهات مختلفی مفید باشد، از جمله ساخت حسگرهای فشارسنج الکتریکی با قابلیت برداشت تنش- کرنش و یا بار- تغییر مکان (چن و چانگ، ۱۹۹۶؛ سان و همکاران، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴؛ هان و همکاران، ۲۰۰۷؛ زیا و همکاران، ۲۰۱۱؛ اظهاری و

حسگر، ساخته‌ای است که پیشامد یا مقدار تغییرات پارامتری را شناسایی کرده و در قالب خروجی مرتبط (عموماً سیگنال الکتریکی یا نوری) نشان می‌دهد (ویلسون، ۲۰۰۵). ایجاد خاصیت تشخیص به بتن با اضافه کردن الیاف یا ذرات هادی در مقیاس و جنس-های مختلف امکان‌پذیر است (ویلسون، ۲۰۰۵؛ گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱؛ بازا و همکاران، ۲۰۱۳؛ پروین و همکاران، ۲۰۱۳؛ سان و همکاران، ۲۰۱۴-ب)؛ اظهاری و بانثیا، ۲۰۱۵؛ هان و همکاران، ۲۰۱۵). با اضافه کردن الیاف هادی مانند نانولوله کربنی به بتن، به دلیل ایجاد شبکه‌های فضایی از الیاف نانولوله کربنی (شکل ۱)، یک شبکه هادی در بتن ایجاد شده و بتن هادی می‌شود (گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱).

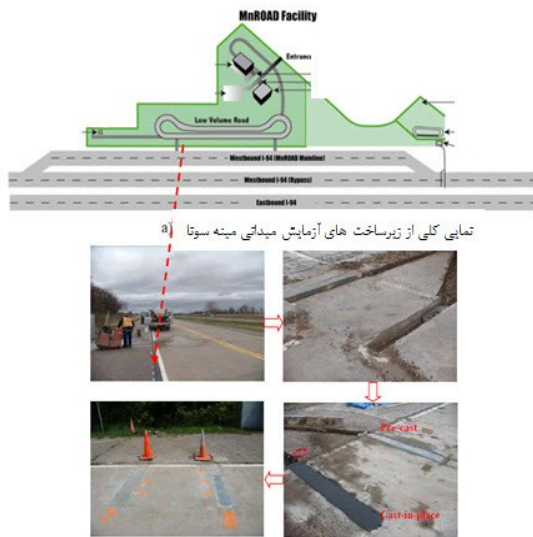


شکل ۱. مکانیزم کارکرد حسگر بتنی (گپالاکریشنا و

همکاران، ۲۰۱۱)

بر اساس تحقیقات به‌عمل آمده، مقاومت حسگر تهیه شده از نانولوله‌های کربنی در خمیر سیمان از دو مقدار نشأت می‌گیرد: اول، مقاومت خود نانولوله‌های کربنی و دیگری مقاومت خمیر سیمان در مرز مشترک بین دو نانولوله کربنی است که از آن به مقاومت تونلی نیز نام برده می‌شود (شکل ۲). مقاومت حسگرهای فشارسنج الکتریکی تا حدود زیادی به چگونگی

و دقیق تر بود.



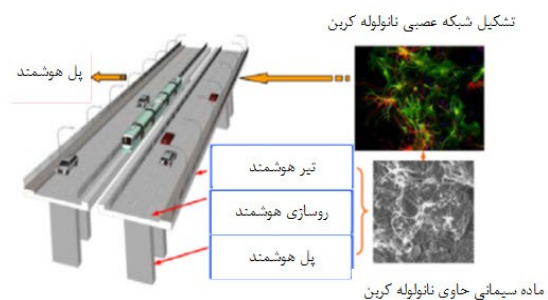
شکل ۴. ساخت و اجرای بتن هوشمند در محوطه مسیر آزمایشی واقع در ۴۰ کیلومتری مینیاپولیس (گپالاکریشنا و همکاران؛ ۲۰۱۱، هان و همکاران، ۲۰۱۵)

حسگر فشارسنج الکتریکی قادر به تشخیص نیروی وارده به سازه بر اساس تغییرات مقاومت الکتریکی است. اساس کار فشارسنج الکتریکی بر پایه رسانایی الکتریکی تونلی<sup>۲</sup> نانولوله‌های کربنی استوار است. خاصیت رسانایی الکتریکی تونلی در مقادیر کم نانولوله کربن ایجاد می‌شود (گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱؛ لی و همکاران، ۲۰۰۷؛ سان و همکاران، ۲۰۱۴-ب).

ولی حسگر سنجش خرابی بر پایه رسانایی الکتریکی تماسی<sup>۳</sup> استوار است. بدین معنی که با افزایش مقدار نانولوله کربن در بتن، شبکه سه‌بعدی تماسی نانولوله‌ها با هم ساخته می‌شود (گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱؛ هان و همکاران، ۲۰۱۵). هنگامی که مقدار نانولوله کربن از آستانه تراوایی الکتریکی<sup>۴</sup> فراتر می‌رود،

<sup>۲</sup> - Tunneling conduction  
<sup>۳</sup> - Contacting conduction  
<sup>۴</sup> - Percolation threshold

بانتیا، ۲۰۱۲) یا حسگرهایی با قابلیت برداشت میزان خسارت در بتن (ونگ و چانگ، ۱۹۹۷؛ بنتا و همکاران، ۲۰۰۰؛ ون و چانگ، ۲۰۰۶؛ سافی، ۲۰۰۹؛ گلائو و همکاران، ۲۰۱۴). ویدو ۲۰۱۰ با استفاده از مصالح سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های کربنی پلی را ساخت و با بهره‌گیری از خواص خودتشخیصی مصالح بتنی، سلامت سازه را بررسی کرده و همچنین سرعت، وزن محور و جریان ترافیک عبوری روی پل را نشان داد (شکل ۳) (گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۳. هوشمندسازی پل از نظر سازه‌ای و ردیابی ترافیکی با استفاده از نانولوله کربن (گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱)

