

A Machine Vision Based Approach for Sag Measurement in Power Lines**Mohammad Javad Abdollahifard, Associate Professor, Mohammad Reza Mehrdad, M.Sc.**Computer Vision and Remote Sensing Research Lab- Department of Electrical Engineering Department, Tafresh University, Tafresh, Iran
mj.abdollahi@tafreshu.ac.ir, elec97.mehrdad@tafreshu.ac.ir**Abstract**

The supply of permanent electrical energy is of vital importance in modern life and its disruption can cause heavy damage to different areas in industry, commerce, transportation, sanitation and health, education, and management of the society. To prevent the network from short-circuiting to the ground, the amount of sag (drop) of the conductors must be within a standard range. Existing methods for sag measurement often require permanent installation of equipment - such as a camera, GPS receiver, and magnetic field sensor - on the line, the poles/towers, and/or around them. The method presented in this paper performs sag measurement based on a single image recorded from the conductor and poles/towers on its both sides. In addition, the distance between the two ends of the conductor from the camera needs to be measured using a laser rangefinder. First, the position of the two ends of the conductor in three-dimensional space is obtained with the help of rangefinder data. Then, from all the parabolas that pass through these two points, the one that best matches the visual observations and field assumptions is selected, and based on that, the three-dimensional conductor model is generated and the sag is calculated. The proposed measurement method can be done without interruption of the network and dangerous approach to the line and with the help of portable and inexpensive equipment. Evaluation on laboratory and field data showed that the proposed method is not sensitive to the shooting angle, works well in complicated backgrounds, and has an average error of less than 1% of the sag value.

Keywords: power line detection, sag measurement, surveying, vision-based measurement**Received:** 5 April 2022**Revised:** 5 May 2022**Accepted:** 22 June 2022**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Javad Abdollahifard**Citation:** M.J. Abdollahifard, M.R. Mehrdad, "A machine vision based approach for sag measurement in power lines", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 55, pp. 101-116, Autumn 2023 (in Persian).

یک روش مبتنی بر بینایی ماشین برای اندازه‌گیری فلش در خطوط برق

محمدجواد عبدالهی فرد، دانشیار، محمدرضا مهرداد، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

آزمایشگاه بینایی ماشین و سنجش از دور - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران
mj.abdollahi@tafreshu.ac.ir, elec97.mehrdad@tafreshu.ac.ir

چکیده: در زندگی مدرن، تامین انرژی الکتریکی پایدار اهمیت ویژه‌ای دارد و اختلال در این امر می‌تواند خسارت‌های سنگینی را به بخش‌های مختلف صنعت، تجارت، حمل و نقل، بهداشت و سلامت، آموزش و مدیریت جامعه وارد کند. برای جلوگیری از اتصال کوتاه شدن شبکه به زمین لازم است مقدار فلش (افتادگی) هادی‌ها در محدوده استاندارد قرار داشته باشد. روش‌های موجود برای اندازه‌گیری فلش اغلب نیازمند نصب دائمی تجهیزاتی مانند دوربین، گیرنده GPS (سیستم موقعیت‌یابی جهانی) و حسگر میدان مغناطیسی روی خط و تیرها/دکل‌ها یا اطراف آن‌ها هستند. روش ارائه شده در این مقاله اندازه‌گیری فلش را بر مبنای تک تصویری که از هادی و تیرها/دکل‌های دو طرف آن ثبت می‌شود انجام می‌دهد. همچنین لازم است فاصله دو انتهای هادی از دوربین به کمک یک فاصله‌سنج لیزری اندازه‌گیری شود. ابتدا به کمک داده‌های فاصله‌سنج، موقعیت دو انتهای هادی در فضای سه-بعدی به دست می‌آید. سپس از بین تمامی سهمی‌هایی که از این دو نقطه عبور می‌کنند، سهمی‌ای که با مشاهدات تصویری و فرضیات میدانی بهترین تطابق را دارد انتخاب می‌شود و بر مبنای آن مدل سه-بعدی هادی تولید و میزان فلش محاسبه می‌شود. روش اندازه‌گیری پیشنهادی بدون قطع شبکه و نزدیک شدن مخاطره‌آمیز به خط و با کمک تجهیزات قابل حمل و ارزان قیمت قابل انجام است. ارزیابی روی ستاپ‌های آزمایشگاهی و داده‌های میدانی نشان داد که روش پیشنهادی به زاویه عکس‌برداری حساس نیست، در پس زمینه‌های شلوغ عملکرد خوبی دارد و خطای متوسط آن کمتر از یک درصد مقدار فلش است.

کلمات کلیدی: آشکارسازی خط، اندازه‌گیری فلش، اندازه‌گیری مبتنی بر بینایی، نقشه برداری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱/۱۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۴/۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدجواد عبدالهی فرد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تفرش - بلوار دانشگاه - دانشگاه تفرش - دانشکده مهندسی برق - گروه الکترونیک

۱- مقدمه

انتقال و توزیع الکتریسیته معمولاً از طریق خطوط هوایی انجام می‌شود. سامانه انتقال و توزیع برق سامانه‌ای بسیار گسترده است که اجزاء مختلفی مانند تیرها و دکل‌ها، هادی‌ها، عایق‌ها (مقره‌ها) و سایر تجهیزات را در بر می‌گیرد. این تجهیزات تحت تاثیر عوامل محیطی متعددی مانند باد، باران و برف، یخ‌زدگی، طوفان و سیل و تغییرات قابل توجه دمایی قرار دارند و باید قادر باشند این پدیده‌ها را تحمل کرده و تحت هر شرایطی به مأموریت خود ادامه دهند. از این رو و با در نظر گرفتن اهمیت و جایگاه انرژی برق در زندگی مدرن بازرسی و پایش تجهیزات شبکه انتقال و توزیع برق به منظور اطمینان حاصل کردن از سلامت و صحت عملکرد آن‌ها و پیش‌بینی و پیش‌گیری از مشکلات آتی اهمیت ویژه‌ای دارد. مشکلات شبکه‌های انتقال و توزیع برق می‌تواند شامل طیف گسترده‌ای از مسائل باشد. از جمله می‌توان به مشکلات مقره‌ها، پارگی جزئی هادی‌ها، تابیدگی دکل‌ها، سستی فنداسیون دکل‌ها و کشیدگی و افتادگی بیش از حد هادی‌ها اشاره کرد.

روش‌های سنتی بازرسی و پایش شبکه‌های برق که نوعاً شامل بازرسی توسط نیروی انسانی است مشکلات متعددی دارد که از آن جمله می‌توان به دشواری دسترسی به شبکه در مسیرهای صعب‌العبور، دشواری و مخاطره‌انگیز بودن نزدیک شدن بیش از حد به شبکه و امکان رخ دادن خطاهای انسانی در بازرسی‌های چشمی اشاره کرد. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توسعه ابزارهای نوین برای پایش و بازرسی خطوط انجام شده است. یکی از راه‌کارهایی که مورد توجه محققان است استفاده از انواع پهپادها^۱ است [۱]. پهپادهای بال-ثابت می‌توانند با سرعت زیاد در طول خط حرکت کرده و برای بازرسی کلی از خط، دکل‌ها، فاصله درختان از شبکه، بررسی اثرات سیل و زلزله روی شبکه و امثال آن مناسب هستند. پهپادهای مولتی روتور توانایی نزدیک شدن بیشتر به شبکه و تصویربرداری دقیق را فراهم می‌کنند. لذا تصاویر حاصل از تصویربرداری با این پهپادها برای شناسایی و آشکارسازی مشکلات تجهیزات شبکه مانند مقره‌ها و هادی‌ها مناسب‌تر هستند. اشکال این نوع پهپادها، مداومت پروازی کم آنها به دلیل اتکای آنها به نیروی باطری است. ربات‌های هادی-نورد^۲ ربات‌هایی هستند که به شبکه آویزان شده و در طول آن حرکت می‌کنند و امکان تصویربرداری دقیق را فراهم می‌کنند [۲]. این ربات‌ها برای استفاده در مقیاس عملیاتی نیاز به مکانیزم‌های پیچیده‌ای برای عبور از انواع موانع موجود در طول خط و روی دکل‌ها دارند که قیمت آنها را به شدت افزایش می‌دهد.

