

# پایش رانش زمین با استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم

سامان شوراچی 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.

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

## ۱. مقدمه

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»<sup>۱</sup> یک رانش است که شامل مواد یک‌دست، سخت و سنگین است، که به صورت سقوط در شیب پایین می‌آیند و «جاری‌شدن زمین»<sup>۲</sup> یک رانش است که شامل جاری‌شدن مواد به سطح پایین شیب است. یک رانش پیچیده<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> نام‌گذاری می‌شود.

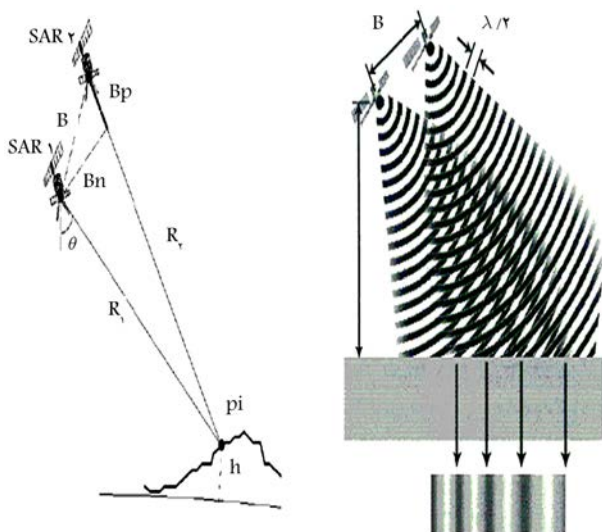
\* نویسنده مسئول

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

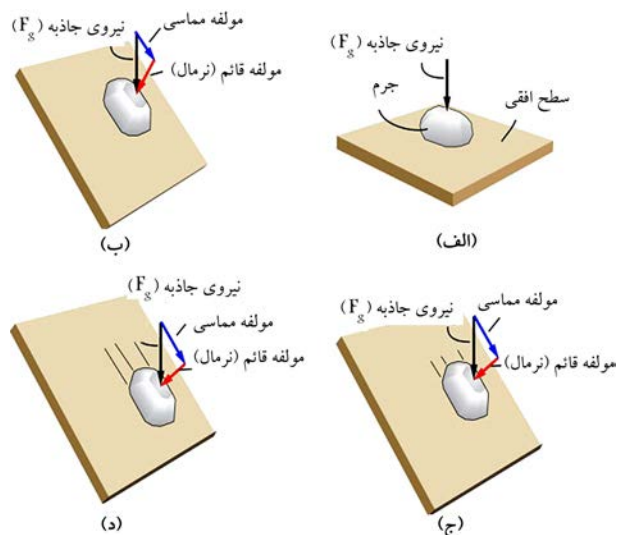
sIsani91@gmail.com  
mona.kalat@arabi.1387@gmail.com  
khazaei@mshdiau.ac.ir

می‌توان به صورت 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:

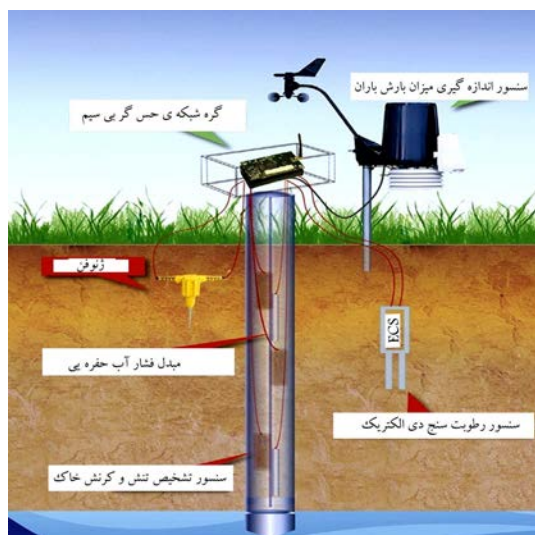
مطابق شکل ۱ الف، یک جرم بزرگ بر روی یک سطح افقی قرار گرفته است. در چنین شرایطی یگانه نیروی عمل‌کننده بر روی جرم مذکور نیروی جاذبه است، که برداری است که هم اندازه و هم جهت دارد و در شکل مذکور، از طریق پیکان مشکی قائم، که به سمت پایین اشاره دارد، نشان داده شده است. طول پیکان مذکور، برابر اندازه‌ی نیروی 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 د) و مؤلفه‌ی دیگر به صورت قائم بر آن عمل خواهد کرد (پیکان قرمز در شکل ۱ ب، ج و 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



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 مطرح‌شده‌ی سوم.

