

پایش رانش زمین با استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم

سامان شوریانی ثانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری
منا کلاته عربی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
علی اکبر خزاعی* (استادیار)
گروه برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۶ (دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۳۷-۱۴۷، یادداشت‌نشی)

در پژوهش حاضر، یک شیوه برای پایش رانش زمین در سطوح شیب‌دار واقع در کوهپایه یا دامنه‌ی کوه با استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی، تحلیل و شبیه‌سازی شده است. اساس این روش در قراردادن آرایه‌ی از گره‌های حسگر بی‌سیم فرستنده در نواحی ویژه در سطح شیب‌دار موردنظر و دریافت و آنالیز سیگنال‌های ارسالی از آرایه‌ی مذکور از طریق دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون استوار است. در واقع سیستم پیشنهادی برای پایش پدیده‌ی رانش زمین، تغییرات اختلاف فاز بین دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون را در قبل و بعد از وقوع رانش زمین اندازه می‌گیرد و قابلیت اطمینان و دقت قابل قبولی را برای پایش سطوح شیب‌دار کوهپایه‌ی محدود، اما با شرایط ویژه یا بحرانی از خود نشان می‌دهد. در این مورد آزمایش میدانی انجام نشده است، اما شبیه‌سازی جامع و کاملی با استفاده از آرایه‌ی ۶ فرستنده و ۲ گیرنده صورت گرفته و نتایج و دقت آن به تفصیل بررسی و ارزیابی شده است.

sIsani91@gmail.com
mona.kalat@arabi.1387@gmail.com
khazaei@mshdiau.ac.ir

واژگان کلیدی: نظارت بلادرنگ رانش زمین، شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

۱. مقدمه

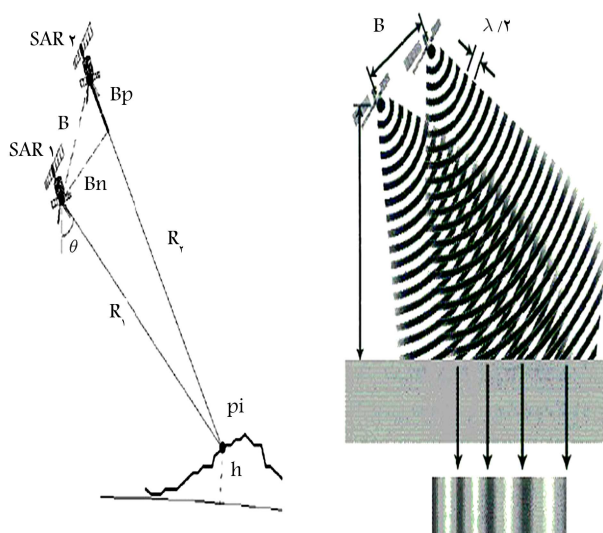
می‌توان به‌صورت خلاصه پدیده‌ی رانش را به این صورت توصیف کرد: حرکت رو به پایین و حرکت رو به بیرون اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی شیب شامل: صخره‌های طبیعی، خاک، عناصر ساخت انسان و یا ترکیبی از مواد مذکور. جرم در حال حرکت به سمت پایین سطح شیب‌دار می‌تواند سقوط کند، ورقه‌ورقه یا پهن و یا جاری شود، یا به صورت ترکیبی از حالات مذکور حرکت خود را انجام دهد. جابه‌جایی از نوع سقوط، ورقه‌شدن، پهن‌شدن و جاری‌شدن اغلب توسط چشم انسان قابل تشخیص است. حال آنکه خزش و یا فرسایش آنقدر آهسته رخ می‌دهد که چشم انسان قادر به مشاهده‌ی جزئیات دو نوع حرکت اخیر نیست. در رابطه با بررسی فیزیکی پدیده‌ی رانش می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

مطابق شکل ۱ الف، یک جرم بزرگ بر روی یک سطح افقی قرار گرفته است. در چنین شرایطی یگانه نیروی عمل‌کننده بر روی جرم مذکور نیروی جاذبه است، که برداری است که هم اندازه و هم جهت دارد و در شکل مذکور، از طریق پیکان مشکی قائم، که به سمت پایین اشاره دارد، نشان داده شده است. طول پیکان مذکور، برابر اندازه‌ی نیروی جاذبه است. اگر سطحی که تخته‌سنگ بر روی آن قرار گرفته است، شیئی مخالف صفر داشته باشد، نیروی جاذبه شامل دو مؤلفه خواهد بود: یکی موازی با سطح شیب‌دار عمل خواهد کرد (بردار آبی در شکل ۱ ب، ج و ۱ د) و مؤلفه‌ی دیگر به صورت قائم بر آن عمل خواهد کرد (پیکان قرمز در شکل ۱ ب، ج و ۱ د). اولین نیروی مذکور، مؤلفه‌ی مماسی و دومین نیرو، مؤلفه‌ی قائم (نرمال) جاذبه نام دارد. مؤلفه‌ی مماسی آن بخش از نیروی جاذبه است، که تمایل دارد

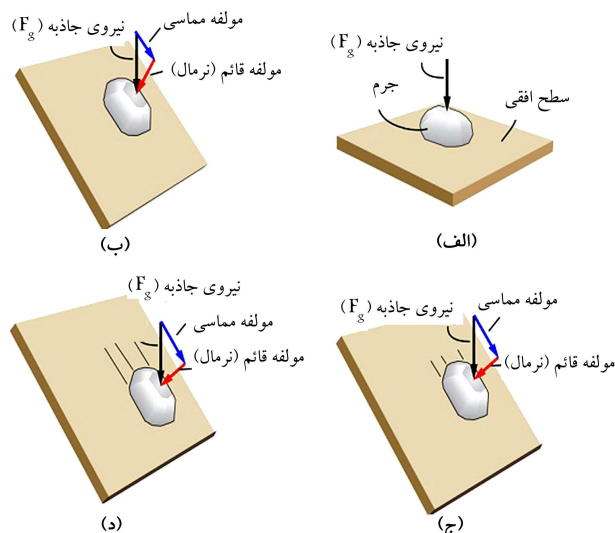
رانش زمین، یک پدیده‌ی کوتاه‌مدت مخرب است، که علل وقوع آن مختلف است. مثلاً شیب تند تپه‌ی عملیات خاک‌برداری از کوهپایه، که شامل خاک‌برداری بخشی از پایه‌ی کوه و همچنین خاک اشباع‌شده از آب است. طبقه‌بندی رانش زمین بر دو اساس صورت می‌گیرد: ۱. نوع ماده‌ی که قبل از وقوع رانش وجود دارد، ۲. نوع حرکت و یا جابه‌جایی مواد که در طول وقوع رانش بر دیگر انواع حرکت غلبه دارد. نوع ماده‌ی موجود قبل از وقوع رانش زمین می‌تواند صخره، خاک، زمین، گل و یا آوار باشد. چهار حالت عمده‌ی وقوع جابه‌جایی در خلال رانش عبارت‌اند از: سقوط، ورقه‌ورقه‌شدن، پهن‌شدن و جاری‌شدن. بنابراین برای طبقه‌بندی نوع رانش زمین، باید ابتدا نوع موادی که در سطح شیب قبل از وقوع رانش وجود دارند، مشخص و سپس نوع جابه‌جایی غالب آن مواد نیز تعیین شود. با چنین ایده‌ی، «سقوط صخره»^۱ یک رانش است که شامل مواد یک‌دست، سخت و سنگین است، که به صورت سقوط در شیب پایین می‌آیند و «جاری‌شدن زمین»^۲ یک رانش است که شامل جاری‌شدن مواد به سطح پایین شیب است. یک رانش پیچیده^۳ شامل دو یا بیشتر از انواع جابه‌جایی سقوط، ورقه‌شدن، پهن‌شدن و جاری‌شدن است. برای مثال بخش پایینی رانش از نوع ورقه‌شدن و بخش بالای آن از جنس جاری‌شدن زمین باشد. چنین رانشی به عنوان یک رانش پیچیده‌ی ورقه - جاری‌شونده^۴ نام‌گذاری می‌شود.

* نویسنده مسئول

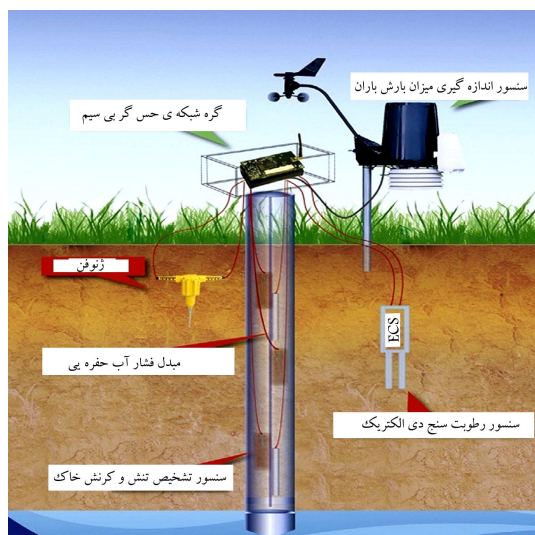
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۵/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۱۷، پذیرش ۱۳۹۴/۱۲/۴.



شکل ۲. نمای کلی روش پردازش تصاویر ماهواره‌ای (SAR).



شکل ۱. بررسی مبانی نظری پدیده‌ی رانش از منظر فیزیک کلاسیک.



شکل ۳. اجزاء یک نمونه‌ی پروب زمین در روش مطب‌حده‌ی سوم.