در تحقیق دیگری که زیر نظر اداره تحقیقات راه مینه‌سوتا (MnROAD) در محلی به فاصله ۴۰ کیلومتری از مینیاپولیس در مسیر آزمایش‌های میدانی<sup>۱</sup> انجام شد (شکل ۴) از دو نوع حسگر بتنی (ساخته شده در محل و ساخته شده در آزمایشگاه و نصب شده در محل) به همراه کرنش‌سنج‌هایی که در محل آرماتورهای طولی قطعات بتنی نصب شده‌اند استفاده شد (گپالاکریشنا و همکاران، ۲۰۱۱؛ هان و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج نشان داد که پاسخ حسگرهای بتنی در تشخیص میزان بار وارد شده توسط کامیون به جسم روسازی، از پاسخ حسگرهای الکترومکانیکی، واضح‌تر

<sup>۱</sup> - Test track

مختلفی از مقادیر متفاوتی (۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ درصد وزنی سیمان) از الیاف کربنی ساختند و تحت بارگذاری دینامیک فشاری قرار دادند. آن‌ها دریافتند که حسگرهای ساخته شده با درصد‌های وزنی سیمان ۰/۷ و ۰/۹ دارای حساسیت و تکرارپذیری حداکثر می‌باشند. هان و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که با افزایش مقدار نانولوله کربن در یک حسگر بتنی از ۰/۱ درصد وزنی سیمان به ۲٪ وزنی سیمان، حساسیت حسگرها نیز افزایش می‌یابد. لی و همکاران (۲۰۰۶) نیز با افزودن مقادیر مختلف کربن سیاه به خمیر سیمان، مشاهده نمودند که در صورتی که ۳/۱۱ درصد حجمی کربن سیاه مصرف شود بتن ساخته شده خاصیت حس نیروی وارده را ندارد. ولی با افزایش مقدار کربن سیاه به ۸/۷۹ درصد حجمی، مقدار حساسیت حسگر به حداکثر خود افزایش یافته و در ادامه با افزایش بیشتر مقدار کربن سیاه، حساسیت حسگر کاهش می‌یابد. در تحقیقی، تومت و ایلکیم (۲۰۱۳) حساسیت بتن مسلح شده با مقادیر متفاوت الیاف فولادی را تحت بارگذاری کششی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که حساسیت و ضریب همبستگی خطی کرنش حسگر با افزایش میزان الیاف فولادی افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که حساسیت حسگر ساخته شده ۲۶۰۰ برابر از حساسیت حسگرهای الکترومکانیکی موجود بیشتر است. همچنین، با افزایش مقدار الیاف کربن، مقدار خطی بودن پاسخ حسگر نیز کاهش می‌یابد. همانند خواص مکانیکی مصالح سیمانی مسلح شده با نانولوله‌های کربنی، خواص الکتریکی و فشارسنجی الکتریکی این نوع نانوکامپوزیت‌ها نیز به عوامل زیادی از قبیل: نوع، مقدار و فعالیت سطحی نانولوله کربن، کیفیت پراکندگی نانولوله کربن و نوع مقدار فعال‌کننده سطحی و همچنین ترکیب خمیر سیمان وابسته است (هان و همکاران، ۲۰۱۵) بر این اساس، در

رسانایی الکتریکی تماسی بر رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها تأثیرگذار خواهد شد. در نتیجه، شبکه سه‌بعدی اتصال بین نانولوله کربن پایدارتر شده و مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها دیگر وابسته به مقدار نانولوله‌های کربنی و بار خارجی نخواهد بود (سافی، ۲۰۰۹؛ ون و چانگ، ۲۰۰۱). به هر حال، شبکه رسانایی تماسی زمانی می‌تواند تشکیل شود که مقدار نانولوله‌های کربنی زیاد باشد. در نتیجه، مقدار مؤثر نانولوله کربن در ملات سیمان باید بیشتر از مقداری باشد که در خمیر سیمان استفاده می‌گردد (هان و همکاران، ۲۰۱۱).

بر اساس تحقیقات به عمل آمده، علاوه بر تغییرات نیروی خارجی که باعث تغییرات پاسخ حسگر می‌شود، عوامل دیگری همچون اجزای سازنده حسگر، فناوری ساخت حسگر و شرایط محیطی بر پاسخ حسگر اثر می‌گذارند (زیا و همکاران، ۲۰۱۱). هان و او (۲۰۰۷) و هان و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی عملکرد حسگرهای فشارسنج الکتریکی پایه سیمانی، معیارهایی از قبیل حساسیت، خطی بودن، تکرارپذیری و پسماند را برای بررسی رفتار حسگرهای مختلف معرفی کردند. سان و همکاران (۲۰۱۴- الف) نیز حسگرهای فشارسنج الکتریکی را برای بررسی سطح سلامت سازه‌های بتنی پرمقاومت بر اساس دو معیار حساسیت و تکرارپذیری ارزیابی نمودند. یکی از عوامل اصلی اثرگذار در ایجاد یک شبکه هادی در داخل بتن، به گونه‌ای که تأثیر زیادی بر پاسخ این گونه حسگرها دارد، مقدار و نوع ماده هادی است. ونگ و همکاران (۲۰۰۲) گزارش دادند که معیار حساسیت حسگر حاوی الیاف کربن تحت بارگذاری خمشی، با افزایش مقدار الیاف، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. جیان و همکاران (۲۰۰۳) حسگرهای

به جهت ساخت حسگر بتنی، از طرح اختلاط مشخص ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد. سیمان مورد استفاده از نوع تیپ ۲، محصول کارخانه آبیگ استان تهران، است. به منظور پخش نانولوله کربن، از ماده فعال‌کننده سطحی ترکیبی فوق‌روان‌کننده و SDS<sup>۴</sup> به نسبت ۹ به ۱ استفاده شد (شریفی و جوادیان، ۱۳۹۱).

