

ساخت و تحلیل حسگر بتنی سنجش خرابی سازگار با خصوصیات مکانیکی رویه بتنی راه

مصطفی آدرسی^۱، ابوالفضل حسینی^{۲*}، محمدرضا سلیمانی کرمانی^۳، علی یزدیان ورجانی^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳. استادیار پژوهشگاه حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۴. استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

Hassani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۱/۰۴]

تاریخ پذیرش: [۹۵/۳/۲۹]

چکیده- تکنولوژی نظارت و کنترل سلامت ساخته‌های مهندسی (SHM) با تأمین راهی برای ارزیابی ایمنی و دوام رویه بتنی در طول عمر آن، این امکان را به وجود می‌آورد تا بتوان از میزان سلامت، رویه بتنی در حال باخبر بود. به منظور عملیاتی نمودن سیستم SHM لازم است که زیر ساخت آن از قبیل ایجاد حسگر در نقاط مختلف رویه بتنی به منظور برداشت لحظه به لحظه اطلاعات مربوطه عملیاتی شود. یکی از مهم‌ترین و اقتصادی‌ترین حسگرها، حسگرهایی از جنس خود رویه بتنی راه است که از اختلاط نانولوله کربن با بتن تولید می‌شوند. هدف از این پژوهش، تشریح چگونگی ساخت حسگرهای بتنی از جنس رویه بتنی راه به گونه‌ای که خواص مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی) حسگر تولید شده نزدیک به رویه بتنی راه باشد. در این راستا تعیین مقدار بهینه و کیفیت پخش نانولوله‌های کربنی با توجه به تأثیر مواد فعال کننده سطحی مختلف به عنوان اصلی‌ترین پارامتر تأثیرگذار در خواص حسگر بررسی شد. برای این منظور از دو نوع ماده فعال کننده سطحی و مقادیر متفاوت نانولوله کربن برای ساخت حسگرهای مختلف بتنی استفاده شد. برای سنجش ویژگی‌های مکانیکی حسگر بتنی، از دو آزمایش مقاومت فشاری و خمشی استفاده شد و همچنین به منظور ارزیابی الکتریکی پاسخ حسگر نیز از دو معیار حساسیت حسگر و خطای مطلق از پیش‌بینی استفاده شد. نتایج نشان دادند که حسگر ساخته شده با نانولوله کربن به مقدار ۰/۱۵٪ وزنی سیمان، به همراه فعال کننده سطحی ترکیبی فوق‌روان کننده^۳ و SDS^۴ دارای خواص مکانیکی سازگار با رویه بتنی راه و پاسخ الکتریکی مناسبی است.

واژگان کلیدی: حسگر بتنی، نانولوله کربن، خواص مکانیکی، خواص الکتریکی، بتن.

1 Structural Health Monitoring
2 Carbon nanotubes
3 superplasticizer
4 Sodium dodecyl sulfate

۱- مقدمه

بودن آستانه تراوایی به عوامل مختلفی از قبیل مواد تشکیل دهنده، فرایند ساخت و بهره‌برداری و ... [16] در این پژوهش سعی شد ماده فعال‌کننده سطحی و درصد نانولوله‌کربن به گونه‌ای تعیین شود تا حسگر ساخته شده از نظر خاصیت مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی) به خواص مکانیکی رویه بتنی راه (فاقد نانولوله‌کربن) شبیه باشد و درعین حال پاسخ الکتریکی قابل قبولی را نیز ارائه دهد. از آنجاکه حسگر سنجش خرابی باید نشان‌دهنده رشد خرابی در رویه بتنی راه باشد ضروری است که خواص مکانیکی آن نیز به رویه بتنی راه شبیه باشد از طرفی پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که بر اثر مسلح شدن بتن با نانولوله‌های کربنی، خواص مکانیکی آن تا حدود زیادی افزایش می‌یابد [14، 19 و 21] پس نوآوری این پژوهش ساخت حسگر بتنی است که در عین مسلح شدن با نانولوله‌کربن و ایجاد خاصیت تشخیص خرابی، خواص مکانیکی آن نسبت به رویه بتنی راه فرق چندانی نداشته باشد. برای این منظور حسگر بتنی با مقادیر متفاوت نانولوله‌کربن و فعال‌کننده‌های سطحی مختلف ساخته شد و مقاومت فشاری و خمشی حسگرهای مختلف بتنی به منظور تعیین مقدار بهینه نانولوله‌کربن به گونه‌ای که مقاومت مشخصه حسگر با رویه بتنی راه یکسان شود اخذ شد. همچنین در حین آزمایش مقاومت فشاری، خمشی و الکتریکی حسگرهای بتنی نیز جمع‌آوری شد و بر اساس معیارهای مختلفی، حساسیت و خطی بودن رفتار حسگر به منظور نیل به مقدار مناسب نانولوله‌کربن که بتواند حسگر دقیقی را تولید نماید اندازه‌گیری شد.