عنوان روش دوم، از شیوه‌ی پردازش تصاویر ماهواره‌ای (SAR)^۸ برای پایش نواحی پهناور استفاده شده است.^[۴-۶] همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در روش دوم، مبنای بررسی وقوع یا عدم وقوع رانش و همچنین میزان و کران خطر آن بر اساس دریافت امواج با بسامد در محدوده‌ی گیگاهرتز از طریق ماهواره‌های فضایی و اسکن سطح شیب‌دار مظنون به رانش در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت (به عنوان مثال ۱۰ تا ۴۰ روز) برای تشخیص وقوع و یا احتمال وقوع رانش با بهره‌گیری از شیوه‌های پردازش تصویر مدرن و داده‌کاوی بانک‌های اطلاعاتی به‌دست‌آمده استوار است.

در پژوهشی مشابه به عنوان روش سوم، با استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای زمین‌شناسی و هیدرولوژی سطح شیب‌دار موردنظر، برای پایش و تشخیص وقوع رانش زمین تلاشی ارزنده به عمل آمده است.^[۷] مطابق شکل ۳، حس‌گرهایی مانند مدل فشار آب حفرة یی^۹ و ژئوفون^{۱۰} و حس‌گر رطوبت‌سنج خاک^{۱۱} و غیره، در غالب یک پروب زمین عمیق^{۱۲} در محدوده‌ی مظنون به رانش نصب و راه‌اندازی شده است، تا با استفاده از شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم بتوان اطلاعات بسیار کارآمدی

جرم بر روی سطح را به سمت پایین بکشاند؛ در مقابل نیروی نرمال آن بخش از نیروی جاذبه است که سعی دارد جرم را به سطح شیب‌دار بفشارد. اگر سطحی که تخته جرم بر روی آن قرار دارد با محور افقی زاویه‌ی ۴۵ درجه بسازد، مؤلفه‌ی نرمال جاذبه از مؤلفه‌ی مماسی آن بزرگ‌تر می‌شود و تخته‌سنگ به پایین شیب حرکت نخواهد کرد. (شکل ۱ ب). اگر زاویه‌ی شیب نزدیک‌تر شود (برای مثال ۱۵ درجه اندازه‌ها)، مؤلفه‌ی مماسی از مؤلفه‌ی نرمال بیشتر و تخته‌سنگ از روی سطح به سمت پایین به مقدار بیشتری شروع به حرکت خواهد کرد (شکل ۱ ج و د). همان‌طور که در توضیحات مقدماتی ذکر شده است، مشخصات فیزیکی ماده‌یی که بر روی سطح شیب‌دار قرار می‌گیرد و همچنین قسمتی از سطح که مستقیماً با شی در تماس است، نقش مهمی در پایین آمدن یا نیامدن آن تحت تأثیر مؤلفه‌ی مماسی نیروی جاذبه دارد. برای مثال اگر سطح زمین، که مستقیماً با اجسام و مواد رویی در تماس است، از جنس سنگ صاف، یک‌دست و بدون شکستگی باشد، می‌تواند سطحی با شیب تند بدون هیچ‌گونه ماده‌ی مقاوم و مانع در جهت حرکت رو به پایین ایجاد کند. از طرف دیگر، اگر سطحی روی شیب با مواد گرانولی مانند سنگ‌فرش^۵ پوشیده شده باشد، در چنین حالتی مواد مذکور حتی با وجود شیب کم هم می‌توانند از روی سطح به پایین بلغزند. در بین دو حد مذکور، محدوده‌ی وسیعی از مواد مختلف با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت وجود دارد که مشخص می‌کند ماده‌ی مذکور تحت تأثیر مؤلفه‌ی مماسی جاذبه به سمت پایین حرکت می‌کند. بعضی از مواد به صورت بلوک‌های به هم چسبیده سقوط می‌کنند و در فضای بالای شیب به صورت آزادانه، به‌صورت غلتیدن و چرخش و جهش از تپه پایین می‌آیند. در حالی که سایر مواد وقتی که از آب اشباع شوند، با مقادیر قابل توجهی از شن و ماسه‌ی خیس از شیب پایین می‌آیند. تمامی این پروسه‌ها و مواد رونشستی حاصل از آنها با اسم عمومی رانش زمین در بین پژوهشگران این رشته شناخته می‌شوند.

تلاش‌های بسیاری برای پیش‌بینی و پایش پدیده‌ی رانش زمین به عنوان یک بالای طبیعی صورت گرفته است. مهم‌ترین عامل تمایز در روش‌های ذکر شده و انتخاب هر کدام از آنها، بحث وسعت ناحیه‌ی موردنظر است. برای محدوده‌های با وسعت چند ۱۰۰ متر به عنوان روش اول، از یک سیستم بر پایه‌ی شعاع^۶ لیزر و سیستم فرستنده - گیرنده بر پایه‌ی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم^۷ استفاده شده است.^[۱-۳] به

مختلف پژوهش حاضر بر آن است که روش مذکور، پتانسیل و قابلیت استفاده‌ی عملی برای کاربرد نظارت بلادرنگ بر رانش زمین^{۱۶} و جایگزینی روش‌های ذکر شده را دارد.

۲. بیان و تفسیر اصول و مبانی هندسی و پردازش

سیگنال شبیه‌سازی

با توجه به محدودیت‌های مالی، فنی و تکنیکی یک ایده‌ی نوآورانه‌ی مبتنی بر شبیه‌سازی برای پایش جابه‌جایی منطقه‌ی مظنون و محتمل برای رانش، طراحی و شبیه‌سازی شده است. برای بازرسی و پایش منطقه‌ی مورد نظر رانش، یک ایده‌ی مبتکرانه به این شرح بر پایه‌ی شبیه‌سازی با نرم‌افزار مطلب و با کمک برنامه‌نویسی C# برای پایش جابه‌جایی‌های بسیار کوچک ناشی از رانش زمین محاسبه و شبیه‌سازی شده و به نمایش در آمده است. یک واسط گرافیکی برای راحتی کاربر در ورود اطلاعات و وضوح نتایج طراحی و پیاده‌سازی شده است، که جزئیات آن در بخش نتیجه‌گیری و تفسیر داده‌های شبیه‌سازی در ادامه‌ی پژوهش حاضر ذکر شده است. جزئیات ایده‌ی مذکور، مبانی نظری و ریاضیاتی آن به این شرح است:

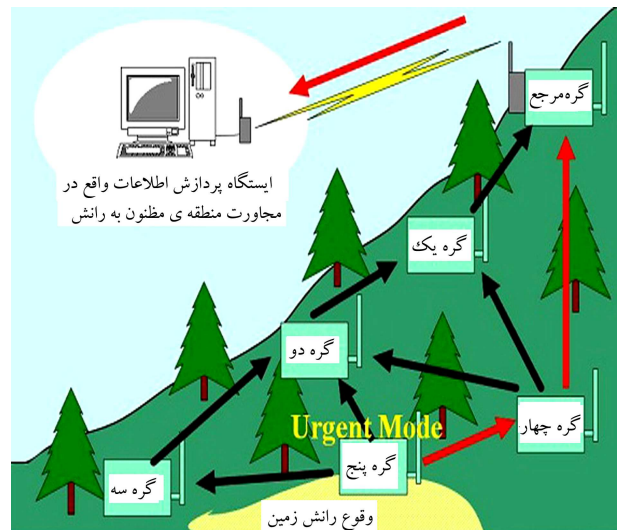
در شیوه‌ی تشخیص رانش زمین، آرایه‌ی از فرستنده‌ها (T_x) را در منطقه‌ی مورد نظر نصب می‌کنند و سیگنال‌ها را به ۲ گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون می‌فرستند. در واقع این سیستم تغییرات اختلاف فاز را - که ناشی از جابه‌جایی (T_x) هاست - در سیستم شامل دو گره گیرنده اندازه می‌گیرد و ضمن نمایش لحظه به لحظه، وضعیت سطح شیب‌دار مظنون به رانش را با دقت در رنج ۰٫۱ میلی‌متر تخمین می‌زند. سیستم دو گره گیرنده‌ی سنکرون در فاصله‌ی اندکی دور از منطقه نصب می‌شود و سیگنال‌های دریافتی را مستقلاً اما با لحاظ کردن هم‌بستگی^{۱۷} آشکار می‌سازد. باشه‌ی آشیل یا مسیر گنگ (مبهم) این ایده که در واقع ظهور رانش بدون تغییر اختلاف فاز قابل تشخیص در گره‌های گیرنده‌ی بی‌سیم است، نیز تعریف و بررسی شده است و باید از آن اجتناب شود. در نوشتار حاضر، این ایده بدون عملیات پیاده‌سازی میدانی فقط با ارائه‌ی مثال‌های شبیه‌سازی مطرح شده است.