عنوان روش دوم، از شیوه‌ی پردازش تصاویر ماهواره‌ای (SAR)<sup>۸</sup> برای پایش نواحی پهناور استفاده شده است.<sup>[۴-۶]</sup> 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 گیگا هرتز 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.<sup>[۷]</sup> مطابق شکل ۳، حس‌گرهایی مانند مبدل فشار آب حفره‌ی<sup>۹</sup> و ژئوفون<sup>۱۰</sup> و حس‌گر رطوبت‌سنج خاک<sup>۱۱</sup> و غیره، در غالب یک پروب زمین عمیق<sup>۱۲</sup> 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 تخته سنگ 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 تخته سنگ 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 ماده‌ی که بر روی سطح شیب‌دار قرار می‌گیرد و همچنین قسمتی از سطح که مستقیماً با شیب 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<sup>۵</sup> 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 متر به عنوان روش اول، از یک سیستم بر پایه‌ی شعاع<sup>۶</sup> لیزر و سیستم فرستنده - گیرنده بر پایه‌ی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم<sup>۷</sup> استفاده شده است.<sup>[۱-۳]</sup> به

مختلف پژوهش حاضر بر آن است که روش مذکور، پتانسیل و قابلیت استفاده‌ی عملی برای کاربرد نظارت بلادرنگ بر رانش زمین<sup>۱۶</sup> 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:

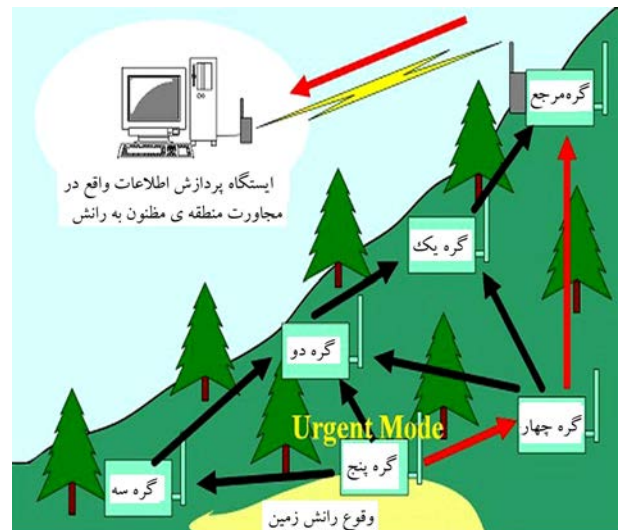
در شیوه‌ی تشخیص رانش زمین، آرایه‌ی از فرستنده‌ها ( $T_x$ ) را در منطقه‌ی مورد نظر نصب می‌کنند و سیگنال‌ها را به ۲ گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون می‌فرستند. در واقع این سیستم تغییرات اختلاف فاز را - که ناشی از جابه‌جایی ( $T_x$ ) هاست - در سیستم شامل دو گره گیرنده اندازه می‌گیرد و ضمن نمایش لحظه به لحظه، وضعیت سطح شیب دار 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<sup>۱۷</sup> 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<sup>۱۸</sup> و دو گره گیرنده‌ی سنکرون شده را اندازه می‌گیرد. به منطقه‌ی مظنون به رانش، سطح شیب دار 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  $250^\circ$  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 پوشش 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.

