

## پایش سلامت سازه ای پنل ساندویچی با هسته مشبک از طریق کاشت کرنش سنج

**چکیده:** پایش سلامت سازه ای روشی است که در آن سلامت سازه ای به صورت زنده و برخط رصد می شود تا خرابی ها پیش از رسیدن به شکست فاجعه آمیز تشخیص داده شوند. در چندلایه های کامپوزیتی فرایند ساخت لایه به لایه این امکان را فراهم می کند تا با جاسازی حسگر کرنش در بین لایه ها، قطعات نسبت به بارهای وارده هوشمند شده و اطلاعاتی از وضعیت تنش درون سازه ای قابل مشاهده گردد. نوآوری مقاله حاضر به کارگیری سیستم پایش سلامت برای سازه های ساندویچی با هسته مشبک است به گونه ای که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد. برای این منظور در حین ساخت نمونه، کرنش سنجی در محل اتصال هسته به پوسته جاسازی شده است تا حالت شکست رایج در این نوع سازه یعنی جدا شدن پوسته از هسته مورد پایش قرار گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که هوشمند سازی پنل ساندویچی و پایش وضعیت آن با روش حاضر در حیطه الاستیک و در بارگذاری های شبه استاتیکی با دقت خوبی امکان پذیر است. خارج از حیطه الاستیک، داده های حاصل از کرنش سنج عمدتاً متأثر از شکست و آسیب در نزدیکی محل کاشت کرنش سنج است.

**واژه های راهنما:** پنل های ساندویچی، هوشمند سازی، پایش سلامت سازه ای، کاشت کرنش سنج

طیبه اکبری

پژوهشگر

الهام شهابی

قهفرخی\*

استادیار

امین میرزایی

پژوهشگر، مهندسی مکانیک،  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر،  
مجتمع دانشگاهی مواد و  
فناوری های ساخت

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

Tayebeh Akbari  
Researcher

Elham Shahabi  
Ghahfarokhi\*  
Associate Professor

Amin Mirzaei  
Researcher, Faculty of  
Materials and  
Manufacturing  
Technologies,  
Malek Ashtar  
University of  
Technology

## Structural Health Monitoring (SHM) of lattice core sandwich panel via embedding strain gauges

**Abstract:** Structural Health Monitoring (SHM) is a method in which the structural health is monitored in order to detect damages before catastrophic failure. In composite laminates, the layer-by-layer fabrication process makes it possible to embed strain sensors between the layers to make the part intelligent with respect to the incoming loads and to obtain information about the stress state inside the structure. The innovation of the present article is to use the health monitoring system for sandwich structures with lattice core in such a way that it would be economical. For this purpose, during the construction of the sample, a strain gauge is embedded between the core and the shell to monitor the common failure mode in this type of structure, i.e. the delamination of the shell from the core. The results of this research show that it is possible to make the sandwich panel smart and monitor its health using the present method in the elastic range and in quasi-static loading with good accuracy. Outside of the elastic range, the data obtained from the strain gauge is mainly affected by the damage and failure near the strain gauge.

**Keywords:** Sandwich panels, Smartening, Structural Health Monitoring (SHM), Embedded strain gauge

## ۱- مقدمه

سازه کامپوزیتی، سازه در برابر بارگذاری‌های مختلف هوشمند شده و امکان اجرای سیستم پایش سلامت بر مبنای کرنش برای آن فراهم می‌گردد. حسگرهای کرنش دو نوعند: کرنش‌سنج‌های مقاومتی و کرنش‌سنج‌های فیبر نوری [۱۳]. کرنش‌سنج‌های فیبر نوری ابزاری جدید و رو به رشد هستند که می‌توانند در تعداد دلخواهی نقطه مشخص شده در طول فیبر هم‌زمان به عنوان حسگر کرنش، دما، ارتعاش و انتشار صوت عمل کنند و به همین خاطر رقیبی جدید برای حسگرهای متعارفی نظیر حسگرهای پیزوالکتریک و کرنش‌سنج مقاومتی محسوب می‌شوند [۱۴]. [۱۵]. اما این مزایا به بهای صرف هزینه بالاتر به دست می‌آیند. به علاوه دقت کرنش‌سنج‌های فیبر نوری نسبت به کرنش‌سنج‌های مقاومتی پایین‌تر است. بنابراین استفاده از کرنش‌سنج‌های مقاومتی در پایش سلامت ساختاری با وجود رقیب جدید همچنان رواج داشته و تحقیقات در این زمینه در جریان است [۱۶].

بله‌ودگ و لاگاج [۱۷] اثر جاسازی کرنش‌سنج مقاومتی در بین لایه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی بر سختی و استحکام کششی و خمشی قطعه را مورد بررسی قرار داده‌اند. سوسا و همکاران [۱۸] همین موضوع را در مورد سازه‌های ساندویچی با پوسته از جنس شیشه/اپوکسی بررسی کرده‌اند. نتیجه هر دو تحقیق نشان می‌دهد که جاسازی کرنش‌سنج مقاومتی در بین لایه‌ها باعث افت درخور توجهی در خواص مکانیکی سازه نشده و هوشمند سازی کامپوزیت شیشه اپوکسی با این روش بلا مانع است. کفال و ایلدیز [۱۹] پایش سلامت پنل کامپوزیتی ضخیمی به شکل بال هواپیما را تحت بارهای خمشی، پیچشی و غشایی با آرایه‌ای از کرنش‌سنج‌های مقاومتی و فیبرنوری پیاده سازی کرده و با این روش تغییر شکل سه بعدی بال را مورد بررسی قرار داده‌اند. زیو و همکاران [۲۰] با استفاده از کرنش‌سنج مقاومتی، مخازن تحت فشار کامپوزیتی ساخته شده به روش رشته پیچی را تحت بارگذاری خستگی تا رسیدن به پارگی کامل پایش برخط کرده و این روش را در پیش‌بینی و پیشگیری از انفجار مخازن قابل اعتماد ارزیابی کرده‌اند.