این تحقیق، دو فاکتور مؤثر مقدار نانولوله کربن و کیفیت پخش آن‌ها (متأثر از میزان انرژی استفاده شده در فرایند پخش نانولوله‌ها در فاز آبی)، که بر اساس مراجع مرتبط دارای بیشترین تأثیر بر عملکرد حسگر می‌باشند، به عنوان دو متغیر اصلی در عملکرد حسگر بتنی مورد بررسی قرار می‌گیرند و عواملی چون طرح اختلاط بتن، شرایط عمل‌آوری جنس و تعداد الکترودهای فلزی متصل شده به دو انتهای حسگر، ماده فعال‌کننده سطحی، جنس ماده هادی و نوع نانولوله کربن مصرفی ثابت فرض می‌شوند. لذا، نوآوری این تحقیق، بررسی میزان تأثیرگذاری هر یک از دو متغیر فوق بر عملکرد حسگر بتنی است. با توجه به منابع مختلف (هان و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵؛ ویلسون، ۲۰۰۵)، حسگرها می‌بایست دارای خواص متعددی از قبیل تکرارپذیری<sup>۱</sup>، حساسیت<sup>۲</sup> مناسب به تغییرات تلاش ورودی، بین شکل نیروی اعمال شده (ورودی) و شکل پاسخ حسگر و حداقل پسماند<sup>۳</sup> باشند. لذا، به منظور بررسی عملکردی حسگر بتنی، معیارهای مختلفی بر اساس خواص پایه‌ای حسگرها تعریف شدند و عوامل مختلف مقدار و کیفیت پخش نانولوله‌ها بر اساس هر یک از این معیارها مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲- روش کار و مواد و مصالح مصرفی

### ۲-۱ مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق، از نانولوله کربن چنددیواره با مشخصات درج شده در جدول ۱ استفاده شد. همچنین،

<sup>۴</sup> - Sodium dodecyl sulfate

<sup>۱</sup> - Repeatability

<sup>۲</sup> - Sensitivity

<sup>۳</sup> - Hysteresis

جدول ۱. مشخصات نانولوله کربن چنددیواره

نوع افزودنی	مشخصه (شرکت تولیدکننده)	قطر نانولوله-ها (نانومتر)	طول نانولوله‌ها (میکرومتر)	مقاومت کششی (Gpa)	خلوص جرم ویژه (اهم- سانتی- متر)	هدایت الکتریکی
نانولوله کربن	MWCNT (پژوهشگاه صنعت نفت)	۱۰-۲۰	۱۰±۳	تقریباً ۱۰۰	تقریباً ≥۹۵٪	۱.۵ <sup>-۲</sup>

جدول ۲. مشخصات طرح اختلاط بتن

درصد	طرح اختلاط	درصد	طرح اختلاط
۲۳/۱۹	نخودی	۳۸۰	طرح اختلاط (kg/m <sup>3</sup> ) سیمان
۷/۷۲	بادامی	۱۵/۳۴	سیمان
۷/۲۱	آب	۳۹/۴۳	ماسه نرم
۰/۴۷	W/C	۶/۹۶	ماسه

ساعت حمام اولتراسونیک و ۹۰ دقیقه اولتراسونیک میله‌ای) قرار داده می‌شود. به‌گونه‌ای که نانولوله‌های کربن به‌طور یکنواخت پخش شوند. در انتها، سیمان در مخلوط‌کن دور بالا به مخلوط آبی اضافه شده تا به‌صورت یکنواخت مخلوط شود. مخلوط خمیر سیمان آماده‌شده بعد از اضافه شدن مصالح سنگی در مخلوط‌کن مخلوط شده و در قالب چرب شده با روغن جا داده می‌شود و با اعمال ویبره مناسب تا حد امکان حباب‌های هوای آن خارج می‌شود (جدول ۳ و ۴).

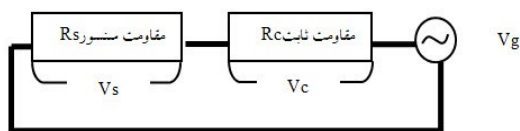
نمونه‌های بتنی به ابعاد ۱۶×۴×۴ که حاوی چهار الکتروود صفحه‌ای مسی در دو انتهای خود می‌باشند به مدت ۲۸ روز در آب ۲۵ درجه سلسیوس عمل‌آوری شده و بعد از خشک شدن به‌وسیله دستگاه MTS تحت بارگذاری دینامیک قرار می‌گیرد. در بررسی دینامیک حسگرهای بتنی، هر یک از حسگرها توسط موج

بر اساس تحقیقات اخیر، حسگرهای بتنی سنجش خرابی را می‌توان به دو صورت با دو الکتروود یا چهار الکتروود ساخت (چن و چانگ، ۱۹۹۶؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۱؛ گالاتو و همکاران، ۲۰۱۴؛ هان و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵). در این تحقیق، از حسگرهایی با چهار الکتروود مسی به ابعاد ۵×۴ به مقاومت ۲/۱۵ nΩm برای هدایت جریان الکتریکی بین دو سر قطعه بتنی استفاده شد.

## ۲-۲. روش تحقیق

در ابتدا، نانولوله‌های کربنی و فعال‌کننده‌های سطحی در آب به مدت ۱۰ دقیقه به‌وسیله همزن مکانیکی با دور ۵۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط می‌شوند. در ادامه، مخلوط آماده‌شده در سه سطح انرژی (یک ساعت حمام اولتراسونیک، دو ساعت در حمام اولتراسونیک، و دو

خروجی حسگر در این مدار اختلاف پتانسیل دو سر حسگر (Vs) است که به وسیله مولتی متر در بازه های زمانی مختلف اندازه گیری می شود. با توجه به مدار شکل ۶ می توان نتیجه گیری کرد که با قرار دادن مقاومت ثابت (Rc=200KΩ) در مدار و همچنین با اندازه گیری اختلاف پتانسیل دو سر حسگر، مقاومت الکتریکی حسگر (RS) را می توان در هر زمان محاسبه نمود (روابط ۱ و ۲):



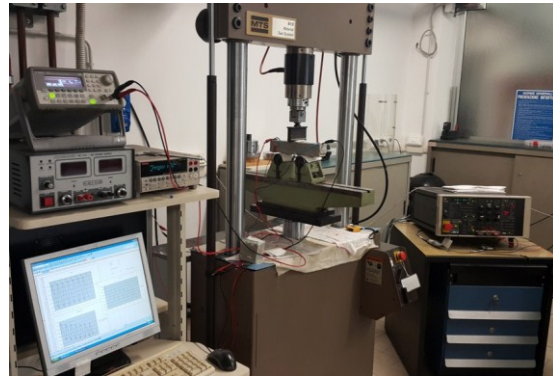
شکل ۶. نمایی شماتیک از مدار الکتریکی حسگر

$$Vg = Vs + Vc \quad (1)$$

$$Vs = Vg \frac{Rs}{Rs + Rc} \quad (2)$$

در جدول ۵، طرح آزمایش تحقیق حاضر، شامل مقادیر مختلف نانولوله کربن، سطح انرژی مختلف (کیفیت پخش متفاوت) و معیارهای ارزیابی خواص عملکردی حسگر نشان داده شده است.