۲- مروری بر ادبیات پژوهش

کونستا [22]، در پژوهش خود توانست با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی (۰٫۱٪ وزنی سیمان) به خمیر سیمان، و بهبود کیفیت پخش نانولوله‌های کربنی، در آن خاصیت رسانایی الکتریکی نسبتاً بالایی را ایجاد کند. سافی [11]، پس از پژوهش در اثر مقدار نانولوله‌های کربن تک دیواره‌ای بر مقاومت الکتریکی و فشارسنجی الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها، دریافت زمانی که مقدار نانولوله‌های تک دیواره‌ای از ۰ به ۰٫۵ درصد حجمی می‌رسد، یک کاهش ناگهانی در مقاومت الکتریکی ایجاد می‌شود و وقتی مقدار نانولوله‌های تک دیواره‌ای از ۰٫۵ به ۱ درصد حجمی افزایش می‌یابد، مقاومت

حسگر ساخته‌ای است که پیشامد یا مقدار تغییرات پارامتری را شناسایی کرده و در قالب خروجی مرتبط (عموماً سیگنال الکتریکی یا نوری) نشان می‌دهد [1]. 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 [2 و 7] و حسگرهایی با قابلیت برداشت میزان خسارت در بتن [8 و 12]. حسگر فشارسنج الکتریکی قادر به تشخیص نیروی وارد شده به رویه بتنی بر اساس تغییرات مقاومت الکتریکی است. اساس کار فشارسنج الکتریکی بر پایه رسانایی الکتریکی تونلی نانولوله‌های کربنی استوار است. خاصیت رسانایی الکتریکی تونلی در مقادیر کم نانولوله‌کربن ایجاد می‌شود [13 و 15]. ولی حسگر سنجش خرابی بر پایه رسانایی الکتریکی تماسی استوار است. بدین معنی که با افزایش مقدار نانولوله‌کربن در بتن، شبکه سه‌بعدی تماسی نانولوله‌ها باهم ساخته می‌شود [14 و 16]. هنگامی که مقدار CNTs از آستانه تراوایی الکتریکی فراتر می‌رود، رسانایی الکتریکی تماسی بر رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها تأثیرگذار خواهد شد. در نتیجه، شبکه سه‌بعدی اتصال بین CNTs پایدارتر شده و مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها دیگر وابسته به مقدار نانولوله‌های کربنی و بار خارجی نخواهد بود [10 و 17]. به هر حال، شبکه رسانایی تماسی زمانی می‌تواند تشکیل شود که مقدار نانولوله‌های کربنی زیاد باشد. در نتیجه، مقدار مؤثر CNTs در ملات سیمان باید بیشتر از مقداری باشد که در خمیر سیمان استفاده می‌شود [18]. مانند 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 CNTs، کیفیت پراکندگی CNTs و نوع و مقدار فعال‌کننده سطحی، و همچنین ترکیب خمیر سیمان وابسته است [15]. بر این اساس به منظور ساخت حسگر سنجش خرابی که بر اساس رسانایی تماسی عملکرد پایش خرابی ایجاد شده در رویه بتنی را انجام دهد مستلزم دستیابی به کمترین مقدار نانولوله‌کربن که بتواند از آستانه تراوایی بیشتر باشد است. پس با توجه به وابسته

1 Tunneling conduction

2 Contacting conduction

3 percolation threshold

SDS [27, 28] به نسبت ۹ به یک به منظور بررسی اثر فعال‌کننده سطحی بر درصد بهینه نانولوله کربن در فرایند ساخت حسگر بتنی سنجش خرابی استفاده شد.

بر اساس پژوهش‌های اخیر حسگرهای بتنی سنجش خرابی را می‌توان به دو صورت با دو الکترود یا چهار الکترود ساخت [7]. در این پژوهش از حسگرهایی با چهار الکترود مسی به ابعاد ۵×۴ به مقاومت (2.15 nΩm) برای هدایت جریان الکتریکی بین دوسر قطعه بتنی استفاده شد.

۳-۲- روش انجام آزمایش

به منظور دستیابی به حسگر دقیق باید نانولوله‌ها به خوبی در محیط بتن پخش شوند تا شبکه رسانایی به خوبی تشکیل شود. برای این منظور ابتدا لازم است تا نانولوله کربن در فاز آبی پخش شود. پس نانولوله‌های کربنی و فعال‌کننده‌های سطحی در آب به مدت ۱۰ دقیقه به وسیله همزن مکانیکی با دور ۵۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط می‌شوند. در ادامه از دستگاه اولتراسونیک استفاده شد تا انرژی لازم برای پخش نانولوله‌ها در مخلوط تولید شود. برای این منظور مخلوط آماده شده دو ساعت در حمام اولترا سونیک با توان ۲۷۵ وات قرار داده می‌شود.

