

Properties and mechanisms of the self-sensing piezoelectric concrete sensor for structural health monitoring

Mostafa Adresi^{1*}, Mohammad Yekrangnia¹

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The use of self-sensing concrete sensors to estimate the amount of force applied or to estimate damage levels to structures as a new approach has been considered in structural health monitoring studies. In this study, the possibility of using piezoelectric concrete sensors as load or stress sensors to the concrete column has been investigated. The importance of this research in the development of smart infrastructure is based on the response of concrete sensors to conventional sensors. For this purpose, different piezoelectric concrete sensors were made with different percentages of carbon nanotubes and were subjected to dynamic loading and the appropriate sensor with appropriate sensitivity and less turbulence was obtained by adding at least 0.15% carbon nanotubes by weight of cement. In order to simulate the performance of the concrete column under external load until the failure and analysis of its behaviour, based on the response of the concrete sensor, a small cubic concrete sensor with dimensions of 5 cm was made and placed in a concrete column. By loading the concrete column until the failure, the output of the sensor was monitored and the behaviour of the concrete column was analysed based on the concrete sensor response. The results showed that the concrete sensor could accurately estimate the final force that can be applied to the column up to failure. The sensor demonstrated that it could differentiate the different phases of the concrete column under the loading up to failure.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 May 2020
Revise Date: 25 August 2020
Accept Date: 07 November 2020

Keywords:

Concrete
SHM
Nano tube carbon
Piezoelectric concrete
Sensor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.232648.2150>

*Corresponding author: Mostafa Adresi
Email address: m.adresi@sru.ac.ir

بررسی عملکرد حسگر فشارسنج بتنی باقابلیت خودتشخیصی در پایش سطح سلامت عضو سازه‌ای

مصطفی آدرسی^{*}، محمد یکرنگ نیا^۱

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

چکیده

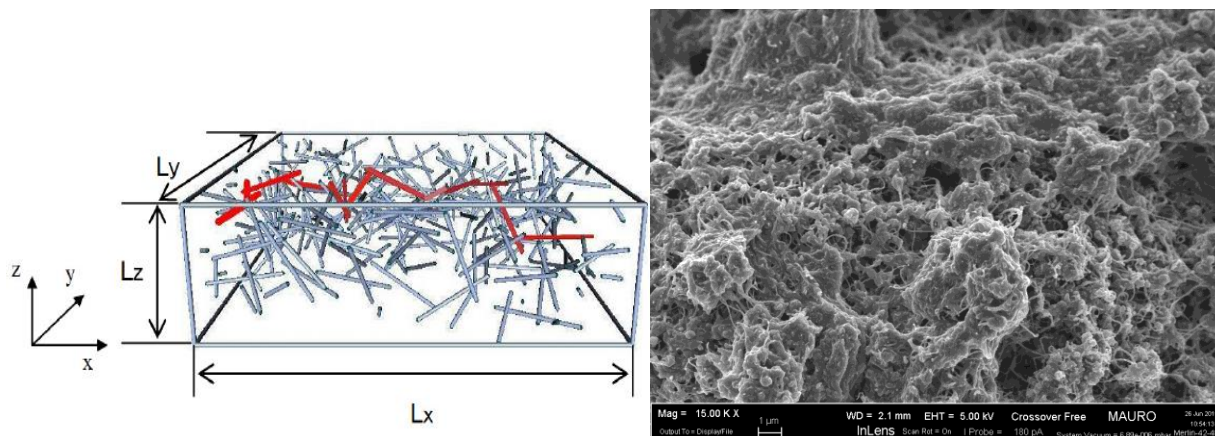
استفاده از حسگرهای بتنی باقابلیت خود تشخیصی به منظور تخمین میزان نیروی وارده یا برآورد سطوح خسارت به سازه به عنوان یک رویکرد نوین در مطالعات پایش سطح سلامت سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق امکان استفاده از حسگرهای فشارسنج الکتریکی بتنی به عنوان حسگرهای تعیین بار یا تنش وارده به ستون بتنی بررسی شده است. اهمیت این تحقیق در توسعه زیرساخت هوشمند بر اساس پاسخ حسگرهای بتنی در مقابل حسگرهای متداول موجود مورد توجه است. برای این منظور حسگرهای مختلفی بتنی با درصدهای مختلف نانولوله کربن ساخته شد و تحت بارگذاری دینامیکی فشاری قرار گرفتند و حسگر مناسب با حساسیت مطلوب و اغتشاش حداقل با اضافه نمودن ۰٫۱۵ درصد وزنی سیمان، نانولوله کربن به دست آمد. در ادامه به منظور شبیه سازی عملکرد ستون بتنی تحت بار خارجی تا لحظه شکست و تحلیل رفتار آن بر اساس پاسخ حسگر بتنی فشارسنج الکتریکی، یک حسگر بتنی کوچک مکعبی به ابعاد ۵ سانتیمتر ساخته شد و در میان یک ستون بتنی جای داده شد. با بارگذاری ستون بتنی تا لحظه شکست، خروجی حسگر برداشت و رفتار ستون بتنی بر اساس پاسخ حسگر بتنی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد حسگر بتنی می تواند با دقت مناسبی مقدار نیروی وارده به ستون را تخمین زده فازهای مختلف رفتار بتن تحت روند افزایش بارگذاری را متمایز سازد.

کلمات کلیدی: بتن، حسگر، نانولوله کربن، فشارسنج الکتریکی، پایش سطح سلامت سازه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.232648.2150	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.232648.2150	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۸/۱۷	۱۳۹۹/۰۸/۱۷	۱۳۹۹/۰۶/۰۴	۱۳۹۹/۰۳/۰۴
				*نویسنده مسئول:		
				مصطفی آدرسی		
				m.adresi@sru.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

ایجاد خاصیت تشخیص به بتن یا همان تبدیل بتن به حسگر با اضافه کردن الیاف یا ذرات هادی در مقیاس و جنس‌های مختلف امکان‌پذیر است [۱]–[۷]. با اضافه کردن الیاف هادی مانند نانولوله کربنی به بتن که به شدت، هادی جریان الکتریکی می‌باشند به دلیل ایجاد شبکه فضایی از الیاف نانولوله کربنی، (شکل ۱) یک شبکه هادی در بتن ایجاد شده و بتن هادی می‌شود [۷].

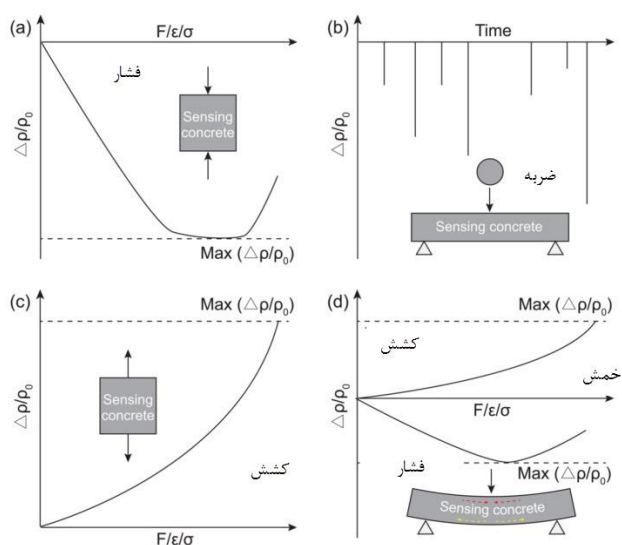


شکل ۱- مکانیسم کارکرد حسگر بتنی [۷] و پخش مناسب نانولوله در خمیر سیمان و ایجاد شبکه هادی در عکس SEM [۸]

ایجاد خاصیت رسانایی الکتریکی در مصالح می‌تواند از جهات مختلفی مفید باشد از جمله ساخت حسگرهایی فشارسنج الکتریکی با قابلیت برداشت تنش- کرنش و یا بار-تغییر مکان [۹]–[۱۴] یا حسگرهایی با قابلیت برداشت میزان خسارت در بتن [۱۵]–[۱۹].