پایش سلامت در ایران جز در کاربردهای عمرانی عمدتاً مغفول مانده است. با گذشت بیش از یک دهه از ورود پایش سلامت به حوزه مهندسی عمران در ایران، اما هنوز از این روش به نحو بایسته در نگهداری سازه‌های عمرانی استفاده نشده است. یکی از دلایل این امر هزینه مالی بالا در اجرای پروژه‌های پایش سلامت است. ناظمی و همکاران در راستای این عامل بازدارنده به توصیف چارچوبی برای تعیین ارزش مالی پایش سلامت سازه‌ای برای نگاهداشت پل‌ها پرداخته‌اند [۲۱]. عدم به کارگیری

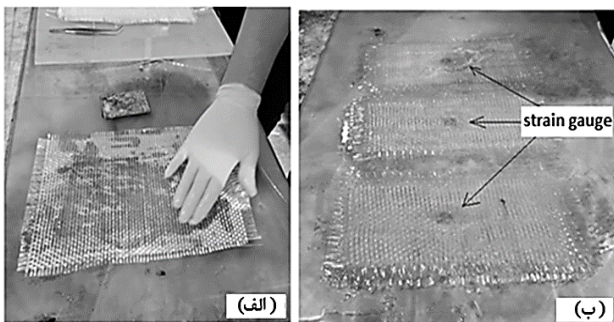
در استاندارد SAE APR6461 پایش سلامت سازه‌ای به این صورت تعریف شده است: فرایند جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها از حسگرهای نصب شده بر روی سازه برای ارزیابی سلامت سازه‌ای. در این روش تعداد زیادی حسگر به طور مداوم حجم بالایی از داده‌ها را برای پردازش به صورت زنده جمع‌آوری می‌کنند. الگوریتم‌هایی داده‌های به‌دست‌آمده را با داده‌های ذخیره‌شده از سازه سالم مقایسه کرده و پس از حذف خطاهای ناشی از شرایط محیطی به محاسبه شاخص آسیب و هشدار در مورد میزان و نوع آسیب می‌پردازند. به این ترتیب یک سیستم پایش سلامت موفق با تشخیص خرابی‌ها در مراحل اولیه، علاوه بر کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری باعث افزایش قابلیت اطمینان شده و از حوادث فاجعه‌بار و خسارات جانی و مالی مرتبط با آن پیشگیری می‌کند. [۱].

پایش سلامت ذاتاً یک حوزه تحقیقاتی میان رشته‌ای با کاربردهایی وسیع در زمینه سازه‌های هوایی، سازه‌های دریایی و سازه‌های عمرانی است. به عنوان مثال زیکا و همکاران [۲] حسگرهای پیزوکامپوزیت را در پایش سلامت سازه‌های هواپیما و دیاز و همکاران [۳] حسگرهای نوری را در همین راستا به کار گرفته‌اند. در کاربردهای دریایی لی و همکاران [۴] روش‌های پایش سلامت سازه‌ای را دسته بندی کرده و فرانگول و همکاران [۵] کاربرد پایش سلامت سازه‌ای را در تعیین طول عمر سازه مفید ارزیابی نموده‌اند. نمونه‌های پایش سلامت در کاربردهای عمرانی متعددی که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش شکرآوی و همکاران [۶] اشاره نمود که در آن پایش سلامت زیرساخت‌های عمرانی مرور شده است. کاساس و همکاران [۷] پایش سلامت را در خصوص سازه پل به کار برده‌اند و سویری و همکاران [۸] در تحقیق خود به پایش سلامت سد بتنی پرداخته‌اند.

بسته به جنس و کاربرد سازه، روش‌های پایش سلامت متعددی وجود دارد. در کامپوزیت‌های پلیمری انواع روش‌های پایش سلامت توسط حسنی و همکاران به تفصیل مرور شده است [۹]. از جمله مهم‌ترین روش‌های پایش سلامت در کامپوزیت‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر ارتعاشات، روش امواج هدایت شونده [۱۰]، روش انتشار صوت [۱۱] و روش‌های مبتنی بر کرنش اشاره کرد.

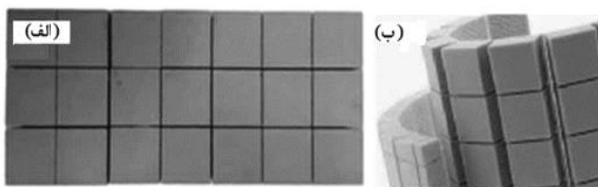
در کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل ساخت لایه به لایه در دمای محیط و یا دماهای متوسط، امکان جاسازی یا کاشت کرنش‌سنج در درون سازه (در بین لایه‌ها) به راحتی امکان‌پذیر است [۱۲]. با کاشت حسگرهای کرنش در نقاط حساس و بحرانی

جاسازی کرنش‌سنج در نزدیکی این محل می‌توان کرنش و در نتیجه بارهای وارد بر محل اتصال را به صورت زنده رصد نمود. نحوه ساخت نمونه با کرنش‌سنج کاشته شده در نزدیکی محل اتصال هسته و پوسته به این صورت بوده است که ابتدا پوسته‌های بالایی و پایینی به صورت دستی مطابق شکل (۱ الف) لایه چینی شده‌اند. پوسته‌ها از جنس شیشه/اپوکسی بوده و شامل چهار لایه پارچه بافته شده از جنس شیشه E می‌باشند. در طی فرایند لایه چینی، کرنش‌سنج‌هایی بر روی پایین‌ترین لایه و در وسط آن جاسازی شده است که در شکل (۱ ب) قابل مشاهده‌اند.



شکل ۱ الف- ساخت رویه‌های پنل ساندویچی به روش دستی ب- جاسازی کرنش‌سنج بین لایه‌ها در حین ساخت رویه‌ها

پوسته‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد پخت شده و پس از پخت کامل با رعایت دستورالعمل‌های لازم با چسب اپوکسی به هسته چسبانیده و تحت فشار خشک شده‌اند. هسته مورد استفاده، فوم پی وی سی شیاردار است که تصویر آن در شکل (۲ الف) دیده می‌شود. وجود شیار در آن باعث می‌شود تا فوم مطابق شکل (۲ ب) انحنای پذیر باشد. این نوع فوم در ساخت بدنه شناورها کاربرد داشته و ساخت بدنه شناور با انحنای ملایم با استفاده از آن امکان‌پذیر است.