جدول (۱) مشخصات نانولوله کربن چند دیواره

MWCNTs length (μm)	MWCNTs diameter (nm)	Producer	Type of additive
3±10	10-20	Research Institute of Petroleum Industry	Multi-Walled Carbon Nanotube
Electrical conductivity (Ohm-cm)	Specific gravity	Tensile strength (GPa)	purity
<10 ⁻²	1.5	100	≥ 9%

Table (1) Multi-walled carbon nanotube properties

جدول (۲) مشخصات طرح اختلاط بتن

Percentage	mix design	Percentage	mix design
23.19	Small gravel	380	Cement (kg/m ³)
7.72	Big gravel	15.34	cement
7.21	water	39.43	Small sand
0.47	W/C	6.96	Big sand

Table (2) Concrete mix design

الکتریکی کاهش بیشتری خواهد داشت. لوو و همکاران [13]، هدایت الکتریکی خمیر سیمان معمولی و مخلوط مسلح شده با ۰/۲٪ نانولوله چندلایه و ۵ فعال‌کننده سطحی مختلف را باهم مقایسه کردند. او به این نکته پی برد که مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش مقدار CNTs، کاهش می‌یابد. اظهري [6]، در مورد اثر انواع و مقادیر مختلف CNTs و ترکیب نانولوله‌های کربنی و فیبرهای کربنی بر هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها مطالعه کرد و دریافت که افزودن ۱٪ نانولوله تک لایه و ۱٪ یا ۳٪ نانولوله چندلایه مقاومت الکتریکی خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. کرزن و همکاران [14]، در مورد مقاومت الکتریکی خمیر سیمان مسلح شده با نانولوله‌های کربنی مطالعه کردند و دریافتند که نانوکامپوزیت‌ها دارای خاصیت رسانایی الکتریکی ۴۰ برابر بیشتر از خمیر سیمان معمولی هستند. ون و همکاران [17]، معتقد است که توانمندی حسگر به میزان قابل ملاحظه‌ای به میزان هدایت الکتریکی آن وابسته است. از طرفی هدایت الکتریکی مناسب در حسگر زمانی که مقدار نانولوله‌های پخش شده از آستانه تراوایی بیشتر باشند ایجاد خواهد شد. با توجه به این نکته، کیفیت پخش در تعیین آستانه تراوایی مؤثر است. هان [15]، نیز مقدار مصرف نانولوله کربن کمتر از آستانه تراوایی را برای حسگرهای فشارسنج الکتریکی و مقدار بیشتر از آن را برای حسگرهای عمل‌کننده درک‌شش مانند حسگرهای سنجش خرابی، ضروری می‌داند. آلکساندرو و همکاران [24]، نیز مقدار ۱٪ وزنی سیمان نانولوله کربن چند دیواره را آستانه تراوایی برای حسگر بتنی معرفی نمود. بر این اساس آن‌ها پارامترهای زیادی که در فرایند ساخت دخیل است را در تعیین مقدار آستانه تراوایی مؤثر دانسته‌اند.

۳- روش تحقیق و مواد و مصالح مصرفی

۳-۱- مواد و مصالح مصرفی

در این پژوهش از نانولوله کربن چند دیواره با مشخصات درج شده در جدول (۱) استفاده شد. همچنین برای ساخت حسگر بتنی از طرح اختلاط مشخص ارائه شده در جدول (۲) استفاده شد. سیمان تیپ ۱۲ استفاده شده، محصول کارخانه آبیگ استان تهران است. به منظور پخش نانولوله کربن، از دو نوع ماده فعال‌کننده سطحی فوق‌روان‌کننده (SP) [26, 25, 11] و ترکیب فوق‌روان‌کننده و

سر حسگر، مقاومت الکتریکی حسگر (RS) را می توان در هر لحظه از زمان محاسبه نمود روابط (۱ و ۲).

در ادامه در جدول (۳) طرح آزمایش در این پژوهش، شامل مقادیر نانولوله کربن، انواع فعال کننده سطحی، سطح انرژی و معیارهای ارزیابی خواص مکانیکی و الکتریکی حسگر نشان داده شده است.

جدول (۳) مشخصات روند پژوهش و ساخت نمونه های مختلف

criterion		CNT (%)	Dispersion duration (Ultrasonic)	surfactant
electrical	Mechanical			
Sensor sensitivity (Se)	Pressure strength	0.15 0.1 0.05	2 hours	SP ^۱
Absolute error	Flexure strength	0.25 0.2 0.15 0.1 0.05	2 hours	SP+SDS (SPS)

Table (3) Tests procedure

در انتها، سیمان در مخلوط کن دور بالا به مخلوط آبی اضافه شده تا به صورت یکنواخت مخلوط شود. مخلوط خمیر سیمان آماده شده بعد از اضافه شدن مصالح سنگی به وسیله مخلوط کن، مخلوط شده و در قالب چرب شده با روغن جای داده می شود و با اعمال ویبره مناسب تا حد امکان حباب های هوای آن خارج می شود. نمونه های بتنی به ابعاد ۱۶x۴x۴ که حاوی چهار الکتروود صفحه ای مسی در دو انتهای خود می باشند به مدت ۲۸ روز در آب ۲۵ درجه عمل آوری شده [29] و بعد از خشک شدن به وسیله دستگاه Instron-Tech. تحت بارگذاری استاتیکی قرار می گیرد. استاندارد مورد آزمایش، تیرچه خمشی سه نقطه ای ASTM C78 است [30] که مبنای بارگذاری در حالت استاتیکی است. در ادامه در شکل (۱) چگونگی انجام آزمایش روی حسگر و جمع آوری داده لازم نشان داده شده است.