سینوسی با شدت KN ۰/۷-۰/۲ در ناحیه خطی بتن (نیروی اعمالی کمتر از ۵۰٪ نیروی نهایی است) طی ۱۰ سیکل بارگذاری و باربرداری قرار گرفتند. در شکل ۵، نحوه انجام آزمایش روی حسگر و جمع آوری داده لازم نشان داده شده است.



شکل ۵. انجام آزمایش تیرچه خمشی سه نقطه ای

به منظور حذف اثر پلاریزاسیون، که به دلیل حرکت یون های آزاد در حسگر بتنی به وجود می آید و باعث افزایش تدریجی مقاومت الکتریکی حسگر با گذشت زمان می شود (هان و همکاران، ۲۰۱۵)، در این تحقیق، از ژنراتور جریان متناوب با بزرگی  $V_{pp} = 8$  volt و فرکانس ۲/۵ KHz برای بی اثر کردن این پدیده استفاده شد.

جدول ۳. مراحل پخش نانولوله در آب

توزین فوق روان کننده	توزین SDS	توزین نانولوله کربن	اختلاط مکانیکی	حمام اولتراسونیک	اولتراسونیک میله ای
			۱۰ min.	۱۳۰ min.	۹۰ min.
			۵۰۰۰ rpm	Power: ۲۷۵ watt	Power: ۳۰۰ watt
					Frequency: ۲۰ Hz

جدول ۴. مراحل پخش نانولوله پخش شده در آب، در سیمان



					
اضافه نمودن ضد کف	اضافه نمودن مقدار نهایی فوق‌روان‌کننده	اختلاط مکانیکی مجدد	اختلاط سیمان ۳ Min.	اختلاط با مصالح سنگی	قالب‌گیری

جدول ۵. مشخصات روند تحقیق و طریقه انجام آزمایش

معیارها	مقادیر نانولوله کربن (%)	اعمال انرژی	سطح انرژی	فعال‌کننده سطحی	بارگذاری
تکرارپذیری درونی و بیرونی حسگر (Re)	۰/۱	یک ساعت حمام اولتراسونیک	VL	فوق‌روان‌کننده + SDS (SPS)	دینامیکی
حساسیت حسگر (Se)	۰/۲	دو ساعت حمام اولتراسونیک	L		
هیستریزیس یا پسماند (SEE)		دو ساعت حمام اولتراسونیک ۹۰+ دقیقه اولتراسونیک میله‌ای	H		

استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ بررسی پاسخ دینامیک حسگرهای بتنی

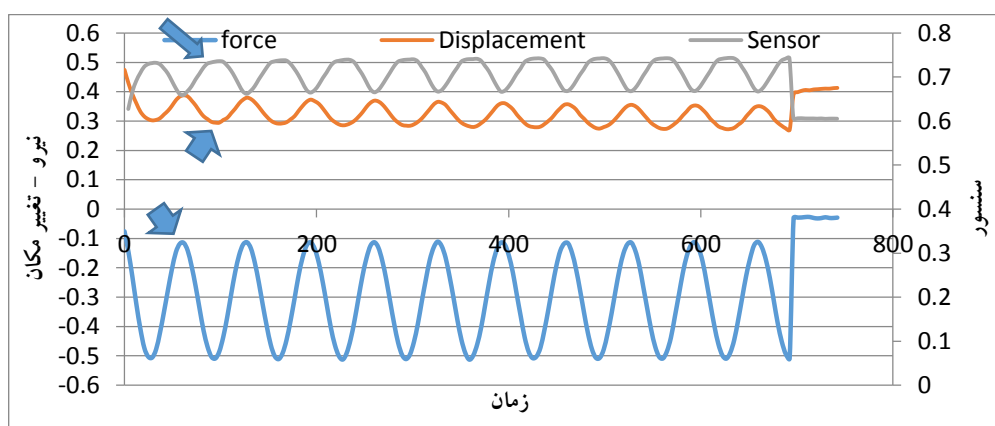
پیکان‌های نشان داده شده در شکل ۷، محل باربرداری را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود، در روند بارگذاری نوک منحنی سینوسی کاملاً با نوک منحنی سینوسی در مرحله باربرداری متفاوت است. این تفاوت را می‌توان با توجه به نحوه باربرداری توجیه نمود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، ابزار مورد استفاده جهت بارگذاری مطابق با استاندارد بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای است که این ابزار فاقد فک نگهدارنده برای هدایت نمونه در مرحله باربرداری است. از این‌رو در مرحله باربرداری، سرعت برگشت نمونه با سرعت باربرداری یکی نبوده (کمتر است) و شیب منحنی پاسخ حسگر و تا حدودی منحنی جابجایی در ناحیه باربرداری (محل پیکان‌ها) کمتر از منحنی نیرو است. به عبارتی، منحنی پاسخ حسگر به حدی گویای رفتار واقعی بتن است که در باربرداری