تلاش‌های زیادی برای پایش رانش زمین صورت گرفته است، که در قسمت مقدمه به آن‌ها اشاره شده است. در پژوهش حاضر، روشی ارزان و کم‌نویز برای تشخیص جابه‌جایی که بر پایه‌ی اختلاف فاز بین دو گره گیرنده استوار است، ارائه شده است. این سیستم پایش در واقع اختلاف فاز مربوط به فرستنده (هدف) در منطقه‌ی مورد نظر^{۱۸} و دو گره گیرنده‌ی سنکرون شده را اندازه می‌گیرد. به منطقه‌ی مظنون به رانش، سطح شیب‌دار کوهپایه گفته می‌شود و گره‌های گیرنده‌ی سنکرون در فاصله‌ی کمی دور از کوهپایه قرار می‌گیرند. آرایه‌ی (T_x) برای ارسال داده‌ها در یک ترتیب هماهنگ شده، برنامه‌ریزی می‌شود و رشته‌ی (۱۱۱۱۱۱۱) را با بسامد کریر مشخص، مکرراً ارسال می‌کند. دو گره گیرنده دور از تپه، ولی در فاصله‌ی نزدیکی نسبت به هم قرار می‌گیرند (a) و سیگنال‌ها را مستقلاً ولی با اسیلاتور سنکرون مشترک آشکار می‌سازد. این سیستم می‌تواند جابه‌جایی و تغییر شکل را در لحظات اولیه برای محدوده‌هایی به وسعت 250° متر با استفاده از پروتکل شبکه‌ی IEEE ۸۰۲/۱۱n و تجهیزات این خانواده تشخیص دهد. در رابطه با مدت زمان مورد نیاز برای پروسه‌ی تشخیص مکان وقوع رانش زمین باید اشاره کرد از آنجا که ارسال داده‌ها توسط آرایه‌ی فرستنده‌ها در رنج گیگاهرتز بوده است (سرعت ارسال اطلاعات در حدود 300 هزار کیلومتر در ثانیه است)، مسافتی محدود به

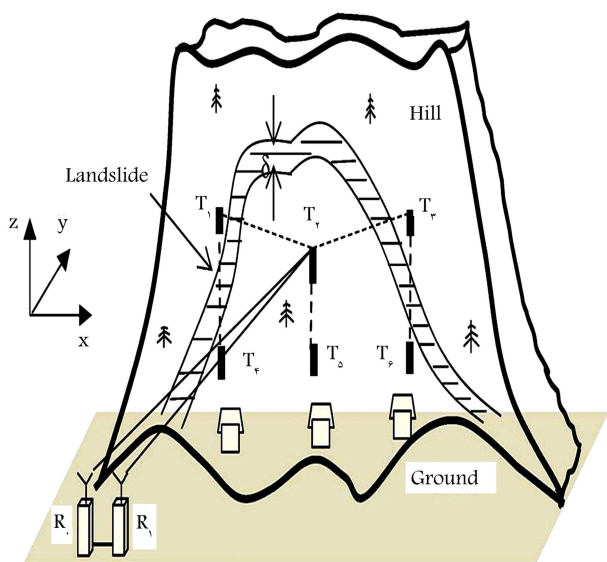
از آن را در اختیار گرفت و پردازش و بررسی دقیق کرد. چیدمان پروب‌های مذکور در محدوده‌ی مظنون به رانش می‌تواند به صورت شکل ۴ باشد. در روش اخیر، مبنای بررسی پدیده‌ی رانش، تشخیص آستانه‌های قابل تشخیص با بهره‌گیری از متد جدید پویش بلادرنگ و درازمدت پارامترهای زمین‌شناسی و هیدرولوژی سطح مظنون به رانش با بهره‌گیری از شیوه‌های به‌روز داده‌کاوی و الگوریتم‌های شبکه‌ی عصبی و کاربرد منطق فازی در تحلیل مقادیری است که با استفاده از تجهیزات سخت‌افزاری (حس‌گرها و میدل‌ها و کارت‌های واسط و تجهیزات انتقال و دریافت بی‌سیم اطلاعات) در بانک اطلاعاتی مجاور سطح مظنون به رانش ذخیره‌سازی شده‌اند.

روش‌های سه‌گانه‌ی مذکور، به عنوان رایج‌ترین روش‌های تشخیص و پایش رانش زمین، هر کدام مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند. برای مثال از جمله معایب روش اول مطرح شده، می‌توان به خطرات کاربرد آن در نواحی مسکونی اشاره کرد. از جمله معایب روش دوم، تحت تأثیر قرار گرفتن دقت نتایج آن از شرایط جوی و آب‌وهوایی و همچنین زمان بر بودن پروسه‌ی جمع‌آوری و ذخیره‌سازی و عملیات سنگین داده‌پردازی در آن است. یکی از اصلی‌ترین نواقص روش سوم نیز گران بودن تجهیزات و حس‌گرهای متنوع آن در کاربردهای با مقیاس بزرگ است.^[۸-۱۱] همچنین شایان ذکر است که متد و روش‌های بسیار متنوع دیگری نیز در سال‌های اخیر چه به صورت استفاده‌ی منفرد و یا به صورت ترکیبی^{۱۲} بررسی، تحلیل، پیاده‌سازی و ارزیابی شده‌اند. از آن جمله می‌توان به معرفی و تحلیل شبکه‌ی حس‌گر بهینه با کمترین توان مصرفی و ترافیک شبکه،^[۱۲] و یا به استفاده از شیوه‌های GPS و TPS،^[۱۳] و یا به معرفی و پیاده‌سازی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم نظارت بر رانش زمین به صورت گسترده و چندمیزبان،^[۱۴] و یا استفاده از داده‌پردازی مبتنی بر منحنی‌های ROC،^[۱۵] و یا به دیگر شیوه‌های حس‌گر از راه دور^[۱۶-۲۳] اشاره کرد.

در پژوهش حاضر با تکیه بر شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار قدرتمند مطلب^{۱۵}، و به جهت کمبود امکانات در آزمون میدانی ایده‌ی مطرح شده، یک روش بسیار ارزان‌قیمت در راستای اهداف پایش سطوح شیب‌دار برای وقوع رانش زمین معرفی و شبیه‌سازی شده است. ادعای پژوهش‌گران با استناد به نتایج و تفاسیر بخش‌های



شکل ۴. چیدمان گره‌های شبکه‌ی حس‌گر برای پویش بلادرنگ سطح مظنون به رانش در روش مطرح شده.



شکل ۵. نمایی کلی از سیستم پایش رانش زمین در AOI.

خطوط انحراف (r_0, r_1) و (r'_0, r'_1) فواصل R_0 و R_1 از T و T' هستند و داریم:

$$r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}, \quad r_1 = \sqrt{(x_0 - a)^2 + y_0^2 + z_0^2}$$

زاویه θ_0 و θ_1 با خطوط $T - T'$ و $R_0 - T$ و همچنین $R_1 - T$ ساخته می‌شوند. در خلال نصب اولیه سیستم، باید مکان T_x ها و R_0 و R_1 را اندازه گرفت، تا x_0, y_0, z_0 و a تعیین شوند. بردار شیب کوه در نقطه‌ی T به صورت رابطه‌ی ۱ تخمین زده می‌شود (به کمک روش‌های محاسبات عددی):

$$\vec{M} = (x_1 - x_0)\hat{x} + (y_1 - y_0)\hat{y} + (z_1 - z_0)\hat{z} \quad (1)$$

و مقدار اسکالر (عددی) شیب دامنه یا کوهپایه از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$M_{Th} = (z_1 - z_0) / \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (2)$$

بدون اطلاع از $T'(x_1, y_1, z_1)$ و برای تعیین مقدار θ_0 و θ_1 به ناچار باید اختلاف فاز φ_D براساس اختلاف فاصله‌ی $D = r_0 - r_1$ محاسبه شود. بدون داشتن مکان T' ، اختلاف فاز φ_D به خاطر اختلاف فاصله‌ی بین $r'_0 - r'_1$ می‌تواند فقط از طریق دو گره گیرنده اندازه‌گیری شود.

با داشتن ۲ مثلث $T - T' - R_0$ و $T - T' - R_1$ می‌توان رابطه‌ی ۳ را به دست آورد:

$$\vec{r}_0^2 + \vec{\delta}^2 - 2r_0 \cdot \vec{\delta} \cdot \cos \theta_0 = \vec{r}'_0^2 \quad (3)$$

$$\vec{r}_1^2 + \vec{\delta}^2 - 2r_1 \cdot \vec{\delta} \cdot \cos \theta_1 = \vec{r}'_1^2$$

بنابراین r'_0 و r'_1 مطابق رابطه‌ی ۴ به دست می‌آیند:

$$r'_0 \approx r_0 - \vec{\delta} \cdot \cos \theta_0 \quad (4)$$

$$r'_1 \approx r_1 - \vec{\delta} \cdot \cos \theta_1$$

که در آن، r_0, r_1, θ_0 و θ_1 پارامترهای معلوم در حین نصب هستند. با داشتن $D = r_0 - r_1$ و $D' = r'_0 - r'_1$ مقدار $\vec{\delta}$ از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$\vec{\delta} = \frac{D - D'}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1} \quad (5)$$

۲۵۰۰ مترمربع، که با تقسیم این مساحت و گرفتن جذر آن عددی برابر ۲۸/۲ متر به دست می‌آید، شعاع دایره‌ی منطقه‌ی تحت پوشش است. با تکیه بر رابطه‌ی شناخته‌شده‌ی محاسبه‌ی سرعت خطی (سرعت = مدت جابه‌جایی/جابه‌جایی)، زمان لازم برای ارسال از طریق فرستنده و دریافت آن درگیرنده‌های سنکرون شده در حدود $T_d = 9 \times 10^{-8}$ ثانیه خواهد شد و مدت زمان پردازش و عملیات تحلیلی جهت محاسبه‌ی میزان رانش (با توجه به بسامد کاری بالای مدارهای الکترونیکی قابل دسترسی برای پیاده‌سازی گیرنده‌ها) در حدود $T_p = 3.2 \times 10^{-8}$ است، که کل مدت زمان لازم جهت عملیات تشخیصی برابر مجموع دو زمان مذکور است ($T_t = 12.2 \times 10^{-8}$).