شکل (۱) انجام آزمایش تیرچه خمشی سه نقطه ای



Fig. 1. Three points bending fatigue test setup

شکل (۲) نمایی شماتیک از مدار الکتریکی حسگر

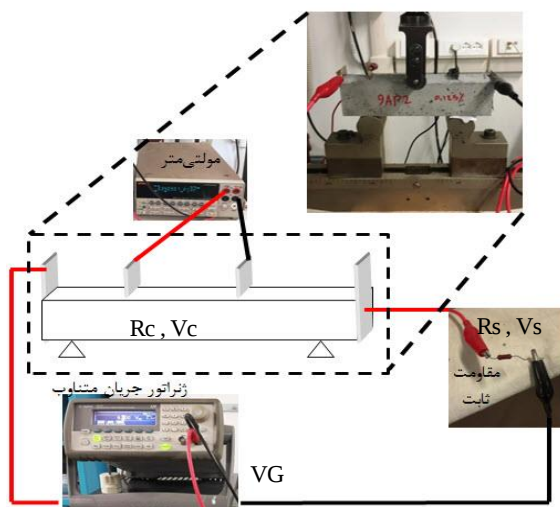


Fig. 2. Research electrical circuit

$$V_g = V_s + V_c \quad (1)$$

$$V_s = V_g \frac{R_s}{R_s + R_c} \quad (2)$$

۴- بحث و نتیجه گیری

۴-۱- ارزیابی خواص مکانیکی حسگر بتنی

به منظور تحلیل رفتار حسگر بتنی سنجش خرابی و تعیین مقادیر بهینه نانولوله کربن که به منظور ساخت یک حسگر سازگار با

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 [16]، در این پژوهش از ژنراتور جریان متناوب با بزرگی (Vpp=8 volt) و فرکانس (KHz ۲,۵) برای بی اثر کردن این پدیده استفاده شد. 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 (۲) می توان نتیجه گیری کرد که با قرار دادن مقاومت ثابت (Rc=۲۰۰KΩ) در مدار و همچنین با اندازه گیری اختلاف پتانسیل دو

بر اساس نمودار (۳) مقاومت خمشی طرح اختلاط بتن حاوی ۰/۵٪ فوق‌روان‌کننده و مسلح شده با ۰/۱٪ نانولوله‌کربن با مقاومت بتن مادر حاوی ۰/۵٪ فوق‌روان‌کننده برابر است. همچنین طرح اختلاط بتن حاوی ۰/۵٪ فوق‌روان‌کننده و ۰/۰۷۸٪ SDS (به نسبت ۹ به ۱) به همراه ۰/۱۵٪ نانولوله‌کربن (0.15%CNT, 0.5%SPS) از نظر مقاومتی شبیه به مقاومت رویه بتنی راه (معمولی بدون فوق‌روان‌کننده) است. ولی از نظر مقاومت فشاری تنها طرح اختلاط 0.15%CNT, 0.5%SPS به ویژگی‌های مکانیکی رویه بتنی راه نزدیک است. پس مقدار ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان نانولوله‌کربن به همراه فعال‌کننده سطحی SDS و فوق‌روان‌کننده گزینه نهایی از نظر یکسانی خواص مکانیکی حسگر با رویه بتنی راه است.

انتظار می‌رود، در صورت استفاده از فوق‌روان‌کننده مقاومت بتن اندکی افزایش می‌یابد که این مطلب در شکل‌های (۳ و ۴) نیز نشان داده شده است. همچنین انتظار می‌رفت که همان‌گونه که در بخش مروری بر مطالب عنوان شد، با اضافه شدن نانولوله‌کربن به حسگر و مسلح شدن آن، مقاومت خمشی و فشاری آن نیز افزایش یابد که این مهم در حسگرهای ساخته‌شده با فوق‌روان‌کننده به‌عنوان فعال‌کننده سطحی در فرایند پخش نانولوله‌های کربن در فاز آبی، مشاهده شد. این نتیجه با نتایج به دست آمده در پژوهش‌های گذشته زیر نظر کزستا، شاه و یاکولو شباهت زیادی دارد [14, 25, 31, 32]. ولی این روند در حسگرهایی که از فعال‌کننده سطحی ترکیبی (فوق‌روان‌کننده و SDS) استفاده شده است، دیده نمی‌شود و در مواردی کاهش مقاومت نیز دیده شده است. با بررسی ریز ساختار بتن به وسیله عکس SEM، شکل (۵)، مشاهده شد که وجود SDS به‌عنوان یک ماده کف‌زا، باعث افزایش حباب هوای ناخواسته در بتن شده و مقاومت مکانیکی بتن را کاهش می‌دهد.

به‌منظور تعیین مقدار بهینه فعال‌کننده سطحی SDS به طوری که مخلوط نهایی حسگر دارای خواص مکانیکی مشابه خواص رویه بتنی راه باشد، میزان رشد مقاومت در مقابل نسبت فعال‌کننده سطحی به نانولوله‌کربن در شکل (۶) ترسیم شد.