در بارگذاری دینامیک، برخلاف بارگذاری استاتیکی، نرخ بارگذاری متغیر است. لذا، پاسخ طبیعی حسگرها نیز خطی نیست. از آنجا که الگوی زین اسبی که در مراجع مختلف به‌عنوان الگوی عددی بار چرخ معرفی شده است (طرح روسازی به روش آشتو، ۱۹۹۳)، ولی اعمال این شکل بارگذاری با توجه به پیچیدگی‌های آن برای دستگاه مورد استفاده در این تحقیق ممکن نبود. لذا، با توجه منابع مختلف (بودر و ویتزاک، ۱۹۷۵) که الگوی سینوسی شکل را تخمین مناسبی از بار اعمال شده از طرف چرخ خودرو به جسم روسازی می‌داند، در این تحقیق از الگوی بار موج سینوسی برای انجام آزمایش‌های دینامیک زمان کوتاه



منحنی پاسخ حسگر اثر نمی‌گذارد. شاید این‌طور بتوان تفسیر نمود که تغییرات پاسخ حسگر در یک سیکل بارگذاری و باربرداری مستقل از شرایط اولیه حسگر می‌باشند و در واقع حسگر بیشتر تغییرات لحظه‌ای را نشان می‌دهد و تغییرات تابع زمان (اثر خزشی بتن) اثر کمی بر خروجی حسگر می‌گذارند.

صاف‌تر از منحنی نیرو است. همچنین، اگر روند جابجایی و پاسخ حسگر را در کل طول زمان آزمایش مورد بررسی قرار دهیم، مشاهده خواهد شد که پدیده تأخیر در بازگشت در مرحله باربرداری باعث ایجاد اندکی تغییرشکل برگشت‌ناپذیر در نمونه شده و لذا منحنی جابجایی افتان می‌شود. ولی همان‌طور که دیده می‌شود این تغییرشکل جزئی بر



شکل ۷. پاسخ حسگر، جابجایی و نیروی حسگر CNT-H 0.15% در طول زمان آزمایش

مشاهده می‌شود که سطح انرژی پخش نانولوله کربن در ایجاد حساسیت مناسب در حسگرها نقش تعیین‌کننده دارد. در واقع، انرژی تولید شده برای پخش واحد نانولوله کربن باعث افزایش کیفیت پخش نانولوله‌ها می‌شود. البته بعد از پخش حداکثری، مقدار نانولوله کربن نیز تأثیر به‌سزایی در ایجاد رسانایی بیشتر در محیط نارسانای بتن دارد. بدین معنی که در یک سطح انرژی معین، هر چه میزان نانولوله کربن افزایش یابد، حساسیت حسگر بتنی نیز افزایش خواهد یافت. با مقایسه تأثیر افزایش نانولوله کربن با افزایش سطح انرژی پخش نانولوله‌ها مشخص می‌شود که معیار حساسیت حسگر بیشتر تحت تأثیر سطح انرژی پخش نانولوله‌ها است. به‌طوری که نتایج نشان می‌دهد ۰/۱۵ درصد نانولوله کربن با انرژی پخش زیاد، بیشترین حساسیت را در بین دیگر حسگرها دارد. از طرفی،

### ۲-۳ معیارهای عملکردی حسگر

در این تحقیق، حسگرهای مختلف حاوی مقادیر متفاوت نانولوله کربن در حالت بارگذاری دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفتند و معیارهایی برای سنجش عملکرد حسگرهای مختلف ساخته‌شده، تعریف شدند و تأثیر متغیرهای مختلف بر عملکرد حسگرها بررسی خواهد شد.

#### ۱-۲-۳ معیار حساسیت حسگر

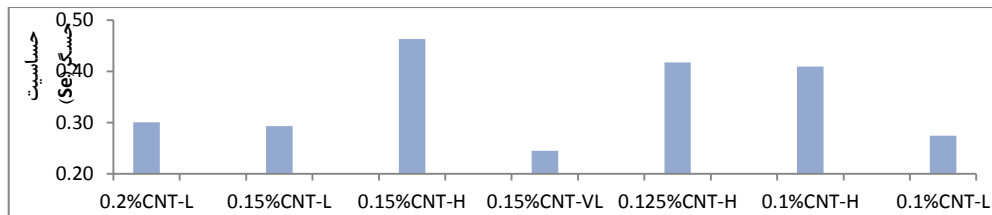
حساسیت حسگر، شیب نمودار نیرو- پاسخ حسگر با فرض تغییرات نیروی واحد تعریف می‌شود:

$$(3) \quad \text{حساسیت حسگر} = \frac{\text{تغییرات پاسخ حسگر}}{\text{پاسخ اولیه}} \text{ حساسیت حسگر (se)}$$

حساسیت حسگرهای مختلف ساخته شده در سطوح مختلف انرژی و درصدهای مختلف نانولوله کربن در شکل ۸ نشان داده شده است

بتن ایجاد نمایند و در نتیجه حساسیت حسگر به شدت کاهش یافته است.

همین مقدار نانولوله کربن ولی با انرژی پخش بسیار کم باعث کم شدن کیفیت پخش نانولوله‌ها شده و نانولوله‌ها نتوانسته‌اند به خوبی شبکه همگنی را در تمام سطح



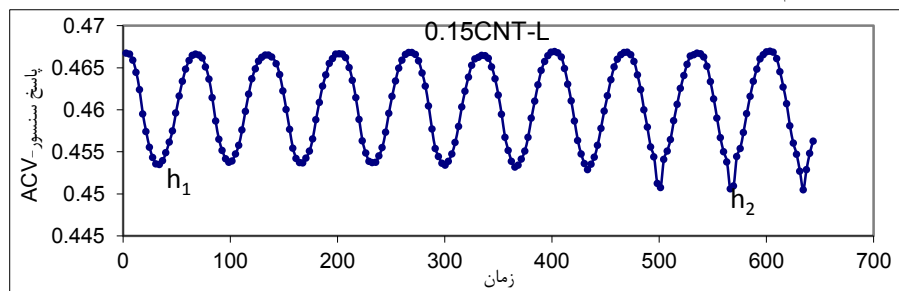
شکل ۸. حساسیت حسگر تحت شرایط اعمال نیروی دینامیک

تعریف می‌شود. هرچه این معیار کمتر باشد بدین معنی است که رفتار حسگر در سیکل‌های مختلف بارگذاری به هم شبیه بوده و لذا حسگر بهتری ساخته شده است:

$$\text{تکرارپذیری درونی} = \frac{\text{Abs}((H2-H1)*100)}{\text{Abs}(\max(H2,H1))} \quad (۴)$$

