

## مانیتورینگ سلامت سازه‌های بتنی با استفاده از شبکه‌های حسگر بی سیم

سامان شورابی ثانی \*

کارشناس ارشد مهندسی برق - الکترونیک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

منا کلاته عربی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق - الکترونیک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی نیشابور، واحد علوم و تحقیقات

خراسان رضوی

علی اکبر خزاعی

استادیار و عضو هیئت علمی، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی نیشابور، واحد علوم و تحقیقات خراسان رضوی

### چکیده

در این پژوهش یک سیستم نظارت بر سلامت سازه‌های بتنی با استفاده از شبکه‌های حسگر بی سیم معرفی و پیاده‌سازی می‌گردد. هدف اصلی در این پژوهش ارائه یک سیستم برای اندازه‌گیری دو پارامتر دما و رطوبت در داخل سازه‌های بتنی - بویژه در مواقع بتن ریزی با حجم زیاد - با کمترین هزینه طراحی و پیاده‌سازی و کمترین هزینه و نیاز به عملیات نگهداری و تعمیرات و با بیشترین طول عمر مفید در هنگام قرارگیری در داخل یا مجاورت بتن و عوامل مخرب مشابه در سازه‌های بتنی است. عمده تمرکز این پژوهش بر دوره‌های اولیه‌ی شکل‌گیری و تشکیل یافتن بتن است. در این پژوهش برای نیل به هدف مذکور چهار تکنولوژی مختلف مورد ارزیابی عملی قرار می‌گیرد. اولین روش عبارت است از استفاده از ترمیستور با ضریب حرارتی منفی و IRIS mote در قالب توپولوژی شبکه‌ی IEEE 802.15.4. نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌گیری این سنسور در حدود  $5^{\circ}\text{C}$  بین مقادیر واقعی و مقادیر اندازه‌گیری شده از خود انحراف معیار استاندارد بروز می‌دهد. روش دوم از یک سنسور SHT15 (دما و رطوبت) به همراه میکروکنترلر PIC16F4680 و یا برد آردینهو استفاده می‌کند. روش سوم شامل استفاده از سنسور SHT21S (دما و رطوبت) به همراه برد کاربردی eZ430-RF2500 با پردازنده‌ی MSP430 می‌باشد. در این حالت قرائت مقادیر دما در طول ۱۶ ساعت اولیه به خوبی انجام می‌گیرد در حالی که مقادیر رطوبت برای ۲۴ ساعت اول آزمایش به خوبی اندازه‌گیری و ثبت گردیدند. با وجود این که مقادیر اندازه‌گیری شده برای سنسورهای SHT15 و SHT21S مطابقت خوبی دارند، هر دو سنسور بعد از گذشت مدت زمان مشخصی از کار ایستادند که نشان دهنده‌ی رابطه‌ی معکوس بین طول عمر سنسور و شدت قلیایی بودن محیط بتن است و بطور ضمنی لزوم ایجاد پوشش برای سنسورهای مذکور را برای کاربرد در داخل بتن متذکر می‌شود. در روش چهارم از هر دو سنسور SHT15 و SHT21S بصورت محافظت شده برای مانیتورینگ درازمدت استفاده گردید. از آنجا که در مورد اخیر دو سنسور SHT15 و SHT21S با وجود تحت تأثیر قرار گرفتن بواسطه‌ی محیط قلیایی بتن، موفق به اندازه‌گیری به مدت نزدیک به دو ماه گردیدند، امکان نظارت بلادرنگ و پیوسته با کمک سنسورهای ویژه در قالب شبکه‌های حسگر بی سیم با حداقل قیمت تمام شده محقق می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های حسگر بی سیم، نظارت بر سلامت سازه، بتن، سنسور، دما، رطوبت.

\* نویسنده مسئول: s1sani91@gmail.com

## ۱- مقدمه

ماینیتورینگ ترک خوردگی بخش‌های بتنی متمرکز شده است [۴]. مجموعه سنسورهای مورد استفاده در تحقیق مذکور نیازمند دانش مقدماتی درباره مکان وقوع ترک‌ها یا آسیب‌ها در بتن نمی‌باشد و این مزیت بزرگ این روش نسبت به سایر تکنیک‌های رایج ماینیتورینگ فعلی می‌باشد. علاوه بر آن، سیستم مذکور قابلیت تشخیص آسیب‌های متعددی را از طریق تنها یک فیبر نوری دارد. در پژوهشی مشابه یک سیستم یکپارچه و با قیمت مناسب مشکل از سنسورهای با قابلیت ماینیتورینگ سازه‌های بتنی از پیش تنیده شده از منظر میزان خوردگی، معرفی و پیاده‌سازی شده است [۵]. سیستم مذکور پارامترهایی مثل اختلاف پتانسیل مدارباز بر روی میله‌های آهنی موجود در بتن، چگالی جریان خوردگی در میله‌ها، مقاومت الکتریکی در بتن، میزان اکسیژن و یون‌های کلرید موجود در بتن و همچنین دمای داخل سازه را اندازه می‌گیرد [۵]. قرار دادن سنسورهای کوچک در داخل یا روی سطح بتن یکی از چالش‌های اصلی در زمینه ماینیتورینگ درازمدت سازه‌های بتنی می‌باشد. ماینیتورینگ خوردگی با استفاده از سنسورها و مبدل‌ها و روش‌های مختلفی که قابلیت تحمل محیط قلیایی بتن را برای سال‌های طولانی دارند، انجام می‌گیرد. داده‌های ذخیره شده برای پتانسیل خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن در سازه‌های واقعی - که به صورت پیوسته در معرض تغییر شرایط محیطی و آب و هوایی قرار گرفته‌اند - می‌تواند برای تشخیص نرخ خوردگی بخش‌های بتنی در سازه‌های مذکور مورد استفاده قرار گیرد [۶]. سنسورهای جای‌گذاری شده (دفن شده) در داخل بتن و در نزدیکی سطح آن اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی و چگونگی توزیع آن در محدوده‌ی تحت پوشش را میسر می‌سازد. سیستم‌های ماینیتورینگ رایج دارای قابلیت تنظیم اتوماتیک محدوده‌ی تحت پوشش خود در داخل بتن نسبت به تغییرات شرایط محیطی - به ویژه تغییر در میزان دمای محیط - هستند [۷].

پیشرفت‌های اخیر در مطالعه‌ی خوردگی‌های بتن می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای ارتقا یابد مشروط بر این که متخصصین رشته‌های تحقیقات بتن و تکنولوژی سنسور (نیمه هادی و الکترونیک) با یکدیگر تعامل نزدیکی داشته باشند. یکی از این نتایج، شکل‌گیری گره‌های سنسور بی‌سیم هوشمند با توان مصرفی پایین با قابلیت

امروزه اهمیت سیستم‌های ماینیتورینگ و نقش مؤثر آن‌ها بر مدیریت سازه‌های بتنی بر کسی پوشیده نیست. ماینیتورینگ خوردگی با هشدار پیش از وقوع و امکان برنامه‌ریزی سرویس‌ها و برنامه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه از بروز خسارات زیاد بعدی و هزینه‌های هنگفت متعاقب آن‌ها جلوگیری می‌کند. علاوه بر آن، استفاده از داده‌های سیستم ماینیتورینگ به همراه مدل‌های ارتقایافته‌ی پیش‌گویی طول عمر (بازه‌ی کارکرد) از طریق الگوریتم‌های داده کاوی<sup>۱</sup> و پردازش الگوی شبکه‌های عصبی منجر به ذخیره‌سازی و صرفه‌جویی‌های بیشتر منابع مالی می‌گردد [۱ و ۲]. سنسورها و سیستم ماینیتورینگ مرتبط با آن برای تجزیه و تحلیل المان‌های مختلف مؤثر بر مدیریت سازه‌های بتنی حائز اهمیت هستند. بیش از ۵۰ نوع سنسور مختلف و با تکنیک‌های جای‌گذاری متنوع در بتن با هدف ماینیتورینگ درازمدت وجود دارد که مواردی چون تغییرات نیروهای برهم کنش سازه‌ای (تنش و کرنش)، خوردگی بخش‌های فلزی (بتن پیش تنیده)، فعل و انفعالات شیمیایی داخل بتن و مقادیر رطوبت و دما را اندازه می‌گیرند [۲]. پیاده‌سازی و طراحی انواع جدیدی از سنسورهای پیشرفته و تکنیک‌های به‌کارگیری جدید آن‌ها، امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر و منظم‌تری برای سرویس‌های بازبینی و نگهداری و تعمیرات سازه‌های عمرانی مختلف را فراهم می‌آورد. در حال حاضر مطالعات زیادی برای جای‌گذاری و پیاده‌سازی سنسورها در داخل سازه‌های بتنی به منظور ماینیتورینگ شرایط محیطی و پارامترهای مؤثر بر کیفیت بتن در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری آن صورت گرفته است. در مطالعه‌ای که برای بررسی استحکام بتن در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری آن از طریق به‌کارگیری سیستم شامل سنسورهای مینیاتوری صورت گرفته است هدف اصلی بررسی و تحلیل شرایط بتن تازه در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری آن است [۳]. سیستم مذکور شامل مبدل‌های با قابلیت استفاده‌ی چند باره - دارای استحکام کافی برای جدا شدن از بتن سخت شده - تشکیل شده است و برای نظارت بر نحوه‌ی استحکام بتن در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری آن و مراحل هیدراتاسیون اولیه به کار می‌رود. مطالعه‌ای دیگر بر روی کارایی سنسورهای فیبر نوری در

<sup>1</sup> Data Mining

صورت محدودیت‌های متنوعی پیش روی تجهیزات و سیستم‌های الکترونیکی جایگذاری شونده در بتن وجود دارد، مانند: پایداری و طول عمر دوره‌ی کارکرد با حداقل استاندارد‌های لازم در مبحث انتقال سیگنال، حفاظت از تجهیزات الکترونیکی در مقابل انواع آسیب مختلف برای مثال از طریق استفاده از جعبه‌های عایق بندی با ضریب حفاظت<sup>۲</sup> خوب و کپسول‌ها و محفظه‌های عایق‌سازی [۱۰]. برای مطالعه‌ی بیشتر پیرامون بحث نظارت بر سلامت سازه با استفاده از تکنیک‌های نوین پیشنهاد شده توسط محققان در سال‌های اخیر پژوهش‌های متنوعی قابل اشاره است [۲۲-۱۷].

## ۲- اهداف و تجهیزات مورد استفاده

هدف اصلی این پژوهش بین رشته‌ای معرفی و پیاده‌سازی یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم یکپارچه با قابلیت مانیتور کردن سازه‌های بتنی - با اهمیت ویژه - به صورت از راه دور می‌باشد. در واقع بدنه‌ی اصلی این پژوهش، گزارشی تکنیکی و بررسی عملی و تجربی تجهیزات اندازه‌گیری رایج رطوبت و دما و ارائه‌ی نقاط ضعف و قوت آن‌ها در کاربرد نظارت بر سلامت سازه‌های بتنی است که نهایتاً منجر به پیشنهاد بهترین و کارآمدترین سیستم با نازلترین قیمت به محققان و پژوهشگران عرصه‌ی تحقیقات بتن می‌گردد.