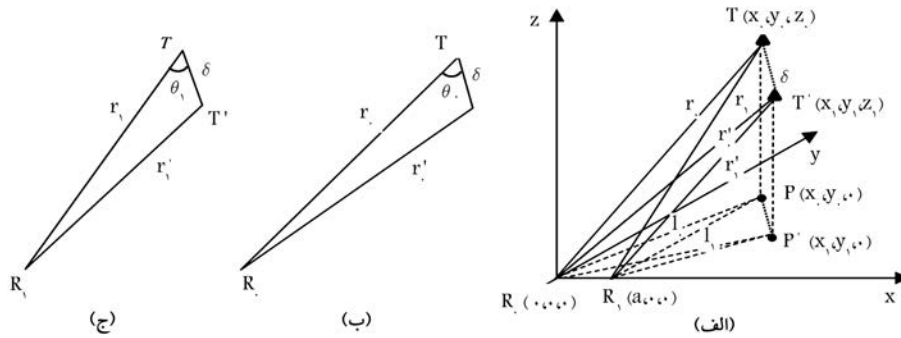
روش‌های سه‌گانه‌ی مذکور، به عنوان رایج‌ترین روش‌های تشخیص و پایش رانش زمین، هر کدام مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند. برای مثال از جمله معایب روش اول مطرح شده، می‌توان به خطرات کاربرد آن در نواحی مسکونی اشاره کرد. از جمله معایب روش دوم، تحت تأثیر قرار گرفتن دقت نتایج آن از شرایط جوی و آب‌وهوایی و همچنین زمان بردن 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.<sup>[۸-۱۱]</sup> 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<sup>۱۲</sup> بررسی، تحلیل، پیاده‌سازی و ارزیابی شده‌اند. از آن جمله می‌توان به معرفی و تحلیل شبکه‌ی حس‌گر بهینه با کمترین توان مصرفی و ترافیک شبکه،<sup>[۱۲]</sup> و یا به استفاده از شیوه‌های GPS و TPS،<sup>[۱۳]</sup> و یا به معرفی و پیاده‌سازی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم نظارت بر رانش زمین به صورت گسترده و چندمیزبان،<sup>[۱۴]</sup> و یا استفاده از داده‌پردازی مبتنی بر منحنی‌های ROC،<sup>[۱۵]</sup> و یا به دیگر شیوه‌های حس‌گر از راه دور<sup>[۱۶-۱۳]</sup> اشاره کرد.

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

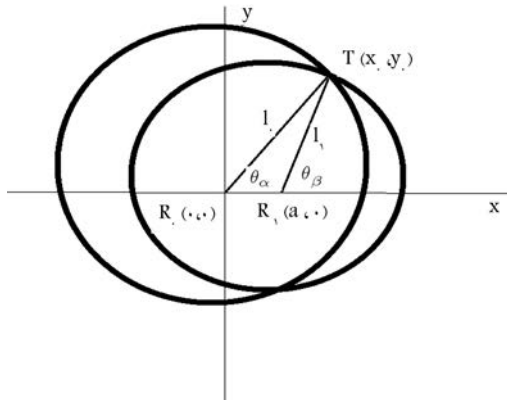


شکل ۴. چیدمان گره‌های شبکه‌ی حس‌گر برای پایش بلادرنگ سطح مظنون به رانش در روش مطرح شده.





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  $T_x T'$  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  $z = y$  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  $\varphi'_D$  اندازه‌گیری شده و مطابق رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است:

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

که در آن،  $\lambda$  طول موج کریر بسامدی است. توجه شود که  $\varphi'_D$  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  $\lambda$  است. از آنجا که بخش صحیح  $D'$  می‌تواند از  $D$  به دست آید، با داشتن مقادیر:  $r_0 - r_1 = N_D \cdot \lambda + \Delta D$ ،  $r_1$  و  $D = r_0 - r_1 = N_D \cdot \lambda + \Delta D$ ،  $N_D = \text{mod}[D, \lambda]$  مقدار درست  $D'$  می‌تواند از طریق  $D' = N_D \cdot \lambda + \Delta D'$  محاسبه شود. از آنجا که  $D - D'$  کسری از  $\lambda$  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،  $\theta_1$  و  $\theta_0$  هستند که به جهت جابه‌جایی و تغییرشکل وابسته‌اند. فرض کنیم  $\theta'_0 = \theta_0 + \varepsilon$  و  $\theta'_1 = \theta_1 + \varepsilon$  است، و  $\varepsilon$  خطای کوچک (انحراف) باشد،  $\delta'$  (ناشی از  $\varepsilon$ ) 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  $\varepsilon$  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.

