

کاربرد شتابسنج سه مؤلفه در برآورد صحیح زوایای شیب، جهت پایش سلامت سازه‌ای

سپیده حراج‌چی^{۱*}، امیر رجبی مقدم^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زلزله‌شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران. harajchi@ut.ac.ir
۲- مهندس الکترونیک، شرکت ابزار دقیق آر تیمان، ایران. amir.rajabi@gmail.com

چکیده

به منظور ارزیابی کاربرد شتابسنج سه مؤلفه در برآورد صحیح زاویه شیب، نرم‌افزاری در محیط LabView 2014 با قابلیت داده‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه از سه کانال مجزا، طراحی گردید. در این نرم‌افزار، از شتاب در سه راستای x ، y و z نمونه‌برداری می‌شود و بر اساس فورمولاسیون حاکم بر فرآیند، زاویه شیب در دو راستای x و y محاسبه می‌شود. نتایج محاسبات بر روی گراف زمانی و نمایشگرهای مربوطه به نمایش درمی‌آیند و مقادیر زوایای شیب در فایل با فرمت (txt) ذخیره می‌شود. از قابلیت‌های نرم‌افزار امکان تعریف مقادیر آستانه خطر توسط کاربر می‌باشد. در صورتی که مقادیر زوایای شیب در هر راستا، بزرگتر از مقادیر آستانه معرفی شده توسط مدیر پروژه باشد، دستگاه با هشدار صوت خطر و ارسال پیامک به مدیران اجرایی، هشدار می‌دهد. لازم به ذکر است مقادیر لحظه‌ای RMS نیز برای هر دو راستای x و y محاسبه و به نمایش در می‌آیند. جهت بررسی عملکرد مجموعه، از یک آرایه متشکل از دو دستگاه، استفاده شد و نتایج حاصل گردآوری گردید.

واژه‌های کلیدی: شتابسنج، زاویه شیب، شیب‌سنج، پایش سلامت سازه‌ای.

۱- مقدمه

یکی از موارد مهم در حین اجرای پروژه‌های عمرانی، کنترل و پایش فرآیندهای اجرایی و نیز تأثیر آن بر محیط پیرامون است. یکی از کاربردی‌ترین ابزار جهت نیل به این موهم، استفاده از ابزار دقیقی چون شیب‌سنج است. از شیب‌سنج، جهت نظارت بر عملکرد ساخت گودها، سدها، پل‌ها، شیب‌ها، سازه‌های نگهدارنده، پی‌ها، سازه‌های مجاور و غیره که ممکن است تحت تأثیر روش ساخت قرار گیرند، استفاده می‌شود. استفاده از شیب‌سنج از یک سو، موجب تسهیل در امر نظارت دقیق و کنترل بر پروژه می‌شود و از سوی دیگر از ایجاد خطرات جانی و مالی به صورت چشمگیری، جلوگیری می‌شود. با استفاده از این دستگاه، حرکات و تغییرات شیب لایه‌های خاک و دیواره‌ها (در اطراف پروژه‌های گودبرداری، بهسازی خاک، سدها و تونل‌ها) ثبت، تحلیل، نمایش و هشدار داده می‌شود.

در این دستگاه از یک شتابسنج سه مؤلفه دقیق، جهت برآورد صحیح زاویه شیب، استفاده شده است. نرم‌افزاری در محیط LabView 2014 با قابلیت داده‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه از سه کانال مجزا، طراحی گردیده است. در این نرم‌افزار، از شتاب در سه راستای x ، y و z نمونه‌برداری می‌شود و بر اساس فورمولاسیون حاکم بر فرآیند، زوایای شیب در دو راستای x و y محاسبه می‌شود. نتایج محاسبات بر روی گراف‌های زمانی و نمایشگرهای مربوطه به نمایش درمی‌آیند. از نتایج محاسبات جهت تحلیل‌های لحظه‌ای، تحلیل‌های آتی و اجرای دستورالعمل‌های هشدار استفاده می‌شود.

این دستگاه تولید داخل بوده و کاربرد اصلی آن در پایش سلامت گودبرداری‌ها، سازه های بتنی، بدنه سدها، پایش ایمنی ساختمان های مجاور در طول گودبرداری و حفاری، می باشد. از کاربردهای دیگر این دستگاه، پایش رانش زمین، شیب سنجی در معادن، هشدارهای ریزش در تونل و مترو، پایش سلامت اسکلت و پایه پل‌ها، سنجش و اندازه گیری نشست زمین می باشد.

