

# رفتار شناسی خرابی و تعیین وزن ناشی از بارگذاری ترافیک با استفاده از خاصیت خودتشخیصی در حسگرهای بتنی

مصطفی آدرسی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
امین احمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران.  
محسن احمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.  
مسعود فرصت، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
محمد تقی پور، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
E-mail: m.adressi@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳

## چکیده

استفاده از حسگرهای باقابلیت خود تشخیصی که علاوه بر تعیین میزان نیروی وارده، عملکرد دیگری مانند تشخیص روند رشد خرابی را در جسم روسازی بتنی بر عهده بگیرند، در حال حاضر توسعه زیادی یافته است و بخش مهمی از سیستم پایش جسم روسازی راه است. در این تحقیق امکان استفاده از حسگرهای سنجش خرابی به عنوان حسگرهای تعیین بار خودرو در روسازی به طور همزمان بررسی خواهد شد. با استفاده از این حسگرها علاوه بر اینکه سطح سلامت سازه و گسترش ترک در آن‌ها به مرور زمان تحت بررسی قرار می‌گیرد، می‌توان از آن‌ها به عنوان حسگرهای تعیین بار و شمارشگر خودرو نیز استفاده نمود. بنابراین اهمیت این تحقیق در توسعه زیرساخت هوشمندی است که قادر است سلامت خود را بطور پیوسته نشان دهد که این خاصیت در مدیریت و تعمیر و نگهداری روسازی نقش بسیار مهمی را بر عهده دارد و همچنین با تعیین وزن و تعداد ترافیک عبوری بر روی روسازی، این حسگر می‌تواند جانشین مناسبی برای حسگرهای موجود باشد. به منظور شبیه‌سازی شرایط وجود حسگر در جسم روسازی، یک حسگر بتنی کوچک ساخته شد و در میان یک تیر بتنی به عنوان یک المان از محیط روسازی جای داده شد. به منظور فرمول‌بندی رفتار تشخیص بار ترافیک در جسم روسازی، تیر بتنی تحت بارگذاری دینامیکی با شدت مختلف قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر بار خارجی وارده به حسگر ( $F_{max}$ ) با حداکثر پاسخ حسگر ( $S_{max}$ ) به نسبت شیب منحنی نیرو-زمان ( $tg\alpha$ ) به شیب منحنی پاسخ حسگر-زمان ( $tg\beta$ ) وابسته است. همچنین در ادامه به منظور ارزیابی رفتار تشخیص خرابی توسط حسگر بتنی، بارگذاری به صورت استاتیک به تیر بتنی وارد شد تا در نهایت تیر بتنی حاوی حسگر بتنی بشکند. نتایج نشان داد نقطه شکست، روند گسترش خرابی و در نهایت مرحله جداسدگی کامل نمونه به وضوح توسط حسگر تفکیک شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده هم‌زمان از حسگر سنجش خرابی برای ارزیابی رشد خرابی و همچنین تشخیص بار وارده به روسازی به عنوان یک حسگر فشارسنج، امکان‌پذیر بوده و قابلیت فرمول‌بندی آن با دقت بالا ( $R^2_{adj.} > 0.99$ ) وجود دارد.

واژه های کلیدی: بتن، تشخیص خسارت، تشخیص وزن، حسگر، نانولوله کربن.

مبحث پایش سطح سلامت سازه‌های مختلف از قبیل

۱. مقدمه

۱۳۹ فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال نهم / شماره دوم / زمستان ۱۳۹۶

## رفتار شناسی خرابی و تعیین وزن ناشی از بارگذاری ترافیک ...

شبکه هادی دچار تغییرات رسانایی شده و هدایت الکتریکی کاهش یافته و به تعبیری مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات مقاومت الکتریکی در ناحیه خطی رفتار مصالح برگشت پذیر و در ناحیه پلاستیک با پرش همراه می‌شوند [Galao et al. 2014].

از طرفی حسگر فشارسنج الکتریکی تغییرات حجمی مقاومت الکتریکی<sup>۵</sup> در مقابل کرنش را تحت بارگذاری مشخص نشان می‌دهد و با اعمال بارگذاری فشاری به قطعه بتنی فاصله بین نانولوله‌های کربنی کاهش خواهد یافت و در نتیجه انتقال الکترون با مقاومت کمتری مواجه خواهد شد. [Zhang et al. 2015]. این خاصیت را فشارسنجی گویند و با استفاده از این خاصیت می‌توان مقدار بارگذاری وارده به سازه را پایش نمود [Veedu, 2010] و یا وزن وسایل نقلیه، سرعت و نوع آن‌ها را نیز مشخص نمود Konsta-Gdoutos and Aza [2014; Galao et al. 2014] در این میان، کنترل وزن و بار اتومبیل‌ها به جهت حفاظت از زیرساخت‌ها ساخته شده نقش اساسی دارد. [Shi and Chung, 1999]

حسگرهای فشارسنج الکتریکی قابلیت تشخیص بار وارده به سازه را بر پایه تغییرات مقاومت الکتریکی دو سر حسگر بر اساس اثر تونلی ایجاد می‌کنند [Xiao, Li and Ou 2010; Zhang et al. 2015]. به انتقال الکترون از یک نانولوله به نانولوله دیگر از میان فضای بتن که باهم در تماس نیستند، اثر تونلی گویند. این اثر وقتی که مقدار نانولوله کربن در بتن کم باشد، به طوری که نانولوله‌ها باهم در تماس نباشند ایجاد می‌شود [Sun et al. 2014]. اما حسگرهای سنسج خسارت بر اساس اثر تماسی استوارند، به این معنی که میزان نانولوله کربن در این نوع حسگرها خیلی بیشتر از مقدار موجود در حسگرهای فشارسنج الکتریکی است و این اثر موقعی که مقدار نانولوله‌ها از آستانه تراوایی بیشتر شود [Azhari and Banthia, 2015] ایجاد می‌شود. حاصل این مقدار زیاد نانولوله‌های کربن یک شبکه سه‌بعدی از نانولوله‌های کربنی هادی جریان الکتریکی است که در اکثر نقاط باهم در تماس هستند [Saafi, 2009; Baeza et al. 2013, Han et al. 2015, Han, Ding and Yu 2015].

هان و همکاران در تحقیقی، رویه‌های بتنی خود

رویه‌های بتنی، به بررسی و ارزیابی کفایت سازه‌ای رویه‌های بتنی به طور پیوسته می‌پردازد [Azhari and Banthia, 2012]. به منظور بررسی کیفیت سازه‌ای یک سازه، در وهله اول، نیاز به حسگرهای مختلفی است که با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در طول زمان بهره‌برداری توسط آن‌ها، سطح سلامت سازه مورد ارزیابی قرار گیرد [Wilson 2005]. نسل جدید این نوع از حسگرها، حسگرهای بتنی هوشمند است، که جسم روسازی با استفاده از تکنیک‌های خاص و افزودن مواد هادی از قبیل نانولوله کربن، قابلیت تشخیص را پیدا می‌کند [Galao et al. 2014] پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط این حسگرها بسته به میزان مواد هادی، نحوه بارگذاری، محل قرارگیری الکترودها و شکل حسگرها متفاوت است. در صورتی که هدف از ساخت حسگر برداشت اطلاعاتی مانند تغییر مکان و کرنش و یا میزان نیروی وارده به رویه بتنی باشد حسگر ساخته شده فشارسنج الکتریکی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. [Han et al. 2015; Kim, Park and Lee, 2014; Konsta-Gdoutos and Aza 2014]. در صورتی که هدف از ایجاد خاصیت خود تشخیصی<sup>۲</sup> در بتن، اندازه‌گیری رشد خرابی در مدت زمان بهره‌برداری از روسازی باشد حسگر تولید شده را حسگر سنسج خرابی<sup>۳</sup> می‌نامند [Han, Ding, and Yu 2014; Saafi 2009; S. Sun, Yu, and Han 2015]. از طرفی در بعضی از مراجع از حسگر فشارسنج الکتریکی جهت تعیین بار ترافیک عبوری نیز استفاده می‌شود که به این نوع حسگرها، حسگر تعیین بار خودرو<sup>۴</sup> نیز گفته می‌شود [Han, Ding and Yu, 2015; Xun, Yu and Kwon, 2009].