شکل ۲ الف- هسته پی وی سی شیاردار به کار رفته در ساخت پنل ساندویچی، ب- امکان ایجاد انحنا در هسته شیاردار

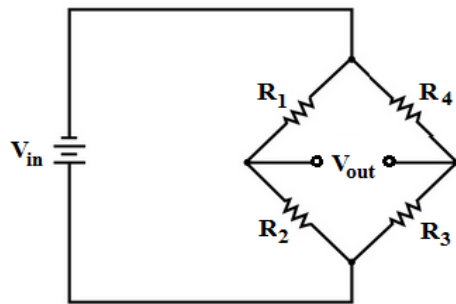
پس از چسباندن رویه‌ها به هسته، اطراف قطعه مطابق ابعاد مذکور در استاندارد ASTM C393 [۲۵] که استاندارد برای تعیین خواص خمشی پنل ساندویچی‌هاست برشکاری شده است. شکل (۳) نمونه نهایی را پس از برشکاری با ذکر ابعاد آن نشان می‌دهد.

سیستم‌های پایش سلامت در ایران در سایر حوزه‌ها مانند صنایع هوایی و دریایی نسبت به حوزه مهندسی عمران مشهودتر است و تا جایی که نویسنده می‌داند هیچ گزارشی در مراجع علمی ایران در مورد استفاده از سیستم‌های روزآمد پایش سلامت در این دو حوزه تاکنون منتشر نشده است.

پژوهش حاضر گام کوچکی در راستای ورود به این عرصه محسوب می‌شود که در آن برای به حداقل رساندن هزینه‌های مرتبط با اجرای سیستم پایش سلامت، اولاً استفاده از کرنش‌سنج‌های مقاومتری به عنوان حسگر در راستای هوشمند کردن سازه ساندویچی مد نظر قرار گرفته است، زیرا نسبت به کرنش‌سنج‌های فیبر نوری قیمت کمتری دارند. و ثانیاً ثبت داده‌های خروجی از کرنش‌سنج با استفاده از میکروکنترلر آردینو صورت گرفته است که نسبت به داده‌بردارهای متعارف برای قرائت کرنش‌سنج هزینه کمتری داشته و به توجیه اقتصادی اجرای سیستم پایش سلامت کمک می‌کند. سازه مورد استفاده از نوع پنل‌های ساندویچی بوده و محل نصب کرنش‌سنج، در نزدیکی محل اتصال هسته به پوسته‌ی پنل ساندویچی در نظر گرفته شده است که نقطه‌ای بحرانی و مستعد آسیب محسوب می‌شود. جزئیات مربوط به نحوه کاشت کرنش‌سنج در حین فرایند ساخت در محل مذکور، به کارگیری سیستم داده برداری مبتنی بر میکروکنترلر آردینو و ارزیابی صحت داده‌های خروجی در ادامه به تفصیل آمده است.

## ۲- ساخت نمونه پنل ساندویچی با حسگر درونی

پنل‌های ساندویچی به دلیل قابلیت بالایی که در تحمل بارهای خمشی دارند به وفور در ساخت سازه‌های کامپوزیتی استراتژیک در صنایع پیشرفته‌ای نظیر صنایع هوایی و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده گسترده از پنل‌های ساندویچی در صنایع پیشرفته باعث شده است تا هوشمندسازی سازه‌های ساندویچی در ایران با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار [۲۲] و روغن‌های مغناطیسی [۲۳]، [۲۴] مورد توجه قرار گیرد. در پژوهش حاضر اما هوشمندسازی سازه ساندویچی با کاشت کرنش‌سنج مقاومتری در محل اتصال پوسته به هسته مدنظر قرار گرفته است. دلیل این جانمایی آن است که در محل اتصال پوسته به هسته، تفاوت در جنس و مدول یانگ هسته و پوسته باعث ایجاد تنش‌های برشی در محل اتصال شده و می‌تواند سبب جدایش پوسته از هسته شود. این مود شکست رایج بوده و باعث از دست رفتن یکپارچگی سازه و کاهش چشمگیر کارایی سازه می‌شود اما وقوع آن از روی سطح با چشم غیر مسلح قابل مشاهده نیست. با

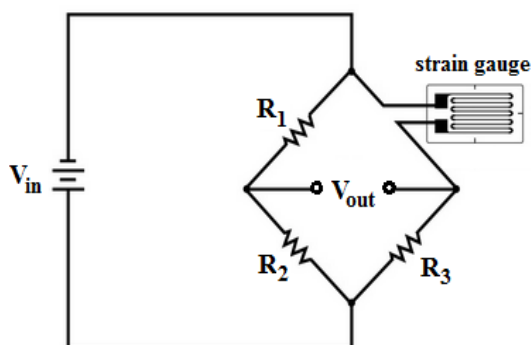


شکل ۵ ساختار پل وتسون که قرائت تغییرات بسیار کوچک مقاومت الکتریکی را امکان پذیر می سازد.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2)$$

$$= \left( \frac{R_3 R_1 - R_2 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)} \right)$$

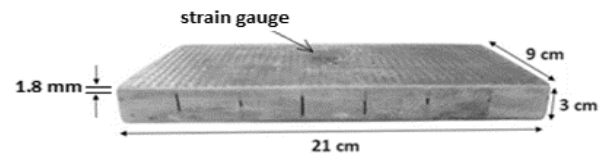
مطابق رابطه (۲) اگر  $R_3 R_1 = R_4 R_2$  باشد ولتاژ خروجی صفر بوده و پل در حالت تعادل قرار دارد. در این حالت کوچکترین تغییر در مقاومتها باعث برهم خوردن تعادل پل و ایجاد ولتاژ خروجی کوچکی می شود که با اندازه گیری دقیق آن می توان تغییرات اندک در مقاومت را با دقت بالایی محاسبه نمود. اگر یکی از چهار مقاومت الکتریکی مطابق شکل (۶) با کرنش سنج جایگزین شود اصطلاحاً گفته می شود که پل در آرایش یک چهارم به کار گرفته شده است.