۲- شتابسنج‌های با سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی

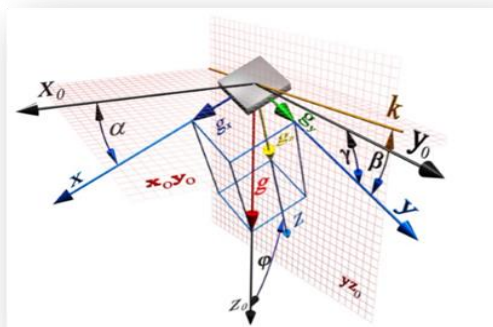
شتابسنج‌های با سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی یا Micro – Electro – Mechanical Systems و یا در اصطلاح اختصاری MEMS، در سال‌های اخیر در وسایل مختلف و با کاربردهای متنوع، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۱] برخی از دستگاه‌های مجهز به این شتابسنج‌ها عبارتند از: کیسه‌های هوا در خودروها [۲] و یا سیستم‌های کنترل کشش، در موتور سیکلت‌ها. [۳]

این نوع از شتابسنج‌ها علاوه بر مزایایی چون قیمت پایین، قابلیت اطمینان بالا، تطبیق پذیری با المان‌های الکترونیکی، مقاومت بالا در مقابل شوک‌های مکانیکی و توان مصرفی کم، دارای ابعاد مینیاتوری بوده، از اینرو حتی در گوشی‌های تلفن همراه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۴]

جهت برآورد صحیح زوایای شیب با استفاده از شتابسنج‌های MEMS، دو راهکار وجود دارد: ۱. ادغام سیگنال‌های خروجی چندین شتابسنج. ۲. ادغام سیگنال‌های خروجی تولید شده توسط یک شتابسنج سه مؤلفه. در این پژوهش با استفاده از روش دوم و ادغام سه سیگنال خروجی یک شتابسنج MEMS سه مؤلفه و بر اساس فورمولاسیون حاکم بر فرآیند، زوایای شیب در دو راستای X و Y محاسبه می‌شود.

۳- فورمولاسیون محاسبه زوایای شیب با استفاده از شتابسنج‌های با سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی

ارتباط هندسی بین مؤلفه های شتاب جاذبه g ، در سه راستای مختلف (g_x, g_y, g_z) و $(\alpha, \beta, \gamma, \varphi)$ در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱: مولفه‌های شتاب جاذبه و زوایای شیب [۱]

مجموع هندسی مؤلفه های دکارتی بر اساس شکل ۱، به صورت روابط ۱ و ۲ است. [۵]

$$g_{xz} = \sqrt{g_x^2 + g_z^2} \quad (1)$$

$$g_{yz} = \sqrt{g_y^2 + g_z^2} \quad (2)$$

الگوریتم به کار رفته در این پژوهش بر اساس استفاده از فورمولاسیون \arctan و \arccos می باشد. جهت محاسبه زاویه شیب برای هر مؤلفه، دو فرمول معرفی می شود.

$$\alpha_1 = \arctan \frac{g_x}{g_{yz}} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \arctan \frac{g_y}{g_{xz}} \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \arccos \frac{g_{yz}}{g} \quad (5)$$

$$\beta_2 = \arccos \frac{g_{xz}}{g} \quad (6)$$

در برخی موارد محاسبه زاویه کمکی β ، جهت محاسبات بعدی مناسب تر است. در حالت کلی جهت محاسبه γ ، از فورمول - های ۷ و ۸ استفاده می شود. [۶]

$$\gamma_2 = \arctan \frac{g_y}{g_z} \quad (7)$$

$$\gamma_2 = \arcsin \frac{g_y}{g \cos \alpha} = \arcsin \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \quad (8)$$

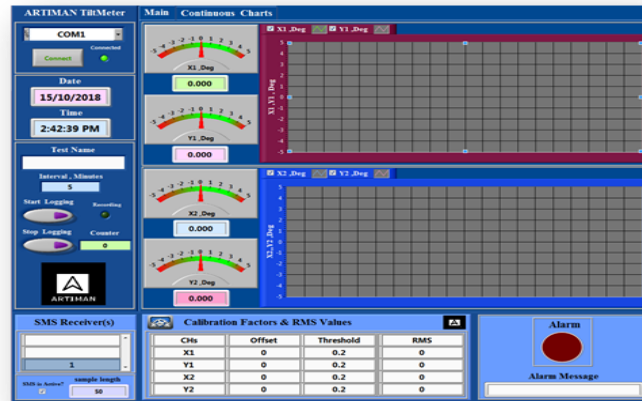
فورمولاسیون بر اساس \arctan دقت بالاتری را در برآورد زاویه شیب ایجاد می کند. [۵] اما از آنجائیکه \arctan در حدود زوایای $\pm 90^\circ$ تابع ناپیوسته ای است. [۷] در محدوده ی زوایای $(-91^\circ - 89^\circ)$ و $(91^\circ - 89^\circ)$ مقادیر خروجی دارای دقت بالایی نیست. در حالت کلی فورمولاسیون بر اساس \arccos که دارای تابع پیوسته ای است، مورد استفاده قرار می گیرد.