دسته دیگر ابزارها، ابزارهای پایشی هستند که روی شبکه به صورت ثابت نصب می‌شوند و می‌توانند داده‌های شبکه را از یک موقعیت مکانی ثابت برداشت و مخابره کنند. این ابزارها اگرچه به مراتب ارزان‌تر هستند ولی برای آنکه بتوانند بخش قابل توجهی از شبکه را پوشش دهند لازم است در طول شبکه به تعداد زیاد تکرار شوند که این امر هزینه تمام شده استفاده از آنها را به شدت بالا می‌برد. همچنین زیرساخت‌های مخابراتی لازم برای انتقال داده‌ها نیز از ملزومات این ابزارها است. البته مزیت مهم آنها فراهم کردن امکان پایش مداوم شبکه در طول زمان است.

یکی از مسائل مهم در شبکه‌های انتقال، مساله افتادگی هادی‌ها است. افتادگی بیش از حد هادی‌ها می‌تواند سبب نزدیک شدن بیش از حد آنها به درختان و عوارض سطح زمین شده و خطر ایجاد اتصال به زمین و قطعی شبکه را ایجاد کند. از طرف دیگر اگر میزان فلش هادی کم باشد، تنش وارده بر آن زیاد خواهد شد که این می‌تواند به پارگی هادی منجر شود [۳]. تغییرات دمایی هادی در اثر تغییرات جریان عبوری و یا تغییر دمای محیطی، می‌تواند تاثیر قابل توجهی روی مقدار افتادگی (فلش) هادی داشته باشد. برای جلوگیری از خطرهای مرتبط با این مساله، لازم است هنگام نصب هادی مقدار فلش آن به دقت اندازه‌گیری شده و با استانداردها تطبیق داده شود. همین‌طور در طول استفاده از هادی در اثر عواملی مانند تغییرات دمای محیط، تغییرات توان انتقالی و افزایش سن هادی مقدار فلش ممکن است از محدوده مناسب خارج شود. لذا اندازه‌گیری دوره‌ای یا پایش مداوم این کمیت حائز اهمیت فراوانی است. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری فلش در مقاله‌ها ارائه شده که عمده آنها به توسعه ابزارهای پایش مقدار فلش می‌پردازند.

برخی از روش‌ها، روش‌های غیر مستقیم هستند. در این روش‌ها، یک کمیت مرتبط با فلش اندازه‌گیری می‌شود و از روی آن کمیت مقدار فلش تخمین زده می‌شود. یکی از این روش‌ها، اندازه‌گیری دما یا تنش هادی و استفاده از آن برای محاسبه فلش است [۴]. اشکال این روش‌ها آن است که حسگرهای دما معمولاً تنها دما را در سطح هادی و آن هم در یک نقطه خاص از

هادی اندازه‌گیری می‌کنند و آن را به تمام طول هادی و مغز هادی هم تعمیم می‌دهند. روش دیگر اندازه‌گیری زاویه هادی نسبت به بردار گرانش^۴ در محل اتصال هادی به مقره‌ها و سپس استفاده از آن برای تخمین مقدار فلش است [۵]. در این روش دقت اندازه‌گیری زاویه باید خیلی بالا باشد و یک خطای کوچک در اندازه‌گیری زاویه خطای بزرگی در مقدار فلش تخمینی را در پی خواهد داشت. یکی دیگر از راه‌ها، بررسی اثرات میدان مغناطیسی هادی‌ها است. اولسن و ادواردز یک هادی جدا از شبکه را به موازات هادی‌های شبکه بین دو تیر آویزان کردند و دو انتهای آن را به زمین متصل کردند [۶]. سپس مقدار جریان القا شده در هادی را به کمک یک آمپر متر اندازه‌گیری کرده و بر اساس آن مقدار فلش سیم را تخمین زدند. سان و همکارانش از دو مقاومت مغناطیسی در زیر خط (روی سطح زمین) استفاده کرده و با استفاده از داده‌های آنها، مقدار جریان عبوری از خط و موقعیت خط را تخمین زدند [۷]. استفاده از حسگرهای میدان مغناطیسی به تعداد هادی‌ها در یک موقعیت بهینه و محاسبه موقعیت هادی‌ها بر مبنای داده‌های برداشت شده از این حسگرها روشی است که توسط خواجا و همکارانش پیشنهاد شد [۸]. یکی از مزایای روش‌های مبتنی بر میدان مغناطیسی آن است که نصب آنها به صورت غیر تماسی انجام می‌شود و امکان نصب بدون قطع کردن شبکه هم وجود دارد. یکی از اشکال‌های این روش‌ها آن است که ممکن است تحت تاثیر میدان حاصل از خطوط دیگری که در اطراف خط مورد نظر قرار دارند دقت تخمین کاهش یابد [۶].

دسته دیگر روش‌ها، روش‌های اندازه‌گیری مستقیم فلش هستند که از جمله آنها می‌توان به روش‌های مبتنی بر سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۵ (GPS) اشاره کرد. یک روش آن است که دو گیرنده GPS در مدل تفاضلی مورد استفاده قرار گیرد [۹]. یکی از گیرنده‌ها روی یک دکل و در نزدیک‌ترین نقطه به انتهای سیم قرار می‌گیرد و موقعیت آن به طور دقیق با استفاده از روش‌های نقشه‌برداری مشخص می‌شود. گیرنده دیگر به نقطه وسط سیم (که معمولاً بیشترین افتادگی را دارد) وصل می‌شود. لازم است این گیرنده‌ها با دقت از شبکه ایزوله شوند. یک اشکال آن است که دقت (تفکیک‌پذیری) GPS در راستای عمودی معمولاً پایین‌تر از دقت در راستای افقی است [۱۰]. حسگرهای اپتیکی که به میدان مغناطیسی حساس نیستند نیز برای اندازه‌گیری مقدار فلش مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱]. یکی دیگر از روش‌های مستقیم، استفاده از دوربین است. مثلاً یک دوربین می‌تواند روی دکل به صورت ثابت نصب و کالیبره شود و هدفی به وسط سیم و در مقابل دوربین آویزان شود. دوربین با تشخیص موقعیت جسم هدف می‌تواند مقدار فلش را اندازه‌گیری کند.

روش‌های فوق‌الذکر همگی روش‌های پایش مقدار فلش بودند. اشکال این روش‌ها دشواری نصب و کالیبره کردن آنها، نیاز به زیر ساخت‌های مخابراتی و نیاز به تعداد زیادی از آنها برای پوشش بخش وسیعی از شبکه است. به همین خاطر از این تجهیزات معمولاً تنها در نقاط حساس و بحرانی شبکه استفاده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، به منظور بازرسی عمدتاً از ربات‌های هادی-نورد یا پهپادها استفاده می‌شود. پهپادهای مجهز به لیدار^۶ توانایی این را دارند که نقشه سه‌بعدی از محیط اطراف خود را برداشت نمایند [۱۲]. لیدار حسگر گران‌قیمت است و پهپادهایی که به این حسگر مجهز باشند قیمت قابل توجه دارند. با توجه به سطح مقطع نسبتاً باریک هادی‌ها، لازم است برای مدل‌سازی سه‌بعدی آنها از لیداری با تفکیک‌پذیری بالا استفاده شود. روش‌های مبتنی بر بینایی بر روی پهپادهای ارزان قیمت‌تر هم قابل پیاده‌سازی هستند [۱۳]. آه و لی با استفاده از تصاویری که توسط یک پهپاد از نماهای مختلف گرفته شده بود توانستند مدل‌سازی سه‌بعدی هادی‌ها را انجام دهند [۱۳]. در این روش برای اندازه‌گیری فلش لازم است محل اتصال سیم‌ها به مقره‌ها به صورت دستی توسط کاربر در تصاویر مشخص شود. روش‌های مبتنی بر بینایی ماشین به کمک سیستم‌های مخابراتی نیز برای ثبت و انتقال داده‌های مربوط به فلش به کار گرفته شده‌اند [۱۴، ۱۵]. برای پایش فلش زنگین و همکارانش مدلی برای یک ربات هادی-نورد ارائه داده و آن را در مقیاس آزمایشگاهی پیاده‌سازی کرده‌اند که با استفاده از داده‌های واحد اندازه‌گیری اینرسیایی^۷ (IMU) مقدار فلش را در حین حرکت در طول هادی اندازه‌گیری می‌کند [۲]. این ربات فاقد مکانیزم‌های عبور از مانع بوده و لذا در مقیاس عملیاتی قابل استفاده نیست.