بر اساس تحقیقات به عمل آمده مقاومت الکتریکی حسگر تهیه شده از نانولوله‌های کربنی در خمیر سیمان از دو پدیده نشأت می‌گیرد. اول مقاومت الکتریکی ذاتی نانولوله‌های کربنی و دیگری مقاومت الکتریکی خمیر سیمان در مرز مشترک بین دو نانولوله کربنی که از آن به مقاومت تونلی نیز نام برده می‌شود. مقاومت الکتریکی حسگرهای فشارسنج الکتریکی تا حدود زیادی به چگونگی قرارگیری شبکه نانولوله‌های کربنی و تعداد محل‌هایی که نانولوله‌ها باهم مرز مشترک دارند وابسته است. که این عامل به کیفیت پخش نانولوله‌ها وابسته است. از مقاومت الکتریکی خود نانولوله‌ها در مقابل مقاومت تونلی که بسیار بیشتر از مقاومت الکتریکی ذاتی نانولوله‌های کربنی است صرف نظر می‌شود. از این رو مقاومت الکتریکی حسگرها ناشی از مقاومت تونلی آن‌هاست. تغییرات در مقاومت تونلی ناشی از تغییرات در میزان ضخامت خمیر سیمان بین 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 باعث کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود. 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 الکتریکی می‌شود [۱]–[۷].

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است. تحت فشار، پارامتر (تغییرات مقاومت الکتریکی به مقاومت الکتریکی اولیه) $\Delta\rho/\rho_0$ حسگر بتنی کاهش یافته، متعادل می‌شود و سپس تمایل به افزایش پیدا می‌کند. که به ترتیب مرتبط با تراکم فشاری، ایجاد ترک‌های تازه و گسترش ترک تحت فشار تک‌محوری یکنواخت است [۲۰]. در این شکل رفتار حسگر در کشش خالص، ضربه و خمش (ترکیبی از فشار و کشش) نشان داده شده است.



شکل ۲ رفتار ادراکی بتن هوشمند تحت فشار و کشش [۲۰]

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است در مرحله اول اعمال نیروی فشاری، فیلرهای عملکردی (مانند نانولوله‌های کربنی) به یکدیگر نزدیک می‌شوند، که باعث بهبود میزان هدایت الکتریکی یا کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود. در مرحله دوم با افزایش تنش فشاری در بتن و افزایش کشش در جهات دیگر و ایجاد ترک‌ها، بخشی از شبکه هادی قطع شده یا از هم فاصله می‌گیرند که باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شوند. در این بین فاصله بین شبکه هادی در بعضی دیگر از نقاط به دلیل اعمال فشار کاهش یافته و مقاومت کاهش می‌یابد. تعامل این دو اثر (کاهش فاصله بین ذرات هادی ناشی از فشار و افزایش فاصله بین ذرات هادی ناشی از کشش یا ترک خوردگی) باهم باعث تغییر شکل نمودار در این حالت می‌شود. در مرحله سوم با افزایش سطح تخریب و گسترش ترک‌ها، شبکه هادی از بین رفته و مقاومت افزایش می‌یابد [۲۰]. این تعامل در تیرچه خمشی که توأمان بخشی از تیر تحت فشار و بخش دیگر تحت کشش است به صورت ترکیبی از این دو اثر فی‌مابین کشش خالص و فشار خالص ظاهر می‌شود.

علاوه بر فشار تک‌محوره، برخی محققان مشخصه ادراک بتن هوشمند را تحت فشار چند محوره یکنواخت نیز بررسی کرده‌اند. برای مثال، وو و همکاران حالت‌های ادراک تنش بتن دارای الیاف کربن را تحت فشار تک‌محوره یکنواخت و فشار دومحوره یکنواخت مقایسه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که منحنی رفتار ادراکی تحت فشار دومحوره مشابه فشار تک‌محوره است، اما سطح تنش که در آن، مقاومت الکتریکی شروع به افزایش می‌کند متفاوت است. مشخصه ادراک حسگرهای هوشمند بتنی تحت فشار دومحوره حساس‌تر از فشار تک‌محوره است [۲۱].

۲-۱ حسگر بتنی و نقش آن در سیستم پایش سلامت سازه‌ها

سازه‌های بتن مسلح به‌مرور زمان و تحت شرایط محیطی مخرب، بارهای خارجی و تنش‌های درونی ناشی از فعل‌وانفعالات مخرب شیمیایی دچار زوال و آسیب می‌شوند. به‌منظور شناسایی نقایصی که ممکن است به‌مرور، سلامت سازه را تهدید نمایند و یا منجر به خرابی آن شوند. به‌منظور تشخیص شدت خرابی و محل تقریبی آن و در ادامه برآورد بهتر از سطح خسارت وارده و تصمیم‌گیری بهتر در خصوص انتخاب اقدامات نگهداری و تعمیراتی بعدی، لازم است شرایط و سلامت سازه در طول زمان مورد پایش قرار گیرد [۲۲]. پایش سلامت سازه‌ها به فرآیند انجام عملیات شناسایی و تشخیص آسیب در سازه‌های مهندسی اطلاق می‌گردد [۲۳]. پایش سطح سلامت سازه به مراحل اعمال ارتعاش مشخص، برداشت پاسخ سازه تحت ارتعاش داده‌شده توسط حسگرهای مختلف، تحلیل داده‌های برداشت‌شده، برآورد خسارت

¹Structural Health Monitoring (SHM)

و تصمیم‌گیری در خصوص سازه تقسیم می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات پژوهشی زیادی جهت استفاده از حسگرهای هوشمند بتنی بر پایه خصوصیت خود تشخیصی در سازه بتنی انجام شده است. یک روش توانمند و کارآمد شناسایی آسیب باید بتواند وجود آسیب را شناسایی نماید، محل آسیب و میزان و شدت آسیب را تعیین نماید و کارایی و عملکرد آینده سازه را بر اساس سطح آسیب فعلی آن ارزیابی نماید [۲۲]–[۲۴]. استفاده از حسگر بتنی به‌عنوان ساخته جدید در جمع‌آوری اطلاعات از سازه به دلیل اینکه از جنس بتن سازه^۲ هست می‌تواند علاوه بر بازتاب پاسخ نیرو – جابجایی سازه رشد خرابی در محیط سازه را نیز نشان دهد که حسگرهای متداول از این مهم بی‌بهره‌اند. همچنین با توجه به قیمت ناچیز و عمر نسبتاً زیاد خود می‌تواند به‌طور گسترده در محل‌های بحرانی قرار بگیرد و تا زمان زیادی به کار خود به‌عنوان حسگر ادامه دهند از این رو این فناوری، بسیار مورد توجه متخصصان این حوزه قرار گرفته است [۲۵]، [۲۶].

در این رابطه هان و همکاران حسگری پایه سیمانی با اضافه کردن نانولوله کربن و ذرات کربن سیاه توسعه دادند. بعد از ارزیابی حساسیت حسگر، آن‌ها را در یک ساختمان ۵ طبقه مدل، بر روی یکی از ستون‌ها در طبقات مختلف تعبیه نمودند. سازه روی یک میز لرزه با اعمال بار دینامیکی سینوسی با فرکانس‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بر پایه خاصیت پیزوالکتریک، این حسگرها به‌خوبی توانستند حداقل فواصل فرکانس‌های ۲ تا ۴۰ هرتز خروجی دقیقی را ارائه دهند. این خروجی الکتریکی همخوانی دقیقی با خروجی حسگرهای نیروسنج و جابجایی سنج نصب‌شده بر روی سازه داشت. آن‌ها نتیجه گرفتند که این نوع حسگر می‌تواند قابلیت فوق‌العاده‌ای در تخمین مدهای سازه‌ای و همچنین خسارت وارده به سازه را داشته باشد [۲۶].

آبرتینی و همکاران با ساخت حسگر سیمانی حاوی نانولوله کربنی چند دیواره و جا دادن آن در سازه، یک شبکه گسترده از حسگرها را برای پیش‌پاسخ سازه توسعه دادند. آن‌ها برای ساخت حسگر مناسب، حسگرهای بتنی و سیمانی را با مقادیر مختلف نانولوله-کربن چند دیواره ساختند و خطی بودن و حساسیت آن‌ها را تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی سینوسی شکل در آزمایش فشار تک‌محوری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در آستانه تراوایی رفتار حسگرها دارای هستریزس است و اندکی غیرخطی است. با افزایش مقدار نانولوله کربنی بیش از آستانه تراوایی رفتار خطی می‌شود. همچنین اظهار داشتند که حسگر سیمانی توانایی مناسبی برای تخمین نیروی وارده با دقت قابل قبول را دارد و این توانایی را حتی بعد از اعمال نیروی حداکثر و شکست نمونه نیز حفظ می‌کند [۲۷].