۴- کالیبراسیون شتابسنج های با سیستم های میکرو الکترو مکانیکی

در حالت کلی، شتابسنج های MEMS با توجه به سیگنال خروجی، به دو گروه دیجیتال و آنالوگ تقسیم می شوند. در این پژوهش از شتابسنج آنالوگ استفاده شده است. این شتابسنج در هر راستا، با توجه به شتاب جاذبه زمین که دارای محدوده ی تغییرات $(1g)$ و $(-1g)$ است، به صورت دو نقطه ای کالیبره می شود. در این حالت با داشتن ضرایب بهره a و آفست b در یک معادله ی درجه اول، که به صورت $y = ax + b$ است، خروجی نهایی هر یک از مؤلفه های شتابسنج سه مؤلفه، شتاب کالیبره است. [۸]

۵- نرم افزار طراحی شده جهت تخمین زاویه شیب

نرم افزار طراحی شده جهت تخمین زاویه شیب در محیط LabView 2014 با قابلیت داده برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه از سه کانال مجزا است. در این نرم افزار، از شتاب در سه راستای X، Y و Z نمونه برداری می شود و بر اساس فورمولاسیون حاکم بر فرآیند، زاویه شیب در دو راستای X و Y محاسبه می شود. شتابسنج به کار رفته در این مجموعه دارای قابلیت جبران سازی تغییرات طولانی مدت آفست با دما نیز می باشد، از اینرو دقت عملکرد بالایی در کارکرد طولانی مدت مجموعه وجود دارد. از قابلیت های دیگر این مجموعه امکان تعریف مقادیر آستانه خطر توسط مدیر پروژه می باشد. در صورتی که مقادیر RMS زوایای شیب در هر راستا، بزرگتر از مقادیر آستانه معرفی شده توسط مدیر پروژه باشد، دستگاه با هشدار صوت خطر، مسئولین حاضر در پروژه را مطلع می نماید و از سوی دیگر با ارسال پیامک به مدیران اجرایی، هشدار داده می شود. لازم به ذکر است مقادیر لحظه ای RMS نیز برای هر دو راستای X و Y محاسبه و به نمایش در می آیند.



شکل ۲: نرم افزار طراحی شده جهت تخمین زوایای شیب

شکل ۲ نرم افزار طراحی شده جهت اتصال دو شیبسنج را نشان می دهد. چنانچه مقادیر RMS زوایای شیب در هر راستا، بزرگتر از مقادیر آستانه تعریف شده برای راستای مذکور باشد، علاوه بر هشدار صوت خطر و ارسال پیامک، علامت هشدار قرمز رنگ، روی صفحه نیز ظاهر و پیغام خطر مربوط به راستای مرتبط نمایش داده می شود.



شکل ۳: نمونه ای از شیبسنج های به کار رفته در این پژوهش

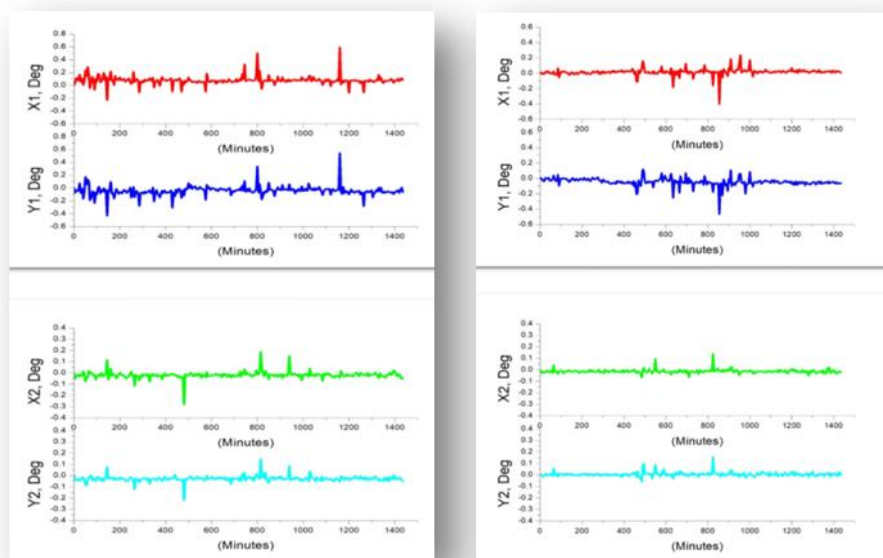
۶- تست عملی جهت بررسی عملکرد دستگاه و الگوریتم تخمین زاویه شیب