در رابطه با این سؤال که در این مرحله مطرح شده است که نهایتاً سیستم پیشنهادی، چه دامنه‌ی کاربردی در تشخیص انواع مختلف رانش و چه طول دوره‌ی لغزش دارد، باید به این نکته اشاره شود که با تکیه بر موارد اشاره‌شده، قدرت تشخیص روش مذکور برای میزان رانش محدود به منطقه‌ی با وسعت ۲۵۰۰ مترمربع و کران زمان تشخیصی $T_t = 12.2 \times 10^{-8}$ و دقت تشخیص در حدود ۰/۱ میلی‌متر است، که در شبیه‌سازی‌ها حاصل شده است و از لحاظ طول دوره و میزان وقوع رانش، محدودیتی برای سیستم پیشنهادی متصور نیست (که در بخش تفسیر نتایج شبیه‌سازی بررسی شده است).

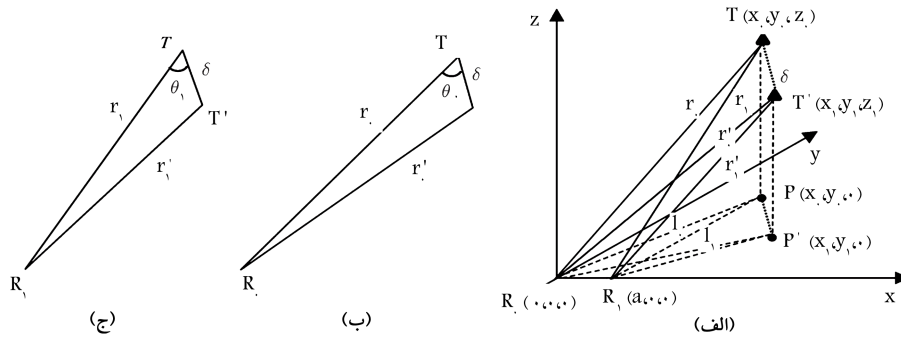
محدوده‌ی عملکردی سیستم پیشنهادی، مدت زمانی است که داده‌های دریافتی برای پردازش‌های بیشتر می‌توانند به مراکز کنترل ثانویه ارسال شوند. این شیوه صرفه‌جو است، چرا که چند آرایه از فرستنده‌ها و آنتن‌ها می‌توانند یک مدار ارسال‌شده را با هم شریک شوند. در ابتدا سیستمی با T_x منفرد، سپس تفسیر چگونگی تغییر فاز به میزان جابه‌جایی، و پس از آن سیستمی با آرایه‌ی از T_x بررسی شده‌اند. در نهایت یک مسیر (حالت) گنگ (مبهم) تشریح و روابط ریاضی آن اثبات شده است. همچنین بلوک دیاگرام دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون ترسیم و سیگنال‌های فرستنده و گیرنده، پله به پله از مراحل ارسال تا آشکارسازی درگیرنده بیان و توضیح داده شده‌اند. همچنین شبیه‌سازی‌های ۳ بعدی برای تفسیر اندازه‌ی جابه‌جایی از روی تغییرات اختلاف فاز و میزان خطای ایده‌ی مذکور انجام شده است.

۱.۲. توصیف مدل بی‌سیم فرستنده - گیرنده

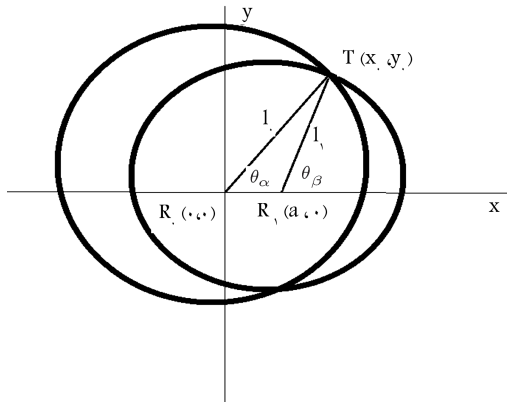
شکل ۵، نمایی کلی از سیستم رانش زمین را نشان می‌دهد. منطقه‌ی مظنون به رانش، در دامنه یا کوهپایه‌ی کوه در بالای منطقه‌ی مسکونی واقع و آرایه‌ی از T_x ها در آن نصب شده است. هر T_x از T_1 تا T_6 نام‌گذاری و طوری تنظیم و برنامه‌ریزی شده‌اند که دنباله‌ی داده‌ی از پیش تعیین‌شده‌ی را به دو گره گیرنده‌ی سنکرون بی‌سیم ارسال کنند (فاز آموزش سیستم^{۱۹}). دور از AOI و تپه، ۲ گیرنده‌ی سنکرون به نام‌های R_0 و R_1 قرار داده شده‌اند (در فاصله‌ی کمی با هم به اندازه‌ی مقدار مشخص α).

۲.۲. محاسبه‌ی جابه‌جایی براساس سیستم یک T_x

شکل ۶، نمای سه‌بعدی برای مدل تشخیص رانش را نشان می‌دهد $T(x_0, y_0, z_0)$ یکی از مجموعه‌های T_x در AOI است و گره گیرنده‌ی اول به نام R_0 در $(0, 0, 0)$ و گره گیرنده‌ی دوم R_1 در $(a, 0, 0)$ واقع شده و T' نقطه‌ی جابه‌جاشده‌ی T پس از وقوع رانش است. δ برابر میزان جابه‌جایی یا تغییرشکل و نقاط $p(x_0, y_0, 0)$ و $p'(x_1, y_1, 0)$ (تصویر) نقاط T و T' روی صفحه‌ی $x - y$ است.



شکل ۶. نمایش وضعیت گره T و حالت بعد از رانش زمین به نام T' .



شکل ۷. بررسی هندسی مسیر مبهم.

همچنین آرایه‌های T_x می‌توانند یک مدار ارسال را از طریق یک تسهیم کننده شریک شوند، تا هزینه‌ی پیاده‌سازی سخت‌افزاری کاهش یابد. ۲ گره گیرنده‌ی سنکرون شده، سیگنال‌های دریافتی را آشکار می‌کنند و T_x را شناسایی و میزان جابه‌جایی زمین را مشخص می‌کنند.

۴.۲. مسیر گنگ (مبهم)

یک مسیر مبهم به صورت تغییرشکل زمین، به طوری که میزان اختلاف فاز بین دو گیرنده ناشی از جابه‌جایی $T_x T_x T'$ ثابت بماند، تعریف می‌شود. تفاوت فاصله‌ی قبل ($r_0 - r_1$) و بعد از جابه‌جایی یا تغییرشکل ($r'_1 - r'_0$) اگر مساوی باشند، یک مسیر مبهم رخ داده است. در روش تشخیصی که در بخش قبل مطرح شده است، در صورتی که $T'(x_1, y_1, z_1)$ بر روی مسیر مبهم جابه‌جا شده باشد، در تشخیص رانش زمین با شکست مواجه می‌شود. مطابق شکل ۷، با در نظر گرفتن خطوط انحنای r_0 و r_1 ، نقطه‌ی T می‌تواند بر روی دایره‌ی حاصل از تقاطع محوری ۲ کره با شعاع r_0 و r_1 قرار داشته باشد. بنابراین $T(x_0, y_0, z_0)$ بر روی معادلات $x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = r_0^2$ و $(x_0 - a)^2 + y_0^2 + z_0^2 = r_1^2$ صدق می‌کند. دایره‌ی ناشی از تقاطع ۲ کره بر روی صفحه‌ی $y-z$ قرار دارد و با فرض $x = x_0$ می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۹ ثابت شود:

$$\begin{aligned} x_0 &= (a^2 + r_0^2 - r_1^2) / 2a = c / 2a \\ c &= a^2 + r_0^2 - r_1^2 \\ y_0^2 + z_0^2 &= r_0^2 - c^2 / (4a^2) \end{aligned} \quad (9)$$

در رابطه‌ی ۳، D' نامعلوم است، ولی از طریق فاز φ'_D اندازه‌گیری شده و مطابق رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است:

$$D' = \lambda \cdot \varphi'_D / 360 \quad (6)$$

که در آن، λ طول موج کریر بسامدی است. توجه شود که φ'_D یک مقدار گنگ (یا مختلط) است و در محدوده‌ی $0^\circ < \varphi'_D < 360^\circ$ است. بنابراین رابطه‌ی ۴ فقط بخش کسری D' را به دست می‌دهد. برای $\lambda < \delta$ ، مقدار $D - D'$ بخش کسری از λ است. از آنجا که بخش صحیح D' می‌تواند از D به دست آید، با داشتن مقادیر: $r_0, r_1, D = r_0 - r_1 = N_D \cdot \lambda + \Delta D$ و با دانستن اینکه $\Delta D = D - N_D \cdot \lambda$ ، مقدار درست D' می‌تواند از طریق $D' = N_D \cdot \lambda + \Delta D'$ محاسبه شود. از آنجا که $D - D'$ کسری از λ است و رابطه‌ی $D - D' = \Delta D - \Delta D'$ را داریم، می‌توان رابطه‌ی ۷-۱ را نوشت:

$$\delta = \frac{\Delta D - \Delta D'}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1} \quad (7-1)$$

همان‌طور که در رابطه‌ی ۷-۱ مشخص است، عامل اصلی بروز خطا در اندازه‌گیری، θ_1 و θ_0 هستند که به جهت جابه‌جایی و تغییرشکل وابسته‌اند. فرض کنیم $\theta'_0 = \theta_0 + \varepsilon$ و $\theta'_1 = \theta_1 + \varepsilon$ است، و ε خطای کوچک (انحراف) باشد، δ' (ناشی از ε) از رابطه‌ی ۷-۲ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \delta' &= \frac{\Delta D - \Delta D'}{\cos(\theta_0 + \varepsilon) - \cos(\theta_1 + \varepsilon)} \\ &\approx \frac{\Delta D - \Delta D'}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1 - \varepsilon \cdot (\sin \theta_0 - \sin \theta_1)} \end{aligned} \quad (7-2)$$

خطای جابه‌جایی ناشی از ε مطابق رابطه‌ی ۸ است:

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= \delta' - \delta \approx \varepsilon \cdot (\Delta D - \Delta D') \cdot \frac{\sin \theta_0 - \sin \theta_1}{(\cos \theta_0 - \cos \theta_1)^2} \\ \frac{\Delta \delta}{\delta} &\approx \varepsilon \cdot \frac{\sin \theta_0 - \sin \theta_1}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1} \end{aligned} \quad (8)$$

۳.۲. سیستم با آرایه‌هایی از T_x

سیستم مذکور با یک T_x به راحتی می‌تواند به یک سیستم ۲ بعدی، با آرایه‌ی از T_x ها برای پوشش محدوده‌ی وسیعی جهت مانیتور کردن رانش زمین گسترش یابد. یک مثال $T_x (2 \times 3)$ در شکل ۵ نشان داده شده است. هر T_x از آرایه برنامه‌ریزی شده است تا طبق توالی منظم، سیگنال خود را ارسال کند. هر T_x می‌تواند بردار شیب مخصوص به خودش را داشته باشد.