نتایج نشان داد که نسبت بهینه اختلاط فوق‌روان‌کننده به نانولوله‌کربن به شرط رشد صفر خواص مکانیکی، حدود ۴/۵ است.

خواص مکانیکی رویه بتنی راه، ضروری است در وهله اول معیارهای مکانیکی مقاومت خمشی شکل (۳) و فشاری شکل (۴) حسگرهای مختلف، که بر اساس طرح آزمایش جدول (۳) ساخته شدند، بررسی شوند.

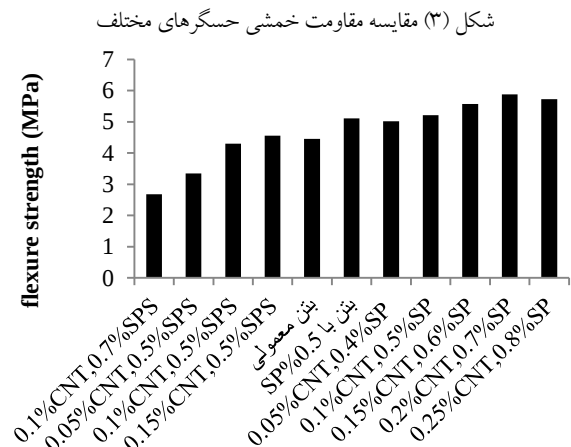


Fig. 3. Flexural strength of different concrete sensors

توضیح کدها: کد های مختلف ارائه شده در جداول این پژوهش نشان دهنده اجزاء تشکیل دهنده حسگر است و به ترتیب از چپ به راست عبارتست از: درصد وزنی نانولوله کربن نسبت به وزن سیمان، عبارت CNTs به معنی نانولوله کربن، درصد وزنی فعال کننده سطحی نسبت به وزن سیمان، عبارت SPS همانطور که در جدول (۳) ذکر شده است نشان دهنده ترکیب فعال کننده سطحی فوق روان کننده و ماده شیمیایی SDS است و عبارت SP نشان دهنده فعال کننده سطحی فوق روان کننده تنها است.

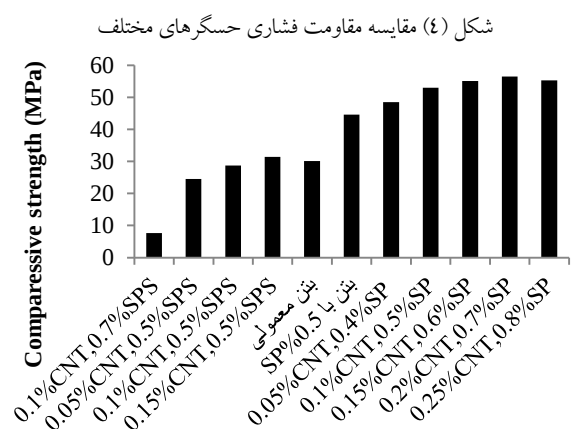


Fig. 4. Compressive strength of different concrete sensors

شکل (۷) حسگر حاوی ۱٪ نانولوله کربن به همراه ۷٪ فوق روان کننده و SDS

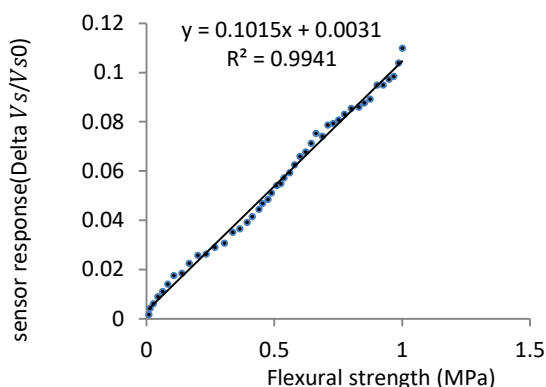


Fig. 7. Electrical response of the sensor containing 0.1% CNTs and 0.7% superplasticizer and SDS

با محاسبه و درج شیب تمام حسگرهای ساخته شده در شکل (۸)، مشخص شد که ترکیب ساخته شده با فعال کننده سطحی فوق روان کننده و SDS (SPS) به دلیل پخش مؤثرتر نانولوله در مخلوط بتن [27]، نسبت به حسگرهای ساخته شده با فعال کننده سطحی فوق روان کننده، از حساسیت بیشتری برخوردار است. همچنین با توجه به اینکه حساسیت حسگر حاوی ۱۵٪ نانولوله کربن از حسگر ۱٪ بیشتر است به نظر می رسد مقدار ۱۵٪ نانولوله کربن، حسگر دقیق تر و حساس تری را تولید می کند.