شکل ۶ پل وتسون در آرایش یک چهارم که در آن تنها یکی از مقاومتها با کرنش سنج جایگزین می شود.

در این حالت ارتباط بین ولتاژ ورودی و خروجی به صورت زیر خواهد بود:

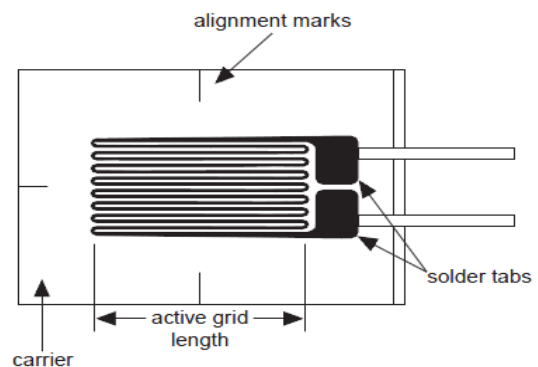
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_g} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (3)$$



شکل ۳ ابعاد نمونه ساخته شده مطابق استاندارد ASTM C393

### ۳- سخت افزار قرائت کرنش

ساختار کرنش سنج های مقاومتی مطابق شکل (۴) به صورت شبکه ای از یک فویل یا سیم فلزی است که بر روی بستری نارسانا قرار گرفته است.



شکل ۴ ساختار کرنش سنج مقاومتی که تغییر طول را به تغییر مقاومت الکتریکی تبدیل می کند.

مقاومت کرنش سنج ها در بازه ۳۰ تا ۳۰۰۰ اهم بوده و رایج ترین کرنش سنج ها دارای مقاومت های ۱۲۰، ۳۵۰ و ۱۰۰۰ اهمی هستند. اعمال کرنش در راستای طول شبکه باعث افزایش طول فویل یا سیم و در نتیجه افزایش مقاومت الکتریکی آن می شود. این رابطه خطی بوده و به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = GF \cdot \varepsilon \quad (1)$$

که در آن  $R_g$  مقاومت کرنش سنج پیش از اعمال کرنش،  $\Delta R_g$  تغییرات مقاومت در اثر اعمال کرنش و  $GF$  ضریب سنج<sup>۱</sup> کرنش سنج است که توسط سازنده آن ارائه می شود. تغییرات مقاومت الکتریکی در اثر اعمال کرنش در مقایسه با مقاومت اولیه کرنش سنج بسیار ناچیز بوده و به همین خاطر اندازه گیری دقیق آن دشوار است. برای برون رفت از این مشکل از مدار پل وتسون<sup>۲</sup> برای اندازه گیری تغییرات اندک در مقاومت کمک گرفته می شود. پل وتسون مدار الکتریکی مطابق شکل (۵) است که ولتاژ خروجی  $V_{out}$  در آن از رابطه (۲) به دست می آید.

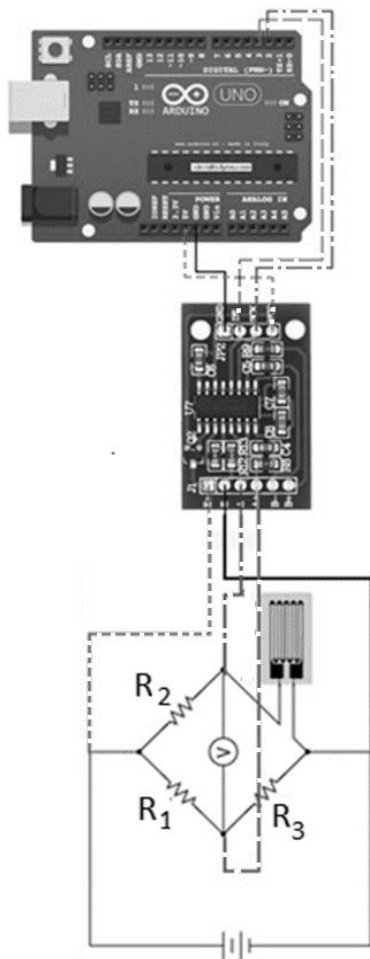
<sup>3</sup> Quarter bridge

<sup>1</sup> Gauge factor

<sup>2</sup> Wheatstone bridge

#### ۵- ارزیابی سیستم داده برداری طراحی شده

برای ارزیابی عملکرد سخت افزار و نرم افزار طراحی شده، داده‌های ثبت شده توسط آن با داده‌های ثبت شده توسط یک داده بردار آزمایشگاهی کالیبره مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور آزمون خمش چهار نقطه‌ای در نظر گرفته شده است. این آزمون به صورت یک چرخه بارگذاری و باربرداری بوده و دو مرتبه تکرار شده است. بار اول از سیستم داده برداری طراحی شده استفاده شده است و بار دوم از سیستم داده برداری آزمایشگاهی کالیبره استفاده شده است. نحوه قرارگیری نمونه در فیکسچر آزمون خمش چهار نقطه‌ای در شکل (۹ الف) و نحوه بارگذاری بر روی آن در شکل (۹ ب) نشان داده شده است.



شکل ۸ نحوه اتصال پل وتسون به ماژول HX711 و نحوه اتصال ماژول HX711 به میکروکنترلر آردوینو [۲۶]

شکل (۱۰) خروجی دو آزمایش را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. کرنش‌های قرائت شده در این آزمون از نوع فشاری است زیرا کرنش‌سنج در شکل (۹ ب) در سطح رویی (بین دو سنبه) قرار داشته و تحت فشار است.