معادله‌ی ۱۳، معادله‌ی مسیر گنگ در صفحه‌ی $x-y$ است. با داشتن مختصات T و m_{ah} ، ارتفاع در امتداد مسیر گنگ در نقطه‌ی T' از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

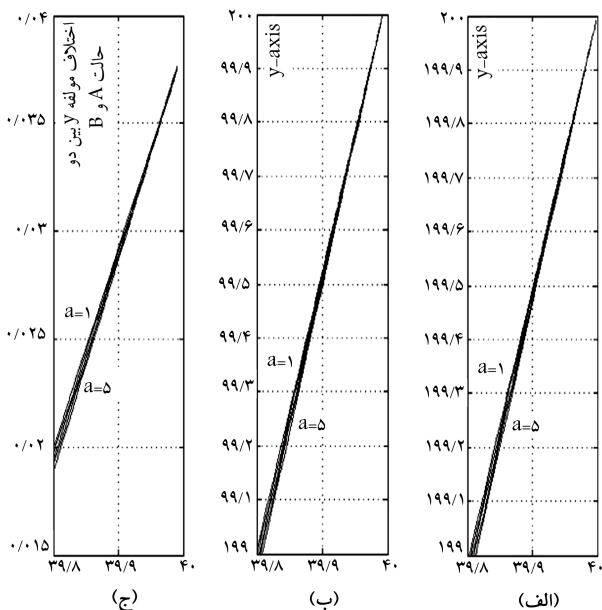
$$z = z_0 - m_{ah} \cdot \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (15)$$

شکل ۸، مسیر گنگ را در صفحه‌ی $x-y$ نشان می‌دهد، که T_x و گیرنده‌ها در نقاط $T(40^{\circ}m, 20^{\circ}m)$ ، $R_0(0, 0)$ و $R_1(a, 0)$ با $\alpha = 1$ تا $a = 5$ قرار گرفته‌اند. شکل ۸ الف، نشان‌دهنده‌ی حالتی است که L_0 و L_1 با میزان یکسانی از δ کاهش یافته‌اند؛ در حالی که شکل ۸ ب، مسیر را بر پایه‌ی رابطه‌ی ۱۳ نشان می‌دهد. در هر دو صورت، مسیر گنگ به‌عنوان تابعی از α (فاصله بین R_0 و R_1 دو گیرنده) بیان می‌شود. برای هر مؤلفه‌ی x ، اختلاف مؤلفه‌ی y بین مسیرهای نشان داده شده در شکل ۸ الف و ۸ ب در شکل ۸ ج نشان داده شده است.

به دلیل جاذبه‌ی زمین، مؤلفه‌ی z نقطه‌ی T_x در حین جابه‌جایی و تغییر شکل کم می‌شود. در این حالت خاص، همخوانی یا عدم همخوانی شیب m_{Th} با شیب m_{ah} (مسیر میهم) در صفحه‌ی $x-y$ بررسی می‌شود. اگر $m_a = m_T$ وقتی که $m_T = (x_1 - x_0)/(y_1 - y_0)$ ، روش تشخیص براساس اختلاف فاز شکست می‌خورد، در غیر این صورت درست کار می‌کند. معادله‌ی ۱۷-۱، برای محاسبه‌ی میزان انحراف زمین در یک سیستم با T_x منفرد به کار می‌رود. وقتی که آرایه‌ی از T_x ها استفاده شود، هر T_x شیب سطح شیب‌دار و مسیر میهم خودش را خواهد داشت. مکان دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون باید طوری طراحی شود که هیچ‌کدام از مسیرهای گنگ بر روی مسیر جابه‌جایی یا تغییر شکل قرار نگیرد.

۵.۲. بلوک دیاگرام و آنالیز سیگنال سیستم فرستنده - گیرنده

عملکرد کلی سیستم گیرنده - فرستنده در بلوک دیاگرام به صورت یک T_x و دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون در شکل ۹ نشان داده شده است. یک T_x معمولی یک سیگنال با بسامد حامل ثابت می‌فرستد. بسامد حامل F_c با بسامد گیرنده‌ها فرق دارد.



شکل ۸. مسیر گنگ در صفحه‌ی $x-y$ (خطای مؤلفه‌ی y به‌عنوان تابعی از a).

مرکز دایره در $(c/2a, 0, 0)$ و شعاع آن $\sqrt{r_0^2 - c^2/(4a^2)}$ است. مسیر گنگ وقتی رخ می‌دهد که جابه‌جایی و رانش، یا به عبارتی T طوری حرکت کند که r_0 و r_1 هر دو با δ یکسانی تغییر نکنند. بنابراین: $r_0' = r_0 - \delta$ ، $r_1' = r_1 - \delta$ ، $\delta > 0$ (به خاطر جاذبه‌ی زمین)، با فرض $C' = C - 2(r_0 - r_1)\delta$ از تقاطع ۲ کروی جدید با شعاع‌های r_0' و r_1' یک دایره‌ی جدید با $x = x'$ جدید و شعاع جدید به صورت رابطه‌ی ۱۰ شکل می‌گیرد:

$$\begin{aligned} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 &= r_1'^2 \\ (x_1 - a)^2 + y_1^2 + z_1^2 &= r_1'^2 \Rightarrow x_1 = [c - 2(r_0 - r_1)\delta]/2a = c'/2a \\ y_1^2 + z_1^2 &= (r_0 - \delta)^2 - \frac{c'^2}{4a^2} \end{aligned} \quad (10)$$

T' حاصل تقاطع سطح کوهپایه با این دایره‌ی جدید است. مرکز این دایره در $(c'/2a, 0, 0)$ و شعاع آن $\sqrt{(r_0 - \delta)^2 - (c'^2/4a^2)}$ است، که تقریباً برابر $\delta [c - 2(r_0 - r_1)] / (2a^2 r_0) - [1 - c(r_0 - r_1)] / (2a^2 r_0)$ است. مسیر میهم در دستگاه سه‌بعدی در مکان هندسی T' با تغییرات مقدار r_0' و r_1' است. اثبات معادله‌ی ۳ بعدی، مسیر میهم کاملاً پیچیده است. در هر صورت باید در ۲ بُعد حل شود و مقدار پارامتر محور z با استفاده از مقدار شیب مسیر گنگ $m_{ah} = (z_1 - z_0) / \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$ محاسبه شود. در صفحه‌ی T و $x-y$ می‌تواند حاصل تقاطع دو دایره‌ی ناشی از تقاطع دو کره با $z_0 = 0$ و شعاع L_0 و L_1 باشد. لذا روابط ۱۱ را داریم:

$$\begin{aligned} L_0 &= r_0 \cos \theta_\alpha \\ L_1 &= r_1 \cos \theta_B \\ \theta_\alpha &= \text{tg}^{-1}(y_0/x_0) \\ \theta_B &= \text{tg}^{-1}[(y_0/(x_0 - a))] \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن، θ_α و θ_B زوایای خطی R_0 و R_1 تا نقطه‌ی T هستند. $[L = L_0 - L_1]$ اختلاف میزان انحراف است. این دایره می‌تواند تصویری از فضای ۳ بعدی به یک صفحه‌ی ۲ بعدی در شکل ۳ باشد. با فرض $z = 0$ ، رابطه‌ی ۱۰ در صفحه‌ی $x-y$ به صورت رابطه‌ی ۱۲ ساده می‌شود:

$$\begin{aligned} x &= \frac{c - 2(L_0 - L_1)\delta}{2a} \\ y^2 &= (L_0 - \delta)^2 - \left[\frac{c}{2a} - \frac{(L_0 - L_1)\delta}{a} \right]^2 \\ y &\approx L_0 - \frac{c^2}{\lambda a^2 L_0} - \left[1 - \frac{c(L_0 - L_1)}{2a^2 L_0} \right] \delta \approx L_0 - \frac{c^2}{\lambda a^2 L_0} - \delta \end{aligned} \quad (12)$$

با حذف δ از x و y در معادله‌ی ۱۲، y مطابق رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$y = L_0 - \frac{(a^2 + L_0^2 - L_1^2)^2}{\lambda a^2 L_0} - \frac{a^2 + L_0^2 - L_1^2}{2(L_0 - L_1)} + \frac{a}{(L_0 - L_1)} x = m_a x + K \quad (13)$$

که در آن، $m_a = a/(L_0 - L_1)$ شیب مسیر گنگ و K از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$K = L_0 - \frac{(a^2 + L_0^2 - L_1^2)^2}{\lambda a^2 L_0} - \frac{(a^2 + L_0^2 - L_1^2)}{2(L_0 - L_1)} \quad (14)$$

اختلاف فاز از رابطه ی ۱۹ به دست می آید:

$$\varphi_D(t) = \varphi_0 - \varphi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{v_{0s}(t)}{v_{0c}(t)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{v_{1s}(t)}{v_{1c}(t)} \right] \quad (19)$$

$$= (w_c + \Delta w_c)(\tau_0 - \tau_1)$$

فاز φ_D از خلال پروسه ی نصب اولیه (فاز آموزش) به دست می آید. بعد از نصب اولیه، فاز φ'_D اندازه گیری می شود و برای محاسبه ی $\Delta D' = r'_0 - r'_1$ به کار می رود. اگر $\Delta D = r_0 - r_1$ ، جابه جایی یا تغییر شکل پایه δ از معادله ی ۷-۱ به دست خواهد. از آنجا که $10^{-2} \times 0.5 = \Delta F_c / F_c$ ، خطای محاسباتی در تخمین δ ، به دلیل Δw_c (or $\Delta \varphi_D$) برابر $10^4 \times \delta / 0.5$ خواهد شد، که قابل صرف نظر است.