در این مقاله روشی برای اندازه‌گیری مقدار فلش بر اساس داده‌های دریافتی از یک دوربین و یک فاصله‌سنج لیزری ارائه شده است. در این روش ابتدا عکسی از صحنه به نحوی ثبت می‌شود که دو انتهای هادی (محل اتصال هادی به مقره‌ها) و نقطه کمینه آن در تصویر دیده شود. ثبت چنین تصویری از فاصله‌ای کاملاً ایمن از شبکه امکان‌پذیر است. سپس، لازم است مشابه مرجع [۱۳]، نقاط انتهایی سیم در تصویر به وسیله کاربر مشخص شود. در ادامه کاربر باید فاصله دوربین از دو انتهای هادی را

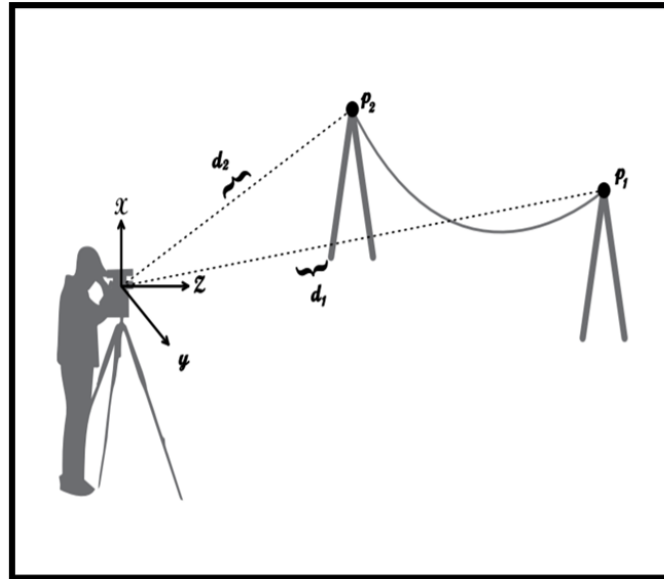
با فاصله سنج لیزری اندازه‌گیری کند. با فرض مدل روزنه‌ای برای دوربین و در نظر گرفتن چند فرض واقع‌گرایانه، موقعیت دو انتهای هادی در فضای سه‌بعدی مشخص می‌شود. روشی موثر برای آشکارسازی مکان هندسی هادی به‌صورت یک سهمی در فضای سه‌بعدی ارائه شده است که نسبت به پوشیدگی جزئی هادی و شلوغی پس‌زمینه حساس نیست. این روش بر مبنای یک معیار برازندگی^۸ از بین تمام سهمی‌هایی که از دو نقطه معلوم انتهایی هادی عبور می‌کنند، سهمی‌ای که بیشترین تطابق با مشاهدات تصویری و فرضیات میدانی دارد را مشخص می‌کند. بر اساس توضیحات فوق می‌توان نوآوری‌های مقاله حاضر را به شرح زیر مورد تأکید قرار داد:

- ۱- ارائه روشی جدید برای جمع‌آوری داده به شکلی که نیازی به نزدیک شدن به شبکه نباشد.
 - ۲- ارائه روشی برای بازسازی سه‌بعدی مکان هندسی هادی تنها با داشتن یک تصویر از صحنه.
 - ۳- ارائه روشی برای آشکارسازی هادی در تصویر علی‌رغم پوشیدگی جزئی هادی و یا شلوغ بودن پس‌زمینه
- لازم است تأکید شود که از میان روش‌های پیشین تنها روش‌های مبتنی بر پهنپاد هستند که امکان مدل‌سازی سه‌بعدی هادی بدون نصب تجهیزات روی شبکه را فراهم می‌کنند. روش‌های مبتنی بر پهنپاد یا نیازمند حسگر لیدار با تفکیک‌پذیری بالا هستند که بسیار پرهزینه خواهد بود [۱۲]، یا بر مبنای تصاویر متعدد از نماهای مختلف عمل می‌کنند [۱۳]. به‌طور کلی روش‌های مبتنی بر بینایی ماشین که برای اندازه‌گیری ابعاد استفاده می‌شوند معمولاً یا از تعدادی عکس از نماهای مختلف استفاده می‌کنند [۱۲، ۱۶]، یا اینکه فرض می‌کنند جسم در فاصله مشخصی از دوربین واقع شده است [۱۷]. اخذ تصاویر متعدد از نماهای مختلف مستلزم پروازهای رفت و برگشتی در طول شبکه است. با در نظر گرفتن ظرفیت محدود باتری، اینگونه برنامه‌های پروازی باعث ایجاد محدودیت قابل توجه در اندازه‌گیری خواهد شد (در هر پرواز بررسی بیش از یکی دو جفت دکل امکان‌پذیر نخواهد بود). استفاده از نور ساختاریافته در تشخیص فاصله در اندازه‌گیری مبتنی بر یک عکس نیز استفاده شده است [۱۸]. روش ارائه شده در این مقاله امکان تصویربرداری و اندازه‌گیری از روی زمین در فاصله ایمن را فراهم کرده و خطای متوسط آن کمتر از یک درصد مقدار فلش است.
- در بخش دوم روش پیشنهادی ارائه خواهد شد. در روش پیشنهادی فرض بر آن است که موقعیت سیم در تصویر آشکارسازی شده است. روش آشکارسازی موقعیت هادی در تصویر در بخش سوم ارائه خواهد شد. سپس در بخش چهارم روش پیشنهادی به کمک چهار آزمایش مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار خواهد گرفت. در انتها جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- روش پیشنهادی

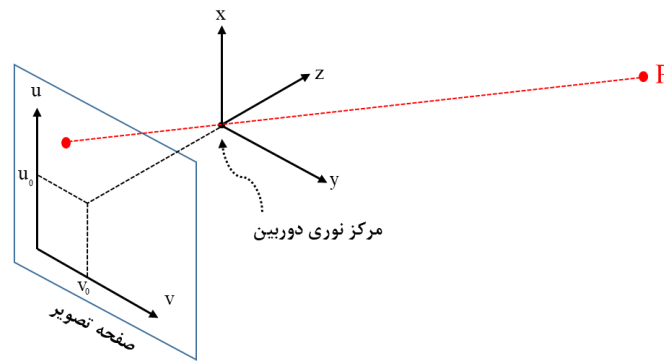
همان‌طور که اشاره شد در این مقاله هدف اندازه‌گیری میزان فلش کابل‌ها به کمک روش‌های مبتنی بر بینایی ماشین است. مطابق شکل (۱) دوربین بر روی یک سه‌پایه در مقابل کابل و دکل‌ها برای تصویربرداری آماده می‌شود. دستگاه مختصات دوربین در شکل (۱) نمایش داده شده است. فرض می‌شود با کمک تراز حیابی یا شتاب‌سنج، دوربین به نحوی مقابل کابل قرار داده شود که بردار شتاب گرانش زمین بر صفحه zy عمود باشد. گوشی‌های هوشمند امروزی معمولاً هم‌حالی دوربین‌هایی با کیفیت بالا هستند و هم حسگرهای شتاب‌سنج را در خود گنجانده‌اند و از این جهت می‌توانند بستر مناسبی برای پیاده‌سازی این روش باشند. در زمان تصویربرداری گوشی معمولاً در حالت پایداری نگه داشته می‌شود. در این حالت تنها عامل تأثیرگذار روی شتابی که توسط حسگر شتاب‌سنج ثبت می‌شود، شتاب گرانش زمین است. با چرخاندن گوشی در راستاهای رول^۹ و پیچ^{۱۰} می‌توان به حالتی دست‌یافت که بردار شتاب اندازه‌گیری شده تنها در جهت محور x مولفه داشته باشد.

برای استفاده از دوربین در کاربردهای فتوگرامتری، لازم است برای دوربین مدلی در نظر گرفته شده و در یک فاز کالیبراسیون پارامترهای مدل برای دوربین مشخص شود. در این پژوهش از مدل دوربین روزنه‌ای^{۱۱} استفاده می‌شود. در این مدل دوربین به‌صورت جعبه‌ای که یک روزنه کوچک روی دیواره‌اش وجود دارد فرض می‌شود. به این روزنه مرکز نوری^{۱۲} دوربین گفته می‌شود [شکل (۲)].



شکل (۱): نحوه تصویربرداری از صحنه. صفحه zy باید بر بردار شتاب گرانش عمود باشد و تصویر به گونه‌ای گرفته شود که هر دو تیر (یا دکل‌ها) در تصویر موجود بوده و محل اتصال سیم به آنها در تصویر دیده شود.