آبرتینی و همکاران در تحقیق دیگری با ساخت حسگر از خمیر سیمان، ملات سیمانی و بتن با استفاده از درصد‌های مختلف نانولوله کربن و نانو فیبر کربنی، حسگر مناسب را انتخاب نموده و با قراردادی آن‌ها بر روی یک تیر بتنی به همراه حسگرهای متداول فشارسنج، شتاب‌سنج و کرنش‌سنج، رفتار تیر بتنی را تحت بارگذاری طیفی زلزله مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که خروجی این نوع حسگر سازگاری مناسبی با خروجی حسگرهای متداول دارد و می‌تواند حسگر قابل اعتمادی برای پیش‌سطح سلامت یک سازه باشد [۲۵].

در تحقیق دیگری آبرتینی و همکاران یک تیر بتنی حاوی نانولوله کربنی ساختند و برای سنجش میزان کرنش تیر تحت بارگذاری مشخص از ارتباط خروجی الکتریکی حسگر با نیرو استفاده کردند و آن را با مقادیر کرنش‌سنج متداول مقایسه نمودند که تطابق خوبی را نشان می‌داد. همچنین به‌منظور سنجش خسارت تحت آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای، تعداد ۱۵ الکتروود را در تیر قرار دادند و هم‌زمان تیر تحت آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای تا نقطه شکست بارگذاری شده است. با بررسی خروجی تغییرات پتانسیل الکتریکی بین هر الکتروود محل خسارت و نقطه شروع خسارت تابع بارگذاری خارجی تعیین شد. این تحقیق نشان داد که می‌شود از این‌گونه حسگر برای تشخیص میزان نیرو و خسارت وارده استفاده کرد [۲۸].

ونگ و همکاران با اضافه کردن نانو الیاف کربنی به اپوکسی حسگر فشارسنج الکتریکی را توسعه دادند. آن‌ها حسگرها را تحت بارهایی مختلف دینامیکی قرار دادند و مشاهده کردند که حسگرهای ساخته‌شده به‌طور دقیق نیروی وارده را تشخیص می‌داد. از این رو ادعا کردند که حسگر ساخته‌شده می‌تواند در ساخته شبکه حسگر در داخل سازه به‌منظور پیش‌سطح سلامت سازه مورد استفاده قرار گیرد [۲۹].

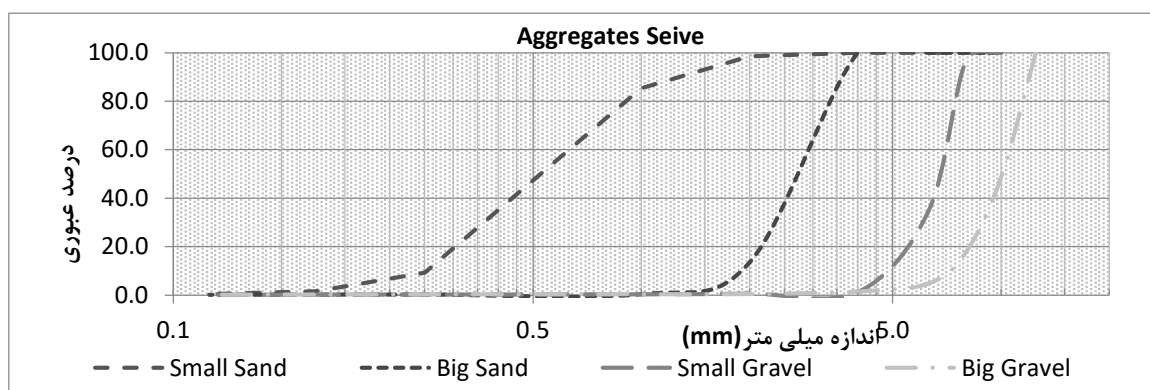
² Compatibility

با بررسی مطالعات پیشین مشخص است که حسگر بتنی به عنوان یک حسگر ارزان، بادوام و سازگار با سازه‌های بتنی برای برداشت اطلاعات گسترده از سازه و استفاده از آن‌ها در پایش سطح سلامت سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری مقاله حاضر در تعیین میزان بهینه نانولوله کربنی برای ساخت حسگر فشارسنج الکتریکی بتنی با حساسیت مناسب هست. همچنین استفاده از حسگر بتنی برای تخمین رفتار واقعی عضو سازه‌ای تا لحظه شکست بر اساس خروجی الکتریکی حسگر بتنی و تحلیل رفتار عضو بتنی بر اساس خروجی الکتریکی حسگر از دیگر اهداف نوآوران این تحقیق به شمار می‌آید.

۲- مواد و مصالح مصرفی و روش انجام آزمایش‌ها

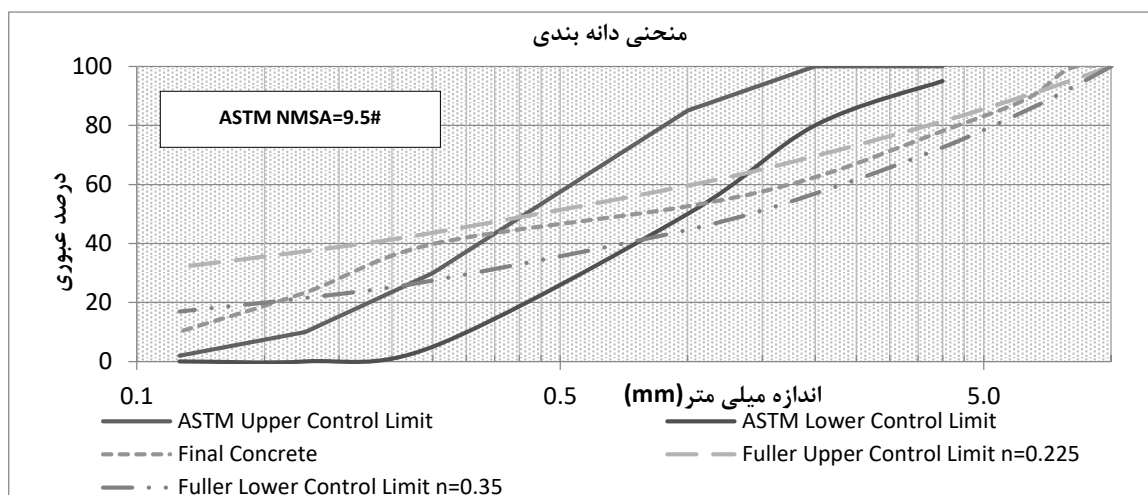
۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

منحنی دانه‌بندی مواد و مصالح سنگی در این تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است. به منظور دستیابی به کمترین فضای خالی مصالح سنگی به گونه‌ای باهم مخلوط شدند که منحنی دانه‌بندی نهایی بر منحنی دانه‌بندی فولر منطبق باشد. دانه‌بندی نهایی با حداکثر اندازه مصالح سنگی ۹/۵ میلی‌متر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- مصالح سنگی مصرفی در این تحقیق

بر این اساس طرح اختلاط ساخت حسگرهای فشارسنج الکتریکی بتنی و همچنین ستون بتنی (بدون نانولوله کربن) مطابق جدول ۱ تعیین گردید. مقدار فوق روان کننده بر اساس نیل به کارایی مطلوب به طور تجربی تعیین شد. در این تحقیق به منظور تعیین مقدار مناسب نانولوله کربنی جهت ساخت یک حسگر مناسب از سه درصد مختلف نانولوله کربنی بر اساس تجربیات پیشین استفاده شد [۸]. [۳۰]-[۳۳] و حسگرهای ساخته شده بر اساس مقدار نانولوله به کاررفته در ساخت آن‌ها نام گذاری شدند.