شبیه سازی رایانه یی سه بعدی با استفاده از نرم افزار مطلب برای سیستم پایش و تشخیص رانش زمین با استفاده از شبکه های حسگر بی سیم براساس شش T_x ، که بر روی منطقه ی فرضی نصب شده اند، انجام شده است. در شبیه سازی مکان، R_0 ، R_1 و T_x ، ورودی های برنامه ی شبیه سازی مطلب هستند. مکان T^1 به عنوان مرجعی برای سنجش میزان دقت محاسبات داده شده است، تا این موارد محاسبه شود:

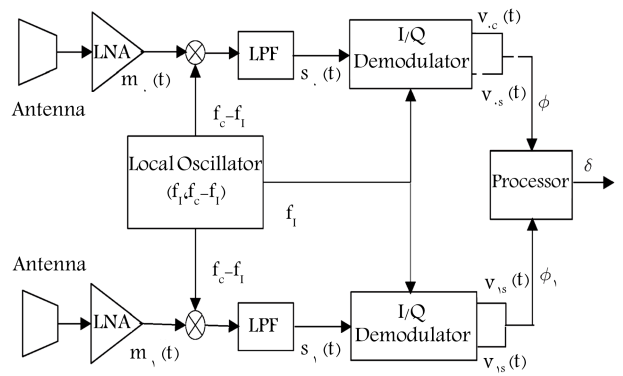
- اختلاف فاز بین φ_D و φ'_D .
- زاوای تخمین زده شده ی θ_0 و θ_1 .
- بردار \vec{M} (ماتریس)، بردار ۳ بعدی شیب کوه در نقطه ی T .

نکته: مدل شبیه سازی بر روی رایانه با CPU اینتل انجام شده است. واضح است تا وقتی که $D - D' < \lambda$ و $D - D' = D - D'$ باشد، فاز φ_D بسیار مهم تر از طول مطلق (r_0 و r_1) است. در هر صورت تخمین دقیق بردار شیب سطح زمین بر دقت محاسبه ی θ_0 و θ_1 و طبیعتاً در δ اثر دارند. علاوه بر آن افزایش فاصله یی دو گره گیرنده در δ اثرگذار نیست، اما دقت محاسبه ی $\Delta D - \Delta D'$ بستگی به میزان تخمین شیب سطح افزایش می دهند. خطای اندازه گیری برای θ_0 و θ_1 بسته به میزان تخمین شیب سطح زمین، منجر به درصد تغییرات کمتری (در حدود ۷.۶٪) برای δ می شود. همان طور که در روابط اخیر نشان داده شده است، فاصله ی α بین دو گره گیرنده بر روی مسیر مهم، به ازاء یک T_x معین تأثیر دارد. همچنین در اختلاف زاویه های θ_0 و θ_1 و $\Delta D - \Delta D'$ تأثیر می گذارد. بسته به طول موج حامل سیگنال و مکان T_x ، مقدار α باید به اندازه ی کافی بزرگ باشد تا $(\Delta D - \Delta D')$ و $(\cos \theta_0 - \cos \theta_1)$ خیلی کوچک نشوند و دقت محاسبات از بین نرود و در طرف مقابل α نباید خیلی زیاد باشد تا در کلاک سنکرون سازی دو گره گیرنده اثر منفی بگذارد. در پایان، میزان جابه جایی و تغییر شکل پایه ی پل از طریق روش مذکور محاسبه و با فاصله ی واقع بین T' و T حاصل از فاصله ی هندسی دو نقطه در فضا مقایسه شده است (رابطه ی ۲۰):

$$T_x(x_0, y_0, z_0), \quad T'_x(x_1, y_1, z_1)$$

$$\delta_{Real} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \quad (20)$$

همچنین یک واسطه گرافیکی (GUI) ^{۲۲} برای وارد کردن مختصات و نمایش محاسبات خروجی و رسم نتایج شبیه سازی در نرم افزار مطلب انجام شده است. جزئیات و نتایج شبیه سازی در بخش ۳ به همراه ذکر مثال ارائه شده است.



شکل ۹. بلوک نمودار سیستم دو گره گیرنده ی بی سیم سنکرون.

راندمان معمولی مورد نیاز ۲۵ ppm تا ۲۵ ppm + (در محدوده ی بسامدی که سیستم پایدار می ماند) است. بنابراین بیشینه خطای F_c بین فرستنده و گیرنده 2° ۵۰ ppm خواهد بود. با فرض بسامد حامل برای T_x مقدار $F_c + \Delta F_c$ باشد، بسامد حامل گیرنده نیز F_c با بیشینه اختلاف بسامد $\Delta F_c = 0.5 \times F_c / 10^2$ خواهد بود. در شکل ۵، دو گره گیرنده ی بی سیم، یک اسپلاتور محلی را به اشتراک می گذارند، که دو بسامد F_I و $F_c - F_I$ را تولید می کند، که F_I بسامد باند میانی است. سیگنال های تقویت شده ی دریافتی $m_0(t)$ و $m_1(t)$ به صورت مستقل با بسامد $F_c - F_I$ دمدوله می شوند. سپس این دو سیگنال از فیلتر پایین گذر (LPF) عبور داده می شوند تا $S_0(t)$ و $S_1(t)$ به وجود آیند. از دو دمدولاتور (I-Q) هم فاز مربعی برای تولید سیگنال های باند پایه ی $v_0(t)$ و $v_1(t)$ که بعداً برای تولید اطلاعات اختلاف فاز بین دو گره گیرنده به کار خواهد آمد، استفاده می شود. اگر سیگنال $p(t)$ ارسال شده از T_x باشد، به صورت $p(t) = \cos[w_c + \Delta w_c]t$ ، $0 \leq t \leq T_p$ و دوره ی تناوب پالس باشد، در این صورت سیگنال های دریافتی $m_0(t)$ و $m_1(t)$ به صورت رابطه ی ۱۶ محاسبه می شوند:

$$m_0(t) = \cos[(w_c + \Delta w_c)(t - \tau_0)]$$

$$m_1(t) = \cos[(w_c + \Delta w_c)(t - \tau_1)] \quad (16)$$

که در آن، τ_0 و τ_1 به ترتیب تأخیر ارسال از T_x به گیرنده های R_0 و R_1 است. با ضرب $m_0(t)$ و $m_1(t)$ در بسامد $F_c - F_I$ و عبور از فیلتر پایین گذر، رابطه ی ۱۷ را خواهیم داشت:

$$s_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos[(\Delta w_c + w_i)t - (w_c + \Delta w_c)\tau_0]$$

$$s_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos[(\Delta w_c + w_i)t - (w_c - \Delta w_c)\tau_1] \quad (17)$$

دو بسامد میانی مذکور، به یک I-Q دمدولاتور ارسال و سیگنال های باند پایه $v_{0c}(t)$ ، $v_{0s}(t)$ ، $v_{1c}(t)$ ، $v_{1s}(t)$ به صورت رابطه ی ۱۸ حاصل می شوند:

$$v_{0c}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c)\tau_0]$$

$$v_{0s}(t) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c)\tau_0]$$

$$v_{1c}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c)\tau_1]$$

$$v_{1s}(t) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c)\tau_1] \quad (18)$$

۳. نتیجه‌گیری و تفسیر داده‌های شبیه‌سازی

شبیه‌سازی رایانه‌ای برای تشخیص کارایی و دقت این روش با کمک نرم‌افزار مطلب برای مثال‌های متنوعی جهت بررسی چگونگی تغییر وضعیت فرستنده‌های شش‌گانه، ناشی از وقوع حالات مختلف و متنوعی از رانش زمین انجام شده است، که در بخش انتهایی این قسمت یک نمونه مثال با ذکر ارقام و محاسبات به‌عنوان نمونه ارائه شده است. از طرف دیگر، نتایج و دقت هر کدام از پیش‌بینی‌ها در GUI طراحی و در هر بار اجرای برنامه برای هر کدام از فرستنده‌های T_1 تا T_6 به‌طور مجزا محاسبه و اعلام شده است. در GUI قابلیت‌های متعددی جهت کارایی و آسان‌کردن شرایط برای کاربر در نظر گرفته شده است، که عبارت‌اند از (مطابقی با شکل ۱۰):

بخش اول: تعیین بسامد کریر سیستم و مکان گره‌های گیرنده‌ی بی‌سیم R_1 و R_0 ؛
 بخش دوم: تعیین مکان گره اول قبل و بعد از وقوع رانش؛
 بخش سوم: تعیین مکان گره دوم قبل و بعد از وقوع رانش؛
 بخش چهارم: تعیین مکان گره سوم قبل و بعد از وقوع رانش؛
 بخش پنجم: تعیین مکان گره چهارم قبل و بعد از وقوع رانش؛
 بخش ششم: تعیین مکان گره پنجم قبل و بعد از وقوع رانش؛
 بخش هفتم: تعیین مکان گره ششم قبل و بعد از وقوع رانش؛
 بخش هشتم: قابلیت فعال و غیرفعال و یا خاموش کردن هرگره فرستنده به‌طور مجزا؛
 بخش نهم: انتخاب فرستنده‌ی موردنظر جهت نمایش اطلاعات آن؛

بخش دهم: نمایش مقادیر محاسباتی مختلف و میزان خطا در محاسبه‌ی δ ؛

بخش یازدهم: نمایش وضعیت فرستنده‌های مختلف به‌صورت بلادرنگ؛

بخش دوازدهم: نمایش سیگنال‌های مختلف در مراحل مختلف در فرستنده و گیرنده؛

بخش سیزدهم: نمایش ۳ بعدی و ۲ بعدی شرایط حاکم بر فرستنده‌ها در پاسخ به پدیده‌ی رانش زمین؛

بخش چهاردهم: رسم ۳ نما برای تفسیر و تحلیل بهتر پدیده‌ی رانش زمین و روند وقوع آن.