شلت و همکاران، برای اولین بار توانستند مفهوم سنسج خسارت را در ماده مرکب حاوی الیاف کربن نشان دهند. بر اساس این مطالعه، آن‌ها با اضافه نمودن الیاف کربن یک شبکه هادی را در ماده مرکب ایجاد کردند و خسارت وارده به آن را با میزان تغییرات مقاومت الکتریکی مقطع حین بارگذاری که باعث بیرون کشیده شدن الیاف کربن از بتن در محل ترک خوردگی و یا قطع شدن تماس این رشته‌ها از همدیگر می‌شود، مرتبط دانستند [Schulte and Baron, 1989]. با بیرون کشیده شدن الیاف از داخل بتن در محل ترک خوردگی و قطع تماس آن‌ها، بر اثر ازدیاد طول مقطع در محل کشش بتن،

بارگذاری خمشی، قسمتی از تیرچه بتنی که تحت فشار قرار داشت به دلیل افزایش اثر تونلی با کاهش مقاومت الکتریکی همراه بوده و بنابراین سنجش وزن میسر خواهد شد. همچنین در قسمت کششی به دلیل کاهش اثر تماسی (از هم دور شدن الیاف کربن و کاهش نقاط تماس) مقاومت الکتریکی افزایش پیدا می‌کند و بنابراین پایش خسارت میسر خواهد شد [Wen and Chung, 2006]. گلو و همکاران، دو خاصیت پایش خسارت و سنجش وزن را در قطعه سیمانی حاوی نانو میله کربن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مرحله اول با هدف سنجش میزان نیروی وارده به قطعه، نمونه را تحت بارگذاری خمشی در ناحیه الاستیک قرار دادند و در مرحله بعد قطعه تا لحظه شکست بارگذاری شد و تغییرات مقاومت الکتریکی قطعه برای پایش رشد خرابی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قطعه بتنی توانایی تشخیص هم‌زمان نیرو و خسارت را داراست [Galao et al. 2014]. شی و همکاران، حسگرهای بتنی حاوی ۰.۵ و ۱ درصد وزنی سیمان نانو میله کربن ساختند. نتایج نشان داد که این حسگرها به خوبی می‌توانند برای تشخیص عبور وسایل نقلیه و تعیین وزن آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد که تا سرعت ۵۵ مایل بر ساعت نتایج به سرعت وابسته نیستند [Shi and Chung 1999]. اظهاری و همکاران، دو نوع حسگر حاوی فقط ۱۵ درصد وزنی سیمان، الیاف کربن و دیگری حاوی ترکیبی از ۱۵ درصد وزنی سیمان الیاف کربن و ۱ درصد وزنی سیمان نانولوله کربنی چند دیواره ساختند و رفتار حسگر را مدل‌سازی نمودند. آن‌ها روند پاسخ حسگر را از لحظه شروع بارگذاری تا لحظه شکست را فرمول‌بندی کردند و بر اساس این روند سه فاز مشخص ناحیه الاستیک، ناحیه غیرخطی (رشد ترک) و ناحیه شکست قابل تفکیک بود. آن‌ها اذعان داشتند که پاسخ حسگر در مقابل بارگذاری غیرخطی و به سرعت بارگذاری وابسته است. همچنین نتایج نشان داد که با وجود غیرخطی بودن رفتار حسگر، میزان تغییرات نیرو در مقابل تغییرات مقاومت الکتریکی را می‌توان برحسب منحنی غیرخطی واحدی کالیبره نمود و مقدار نیرو و کرنش را از روی تغییرات مقاومت الکتریکی (پاسخ حسگر) پیش‌بینی نمود [Azhari and Banthia, 2012].

تشخیص‌دهنده‌ای را ساختند و قابلیت تشخیص وزن عبوری چرخ از روی این روسازی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که عبور چرخ از روی حسگرهای بتنی باعث تغییرات محسوس مقاومت الکتریکی این حسگرها شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که ترافیک عبوری به وسیله این نوع از حسگرها، قابل تشخیص بوده و با اندازه‌گیری بزرگی تغییرات الکتریکی پاسخ حسگر، نوع وسیله نقلیه نیز قابل تشخیص است. در این تحقیق از دو شبکه میلگرد در بالا و پایین روسازی و عمود برجهت بارگذاری به عنوان الکتروود استفاده شد [Gopalakrishnan et al. 2011; Han, et al. 2012; Yu and Known, 2012]. یو و همکاران دو نوع حسگر بتنی پیش‌ساخته و ساخته‌شده در محل را در داخل یک روسازی بتنی در محل آزمایش میدانی مینیسوتا قرار دادند. الکتروودهای این دو حسگر از نوع مش فولادی بود که در بالا و پایین حسگرها جای‌داده شده بود. در این تحقیق دو وسیله نقلیه سبک و سنگین با سرعت‌های مختلف از روی حسگرهای ساخته‌شده درون روسازی عبور کردند. نتایج نشان داد که هر دو حسگر حساسیتی مشابه به عبور خودروها دارند. همچنین مشاهده شد که تغییرات مقاومت الکتریکی دو حسگر با عبور وزن بیشتر، مقادیر بیشتری را نشان می‌داد. به علاوه، نتایج مشخص کرد که عبور وزن یکسان در سرعت‌های مختلف رفتار یکسانی را در حسگر ایجاد می‌کند. بنابراین آن‌ها نتیجه گرفتند که پاسخ حسگر وابسته به سرعت و وسیله نقلیه نیست. همچنین در این تحقیق، در قسمت پایین مقطع حسگر، در کنار شبکه فولادی، از حسگر الکترومکانیکی متداول نیز استفاده شده بود. نتایج نشان داد هنگام عبور اتومبیل با وزن سبک از روی حسگر بتنی، حسگر بتنی تغییرات محسوسی را ارائه می‌نمود، ولی حسگر الکترومکانیکی قادر به تشخیص مؤثر و باکیفیت اتومبیل سبک نبوده و برداشت‌ها با مقادیر زیاد اغتشاش همراه بود. ون و همکاران، حسگر بتنی به شکل تیرچه بتنی حاوی مقادیر الیاف کربنی ساختند و تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای خاصیت پایش خسارت و تعیین وزن آن را مورد ارزیابی قرار دادند. الکتروودها در این نوع حسگر از نوع پوششی بود و در دو انتهای حسگر قرار داشت. نتایج نشان داد در هنگام