در این پژوهش شبکه‌های حسگر بی‌سیم از ادوات کوچکی تشکیل یافته‌اند که Mote نام دارند، و هر کدام شامل یک میکروکنترلر و سنسور و تعدادی حافظه‌ی جانبی و یک بخش تأمین توان و ماژول ارتباطی بوده و قادرند تا پارامترهای محیطی را حس کرده و اطلاعات جمع‌آوری شده توسط سنسورها را از طریق بستر ارتباط بی‌سیم به یک گره مرجع انتقال دهند. قابلیت‌های هر کدام از آن‌ها شامل مواردی چون: خواندن پارامترهای فیزیکی در نقطه‌ی موردنظر، تشخیص رخدادها، موردنظر، تجمع داده‌های پردازش سیگنال و کاهش حجم ارتباطات و مبادلات و مواردی از این دست می‌شود. شبکه‌های حسگر بی‌سیم در موقعیت‌هایی که نیازمند سرعت بالا هستیم و یا با محدودیت تعداد و هزینه‌ی تجهیزات و سنسورهای جایگذاری

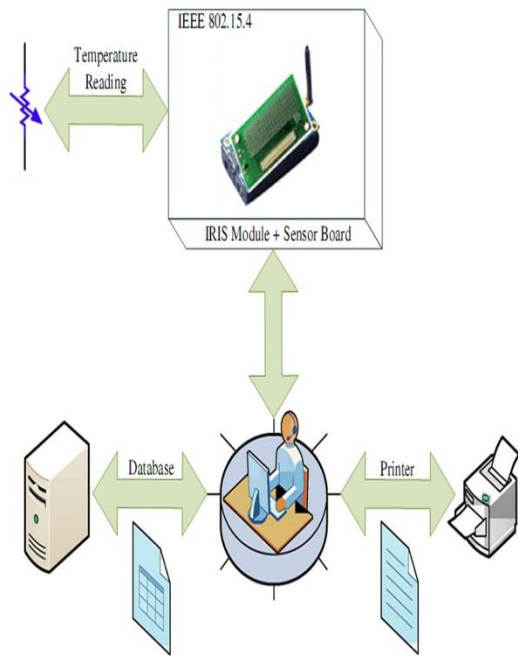
اندازه‌گیری بلادرنگ و فیلتر کردن داده‌های مطلوب از نویز و اعوجاج و داده‌های نامطلوب و به اشتراک گذاری مناسب داده‌های اندازه‌گیری شده - از مجموعه‌ی بزرگی از سنسورها - می‌باشد.

چالش‌های اصلی به کارگیری سنسورها در بحث مانیتورینگ سلامت سازه‌های بتنی عبارتند از: کالیبراسیون سنسورهای دفن شده، استحکام و پایداری سنسورها در محیطی که جای‌گذاری می‌شوند و همچنین طول عمر مفید آن‌ها در راستای تحقق اهداف مانیتورینگ درازمدت سازه‌ها [۸].

مانیتورینگ دما و رطوبت، اطلاعات حیاتی در رابطه با فرایند سخت شدن بتن و شکل‌گیری آن در اختیار می‌گذارد. همچنین اطلاعات مقتضی در رابطه با مکانیزم خوردگی‌های مختلفی چون خوردگی بخش‌های آهنی در بتن پیش‌تینده، دوره‌های یخ‌زدگی و آب شدن یخ موجود در بتن، کربنیزه شدن بتن و فعل و انفعالات مرتبط با واکنش‌های شیمیایی-قلیایی در اختیار مهندسان عمران می‌گذارد. یک تکنیک جدید برای نظارت بر میزان رطوبت و دمای موجود در بتن اخیراً ارائه شده است [۹]. این تکنیک مدرن از سیستم‌های میکرو الکترومکانیکال<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی داخلی بتن بهره می‌برد. براساس نتایج این پژوهش مشخص شد که سیستم مبتنی بر MEMS در محیط پر از خوردگی بتن در حضور تنش‌ها و کرنش‌های داخلی و خارجی پایدار است. همچنین مشخص شد که خروجی MEMS نشان‌دهنده‌ی تغییرات در مشخصات بتن بوده و می‌تواند به طور مؤثر و حساسیت بالایی میزان رطوبت موجود در بتن را اندازه‌گیری نماید. در هر صورت مشکلات عمده‌ای مثل عملکرد درازمدت و قابلیت تکرارپذیری تکنولوژی MEMS در داخل بتن نیازمند بررسی‌های بیشتری است [۹]. نتایج حاصل از پژوهش‌های بین رشته‌ای شامل مهندسی عمران و الکترونیک و کنترل منجر به معرفی تکنیک اندازه‌گیری جدیدی شده است که اندازه‌گیری و نظارت بلادرنگ و پیوسته‌ی بتن را از منظر پارامترهای دما و رطوبت در بستر انتقال سیگنال بی‌سیم فراهم می‌آورد [۹]. نتایج سیستم مذکور با نتایج سنسورهای رایج باسیم برای اندازه‌گیری دما و رطوبت هم‌خوانی بالایی دارد. در هر

<sup>2</sup> IP

<sup>1</sup> Micro Electro Mechanical System



شکل ۱- معماری شبکه‌ی حسگر بی سیم برای نظارت بر سلامت سازه‌های بتنی

نرخ افزایش استحکام در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری بتن به نرخ فرایند هیدراتاسیون وابسته است. در سال‌های اخیر مطالعه بر روی تغییرات دمایی ناشی از وقوع واکنش‌های هیدراتاسیون از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. علاوه بر آن، نظارت بر سلامت سازه‌های عمرانی در سال‌های اخیر به عنوان یکی از زمینه‌های مهم کاربرد شبکه‌های حسگر بی سیم مطرح شده است زیرا که روش‌های مبتنی بر سیم‌کشی صنعتی دارای محدودیت‌های ذاتی و غیرقابل اجتنابی مانند سختی نصب و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و عدم قابلیت گسترش پذیری و همچنین بد منظره کردن سازه‌ها است. ویژگی‌های سازه‌های عمرانی در اهداف نظارت بر سلامت سازه ایجاب می‌کند که حجم نسبتاً قابل توجهی از داده‌ها با درصد بالایی از عدم قطعیت در پارامترهای مختلف - که این خود ناشی از تغییر فاکتورهای محیطی مثل دما و رطوبت می‌باشد - پردازش شود. فرایند اضمحلال و خوردگی در ساختارهای عمرانی به شدت به تغییرات مذکور وابسته است. در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری بتن رطوبت و دما نقش مهمی در پروسه‌ی قوام یافتن و سخت شدن بتن ایفا کرده و بر راندمان و کیفیت درازمدت بتن تأثیر زیادی دارند. هردو پارامتر دما و رطوبت در شرایط ویژه از

شونده در زیرساخت‌ها مواجه هستیم، مفید هستند [۱۱-۱۳]. از طرف دیگر این پژوهش بر روی مطالعه‌ی رفتار قالب (مکعب) بتونی بلافاصله بعد از شکل‌گیری بتن در لحظات اولیه‌ی آن متمرکز می‌باشد و در خلال بازه‌ی فوق تمامی تغییرات دما و رطوبت نسبی به صورت بلادرنگ اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. توپولوژی شبکه‌ی IEEE.802.15.4 با کاهش قابل توجه در میزان هزینه و وقت لازم برای پیاده‌سازی این پروژه، سیستمی که از طریق آزمون و خطا در این پژوهش بدست آمده است را قابل گسترش به سایر سیستم‌های مانیتورینگ برای سازه‌های مختلف عمرانی بسته به نوع مواد و شرایط مختلف محیطی در راستای اندازه‌گیری پارامترهای مختلفی در داخل سازه‌های بتنی - برای مثال دما و رطوبت - می‌سازد. در هنگام استفاده از شبکه‌های حسگر بی سیم در محیط سازه‌های عمرانی مهم است که یک بستر<sup>۱</sup> طراحی شود که قابلیت تعامل با محدوده‌ی وسیعی از سنسورهای مورد نیاز را داشته باشد. از طرفی قابلیت گسترش و قیمت پایین و انتقال اطلاعات در شبکه را دارا باشد. برای این منظور می‌توان اطلاعات را بر روی یک کارت micro SD ذخیره کرد تا بعداً بتوان به آن دسترسی داشته و اطلاعات آن را تفسیر کرد و یا می‌توان با انتقال بی سیم داده‌ها به صورت بلادرنگ به یک برد واسط<sup>۲</sup> که به یک کامپیوتر متصل است اطلاعات مورد نیاز را برای مهندسین عمران فراهم آورد) همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است). دما یک پارامتر حیاتی در خلال لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری بتن می‌باشد، چرا که بتن در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری خود نباید خیلی سرد و یا خیلی داغ باشد. وقتی که دما کاهش شدیدی یابد واکنش‌های هیدراتاسیون کند می‌گردد. در طرف مقابل اگر دمای بتن افزایش یابد فعل و انفعالات داخل بتن افزایش یافته و منجر به وقوع واکنش‌های گرماساز - که خود تولید حرارت می‌کنند - می‌شود. این گرادیان دما می‌تواند منجر به بروز آسیب و یا ترک خوردگی در داخل ساختار بتن شود. علاوه بر آن در خلال مراحل اولیه‌ی شکل‌گیری بتن بسیار حیاتی است که از ترک خوردگی‌های ناشی از خشک شدن سریع بتن بر اثر افزایش دما و واکنش‌های گرماساز و هیدراتاسیون فرایند جلوگیری شود.

<sup>2</sup> Mote

<sup>1</sup> Platform

طریق فعل و انفعالات خوردگی و انقباض (تنش و کرنش) منجر به بروز آسیب‌هایی می‌شوند مانند: ترک‌های ناخواسته ناشی از پدیده‌ی گرادیان دمایی و یا خوردگی در ساختار میله‌های واقع در بتن پیش‌تنیده، افزایش دی اکسید کربن و سایر واکنش‌های شیمیایی در داخل بتن.

### ۳-۱- ترمیستور با ضریب حرارتی منفی

اولین مجموعه از آزمایشات به عمل آمده در این پژوهش شامل اندازه‌گیری دما به کمک یک سنسور دما NTC که در داخل یک مکعب بتنی (با مقاومت متداول کلاس C25.30، با طول 10cm) که در شکل ۲ نشان داده شده است، می‌باشد.



