

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه کشور

# راهنمای مطالعه و اجرای عملیات پایدارسازی زمین لغزش‌ها

(جلد اول - مطالعات رفتارسنجی زمین لغزش‌ها)

ضابطه شماره ۱-۸۲۹

آخرین ویرایش: ۱۳۹۹-۰۹-۲۶

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور  
معاونت آبخیزداری، امور مراتع و امور بیابان  
دفتر کنترل سیلاب و آبخوانداری

[www.frw.org.ir](http://www.frw.org.ir)


سازمان برنامه و بودجه کشور  
معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی  
امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)



[omooorepeyman.ir](http://omooorepeyman.ir)



شماره:	۹۹/۵۶۶۵۸۶	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ:	۱۳۹۹/۱۰/۲۳	
موضوع: راهنمای مطالعه و اجرای عملیات پایدارسازی زمین لغزش‌ها		
<p>در چارچوب ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور موضوع نظام فنی و اجرایی یکپارچه، ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی، به پیوست ضابطه شماره ۸۲۹ امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران با عنوان «<b>راهنمای مطالعه و اجرای عملیات پایدارسازی زمین لغزش‌ها</b>» در قالب ۲ جلد و از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود. رعایت مفاد این ضابطه در صورت نداشتن ضوابط بهتر، از تاریخ ۱۴۰۰/۰۱/۰۱ الزامی است.</p> <p>جلد اول - مطالعات رفتارسنجی زمین لغزش‌ها</p> <p>جلد دوم - مطالعات پهنه‌بندی خطر و ریسک زمین لغزش</p> <p>امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.</p>		
 <p>محمد باقر نوبخت</p>		





## اصلاح مدارک فنی

### خواننده گرامی:

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هر گونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید:

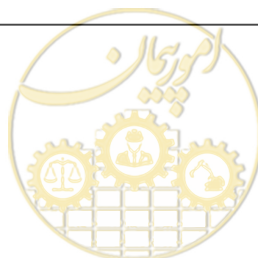
- ۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت‌نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir
  - ۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربری تکمیل فرمایید.
  - ۳- به بخش نظرخواهی این ضابطه مراجعه فرمایید.
  - ۴- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
  - ۵- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید.
  - ۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال کنید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

**نشانی برای مکاتبه:** تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

**Email:** nezamfanni @mporg.ir

**web:** nezamfanni.ir





## پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آن‌ها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آن‌ها را ضروری و اجتناب‌ناپذیر کرده‌است. نظر به گستردگی دامنه فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی تخصصی واگذار شده است. با در نظر گرفتن موارد بالا و با توجه به شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و توپوگرافی کشور پهناور ایران تهیه ضوابط و معیارهای فنی مطالعات زمین‌لغزش‌ها و پایداری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و با توجه به عدم وجود دستورالعملی اختصاصی برای مطالعات رفتارسنجی زمین‌لغزش‌ها، معاونت آبخیزداری سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری تهیه «راهنمای مطالعه و اجرای عملیات پایداری زمین‌لغزش‌ها» را در قالب ۲ جلد، با هماهنگی امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور در دستور کار قرار داد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی و اجرایی کشور به این سازمان ارسال نمود:

جلد اول) مطالعات رفتارسنجی زمین‌لغزش‌ها

جلد دوم) مطالعات پهنه‌بندی خطر و ریسک زمین‌لغزش‌ها

این ضوابط پس از بررسی، براساس نظام فنی اجرایی یکپارچه، موضوع ماده ۳۴ قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور، ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران تصویب و ابلاغ گردید. ضوابط حاضر با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصص‌ها و تجربه‌های کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی،
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی،
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحد‌های صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت،
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌گیری و ارزشیابی طرح‌ها،
- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور،
- توجه به اصول و موازین مورد عمل موسسه استاندارد تحقیقات صنعتی ایران و سایر موسسات معتبر تهیه کننده استاندارد.

علیرغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردید، این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پررنگ شدن این ضابطه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن ضابطه، با همفکری



نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع‌رسانی نظام فنی و اجرایی کشور برای بهره‌برداری عموم، اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از اینرو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

حمیدرضا عدل

معاون فنی، امور زیربنایی و تولیدی

پاییز ۱۳۹۹





## تهیه و کنترل «راهنمای مطالعه و اجرای عملیات پایدارسازی زمین لغزش‌ها

(جلد اول-مطالعات رفتارسنجی زمین لغزش‌ها)» [ضابطه شماره ۱-۸۲۹]

مجری: سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، معاونت آبخیزداری، امور مراتع و بیابان

### اعضای گروه تهیه‌کننده:

مهدی معتق	کارشناس مرکز تحقیقات GFZ آلمان	دکترای نقشه برداری- ژئودزی
شهریز دروگریان	مهندسین مشاور ایستاسنج دقیق	کارشناس ارشد ژئودزی
محمد هنرور	مهندسین مشاور ایستاسنج دقیق	کارشناس ارشد ژئودزی
بهمن نیک ضمیر	مهندسین مشاور ایستاسنج دقیق	کارشناس ارشد نقشه برداری، راه و ترابری
علیرضا علیاری	مهندسین مشاور زمین آب پی	کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی
علیرضا لیاقت	مهندسین مشاور زمین آب پی	کارشناس ارشد رسوب شناسی

### اعضای گروه داوری فنی پروژه:

بهمن اکبری	دکترای زمین شناسی مهندسی
نغمه خوانین زاده	کارشناس ارشد نقشه برداری- ژئودزی

### اعضای گروه مدیریت اجرای پروژه (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور):

پرویز گرشاسبی	دکترای آبخیزداری	معاون آبخیزداری، امور مراتع و بیابان
خسرو شهبازی	دکترای آبخیزداری	معاون اسبق آبخیزداری، امور مراتع و بیابان
محمد عقیقی	فوق لیسانس آبخیزداری	مدیر کل وقت دفتر طرح ریزی و هماهنگی
ابوالقاسم حسین پور	فوق لیسانس آبخیزداری	مدیر کل دفتر کنترل سیلاب و آبخوانداری
هوشنگ جزی	دکترای برنامه ریزی شهری	مدیر کل دفتر آبخیزداری و حفاظت خاک
بابک ربیعی فر	فوق لیسانس مناطق بیابانی	مسئول گروه ضوابط و استانداردها

### اعضای گروه هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه کشور):

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
فرزانه آقارمضانعلی	رییس گروه امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
سید وحیدالدین رضوانی	کارشناس امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران





## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۳	فصل اول - زمین لغزش
۵	۱-۱- تعریف زمین لغزش
۶	۱-۲- وضعیت زمین لغزش در ایران و مرور کوتاهی بر چند زمین لغزش رخ داده شده
۷	۱-۲-۱- زمین لغزش سیمره
۸	۱-۲-۲- زمین لغزش آبیکار کارکن علیا
۱۰	۱-۲-۳- زمین لغزش امامزاده علی
۱۰	۱-۳- اجزای تشکیل دهنده یک زمین لغزش
۱۳	۱-۴- طبقه‌بندی زمین لغزش‌ها
۱۴	۱-۴-۱- ریزش
۱۵	۱-۴-۲- واژگونی
۱۵	۱-۴-۳- لغزش
۱۷	۱-۴-۴- گسترش‌ها
۱۸	۱-۴-۵- روانه‌ها
۲۱	۱-۵- عوامل موثر در وقوع زمین لغزش
۲۱	۱-۵-۱- عوامل ذاتی
۲۱	۱-۵-۲- عوامل افزایش دهنده تنش برشی
۲۳	۱-۵-۳- عوامل کاهش دهنده مقاومت برشی
۲۶	۱-۶- علائم هشدار دهنده وقوع زمین لغزش
۲۹	۱-۷- نتیجه‌گیری
۳۱	فصل دوم - سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای
۳۳	۱-۲- تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GPS)
۳۳	۱-۱-۲- تاریخچه سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای
۳۵	۲-۲- اساس تعیین موقعیت در این سیستم
۳۶	۱-۲-۲- پیام ناوبری
۳۶	۲-۲-۲- افریزها