شکل ۴- طرح اختلاط نهایی مصالح سنگی مصرفی بر اساس منحنی فولر

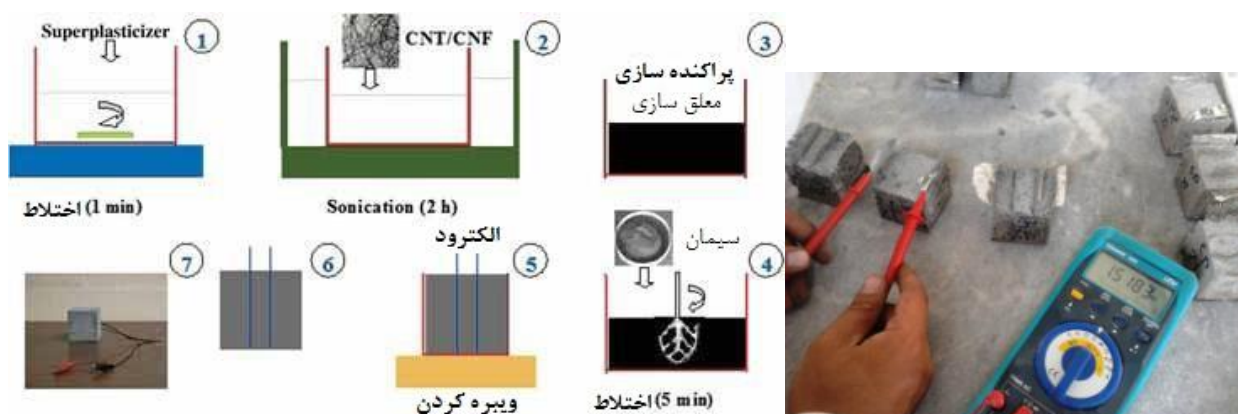
جدول ۱- طرح اختلاط حسگرهای فشارسنج الکتریکی بتنی

کد نمونه	نانولوله کربن kg/m^3 (برحسب درصد وزنی سیمان)	سیمان (kg/m^3)	ماسه ریز (kg/m^3)	ماسه درشت (kg/m^3)	شن ریز (kg/m^3)	شن درشت (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	W/C ¹
0.1C	0.35 (0.1%)	350.0							
0.125C	0.4375 (0.125%)	350.0	942.6	166.4	554.4	184.5	159.1	3.5	0.46
0.15C	0.525 (0.15%)	350.0							

¹ نسبت آب به سیمان

۲-۲- روش ساخت حسگر و ستون بتنی

به منظور ساخت حسگر، ابتدا لازم است نانولوله کربنی به شکل مناسب در آب پراکنده شود. برای پایداری پراکندگی نانولوله کربنی از فوق روان کننده پایه پلی کربکسیلاتی استفاده شد. بخشی از فوق روان کننده مورد نیاز جهت نیل به کارایی مطلوب در مرحله یک به آب اضافه شده و توسط همزن مخلوط می شود در ادامه نانولوله های کربنی به مخلوط اضافه شده (مرحله ۲) و به جهت پراکندگی مناسب به مدت ۲ ساعت در حمام التراسونیک قرار داده می شود. در ادامه سیمان به مخلوط اضافه شده (مرحله ۴) و ۵ دقیقه هم زده شده تا یکنواخت گردد. در ادامه مصالح سنگی اضافه می شود و عمل اختلاط ادامه می یابد. در انتها با قرار دادن الکترودها درون قالب و بتن ریزی قالب حسگرهای بتنی شکل می گیرند. در انتها بعد از بیرون آوردن حسگرها از قالب برای ۲۸ روز در آب با دمای ۲۳ درجه سانتی گراد عمل آوری شده و در نهایت به مدت یک هفته در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده می شوند تا کاملاً خشک شوند. در ادامه به منظور بررسی چسبندگی الکتروود به بتن و همچنین تعیین میزان هدایت الکتریکی هر کدام از حسگرها، با ولت متر مقاومت دو سر هر کدام اندازه گیری می شود. روند ساخت حسگرهای فشارسنج الکتریکی بتنی در شکل ۵ نشان داده شده است. خاطر نشان می شود روند انجام مراحل مختلف آزمایشگاهی همگی در آزمایشگاه های مرتبط در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی به انجام رسیده است.



شکل ۵- روند ساخت حسگرهای فشارسنج الکتريکی بتنی و اندازه‌گیری مقادير اولیه هدايت الکتريکی آن‌ها

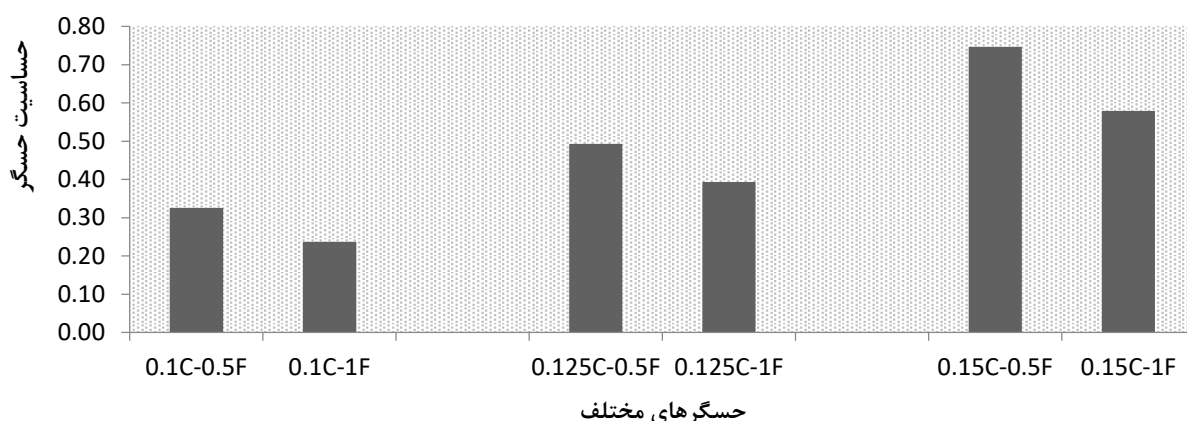
به منظور ساخت حسگرهای فشارسنج الکتريکی بتنی مقدار مناسب نانولوله کربن به گونه‌ای به دست می‌آید که حسگرهای فشارسنج الکتريکی بتنی دارای هدايت الکتريکی مناسبی باشد و هنگام بارگذاری حسگر، پاسخ خروجی حسگر اغتشاشات کمی داشته باشد. از این رو سه حسگر مختلف با درصد‌های متفاوت نانولوله کربن ساخته شد و با بررسی خروجی هر حسگر، مقدار مناسب نانولوله کربن برای نیل به تراوایی مناسب و خروجی بدون اغتشاش تعیین شد. بعد از این مرحله خروجی الکتريکی حسگر تحت بارگذاری و باربرداری مورد بررسی قرار گرفته و حسگر کالیبره می‌شود. در ادامه به منظور اعتبارسنجی ضرایب ثابت حسگر، حسگر ساخته شده در یک المان بتنی قرار داده شد و برای آزمایش عملکرد حسگر، المان بتنی بعد از مدت ۱۴ روز عمل‌آوری تحت بارگذاری استاتیکی تا لحظه شکست قرار گرفت. شکل ۶ نحوه جادهی حسگر بتنی در داخل المان بتنی و آزمایش حسگر تا نقطه شکست را نشان می‌دهد.



شکل ۶- جاگذاری حسگرهای فشارسنج الکتريکی بتنی داخل المان بتنی و آزمایش حسگر تا نقطه شکست

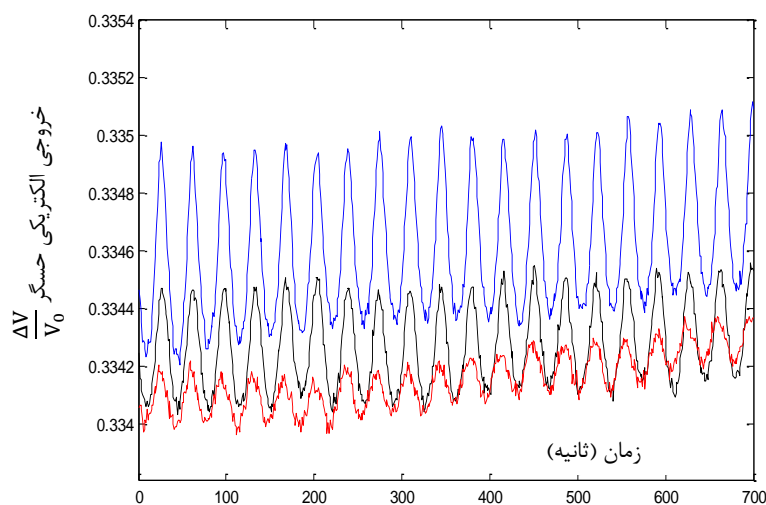
۳- تحلیل و تفسیر نتایج

به منظور ارزیابی الکتريکی حسگرها، از معیار حساسیت حسگر استفاده شد. بر این اساس معیار حساسیت حسگر (Se) را می‌توان نسبت تغییرات مقاومت الکتريکی دو سر حسگر به تغییرات نیروی وارده به حسگر تعریف نمود. حسگری مطلوب است که با اندک تغییرات نیرو، تغییرات خروجی ملموسی را نشان دهد. بدین معنی که شیب نمودار نیرو (تنش)-پاسخ الکتريکی حسگر (تغییرات مقاومت به مقاومت اولیه $\frac{\Delta R}{R_0}$ یا تغییرات ولتاژ به ولتاژ اولیه $\frac{\Delta V}{V_0}$) می‌بایست حتی الامکان زیاد باشد. بر این اساس حساسیت حسگر برای سه نوع حسگر با مقادیر متفاوت نانولوله کربن در دو سطح نیرو ۰/۵ و ۱ کیلو نیوتن در شکل ۷ نشان داده شده است. (0.5F) به معنی اعمال ۰.۵ کیلو نیوتن بر حسگر است)