### ۲-۲-۳. معیار تکرارپذیری حسگر

تکرارپذیری یک حسگر در واقع نشان می‌دهد که پاسخ یک حسگر در سیکل‌های مختلف بارگذاری و باربرداری با اعمال نیروی یکسان تا چه اندازه شبیه به هم است (شکل ۹). در این تحقیق، این معیار را تکرارپذیری درونی می‌نامیم. این معیار به صورت زیر



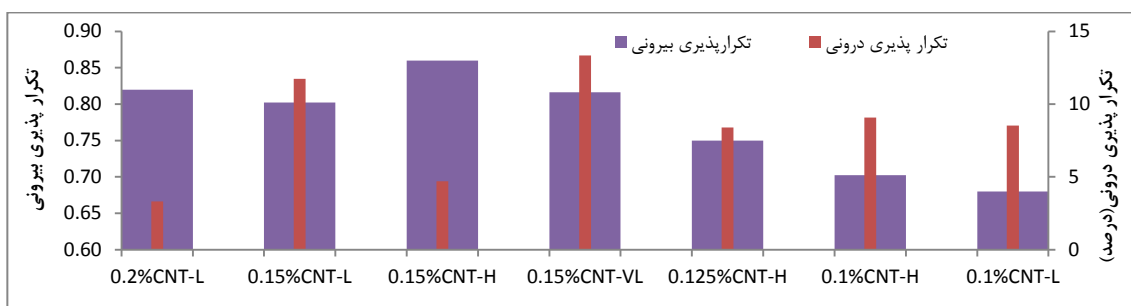
شکل (۹) تعریف معیار تکرارپذیری حسگر

صورت، می‌توان ادعا نمود که حسگر دارای رفتار خطی است. لذا این معیار را می‌توان این‌گونه تعریف نمود که هرچه این معیار به یک نزدیک‌تر باشد رفتار حسگر خطی‌تر است. این بدان معنی نیست که حسگرهایی که دارای مقادیر کمتر از یک می‌باشند حسگر خوبی نیستند. بلکه این حسگرها رفتار خطی ندارند. ولی ممکن است رفتار غیرخطی نظام‌مندی داشته باشند و لذا از این معیار فقط می‌توان در مورد خطی بودن رفتار حسگر استفاده کرد.

همچنین، در تعریف دیگری برای این معیار، تکرارپذیری حسگر با اعمال سطوح مختلف نیرو به حسگر می‌بایست دارای همان نسبت در مقادیر پاسخ-های حسگر نیز باشد (در صورت خطی بودن رفتار حسگر) و یا از تابعی مشخص تبعیت نماید. لذا، معیار زیر را می‌توان این‌گونه تعریف نمود:

$$\text{تغییرات نیرو} = \frac{\text{تغییرات پاسخ حسگر}}{\text{تکرارپذیری بیرونی}} \quad (۵)$$

بدین معنی که اگر نیروی اعمالی دو برابر شود، پاسخ حسگر مطلوب نیز می‌بایست دو برابر شود. در این



شکل ۱۰. تکرارپذیری بیرونی و درونی حسگرها

پاسخ حسگر حاوی مقدار بیشتر نانولوله کربن تکرارپذیرتر شده است. لذا، با توجه به نتایج این دو معیار، می‌توان ادعا نمود که هرچه حسگر دارای نانولوله کربن بیشتری باشد و انرژی بیشتری برای پخش استفاده شود و بتواند پخش بهتری را ایجاد کند، این دو معیار بهبود می‌یابند.

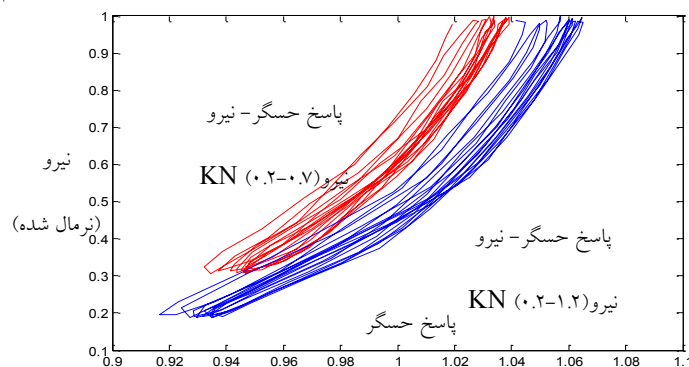
### ۳-۲-۳. معیار پسماند حسگر

معیار دیگری که در این تحقیق در تحلیل خروجی حسگرها مورد استفاده قرار گرفت، پسماند است. در سیستم‌هایی که فاقد پسماند هستند، در هر لحظه از زمان با توجه به مقدار ورودی می‌توان مقدار خروجی را پیش‌بینی کرد. اما در سیستم‌هایی که دارای پسماند هستند این کار غیرممکن است. زیرا خروجی سیستم نه تنها به ورودی بلکه تا حدی به حالت درونی سیستم نیز بستگی دارد. لذا، نمی‌توان خروجی سیستم را بدون مد نظر قرار دادن وضعیت قبلی ورودی‌ها به سیستم، یا بررسی حالت درونی سیستم، پیش‌بینی کرد. پسماند در اندازه‌گیری از کیفیت غیر الاستیکی اجزای سیستم ابزار دقیق (حسگر) حاصل می‌شود. به مقدار پسماند، خطای پسماند نیز می‌گویند. هان و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی روی حسگرهای بتنی فشارسنج الکترونیکی، میزان پسماند را برای یک حسگر مؤثر دانستند و آن را حاصل تقسیم حداکثر تفاوت بین خروجی حسگر در

همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، هرچه میزان نانولوله کربن افزایش یابد تکرارپذیری بیرونی حسگرها بهبود یافته است؛ بدین معنی که رفتار حسگرها خطی‌تر می‌شود. از طرفی، از نتایج این‌طور می‌توان نتیجه گرفت که انرژی پخش تأثیر چندانی نسبت به میزان نانولوله کربن بر این معیار ندارد. در واقع، ماهیت این معیار برخلاف معیارهای دیگر تعریف شده است و به‌عنوان یک معیار کامل برای تعیین عملکرد حسگر و دقیق بودن یا نبودن آن کاربرد ندارد و فقط خطی بودن یا غیرخطی بودن رفتار یک حسگر را ارزیابی می‌کند. بدین معنی که یک حسگر می‌تواند بر اساس این معیار رفتار خطی نداشته باشد، ولی در حالت غیرخطی حسگر دقیقی باشد.