شکل (۸) حساسیت حسگرهای مختلف

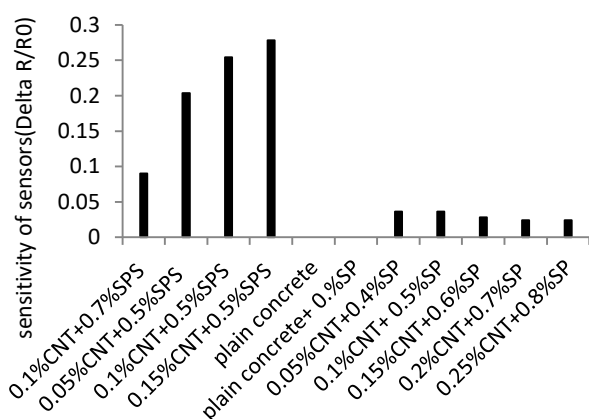


Fig. 7. sensitivities of different concrete sensors

معیار دیگری که تعریف شد خطای مطلق از پیش بینی است. این معیار نشان دهنده سنجش میزان پراکندگی داده ها از مقدار پیش بینی شده (که از معادله برازش شده به دست می آید) است و به صورت زیر تعریف شده است شکل (۹).

شکل (۵) تأثیر SDS در ایجاد هوای ناخواسته در بتن

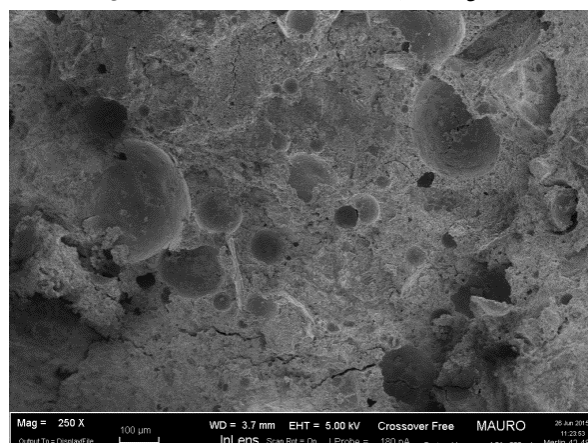


Fig. 5. Effect of SDS on creation of unwanted air bubble in concrete

شکل (۶) تعیین مقدار بهینه فوق روان کننده و SDS

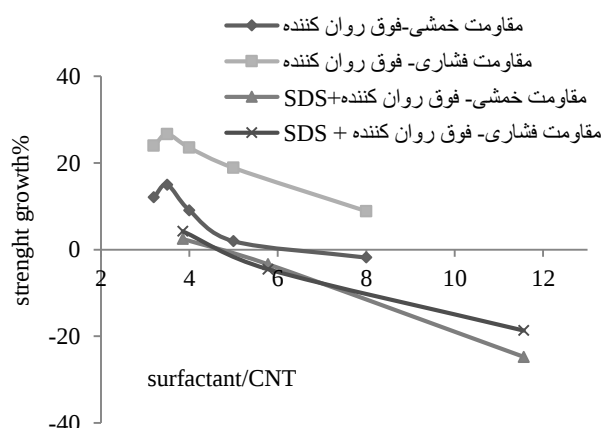


Fig. 6. Determination of optimum amounts of superplasticizer and SDS surfactants

۴-۲- ارزیابی الکتریکی پاسخ حسگر بتنی

در این قسمت هدف ساخت حسگری است که پاسخ دقیق و واضحی را با اعمال بار و رشد خرابی در اختیار قرار دهد. در این خصوص، دو معیار حساسیت حسگر و خطای مطلق از پیش بینی تعریف شدند. معیار حساسیت حسگر نشان دهنده میزان تغییرات ولتاژ دو سر مقاومت ثابت به ازای تغییر یک واحد مقاومت خمشی نمونه بتنی تعریف می شود. بدیهی است هرچه این تغییرات بیشتر باشد دقت اندازه گیری حسگر در بارهای کوچک نیز بیشتر است. پس شیب نمودار تغییرات ولتاژ حسگر در مقابل بارگذاری نمونه بتنی از ابتدا تا لحظه شکست نشان دهنده حساسیت حسگر بوده، شکل (۷)، و هرچه این شیب بیشتر باشد حسگر از دقت بالاتری برخوردار است.

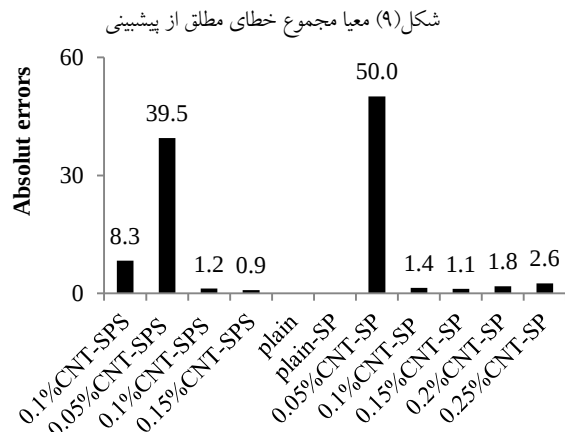


Fig. 9. Absolute of the prediction errors of different concrete sensors

۵- نتیجه گیری

بر اساس معیارهای خواص مکانیکی، بتن حاوی ۰/۱۵٪ نانولوله کربن به همراه فعال کننده سطحی ترکیبی، ۰/۵٪ فوق روان کننده و SDS، خواص مکانیکی مشابهی با خواص رویه بتنی راه (فاقد نانولوله کربن) دارد.