## رفتار شناسی خرابی و تعیین وزن ناشی از بارگذاری ترافیک ...

### ۱-۲ مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق از نانولوله کربن چند دیواره با مشخصات درج شده در جدول (۱) استفاده شد. همچنین به جهت ساخت حسگر بتنی و تیرچه بتنی بزرگ از طرح اختلاط مشخص ارائه شده در جدول (۲) استفاده شد. سیمان تیپ ۲ مورد استفاده، محصول کارخانه آبیگ استان تهران است. به منظور پخش نانولوله کربن، از ماده فعال کننده سطحی ترکیبی فوق روان کننده و SDS<sup>۷</sup> به نسبت ۹ به یک در فرایند ساخت حسگر بتنی سنجش خرابی استفاده شد [Adresi et al. 2016; Adresi, et al. 2016]. بر اساس تحقیقات اخیر حسگرهای بتنی سنجش خرابی را می توان به دو صورت با دو الکتروود یا چهار الکتروود ساخت [Han, Ding and Yu, 2015] در این تحقیق از حسگرهایی با دو الکتروود مسی به ابعاد ۵×۴ سانتیمتر به مقاومت (۲/۱۵ nΩm) برای هدایت جریان الکتریکی بین دوسر قطعه بتنی استفاده شد. در این تحقیق همانند تحقیقات گذشته از اثر جنس سنگدانه ها و سیمان، بر هدایت الکتریکی حسگر صرف نظر شده است [Chiarello and Zinno, 2005; Gao, Sturm and Mo, 2011].

بررسی تحقیقات گذشته نشان داد که حسگرهای بتنی توانایی تشخیص فشار وارده و همچنین رشد خرابی را دارند ولی شکل، نحوه قرارگیری الکتروودها، نحوه ساخت و مقدار مواد هادی مصرفی در هر یک متفاوت است. همچنین تحقیقاتی بر پایه استفاده از یک حسگر بتنی با قابلیت تشخیص همزمان فشار و رشد خرابی انجام شد که نتایج متفاوتی را ارائه نمودند. به منظور عملیاتی شدن استفاده از این حسگرها در رویه های بتنی و برداشت همزمان وزن و میزان تخریب ترافیک عبوری لازم است تا شرایط قراردعی یک حسگر بتنی در المانی از روسازی شبیه سازی شود و رفتار فشارسنجی و رشد خرابی حسگر بتنی مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین نوآوری این تحقیق، فرمول بندی مناسب جهت پیش بینی میزان نیروی وارده به حسگر سنجش خرابی از روی تغییرات مقاومت الکتریکی دوسر حسگر و تحلیل رفتار فشارسنج الکتریکی در حسگرهای سنجش خرابی است. همچنین رفتار فشار حسگر تحت بارگذاری تدریجی تا لحظه شکست نیز مورد بررسی قرار گرفت و رفتار سنجش خرابی حسگر نیز ارزیابی گردید.




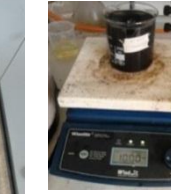


### ۲. روش تحقیق و مواد و مصالح مصرفی

جدول ۱. مشخصات نانولوله کربن چند دیواره

ماده	تولیدکننده	قطر (نانومتر)	طول (میکرومتر)	خلوص	مقاومت کششی (Gpa)	جرم ویژه (gr/cm <sup>3</sup> )	هدایت الکتریکی (اهم-سانتیمتر)
نانولوله کربن <sup>۸</sup>	پژوهشگاه صنعت نفت	۲۰-۱۰	۱۰±۳	≥۹۵	تقریباً ۱۰۰	تقریباً ۱/۵	<۱۰-۲

جدول ۲. مشخصات طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط	درصد	طرح اختلاط	درصد
عیار سیمان ۳۸۰ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۵/۳۴	شن ریز	۲۳/۱۹
نانولوله کربن چند دیواره	۰/۱۵	شن درشت	۷/۷۲
ماسه نرم	۳۹/۴۳	اندازه اسمی = ۱۲/۵ mm	۷/۲۱
اندازه اسمی = ۱/۵ mm	۶/۹۶	آب	۰/۴۷
ماسه درشت		W/C	
اندازه اسمی = ۴ mm			

					
توزین فوق‌روان‌کننده	توزین SDS	توزین نانولوله کربن	اختلاط مکانیکی min. ۱۰ rpm ۵۰۰۰	حمام اولتراسونیک min. ۱۳۰ توان ۲۷۵watt	اضافه نمودن ضد کف

شکل ۱. پخش نانولوله کربن در فاز آبی

## ۲-۲ روش انجام آزمایش

به وسیله مخلوط‌کن، مخلوط شده و در قالب چرب شده با روغن جای داده می‌شود و با اعمال ویبره مناسب تا حد امکان حباب‌های هوای آن خارج می‌شود. نمونه‌های بتنی به ابعاد ۲۰×۵×۵ سانتیمتر که حاوی دو الکتروود صفحه‌ای مسی در دو انتهای خود می‌باشند به مدت ۲۸ روز در آب ۲۵ درجه عمل‌آوری شده [Astm:C192/C192M-13 2013] و بعد از خشک شدن درون قالب تیرچه بتنی بزرگ‌تر به ابعاد ۵۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر قرار داده می‌شود و همانند مراحل تهیه حسگر، تیرچه بتنی نیز بتن‌ریزی و عمل‌آوری می‌شود، شکل (۲) را ببینید.

به منظور دستیابی به حسگر دقیق می‌بایست نانولوله‌ها به خوبی در محیط بتن پخش شوند تا شبکه رسانایی به خوبی تشکیل گردد. برای این منظور ابتدا لازم است تا نانولوله کربن در فاز آبی پخش شود. بنابراین 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 جهت پخش نانولوله‌ها در مخلوط تولید گردد. برای این منظور مخلوط آماده‌شده دو ساعت در حمام اولتراسونیک با توان ۲۷۵ وات قرار داده می‌شود، شکل (۱).

در انتها، سیمان در مخلوط‌کن دور بالا به مخلوط آبی اضافه‌شده تا به صورت یکنواخت مخلوط شود. مخلوط خمیر سیمان آماده‌شده بعد از اضافه شدن مصالح سنگی

					
					
اختلاط مکانیکی	اختلاط سیمان ۳ Min.	اختلاط با مصالح سنگی	قالب‌گیری	عمل‌آوری در دمای ۲۵ درجه به مدت ۲۸ روز و خشک نمودن در دمای ۸۰ درجه به مدت ۷ روز	جادهی حسگر بتنی درون تیرچه بتنی بزرگ‌تر و بتن‌ریزی آن

شکل ۲. ساخت حسگر بتنی و جادهی در تیرچه بتنی بزرگ



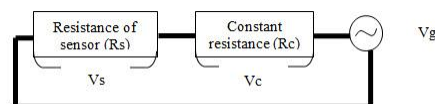
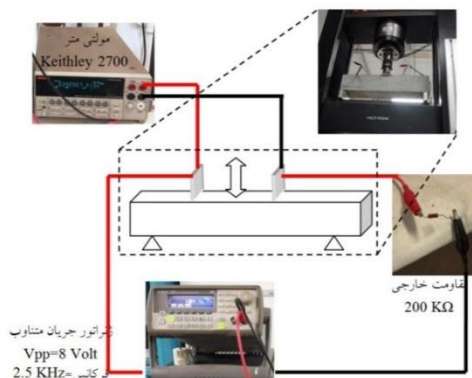
شکل ۳. انجام آزمایش تیرچه خمشی سه نقطه‌ای

اختلاف پتانسیل دو سر حسگر ( $V_s$ ) است که به وسیله مولتی متر در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به مدار شکل (۴) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با قرار دادن مقاومت ثابت ( $R_c = 200\text{K}\Omega$ ) در مدار و همچنین با اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل دو سر حسگر، مقاومت الکتریکی حسگر ( $R_s$ ) را می‌توان در هر لحظه از زمان محاسبه نمود (روابط ۱ و ۲).