شکل ۲: اندازه‌گیری دما توسط سنسور بی‌سیم در داخل مکعب بتنی

سنسورها در داخل یک مکعب کوچک به طول 4 cm تشکیل یافته از سیمان برای محافظت از سنسورها قرار داده شدند. محفظه‌ی سیمانی مذکور با استفاده از مخلوط سیمان و ماسه به نسبت ۱ به ۳ ساخته شده است. شایان توجه است که این مکعب نقش محافظتی و سنسورها و اتصالات آن‌ها در مقابل محیط خورنده بتن داشته و از طرف دیگر با ساختار متخلخل خود اجازه‌ی اندازه‌گیری رطوبت و دمای بخش اصلی بتن را فراهم می‌آورد. (شکل‌های ۵ و ۶)

### ۳-۳- سنسور دما و رطوبت SHT21S

#### ۳-۳-۱ نسخه‌ی یکتا<sup>۱</sup>:

در کنار سنسور SHT15 که هم رطوبت و هم دما را اندازه‌گیری می‌کند سنسور جدید به نام SHT21S مورد استفاده قرار گرفت. قبل از تست این سنسور یک محفظه‌ی سیمانی برای محافظت آن تعبیه

### ۳-۲- سنسور رطوبت و دمای SHT15

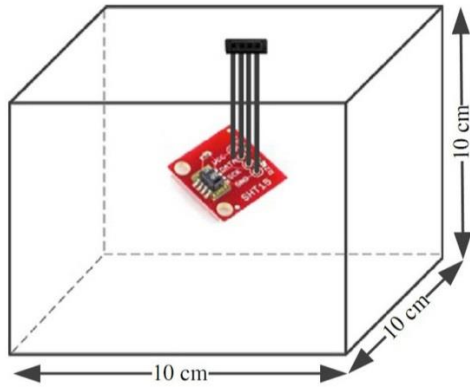
در مجموعه‌ی دوم آزمایشات به عمل آمده در این پژوهش از یک سنسور دیجیتال SHT15 استفاده گردید که هر دو پارامتر دما و رطوبت را با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌کند. شکل ۳ نشان دهنده‌ی شماتیکی از فرایند اندازه‌گیری دما و رطوبت در داخل مکعب بتنی می‌باشد. عملیات تبدیل داده‌های اولیه سنسور SHT15، به مقادیر واقعی دما و رطوبت از طریق روابط ۱ و ۲ صورت گرفت.

$$Temperature[^\circ C] = (R_{xval} \times 0.01) - 40 \quad (1)$$

$$Humidity [\% RH] = -0.4 + 0.0405 \times R_{xval} - 0.0000028 \times R_{xval} \times R_{xval} \quad (2)$$

قبل از قرار دادن سنسور مذکور در مکعب بتنی اقدامات اولیه‌ی زیر مطابق شکل ۴ به انجام رسیدند.

<sup>1</sup> Standalone



شکل ۳- نمایش شماتیکی سنسور رطوبت و دما در داخل مکعب

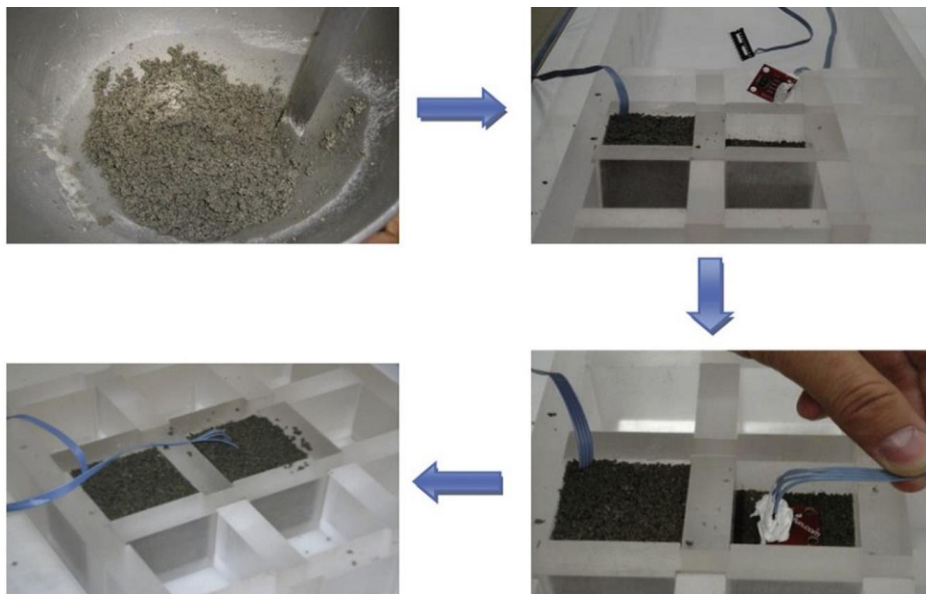
بتنی به طول ۱۰cm

گردید. همان گونه که پیش تر اشاره کردیم، هدف ما اندازه گیری همزمان دما و رطوبت در خلال لحظات اولیهی شکل گیری بتن در طول دورهی سفت شدن و قوام یافتگی آن، در داخل بلوک بتنی است. در مورد اخیر مقادیر دما و رطوبت از روابط ۳ و ۴ محاسبه گردید.

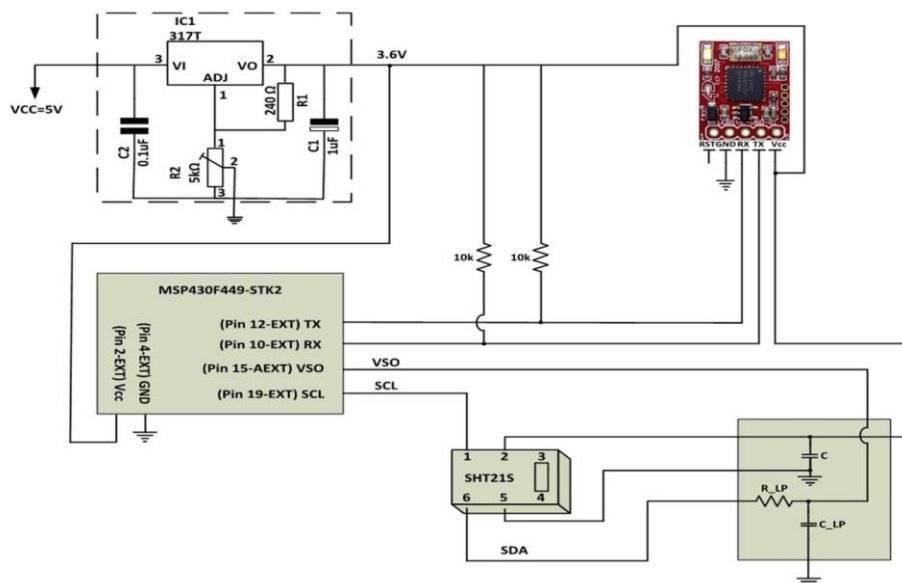
$$Temperature [^{\circ}C] = -46.85 + 175.72 \times \frac{V_{SO}}{V_{DD}} \quad (3)$$

$$Humidity [\%RH] = -6 + 125 \times \frac{V_{SO}}{V_{DD}} \quad (4)$$

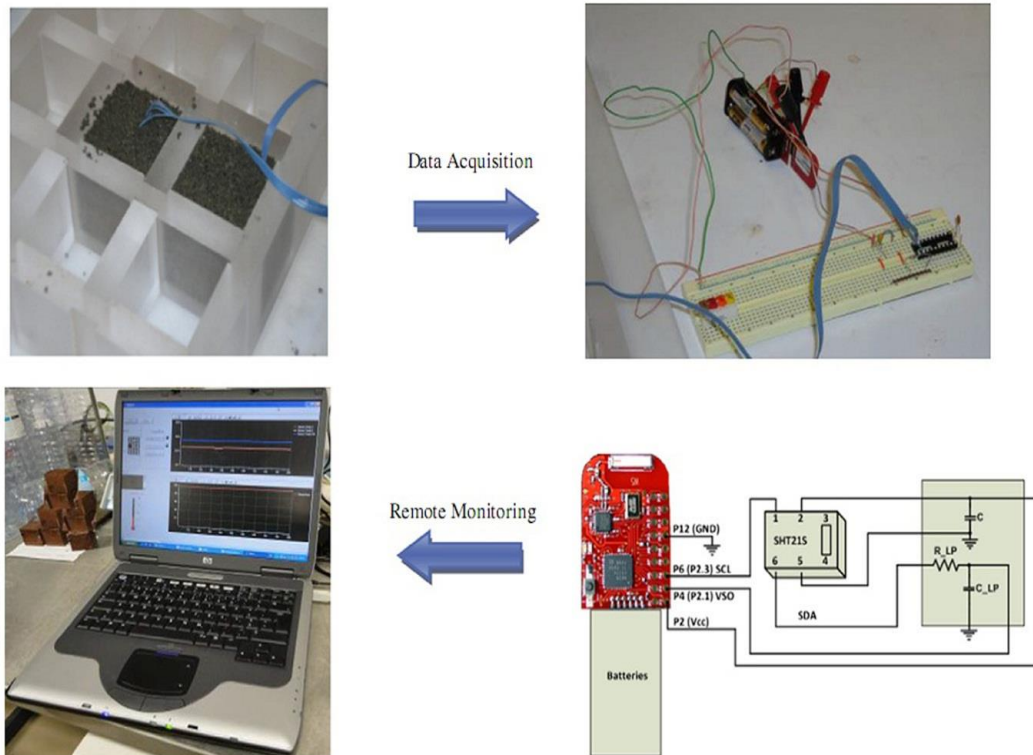
در روابط فوق، ولتاژ تغذیه است.



شکل ۴- آماده سازی و قرار دادن سنسورهای دما و رطوبت در داخل محفظه‌ی سیمانی برای محافظت از آن‌ها



شکل ۵- سیستم تحلیل داده سنسور SHT21S برای نسخه‌ی یکتا



شکل ۶- سیستم تحلیل داده‌ی بی‌سیم سنسور SHT21S

### ۳-۲- نسخه‌ی بی‌سیم

برای اندازه‌گیری دما به کار رفته است، در مقابل محیط با رطوبت بالا و خاصیت قلیایی بالا ایستادگی کند. برای غلبه بر این محدودیت در گروه دوم آزمایشات تصمیم گرفتیم تا از یک محفظه‌ی فیلتر<sup>۴</sup> برای حفاظت سنسورهای رطوبت و دمای SHT15 و SHT21S در مقابل موارد مخل اندازه‌گیری صحیح (مانند غبار، آلاینده‌ها، نفوذ آب، میعانات گازی و ذرات مخل اندازه‌گیری) استفاده کنیم. حفره‌ی کوچک داخل محفظه‌ی فیلتر طوری طراحی شد تا حجم بین بدنه‌ی پوشش و سنسور در حداقل ممکن نگهداری شود، که این امر اثر فیلتر را بر روی پاسخ زمانی سنسور اندازه‌گیر رطوبت کاهش می‌دهد. محفظه‌ی فیلتر از جنس پلی پروپیلن و یک فیلتر که به قطعه‌ی منفرد مذکور وصل شده است، تشکیل شده است (مطابق با شکل های ۷ و ۸). بعد از شیلد کردن سنسور SHT15 و SHT21S این سنسورها را در شرایط مختلفی از لحاظ میزان دما و رطوبت قرار دادیم و نتایج را با یک سنسور مرجع - که آن را از این به بعد پروب سنسور می‌نامیم- (که در محدوده‌ی دمای  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  در رطوبت بتنی صفر تا ۱۰۰ درصد به خوبی کار می‌کند) مقایسه کردیم.