به‌عنوان توضیحات تکمیلی باید اشاره شود که مختصات مکان‌های T'_i در GUI که توسط کاربر وارد می‌شود، به‌عنوان مبنای خط‌سنجی برای محاسبات روش پیشنهادی از طریق مقایسه با فرمول فاصله‌ی فضایی دو نقطه در فضا به کار می‌رود (δ_{real}).

۱.۳. بررسی یک نمونه‌ی موردی از شبیه‌سازی و نتایج و دقت آن در بخش حاضر، با بیان این فرضیات به بررسی میزان دقت و جزئیات شبیه‌سازی روش مطرح شده در نوشتار حاضر پرداخته شده و این اطلاعات به‌عنوان داده‌های ورودی برنامه‌ی شبیه‌ساز مفروض است:

-- بسامد کریر (F_c): 4 GHZ؛

-- مختصات گره گیرنده‌ی اول (R_0): (0, 0, 0)؛

-- مختصات گره گیرنده‌ی دوم (R_1): (1, 0, 0)؛

-- مختصات گره فرستنده‌ی اول (T_1):

$$T_1(10, 10, 10) \rightarrow T'_1(10/5, 10, 10)$$

-- مختصات گره فرستنده‌ی دوم (T_2):

$$T_2(10, 11, 10) \rightarrow T'_2(10, 11, 10/5000)$$

-- مختصات گره فرستنده‌ی سوم (T_3):

$$T_3(11, 10, 10) \rightarrow T'_3(11, 10, 10/5000)$$

-- مختصات گره فرستنده‌ی چهارم (T_4):

$$T_4(11, 11, 10) \rightarrow T'_4(11, 11, 10/5)$$

-- مختصات گره فرستنده‌ی پنجم (T_5):

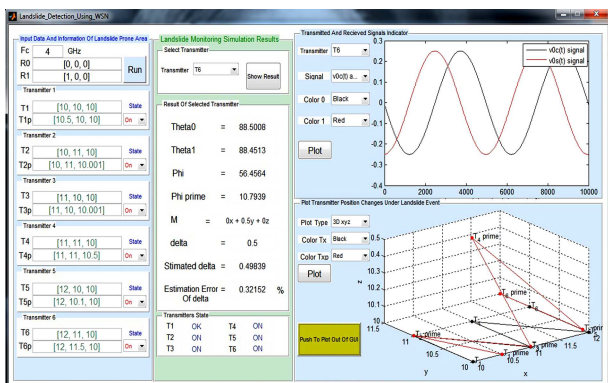
$$T_5(12, 10, 10) \rightarrow T'_5(12, 10/1, 10)$$

-- مختصات گره فرستنده‌ی ششم (T_6):

$$T_6(12, 11, 10) \rightarrow T'_6(12, 11/5, 10)$$

پس از اجرای شبیه‌سازی، اطلاعات مطرح شده در بخش دوم نوشتار حاضر و کمیت‌های محاسباتی برای هر کدام از فرستنده‌ها مطابق جدول‌های ۱ الی ۳ خواهند بود.

در شکل ۱۱، پنجره‌ی GUI مرتبط با ورودی‌های فوق ارائه شده است، که در آن اطلاعات ورودی‌ها و پارامترهای محاسبه شده (برای مثال در رابطه با T_6) و سیگنال‌های دریافتی (برای مثال $V_{os}(t)$ و $V_{oc}(t)$) و همچنین نمایش ۳ بعدی (3D) نتایج به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شده است، شبیه‌سازی قابلیت به تصویر کشیدن ۳ بعدی و نگاشت آن به صفحات دو بعدی را دارد و در شکل ۱۲، نیز سه نما برای ناظری که در سه جهت مقابل کنار و بالای سطح به رخداد رانش زمین می‌نگرد، برای تفسیر بهتر پدیده‌ی رانش رسم شده است.



شکل ۱۱. نمایش نتایج شبیه‌سازی در GUI.



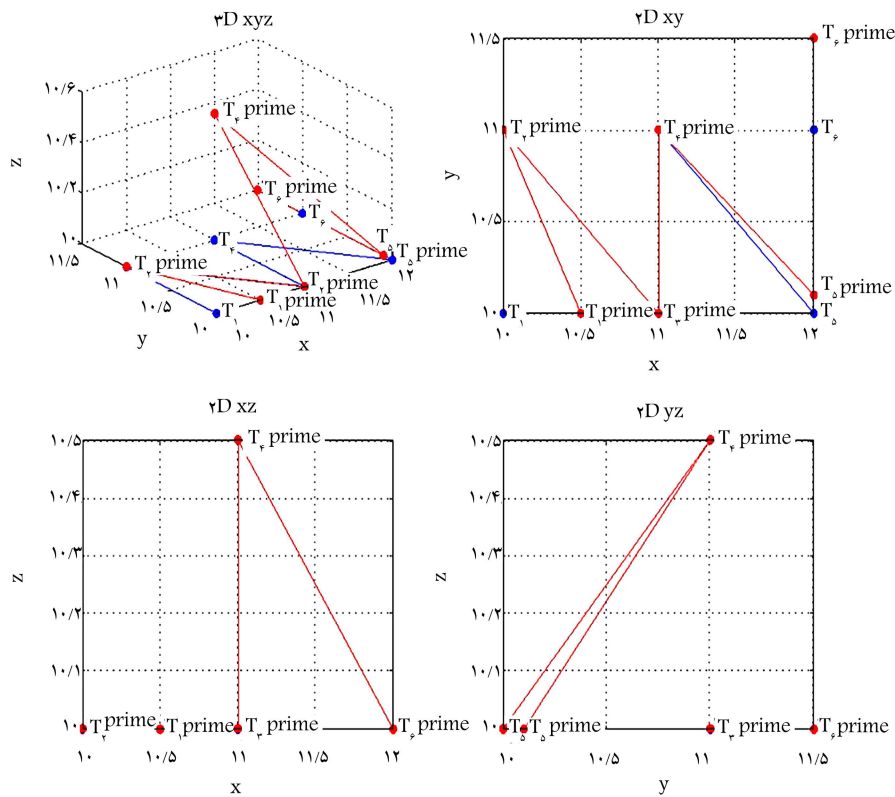
شکل ۱۰. معرفی بخش‌های مختلف GUI طراحی شده.

جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم پیشنهادی (بخش اول نتایج).

φ'_D	φ_D	τ_1	τ_0	r'_1	r'_0	r_1	r_0	T_{∞}
۲۵۰٫۶۵۰۱	۱۵۵٫۹۱۰۴	۵٫۵۸۷۷ e-۰۸	۵٫۷۷۳۵ e-۰۸	۱۷٫۰۳۶۷	۱۷٫۶۱۳۹	۱۶٫۷۶۳۱	۱۷٫۳۲۰۵	T_1
۶۴٫۰۰۹۴	۶۴٫۰۹۲۴	۵٫۷۹۲۷ e-۰۸	۵٫۹۷۲۲ e-۰۸	۱۷٫۳۷۸۷	۱۷٫۹۱۷	۱۷٫۳۷۸۱	۱۷٫۹۱۶۵	T_T
۳۴۰٫۶۸۱۸	۳۴۰٫۷۷۴	۵٫۷۷۳۵ e-۰۸	۵٫۹۷۲۲ e-۰۸	۱۷٫۳۲۱۱	۱۷٫۹۱۷	۱۷٫۳۲۰۵	۱۷٫۹۱۶۵	T_T
۲۶۰٫۷۷۴۷	۲۴۸٫۶۳۰۳	۵٫۹۷۲۲ e-۰۸	۶٫۱۶۴۴ e-۰۸	۱۸٫۲۰۰۳	۱۸٫۷۶۸۳	۱۷٫۹۱۶۵	۱۸٫۴۹۳۲	T_T
۱۳۸٫۷۰۳۳	۱۴۷٫۸۱۹۲	۵٫۹۷۲۲ e-۰۸	۶٫۱۸۲۴ e-۰۸	۱۷٫۹۷۲۵	۱۸٫۶۰۱۳	۱۷٫۹۱۶۵	۱۸٫۵۴۷۲	T_{δ}
۱۰٫۷۹۳۹	۵۶٫۴۵۶۴	۶٫۱۶۴۴ e-۰۸	۶٫۳۶۸۳ e-۰۸	۱۸٫۷۹۴۹	۱۹٫۳۹۷۲	۱۸٫۴۹۳۲	۱۹٫۱۰۵	T_{ξ}

جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم پیشنهادی (بخش دوم نتایج).