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

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

در ادامه تیرچه بتنی بزرگ حاوی حسگر بتنی به وسیله دستگاه Instron-Tech تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرد، شکل (۳)، به منظور شبیه سازی بار چرخ بر روی روسازی و با توجه به امکانات آزمایشگاهی، بارگذاری دینامیکی بر روی حسگر ساخته شده به شکل موج سینوسی اعمال شد. استاندارد مورد آزمایش، تیرچه خمشی سه نقطه‌ای ASTM C78 است [ASTM C78 2012] که مبنای بارگذاری در حالت استاتیکی است. در این تحقیق از ژنراتور جریان متناوب با بزرگی ( $V_{pp} = 8\text{ volt}$ ) و فرکانس ( $2.5\text{ Khz}$ ) برای اندازه‌گیری پاسخ حسگر استفاده شد. خروجی حسگر در این مدار



شکل ۴. نمایی شماتیک از مدار الکتریکی حسگر

جدول ۳. طرح آزمایش و روند تحقیق

الگوی بارگذاری	فعال کننده سطحی	مقدار نانولوله کربن	شدت بارگذاری (KN)		
استاتیکی	SDS/SP	۰/۱۵	از مقدار صفر تا لحظه شکست		
دینامیکی	SDS/SP	۰/۱۵	۰/۵	۰/۷	۱/۳
			۲	۳	

## رفتار شناسی خرابی و تعیین وزن ناشی از بارگذاری ترافیک ...

مرحله باربرداری است. از این رو 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 فلش‌ها) کمتر از منحنی نیرو است. به عبارتی منحنی پاسخ حسگر به حدی گویا رفتار واقعی بتن است که در باربرداری صاف‌تر از منحنی نیرو است. همچنین اگر روند جابجایی و تا حدودی 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 تغییر شکل برگشت‌ناپذیر در نمونه شده و بنابراین منحنی جابجایی افتان می‌شود. ولی همان‌طور که دیده می‌شود این تغییر شکل جزئی به‌طور خیلی محدود بر پاسخ حسگر اثر می‌گذارد. این‌طور بتوان تفسیر نمود که تغییرات پاسخ حسگر در یک سیکل بارگذاری و باربرداری مستقل از تغییر شکل ماندگار حسگر می‌باشند و در واقع حسگر بیشتر تغییرات لحظه‌ای را نشان می‌دهد و تغییرات جابجایی حسگر تابع زمان اثر کمی در خروجی حسگر می‌گذارند.

### ۳-۲ مدل‌سازی پاسخ حسگر

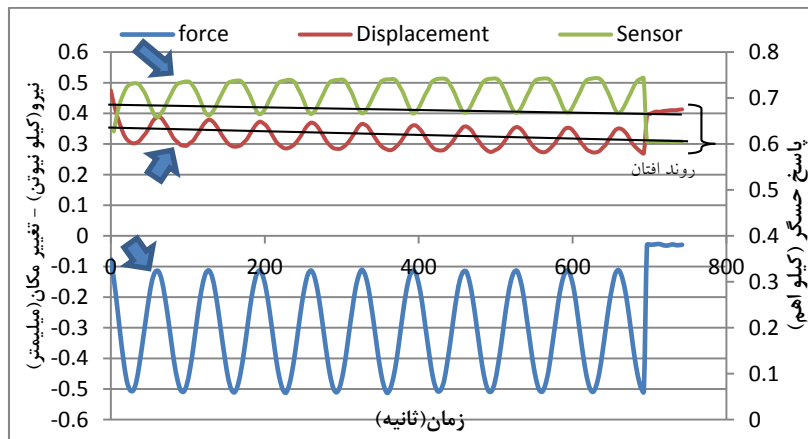
به منظور استفاده از حسگرهای بتنی به جهت تشخیص میزان نیروی وارده، می‌بایست رفتار آن‌ها تحلیل شده و با فرمول‌بندی رفتار حاکم بر حسگرهای مختلف تحت بارگذاری دینامیکی، قدم اولیه جهت کاربرد این‌گونه حسگرها در رویه‌های بتنی راه به منظور برآورد نیروی وارده به سازه روسازی و یا تعیین وزن خودرو عبوری از روی روسازی برداشته شود. برای این منظور تیرچه بتنی بزرگ را که معرف المانی از روسازی است و حاوی حسگر بتنی است تحت بارگذاری دینامیکی با شدت نیروهای مختلف که نشان‌دهنده وزن عبور وسایل نقلیه مختلف است قرار داده شد. به منظور تعیین رفتار واقعی حسگر و کاهش خطای آزمایش، روند بارگذاری و باربرداری چرخ و سیله نقلیه (یک پیک سینوسی) برای هر شدت نیرو، ۱۰ مرتبه (۱۰ سیکل بارگذاری) تکرار شد. نتیجه نهایی از میانگین‌گیری همه داده‌های متناظر (موجود در کادر مشکی نشان داده شده در شکل (۶)) در بازه‌های زمانی مساوی بین حداکثر و حداقل بارگذاری این ده سیکل مدل نیم موج را تولید کرد. روند محاسبه مدل نیم موج در شکل (۶) نمایش داده شده است.

در ادامه در جدول (۳) طرح آزمایش در این تحقیق، شامل مقادیر نانولوله کربن، فعال‌کننده سطحی، الگوی بارگذاری و شدت بارگذاری حسگر نشان داده شده است. در این تحقیق به منظور بررسی اثر بزرگای نیروهای مختلف بر عملکرد حسگر و فرمول بندی آن، بقیه پارامترهای مختلف از قبیل فرکانس بارگذاری، مقادیر طرح اختلاط و ... ثابت فرض شد. بزرگای نیروهای اعمال شده به حسگر به گونه‌ای تعیین شد تا با توجه به ابعاد حسگر بتنی، نیروی اعمال شده تنش معادل تنش تولید شده از طرف چرخ اتومبیل بر روی روسازی را شبیه‌سازی کند. بنابراین نیروی حداقل، تنش معادل عبور یک خودرو سواری سبک و نیروی حداکثر تنش معادل عبور یک خودرو فوق سنگین را در این آزمایش شبیه‌سازی می‌کند. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده، نیروی حداکثر در آزمایش دینامیکی کمتر از ۲۵٪ نیروی نهایی مقطع بتنی است و بنابراین بارگذاری دینامیکی در محدوده رفتار خطی بتن (کمتر از ۴۰٪ از ظرفیت نهایی حسگر بتنی) قرار دارد.