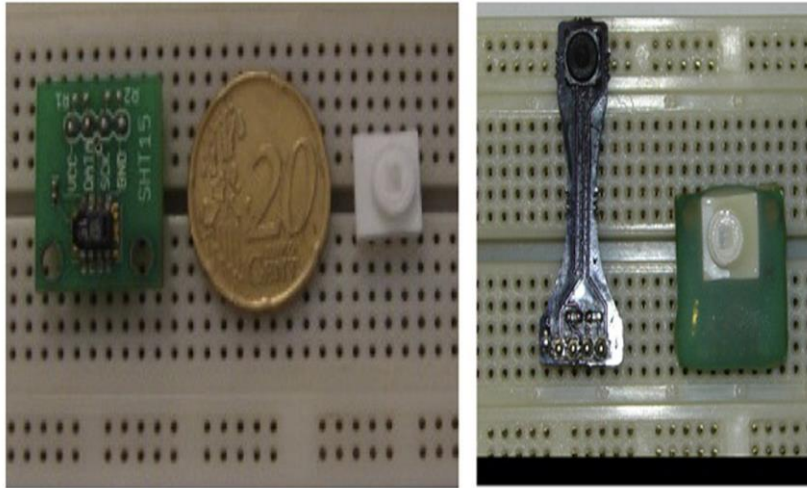
نسخه‌ی بی‌سیم سنسور SHT21S با هدف تشکیل یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم متناسب با کاربرد نظارت بر سلامت سازه پیاده سازی گردید که قابلیت اندازه‌گیری دما و رطوبت در داخل یک ساختار بتنی را دارد. مقادیر دما و رطوبت محاسبه شده به صورت بی‌سیم به نقطه‌ی دسترسی<sup>۱</sup> فرستاده می‌شود. تجهیز انتهایی<sup>۲</sup> اطلاعات را به طور دوره‌ای در هر دقیقه به نقطه‌ی دسترسی می‌فرستد. کاربر بسته به سناریوی کاربردی می‌تواند بازه گزارش‌گیری را تغییر دهد.

### ۳-۴- استفاده‌ی همزمان سنسورهای شیلد شده SHT21S و SHT15

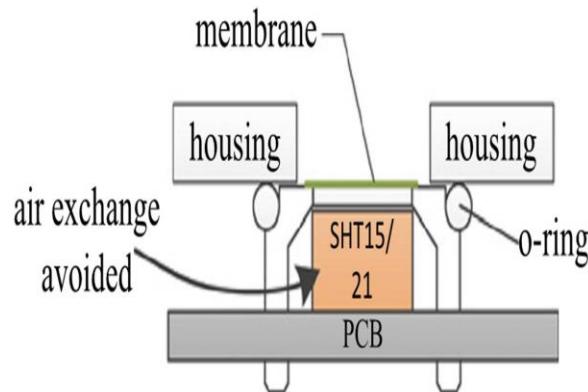
هدف اصلی استفاده از سنسورهای شیلد شده SHT15 و SHT21S ایجاد پایداری و محافظت آن‌ها در محیط با رطوبت خاصیت قلیایی بالای بتن است - که می‌تواند به سنسورهای داخل آن آسیب بزند - می‌باشد. از طرف دیگر سنسور مبتنی بر تکنولوژی خازنی استفاده شده برای اندازه‌گیری رطوبت نمی‌تواند به اندازه‌ی سنسور باند گذار<sup>۳</sup> که

<sup>3</sup> Band gap  
<sup>4</sup> Filter Cap

<sup>1</sup> Access Point  
<sup>2</sup> End Device



شکل ۷- محفظه‌ی فیلتر محافظ برای سنسور SHT21S



شکل ۸- شماتیک نصب محفظه‌ی محافظ سنسورهای SHT15 و SHT21S

دقت نتایج در شکل ۹ بخش‌های a تا d نشان داده شده است. در ادامه‌ی این بخش به دقت به تفسیر نتایج و استنتاج از شکل ۹ می‌پردازیم. پاسخ سنسورها در شرایط مختلف چهارگانه اندازه‌گیری شدند. در آزمایش اول رطوبت نسبی ۷۵ درصد در داخل دسیکاتور<sup>۱</sup> تنظیم شد. بنابراین بخش زیرین دسیکاتور با محلول آب نمک اشباع شده پر گردید (شکل ۹ قسمت a) آزمایش به مدت ۲۳ ساعت انجام گردید و از پروب سنسور برای تعیین صحت اندازه‌گیری‌ها استفاده شد. پس از ۴ ساعت اولیه سنسور SHT15 را به تغذیه متصل کرده و اندازه‌گیری مقادیر دما و رطوبت آغاز گردید. بین ساعت چهارم تا ساعت بیست و سوم از مقایسه‌ی مقادیر بدست آمده از سنسورهای SHT15 و SHT21S با مقادیر بدست آمده از پروب سنسور به این جمع‌بندی می‌رسیم که نتایج مشابهت قابل قبولی دارد و در این بازه از مدت زمان تماس با محیط قلیایی بتن، سنسورهای مذکور دارای

عملکرد قابل قبول هستند. علاوه بر آن، بعد از ساعت هفتم هر دو مقدار رطوبت و دما رفتار ثابتی از خود نشان می‌دهند. رطوبت در حدود ۷۵٪ و دما در حدود  $23^{\circ}\text{C}$  ثابت باقی می‌ماند. بعد از ۱۶ ساعت دسیکاتور را باز می‌کنیم تا تغییر در مقادیر رطوبت و دمای احتمالی را مشاهده کنیم. همان‌طور که در شکل ۹-a نشان داده شده است کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقادیر رطوبت و مقداری افزایش در مقادیر دما رخ می‌دهد. در مجموعه‌ی آزمایشات دوم که نتایج آن‌ها در شکل ۹-b نشان داده شده است، مخزن پایین دسیکاتور به جای محلول نمک از قطعات یخ پر شد بنابراین در طول سه ساعت اول کاهش در دما و افزایش در رطوبت مشاهده شد. بعد از حدود ۳۰ ساعت هوای داخل دسیکاتور به شرایط پایداری و موازنه می‌رسد. در این شرایط رطوبت در حدود ۱۰۰ درصد و دما برابر دمای محیط می‌باشد. سنسور SHT15 بعد از گذشت ۴۲ امین ساعت وارد پروسه

<sup>1</sup> Desiccator



کم به زیاد و سپس مجدداً از زیاد به کم و رطوبت را هم از کم به زیاد و از زیاد به کم تغییر داده و از ترکیب این موارد چهار حالت مربوط به شکل ۹ حاصل می‌شود.

#### ۴- نتایج و ارزیابی

##### ۴-۱- ترمیستور با ضریب حرارتی منفی

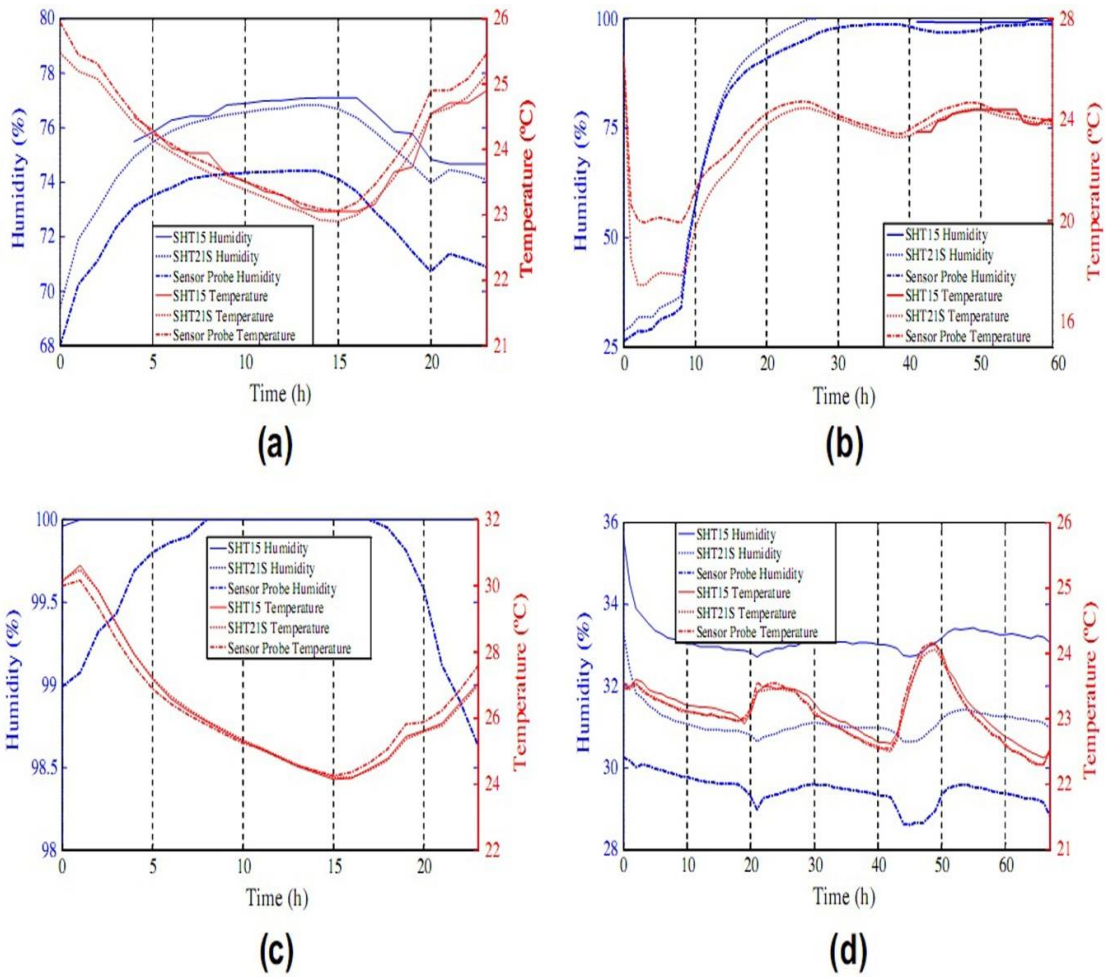
آزمایش اول برای اندازه‌گیری دما در داخل محفظه‌ی بتنی شامل استفاده از ترمیستور با ضریب حرارتی منفی و IRIS Mote در قالب یک سیستم نظارت بی‌سیم صورت گرفته است. شکل ۱۰ نشان دهنده‌ی مقادیر بدست آمده از پروب سنسور و سنسورهای کالیبره شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود تفاوت حدوداً ۵ درجه سلسیوس بین مقادیر واقعی و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. نتیجه‌گیری از شکل ۱۰ و مشاهدات موجود در آن بدین صورت است: اختلاف فوق‌الذکر خود از خطاهایی در طول دوره‌ی کالیبراسیون سنسور که منجر بروز اندازه‌گیری‌های غیردقیق می‌گردد، ناشی می‌شود. با توجه به مورد مذکور، به این جمع‌بندی می‌رسیم که سنسورهای NTC با رفتار غیر قابل پیش‌بینی خود روش مناسبی برای اهداف نظارت بر سلامت سازه‌های بتنی نیستند و علاوه بر آن این نوع سنسور قابلیت اندازه‌گیری تومان دما و رطوبت را نیز ندارد.