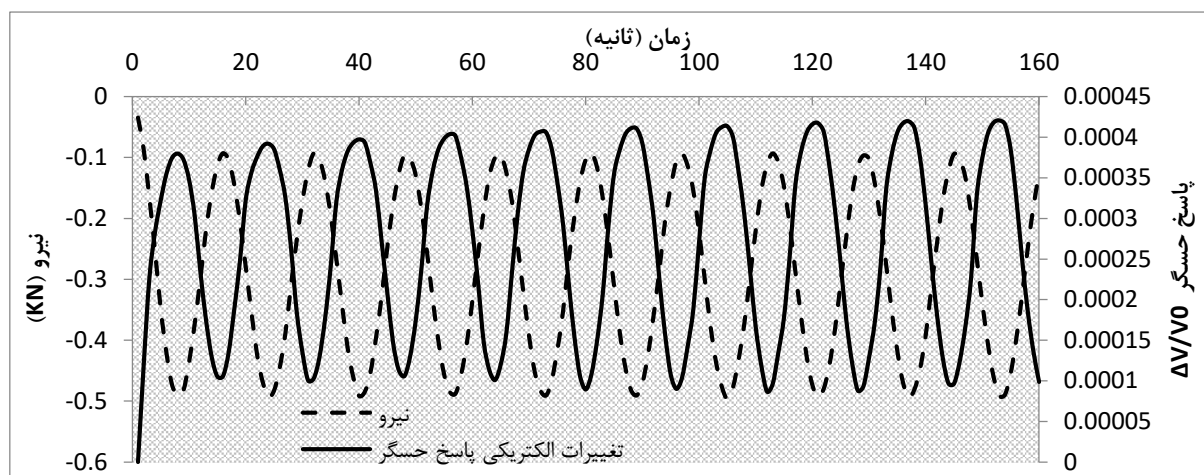
شکل ۷- حساسیت حسگرهای مختلف حاوی درصد‌های متفاوت نانولوله کربن و در سطوح مختلف بارگذاری

همان‌طور که مشخص است با افزایش مقدار نانولوله کربنی حساسیت حسگر بیشتر شده است و همچنین در سطوح کمتر بارگذاری حساسیت حسگر مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. این به این دلیل است که در تعریف حساسیت حسگر مقدار تغییرات الکتریکی حسگر به تغییرات نیرو به‌عنوان حساسیت تعریف شد. در ادامه هر یک از حسگرها برای ۲۰ سیکل متوالی در سطوح مختلف بارگذاری ۰/۵، ۱، و ۱/۵ کیلو نیوتن مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حسگرهای حاوی ۰/۱ و ۰/۱۲۵ درصد وزنی سیمان، نانولوله کربنی در پاسخ دارای اغتشاشاتی هستند که به‌عنوان نمونه پاسخ الکتریکی حسگر 0.1C در شکل ۸ نشان داده شده است.

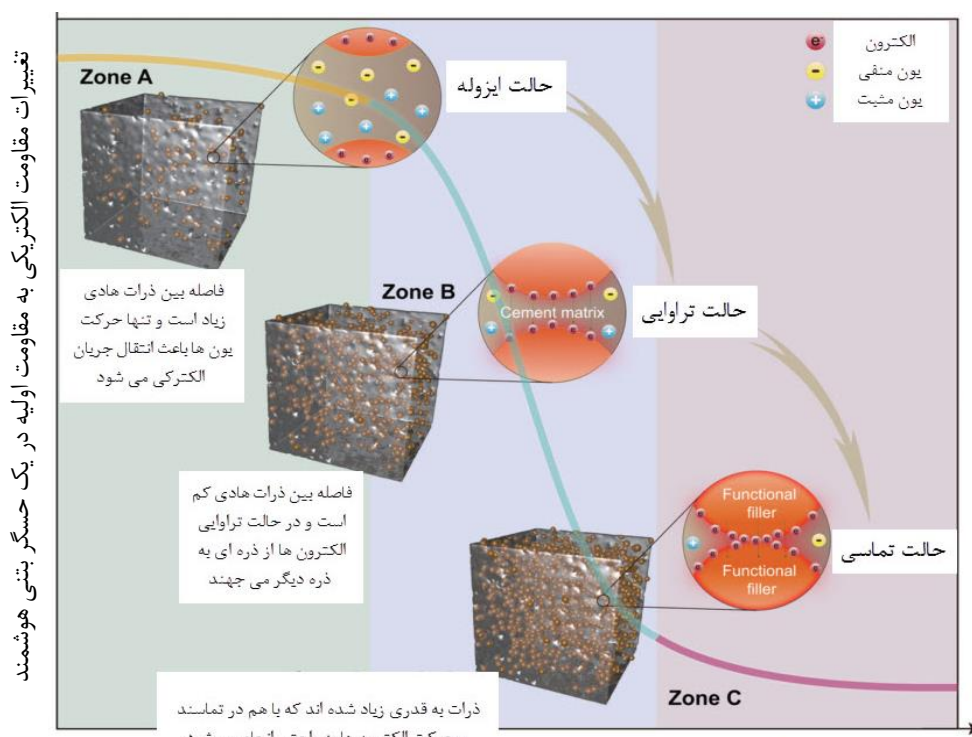


شکل ۸- حساسیت حسگرهای مختلف حاوی درصد‌های متفاوت نانولوله کربن و در سطوح مختلف بارگذاری شکل ۸- پاسخ الکتریکی حسگر $(\frac{\Delta V}{V_0})$ حاوی ۰/۱ درصد وزنی سیمان نانولوله کربن در سطوح مختلف بارگذاری ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلو نیوتن

با بررسی پاسخ حسگر بتنی حاوی ۰/۱۵ وزنی سیمان، نانولوله کربنی در شکل ۹، مشاهده می‌شود پاسخ حسگر بدون اغتشاش دقیقاً متناظر با نیروی وارده در حال تغییر است. بر اساس مطالعات گذشته با افزایش افزودنی‌های هادی جریان الکتریکی به بتن نظر نانولوله کربنی، حساسیت حسگر افزایش می‌یابد. در صورتی که هدف از ساخت حسگر، سنجش تغییرات بار و تغییر مکان حسگر باشد (حسگر فشارسنج الکتریکی) افزایش میزان نانولوله‌های کربنی در حالت تراوایی کفایت می‌کند. ولی در صورتیکه هدف ساخت حسگری باقابلیت تشخیص خرابی و رشد ترک در سازه باشد به میزان بیشتری ذرات هادی جهت نیل به حالت تماسی نیاز است. این مطلب در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۹- پاسخ الکتریکی حسگر $0.15C \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)$ در سطح بارگذاری 0.5 کیلو نیوتن



پرکننده های عملکردی مانند نانولوله کربن بر حسب درصد وزنی سیمان

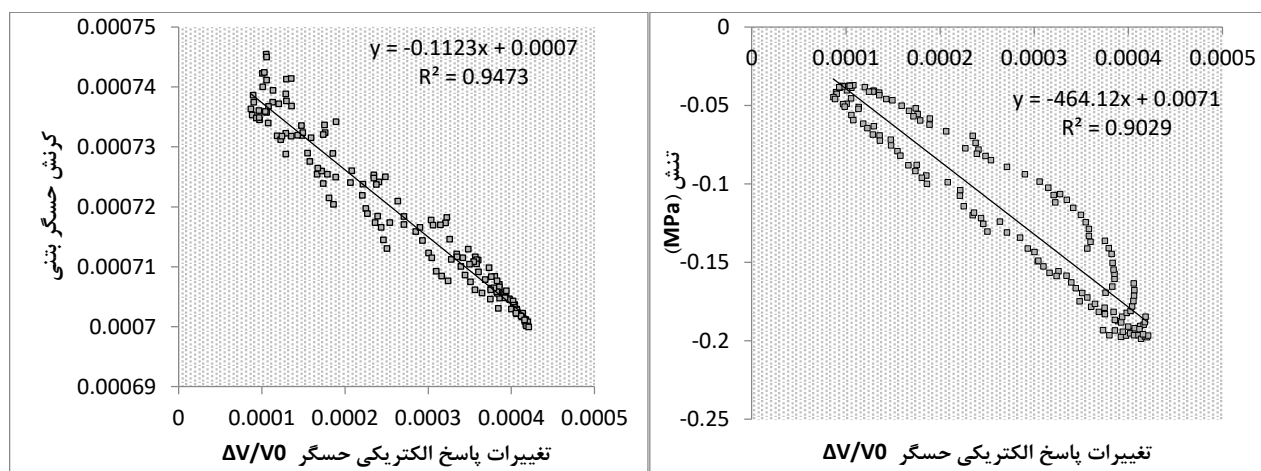
شکل ۱۰- سطوح مختلف هدایت الکتریکی در حسگرهای بتنی با کاربرد متفاوت