از طرفی، نتایج نشان داد که تکرارپذیری درونی یک حسگر بیشتر به انرژی پخش و کیفیت پخش نانولوله‌ها در بتن و تا اندازه‌ای کمتر به میزان کربن وابسته است. بدین معنی که با ثابت بودن میزان نانولوله کربن، مثلاً ۰/۱۵ درصد، هرچه انرژی کمتری در فرایند پخش به کار گرفته شود تغییرات پاسخ حسگر در سیکل‌های بارگذاری بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر، در صورتی که در سطح انرژی حداکثر میزان تکرارپذیری درونی متناظر با مقادیر ۰/۱ درصد الی ۰/۱۵ درصد نانولوله کربن را مشاهده کنیم خواهیم دید که معیار تکرارپذیری درونی بهبود یافته است. یعنی،

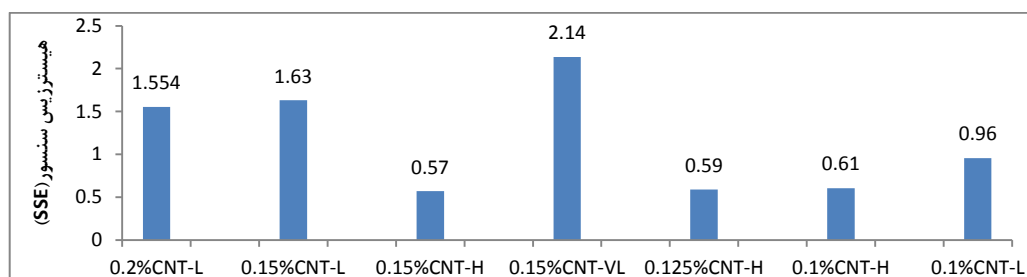
سیکل‌های مختلف بارگذاری به دامنه متوسط پاسخ خروجی حسگرها دانستند. در شکل ۱۱، نمودار خروجی حسگر در مقابل نیروی وارده در سیکل‌های مختلف بارگذاری و باربرداری ترسیم شده است.



شکل ۱۱. مقایسه پسماند خروجی حسگر CNT-H 0.1% نسبت به نیروی وارده به حسگر

حسگر در مقابل نیرو (نرمال شده) برازش شده باشد، میزان پراکندگی داده‌ها از خط برازش شده را می‌توان به نوعی نشان‌دهنده انحراف از رفتار یک حسگر ایده‌آل تعریف نمود و در واقع مجموع این مقادیر پراکندگی را نشان‌دهنده میزان پسماند در کل سیکل‌های بارگذاری و باربرداری دانست. با این تعریف، هرچه حسگر دارای پسماند بیشتری باشد، در تعداد مشخص بارگذاری، فاصله خروجی حسگر از بهترین خط برازش (فرض یک حسگر ایده‌آل) بیشتر خواهد بود در نتیجه، می‌توان مقدار SSE (مجموع مربعات خطا) در تحلیل رگرسیون را معیاری برای نشان دادن پسماند تعریف نمود. شکل ۱۲ نتایج معیار پسماند را برای حسگرهای مختلف نشان می‌دهد.

یک حسگر ایده‌آل در یک چرخه بارگذاری و باربرداری می‌بایست رفتار متفاوتی نداشته باشد و همچنین با تکرار فرایند بارگذاری و باربرداری دچار پسماند نشود. ولی مشاهده شد که تمام حسگرهای بتنی با درصدهای مختلف نانولوله کربن و کیفیت‌های مختلف پخش نانولوله کربن در محیط حسگر دارای پسماند می‌باشند. معیاری که در این تحقیق برای ارزیابی میزان پسماند تعریف می‌شود می‌بایست به گونه‌ای میزان تغییرات حرکتی حسگر در یک چرخه بارگذاری و باربرداری و همچنین در چرخه‌های مختلف بارگذاری و باربرداری را توأمان ارزیابی نماید. برای این منظور، با فرض اینکه با استفاده از تکنیک رگرسیون، بهترین خط بر مجموعه داده‌های خروجی



شکل ۱۲. معیار پسماند حسگرهای مختلف

ها با هم می‌شود، که نتیجه این کار افزایش بیشتر حساسیت حسگر را به همراه دارد.

- معیارهای عملکردی از قبیل حساسیت، تکرارپذیری درونی و پسماند نشان دادند که سطوح انرژی پخش نانولوله تأثیر بیشتری بر بهبود خواص حسگر نسبت به تغییرات مقادیر نانولوله مصرفی در فرایند ساخت حسگر دارند. فقط معیار تکرارپذیری بیرونی، با توجه به تفاوت ماهوی با دیگر معیارها، نتیجه متفاوتی را نشان داد.

- معیار تکرارپذیری بیرونی نشان داد که رفتار خطی حسگرها بیشتر به میزان نانولوله کربن مصرفی وابسته است.

- معیارهای عملکردی نشان دادند که بجز معیار پسماند که مقدار ۰/۱ درصد نانولوله کربن را برای ساخت حسگر مناسب کافی می‌داند، بقیه معیارها مقدار ۰/۱۵ درصد نانولوله کربن را ضروری می‌دانند.