D'	Δ_D	D	θ_1	θ_0	M	m_t	m_a	T_{∞}
۰٫۵۷۷۲۲	۰٫۰۳۲۴۸۱	۰٫۵۵۷۴۵	۸۸٫۲۹۱۵	۸۸٫۳۴۶۵	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	-Inf	۱٫۴۵۲۴	T_1
۰٫۵۳۸۳۴	۰٫۰۱۳۳۵۳	۰٫۵۳۸۳۳	۸۹٫۹۹۶۷	۸۹٫۹۹۸۶	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	NaN	۱٫۵۳۰۵	T_T
۰٫۵۹۵۹۸	۰٫۰۷۰۹۹۵	۰٫۵۹۵۹۶	۸۹٫۹۹۶۷	۸۹٫۹۹۶۸	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	NaN	۱٫۳۸۱۳	T_T
۰٫۵۶۸۰۸	۰٫۰۵۱۷۹۸	۰٫۵۷۶۷۷	۸۸٫۴۰۱۴	۸۸٫۴۵۱۳	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	NaN	۱٫۴۴۸۷	T_T
۰٫۶۲۸۹	۰٫۰۳۰۷۹۶	۰٫۶۳۰۷۶	۸۹٫۶۸۰۲	۸۹٫۶۹۱۱	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	0	۱٫۳۲۵۵	T_{δ}
۰٫۶۰۲۲۵	۰٫۰۱۱۷۶۲	۰٫۶۱۱۷۳	۸۸٫۴۵۱۳	۸۸٫۵۰۰۸	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	0	۱٫۳۸۴۱	T_{ξ}



شکل ۱۲. رسم سه نمای حاصل از شبیه‌سازی شرایط حاکم بر رانش زمین.

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم پیشنهادی (بخش سوم نتایج).

Estimation error (%)	$\delta_{estimated}$	δ_{real}	$D - D'$	$\Delta_{D'}$	T_{est}
۰٫۱۴۱۲۲	۰٫۵۰۰۷۱	۰٫۵	۰٫۱۹۷۵۶	۰٫۰۵۲۲۱۹	T_1
۴٫۳۳۰۵	۰٫۰۰۰۵۵۶۶۹	۰٫۰۰۱	۹٫۶۲۵۶ e-۰۶	۰٫۰۱۳۳۳۵	T_2
۴٫۸۴۶۸	۰٫۰۰۰۵۵۱۵۳	۰٫۰۰۱	۱٫۰۵۹۳ e-۰۵	۰٫۰۷۰۹۷۵	T_3
۰٫۳۳۰۷۲	۰٫۴۹۸۳۵	۰٫۵	۰٫۰۰۸۶۹۱۱	۰٫۰۴۳۰۷۸	T_4
۱٫۶۶۰۷	۰٫۰۹۸۳۳۹	۰٫۱	۰٫۰۰۱۸۶۷۶	۰٫۰۲۸۸۹۷	T_5
۰٫۳۲۱۵۲	۰٫۴۹۸۳۹	۰٫۵	۰٫۰۰۹۴۸۲۴	۰٫۰۰۲۲۴۸۷	T_6

۴. نتیجه‌گیری

یک روش جدید برای پایش پدیده‌ی موسوم به رانش زمین بر پایه‌ی استفاده از قراردادن آرایه‌ی از فرستنده‌های بی‌سیم در منطقه‌ی مظنون به وقوع رانش و دریافت سیگنال‌های ارسال شده با کمک دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون شده، در قالب یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم یکپارچه، طراحی و مبنای هندسی و پردازش سیگنال آن کاملاً بررسی و ارائه شده است. در واقع، در روش پیشنهادی مطرح شده، اختلاف فاز بین دو گیرنده‌ی سنکرون برای تشخیص و آشکارسازی وقوع و میزان رانش زمین تفسیر و ارزیابی شده است. مجموعه‌ی متنوعی از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی برای ارزیابی روش پیشنهادی برای پایش رانش زمین با استفاده از ۶ فرستنده انجام شده است. دقت متوسط در تشخیص میزان جابه‌جایی قابل تشخیص برای هر فرستنده در رنج ۰٫۱ میلی‌متر بوده است، که نشان‌دهنده‌ی کارایی روش پیشنهادی مذکور برای اهداف پایش رانش زمین بوده است.

پانویس‌ها

1. rock fall
2. earthflow
3. complex landslide
4. slide-earthflow
5. regolith
6. beam
7. wireless sensor networks
8. synthetic aperture radar
9. pore pressure transducer
10. Geophone
11. soil moisture sensor
12. deep earth probe
13. Hybrid
14. remote sensing
15. Matlab
16. landslide real-time monitoring
17. correlation
18. area of interest
19. training phase
20. pulse per minute
21. low-pass filter
22. graphical user interface

منابع (References)

1. Angeli, M.G., Pasuto, A. and Silvano, S. "A critical review of landslide monitoring experiences", *Engineering Geology*, **55**(3), pp. 133-147 (2000).
2. Barrenetxea, G., Ingelrest, F., Schaefer, G. and Vetterli, M. "The hitchhiker's guide to successful wireless sensor network deployments", in *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pp. 43-56 (2008).

3. Bonanno, C., Magnani, M., Lapini, M. and Piantelli, E. "Landslide monitoring system based on integrated automatic total station and GPS", *Geotitalia*, **2**, p. 221 (2007).
4. Shoorabi Sani, S., Baghaei-Nejad, M. and Kalate Aarabi, M. "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*, **16**(4), pp. 281-288 (2015).
5. Dempster, A.P., Laird, N.M. and Rubin, D.B. "Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm", *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, **39**(10), pp. 1-38 (1977).
6. Luzi, G., *Ground Based SAR Interferometry: A Novel Tool for Geoscience*, INTECH Open Access Publisher (2010).
7. Ramesh, M.V. "Real-time wireless sensor network for landslide detection", in *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM'09), 3rd International Conference on*, pp. 405-409 (2009).
8. Richards, M.A. "A Beginner's Guide to interferometric SAR concepts and signal processing [AESS tutorial IV]", *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, **22**(9), pp. 5-29 (2007).
9. Sakai, T., Jeong, J.H. and Takagi, M. "Measurement method of landslide displacement with ground based portable laser scanner", in *Proceedings of International Symposium on Management Systems for Disaster Prevention* (2006).
10. Taneda, K., Niimi, S. and Takayama, S. "Estimation method of dynamic behaviors of network sensing node at landslide disaster", *SICE Annual Conference (SICE) Proceedings*, pp. 2019-2023 (2011).
11. Wang, B.C., *Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing*, John Wiley & Sons, 368 p. (2008).

12. Ahmed, S., Mahajan, A., Gupta, S. and Suri, A. "An optimal selection of routing protocol for different sink placements in a wireless sensor network for landslide detection system", *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), International Conference on*, IEEE, Bhopal, India, pp. 358-363 (2014).
13. Arbanas, Ž., Sassa, K., Nagai, O., Jagodnik, V., Vivoda, M., Jovančević, S.D., Peranić, J. and Ljutić, K. "A landslide monitoring and early warning system using integration of GPS, TPS and conventional geotechnical monitoring methods", *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Springer, pp. 631-636 (2014).
14. Bin Abas, F. and Takayama, S. "Implementation of multiple host nodes in wireless sensing node network system for landslide monitoring", *Journal of Physics: Conference Series*, **588**(1) (2015).
15. Shoorabi Sani, S., Baghaei-Nejad, M. and Kalate Aarabi, M. "Using a phase difference detection technique for monitoring the structural health of bridge piers", *Structural Control and Health Monitoring*, **23**(5), pp. 857-875 (2015).
16. Shahrokh abadi, M.H. and Shoorabi sani, S. "A novel system based on dual-receiver for movement detection in structures: A bridge case study", *Int. J. Systems, Control and Communications*, (2015).
17. Ramesh, M.V. "Design, development, and deployment of a wireless sensor network for detection of landslides", *Ad Hoc Networks*, **13**, pp. 2-18 (2014).
18. Senturk, I.F., Akkaya, K. and Yilmaz, S. "Relay placement for restoring connectivity in partitioned wireless sensor networks under limited information", *Ad Hoc Networks*, **13**, pp. 487-503 (2014).
19. Tofani, V., Hong, Y. and Singhroy, V. "Introduction: Remote sensing techniques for landslide mapping and monitoring", *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Springer, pp. 301-303 (2014).
20. Travelletti, J., Malet, J.P. and Delacourt, C. "Image-based correlation of laser scanning point cloud time series for landslide monitoring", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **32**, pp. 1-18 (2014).
21. Wang, G., Kearns, T.J., Yu, J. and Saenz, G. "A stable reference frame for landslide monitoring using GPS in the Puerto Rico and Virgin Islands region", *Landslides*, **11**(1), pp. 119-129 (2014).
22. Wang, K.L., Lin, M.L., Lin, J.T., Huang, S.C., Liao, R.T. and Chen, C.W. "Monitoring of the evolution of a deep-seated landslide in Lushan Area, Taiwan", *Engineering Geology for Society and Territory*, Springer, **2**, pp. 1317-1320 (2015).
23. ZHI, M.M., Pan, P. and WEI, Z.L. "Research on monitoring methods of landslide based on a demonstration project in Zhejiang Province, southeast of China", *International Conference on Mechanics and Civil Engineering (ICMCE)*, pp. 859-863 (2014).