نتایج نشان داد، وجود SDS در مخلوط سیمان، باعث ایجاد حباب هوای ناخواسته و کاهش مقاومت مکانیکی بتن خواهد شد.

بر اساس نتایج به دست آمده مقدار بهینه ماده فعال کننده سطحی ترکیبی (فوق روان کننده و SDS) برای ساخت حسگر بتنی سنجش خرابی با خصوصیات مکانیکی شبیه به رویه بتنی راه، ۴/۵ برابر مقدار نانولوله کربن مصرفی است.

معیارهای الکتریکی نشان دادند که کیفیت میزان پخش (نوع ماده فعال کننده سطحی)، بر معیار شیب منحنی و همچنین درصد نانولوله کربن مورد استفاده، بر معیار خطای مطلق از پیش بینی مؤثر است.

با توجه به معیارهای الکتریکی، مقدار ۰/۱۵٪ نانولوله کربن به همراه فعال کننده سطحی ترکیبی، ۰/۵٪ فوق روان کننده و SDS، به عنوان بهترین ترکیب برای ساخت حسگر بتنی با حداکثر حساسیت و کمترین میزان خطای مطلق از پیش بینی است.

۶- مراجع

- [1] J. Wilson, *Sensor Technology Handbook*. Chandler, Arizona, USA: Elsevier Ltd, 2005.
- [2] 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.

$$(۳) \quad \text{خطای مطلق از پیش بینی} = \sum |Y_i - Y^*|$$

Y_i = مقدار تغییرات VS از حسگر در تنش مشخص
 Y^* = مقدار تغییرات VS به دست آمده از معادل برازش شده بر حسگر در تنش مشخص. هرچه پراکندگی بیشتری در نتایج حسگر در برابر روند اعمال نیرو وجود داشته باشد این معیار بیشتر می شود. پس حسگری که مقدار پراکندگی کمتری داشته باشد و با توجه به نرخ ثابت بارگذاری به فرم خطی نزدیک تر باشد، حسگر دقیق تری خواهد بود. این معیار در واقع نشان دهنده میزان نزدیکی رفتار یک حسگر به یک خط را نشان می دهد. بنابراین هرچه این معیار کمتر باشد رفتار حسگر خطی تر خواهد بود.

شکل (۸) پاسخ حسگر حاوی ۰/۵٪ نانولوله کربن به همراه ۰/۵٪ فوق روان کننده و

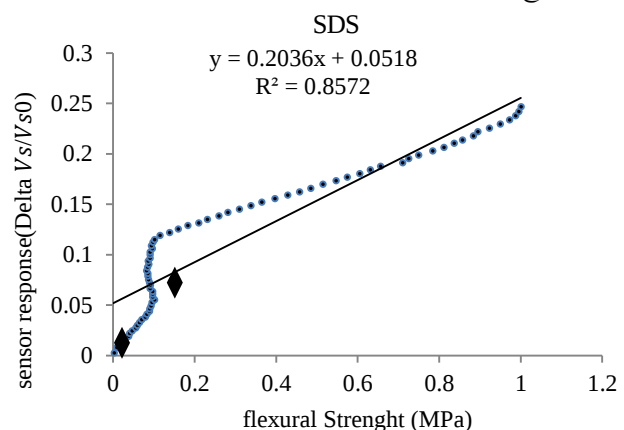


Fig. 8. Electrical response of the sensor containing 0.05% CNTs and 0.5% superplasticizer and SDS

با جمع بندی نتایج معیار خطای مطلق از پیش بینی در شکل (۱۰) می توان دریافت که مجموع پراکندگی داده ها بین مقادیر مشاهده شده (خروجی از حسگر) و مقادیر تخمین زده شده (به دست آمده از نمودار برازش شده به وسیله تکنیک رگرسیون خطی) در مقدار ۰/۱۵٪ حداقل ممکن بوده و می توان ادعا نمود که مقدار ۰/۱۵٪ نانولوله کربن که به وسیله فعال کننده سطحی فوق روان کننده و SDS پخش شده است دارای کمترین پراکندگی و نزدیک ترین فرم به نمودار خطی رادار است.

behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes,” *Carbon N. Y.*, vol. 43, no. 6, pp. 1239–1245, 2005.

[20] H. Li, H. Xiao, J. Yuan, and J. Ou, “Microstructure of cement mortar with nano-particles,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 185–189, 2004.

[21] A. Chaipanich, T. Nochaiya, W. Wongkeo, and P. Torkittikul, “Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–Fly ash cement composites,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 4, pp. 1063–1067, 2010.

[22] M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and S. P. Shah, “Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 7, pp. 1052–1059, 2010.

[23] J. Luo, Z. Duan, and H. Li, “The influence of surfactants on the processing of multi-walled carbon nanotubes in reinforced cement matrix composites,” *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 206, no. 12, pp. 2783–2790, 2009.

[24] A. D’Alessandro, M. Rallini, F. Ubertini, A. L. Materazzi, and J. M. Kenny, “Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 65, no. November 2015, pp. 200–213, 2016.