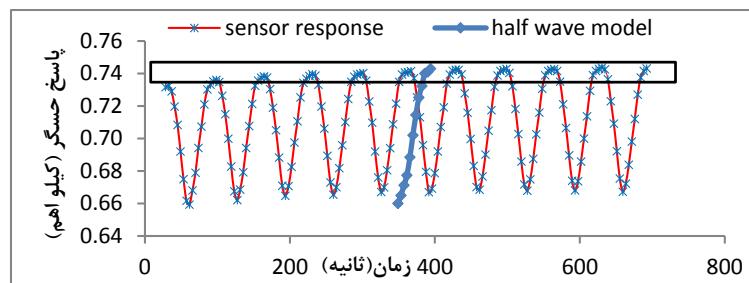
### ۳. بحث و نتیجه‌گیری

#### ۳-۱ تحلیل رفتار حسگر بتنی در مقابل بار دینامیکی

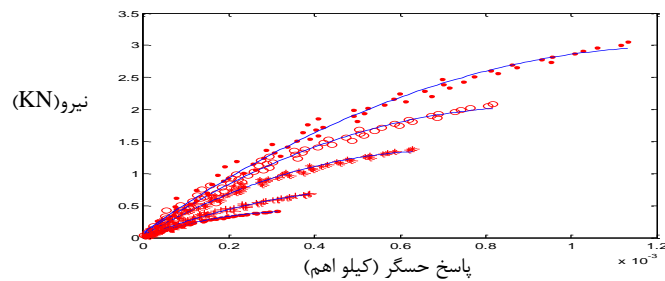
حسگر بتنی بعد از ساخت، تحت بارگذاری دینامیکی با شدت‌های مختلف قرار گرفت. هرچند در مراجع مختلف الگوی زین اسبی به‌عنوان الگوی نزدیک به الگوی بار چرخ معرفی شده است [Yoder and Witczak, 1975]، ولی اعمال این شکل بارگذاری با توجه به پیچیدگی‌های آن برای دستگاه مورد استفاده در این تحقیق ممکن نبود، بنابراین با توجه به منابع مختلف [AASHTO, 1993] که الگوی سینوسی شکل را تخمین مناسبی از بار اعمال‌شده از طرف چرخ خودرو به جسم روسازی می‌داند، در این تحقیق از الگوی بار موج سینوسی برای انجام آزمایش‌های دینامیکی استفاده شد. نتایج آزمایش دینامیکی بر روی حسگرهای بتنی نشان‌دهنده رفتار متفاوت بین حالت باربرداری و بارگذاری را نشان می‌دهد. پیکان‌های نشان داده شده در شکل (۵) محل باربرداری را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود در روند بارگذاری قله موج سینوسی کاملاً با قله موج سینوسی در مرحله باربرداری متفاوت است. این تفاوت را می‌توان با توجه به نحوه باربرداری توجیه نمود. جهت بارگذاری مطابق با استاندارد بارگذاری خمش سه نقطه‌ای [ASTMC78] است که این ابزار فاقد فک نگه‌دارنده برای هدایت نمونه در



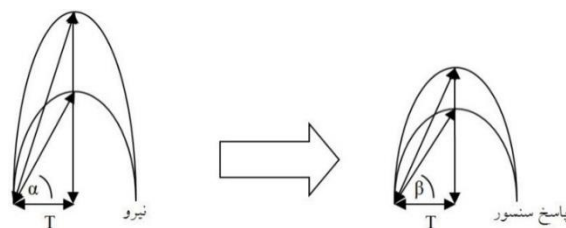
شکل ۵. پاسخ حسگر، جابجایی و نیروی حسگر به زمان آزمایش



شکل ۶. تولید مدل نیم موج از پاسخ حسگر در سیکل های مختلف بارگذاری به وسیله میانگین گیری نقاط متناظر



شکل ۷. مدل نیم موج پاسخ حسگر-نیرو در سطوح مختلف نیرو در حسگر



شکل ۸. مقایسه تغییرات شیب موج پاسخ حسگر با موج نیرو



فرمول بندی بر اساس رفتار هر حسگر بدست آید. به این پروسه، کالیبراسیون حسگر گفته می‌شود. در این قسمت دو رویکرد برای فرمول بندی رفتار حسگر ارائه می‌شود.

### ۳-۳-۱ رویکرد اول، بر اساس تکنیک رگرسیون

در این رویکرد نمودار پاسخ حسگر (کیلو اهم) در مقابل نیرو (کیلو نیوتن) در شکل (۹) رسم شده است. از آنجاکه رفتار یک حسگر خاص در سطوح مختلف نیرو غیر ثابت است بدین معنی که در یک فرکانس ثابت با تغییر حداکثر نیرو ( $F_{max}$ )، نسبت شیب پاسخ حسگر ( $tg\beta_i$ ) به شیب نیرو ( $tg\alpha_i$ ) و همچنین حداکثر پاسخ حسگر ( $S_{max}$ ) متغیر است از این رو می‌توان نوشت:

$$F_{max} = f\left(\frac{tg\alpha_i}{tg\beta_i}, S_{max}\right) \quad (3)$$

$F$  = حداکثر نیروی وارده به حسگر در سیکل  $i$

با توجه به اینکه هدف از استفاده از حسگرها، استخراج حداکثر نیروی وارده به سازه از روی حداکثر پاسخ حسگر است، می‌توان با استفاده از تکنیک رگرسیون خطی، بهترین تابع حاکم بر رفتار حسگر که ارتباط دهنده بین این دو باشد را استخراج نمود. (جدول (۴) را ببینید) به ثابت‌های معادله حاکم استخراج شده، ثابت حسگر گفته می‌شود که هر حسگر قبل از استفاده در جسم روسازی می‌بایست در آزمایشگاه محل تولید، با اعمال سطوح مختلف نیرو و ثبت موج نیرو و پاسخ حسگر و رسم گرافی مانند شکل (۹)، این ضرایب به دست آید و به همراه هر حسگر به عنوان ضرایب ثابت حسگر مورد استفاده قرار گیرند.

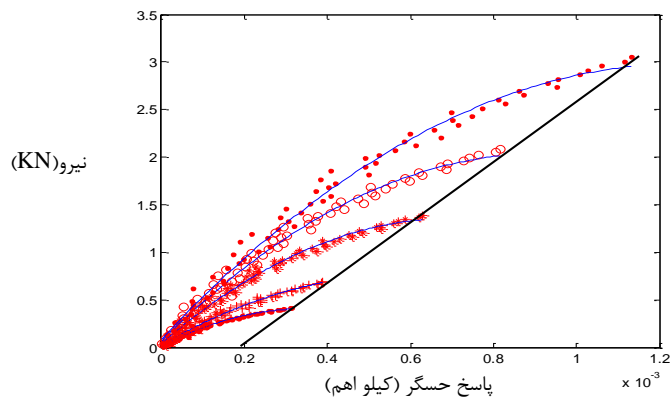
### ۳-۳-۲ رویکرد دوم: بر اساس تحلیل گرافیکی

در صورتی که در هر سطح بارگذاری، شیب نمودار موج نیرو و موج پاسخ حسگر هر کدام جداگانه همانند شکل (۱۰) محاسبه شوند. و در نمودار (۱۱) ترسیم شوند خواهیم دید که نمودار حاصل از طاقی شیب‌های مذکور نشان دهنده ارتباط بین حداکثر موج پاسخ حسگر و حداکثر موج نیرو است.