##### ۴-۲- سنسور دما و رطوبت SHT15

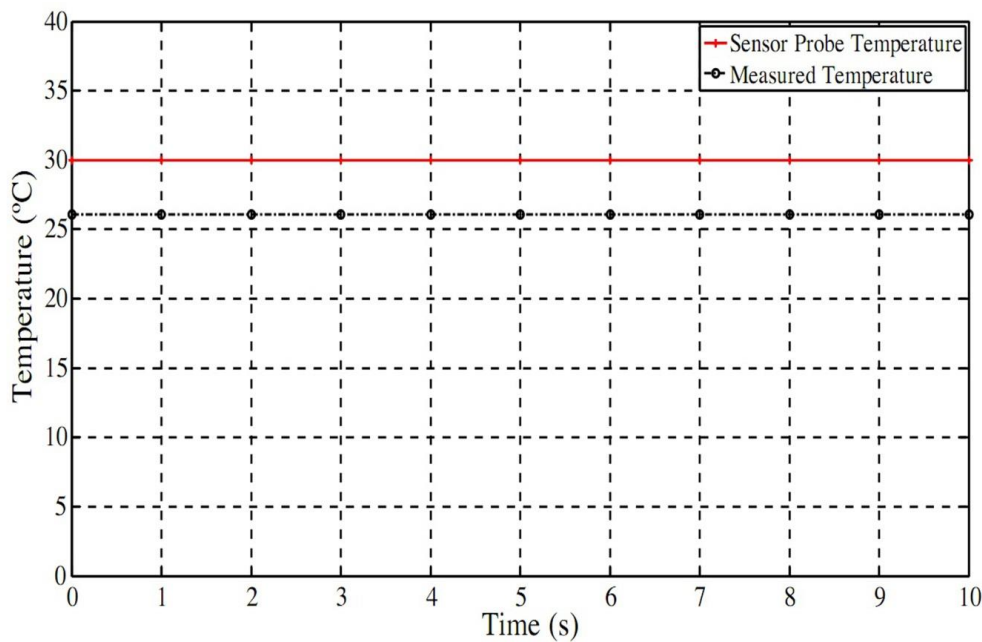
مجموعه‌ی دوم از آزمایشات با استفاده از سنسور SHT15 با قابلیت اندازه‌گیری هردو پارامتر دما و رطوبت صورت گرفت. دو تکنیک مورد آزمایش قرار گرفت، یکی با استفاده از میکروکنترلر PIC18F4680 و دیگری برد آردینو. قبل از استفاده از سنسور SHT15 در یک سناریوی واقعی تعدادی آزمایشات اولیه برای محاسبه‌ی میزان دقت مقادیر محاسبه شده‌ی دما و رطوبت سنسور مذکور با استفاده از تنظیم دما در محفظه‌ی یک یخچال به میزان  $16.3^{\circ}\text{C}$  و مقایسه‌ی نتایج با مقادیر پروب سنسور انجام گرفت. از مقایسه‌ی داده‌های سنسور با نتایج بدست آمده از پروب به این جمع‌بندی می‌رسیم که نتایج مشابهت قابل قبولی -همانطور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود- دارد. آزمایش انجام شده‌ی اخیر نشان دهنده‌ی دقت و کالیبره بودن سنسور SHT15 برای اطمینان در کاربرد آن در آزمایشات بعدی است

اندازه‌گیری گردید. در بازه‌ی بین ساعت ۴۲ ام و ساعت ۶۳ ام از طریق مقایسه‌ی نتایج سنسورهای SHT15 و SHT21S با نتایج پروب سنسور به این جمع‌بندی می‌رسیم که نتایج یکسان است و این نشان دهنده‌ی کارکرد قابل قبول سنسورهای مذکور در محیط‌های با رطوبت بالا و دمای کم اما دور از نمک و مواد خورنده است.

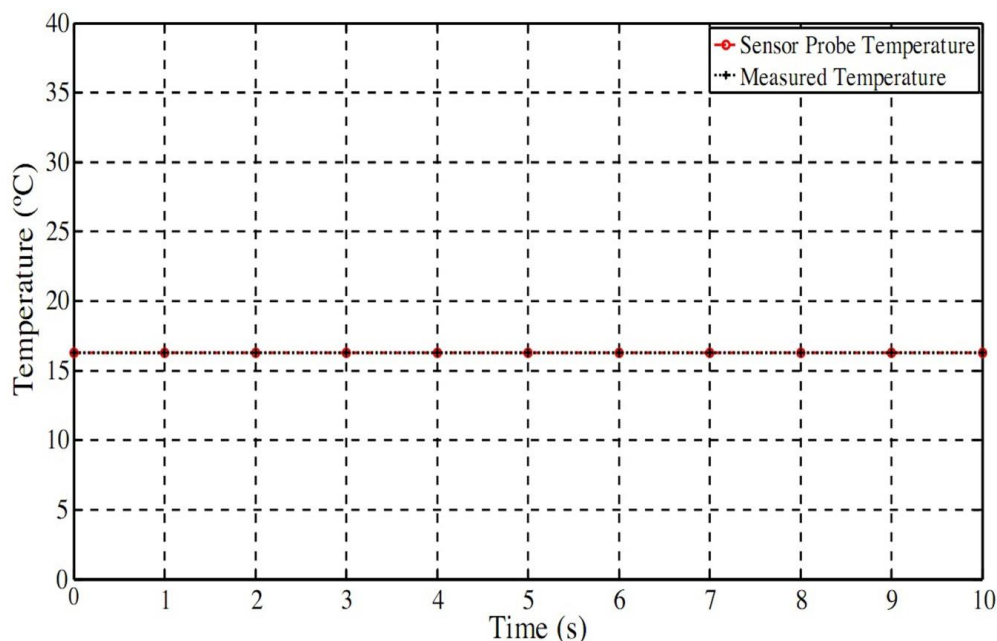
در شکل C-۹ قطعات یخ داخل دسیکاتور ذوب شده و محفظه‌ی پایین دسیکاتور از آب پر می‌شود، بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رود رطوبت داخل دسیکاتور در حدود ۱۰۰ درصد و دما برابر با دمای محیط می‌شود. نتایج این سری از آزمایشات نشان دهنده‌ی عملکرد قابل قبول سنسورهای SHT15 و SHT21S در محیط‌های با رطوبت بالا و دمای بالا اما به دور از نمک یا سایر مواد خورنده است. علاوه بر آن مقداری افزایش در میزان دما در طول روز و مقداری کاهش در میزان آن در طول شب رخ می‌دهد. نهایتاً آخرین مجموعه آزمایشات شامل تعویض محفظه‌ی پایین دسیکاتور که با آب پر شده بود، با قطعات سیلیکاژل می‌باشد. همان‌طور که در شکل d-۹ نشان داده شده است تغییرات سریعی از لحاظ میزان رطوبت نسبی داخل دسیکاتور مخصوصاً در ساعت اول رخ می‌دهد. مقادیر رطوبت نشان دهنده‌ی انحراف معیار در حدود ۲ درصد در مقایسه با نتایج سنسورهای SHT15 و SHT21S است. این امر ناشی از این حقیقت است که مکان‌های قرارگیری سنسورها در داخل دسیکاتور یکسان نبوده و منجر به تغییرات کوچکی در نتایج اندازه‌گیری‌های رطوبت می‌شود. از طرف دیگر باید توجه کنیم که انحراف معیار میانگین دوتا ۴ درصد بین نتایج رطوبت نسبی پروب سنسور و مقادیر سنسورهای SHT15 و SHT21S وجود دارد. این حقیقت ناشی از آن است که پروب سنسور به دقت و حساسیت سنسورهای دیجیتال رطوبت و دما در هنگام تغییرات شدید نیست [۱۴]. نتیجه‌ی حاصل از سری چهارم از این سلسله آزمایشات نشان دهنده قابلیت این سنسور ها (SHT15 و SHT21S) در محاسبه‌ی دقیق و با میزان حساسیت قابل قبول - واکنش سریع نسبت به تغییرات دما و رطوبت - آن‌ها در محیط‌های خشک (جاذب رطوبت) و با دمای بالا و دور از مواد خورنده است. در واقع هدف اصلی از مجموعه آزمایشات مرتبط با شکل ۱۹ ایجاد یک سیکل کامل تغییرات در دما و رطوبت در حضور سنسور مرجع و اندازه‌گیری و مشاهده‌ی پارامترهایی مثل دقت و حساسیت و رزولوشن (و دیگر ویژگی‌های مهم) سنسورهای دیجیتال دما و رطوبت SHT15 و SHT21s می‌باشد. به بیان دیگر دما را از



شکل ۹: نتایج مقادیر بدست آمده رطوبت و دما برای سنسورهای SHT15 و SHT21S: (a) رطوبت ۷۵٪، (b) در این حالت قطعات یخ جای گزین ذرات سیلیکاژل در مخزن دسیکاتور شده اند، (c) در این حالت محفظه‌ی دسیکاتور از آب پر شده است و (d) در این حالت ذرات سیلیکاژل جای گزین آب مخزن شده اند



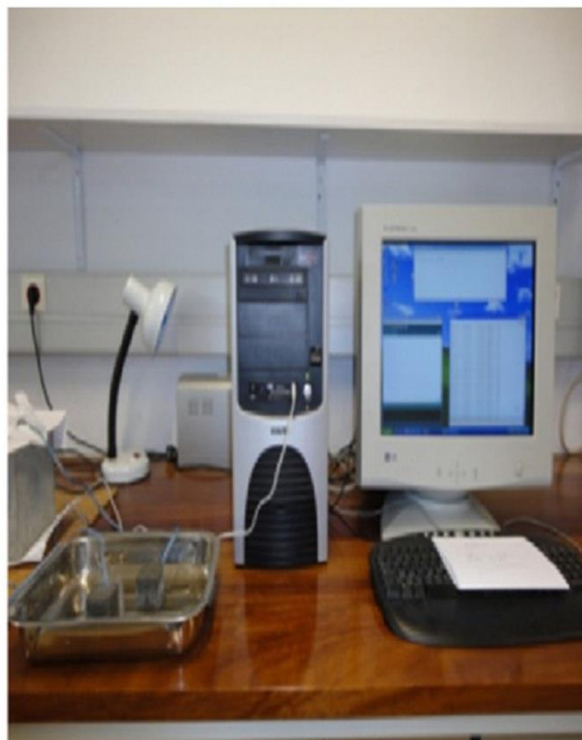
شکل ۱۰: مقایسه‌ی نتایج دمای اندازه گیری شده در داخل مکعب بتنی از طریق سنسور دمای NTC و پروب سنسور



شکل ۱۱: مقایسه‌ی نتایج دمای اندازه‌گیری شده در داخل محفظه‌ی یخچال با مقادیر دمای سنسور SHT15

قابلیت کار سنسور در داخل مکعب سیمانی و همچنین اثر خلل و فرج موجود در ساختار محفظه‌ی سیمانی بر روی نتایج رطوبت سنجی سنسور بود. نتایج بدست آمده از هر دو روش استفاده شده PIC18F4680 و برد آرنه‌و تقریباً مشابه بودند. آزمایشات در خلال ساعات طولانی برای مشاهده‌ی هر گونه تغییرات احتمالی در مقادیر دما و رطوبت صورت گرفت.