رابطه بالا کلی بوده و در پل متعادل و پل غیرمتعادل هر دو برقرار است. برای محاسبه کرنش با داشتن ولتاژ خروجی، پارامتر  $V_r$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_r = \left[ \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right)_{strained} - \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right)_{unstrained} \right] \quad (۴)$$

جایگذاری از رابطه (۳) در رابطه (۴) نتیجه می‌دهد:

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = \frac{-4V_r}{1 + 2V_r} \quad (۵)$$

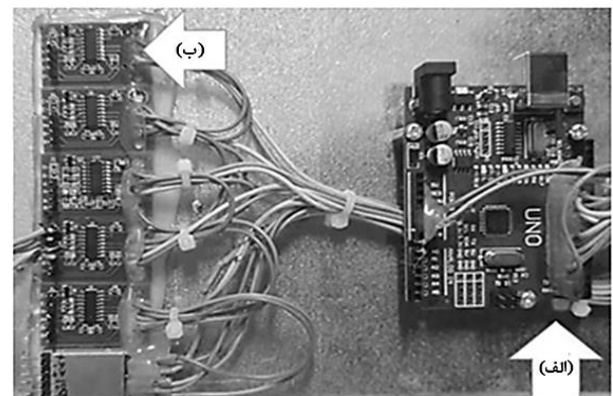
و نهایتاً از ترکیب روابط (۱) و (۵)، کرنش به صورت زیر بر حسب ولتاژهای ورودی و خروجی قابل محاسبه خواهد بود:

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \quad (۶)$$

#### ۴- سخت افزار ثبت کرنش

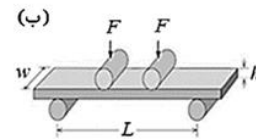
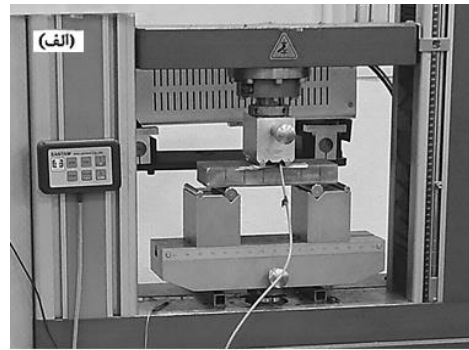
خروجی مدار پل وتسون می‌بایست توسط یک داده بردار دریافت و ذخیره شود. در پژوهش حاضر از ماژول تقویت کننده HX711 برای تبدیل داده‌های آنالوگ حاصل از پل وتسون به داده دیجیتال و از میکروکنترلر آردوینو مدل UNO برای ثبت داده‌های دیجیتال استفاده شده است. حداکثر نرخ داده برداری قابل حصول در این سیستم داده برداری ۱۰ HZ و حداکثر وضوح قابل حصول در ثبت داده‌های دیجیتال در میکروکنترلر آردوینو ۲۴ بیت است. شکل (۷ الف) ماژول آردوینو و شکل (۷ ب) پنج عدد ماژول HX711 را که برای قرائت هم زمان پنج کرنش‌سنج طراحی شده است نشان می‌دهد.

شکل (۸) نحوه اتصال پل وتسون به ماژول HX711 و اتصال ماژول HX711 به میکروکنترلر آردوینو در شکل (۷) را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

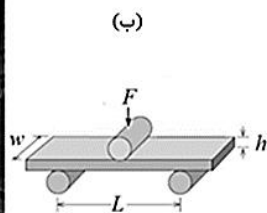
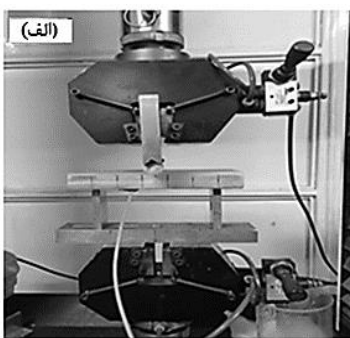


شکل ۷ سخت افزار طراحی شده برای ثبت داده، الف- میکروکنترلر آردوینو، ب- پنج عدد ماژول آنالوگ به دیجیتال HX711

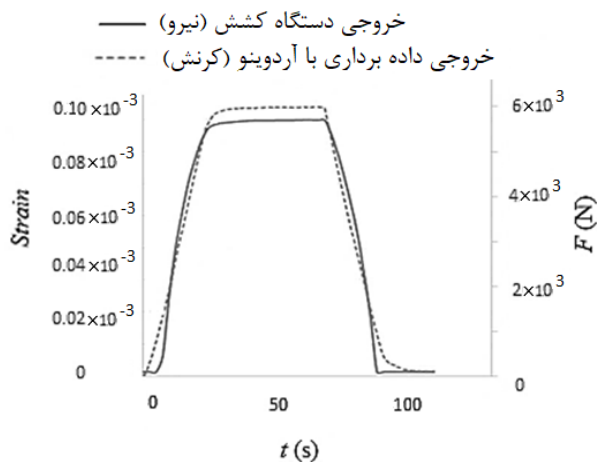
استانداردی برای تعیین خواص خمشی پنل ساندویچی هاست مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت، کرنش سنج مطابق آنچه در شکل (۱۱ الف) قابل مشاهده است در سطح زیرین نمونه و تحت کشش قرار دارد. نحوه قرارگیری نمونه در فیکسچر آزمون خمش سه نقطه‌ای در شکل (۱۱ ب) نمایش داده شده است. خروجی حاصل از سیستم داده برداری حاضر در مقایسه با بار وارده در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بارگذاری در این آزمون به این صورت است که بار وارده پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود به مدت ۵۰ ثانیه ثابت باقی مانده و پس از آن باربرداری انجام می‌شود.