[25] S. P. Shah, M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and P. Mondal, “Nanoscale modification of cementitious materials,” *Nanotechnol. Constr.*, 3, pp. 125–130, 2009.

[26] B. Han, S. Sun, S. Ding, L. Zhang, X. Yu, and J. Ou, “Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 70, pp. 69–81, 2015.

[27] M. Sharifi, “the investigation of the interaction of the surfactants with carbon nanotube structures,” Tarbiat Modares University, 2012.

[28] M. Sharifi and S. Javadian, “The effect of surfactants on the dispersion of carbon nanotubes in aqueous solution(In Persian),” in *3rd Surfactant & Detergent Technology Conference*, 2012.

[29] Astm:C192/C192M-13, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” *ASTM Int.*, vol. 4, pp. 1–8, 2013.

[30] ASTM C78, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading),” *ASTM Int. West Conshohocken, PA*, pp. 12–14, 2012.

[31] M. S. Konsta-Gdoutos and C. A. Aza, “Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 162–169, 2014.

[32] G. Yakovlev, J. Keriené, A. Gailius, and I. Gimiené, “Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes,” *Mater. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 147–151, 2006.

[3] 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.

[4] B. Han and J. Ou, “Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 138, no. 2, pp. 294–298, 2007.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] M. Saafi, “Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures,” *Nanotechnology*, vol. 20, no. 39, p. 395502, 2009.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] K. Gopalakrishnan, P. T. Bjorn Birgisson, and N. O. A.-O. (Eds.), *Nanotechnology in Civil Infrastructure A Paradigm Shift*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

[15] G. Y. Li, P. M. Wang, and X. Zhao, “Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 5, pp. 377–382, 2007.

[16] B. Han, S. Ding, and X. Yu, “Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review,” *Measurement*, vol. 59, pp. 110–128, 2015.

[17] S. Wen and D. D. L. Chung, “Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 141–147, 2001.

[18] B. Han, X. Yu, K. Zhang, E. Kwon, and J. Ou, “Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors,” *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 17–24, 2011.

[19] G. Y. Li, P. M. Wang, and X. Zhao, “Mechanical

Construction and Evaluation of Damage Detection Sensor Consistent with Concrete Pavement

M.Adresi¹, A.Hassani^{2*}, M.R.Soleimani³, A.Yazdian⁴

1-Ph.D., civil and environmental department, Tarbiat modares University.

2- Prof., civil and environmental department, Tarbiat modares University.

3- Assist. Prof., Road, Housing & Urban Development Research Center.

4- Assist. Prof., Electrical and Computer Engineering department, Tarbiat modares University.

*HASSANI@modares.ac.ir

Abstract

Structural Health Monitoring (SHM) provides a way to evaluate safety and durability of a structure during its service life in order to ensure the serviceability and sustainability. Therefore, the sensor technology is a critical part to operate SHM system for recording relevant data through its lifespan. Sensor is a device capable of identifying the probability or the value of parametric changes and showing them as a relevant output (typically electrical or optical signal). Making materials electrically conductive may be useful in many different ways such as creating piezoresistive sensors with the ability to acquire stress-strain or load-displacement data or creating sensors with the ability to acquire data on the extent of damage to the concrete. The piezoresistive sensor is capable of detecting the applied forces to the structure based on the changes in the electrical resistance. But the damage detection sensor operates based on the contacting conduction of CNTs. This means that by increasing the amount of CNTs in concrete, a three-dimensional contacting network of CNTs is built. When the amount of CNTs exceeds the percolation threshold, the contacting conduction will affect the electrical conduction of nano-composites. One of the most significant and economical types of the sensor is the damage detection sensor which is provided by mixing conductive fibers (such as carbon nanotubes (CNT)) with concrete. For preparing damage detection sensor, CNTs and surfactants were mixed in the water for 10 minutes using a magnetism stirrer at 5000 rpm. Then, the mix was prepared at one ultrasonic energy dispersion. The cement and CNTs were added to high-speed mixer to be uniformly mixed. After adding aggregate to the mixer, the concrete was placed in pre-oiled molds and by applying appropriate vibration, any trapped air was released. The specimens were cured for 28 days and they were tested under the static loading by Instron-Tech. test equipment. In order to remove the effect of polarization - which is due to the movement of free ions in the concrete sensor during the measurement - an alternating current generator was used to nullify this phenomenon. After preparing the sensors, two main factors affecting the performance of concrete sensors are the amount of CNTs and their dispersion quality in the mixture. The goal of this study is to determine the optimum amount of CNTs with regard to the combined effects of the surfactant and the CNTs dispersion quality on the performance of the sensor. In this regard, various criteria such as sensitivity of the sensor (S_e), the Absolute prediction errors as electrical criteria and flexural strength as mechanical criteria are involved. The results demonstrate that the sensor provided by 0.15 wt% CNTs, superplasticizer and SDS as a surfactant has the best performance. Also, the static criteria indicates that the quality of the dispersion (using proper surfactant material) and the amount of CNTs are effective on the sensitivity and the Absolute of the prediction errors, respectively.

Keywords: Concrete sensor, Carbon nanotubes, Mechanical properties, Electrical properties, Concrete