به منظور اندازه‌گیری رطوبت یک سنسور SHT15 در داخل مکعب سیمانی همان‌طور که در بخش ۳-۲ توضیح داده شد استفاده گردید. وقتی که مکعب‌ها در داخل یک سینی که عمق آب موجود در آن که در حدود ۲ تا ۳ میلیمتر بود قرار گرفتند، افزایش میزان رطوبت موجود در مکعب به صورت شکل ۱۲ مشاهده گردید. بعد از حدود یک دقیقه، رطوبت به میزان ۹۸٪ رسید. هدف آزمایش اخیر ارزیابی



شکل ۱۲: چیدمان اندازه‌گیری رطوبت و دما با استفاده از سنسور SHT15 با کمک مکعب سیمانی محافظ

محیطی بیرونی در طول تابستان انجام گرفت. در خلال ۱۲ ساعت اولیه تغییرات فزاینده با شیب ثابتی مشاهده شد در حالی که در بین ساعات دوازدهم و شانزدهم کاهش قابل ملاحظه در مقادیر دما و رطوبت مشاهده گردید. بعد از ساعت شانزدهم اندازه گیری مقادیر دما متوقف شد و تنها مقادیر رطوبت می توانستند اندازه گیری شوند. درست همانند آنچه که برای سنسور SHT15 رخ داد. ارزیابی بر پایه ی مستندات و مشاهدات شکل ۱۴ نشان می دهد که سنسور SHT21S نیز در داخل محیط به شدت قلیایی بتن توانایی ایستادگی ندارد. برای حل این مشکل باید از محفظه های شیلد با جنس منسوجات و یا پلیمرها و یا حتی شیلدهای فلزی استفاده کرد [۱۵].

#### ۴-۳-۲- نسخه ی بی سیم

همانطور که پیشتر اشاره گردید در سناریوی مانیتورینگ از راه دور نیازمند استحصال و ذخیره ی داده های جمع آوری شده توسط گره های حسگر بی سیم هستیم. جلوگیری از بد منظره شدن سازه ها با استفاده از دسترسی بی سیم به گره ها و علاوه بر آن پتانسیل قابل توجه شبکه های حسگر بی سیم در کاربردهای نظارت بر سلامت سازه به صورت بلادرنگ و کاهش مشهود هزینه ها از دیگر مزایای شبکه های حسگر بی سیم می باشند که ما را به سمت استفاده از آن ها سوق می دهند. سیستم بی سیم مبتنی بر سنسور SHT21S این اجازه را به ما می دهد تا اطلاعات مورد نیازمان را از هر سازه ی دلخواه بدست آوریم.

در مجموعه ی دیگری از آزمایشات سنسور SHT15 به همراه مکعب سیمانی به طور کامل در آب غوطه ور گردید. در این حالت دما کاهش پیدا کرده و رطوبت افزایش می یابد. بعد از حدود ۲۰ دقیقه اندازه گیری دقیق تصمیم گرفتیم طول مدت آزمایش را به یک هفته افزایش بدهیم، اما در هر صورت بعد از گذشت یک روز سنسور دمای SHT15 خراب شد. بعد از گذشت ۴ روز همین اتفاق برای سنسور رطوبت آن نیز به وقوع پیوست. اعتقاد نویسندگان بر این است که علت اصلی این اتفاق وقوع پاره ای واکنش های شیمیایی در داخل مکعب سیمانی بوده که سنسور خازنی را تحت تأثیر خود قرار داده است. تجهیزات سنسور مقاومت زیادی در برابر یون های قلیایی حاضر در سیمان علی الخصوص هیدروکسید کلسیم را- که در خلال فرایند خوردگی سیمان در آب آزاد می شود- ندارد. برای حل این مشکل به جای استفاده از محفظه ی سیمانی باید از شیلدها و محافظت هایی با جنس پلیمر یا منسوجات پارچه ای استفاده کرد.

#### ۴-۳-۱- سنسور دما و رطوبت SHT21S

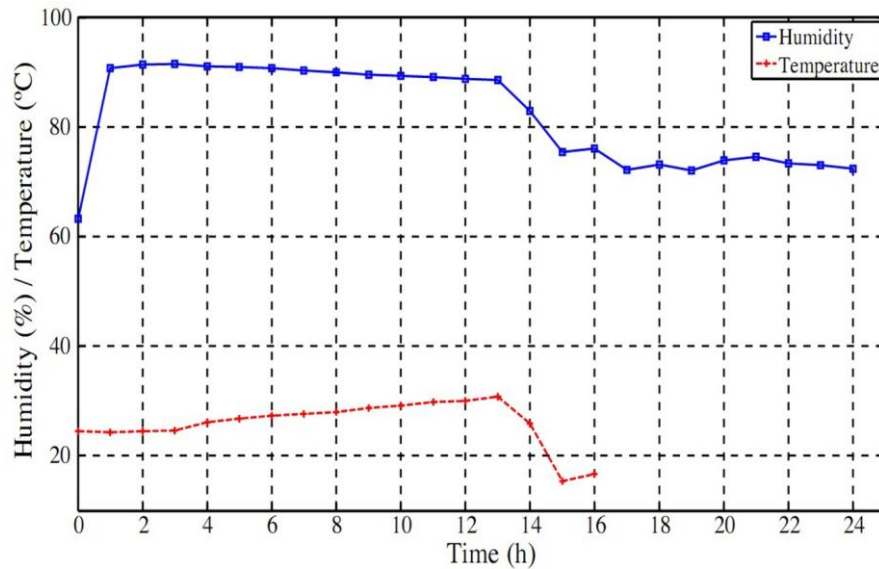
##### ۴-۳-۱- نسخه ی یکتا

سنسور SHT21S محافظت شده توسط مکعب سیمانی در داخل محفظه ی بتنی مطابق با شکل ۱۳ قرار داده شد. داده های جمع آوری شده مطابق شکل ۱۴ می باشد. اندازه گیری های انجام شده در شرایط

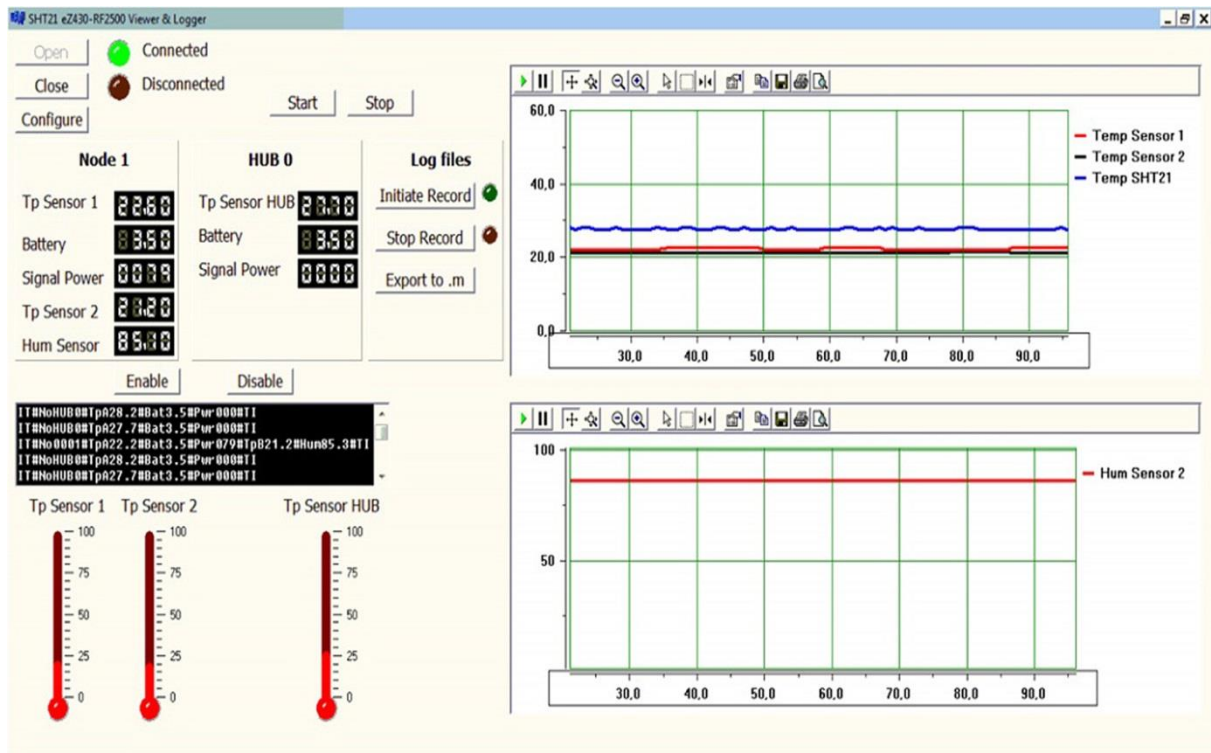


شکل ۱۳: آماده سازی برای اندازه گیری مقادیر دما و رطوبت در لحظات اولیه ی شکل گیری بتن توسط سنسور SHT21S در داخل مکعب

سیمانی محافظ



شکل ۱۴: نتایج مقادیر دما و رطوبت برای سنسور SHT21S در داخل محفظه‌ی محافظ قرار داده شده در بتن در ساعات اولیه‌ی شکل‌گیری آن در محیط آزاد در طول یک روز تابستانی



شکل ۱۵: نرم‌افزار تحویل داده‌ی سنسور دیجیتال SHT21S

شکل ۱۵ نمایشی از نرم‌افزار تحویل داده که مسئولیت جمع‌آوری داده‌های سنسور SHT21S را دارد، می‌باشد. برای آنالیز بیشتر داده‌ها و انجام پردازش‌های داده‌کاوی و الگوریتم‌های تحلیلی پیشرفته، می‌توان آن‌ها را به یک فایل MATLAB انتقال داد. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است نتایج بدست آمده برای دما و رطوبت کاملاً دقیق هستند. بنابراین استفاده از محفظه‌ی سیمانی دارای خلل و فرج به عنوان بخش عایقی محافظ بر اندازه‌گیری سنسورها تأثیر نمی‌گذارد. این روش محافظت شبیه آن نوع محافظتی است که به-تازگی به چاپ رسیده است [۱۰]. با این وجود برای نویسندگان این مقاله در خلال فاز آزمایشات تجربی ناشناخته بود. در هر صورت روش ارائه شده در این پژوهش بر خلاف روش مذکور یک محفظه‌ی عایق‌سازی مجزا برای تجهیزات تحویل داده به این جهت که خارج