معادله 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:

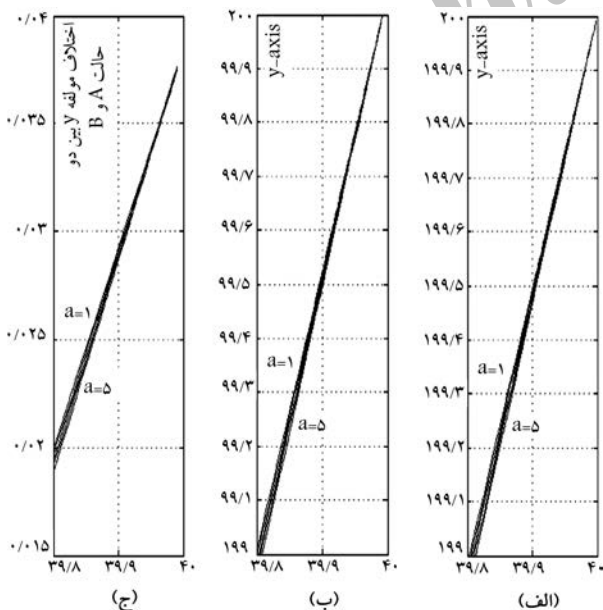
$$z = z_0 - m_{ah} \cdot \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (15)$$

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  $\delta$  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  $\alpha$  (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 ۱-۷، 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 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 گیره 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  $\delta$  یکسانی تغییر کنند. 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 کره‌ی 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،  $\theta_\alpha$  و  $\theta_B$  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  $\delta$  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 ۱۹ به دست می آید:

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

$$= (w_c + \Delta w_c)(\tau_0 - \tau_1) \quad (19)$$

فاز  $\varphi_D$  از خلال پروسه‌ی نصب اولیه (فاز آموزش) به دست می آید. بعد از نصب اولیه، فاز  $\varphi'_D$  اندازه‌گیری می‌شود و برای محاسبه‌ی  $\Delta D' = r'_0 - r'_1$  به کار می‌رود. اگر  $\Delta D = r_0 - r_1$ ، جابه‌جایی یا تغییرشکل پایه  $\delta$  از معادله‌ی ۷-۱ به دست خواهد. از آنجا که  $\Delta F_c / F_c = 0.5 \times 10^{-2}$ ، خطای محاسباتی در تخمین  $\delta$ ، به دلیل  $\Delta w_c$  (or  $\Delta \varphi_D$ ) برابر  $0.5 \times \delta / 10^4$  خواهد شد، که قابل صرف نظر است.

شبیه‌سازی رایانه‌ی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار مطلب برای سیستم پایش و تشخیص رانش زمین با استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم براساس شش  $T_x$ ، که بر روی منطقه‌ی فرضی نصب شده‌اند، انجام شده است. در شبیه‌سازی مکان،  $R_0$ ،  $R_1$  و  $T_x$ ، ورودی‌های برنامه‌ی شبیه‌سازی مطلب هستند. مکان  $T^1$  به‌عنوان مرجعی برای سنجش میزان دقت محاسبات داده شده است، تا این موارد محاسبه شود:

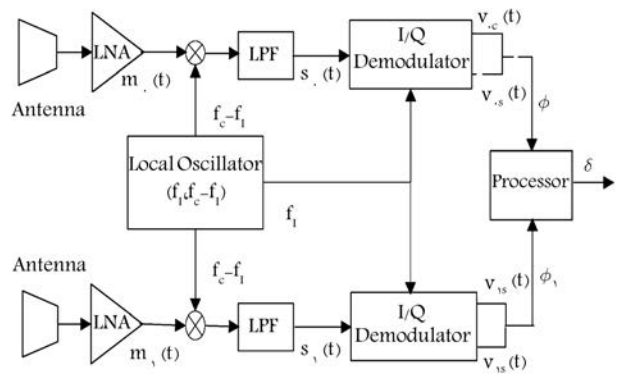
- اختلاف فاز بین  $\varphi_D$  و  $\varphi'_D$ .
- زاوای تخمین زده‌شده‌ی  $\theta_0$  و  $\theta_1$ .
- بردار  $\vec{M}$  (ماتریس)، بردار ۳ بعدی شیب کوه در نقطه‌ی  $T$ .