استفاده از نانولوله های کربنی در بتن از طرفی به دلیل مدول الاستیسیته بالای آن ها (در حدود ۵ برابر فولاد)، مقاومت کششی بالای آن (در حدود ۵۰ برابر فولاد) می تواند خواص مکانیکی خمیر سیمان را ارتقا دهد ولی باید توجه داشت که میزان ارتقا به شدت به پارامترهایی از قبیل، نوع و ساختار نانولوله کربنی، میزان چسبندگی نانولوله با خمیر، مقدار نانولوله مصرفی، کیفیت پخش نانولوله، طول و اندازه نانو مواد و ... بستگی داشته باشد که با توجه به تغییرات مختلف هر یک از آن ها در مراجع مختلف خواص مکانیکی به گونه متفاوتی

ارتقاء یافته یا بعضاً کاهش یافته است. مثلاً در تحقیقی که توسط گالو و همکاران انجام شد اضافه نمودن نانو فیبر کربن تا میزان ۰٫۵ درصد باعث افزایش مقاومت شده است و از این مقدار بیشتر باعث کاهش مقاومت شده است [۱۶].

در این تحقیق هدف رسیدن به تراوایی الکتریکی مناسب در بتن بود و از این رو برای توجیه اقتصادی بهتر این حسگرها لازم بود تا حد ممکن از نانولوله کربن کمتری استفاده شود. استفاده مقدار کم نانولوله‌ها در حد ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان مصرفی در ساخت حسگر بتنی در حدود ۱۵ درصد باعث افزایش مقاومت بتن نسبت به بتن نمونه شاهد شد. باید توجه داشت هدف ما در این مقاله بررسی تغییرات مقاومت مکانیکی این حسگرها نیست. لذا بهینه‌یابی مقدار نانولوله‌ها بر اساس ایجاد خاصیت تراوایی در بتن و کاهش اغتشاشات به حداقل مقدار ممکن استوار است.

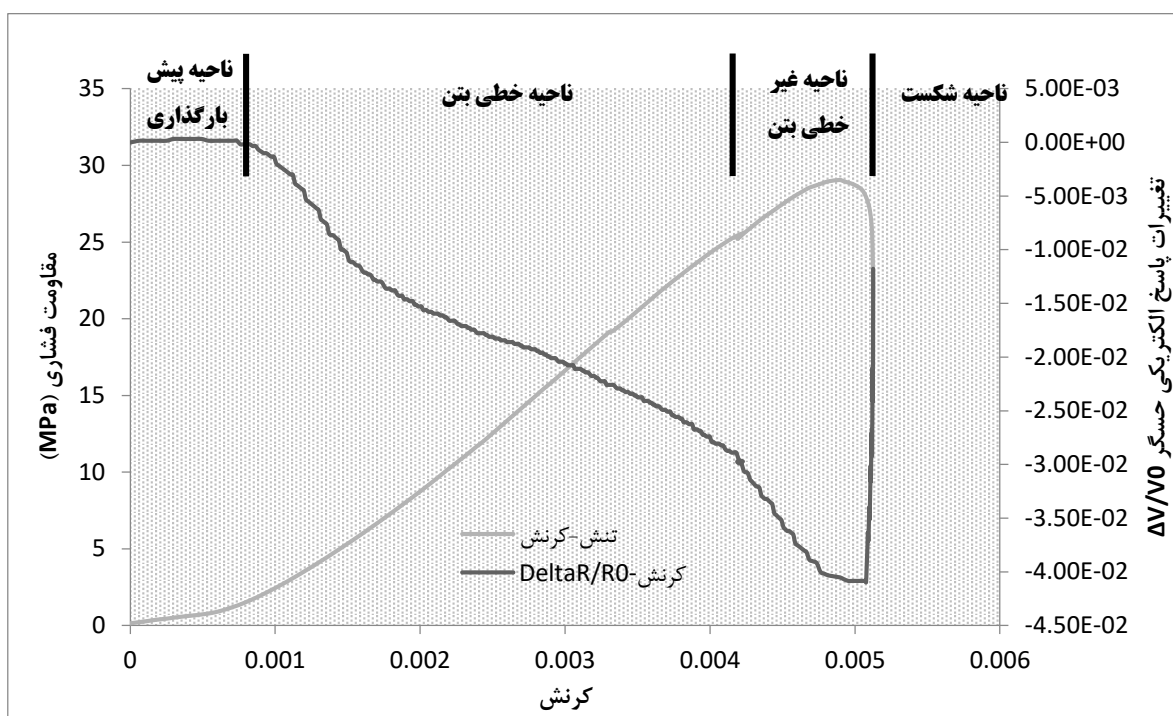
بعد از تعیین مقدار بهینه نانولوله کربن برای حسگر بر اساس حداقل اغتشاش و بیشترین حساسیت که در حسگر بتنی حاوی ۰/۱۵ وزنی سیمان، نانولوله کربنی حاصل شد لازم بود تا رفتار حسگر بتنی فرمول‌بندی گردد تا بتوان از این حسگر برای پیش‌بینی نیرو و جابجایی وارده به آن با توجه به پاسخ الکتریکی حسگر اقدام نمود. از این رو حسگر ساخته شده طی ۱۰ سیکل با شدت نیروی حداکثر ۰/۵ کیلو نیوتن بارگذاری و باربرداری شد. نمودار ۱۱ تغییرات پاسخ الکتریکی حسگر $\frac{\Delta V}{V_0}$ در مقابل تنش و کرنش حسگر بتنی را نشان می‌دهد. با استفاده از معادلات رگرسیون خطی، مقادیر ثابت حسگر تعیین گردید. به این عمل کالیبراسیون حسگر گفته می‌شود که تمامی حسگرها قبل از مصرف باید توسط شرکت سازنده یک‌بار کالیبره شده و ضرایب مدل حاکم بر رفتار حسگر به استفاده‌کننده ارائه شود [۳۴]. در فرایند بررسی حساسیت حسگر تنش وارده به حسگر بسیار جزئی است به نحوی که حسگری که بتواند سطوح کم تنش را نشان دهد قطعاً از حساسیت مناسبی برخوردار است. همچنین اعمال سطوح زیاد تنش باعث ایجاد خرابی و ریزترک در محیط بتن خواهد شد که عملاً رفتار بتن بعد از فرایند کالیبراسیون تغییر خواهد کرد.



شکل ۱۱- تغییرات پاسخ الکتریکی حسگر $\frac{\Delta V}{V_0}$ در مقابل نیرو و جابجایی حسگر بتنی

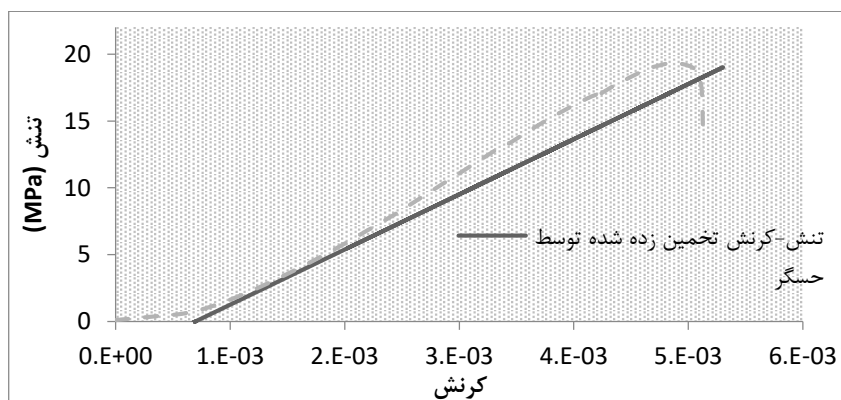
در این مرحله حسگر در داخل عضو سازه‌ای قرار گرفته و عضو سازه‌ای بتن‌ریزی می‌شود. به منظور بررسی رفتار عضو سازه‌ای تا لحظه شکست و ارزیابی دقت خروجی حسگر تا نیروی نهایی ستون، به‌طور هم‌زمان اطلاعات تنش، کرنش و تغییرات پاسخ الکتریکی حسگر برداشت می‌شود. باید توجه داشت که برخلاف رویه کالیبره نمودن حسگر که در سطوح بسیار جزئی تنش انجام می‌شود، این آزمایش یک آزمایش مخرب هست و حسگر بتنی تا لحظه شکست بارگذاری می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده می‌شود، ستون بتنی تا اندکی بعد از شکست بارگذاری شده است و رفتار آن تا لحظه شکست در مقابل پاسخ حسگر دهن شده در درون ستون نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مرحله پیش بارگذاری، تغییرات پاسخ حسگر بتنی بسیار جزئی است در ادامه با اعمال بیشتر نیرو به ستون و فشرده شدن الاستیک ستون تحت بارگذاری، عملاً فاصله بین نانولوله‌های کربنی کاهش یافته و مقاومت عبور الکترون‌ها از ماتریس سیمان کاهش می‌یابد. این روند در اوایل بارگذاری بیشتر (شیب نمودار بیشتر) و در ادامه با شیب کمتری مشاهده شد. دلیل این رفتار می‌تواند به علت جابجایی بیشتر خمیر سیمان با توجه به وجود فضاهای خالی در خمیر در ابتدای بارگذاری توجیه شود. در ادامه با رشد