Figure (1): How to capture an image from the scene. The zy plane must be perpendicular to the gravitational acceleration vector and the image must be taken in such a way that both the poles/towers and their connection points to the wire(s) can be seen in the image



شکل (۲): مدل دوربین روزنه‌ای

Figure (2): Pinhole camera model

در این پژوهش کالیبراسیون با تصویربرداری از نماهای مختلف از یک الگوی شطرنجی 10×7 حاوی مربع‌های سیاه و سفید با ابعاد مشخص انجام شده و پارامترهای α ، β ، u_0 و v_0 که پارامترهای ذاتی دوربین هستند طی فرایند کالیبراسیون مشخص شده‌اند (در ادامه مفهوم این پارامترها توضیح داده خواهد شد).

نقطه $P=[x,y,z]^T$ را در فضای سه‌بعدی در نظر بگیرید که مختصات تصویر آن در صفحه تصویر به صورت $[u,v]$ نمایش داده می‌شود. مطابق شکل (۲) چنانچه فاصله صفحه تصویر با صفحه f را با f نمایش داده شود، برای هر نقطه رابطه (۱) را بین مختصات سه‌بعدی نقطه و موقعیت آن در صفحه تصویر می‌توان نوشت، که در آن v_0 و u_0 همان‌طور که در شکل نشان داده شده، مختصات محل برخورد محور نوری دوربین با صفحه تصویر را نشان می‌دهند. تراکم پیکسل‌های صفحه حسگر دوربین در راستای عمودی و افقی لزوماً یکسان نیست. α نشان دهنده تعداد پیکسل‌هایی است که در طول f در راستای عمودی کنار هم جا می‌گیرند و β معادل همین مقدار در راستای افقی را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} v = -\beta \frac{y}{z} + v_0 \\ u = -\alpha \frac{x}{z} + u_0 \end{cases} \quad (1)$$

دستگاه مختصات سه بعدی نشان داده شده در شکل (۲) را دستگاه مختصات دوربین می نامند که محور z آن هم راستا با محور نوری دوربین است. در این پژوهش دستگاه مختصات شیء با دستگاه مختصات دوربین یکسان فرض می شود و لذا محاسبه پارامترهای غیرذاتی دوربین ضروری نخواهد بود. واضح است که مقدار فلش سیم مستقل از دستگاه مختصاتی که سیم در آن توصیف می شود قابل اندازه گیری خواهد بود. اگر مختصات یک نقطه در دستگاه مختصات سه بعدی مشخص باشد، مختصات محل تصویر آن از رابطه (۱) به دست خواهد آمد. ولی اگر مختصات محل یک نقطه در تصویر را داشته باشیم، مکان هندسی آن در دنیای سه بعدی در هر جایی در راستای خط قرمز رنگ نشان داده شده در شکل (۲) می تواند باشد. یکی از نقاط روی این خط نقطه ای است که مولفه z آن مساوی ۱ باشد. برای این نقطه بر اساس رابطه (۱) مولفه های x و y به صورت رابطه (۲) به دست می آیند:

$$\begin{cases} x = \frac{(u_0 - u)}{\alpha} \\ y = \frac{(v_0 - v)}{\beta} \end{cases} \quad (2)$$

بنابراین بردار نشان داده شده در رابطه (۳) برداری است هم راستا با بردار P. لذا بردار یک هم راستا با P را می توان به صورت رابطه (۴) به دست آورد. از طرفی اگر فاصله نقطه از مرکز نوری دوربین هم مشخص و برابر d باشد، آنگاه مختصات نقطه P به صورت رابطه (۵) به دست می آید.

$$P' = \left[\frac{u_0 - u}{\alpha}, \frac{v_0 - v}{\beta}, 1 \right]^T \quad (3)$$

$$\hat{P} = \frac{P'}{|P'|} \quad (4)$$

$$p = d\hat{p} \quad (5)$$

به عبارت دیگر اگر محل یک نقطه در تصویر معلوم باشد و همچنین فاصله نقطه از مرکز نوری دوربین هم مشخص باشد، می توان محل نقطه را در فضای سه بعدی از رابطه (۵) به دست آورد.

محل اتصال سیم به مقره ها را در دو طرف کابل با P_1 و P_2 نمایش داده می شود. با استفاده از یک فاصله سنج لیزری می توان فاصله این نقاط از دوربین که به ترتیب با d_1 و d_2 نشان داده می شوند را اندازه گیری کرد. شاید تصور شود استفاده از فاصله سنج لیزری برای تمام نقاط سیم هم میسر است. واقعیت این است که سطح مقطع باریک سیم سبب می شود که اندازه گیری نقاط روی سیم از فاصله سنج به سادگی امکان پذیر نیست. ولی مقره ها سطح مقطع بیشتری دارند و لذا می توان فاصله سنجی را در مورد آنها به راحتی انجام داد. می توان فاصله سنج را بالای دوربین قرار داد. نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد آن است که موقعیت فاصله سنج با موقعیت دستگاه مختصات (که همان موقعیت مرکز نوری دوربین است) متفاوت خواهد بود. لیکن با توجه به آنکه فاصله دوربین از مقره ها در دو طرف اعداد بسیار بزرگ تری هستند، این تفاوت اندک در مقابل فاصله های مورد اندازه گیری قابل چشم پوشی است. محل دو انتهای سیم به کمک اپراتور در تصویر مشخص می شود. با داشتن فاصله و موقعیت نقاط انتهایی سیم در تصویر، موقعیت این دو نقطه در فضای سه بعدی با استفاده از رابطه (۶) به دست می آید.

$$P_i = [x_i, y_i, z_i]^T, i \in \{1, 2\} \quad (6)$$

$$z = my + z_0 \quad (7)$$

در اغلب موارد می توان فرض کرد که سیم تحت تاثیر وزن خود به گونه ای آویزان شده است که صفحه دربردارنده آن بر صفحه zy عمود است. این فرض تنها به صورت لحظه ای و در اثر بادهای شدید می تواند نقض شود و در شرایط آب و هوایی عادی تا حدود زیادی صحیح است. معادله این صفحه را می توان به صورت رابطه (۸) بیان کرد، که در آن m و z_0 پارامترهای مشخص کننده صفحه هستند. واضح است که دو نقطه انتهایی سیم باید در معادله فوق صدق کنند. بر این اساس پارامترهای این صفحه با استفاده از رابطه (۹) قابل محاسبه خواهند بود.

$$z = my + z_0 \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} m \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 & 1 \\ y_2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

سیم‌ی که تحت تاثیر وزن خود از دو انتها آویزان شده باشد، از یک معادله کسینوس هیپربولیکی تبعیت می‌کند. این معادله را می‌توان به دقت خوبی با یک سهمی تقریب زد [۳]. نظر به اینکه این سهمی در دستگاه مختصات دوربین در صفحه‌ای واقع شده که بر صفحه zy عمود است، می‌توان معادله آن را به صورت رابطه (۱۰) نوشت:

$$x = ay^2 + by + c \quad (10)$$

که در آن a ، b و c پارامترهای مدل سهمی هستند. با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۱۰)، سهمی به طور کامل در فضای سه بعدی توصیف می‌شود. داشتن مختصات دو انتهای سیم، برای به دست آوردن هر سه پارامتر سهمی کافی نیست و لازم است حداقل یک نقطه از سهمی هم در فضای سه بعدی مشخص باشد. ولی با توجه به باریک بودن سطح مقطع سیم، به دست آوردن موقعیت نقاط روی آن با روشی که برای دو انتهای سیم ارائه شد، عملی نیست. چنانچه فرض شود یکی از سه پارامتر مذکور (مثلا a) معلوم است، دو پارامتر دیگر با توجه به مختصات معلوم P_1 و P_2 مشخص خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 & 1 \\ y_2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 - ay_1^2 \\ x_2 - ay_2^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در بخش بعد توضیح داده خواهد شد که چطور می‌توان پارامتر a را با آشکارسازی سیم در تصویر تخمین زد. پس از تعیین پارامترهای توصیف کننده منحنی، مقدار فلش سیم از بیشینه اختلاف بین سهمی و خط مستقیم واصل نقاط انتهایی سیم به صورت رابطه (۱۲) به دست خواهد آمد که در آن رابطه، رابطه (۱۳) برقرار است.

$$\text{Sag} = \frac{(k_1 - b)^2}{4a} + k_0 - c \quad (12)$$

$$\begin{cases} k_0 = x_1 - k_1 y_1 \\ k_1 = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \end{cases} \quad (13)$$

۳- آشکارسازی سیم

در تصاویری که با دوربین‌های معمولی و از نمای دور گرفته می‌شوند پهنای سیم‌ها بسیار کم است و می‌تواند در حد کسری از پیکسل باشد. فرض کنید یک عکس 3000×4000 پیکسلی قرار است فاصله بین دو دکل را که ۴۰۰ متر است به تصویر بکشد. در صورتی که تصویربرداری از نمای روبرو انجام شود، گستره مکانی معادل هر پیکسل حدود 10×10 سانتی متر خواهد بود. در این شرایط، کابلی که ضخامت آن ۴ سانتی متر باشد باید در مقیاس زیر پیکسلی^{۱۳} بررسی شود زیرا کارایی روش‌هایی که در مقیاس پیکسل اجرا می‌شوند در این شرایط به شدت افت می‌کند [۱۹]. هرچند که با توجه به کنتراست بالای سیم نسبت به پس زمینه آن (که معمولا حداقل در بخشی از مسیر شامل آسمان است) سیم در چنین تصویری قابل رویت خواهد بود، ولی ممکن است اثر سیم در تصویر بسیار ضعیف بوده و آشکارسازی آن دشوار باشد.