SHT21S در برابر شرایط بیرونی آب و هوایی خارج از رنج عملکردی نرمال خود-برای مثال رطوبت بیش از ۸۰٪- قرار بگیرد احتمال بروز یک آفت<sup>۲</sup> در نتایج خروجی آن می‌رود، بنابراین بنا به استنتاج از داده‌های شکل ۱۶ در محیط‌های با رطوبت بالا استفاده از سنسور SHT15 توصیه می‌شود. نکته‌ی دیگر موجود در شکل ۱۶ این است که دمای اندازه‌گیری شده جز در موارد محدودی که مربوط به اختلاف در فرایند خشک شدن می‌باشد مشابه با دمای پروب سنسور بود و از نقطه نظر اندازه‌گیری دما در شرایط فوق تفاوت عمده‌ای در انتخاب دو سنسور SHT11 و SHT21S در راستای اهداف نظارت بر سلامت سازه‌های بتنی وجود ندارد. سپس سنسورهای SHT15 و SHT21S که پیش‌تر توسط مکعب سیمانی شیلد شده بودند در داخل محفظه‌ی بتن برای بررسی رفتار بتن در ساعات اولیه‌ی شکل‌گیری آن مطابق با شکل ۱۷ قرار داده شدند. داده‌های جمع‌آوری شده توسط سنسورها در شکل ۱۸ نشان داده شده است. آزمایشات به مدت ۶ روز صورت گرفته و در خلال دوازده ساعت اولیه‌ی مقداری افزایش در میزان رطوبت محفظه‌ی حاوی SHT15 مشاهده شد در حالی که رطوبت محفظه‌ی حاوی SHT21S به حداکثر خود یعنی ۱۰۰٪ رسید. علاوه بر آن در خلال پروسه‌ی شکل‌گیری بتن دمای داخلی مکعب‌ها بعد از گذشت حدوداً ۱۱ ساعت در حدود ۳۷°C بود. موارد مذکور مشابهت قابل قبولی با داده‌های نشان داده شده در شکل ۱۴ دارد. بنابراین ما به استناد داده‌ها و مشاهدات موجود در آزمایش مرتبط با شکل ۱۸ به این نتیجه -نظر به طول عمر نسبتاً قابل توجه سنسور‌ها در محیط خورنده‌ی قلیایی بتن- می‌رسیم که استفاده از محفظه‌های فیلتری برای شیلد کردن سنسورها همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده، ضمن محافظت سنسورهای دما و رطوبت در برابر محیط قلیایی بتن، مانعی برای اندازه‌گیری پارامترهای دما و رطوبت در داخل محیط بتنی با دقت مناسب ایجاد نمی‌کند و اجازه‌ی پیاده‌سازی روش‌های کارآمد برای مانیتورینگ درازمدت سازه‌های بتنی را فراهم می‌آورد که یکی از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشد و در نهایت این موضوع نیز مورد مشاهده و آزمایش عینی قرار گرفت که سنسورهای شیلد شده بعد از گذشت ۲ ماه همچنان به اندازه‌گیری‌های خود با دقت قابل قبولی ادامه می‌دهند. (رجوع به مستندات بازه‌ی زمانی ۴۰ تا ۱۴۰ ساعت در شکل ۱۸).

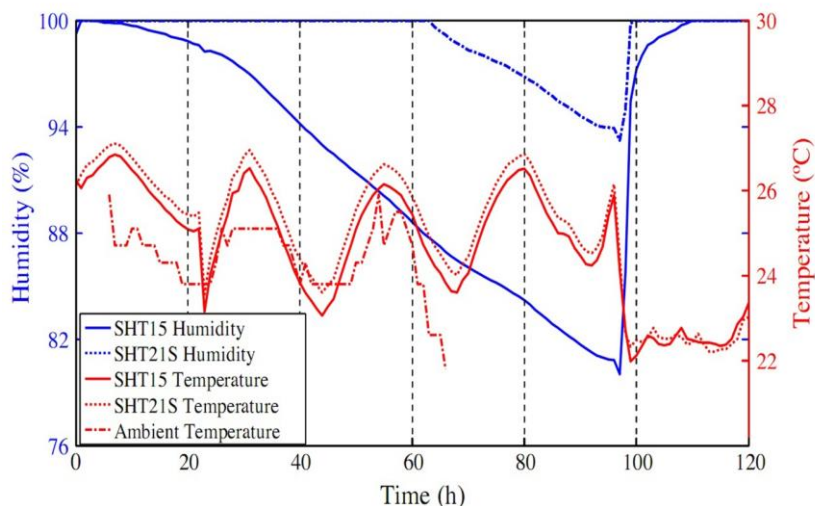
از بتن قرار دارند در نظر نمی‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است با کمک این روش ما می‌توانیم مقادیر دقیق‌تری از دما و رطوبت را بدست آوریم چرا که سنسور تا حد امکان به محیط موردنظر نزدیک است در حالی که با استفاده از جعبه‌های عایق‌سازی مقادیر دما و رطوبت اندازه‌گیری شده ممکن است با مقادیر دما و رطوبت سازه اختلاف داشته باشد [۱]. در این سری از آزمایشات مقادیر قرائت شده سنسور دما SHT21S با موفقیت در خلال ۱۶ ساعت اول اندازه‌گیری شد، در حالی که مقادیر رطوبت برای ۲۱ ساعت اول اندازه‌گیری شدند. بعد از این بازه به علت محیط قلیایی بتن، سنسورها خراب شدند.

#### ۴-۴- استفاده‌ی همزمان سنسورهای SHT15 و SHT21S شیلد شده

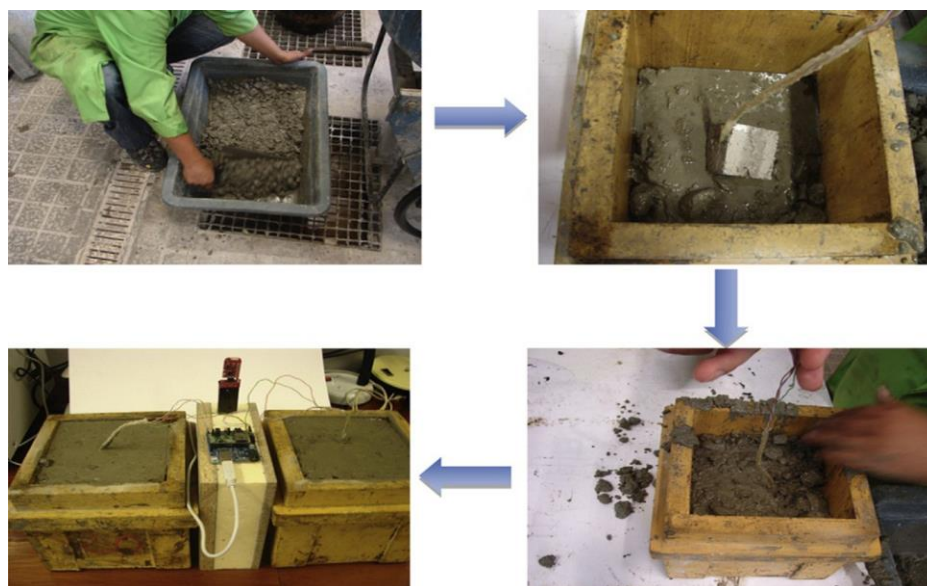
در این مجموعه از آزمایشات از سنسورهای SHT15 و SHT21S که در داخل مکعب‌های سیمانی به طول ۴cm قرار داده شده‌اند استفاده گردید. برای آزمایش میزان دقت اندازه‌گیری‌ها ابتدا مکعب‌های سیمانی در داخل سینی آب قرار داده شدند. شکل ۱۶ نشان دهنده‌ی نتایج این آزمایش است. مکعب سیمانی حاوی SHT15 بعد از ساعت دهم وارد فرایند خشک شدن<sup>۱</sup> شد در حالی که مکعب سیمانی حاوی SHT21S بعد از ساعت ۱۶ وارد پروسه‌ی خشک شدن گردید. بعد از ساعت ۱۹۷م آزمایش قرار دادن مکعب‌های سیمانی را در سینی آب به منظور مشاهده‌ی افزایش مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت تکرار کردیم (ایجاد مصنوعی سیکل افزایش و کاهش رطوبت در بتن برای اندازه‌گیری پارامترهای دقت و حساسیت و رزولوشن بخش سنسور رطوبت در سنسورهای SHT15 و SHT21S). داده‌های شکل ۱۶ متذکر این نکته هستند که در محیط‌های با رطوبت بالا سنسور مناسب- به دلیل حساسیت بالا و لختی کمتر سنسور و دیرتر به اشباع رسیدن سنسور رطوبت آن - سنسور SHT15 می‌باشد به بیان دیگر انحراف معیار بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط سنسور SHT15 و SHT21S توسط این حقیقت توضیح داده می‌شود که مکعب‌های کوچک دقیقاً شبیه هم نبوده و طبیعتاً تغییرات کوچکی در میزان رطوبت آن‌ها در پروسه‌ی خشک شدن دارد. از طرف دیگر چنانچه سنسور

<sup>2</sup> Offset

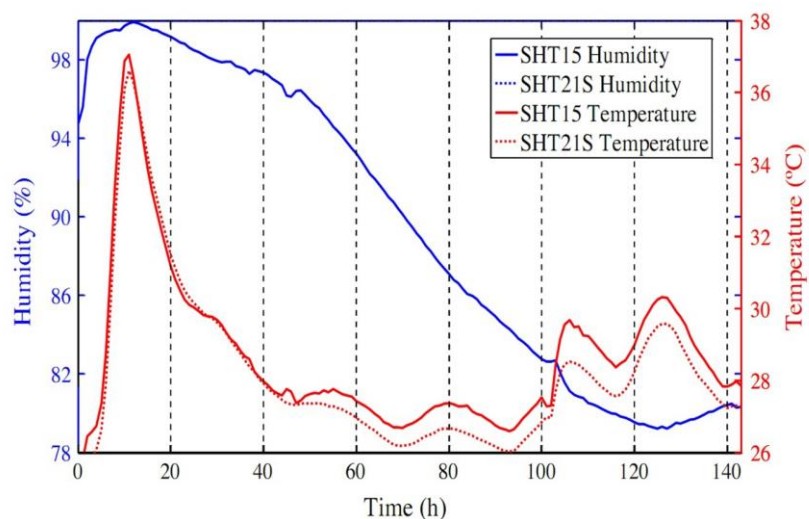
<sup>1</sup> Drying Process



شکل ۱۶: نتایج بدست آمده برای دما و رطوبت از طریق سنسور SHT15 و SHT21S در خلال ۵ روز اول از شکل گیری بتن



شکل ۱۷: آماده‌سازی و مقدمات اندازه‌گیری مقادیر دما و رطوبت در لحظات اولیه‌ی شکل‌گیری بتن با استفاده از سنسورهای SHT15 و SHT21S در داخل مکعب سیمانی



شکل ۱۸: نتایج بدست آمده از سنسورهای SHT15 و SHT21S در داخل مکعب سیمانی برای ۱۴۳ ساعت

#### ۴-۵- محدودیت‌ها و چالش‌ها و فرصت‌های پیش رو

در این پژوهش ما سیستم‌های متنوعی که از سنسورهای کوچک<sup>۱</sup> تشکیل شده‌اند و قابلیت اندازه‌گیری مقادیر دما و رطوبت را در سازه‌های بتنی دارند معرفی کردیم و در هنگام استفاده از این تجهیزات حسگر فقط بخش حسگر در داخل سازه‌ی بتنی قرار گرفته و سایر تجهیزات کنترل و تحصیل داده در خارج از سازه‌ی بتنی قرار می‌گیرد و این امکان را به وجود می‌آورد که از یک سنسور یکسان و سیستم‌های تحصیل داده مختلفی استفاده کنیم. در هر صورت سیستم پیشنهاد شده نهایی - که در خلال پروسه جامعی از آزمون و خطا و ارزیابی انواع سنسورها و تکنیک‌های محافظتی مختلف بدست آمد - توسط باتری تغذیه می‌شود. بنابراین طول عمر بازه‌ی سرویس‌دهی تجهیزات الکترونیکی یک نگرانی اصلی خواهد بود. اگر امکان تعویض باتری و یا قابلیت تامین انرژی خودکار<sup>۲</sup> در سیستم‌های مذکور تعبیه نشده باشد نگرانی و مشکل اصلی در بحث نظارت بر سلامت سازه در برآورده ساختن یک سیستم با طول عمر بالا می‌باشد. برای غلبه بر محدودیت‌های طول عمر سرویس‌دهی تجهیزات الکترونیکی سیستم‌های تامین انرژی خودکار باید مورد استفاده قرار بگیرد، مانند باتری‌های خورشیدی و سلول‌های گرمایی. در کاربردهای مانیتورینگ از راه دور که نیازمند ارسال داده بصورت بی‌سیم هستند، انجام پژوهش‌هایی در مورد اثر ساختارهای بتنی بر انتقال داده (برای مثال میدان مغناطیسی القایی میله‌های موجود در بتن پیش‌تینده) به منظور دستیابی که به یک روش جامع که قابلیت اعمال به ساختمان‌های قدیمی و هم چنین ساختمان‌های جدید را دارا باشد، ضروری می‌نماید. از نقطه نظر تجربی، ما مقادیر دما و رطوبت را بصورت نقطه‌ای اندازه گرفتیم، در حالی که طراحی یک سیستم با قابلیت اندازه‌گیری چندنقطه‌ای<sup>۳</sup> دما و رطوبت می‌تواند ادامه‌ی این پژوهش در آینده باشد.