ریزترکها در بتن و به هم پیوستن آنها در تنشی بیش از ۰/۷۵ درصد مقاومت نهایی بتن، رشد ترکهای بتن وارد ناحیه ناپایدار شده و خواص بتن غیرخطی می شود. مطالعات گذشته نشان دادند از شروع ناحیه غیرخطی تا لحظه شکست به علت شکست ساختار بتن احتمال تماس نانولوله های کربنی به هم و افزایش رسانایی (کاهش مقاومت) وجود دارد. نکته مهمی که قابل مشاهده است تغییر رفتار از ناحیه الاستیک به غیرخطی است که حسگر بتنی می تواند به خوبی آن را شناسایی کند. در ادامه با به هم پیوستن ریزترکها و ایجاد ترکهای عمیق و شکست نمونه، جدا شدن و فاصله گرفتن بتن در مجاورت ترکها، باعث کاهش رسانایی و افزایش مقاومت خواهد شد. این ناحیه و لحظه شکست نیز به خوبی قابل مشاهده است.



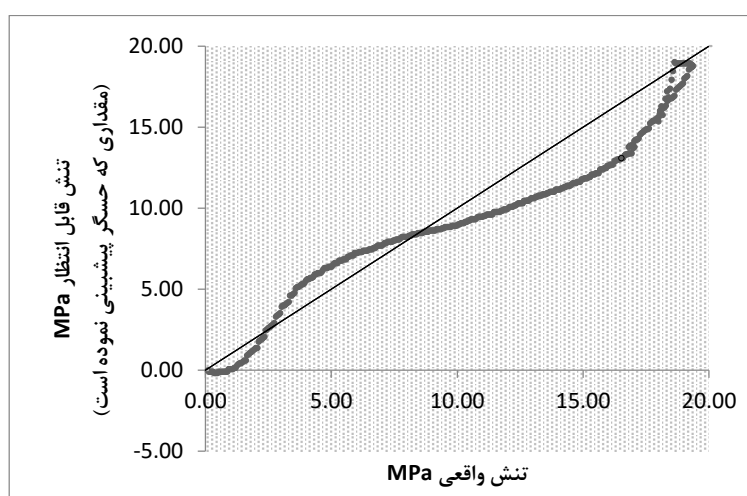
شکل ۱۲- ارتباط معنادار بین نمودار تنش و کرنش ستون بتنی با تغییرات پاسخ الکتریکی حسگر $\frac{\Delta V}{V_0}$

به منظور بررسی عملکرد حسگر بتنی در تخمین تنش و کرنش وارده به عضو سازه ای، با استفاده از معادلات به دست آمده در فرایند کالیبراسیون (ارائه شده در شکل ۱۱) حاکم بر رفتار حسگر، مقدار تنش و کرنش قابل انتظار وارده به عضو بتنی بر اساس خروجی الکتریکی حسگر $\frac{\Delta V}{V_0}$ که در شکل ۱۲ در روند آزمایش شکست عضو بتنی به دست آمده در شکل ۱۳ به همراه نمودار تنش کرنش واقعی عضو بتنی نشان داده است.



شکل ۱۳- منحنی تنش-کرنش واقعی (به دست آمده از آزمایش) و قابل انتظار (تخمین زده شده از خروجی به دست آمده) از حسگر

همان‌طور که در نمودار ۱۳ نشان داده می‌شود حسگر بتنی توانسته با دقت مناسبی رفتار واقعی عضو بتنی را تخمین بزند. از آنجایی که به‌منظور کالیبره نمودن حسگر، مقدار تنش کمی به نمونه وارد می‌شود. از این‌رو معادلات استخراج‌شده در فرایند کالیبراسیون حسگر بیشتر بیانگر رفتار بتن در ناحیه الاستیک خطی است. این در حالی است که بتن دارای فازهای مختلفی است از این‌رو تخمین رفتار بتن در شرایط واقعی به‌وسیله حسگر بتنی قطعاً دارای تفاوت‌هایی است. در شکل ۱۴ تفاوت مقادیر تنش واقعی تحمل شده توسط عضو بتنی تا لحظه شکست در مقابل تنش تخمین زده‌شده توسط حسگر با توجه به خروجی الکتریکی حسگر نشان داده شده است. قطعاً هرچه اختلاف بین مقدار تخمین زده‌شده با مقدار واقعی کمتر باشد و یا به عبارتی نقاط به خط $Y=X$ نزدیک‌تر باشند حسگر با دقت بیشتری رفتار واقعی حسگر را تخمین زده است. باوجود تشابه زیاد بین رفتار بتن و تغییرات خروجی الکتریکی حسگر هم در ناحیه خطی و غیرخطی، توصیه می‌شود که استفاده از حسگر تا قبل از ترک‌خوردگی بتن مورد تأکید باشد. بعد از ایجاد ترک در بتن پارامترهای زیادی در تعیین رفتار بتن تأثیرگذار هستند که نمی‌توان همه آن‌ها را در قالب مدل جامع ارائه نمود؛ ولی در صورتی که عملکرد تقریبی حسگر مورد توجه باشد در ناحیه غیرخطی بتن نیز می‌توان از حسگر استفاده نمود.



شکل ۱۴- تنش واقعی تحمل شده توسط عضو بتنی تا لحظه شکست در مقابل تنش تخمین زده‌شده توسط حسگر با توجه به خروجی الکتریکی حسگر

عمده دلایل وجود تفاوت بین نتایج تخمین زده‌شده با نتایج واقعی را می‌توان به‌قرار ذیل خلاصه نمود:

- ۱- قطعاً جواب یک عضو سازه‌ای یکتا نیست و مقاومت فشاری به‌عنوان یک متغیر تصادفی عضو بتنی به فرض پیروی از توزیع نرمال دارای انحراف معیاری در بین نمونه‌های مختلف از یک طرح اختلاط است. لذا از دید آماری عملاً عدم تطابق بین نتایج تخمین زده‌شده با مقادیر واقعی نشان‌دهنده ضعف و همچنین از بعد دیگر قوت حسگر نیست.
- ۲- هرچند حسگر بتنی دارای طرح اختلاطی مشابه با عضو بتنی است ولی مسلح شدن آن با نانولوله‌های کربنی قطعاً بر مقاومت نهایی حسگر نسبت به عضو بتنی تأثیر گذاشته و همچنین همان‌طور که در نمودار ۱۳ نشان داده می‌شود دارای کرنش بیشتری تا لحظه تا شکست است. لذا طبیعتاً رفتار این دو عضو یکسان نیست.
- ۳- باید توجه داشت که عضو بتنی فقط ۱۴ روز عمل‌آوری شد؛ ولی حسگر ۲۸ روز بعلاوه اینکه حسگر ۷ روز در آون خشک شد و ۱۴ روز را در عضو سازه‌ای سپری کرد تا اینکه شکسته شود. از این‌رو تفاوت بین عمر این دو نمونه می‌تواند تفاوت در رفتار این دو عضو را نیز به همراه داشته باشد.
- ۴- هرچند سعی شد حسگر بتنی دقیقاً در وسط ارتفاع و قطر نمونه قرار گیرد ولی به دلیل تفاوت بین شکل حسگر (مکعب) در مقابل مقطع دایره‌ای عضو سازه‌ای، سن بتن، مدول الاستیسیته حسگر و عضو سازه‌ای، وجود الکتروود فلزی و سیم عبوری در عضو بتنی قطعاً رفتار حسگر با عضو سازه‌ای متفاوت خواهد بود.