جهت بررسی عملکرد مجموعه، از یک آرایه متشکل از دو دستگاه، استفاده شد. دستگاه شماره ۱ بر روی دیواره بتن پاشی شده و دستگاه شماره ۲ بر روی دیوار برج کناری مجموعه ی در حال انجام عملیات عمرانی (طبقه چهارم)، نصب گردید.



شکل ۴: نمایی از محل های نصب دو شیبسنج به کار رفته در این پژوهش

فرآیند داده برداری به مدت دو ماه انجام گردید. نمونه فایل های داده برداری برای دو روز در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۵: نمونه فایل های مربوط به دو روز، برای دو دستگاه شیب سنج، نمودارها زاویه بر حسب دقیقه

مقادیر آستانه تعریف شده در این پژوهش 0.2° بود. در طی دو ماه داده برداری، هر بار که مقادیر RMS زوایای شیب در هر راستا، بزرگتر از مقدار آستانه 0.2° بود، هشدارهای برنامه اجرا شد.

۷- نتیجه گیری

به منظور ارزیابی کاربرد شتابسنج سه مؤلفه در برآورد صحیح زاویه شیب، نرم افزاری در محیط LabView 2014 با قابلیت داده برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه از سه کانال مجزا، طراحی گردید. در این نرم افزار با داده برداری از شتاب در سه راستای X، Y و Z و بر اساس فورمولاسیون حاکم بر فرآیند، زاویه شیب در دو راستای X و Y محاسبه می شود. نتایج محاسبات علاوه بر نمایش لحظه ای بر روی گراف های زمانی و نمایشگرهای مربوطه، در فایل با فرمت (txt) نیز ذخیره می شود.

جهت بررسی عملکرد مجموعه، از یک آرایه متشکل از دو دستگاه، استفاده شد. دستگاه شماره ۱ بر روی دیواره بتن پاشی شده و دستگاه شماره ۲ بر روی دیوار برج کناری مجموعه در حال انجام عملیات عمرانی (طبقه چهارم) نصب گردید. با تعریف مقادیر آستانه خطر 0.2° ، در صورتی که مقادیر زوایای شیب در هر راستا، بزرگتر از این مقدار آستانه می شد، دستگاه با هشدار صوت خطر و ارسال پیامک به مدیران اجرایی، هشدار می داد.

قابلیت های متمایز این مجموعه عبارتند از: جبران سازی تغییرات طولانی مدت آفست با دما، خطی سازی فرآیندی غیرخطی، قابلیت هشدار صوت خطر و ارسال پیامک، تعداد برداشت نمونه بهینه و سهولت نصب.

امید است تا با استفاده از ابزارهایی چون شیبسنج جهت نظارت هر چه بیشتر بر عملکرد ساخت گودها، سدها، پلها، شیبها، سازه های نگهبان، پیها، سازه های مجاور و غیره که ممکن است تحت تاثیر روش ساخت قرار گیرند، از یک سو، امر نظارت دقیق و کنترل بر پروژه تسهیل شود و از سوی دیگر با صرف زمان و هزینه کمتر، از ایجاد خطرات جانی و مالی به صورت چشمگیری، جلوگیری شود.

مراجع

- [۱] Luczak S, Grepl R, Bodnicki M. Selection of MEMS Accelerometers for Tilt Measurements, 2017.
- [۲] Jrad M, Younis MI, Najjar F. Modeling and Design of an Electrically Actuated Resonant Switch, 2012.
- [۳] Luczak S. Tilt Measurements in BMW Motorcycles, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2017.
- [۴] Wilson JS. Sensor Technology Handbook, Newnes, Burlington, 2005.
- [۵] Luczak S. Guidelines for Tilt Measurements Realized by MEMS Accelerometers, 2014.
- [۶] Luczak S, Oleksiuk W, Bodnicki M. Sensing Tilt With MEMS Accelerometers, IEEE Sensors J. 6, 2006.
- [۷] Jurman D, Jankovec M, Kamnik R, Topič M. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system. Sens. Actuators A: Phys. 138,411-420, 2007.
- [۸] Luczak S. Experimental Studies of Hysteresis in MEMS Accelerometers: A Commentary. IEEE Sensors J. 15, 3492-3499, 2015.