مدل نیم موج پاسخ حسگر - نیرو در سطوح مختلف نیرو، در شکل (۷) نشان داده شده است. مشخص است که پاسخ حسگر در سطوح مختلف نیرو، بر هم منطبق نبوده، به این معنی که شیب نمودار پاسخ حسگر-نیرو با توجه به حداکثر نیروی اعمال شده به حسگر متفاوت است و مقدار ثابتی ندارد. به منظور تشریح پدیده مشاهده شده در شکل (۷)، در صورتی که فرض کنیم شکل (۸) دو موج نیرو با بزرگی مختلف را نشان دهد و مترادف نیروهای اعمال شده، حسگر نیز پاسخ‌هایی در سطوح مختلف از خود نشان می‌دهد. با توجه به ثابت بودن فرکانس بارگذاری حین آزمایش ( $\frac{1}{T} = \partial$ ) در موج نیرو و موج پاسخ حسگر و عدم وجود تاخیر در بین موج نیرو و موج پاسخ، شیب نیروهای وارده متفاوت خواهد بود. ( $tg\alpha_1 \neq tg\alpha_2$ )، حال در صورتی که به نمودار پاسخ حسگر نیز توجه کنیم این تفاوت نیز وجود خواهد داشت ( $tg\beta_1 \neq tg\beta_2$ ). از آنجا که نمودار (۷) متشکل از تجمیع داده‌های پاسخ حسگر در مقابل نیروی اعمالی به حسگر است می‌توان نتیجه گرفت که شیب نمودار (۷)، از تقسیم شیب نمودارهای نیرو در برابر پاسخ حسگر حاصل می‌شود ( $\frac{tg\alpha_1}{tg\beta_1}$ ). از آنجاکه شیب نمودارهای موجود در شکل (۷) یکی نیست ( $\frac{tg\alpha_1}{tg\beta_1}$  یا  $\frac{tg\alpha_2}{tg\beta_2}$ ) و نمودارها بر هم منطبق نمی‌باشند بنابراین می‌توان ادعا نمود که نرخ افزایش پاسخ حسگر با افزایش نیرو یکسان نیست و این گونه حسگرها رفتار غیر خطی دارند.

### ۳-۳-۳ فرمول بندی پاسخ حسگر

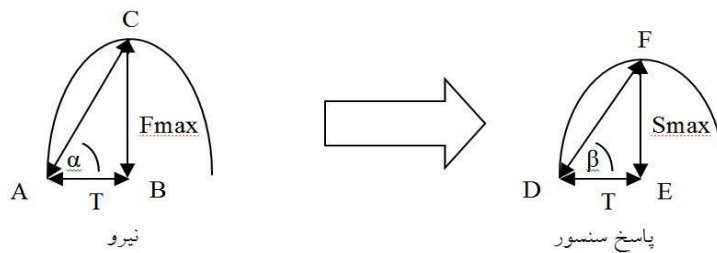
هدف از این قسمت فرمول بندی پاسخ حسگر به منظور تخمین مقدار نیروی اعمال شده، از روی خروجی‌های حسگر است. این مهم در تحلیل نتایج حسگر و تخمین وزن وارده به روسازی نقش حیاتی دارد. در این تحقیق از یک حسگر بتنی جهت رفتار شناسی حسگر و فرمول بندی پاسخ آن استفاده شد. تابع ارائه شده برای تخمین مقدار نیرو وارده، بر اساس خروجی حسگر، فقط برای این حسگر صادق است و این روند برای حسگرهای مختلف در آزمایشگاه می‌بایست دوباره تکرار شود تا



شکل ۹. مدل نیم موج پاسخ حسگر-نیرو در سطوح مختلف نیرو

جدول ۴. ثابت حسگر و معادله حاکم بر آن

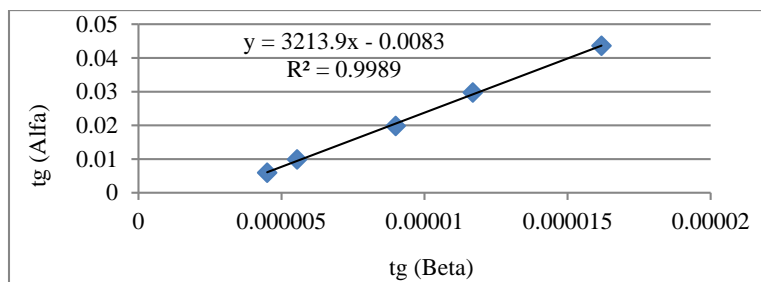
معادله حاکم	
$f(x) = p1 * x + p2$	
$p1 = 3211 \quad (3083, 3338)$	$p2 = -0.5727 \quad (-0.6619, -0.4836)$
R-square: 0.9988	SSE: 0.006638



شکل ۱۰. محاسبه مشخصات اولیه موج نیرو و پاسخ

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{F_{\max_i}}{T} \quad (۴)$$

$$\operatorname{tg} \beta_i = \frac{S_{\max_i}}{T} \quad (۵)$$



شکل ۱۱. ارتباط بین شیب نمودار پاسخ حسگر ( $\operatorname{tg} \beta_i$ ) و شیب نمودار نیرو اعمالی به حسگر ( $\operatorname{tg} \alpha_i$ )

مقاومت به مقاومت اولیه حسگر تغییر می‌کند همان نقطه شکست و حد نهایی مقاومت نمونه بتنی است. از این مرحله به بعد با افزایش بار، دهانه ترک بازتر شده و ترک عریض‌تر شده و اثر تماسی نیز کاهش می‌یابد در این حالت، تغییرات مقاومت الکتریکی با شیب بیشتری افزایش پیدا می‌کند. در مرحله بعد نیروی وارده به حسگر به حداقل قابل تحمل کاهش یافته و فقط تغییر مکان عمودی تیرچه بتنی و عرض ترک افزایش می‌یابد تا تیرچه بتنی به دونیم شود. در این حالت به دلیل قطع شدن کلیه نانولوله‌ها و کاهش رسانایی مقطع، جهش‌های بزرگی در نمودار میزان تغییرات مقاومت الکتریکی رخ می‌دهد. این آزمایش نشان داد که یک حسگر بتنی با مشخصات یک حسگر سنجش خرابی می‌تواند علاوه بر پایش پیوسته خسارت، بار وارده از طرف چرخ خودرو را نیز سنجیده و بر اساس روش‌ها و تکنیک‌های مدل‌سازی تشریح شده در این مقاله قادر به فرمول‌بندی این دو اثر خواهیم بود.

حسگرهای تیری شکل که الکترودها در دو طرف تیر قرار دارند و به منظور تعیین خسارت در داخل بتن تعبیه شده‌اند، قابلیت تشخیص مقدار نیروی خارجی وارده به روسازی را دارند. به این معنا که یک حسگر سنجش خرابی که وظیفه پایش خسارت وارده در طول زمان به روسازی را بر عهده دارد می‌تواند به طور هم‌زمان وظیفه یک حسگر فشارسنج الکتریکی با قابلیت تشخیص وزن خودروهای عبوری را نیز ایفا نماید. این نتیجه مشابه نتایج بدست آمده در تحقیقات گذشته با استفاده از حسگر ساخته شده به فرم فشارسنج الکتریکی (که الکترودها در بالا و پایین نمونه قرار گرفته اند) است [Wen and Chung 2006; Galao et al. 2013; Baeza et al. 2014]. بنابراین می‌توان ادعا نمود که شکل قرارگیری الکترودها در حسگرهای بتنی (دو طرف نمونه و در راستای بارگذاری خارجی و بالا و پایین نمونه، عمود بر راستای بارگذاری خارجی) تاثیری بر عملکرد توامان رفتار سنجش خرابی و فشارسنج الکتریکی ندارد.

با توجه به ثابت بودن زمان  $T$  بین موج پاسخ و موج نیرو می‌توان با مشابه دانستن دو مثلث  $ABC$  و  $DEF$ ، رابطه مثلثاتی زیر را استخراج نمود.