با توجه به همه موارد فوق باید توجه داشت که نتایج به دست آمده تطابق بالایی بین بارگذاری خارجی و پاسخ الکتریکی حسگر را نشان می‌دهند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که این حسگر از دقت بالایی برخوردار بوده و با توجه به هزینه اندک ساخت و همچنین سازگاری بیشتر با بتن عضو سازه‌ای نسبت به حسگرهای الکترومکانیکی متداول و همچنین دوام بیشتر و حساسیت کارگذاری کم‌تر و راحت‌تر در دل عضو سازه‌ای نسبت به قطعات حسگرهای الکترومکانیکی متداول، می‌توان نتیجه گرفت که این نوع حسگر گزینه مناسبی جهت پایش نیروهای وارده به عضو سازه خواهد بود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار فشارسنج الکتریکی بتنی در حسگرهای هوشمند بتنی مدل‌سازی شد و برخلاف تحقیقات پیشین که نتایج مختلفی در این زمینه ارائه داده بودند، توانست با فرمول‌بندی رفتار فشارسنج الکتریکی، میزان نیروی وارده به عضو بتنی را از روی مقدار تغییرات الکتریکی دو سر یک حسگر بتنی تخمین بزند. نتایج مدل‌سازی و تحلیل آماری دقت مدل‌سازی بالایی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج رفتارشناسی عضو بتنی از روی خروجی الکتریکی حسگر بتنی نشان داد که این نوع حسگرهای بتنی به خوبی رفتار در ناحیه خطی و غیرخطی بتنی را جدا کرده و مراحل مختلف شروع ریزترک‌ها، به هم پیوستگی آن‌ها و خرابی المان بتنی را نشان می‌دهند. بررسی حساسیت حسگرها نشان داد که با اضافه نمودن مقادیر ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان، نانولوله کربن می‌توان به تراوایی لازم برای ساخت حسگر فشارسنج الکتریکی با دقت مناسب دست یافت.

۵- مراجع

- [1] F. Azhari and N. Banthia, "A 3D percolation model for conductive fibrous composites: application in cement-based sensors," *J. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 17, pp. 5817–5821, 2015.
- [2] F. J. Baeza, O. Galao, E. Zornoza, and P. Garcés, "Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements," *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 3, pp. 841–855, 2013.
- [3] S. Sun, X. Yu, and B. Han, "Sensing Mechanism of Self-Monitoring CNT Cementitious Composite," *J. Test. Eval.*, vol. 42, no. 1, p. 20120302, 2014.
- [4] S. Parveen, S. Rana, and R. Fanguero, "A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites," *J. Nanomater.*, vol. 2013, pp. 1–19, 2013.
- [5] B. Han, S. Ding, and X. Yu, "Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review," *Measurement*, vol. 59, pp. 110–128, 2015.
- [6] J. Wilson, *Sensor Technology Handbook*. Chandler, Arizona, USA: Elsevier Ltd, 2005.
- [7] K. Gopalakrishnan, P. T. Bjorn Birgisson, and N. O. A.-O. (Eds.), *Nanotechnology in Civil Infrastructure A Paradigm Shift*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [8] M. Adresi, "Concrete pavement prediction life model based on electrical response of concrete - CNTs sensors under fatigue loading," Politecnico di Torino, 2017.
- [9] P. W. Chen and D. D. L. Chung, "Concrete as a new strain/stress sensor," *Compos. Part B Eng.*, vol. 27, no. 1, pp. 11–23, 1996.
- [10] H. Xiao, H. Li, and J. Ou, "Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 167, no. 2, pp. 581–587, 2011.
- [11] B. Han and J. Ou, "Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 138, no. 2, pp. 294–298, 2007.
- [12] M. Sun, R. J. Y. Liew, M.-H. Zhang, and W. Li, "Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, no. 2014, pp. 630–637, 2014.
- [13] F. Azhari and N. Banthia, "Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for

- piezoresistive sensing,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 7, pp. 866–873, 2012.
- [14] M. Sun, Q. Liu, Z. Li, and Y. Hu, “A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1593–1595, 2000.
- [15] S. Wen and D. D. L. Chung, “Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars,” *Carbon N. Y.*, vol. 44, no. 8, pp. 1496–1502, 2006.
- [16] O. Galao, F. J. Baeza, E. Zornoza, and P. Garcés, “Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 46, no. 2014, pp. 90–98, 2014.
- [17] M. Saafi, “Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures.,” *Nanotechnology*, vol. 20, no. 39, p. 395502, 2009.
- [18] D.-M. Bontea, D. D. L. Chung, and G. C. Lee, “Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 4, pp. 651–659, 2000.
- [19] S. Wang and D. D. L. Chung, “Self-monitoring of strain and damage by a carbon-carbon composite,” *Carbon N. Y.*, vol. 35, no. 5, pp. 621–630, 1997.
- [20] S. Ding, S. Dong, A. Ashour, and B. Han, “Development of sensing concrete : Principles , properties and its applications,” *J. Appl. Phys.*, vol. 126, no. 241101, 2019.
- [21] B. Wu, X. Huang, and J. Lu, “Biaxial compression in carbon-fiber-reinforced mortar , sensed by electrical resistance measurement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1430–1434, 2005.
- [22] E. Darvishan, “Low cost health monitoring of cable stayed bridges using synchrosqueezed wavelet transform and nonlinear principal component analysis,” *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 193–216, 2019.
- [23] G. Nouri, S. H. Lavasani, and M. Shahrabi, “Developing the application of strain energy spectrum in the health monitoring of steel resistance frame structures,” *J. Struct. Constr. Eng.*, 2019.
- [24] A. Rytter, “Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University,” 1993.
- [25] A. D’Alessandro, F. Ubertini, A. L. Materazzi, S. Laflamme, A. Cancelli, and L. Micheli, “Carbon cement-based sensors for dynamic monitoring of structures,” in *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence*, 2016, pp. 1–4.
- [26] S. Materials, S. Ding, and B. Han, “Structural modal identification and health monitoring of building structures using self-sensing cementitious composites,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, 2020.
- [27] A. Meoni *et al.*, “An Experimental Study on Static and Dynamic Strain Sensitivity of Embeddable Smart Concrete Sensors Doped with Carbon Nanotubes for SHM of Large Structures,” *sensors*, vol. 18, no. 3, pp. 1–19, 2018.
- [28] A. Downey, E. Garcia-Macias, A. D’Alessandro, S. Laflamme, R. C.-T. Ubertini, and F. Ubertini, “Continuous and embedded solutions for SHM of concrete structures using changing electrical potential in self-sensing cement-based composites,” in *Proceedings Volume 10169, Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure*, 2017.
- [29] Y. Wang, Y. Wang, B. Wan, B. Han, G. Cai, and Z. Li, “Properties and mechanisms of self-sensing carbon nanofibers / epoxy composites for structural health monitoring Properties and mechanisms of self-sensing carbon nano fi bers / epoxy composites for structural health monitoring,” *Compos. Struct.*, vol. 200, pp. 669–678, 2018.
- [30] M. Adresi, A. Hassani, A. Khishdari, and M. Zeini, “Determination of optimum Mix Design for Cement Treated Base Containing High Volume of Reclaimed Asphalt Pavement,” *Transp. Infrastructures Eng. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–68, 2017.
- [31] M. Adresi, A. Hassani, Mohammad reza Soleimani, and A. yazdian Varjani, “Investigation of carbon nanotube and energy levels effects on Self-sensing Concrete Sensor Performance in Dynamic Loading Pattern,” *Transp. Infrastructures Eng. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 17–34, 2016.
- [32] M. Adresi, A. Hassani, S. Javadian, and J. Tulliani, “Determining the Surfactant Consistent with Concrete in order to Achieve the Maximum Possible Dispersion of Multiwalled Carbon Nanotubes in Keeping the

- Plain Concrete Properties,” *J. Nanotechnol.*, vol. 2016, no. Article ID 2864028, pp. 1–10, 2016.
- [33] M. Adresi, A. Hassani, J.-M. Tulliani, G. Lacidogna, and P. Antonaci, “A study on the main factors affecting the performance of self-sensing concrete,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 29, no. 5, pp. 216–226, 2017.
- [34] M. Adresi, A. Ahmadi, M. Ahamadi, M. Forsat, and M. Taghipour, “Methodology of Damage Detection and Weight in Motion Performance under Traffic Loading Based on Self-Sensing Concrete,” *Transp. engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 139–154, 2018.