شکل ۹ الف- اتصال کرنش‌سنج به سطح رویی نمونه در آزمون خمش چهار نقطه‌ای ب- نحوه بارگذاری بر روی نمونه در آزمون خمش چهار نقطه‌ای

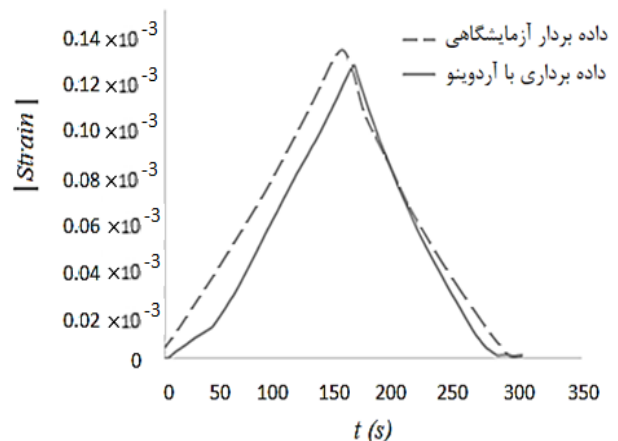


شکل ۱۱ الف- اتصال کرنش‌سنج به سطح زیرین نمونه در آزمون خمش سه نقطه‌ای ب- نحوه بارگذاری بر نمونه در آزمون خمش سه نقطه‌ای



شکل ۱۲ کرنش خروجی از داده‌بردار طراحی شده در مقایسه با بار وارده در آزمون خمش سه نقطه‌ای

همان طور که مشاهده می‌شود خروجی سیستم داده بردار به خوبی منعکس کننده بارهای وارد بر نمونه است. این به این معناست که وقتی سازه در شرایط واقعی تحت بارگذاری قرار داشته باشد با کاشت کرنش‌سنج در درون سازه می‌توان به صورت زنده برآوردی از بارهای وارد بر سازه داشته و بر مبنای آن پایش سلامت سازه را سازماندهی کرد. اجرای سیستم پایش سلامت مستلزم پردازش داده‌های ثبت شده و تبدیل آن‌ها به نمودارهایی



شکل ۱۰ مقایسه کرنش قرائت شده از طریق داده بردار طراحی شده با داده بردار آزمایشگاهی در آزمون خمش چهار نقطه‌ای

همان گونه که در شکل (۱۰) دیده می‌شود خروجی‌های داده بردار حاضر تطابق خوبی با داده بردار کالیبره شده آزمایشگاهی دارد. تفاوت اندک موجود به دلیل انجام آزمون‌های مجزا است که با توجه به عدم امکان قرائت همزمان کرنش از طریق دو سیستم داده برداری اجتناب ناپذیر بوده است.

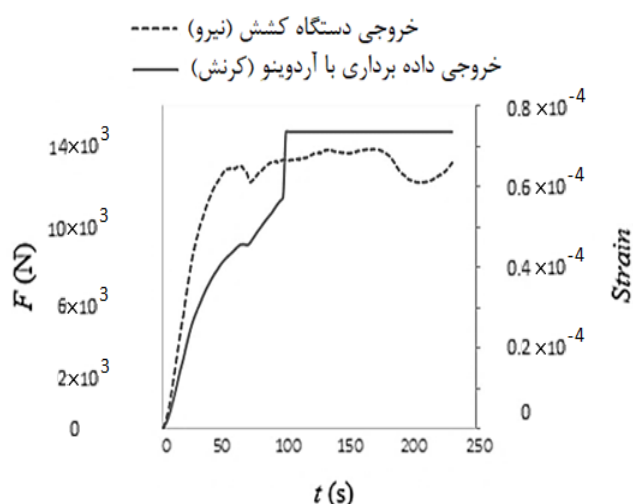
## ۶- به کارگیری سیستم داده برداری طراحی شده در کرنش‌های کششی در حیطه الاستیک

پس از تایید صحت عملکرد سیستم داده برداری، ارزیابی سیستم داده برداری در کرنش‌های کششی از طریق آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C393-2000 که

## ۸- ارزیابی سیستم داده برداری در کرنش‌های کششی تا نقطه شکست

در بررسی‌های فوق عملکرد سیستم داده برداری در محدوده الاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد سیستم داده برداری فراتر از حیطه الاستیک، آزمون خمش سه نقطه‌ای تا شکست کامل نمونه ادامه یافته و نتیجه حاصل از آن در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.

همان طور که در شکل دیده می‌شود منحنی نیرو (منحنی خط چین) پس از حدود ۵۰ ثانیه از حالت خطی خارج شده و در لحظه ۷۲ ثانیه نزولی شده و اصطلاحاً دنداندار می‌شود.



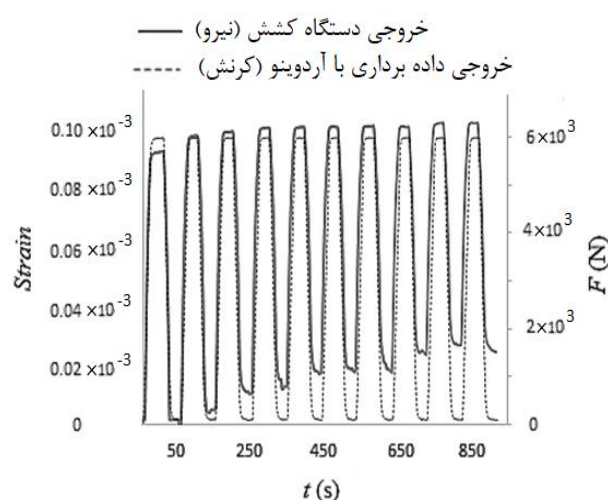
شکل ۱۴ مقایسه کرنش خروجی از داده‌بردار طراحی شده با نیروی وارده در آزمون خمش سه نقطه تا شکست کامل نمونه

خروج از حالت خطی به دلیل ایجاد ریز ترک‌ها و آغاز فرایند آسیب بوده و شیب منفی به معنای بهم پیوستن ریز ترک‌ها و ایجاد اولین ترک ماکروسکوپی در نمونه است. مقایسه منحنی کرنش قرائت شده با منحنی نیرو نشان می‌دهد دو نمودار تا پیش از ایجاد ترک ماکروسکوپی تشابه دارند. اما در اثر ترک ایجاد شده در نمونه، عملکرد کرنش‌سنج مختل شده و قادر به تعقیب و انعکاس نمودار نیرو در بخش رشد آسیب نمی‌باشد. به این ترتیب می‌توان گفت که داده‌های حاصل از سیستم پایش سلامت تا پیش از شروع آسیب از اعتبار کافی برخوردار بوده اما پس از آن با احتیاط قابل استفاده است. پس از وقوع ترک ماکروسکوپی و بسته به فاصله آن تا محل نصب کرنش‌سنج، داده‌های خروجی ممکن است به کلی نامعتبر گردد.