رویکرد رایج برای آشکارسازی اشیاء در تصاویر، رویکرد فضای تصویر به فضای شیء به کمک ویژگی‌های خاص آن است [۲۰]. چنین رویکردی در مساله آشکارسازی سیم می‌تواند شامل تشخیص خطوط (یا سهمی‌ها یا منحنی‌های هموار) موجود در تصویر به عنوان کاندیداهای احتمالی موقعیت سیم، هرس کردن^{۱۴} کاندیداها و حذف گزینه‌های نامربوط و در نهایت انتخاب بهترین گزینه بر مبنای یک معیار برازندگی مناسب باشد. با در نظر گرفتن چالش‌های مرتبط با باریک و ضعیف بودن اثر سیم در تصویر، در این پژوهش یک روش مقاوم و قابل اطمینان برای آشکارسازی سیم ارائه شده که بر خلاف رویکردهای رایج مبتنی بر رویکرد فضای شیء به فضای تصویر است. در این رویکرد تمام گزینه‌هایی که با قیدهای مساله در فضای سه بعدی شیء سازگار هستند را در نظر گرفته و آنها را به فضای تصویر می‌نگاریم. سپس از بین این گزینه‌ها، گزینه‌ای که با مشاهدات در فضای تصویر تطابق بهتری دارد را به عنوان گزینه نهایی انتخاب می‌شود.

پارامتر a میزان تقعر^{۱۵} سیم را مشخص می‌کند و محدوده مقادیر آن برای سیم‌ها معمولاً در بازه صفر تا 0.2 قرار می‌گیرد. بازه مذکور را با طول گام کوچک Δa چندی‌سازی می‌شود. در این پژوهش Δa به شکلی انتخاب می‌شود که بازه به 200 قسمت تقسیم شود (Δa برابر 10^{-4}). با در نظر داشتن قید عبور سهمی از نقاط P_1 و P_2 به ازای هر مقدار a سایر پارامترهای سهمی از رابطه (۷) به دست می‌آید و سهمی در فضای سه-بعدی کاملاً مشخص می‌شود. با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۸) می‌توان معادله منحنی معادل با سهمی رابطه (۱۰) را طی یک سری محاسبات جبری ساده در فضای تصویر به صورت رابطه زیر به دست آورد:

$$u = g_a(v) = \left[\alpha \alpha z_0 \frac{v'^2}{mv' - 1} - \beta \alpha v' + \frac{c\alpha}{z_0} (mv' - 1) + u_0 \right] \quad (14)$$

$$v' = \frac{v_0 - v}{\beta} \quad (15)$$

که در آن $[w]$ مقدار گرد شده w به نزدیکترین عدد صحیح را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که منحنی ایجاد شده از سیم در فضای تصویر لزوماً یک سهمی نیست. به ازای هر مقدار مفروض a تمام ضرایب این منحنی مشخص هستند. به ازای v های صحیحی که بین v_1 و v_2 قرار می‌گیرند، مقدار u از رابطه فوق حساب شده و از کنار هم قرار دادن نقاط متناظر در فضای گسسته تصویر مکان هندسی منحنی سیم به دست می‌آید. به ازای هر مقدار مفروض a ، این مکان هندسی در رابطه (۱۶) نمایش داده می‌شود. برای هر منحنی یک معیار برازندگی محاسبه می‌شود و مقداری از a که بیشترین مقدار برازندگی را ایجاد می‌کند به عنوان مقدار نهایی a انتخاب می‌شود.

$$\Lambda_a = \{(u = g_a(v), v) \mid v \in [v_1 : v_2]\} \quad (16)$$

با در نظر گرفتن این نکته که سیم‌ها در تصویر معمولاً در وضعیت نزدیک به افقی قرار می‌گیرند، برای تقویت سیم‌ها در مقابل سایر عوارض، از پنج فیلتر جهت‌دار استفاده می‌شود. هسته این فیلترها با F_0 نمایش داده می‌شود که θ یکی از زاویه‌های $0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180$ درجه است. این فیلترها در جهت θ خاصیت هموارکنندگی شدیدی دارند و در جهت عمود بر θ بالاگذر هستند و لذا لبه‌هایی که در راستای θ هستند را از خود عبور می‌دهند. هسته فیلتر به ازای θ برابر صفر در شکل (۳) نمایش داده شده و سایر هسته‌ها هم از چرخاندن این هسته به دست می‌آیند. اگر حاصل اعمال فیلتر F_0 به تصویر ورودی $I(u, v)$ را با $G(u, v)$ نمایش داده شود، آنگاه $G(u, v)$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G(u, v) = \max_{\theta \in \Theta} |G_\theta(u, v)| \quad (17)$$

سپس از تابع رابطه (۱۸) به عنوان معیار برازندگی استفاده کرده و مقدار بهینه a از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$J(a) = \sum_{(u, v) \in \Lambda_a} G(u, v) \quad (18)$$

$$a^* = \arg \max J(a) \quad (19)$$

۴- نتایج و بحث

در این پروژه از دوربین ۲۵ مگاپیکسل گوشی هوشمند سامسونگ A30s استفاده شد. برای کالیبره کردن دوربین از برنامه کاربردی Camera Calibrator در نرم‌افزار متلب استفاده شد. ۳۱ عدد عکس از نماهای مختلف از یک صفحه شطرنجی به اندازه 10×7 گرفته شد. طول ضلع مربع‌های موجود در صفحه شطرنجی ۲۱ میلی‌متر بود.

-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱

شکل (۳): هسته فیلتر F_0

Figure (3): F_0 filter kernel

با تزریق تصاویر اخذ شده از صفحه شطرنجی به برنامه کاربردی و طی مراحل لازم مقدار پارامترهای داخلی دوربین α ، β ، u_0 و v_0 به ترتیب به این شرح به دست آمد: $2213/1$ ، $4470/9$ ، $4474/6$ و $2843/1$. در ادامه این بخش، مطابق آنچه در بخش قبل ذکر شد از پارامترهای بدست آمده در مرحله کالیبراسیون، برای محاسبه مقدار فلش سیم استفاده خواهد شد.