بر اساس این معیار، انرژی پخش نانولوله‌های کربنی در محیط حسگر تأثیر زیادی در کاهش پسماند و افزایش دقت پیش‌بینی توسط حسگر را دارد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات پسماند با تغییر ۵۰٪ نانولوله کربن از ۰/۱ درصد الی ۰/۱۵ درصد (وزنی سیمان) در محیط حسگر تأثیر چشمگیری در کاهش پسماند حسگرها ندارد. لذا، با توجه به این معیار، مقدار ۰/۱ درصد نانولوله کربن که با انرژی کافی به‌خوبی در محیط حسگر پخش شود برای ساخت یک حسگر، با مقدار پسماند قابل قبول، کافی است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که:

- عامل پخش مناسب نانولوله‌ها که حاصل انرژی بیشتر اعمال شده به مخلوط نانولوله کربن در فاز آبی است، تأثیر بیشتری بر بهبود معیارهای عملکردی حسگر نسبت به میزان مصرف نانولوله کربن دارد.

- حساسیت حسگرهای بتنی تا حدود زیادی به کیفیت پخش نانولوله‌ها در فاز آب و محیط بتن وابسته است. پخش بهتر، شبکه عصبی بهتری از نانولوله‌ها را در محیط بتن ایجاد می‌کند و باعث افزایش تماس نانولوله-

## ۵. مراجع

شریفی، م. و جوادیان، ف. ۱۳۹۱. "بررسی اثر ساختار مواد فعال سطحی بر پراکندگی نانولوله‌های کربنی در محلول آبی". سومین همایش علوم و فناوری مواد فعال سطحی و صنایع شوینده، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه شریف، تهران.

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 1993. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Azhari, F. and Banthia, N. 2012. "Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing." *Cement Concrete Comp.*, 34(7): 866-73.
- Azhari, F. and Banthia, N. 2015. "A 3D percolation model for conductive fibrous composites: Application in cement-based sensors." *J. Mater. Sci.*, 50(17): 5817-21.
- Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E. and Garcés, P. 2013. "Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements." *Mater.*, 6(3): 841-855.
- Bontea, D. M., Chung, D. D. L. and Lee, G. C. 2000. "Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement." *Cement Concrete Res.*, 30(4): 651-659.
- Chen, P. W. and Chung, D. D. L. 1996. "Concrete as a new strain/stress sensor." *Comp. Part B: Eng.*, 27(1): 11-23.
- Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E. and Garcés, P. 2014. "Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture." *Cement Concrete Comp.*, 46: 90-98.
- Gao, D., Sturm, M. and Mo, Y. L. 2011. "Electrical resistance of carbon-nanofiber concrete." *Smart Mater. Struct.*, 20(4): 049501.
- Gopalakrishnan, K., Birgisson, B., Taylor, P. and Attoh-Okine, N. O. 2011. "Nanotechnology in Civil Infrastructure." Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg.
- Han, B. and Ou, J. 2007. "Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor." *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 138(2): 294-98.
- Han, B., Yu, X., Zhang, K., Kwon, E. and Ou, J. 2011. "Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors." *J. Civil Struct. Health Monit.*, 1(1-2): 17-24.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E. and Ou, J. 2012. "Fabrication of piezoresistive CNT/CNF cementitious composites with superplasticizer as dispersant." *J. Mater. Civil Eng.*, 24(6): 658-665.
- Han, B., Yu, X. and J. Ou, 2014. "Sensing properties of self-sensing concrete." PP. 95-162. *In: Han, B., Yu, X. and Ou, J. (Eds.), Self-Sensing Concrete in Smart Structures, Butterworth-Heinemann, 398 p.*
- Han, B., Ding, S. and Yu, X. 2015. "Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review." *Measurement*, 59: 110-128.
- Jian, H., Xie, H. and Liu, J. 2003. "The effect of fiber content on the mechanical properties and pressure-sensitivity of CFRC." *China Build. Sci. Core Period.*, (12): 21-22.
- Li, H., Xiao, H. and Ou, J. 2006. "Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites." *Cement Concrete Comp.*, 28: 824-828.
- Li, G. Y., Wang, P. M. and Zhao, X. 2007. "Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites." *Cement Concrete Comp.*, 29(5): 377-382.
- Parveen, S., Rana, S. and Fanguero, R. 2013. "A review on nanomaterial dispersion, microstructure, and mechanical properties of carbon nanotube and nanofiber reinforced cementitious composites." *J. Nanomater.*, 2013: 1-19.
- Saafi, M. 2009. "Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures." *Nanotech.*, 20(39): 395502.
- Sun, M., Liu, Q., Li, Z. and Hu, Y. 2000. "A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading." *Cement Concrete Res.* 30(10): 1593-1595.
- Sun, M., Liew, R. J. Y., Zhang, M. H. and Li, W. 2014a. "Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete." *Constr. Build. Mater.*, 65: 630-637.
- Sun, S., Yu, X. and Han, B. 2014b. "Sensing mechanism of self-monitoring CNT cementitious composite." *J. Test. Eval.* 42(1): 20120302.
- Teomete, E., and Ilkim, O. 2013. "Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement matrix composites tested by split tensile test." *Constr. Build. Mater.* 47: 962-968.
- Veedu', Vmod P-. 2010. "MULTIFUNCTIONAL CEMENTITIOUS NANOCOMPOSITE MATERIAL AND METHODS OF MAKING THE SAME." 1(12).
- Wang, S., and D.D.L. Chung. 1997. "Self-monitoring of strain and damage by a carbon-carbon composite."

- Carbon, 35(5): 621-630.
- Wang, X., Wang, Y. and Jin, Z. 2002. "Electrical conductivity characterization and variation of carbon fiber reinforced cement composite." J. Mater. Sci., 7: 223-227.
- Wen, S. and Chung, D. D. L. 2001. "Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement." Cement Concrete Res. 31: 141-147.
- Wen, S. and Chung, D. D. L. 2006. "Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars." Carbon, 44(8): 1496-1502.
- Wilson, J. S. 2005. "Sensor Technology Handbook.", Elsevier, Amsterdam.
- Xiao, H., Li, H. and Ou, J. 2011. "Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam." Sens. Actuat. A- Phys., 167(2): 581-587.
- Yoder, E. J., and Witczak, M. W. 1975. "Principles of Pavement Design." Second edition, John Wiley, N. Y.

بررسی تأثیر مقادیر مختلف نانولوله کربن و کیفیت پخش آنها بر عملکرد دینامیک حسگرهای هوشمند بتنی