**نکته:** مدل شبیه‌سازی بر روی رایانه با CPU اینتل انجام شده است. واضح است تا وقتی که  $\Delta D - \Delta D' = D - D'$  و  $D - D' < \lambda$ ، فاز  $\varphi_D$  بسیار مهم‌تر از طول مطلق  $(r_0$  و  $r_1)$  است. در هر صورت تخمین دقیق بردار شیب سطح زمین بر دقت محاسبه‌ی  $\theta_0$  و  $\theta_1$  و طبیعتاً در  $\delta$  اثر دارند. علاوه بر آن افزایش فاصله‌ی دو گره گیرنده در  $\delta$  اثرگذار نیست، اما دقت محاسبه‌ی  $\Delta D - \Delta D'$  و  $\cos \theta_0 - \cos \theta_1$  را افزایش می‌دهند. خطای اندازه‌گیری برای  $\theta_0$  و  $\theta_1$  بسته به میزان تخمین شیب سطح زمین، منجر به درصد تغییرات کمتری (در حدود ۷.۶٪) برای  $\delta$  می‌شود. همان‌طور که در روابط اخیر نشان داده شده است، فاصله‌ی  $\alpha$  بین دو گره گیرنده بر روی مسیر مهم، به ازاء یک  $T_x$  معین تأثیر دارد. همچنین در اختلاف زاویه‌های  $\theta_0$  و  $\theta_1$  و  $\Delta D - \Delta D'$  تأثیر می‌گذارد. بسته به طول موج حامل سیگنال و مکان  $T_x$ ، مقدار  $\alpha$  باید به اندازه‌ی 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  $\alpha$  نباید خیلی زیاد باشد تا در کلاک سنکرون‌سازی دو گره گیرنده اثر منفی بگذارد. در پایان، میزان جابه‌جایی و تغییرشکل پایه‌ی پل از طریق روش مذکور محاسبه و با فاصله‌ی واقع بین  $T'$  و  $T$  حاصل از فاصله‌ی هندسی دو نقطه در فضا مقایسه شده است (رابطه‌ی 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 واسط گرافیکی (GUI) <sup>۲۲</sup> برای واردکردن مختصات و نمایش محاسبات خروجی و رسم نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار مطلب انجام شده است. جزئیات و نتایج شبیه‌سازی در بخش ۳ به همراه ذکر مثال ارائه شده است.



شکل ۹. بلوک نمودار سیستم دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم سنکرون.

راندمان معمولی مورد نیاز ۲۵ ppm تا ۲۵ ppm+ (در محدوده‌ی بسامدی که سیستم پایدار می‌ماند) است. بنابراین بیشینه خطای  $F_c$  بین فرستنده و گیرنده  $2^{\circ}$  ۵ 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  $\Delta F_c = 0.5 \times F_c / 10^4$  خواهد بود. در شکل ۵، دو گره گیرنده‌ی بی‌سیم، یک استیلاتور محلی را به اشتراک می‌گذارند، که دو بسامد  $F_I$  و  $F_c - F_I$  را تولید می‌کند، که بسامد باند میانی است. سیگنال‌های تقویت‌شده‌ی دریافتی  $m_0(t)$  و  $m_1(t)$  به صورت مستقل با بسامد  $F_c - F_I$  دمدوله می‌شوند. سپس این دو سیگنال از فیلتر پایین‌گذر (LPF) عبور داده می‌شوند تا  $S_0(t)$  و  $S_1(t)$  به وجود آیند. از دو دمدولاتور (I-Q) هم‌فاز مربعی برای تولید سیگنال‌های باند پایه‌ی  $v_0(t)$  و  $v_1(t)$ ، که بعداً برای تولید اطلاعات اختلاف فاز بین دو گره گیرنده به‌کار خواهد آمد، استفاده می‌شود. 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 دوره‌ی تناوب پالس باشد، در این صورت سیگنال‌های دریافتی  $m_0(t)$  و  $m_1(t)$  به صورت رابطه‌ی ۱۶ محاسبه می‌شوند:

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

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

که در آن،  $\tau_0$  و  $\tau_1$  به ترتیب تأخیر ارسال از  $T_x$  به گیرنده‌های  $R_0$  و  $R_1$  است. با ضرب  $m_0(t)$  و  $m_1(t)$  در بسامد  $F_c - F_I$  و عبور از فیلتر پایین‌گذر، رابطه‌ی 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 سیگنال‌های باند پایه  $v_{0c}(t)$ ،  $v_{0s}(t)$ ،  $v_{1c}(t)$ ،  $v_{1s}(t)$  به صورت رابطه‌ی ۱۸ حاصل می‌شوند:

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

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

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

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

### ۳. نتیجه‌گیری و تفسیر داده‌های شبیه‌سازی

شبیه‌سازی رایانه‌ی 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 (مطابق با شکل ۱۰):

بخش اول: تعیین بسامد کریر سیستم و مکان گره‌های گیرنده‌ی بی‌سیم  $R_0$  و  $R_1$ ؛

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  $\delta$ ؛

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 ( $\delta_{real}$ ).

### 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 ( $T_5$ ):

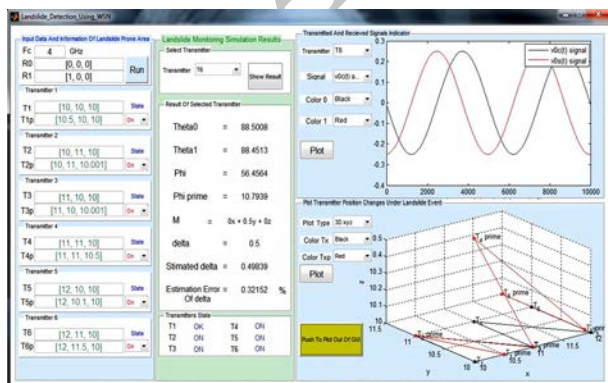
$$T_5(12, 10, 10) \rightarrow T'_5(12, 10/1, 10)$$

-- 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 به‌تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شده است، شبیه‌سازی قابلیت به‌تصویر 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.