۴-۱- آزمایش اول

همان‌طور که اشاره شد، روش پیشنهادی به وسیله یک گوشی تلفن همراه که بر روی یک سه پایه قرار گرفته باشد قابل اجرا است. برای آن که صحت الگوریتم ارائه شده مورد ارزیابی قرار گیرد، ابتدا روش ارائه شده در یک شرایط آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، یک نخ سفید رنگ مطابق شکل (۴) به لبه یک میز آویخته شد. سطح میز در وضعیت تراز قرار دارد و فاصله بین محل اتصال دو طرف نخ (که در اصطلاح به آن اسپین^{۱۶} می‌گویند) ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در سه مرحله مختلف، نخ به نحوی آویزان شده که مقدار فلش به ترتیب $11/5$ ، $7/5$ و $19/7$ سانتی‌متر باشد. مقدار فلش واقعی با استفاده از خط‌کش فلزی که با دقت میلی‌متری مدرج شده بود اندازه‌گیری شد. چنانچه در شکل (۴-ب) نمایش داده شده است در هر مرحله، ۶ عکس از ۶ نمای مختلف از این صحنه گرفته شد. در نماهای ۱ تا ۳ فاصله دوربین از زمین حدود ۶۰ سانتی‌متر و در نماهای ۴ تا ۶ فاصله دوربین از زمین حدود ۴۵ سانتی‌متر بود. دو تصویر از نمای متمایل به مرکز، دو تصویر از نمای متمایل به راست و دو تصویر از نمای متمایل به چپ از صحنه گرفته شد. در هنگام عکس‌برداری با استفاده از حسگر شتاب‌سنج، گوشی به نحوی قرار گرفت که بردار شتاب اندازه‌گیری شده تنها در راستای محور X مولفه داشته باشد. برای اندازه‌گیری فاصله دوربین از محل اتصال نخ به میز در دو طرف، از یک نخ دیگر استفاده شد. یک طرف نخ روی لنز دوربین نگه داشته می‌شد و طرف دیگر در زیر محل اتصال قرار گرفته و پس از اطمینان از صاف بودن نخ، در زیر محل اتصال علامت‌گذاری روی نخ انجام می‌شد. سپس قطعه علامت‌گذاری شده با استفاده از متری که با دقت میلی‌متری درجه‌بندی شده بود اندازه‌گیری شد. لازم است تاکید شود که تخمین مقدار فلش با استفاده از هر تصویر مستقل از سایر تصاویر انجام شده و مقادیر به دست آمده از نماهای مختلف روی هم اثری ندارند. نتایج در جدول (۱) زیر نمایش داده شده‌اند.

۴-۲- آزمایش دوم

این فرض که دو انتهای سیم هم‌تراز هم، باشند در عمل در بسیاری از موارد فرض صحیحی نیست. به ویژه در شبکه توزیع دکل‌ها فاصله بسیار زیادی از هم دارند و عوارض زمینی (نظیر کوه‌ها، تپه و دره‌ها) باعث می‌شوند که دو انتهای سیم در سطح ترازهای متفاوتی از هم قرار بگیرند. در چنین مواردی مقدار فلش به صورت حداکثر فاصله عمودی سیم از خط مستقیمی که دو انتهای سیم را به هم وصل کند تعریف می‌شود. روش پیشنهادی فرضی مبنی بر تراز بودن خط واصل دو انتهای سیم را در نظر نمی‌گیرد و لذا انتظار می‌رود در این موارد نیز بتواند به درستی عمل کند. برای بررسی صحت عملکرد روش در چنین مواردی، پایه‌های میز در یک طرف به اندازه حدود ۲۰ سانتی‌متر بالا آورده شده و زیر آنها با چوب پر شده و ثابت شدند. در این حالت خط واصل دو انتهای نخ که در واقع همان لبه میز است به صورت مورب با شیب حدود ۲۰ درصد نسبت به سطح افق قرار می‌گیرد. فاصله لبه میز از پایین‌ترین نقطه سیم با خط‌کش اندازه‌گیری شد. مشابه آزمایش قبل، تصویربرداری از ۶ نقطه انجام شده و نتایج در جدول (۲) گزارش شدند.

۴-۳- آزمایش سوم

در این مرحله ارزیابی در شرایط واقعی انجام شد. برای این منظور ابتدا به کمک یک دستگاه توتال استیشن^{۱۷} مدل Leica TC805 نقشه‌برداری از سیم با دقت بالا انجام گرفت. لازم است تاکید شود که نقشه‌برداری لیزری با دستگاه توتال استیشن هرچند بسیار دقیق است ولی بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. دشواری اصلی در مواردی است که مجبور می‌شویم دستگاه را جابجا کرده و نسبت به موقعیت قبلی توجیه کنیم. با توجه به سطح مقطع باریک سیم، فاصله‌سنجی لیزری از سیم به دشواری قابل انجام خواهد بود. تصویری از تیرها و هادی مورد بررسی در شکل (۵) نشان داده شده است. نقشه‌برداری دقیق مقدار فلش

مشخص شده را در این محل معادل $3/193$ متر نشان می‌دهد. در روش ارائه شده لازم است فاصله دو انتهای سیم از لنز دوربین مشخص شود. برای این منظور یک فاصله‌سنج لیزری که نمایی از آن در شکل (۶-الف) نمایش داده شده مورد استفاده قرار گرفت. در دو انتهای سیم مقوله‌ها حضور دارند که سطح مقطع بزرگتری نسبت به سیم دارند و فاصله‌سنجی از آن‌ها به مراتب ساده‌تر است [شکل (۶-ب)]. این فاصله‌سنج برای فاصله‌های بین صفر تا 600 متر قابل استفاده است و دقت اندازه‌گیری آن در فاصله 400 متری ± 50 سانتی‌متر است. ابتدا گوشی هوشمند روی پایه تثبیت و تراز می‌شود و تصویربرداری از صحنه مورد نظر با آن انجام می‌گیرد. سپس فاصله‌سنج در حالی که به گوشی تکیه دارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. تلاش می‌شود در طول فاصله‌سنجی، فاصله بین لیزر و لنز دوربین تا جای ممکن کوچک باشد. هرچند این فاصله را می‌توان اندازه‌گیری کرده و در محاسبات لحاظ کرد، ولی با توجه به آنکه فاصله تا هدف معمولاً چندصد برابر بزرگتر از این فاصله است، می‌توان به‌سادگی از آن چشم‌پوشی کرد. در این شرایط از پنج نمای مختلف از صحنه عکس‌برداری و فاصله‌سنجی انجام شد و به ازای هر تصویر به‌طور جداگانه مقدار فلش اندازه‌گیری گردید. نتایج به‌دست آمده در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که اعداد ارائه شده در جدول نشان می‌دهند خطای محاسبه فلش در این روش کمتر از یک درصد بوده است.

جدول (۱): نتایج آزمایش اول

Table (1): Results of the first experiment

مرحله	مقدار فلش واقعی (سانتی‌متر)	نما	فاصله از انتهای راست (سانتی‌متر)	فاصله از انتهای چپ (سانتی‌متر)	مقدار فلش اندازه‌گیری شده (سانتی‌متر)	خطا (سانتی-متر)	خطا بر حسب درصدی از فلش	درصد میانگین خطا
اول	۱۱/۵	۱	۱۰۷/۲	۱۰۲/۴	۱۱/۵۰۲۸	۰/۰۰۲۸	۰/۰۲	۰/۴۹۵
		۲	۹۳/۵	۱۰۷/۴	۱۱/۶۲۲۲	۰/۱۲۲۲	۱/۲	
		۳	۱۱۳/۳	۸۱/۴	۱۱/۵۷۷۸	۰/۰۷۷۸	۰/۷	
		۴	۱۰۹/۶	۱۰۴/۹	۱۱/۵۹۲۵	۰/۰۹۲۵	۰/۸	
		۵	۹۵/۲	۱۰۷/۸	۱۱/۴۷۳۲	۰/۰۲۶۸	۰/۲	
		۶	۱۱۷/۳	۸۳/۸	۱۱/۵۰۶۰	۰/۰۰۶	۰/۰۵	
دوم	۷/۵	۱	۱۲۳/۳	۱۲۵/۱	۷/۳۸۴۸	۰/۱۱۵۲	۱/۵	۰/۸
		۲	۱۱۳/۳	۱۵۴/۲	۷/۴۶۴۳	۰/۰۳۵۷	۰/۵	
		۳	۱۴۶/۵	۱۱۴/۲	۷/۴۵۰۵	۰/۰۴۹۵	۰/۷	
		۴	۱۲۷/۷	۱۱۵/۰	۷/۵۲۹۵	۰/۰۲۹۵	۰/۴	
		۵	۱۱۴/۰	۱۵۲/۹	۷/۵۷۹۸	۰/۰۷۹۸	۱/۱	
		۶	۱۵۷/۴	۱۱۶/۰	۷/۵۴۷۹	۰/۰۴۷۹	۰/۶	
سوم	۱۹/۷	۱	۱۲۷/۰	۱۱۸/۲	۱۹/۶۸۵۵	۰/۰۱۴۵	۰/۰۷	۰/۳۴۷
		۲	۱۱۱/۲	۱۴۴/۰	۱۹/۵۹۵۸	۰/۱۰۴۲	۰/۵	
		۳	۱۴۶/۵	۱۱۴/۲	۱۹/۵۵۲۴	۰/۱۴۷۶	۰/۷	
		۴	۱۳۰/۰	۱۱۴/۷	۱۹/۷۰۲۹	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱	
		۵	۱۱۲/۱	۱۴۵/۰	۱۹/۶۴۲۴	۰/۰۵۷۶	۰/۳	
		۶	۱۶۰/۱	۱۲۰/۹	۱۹/۶۰۴۹	۰/۰۹۵۱	۰/۵	