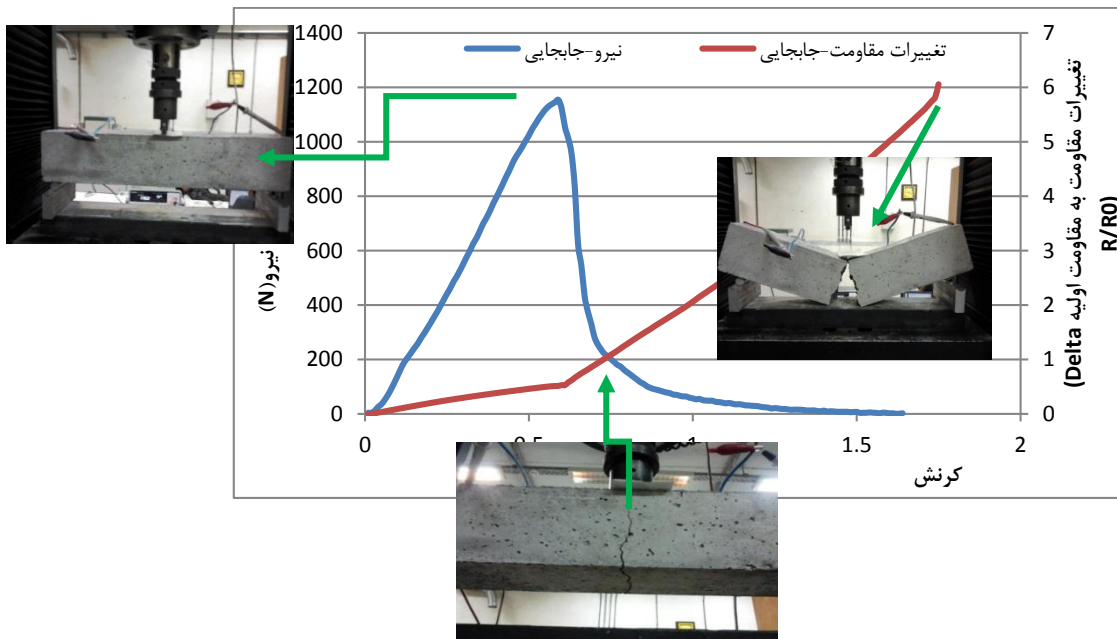
$$F_{max_i} = \frac{tg\alpha_i}{tg\beta_i} \times S_{max_i} \quad (6)$$

که در این رابطه معلومات  $S_{max}$  و  $tg\beta_i$  هستند که با استفاده از نمودار (۱۱)،  $tg\alpha_i$  نیز قابل محاسبه بوده و در نهایت  $F_{max}$  از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. نمودار (۱۱) با اعمال مقادیر مختلف نیرو و استخراج نتایج پاسخ حسگر و محاسبه شیب هرکدام از موج‌های خروجی و ورودی و ترسیم آن‌ها در یک نمودار در آزمایشگاه تولید حسگر، ترسیم می‌شود و به همراه حسگر برای ارزیابی نیروهای جسم روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با بررسی و فرمول‌بندی رفتار سنجش نیرو حسگر بتنی، قابلیت اندازه‌گیری وزن خودرو توسط این نوع حسگر به اثبات رسید در ادامه به بررسی قابلیت پایش خرابی و گسترش آن در حین بارگذاری پرداخته می‌شود.

#### ۴. بررسی رفتار سنجش خرابی حسگر بتنی

در آزمایش خمشی سه نقطه استاتیکی، نیرو بر اساس استاندارد مربوطه با نرخ ثابت ۰/۵ کیلو نیوتن بر دقیقه زیاد شد تا ریزترک‌ها درون جسم ایجاد شوند و در نهایت بتن، ترک خورده و بشکند. در این مرحله نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی دو سر حسگر، به صورت تابعی از کرنش نمونه بتنی، تا لحظه شکست در شکل (۱۲) رسم شده است. همان‌طور که در نمودار زیر مشاهده می‌شود در قسمت اول نمودار، نیروی وارده در محدوده خطی مصالح و با سرعت بارگذاری یکنواخت به نمونه وارد شده و مشاهده می‌شود که مقاومت عبوری از نمونه حسگر بتنی، با افزایش نیرو، به تدریج افزایش می‌یابد. هنگامی که ریزترک‌ها در بتن به وجود می‌آیند و نمونه از نظر مقاومت خمشی به حداکثر توان خود می‌رسد و ترک مرئی ایجاد می‌شود، دیده می‌شود که جهشی در میزان تغییرات مقاومت الکتریکی رخ می‌دهد. مشاهده شده است نقطه‌ای که شیب نمودار تغییرات



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت الکتریکی در مقابل تغییرات بارگذاری بر روی حسگر بتنی

## ۵. نتیجه گیری

نتایج نشان دادند:

خارجی) تاثیری بر عملکرد توامان سنسجش خرابی و فشارسنج الکتریکی ندارد.

۴. نتایج به دست آمده از مدل نیم موج با بزرگی مختلف نشان داد که سنسجش وزن خودروهایی عبوری توسط حسگر سنسجش خرابی یک رفتار غیرخطی است.

۵. پاسخ این گونه حسگرها تابعی از نسبت شیب منحنی نیرو به شیب منحنی پاسخ حسگر و همچنین مقدار حداکثر نیروی وارده به آنها است.

۶. در این تحقیق از دو رویکرد تحلیل رگرسیون و گرافیکی برای تعیین ثابت حسگر استفاده شده و نتایج نزدیکی زیادی بین نتایج خروجی هر دو رویکرد را نشان می دهند. مقدار ضرایب خوبی برازش در این دو رویکرد دقت بالایی را نشان می دهند.

۷. در بررسی رفتار حسگر بتنی به منظور سنسجش میزان خرابی و گسترش آن هم زمان با افزایش بارگذاری، حسگر بتنی عملکرد مناسبی داشت و زمان شکست و روند گسترش خرابی بعد از شکست به خوبی با روند افزایش بارگذاری نشان داده شد.

۱. در این تحقیق رفتار فشارسنج الکتریکی در حسگرهای سنسجش خرابی مدل سازی شد و بر خلاف تحقیقات پیشین که نتایج مختلفی در این زمینه ارائه داده بودند، توانست با فرمول بندی رفتار فشارسنج الکتریکی، میزان نیروی وارده به روسازی را از روی مقدار تغییرات مقاومت الکتریکی دو سر یک حسگر بتنی تخمین بزند. نتایج مدل سازی از دو روش مختلف مورد بررسی قرار گرفت و آنالیز آماری دقت مدل سازی بالایی را نشان می دهد.

۲. بررسی دینامیکی تغییرات پاسخ حسگر در یک سیکل بارگذاری و باربرداری مستقل از تغییر شکل ماندگار حسگر می باشد و در واقع حسگر بیشتر تغییرات لحظه ای را نشان می دهد و تغییرات جابجایی حسگر تابع زمان اثر کمی در خروجی حسگر می گذارند.

۳. نتایج نشان داد که شکل قرارگیری الکترودها در حسگرهای بتنی (دو طرف نمونه و در راستای بارگذاری خارجی و بالا و پایین نمونه، عمود بر راستای بارگذاری

<sup>4</sup> weight in motion detector

<sup>5</sup> volume resistance

<sup>6</sup> Multi-walled carbon nanotubes

<sup>7</sup> Sodium dodecyl sulfate( $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$ )

<sup>8</sup> MWCNT

۶. پی نوشتها

<sup>۱</sup> piezoresistive sensor

<sup>۲</sup> self-sensing

<sup>۳</sup> damage detection sensor

Materials, Vol. 6 No. 3, pp. 841–855.

۷. مراجع

-Bontea, Dragos-Marian, Chung, D. D. L. and Lee, G. C. (2000). "Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement", Cement and Concrete Research Vol. 30, No. 4, pp. 651–659.