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳۹	۳-۲- گیرنده
۳۹	۱-۳-۲- گیرنده‌های تک فرکانسه
۴۰	۲-۳-۲- گیرنده‌های دو فرکانسه
۴۰	۴-۲- آنتن
۴۰	۵-۲- مشاهدات شبه فاصله
۴۲	۶-۲- مشاهدات فاز موج حامل
۴۴	۷-۲- منابع خطاها در سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای
۴۵	۱-۷-۲- بایاس‌های ماهواره‌ها
۴۶	۲-۷-۲- بایاس ایستگاه‌ها
۴۶	۳-۷-۲- بایاس وابسته به مشاهدات
۴۹	۴-۷-۲- خطای SA
۴۹	۵-۷-۲- خطای چند مسیری
۵۰	۶-۷-۲- خطای cycle slip
۵۱	۷-۷-۲- جابه‌جایی مرکز فاز آنتن
۵۲	۸-۲- ترکیبات خطی مشاهدات
۵۲	۱-۸-۲- تفاضلی یگانه بین اپک‌ها
۵۳	۲-۸-۲- تفاضلی یگانه بین گیرنده‌ها
۵۴	۳-۸-۲- تفاضلی یگانه بین ماهواره‌ها
۵۵	۴-۸-۲- تفاضلی دوگانه گیرنده- زمان
۵۵	۵-۸-۲- تفاضلی دوگانه ماهواره- زمان
۵۶	۶-۸-۲- تفاضلی دوگانه ماهواره- گیرنده
۵۶	۷-۸-۲- تفاضلی سه گانه گیرنده- ماهواره- زمان
۵۷	۹-۲- ضریب تعدیل دقت
۵۹	۱۰-۲- طراحی
۵۹	۱-۱۰-۲- انتخاب محل ایستگاه
۶۰	۲-۱۰-۲- تعیین اپتیمم پریود مشاهدات



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۶۱	۲-۱۰-۳- شناسایی منطقه
۶۳	۲-۱۰-۴- انتخاب تجهیزات
۶۳	۲-۱۱- کاربرد مشاهدات GPS در پایش جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از پدیده زمین‌لغزش
۶۴	۲-۱۱-۱- پیشینه مطالعات رفتارسنجی زمین‌لغزش به کمک GPS در ایران
۷۰	۲-۱۱-۲- طراحی نقاط مبنا در پروژه‌های رفتارسنجی به کمک GPS
۷۱	۲-۱۲- معیارهای انتخاب ایستگاه در پروژه‌های رفتارسنجی به کمک GPS
۷۱	۲-۱۲-۱- ماسک افق (Horizon Mask)
۷۲	۲-۱۲-۲- خطای چند مسیری
۷۳	۲-۱۲-۳- فرکانس رادیویی محیطی
۷۳	۲-۱۲-۴- شناسایی محل ایجاد ایستگاه
۷۴	۲-۱۳- انواع ساختمان ایستگاه‌های GPS
۷۴	۲-۱۳-۱- بنای مهارشده با حفاری عمیق (Braced Monument Deep Drilled)
۷۵	۲-۱۳-۲- بنای مهارشده با حفاری کم عمق (Shallow Drilled Braced Monument)
۷۷	۲-۱۳-۳- بنای مهارشده بدون حفاری کم عمق (Shallow Braced non-drilled Monument)
۷۹	۲-۱۳-۴- پایه با پی سطحی (Shallow Foundation Mast)
۸۳	۲-۱۳-۵- پیلار بتنی
۸۶	۲-۱۳-۶- پایه فولادی
۸۸	۲-۱۳-۷- پایه آلومینیومی
۹۰	۲-۱۳-۸- بنای پیشنهادی NMD در کشور استرالیا
۹۱	۲-۱۳-۹- بنای پیشنهاد شده توسط NGS
۹۲	۲-۱۳-۱۰- بنای پیشنهادی HIGP
۹۴	۲-۱۳-۱۱- بنای پیشنهادی WCDA
۹۵	۲-۱۳-۱۲- پیشنهاد سازمان نقشه‌برداری کشور
۹۸	۲-۱۴- طراحی نقاط مشاهداتی
۹۸	۲-۱۴-۱- پیشنهاد سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزدای کشور
۱۰۵	۲-۱۴-۲- پیشنهاد دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تکنولوژی مالزی