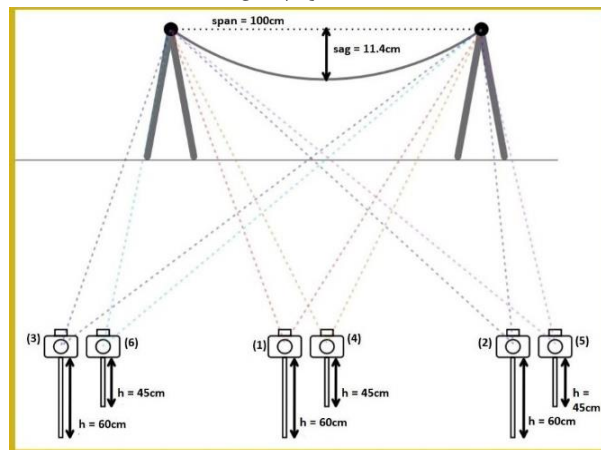
جدول (۲): نتایج آزمایش دوم

Table (2): Results of the second experiment

مرحله	مقدار فلش واقعی (سانتی‌متر)	نما	فاصله از انتهای راست (سانتی‌متر)	فاصله از انتهای چپ (سانتی‌متر)	مقدار فلش اندازه‌گیری شده (سانتی‌متر)	خطا (سانتی-متر)	خطا بر حسب درصدی از فلش	درصد میانگین خطا
۱	۱۱/۵	۱	۱۱۰/۹	۱۰۴/۰	۱۱/۴۷۴۰	۰/۰۲۶	۰/۲	۰/۶۸
		۲	۹۴/۵	۱۰۳/۲	۱۱/۴۳۰۳	۰/۰۶۹۷	۰/۶	
		۳	۱۲۳/۸	۹۵/۴	۱۱/۵۹۵۷	۰/۰۹۵۷	۰/۸	
		۴	۱۱۳/۵	۱۰۵/۸	۱۱/۵۸۳۲	۰/۰۸۳۲	۰/۷	
		۵	۹۶/۷	۱۰۷/۱	۱۱/۶۷۲۰	۰/۱۷۲	۱/۵	
		۶	۱۲۹/۲	۱۰۱/۵	۱۱/۵۳۶۸	۰/۰۳۶۸	۰/۳	



(الف) نحوه چینش



(ب) زاویه‌های عکس‌برداری

شکل (۴): شرایط آزمایشگاهی برای ارزیابی روش پیشنهادی

Figure (4): Laboratory conditions for evaluating the proposed method, a) how to arrange, b) shooting angles

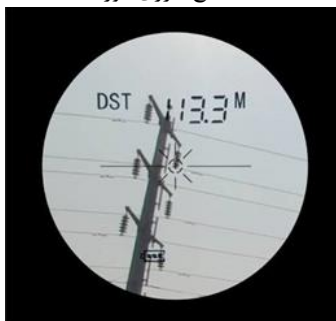
به عبارت بهتر با این روش می‌توان مقدار فلش را با خطایی کمتر از یک درصد برآورد کرد. این دقت در کاربرد مورد نظر کاملاً تکافوی نیاز نصابان و پیمانکاران شبکه‌های برق را می‌کند. همین‌طور نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده به موقعیت قرارگیری دوربین حساسیت چندانی ندارد و در تمام نماها دقت قابل قبولی را ارائه کرده است.



شکل (۵): محل مورد نظر برای ارزیابی میدانی روش پیشنهادی در اطراف شهر تفرش - استان مرکزی
Figure (5): The location for field evaluation of the proposed method around Tafresh- Markazi province



(الف) فاصله‌سنج لیزری مورد استفاده



(ب) نمای ارائه شده در چشمی فاصله‌سنج که به سادگی امکان اندازه‌گیری در فاصله‌های چند صد متری از مقره‌ها را فراهم می‌کند.

شکل (۶): در روش ارائه شده برای اندازه‌گیری فاصله از مقره‌ها از یک فاصله‌سنج لیزری استفاده شده است.

Figure (6): In the proposed method, a laser rangefinder is used to measure the distance from the insulators. (a) shows the laser rangefinder used and (b) shows the view provided by the rangefinder, which makes it easy to measure at distances of several hundred meters from the insulators.

۴-۴- آزمایش چهارم

یکی از چالش‌های روش پیشنهادی تشخیص درست محل سیم است. چنانچه الگوریتم پیشنهادی نتواند محل سیم را به درستی تشخیص دهد، محاسباتی که برای اندازه‌گیری فلش انجام می‌شود از پایه غلط بوده و به تبع نتیجه نیز غلط خواهد بود. نازک بودن بیش از حد سیم‌ها در تصاویری که از نماهای دور گرفته می‌شوند از یک سو و شلوغ بودن پس‌زمینه از سوی دیگر دشواری کار را بیشتر می‌کند. در این بخش بدون آنکه مقدار فلش را با نقشه‌برداری محاسبه کرده و دقت اندازه‌گیری فلش سنجیده شود، تنها به آشکارسازی سیم و ارزیابی بصری آن پرداخته می‌شود تا بررسی شود که آیا روش ارائه شده می‌تواند در تصاویری با پس‌زمینه شلوغ هم به درستی سیم را تشخیص دهد یا خیر. سه نمونه از تصاویر در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.

جدول (۳): نتایج آزمایش سوم

Table (3): Results of the third experiment

خطا بر حسب درصدی از فلش	خطا (سانتی‌متر)	مقدار فلش محاسبه شده با روش پیشنهادی (متر)	فاصله از تیر سمت چپ (متر)	فاصله از تیر سمت راست (متر)	مقدار واقعی فلش (اندازه گیری شده با توتال استیشن)	شماره موقعیت
۰/۲	۰/۷	۳/۲۰	۳۱/۰	۴۰/۲	۳/۱۹۳ متر	۱
۰/۲	۰/۷	۳/۲۰	۳۵/۲	۳۰/۶		۲
۰/۴	۱/۳	۳/۱۸	۳۳/۷	۳۱/۵		۳
۰/۸	۲/۷	۳/۲۲	۳۷/۶	۳۵/۷		۴
۰/۸	۲/۷	۳/۲۲	۳۵/۶	۳۹/۷		۵
۰/۴۸	۱/۶۲	۳/۲۰۴			۳/۱۹۳ متر	میانگین



شکل (۷): آشکارسازی سیم در تصاویری با سطوح مختلفی از پیچیدگی پس زمینه. سیم‌ها در تصاویر بسیار نازک بوده و به سختی قابل رویت هستند. ستون سمت راست تصاویر اولیه را نشان می‌دهد. در ستون سمت چپ علامت‌های + توسط کاربر مشخص شده‌اند و سپس الگوریتم پیشنهادی سیم را آنطور که به رنگ نارنجی مشخص شده آشکارسازی کرده است.

Figure (7): Wire detection in images with different levels of background complexity. The wires in the images are very thin and hard to see. The right column shows the initial images. In the left column, the + signs are marked by the user, and then the proposed algorithm detects the wire as shown in orange.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با وجود پیچیدگی‌هایی که در پس زمینه مشاهده می‌شود و نیز با وجود نازک بودن سیم، با مشخص بودن دو انتهای سیم الگوریتم می‌تواند سیم را با دقت خوبی بازسازی و آشکارسازی نماید.