#### ۵- جمع‌بندی

در این پژوهش یک سیستم اندازه‌گیری اتوماتیک با قابلیت مانیتور کردن بلادرنگ پارامترهای دما و رطوبت در سازه‌های بتنی مطرح و پیاده‌سازی شد. این سیستم می‌تواند هنگام کار با مقادیر زیاد بتن مثل ساختن پل‌ها - که در آن حجم بتن‌ریزی مورد استفاده زیاد است -

<sup>3</sup> Multi Points

<sup>1</sup> Tiny Sensor

<sup>2</sup> Energy Harvesting



[3] Providakis, C., and Liarakos, E.: 'T-WiEYE: An early-age concrete strength development monitoring and miniaturized wireless impedance sensing system', *Procedia Engineering*, 2011, 10, pp. 484-489.

[4] Cruz, P.J., Diaz de León, A., Nunes, J.P., and Leung, C.K.: 'Design and mechanical characterization of fibre optic plate sensor for cracking monitoring', 2006.

[5] Duffó, G.S., and Farina, S.B.: 'Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures', *Construction and Building Materials*, 2009, 23, (8), pp. 2746-2751.

[6] Martínez, I., and Andrade, C.: 'Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures', *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31, (8), pp. 545-554.

[7] McCarter, W., Chrisp, T., Starrs, G., Holmes, N., Basheer, L., Basheer, M., and Nanukuttan, S.: 'Developments in monitoring techniques for durability assessment of cover-zone concrete', 2010.

[8] Song, G., Gu, H., Mo, Y., Hsu, T., and Dhonde, H.: 'Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers', *Smart Materials and Structures*, 2007, 16, (4), pp. 959.

[9] Norris, A., Saafi, M., and Romine, P.: 'Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology /microelectromechanical systems (MEMS) sensors', *Construction and Building Materials*, 2008, 22, (2), pp. 111-120.

[10] Chang, C.-Y., and Hung, S.-S.: 'Implementing RFIC and sensor technology to measure temperature and humidity inside concrete structures', *Construction and Building Materials*, 2012, 26, (1), pp. 628-637.

[11] Jurdak, R.: 'Wireless ad hoc and sensor networks: a cross-layer design perspective' (Springer Science & Business Media, 2007).

[12] Friedrich, M., Dobie, G., Chan, C.C., Pierce, S.G., Galbraith, W., Marshall, S., and Hayward, G.: 'Miniature mobile sensor platforms for condition monitoring of structures', *Sensors Journal, IEEE*, 2009, 9, (11), pp. 1439-1448.

[13] Inaudi, D., Manetti, L., and Glisic, B.: 'Reinforced concrete corrosion wireless monitoring system', in Editor (Ed.) (Eds.): 'Book Reinforced concrete corrosion wireless monitoring system' (2009, edn.), pp. 2-7.

[14] Datasheet Hygroclip, November 2012. <<http://www.rotronic-usa.com/ds/Hygroclip.pdf>>.

[15] Datasheet Filter Cap SF2 for Humidity and Temperature Sensor SHT2x, December 2011.

ساختار این محافظ سیمانی به راحتی اجازه‌ی اندازه‌گیری دما و تبادل (عبور) رطوبت بتن دربرگیرنده‌ی بخش محافظ سیمانی را با سنسور خازنی رطوبت می‌دهد. با این وجود راه‌حل مذکور از سنسورها در مقابل محیط به شدت قلیایی بتن حفاظت نمی‌کند. بنابراین توصیه می‌شود سنسورهای مورد استفاده در مانیتورینگ سلامت سازه‌های عمرانی خصوصاً در خلال ساخت و ساز با شیلد های از جنس مواد آلی یا الیاف پوشانده شوند، همچنین توصیه می‌شود از سنسورهایی که قابلیت ایستادگی بالاتری در محیط‌های قلیایی دارند استفاده شود که تک تک تجهیزات استفاده شده در این پژوهش از این منظر به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفتند.

در مجموعه دیگری از آزمایشات از سنسورهای شیلد شده SHT15 و SHT21S که توسط یک محفظه‌ی فیلتر پوشانیده شده‌اند استفاده گردید- که ضمن جلوگیری از اثرات مخرب محیط قلیایی بتن- امکان اندازه‌گیری بلادرنگ و پیوسته‌ی پارامترهای دما و رطوبت را فراهم می‌آورد. در مورد اخیر سنسورهای SHT15 و SHT21S به خوبی از لحظه‌ی شروع آزمایش تا مدت زمانی نزدیک دو ماه قادر به اندازه‌گیری و ذخیره‌ی مقادیر دما و رطوبت با دقت قابل قبولی بودند. نتایج نشان می‌دهند که شباهت قابل قبولی برای مقادیر دما و رطوبت اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای مذکور در مقایسه با پروب سنسور وجود دارد، که تأییدی بر قابلیت سیستم مبتنی بر شبکه‌ی حسگر بی‌سیم پیشنهادی برای مانیتورینگ سلامت سازه‌های بتنی است. در نهایت شایان ذکر است که روش مبتنی بر شبکه‌ی حسگر بی‌سیم پتانسیل بالایی برای مانیتورینگ سلامت سازه‌های عمرانی دارد چرا که هزینه‌ی تمام شده را کاهش داده و از ریسک‌هایی که سایر سیستم‌های مانیتورینگ در خلال فرآیند اندازه‌گیری با آن‌ها مواجه می‌شوند (برای مثال عدم دقت در مقادیر اندازه‌گیری شده یا اثرات منفی و مخرب محیط) جلوگیری می‌کند.

## ۶- مراجع

[1] Buenfeld, N.R., Davies, R., Karimi, A., and Gilbertson, A.: 'Intelligent monitoring of concrete structures', in Editor (Ed.) (Eds.): 'Book Intelligent monitoring of concrete structures' (CIRIA London, UK, 2008, edn.).

[2] McCarter, W.J., and Vennesland, Ø.: 'Sensor systems for use in reinforced concrete structures', *Construction and Building Materials*, 2004, 18, (6), pp. 351-358.

- [16] Quinn, B., and Kelly, G.: 'Feasibility of embedded wireless sensors for monitoring of concrete curing and structural health', in Editor (Ed.)^(Eds.): 'Book Feasibility of embedded wireless sensors for monitoring of concrete curing and structural health' (International Society for Optics and Photonics, 2010, edn.), pp. 764704-764704-764712.
- [17] S.Shoorabi Sani, M.Baghaei-Nejad, M.Kalate Aarabi ,” Using a phase difference detection technique for monitoring the structural health of bridge piers”, STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING, In Press.
- [18] S.Shoorabi Sani, M.Baghaei-Nejad, M.Kalate Aarabi ,” Remote Detection of Earthquake Induced Damages on Bridge Piers Using WSN Based on Dual Receiver and Phase Difference Measurement Technique”, journal of Siesmology & Earthquake Engineering, In Press.
- [19] M.H.Shahrokh abadi , S.Shoorabi sani ,” A novel system based on dual-receiver for movement detection in structures : a bridge case study”, Int. J. Systems, Control and Communications, In Press.
- [20] S.Shoorabi Sani, M.Kalate Arabi , ” Application Of Inexpensive Sensors For SHM Of Bridges Improved By Fuzzy Inference And Data Mining Techniques”. J. of Active and Passive Electronic Devices , In Press.
- [21] S.Shoorabi Sani ,” Overcome To Some Technical Limitations And Challenges In Structural Health Monitoring Of Concrete Structures Using Wireless Sensor Networks”, J. of Active and Passive Electronic Devices , In Press.
- [22] S.Shoorabi Sani , M.Baghaei-Nejad , M.Kalate Arabi ,” A New Inexpensive System For SHM Of Bridge Decks Capable Of Issuing Alarms Regarding Bridge Maintenance Using Wireless Sensor Networks Based On Measurements OF Temperature And Humidity”, Structural Durability & Health Monitoring ,In Press.

## Health Monitoring Of Concrete Structures Using Wireless Sensor Networks

Saman Shoorabi Sani \*

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Iran

Mona Kalate Arabi

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University of Neyshabur, Science and Research Branch, Iran

Ali Akbar Khazaei

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University of Neyshabur, Science and Research Branch, Iran

### Abstract

This paper presents the development of an automatic wireless sensor monitoring system for civil engineering structures. The objective is to provide a solution to measure both temperature and humidity inside a concrete structure. The research has been focused in the early age and curing phase period. Four solutions have been addressed. The first one involves the use of a negative temperature coefficient (NTC) thermistor and an IRIS mote allowing for the creation of an IEEE 802.15.4 network. However, the results have shown that the sensor measurements present a 5 C standard deviation between the actual and the experimental values. The second one considers the use of the SHT15 (humidity/temperature) sensor, together with the PIC18F4680 microcontroller or the Arduino platform. The third solution involves the use of the SHT21S (humidity/temperature) sensor and the eZ430-RF2500 wireless development tool platform for the MSP430 microcontroller. In this case, the temperature readings were successfully performed for the first 16 h, while the humidity values were successfully obtained for the first 24 h of the experiment. Although the set of measured values is very promising for the SHT15 and SHT21S sensors, both sensors have stopped working after some time, showing that direct contact between the sensor and the concrete alkaline environment causes its breakdown. Finally, the fourth solution considers both the SHT15 and SHT21S sensors completely shielded allowing for the creation of a long-term solution. As, the SHT15 and SHT12S sensors have not been affected by the alkaline environment for more than two months of operation, enabling real-time and continuous monitoring with almost non-intrusive tiny devices, the potential of applying the proposed inexpensive wireless sensor network approach is verified.

**Keywords:** Wireless sensor networks; Structural health monitoring; Concrete; Sensor; Temperature; Humidity.

---

\* Corresponding Author: s1sani91@gmail.com