-Chiarello, Manuela, and Zinno, Raffaele (2005) "Electrical conductivity of self-monitoring CFRC", Cement and Concrete Composites Vol. 27, No. 4, pp. 463–469.

-Du, Hongjian, Quek, Ser Tong and Dai Pang, Sze (2013) "Smart multifunctional cement mortar containing graphite nanoplatelet", Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, No. 8692, pp. 1–10.

-Galao, O., Baeza, F.J., Zornoza, E. and Garcés, P. (2014) "Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture", Cement and Concrete Composites, No. 46, pp. 90–98.

-Gao, Di, Sturm, Mariel and Mo, Y L. (2011) "Electrical resistance of carbon-nanofiber concrete", Smart Materials and Structures, Vol. 20, No. 4, pp. 49501.

-Gopalakrishnan, Kasthurirangan, Taylor, Peter, Birgisson, Bjorn and and Attoh-Okine, Nii O. (Eds.) (2011) "Nanotechnology in civil infrastructure a paradigm shift", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

-Han, Baoguo, Ding, Siqi and Yu, Xun (2015) "Intrinsic self-sensing concrete and structures: a review", Measurement No. 59, pp. 110–128.

-Han, Baoguo and Ou, Jinping (2007) "Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor", Sensors and Actuators, A: Physical, Vol. 138, No. 2, pp. 294–298.

-Han, Baoguo, Sun, Shengwei, Siqi Ding, Liqing

-AASHTO. (1993) "AASHTO guide for design of pavement structures", Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

-Adresi, Mostafa, Hassani, A. Javadian, S. and Tulliani, J. (2016) "Determining the Surfactant consistent with concrete in order to achieve the maximum possible dispersion of multiwalled carbon nanotubes in keeping the plain concrete properties", Journal of Nanotechnology, Vol. 2016, pp. 1–10.

-Adresi, Mostafa, Hassani, A., Tulliani, J., Lacidogna, G. and Antonaci, P. (2016) "A Study on the main factors affecting the performance of self-sensing concrete", Advances in Cement Research, Vol. 29, Issue 5, pp. 1-14.

-ASTM:C192/C192M-13. (2013). "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory", ASTM International 4: pp. 1–8.

-ASTM C78. (2012) "Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with center-point loading)." ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 12–14.

-Azhari, Faezeh and Nemkumar, Banthia (2012) "Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing", Cement and Concrete Composites Vol. 34, No. 7, Elsevier Ltd: pp. 866–873.

-Azhari, Faezeh, and Nemkumar, Banthia (2015) "A 3D percolation model for conductive fibrous composites: application in cement-based sensors", Journal of Materials Science Vol. 50, No. 17, Springer US: pp. 5817–5821.

-Baeza, Francisco Javier, Galao, O., Zornoza, E. and Garcés, P. (2013) "multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) Structural Elements",

- Shi, Zeng Qiang and Chung, D. D. L. (1999) "Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 435–439.
- Sun, Ming-qing, Liew, Richard J.Y., Zhang, Min-Hong and Li, Wei (2014) "Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 65, pp. 630–637.
- Sun, Shengwei, Yu, Xun and Han, Baoguo (2014) "Sensing mechanism of self-monitoring CNT cementitious composite", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 42, No. 1, pp. 20120302.
- Veedu, Vmod P-. (2010) "Multifunctional cementitious nanocomposite material and methods of making the same", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 529-543.
- Wen, Sihai 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*, Vol. 44, No. 8, pp. 1496–1502.
- Wilson, Jon (2005) "Sensor technology handbook", Elsevier.
- Xiao, Huigang, Li, Hui and Ou, Jinping (2010) "Modeling of piezoresistivity of carbon black filled cement-based composites under multi-axial strain", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 160, No.1–2, pp. 87–93.
- Xiao, Huigang, Li, Hui and Ou, Jinping (2011) "Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam", *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 167, No. 2, Elsevier B.V.: pp. 581–587.
- Yoder, E. J. and Witczak, M. W. (1975) "Principles of pavement design", second edition, John Wily and Sons.
- Yu, Xun and Kwon, Eil (2012) "Carbon nanotube based self-sensing concrete for pavement structural health monitoring", Center for Transportation Studies, University of
- Zhang, Xun Yu and Jinping Ou (2015) "Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Vol. 70, pp. 69–81.
- Han, Baoguo, Yu, Xun and Kwon, Eil (2009). "A Self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring", *Nanotechnology* Vol. 20, No. 44, pp. 445-501.
- Han, Baoguo, Yu, Xun and Ou, Jinping (2014) "Chapter 5 - Sensing properties of self-sensing concrete", In *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*, pp. 95–162.
- Han, Baoguo, Zhang, Kun, Yu, Xun, Kwon, Eil and Ou, Jinping (2012) "Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 6, pp. 794–800.
- Kim, H. K., Park, I. S. and Lee, H. K. (2014) "Improved piezoresistive sensitivity and stability of cnt/cement mortar composites with low water-binder ratio", *Composite Structures*, No. 116, pp. 713–719.
- Konsta-Gdoutos, Maria, S. and Chrysoula, Aza (2014) "Self sensing carbon nanotube (cnt) and nanofiber (cnf) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 53. pp. 162–169.
- Li, Chunyu and Chou, Tsu-Wei (2008) "Modeling of damage sensing in fiber composites using carbon nanotube networks", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 15–16, pp. 3373–3379.
- Saafi, Mohamed (2009) "Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures", *Nanotechnology* Vol. 20, No. 39, pp. 395502.
- Schulte, K. and Baron, Ch. (1989) "Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements", *Composites Science and Technology*, Vol. 36, No. 1, pp. 63–76.

رفتار شناسی خرابی و تعیین وزن ناشی از بارگذاری ترافیک با استفاده از خاصیت خودتشخیصی در حسگرهای بتنی

Minnesota.

-Yu, Xun, and Kwon, Eil (2009). "A carbon nanotube/cement composite with Piezoresistive properties", *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 5, pp. 55010.

-Zhang, Jinrui, Lu, Youyuan, Lu, Zeyu, Liu, Chao, Sun, Guoxing and Li, Zongjin (2015) "A new smart traffic monitoring method using embedded cement-based Piezoelectric sensors", *Smart Materials and Structures* Vol. 24, No. 2, pp. 25023.

## رفتار شناسی خرابی و تعیین وزن ناشی از بارگذاری ترافیک ...

مصطفی آدرسی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه یزد و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران، راه و ترابری از دانشگاه پلی تکنیک تورین ایتالیا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی (بتنی و آسفالتی)، مواد هوشمند و فنآوری های نوین در رشته روسازی راه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی است.



امین احمدی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران، راه و ترابری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گردید. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان ارزیابی عملکرد مخلوط های آسفالتی و بتنی بازیافتی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه شهرکرد است.

محسن احمدی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۹۳۱ از دانشگاه یزد و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۹۳ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی بتنی، تکنولوژی بتن، بتن ییافی، بتن با مصالح بازیافتی بوده و در حال حاضر دانشجوی دوره دکتری عمران (راه و ترابری) در دانشگاه سمنان است.



مسعود فرصت، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه چابهار و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۵ موفق به تحصیل در مقطع دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی بتنی است.



محمد تقی پور، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران را در سال ۹۲ از دانشگاه گیلان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری در سال ۹۴ را از دانشگاه گیلان اخذ نمود و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی عمران، راهسازی، در دانشگاه تربیت مدرس است.