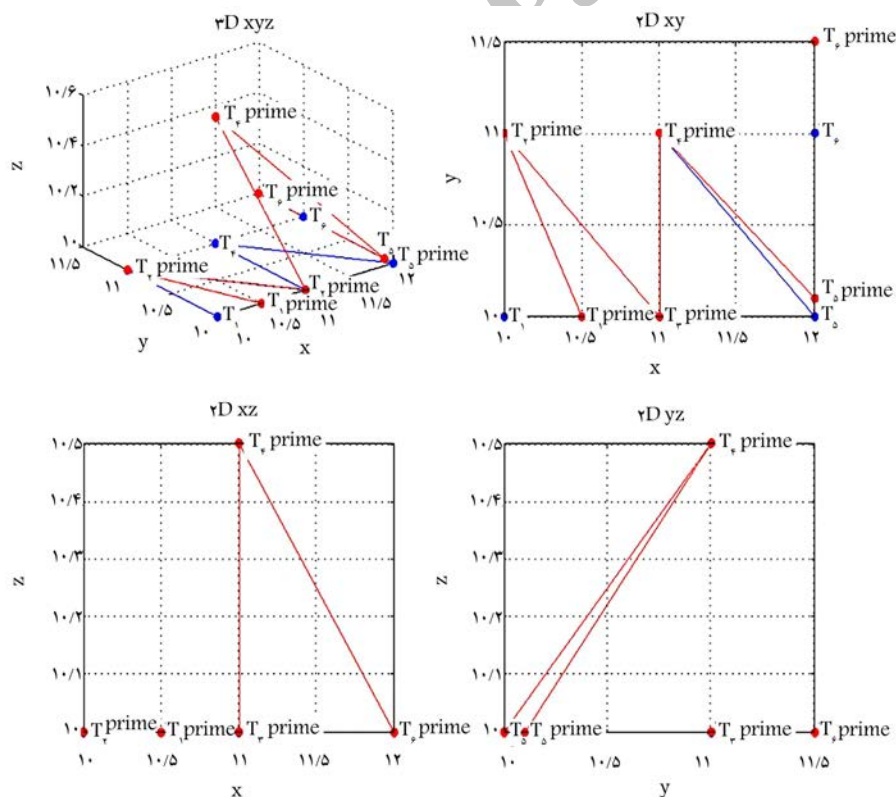


جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم پیشنهادی (بخش اول نتایج).

$\varphi'_D$	$\varphi_D$	$\tau_1$	$\tau_0$	$r'_1$	$r'_0$	$r_1$	$r_0$	$T_{\infty}$
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	۱۷٫۹۱۱۷	۱۷٫۳۷۸۱	۱۷٫۹۱۶۵	$T_2$
۳۴۰٫۶۸۱۸	۳۴۰٫۷۷۴	۵٫۷۷۳۵ e-۰۸	۵٫۹۷۲۲ e-۰۸	۱۷٫۳۲۱۱	۱۷٫۹۱۱۷	۱۷٫۳۲۰۵	۱۷٫۹۱۶۵	$T_3$
۲۶۰٫۷۷۴۷	۲۴۸٫۶۳۰۳	۵٫۹۷۲۲ e-۰۸	۶٫۱۶۴۴ e-۰۸	۱۸٫۲۰۰۳	۱۸٫۷۶۸۳	۱۷٫۹۱۶۵	۱۸٫۴۹۳۲	$T_4$
۱۳۸٫۷۰۳۳	۱۴۷٫۸۱۹۲	۵٫۹۷۲۲ e-۰۸	۶٫۱۸۲۴ e-۰۸	۱۷٫۹۷۲۵	۱۸٫۶۰۱۳	۱۷٫۹۱۶۵	۱۸٫۵۴۷۲	$T_5$
۱۰٫۷۹۳۹	۵۶٫۴۵۶۴	۶٫۱۶۴۴ e-۰۸	۶٫۳۶۸۳ e-۰۸	۱۸٫۷۹۴۹	۱۹٫۳۹۷۲	۱۸٫۴۹۳۲	۱۹٫۱۰۵	$T_6$

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

$D'$	$\Delta_D$	$D$	$\theta_1$	$\theta_0$	$M$	$m_t$	$m_a$	$T_{\infty}$
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	$T_2$
۰٫۵۹۵۹۸	۰٫۰۷۰۹۹۵	۰٫۵۹۵۹۶	۸۹٫۹۹۶۷	۸۹٫۹۹۶۸	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	NaN	۱٫۳۸۱۳	$T_3$
۰٫۵۶۸۰۸	۰٫۰۵۱۷۹۸	۰٫۵۷۶۷۷	۸۸٫۴۰۱۴	۸۸٫۴۵۱۳	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	NaN	۱٫۴۴۸۷	$T_4$
۰٫۶۲۸۹	۰٫۰۳۰۷۹۶	۰٫۶۳۰۷۶	۸۹٫۶۸۰۲	۸۹٫۶۹۱۱	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	0	۱٫۳۲۵۵	$T_5$
۰٫۶۰۲۲۵	۰٫۰۱۱۷۶۲	۰٫۶۱۱۷۳	۸۸٫۴۵۱۳	۸۸٫۵۰۰۸	$0.5x + 0.5y + 0.5z$	0	۱٫۳۸۴۱	$T_6$



شکل ۱۲. رسم سه‌نمای حاصل از شبیه‌سازی شرایط حاکم بر آنش زمین.

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

Estimation error (%)	$\delta_{estimated}$	$\delta_{real}$	$D - D'$	$\Delta_{D'}$	$T_{\#}$
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.

#### پانوشته‌ها

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 Seismology & 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).