۴-۵- بحث

تاکنون روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری فلش ارائه شده است. به لحاظ دقت، بهترین روش‌ها توانسته‌اند به خطایی در حدود چند سانتی‌متر دست پیدا کنند. به بیان دقیق‌تر، روش مبتنی بر GPS تفاضلی خطای یک اینچی را در شرایطی که فلش حدود یک متر و اسپن حدود ۱۰۰ متر است ارائه داده است [۱۰]. همین‌طور روش مبتنی بر پهپاد خطایی چند سانتی‌متری را در اندازه‌گیری فلش گزارش کرده است [۱۳]. این دقت‌ها با دقت ارائه شده توسط روش پیشنهادی قابل مقایسه است. لیکن برتری روش پیشنهادی را می‌توان هزینه تمام شده دستگاه و امکان انجام اندازه‌گیری‌های متعدد در فاصله ایمن از شبکه و بدون ایجاد اختلال در فرایند برق‌رسانی دانست. پهپاد مورد استفاده در مرجع [۱۳] یک پهپاد فانتوم ۴ پرو است که قیمت آن در حدود ۲۵۰۰ دلار است (این پهپاد یکی از ارزان‌ترین پهپادهای تجاری موجود در بازار است و پهپادهای مجهز به لیدار چنددهه برابر گران‌تر هستند). این در حالی است که روش پیشنهادی به غیر از یک گوشی تلفن هوشمند، تنها به یک فاصله سنج لیزری ۱۴۰ دلاری نیاز دارد. هر چند که هر نمونه از ستاپ‌های مبتنی بر GPS و یا حسگرهای مغناطیسی ممکن است نسبت به تجهیزات مورد نیاز در روش پیشنهادی ارزان‌تر باشند ولی باید توجه داشت که این تجهیزات به‌طور دائمی روی خط نصب و کالیبره می‌شوند و امکان جابجایی برای اندازه‌گیری فلش در هادی‌های دیگر برای آنها موجود نیست. لذا هزینه تمام شده آنها برای پوشش یک بخش چندکیلومتری از شبکه به مراتب بیش از روش پیشنهادی خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای اندازه‌گیری فلش در هادی‌ها ارائه شد. بسیاری از روش‌های موجود برای اندازه‌گیری فلش نیازمند نصب تجهیزات روی دکل‌ها و تیرها هستند ولی روش ارائه شده می‌تواند با حداقل امکانات (یک گوشی هوشمند و یک فاصله-سنج لیزری) مقدار فلش را از راه دور اندازه‌گیری کرده و لذا خطرهای ناشی از نزدیک شدن به شبکه و بالا رفتن از دکل‌ها و هزینه‌های اضافی تجهیزات نصب شونده روی دکل را حذف کند. خطای اندازه‌گیری فلش تقریباً در تمام موارد ارزیابی شده زیر یک درصد به دست آمد که برای کاربرد مورد نظر کاملاً کافی و مناسب است. این روش می‌تواند به هنگام نصب به نصابان و پیمانکاران کمک نماید تا مقدار فلش را به دقت برآورد کرده و نصب را بر اساس استانداردهای لازم انجام دهند. چنانچه رعایت استانداردها در نصب هادی‌ها به درستی صورت نگیرد، نزدیکی بیش از حد هادی‌ها به زمین و یا کش آمدن بیش از حد سیم‌ها در فصل‌های گرم و سرد می‌تواند خطرهایی را در قالب اتصال کوتاه به زمین و یا پارگی هادی ایجاد نماید. دستگاه پیشنهادی می‌تواند با حداقل هزینه مشکل اندازه‌گیری فلش را حل کرده و مشکلات ناشی از برآورد چشمی را به حداقل برساند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت مالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری از این پروژه در قالب کد اعتباری ۹۹-۲۹-۰۱-۰۰۰۰۰۷ قدردانی می‌نمایند.

References

مراجع

- [1] C. Deng, S. Wang, Z. Huang, Z. Tan, J. Liu, "Unmanned aerial vehicles for power line inspection: a cooperative way in platforms and communications", *Journal Commun*, vol. 9, no. 9, pp. 687-692, Sept. 2014 (doi:10.12720/jcm.9.9.687-692).
- [2] A.T. Zengin, G. Erdemir, T.C. Akinci, S. Seker, "Measurement of power line sagging using sensor data of a power line inspection robot", *IEEE Access* vol. 8 pp. 99198-99204, May. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998154).
- [3] D. Xiaoyuan, "Analytic method to calculate and characterize the sag and tension of overhead lines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31, no. 5, pp. 2064-2071, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TPWRD.2015.2510318).
- [4] Y. Du, Y. Liao, "Online estimation of power transmission line parameters, temperature and sag", *Proceeding of the IEEE/NAPS*, pp. 1-6, American, Aug. 2011 (doi: 10.1109/NAPS.2011.6024854).
- [5] R.M. Hayes, A. Nourai, "Power line sag monitor", U.S. Patent, No. 6,205,867. 27 Mar. 2001.

- [6] R.G. Olsen, K.S. Edwards, "A new method for real-time monitoring of high-voltage transmission-line conductor sag", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17 no. 4, pp. 1142-1152, Oct. 2002 (doi: 10.1109/TPWRD.2002.804015).
- [7] X. Sun, K.S. Lui, K.K.Y. Wong, W.K. Lee, Y. Hou, Q. Huang, P.W.T. Pong, "Novel application of magnetoresistive sensors for high-voltage transmission-line monitoring", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 47 no. 10, pp. 2608-2611, Sept. 2011 (doi: 10.1109/TMAG.2011.2158085).
- [8] A. Habib, Q. Huang, J. Li, Z. Zhang, "Estimation of current and sag in overhead power transmission lines with optimized magnetic field sensor array placement", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 53 no. 5, pp. 1-10, Jan. 2017 (doi: 10.1109/TMAG.2017.2657490).
- [9] C. M. Bonsu, U.F. Krekeler, G.T. Heydt, Y. Hoverson, J. Schilleci, B.L. Agrawal, "Application of the global positioning system to the measurement of overhead power transmission conductor sag", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, no. 1, pp. 273-278, Jan. 2002 (doi: 10.1109/61.974218).
- [10] S.M. Mahajan, U.M. Singareddy, "A real-time conductor sag measurement system using a differential GPS", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27 no. 2, pp. 475-480, Feb. 2012 (doi: 10.1109/TPWRD.2011.2181963).
- [11] M. Wydra, P. Kisala, D. Harasim, P. Kacejko, "Overhead transmission line sag estimation using a simple optomechanical system with chirped fiber bragg gratings, Part 1: Preliminary measurements", *Sensors*, vol. 18 no. 1, Article Number: 309, Jan. 2018 (doi: 10.3390/s20092652).
- [12] G. Sohn, Y. Jwa, H.B. Kim "Automatic powerline scene classification and reconstruction using airborne lidar data", *Proceeding of the ISPRS*, vol. I-3, pp. 167-172, Aug. 2012 (doi: 10.5194/isprsannals-I-3-167-2012).
- [13] J. Oh, C. Lee 2, "3D power line extraction from multiple aerial images", *Sensors*, vol. 17, no. 10, Article Number: 2244, Sept. 2017 (doi: 10.3390/s17102244).
- [14] M. Wydra, P. Kubaczynski, K. Mazur, B. Ksiezopolski, "Time-aware monitoring of overhead transmission line sag and temperature with LoRa communication", *Energies*, vol. 12, no. 3, Article Number: 505, Feb. 2019 (doi: 10.3390/en12030505).
- [15] M.Y. Sermet, I. Demir, S. Kucuksari, "Overhead power line sag monitoring through augmented reality", *Proceeding of the IEEE/NAPS*, pp. 1-5, American, Sept. 2018 (doi: 10.1109/NAPS.2018.8600565).
- [16] M.A. Isa, D. Sims-Waterhouse, S. Piano, R. Leach, "Volumetric error modelling of a stereo vision system for error correction in photogrammetric three-dimensional coordinate metrology", *Precision Engineering*, vol. 64, pp.188-199, July 2020 (10.1016/j.precisioneng.2020.04.010).
- [17] H. Kim, W.Y. Kim, "Automated inspection system for rolling stock brake shoes", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 8, pp. 2835-2847, April 2011 (doi: 10.1109/TIM.2011.2119110).
- [18] S. Huang, W. Jin, M. Ye, Z. Liu, B. Yu, Y. Ying, X. Zhang, Y. Mu, "A vision based method for automated measurement of circular fiber cross-sections", *Measurement*, vol. 162, Article Number: 107913, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.measurement.2020.107913).
- [19] M. Alidoust, M. Zeinali, H. Mahdavi-Nasab, "A robust edge detection method with subpixel accuracy in presence of noise", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 6, no. 24, pp. 17-26, Jan. 2016 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1394.6.24.2.2).
- [20] V. Ghods, A. Behrad, "Road extraction and car detection from aerial image using intensity and color", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 55-64, Aug. 2011 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1390.2.6.6.2).

زیرنویس‌ها

1. Tower twist
2. Drone
3. Climbing robot
4. Gravity vector
5. Global positioning system
6. Lidar: Light detection and ranging
7. Inertial measurement unit
8. Fitness measure
9. Roll
10. Pitch
11. Pinhole camera
12. Optical center
13. Subpixel
14. Prune

- 15. Concavity
- 16. Span
- 17. Total station