است که در مقایسه با نمودارهای از پیش تعیین شده برای سازه سالم تفسیر می‌شوند. تفسیر داده‌ها و چگونگی استفاده از آن‌ها در تشخیص میزان خرابی در سازه مرحله مهمی در فرایند پایش سلامت سازه‌ای است که با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از سازه بدون عیب طراحی و اجرا می‌شود.

## ۷- ارزیابی سیستم داده برداری در بارگذاری تکرار شونده

اغلب بارهای وارد بر سازه‌ها در حیطه الاستیک و به صورت تکرار شونده هستند. به همین دلیل عملکرد سیستم داده بردار طراحی شده با بارگذاری تکرار شونده در تست خمش سه نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱۳) نتایج حاصل را نشان می‌دهد که در آن فرایند بارگذاری و باربرداری بر روی نمونه پیل ساندویچی ده مرتبه تکرار شده است.



شکل ۱۳ کرنش خروجی از داده‌بردار طراحی شده در مقایسه با نیروی وارده در آزمون خمش سه نقطه‌ای در بارگذاری تکرار شونده

همان گونه که در شکل دیده می‌شود از چرخه سوم به بعد با گذشت زمان کوچکترین کرنش قرائت شده در هر چرخه غیرصفر بوده و به تدریج رو به افزایش است. محتمل‌ترین منشا برای این خطا، افزایش دمای ناشی از جریان الکتریکی در کرنش‌سنج در اثر سپری شدن زمان زیاد است که می‌بایست با روش‌های موجود برای جبران دما در اصول اندازه‌گیری کرنش مرتفع گردد. در بین انواع روش‌های موجود، ساده‌ترین راه حل به کارگیری پیل وتسون در آرایش یک دوم با جایگزین کردن دو مقاومت در مدار پیل وتسون با دو کرنش‌سنج است که به عنوان موضوعی برای ادامه این پژوهش قابل بررسی می‌باشد.

<sup>1</sup> Half bridge

## ۹- نتیجه گیری

Great Britain, *John Wiley & Sons*, pp. 11-13, DOI: <https://doi.org/10.1109/MIM.2010.5669608>, (2010).

- [2] Ksica, F., Hadas, Z., and Hlinka, J., "Integration and Test of Piezocomposite Sensors for Structure Health Monitoring in Aerospace", *Measurement*, Vol. 147, No. 106861, pp. 1-10, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106861>, (2019).
- [3] Díaz-Maroto, P.F., Fernández-López, A., García-Alonso, J., and Iglesias, M., "Buckling Detection of an Omega-stiffened Aircraft Composite Panel using Distributed Fibre Optic Sensors", *Thin-Walled Structures*, Vol. 132, pp. 375-384, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.08.024>, (2018).
- [4] Li, M., Kefal A., Cerik B., and Oterkus E., "Trends in the Analysis and Design of Marine Structures", First Edition, pp. 293-302, London, CRC Press, (2019).
- [5] Frangopol, D. M., Saydam, D., and Kim, S., "Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance of Structures and Infrastructures: A Brief Review", *Structure and infrastructure engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-25, <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.628962>, (2012).
- [6] Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Koloor, S. S. R., and Petru, M., "Health Monitoring of Civil Infrastructures by Subspace System Identification Method: An Overview", *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 10, pp. 1-29, <https://doi.org/10.3390/app10082786>, (2020).
- [7] Casas, J. R., and Cruz, P. J. S., "Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring", *Journal of bridge engineering*, vol. 8, No 6, pp. 362-373, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2003\)8:6\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(362)), (2003).
- [8] Sevieri, G., and De Falco, A., "Dynamic Structural Health Monitoring for Concrete Gravity Dams Based on the Bayesian Inference", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 8, pp. 235-250, <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00380-w>, (2020).
- [9] Hassani, S., and Mousavi, M., Gandomi, A. H., "Structural Health Monitoring in Composite Structures: A Comprehensive Review", *Sensors*, Vol. 22, No. 10, pp. 1-45, <https://doi.org/10.3390/s22010153>, (2022).
- [10] Parvari, Y., Ramezani, H., and Kazemirad, S., "Nondestructive Evaluation of Bilayer Metal-Composite Structures Using Finite Element Simulation of Guided Lamb Wave Propagation", *Journal of Science and Technology of Composites*,

در مقاله حاضر پایش سلامت پنل ساندویچی با هسته مشبک مدنظر قرار گرفته است. از آن جایی که رایج ترین حالت شکست در این نوع پنل ساندویچی جدایش پوسته از هسته است کرنش سنج در طی فرایند ساخت در محل اتصال پوسته به هسته جاسازی شده است. یکی از موانع اساسی در به کارگیری سیستم پایش سلامت هزینه بالای تهیه حسگر و سیستم داده برداری است. هدف از تحقیق حاضر اجرای سیستم پایش سلامت برای پنل ساندویچی به گونه ای است که اجرای آن صرفه اقتصادی داشته باشد. در راستای کاهش هزینه ها، کرنش سنج مورد استفاده از نوع مقاومتری انتخاب شده است زیرا نسبت به کرنش سنج های فیبرنوری قیمت کمتر اما دقت بالاتری دارد. سیستم داده برداری نیز با استفاده از میکروکنترلر آردوینو طراحی شده است که نسبت به داده بردارهای معمول آزمایشگاهی مقرون به صرفه تر است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می دهد که:

- جاسازی کرنش سنج در بین چندلایه های کامپوزیتی می تواند به عنوان روشی برای هوشمند سازی قطعات کامپوزیتی و پایش سلامت آن ها مورد استفاده قرار گیرد.
  - به کارگیری روش حاضر در پایش سلامت سازه ای در حیطه بارگذاری الاستیک و تا پیش از وقوع ترک ماکروسکوپی در نزدیکی محل کاشت کرنش سنج قابل استفاده است.
  - استفاده از سیستم داده برداری مبتنی بر میکروکنترلر آردوینو نسبت به استفاده از داده بردارهای متعارف آزمایشگاهی به مراتب کم هزینه تر بوده و برای راه اندازی سیستم پایش سلامت توجیه اقتصادی دارد. به ویژه هنگامی که تعداد حسگرهای مورد نیاز افزایش یابد مزیت اقتصادی این روش بیشتر نمایان می شود.
  - در سیستم حاضر از پل وتسون در آرایش یک چهارم استفاده شده است که به افزایش دما در اثر جریان الکتریکی حساس است. برای حفظ صحت اندازه گیری کرنش در طول زمان لازم است از روش های رایج برای جبران دما استفاده شود که از جمله آن ها استفاده از پل وتسون در آرایش یک دوم است.
- و اما در پایان پیشنهاد نویسندگان در جهت تکمیل این پژوهش ارزیابی عملکرد سیستم داده برداری حاضر در شرایط محیطی سخت، بارهای خستگی و بارهای دینامیکی است.

## ۱۰- مراجع

- [1] Balageas, D., Fritzen, C.P., and Güemes, A., "Structural Health Monitoring", Second Edition,



- [19] Kefal, A., and Yildiz, M., "Modeling of Sensor Placement Strategy for Shape Sensing and Structural Health Monitoring of a Wing-Shaped Sandwich Panel Using Inverse Finite Element Method", *Sensors*, Vol. 17, No. 12, pp. 1-20, <https://doi.org/10.3390/s17122775>, (2017).
- [20] Xiao, B., Yang, B., Xuan, F. Z., Wan, Y., Hu, C., Jin, P., Lei, H., Xiang, Y., and Yang, K., "In-Situ Monitoring of a Filament Wound Pressure Vessel by the MWCNT Sensor Under Hydraulic Fatigue Cycling and Pressurization", *Sensors*, Vol. 19, No. 6, pp. 1-20, <https://doi.org/10.3390/s19061396>, (2019).
- [21] Nazemi A H., Afshar M., Pakzad A., and Rahai A., "Introducing a Framework for Determining the Financial Value of Structural Health Monitoring on Maintenance Management of Bridges; The Case Study of the Effect of SHM on Retrofitting of a Bridge", *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 21, No. 5, pp. 161-182, URL: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-54528-en.html>, (2021). (in Persian فارسی)
- [22] Maher, R., Khalili, S. M. R., and Eslami-Farsani, R., "The Effect of Shape Memory Wire on the Ballistic Behavior of Smart Corrugated Core Sandwich Panels", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 2, pp. 1612-1627, <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.540982.1752>, (2021). (in Persian فارسی)
- [23] Fard, K. M., and Hassanabadi, M. R., "Free Vibration and Static Bending Analysis of Curved Sandwich Panel with Magneto-Rheological Fluid Layer in Sheets using Improved High Order Sandwich Panel Theory", *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 49-62, (2015). (in Persian فارسی)
- [24] Khorshidi, K., and Shabani, Y., "Free Vibration Analysis of Sandwich Plates with Magneto Rheological Smart Fluid Core by Using Modified Shear Deformation Theory", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 4, pp. 1826-1835, DOI: <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.552957.1782>, (2022). (in Persian فارسی)
- [25] Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Construction, Annual Book of ASTM Standard, C393, (2000).
- [26] <https://community.robotshop.com/forum/t/hx711-and-a-single-strain-gauge/48600>.
- Vol. 8, No. 3, pp. 1700-1707, <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.546257.1765>, (2022). (in Persian فارسی)
- [11] Riahi, M., and Ahmadi, A., "Utilization of Artificial Neural Networks for Detection and Classification of Damages in Composite Plate-like Structures via Ultrasonic Guided Waves", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, (2018). (in Persian فارسی)
- [12] Aloisi, S., Galietti, U., and Pappalettere, C., "Strain Measurement in Composite Materials using Embedded Strain Gauges", *Key Engineering Materials*, Vol. 144, pp. 251-260, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.144.251>, (1998).
- [13] Qiu, Y., Wang, Q. B., Zhao, H. T., Chen, J. A., and Wang, Y. Y., "Review on Composite Structural Health Monitoring Based on Fiber Bragg Grating Sensing Principle", *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 18, No 2, pp. 129-139, <https://doi.org/10.1007/s12204-013-1375-4>, (2013).
- [14] Kinet, D., Mégret, P., Goossen, K. W., Qiu, L., Heider, D., and Caucheteur, C., "Fiber Bragg Grating Sensors Toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions", *Sensors*, Vol. 14, No. 4, pp. 7394-7419, <https://doi.org/10.3390/s140407394>, (2014).
- [15] Lau, K. T., "Structural Health Monitoring for Smart Composites Using Embedded FBG Sensor Technology", *Materials Science and Technology*, Vol. 30, No 13, pp. 1642-1654, <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000608>, (2014).
- [16] Aygun, L. E., and Kumar, V., Weaver, C., Gerber, M., Wagner, S., Verma, N., Glisic, B., Sturm, J. C., "Large-Area Resistive Strain Sensing Sheet for Structural Health Monitoring", *Sensors*, Vol. 20, No. 5, pp. 1-15, <https://doi.org/10.3390/s20051386>, (2020).
- [17] Belhouideg, S., and Lagache, M., "Effect of Embedded Strain Gage on the Mechanical Behavior of Composite Structures", *Journal of Modern Materials*, Vol. 5, No 1, pp. 1-7, <https://doi.org/10.21467/jmm.5.1.1-7>, (2018).
- [18] Sousa, J., Marques, J., Garcia, M., Infante, V., and Amaral, P., "Mechanical Characterization of Sandwich Composites with Embedded Sensors", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 117, No. 104765, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104765>, (2020).