## فهرست مطالب

### عنوان

### صفحه

۱۰۶	۲-۱۴-۳- پیشنهاد موسسه GNS نیوزلند
۱۰۶	۲-۱۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد دستورالعمل ارائه شده
۱۰۶	۲-۱۵-۱- پیشنهاد ساخت نقاط مبنا
۱۰۶	۲-۱۵-۲- پیشنهاد ساخت نقاط مشاهداتی
۱۰۷	۲-۱۶- روش قرائت مشاهدات:
۱۰۹	۲-۱۷- تعداد مراحل و زمان مشاهدات
۱۰۹	۲-۱۸- خروجی گزارش
۱۱۱	فصل سوم - اصول و مبانی تداخل‌سنجی راداری
۱۱۳	۳-۱- تعریف رادار
۱۱۳	۳-۲- تاریخچه رادار
۱۱۴	۳-۳- تصویربرداری در راستاهای رنج و آزیموت
۱۱۶	۳-۴- سیستم‌های تصویربرداری راداری
۱۱۶	۳-۵- توان تفکیک تصاویر راداری
۱۱۸	۳-۶- سیستم تصویربرداری راداری با دهانه ترکیبی
۱۲۰	۳-۷- اعوجاجات هندسی در تصاویر راداری
۱۲۰	۳-۷-۱- سایه
۱۲۱	۳-۷-۲- کوتاه شدگی
۱۲۱	۳-۷-۳- وارونگی
۱۲۳	۳-۸- تداخل‌سنجی دهانه مصنوعی راداری
۱۲۴	۳-۸-۱- تداخل‌سنجی تک مسیره
۱۲۵	۳-۸-۲- تداخل‌سنجی با تکرار مسیر
۱۳۱	۳-۹- تداخل‌سنجی تفریقی
۱۳۳	۳-۱۰- شرط تداخل‌سنجی
۱۳۳	۳-۱۱- تطابق
۱۳۴	۳-۱۱-۱- عدم تطابق مکانی
۱۳۴	۳-۱۱-۲- عدم تطابق حرارتی



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۳۴	۳-۱۱-۳- عدم تطابق زمانی
۱۳۵	۳-۱۲- هم‌دوسی تعیین کننده کیفیت اینترفروگرام
۱۳۵	۳-۱۳- مزایا و معایب تکنیک تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی
۱۳۶	۳-۱۳-۱- مزایا
۱۳۶	۳-۱۳-۲- معایب
۱۳۶	۳-۱۴- رابطه بین زاویه شیب و جهت لغزش با زاویه تابش رادار و راستای دید ماهواره
۱۳۶	۳-۱۴-۱- رابطه بین راستای دید ماهواره و جهت لغزش
۱۳۷	۳-۱۴-۲- رابطه بین زاویه شیب و زاویه تابش رادار
۱۳۹	۳-۱۵- نتیجه‌گیری
۱۴۱	فصل چهارم - مبانی و تئوری مجموعه کوتاهی خطوط مبنا و روش کم‌ترین مربعات
۱۴۳	۴-۱- مقدمه
۱۴۳	۴-۲- اساس روش مجموعه خطوط مبنا
۱۴۳	۴-۳- روش کم‌ترین مربعات
۱۴۵	۴-۴- نتیجه‌گیری
۱۴۷	فصل پنجم - تداخل‌سنجی به کمک پراکنده‌سازهای پایا و آنالیز سری زمانی
۱۴۹	۵-۱- مقدمه
۱۴۹	۵-۲- مبانی و تئوری روش (PS) Permanent/Persistent Scatterer
۱۵۱	۵-۳- آنالیز سری زمانی
۱۵۵	فصل ششم - رفتارسنجی زمین‌لغزش با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری
۱۵۷	۶-۱- پیشینه تحقیق
۱۷۷	۶-۲- نکات مورد نظر در انجام یک پروژه رفتارسنجی به کمک روش تداخل‌سنجی راداری
۱۷۷	۶-۳- هدف از انجام پروژه
۱۷۸	۶-۴- مواردی که باید در انتخاب تصاویر در نظر گرفته شود
۱۸۰	۶-۵- مواردی که در پردازش تصاویر راداری بایستی در نظر گرفت
۱۸۹	پیوست ۱
۲۰۱	پیوست ۲
۲۰۵	منابع و مراجع



## فهرست شکل‌ها و نمودارها

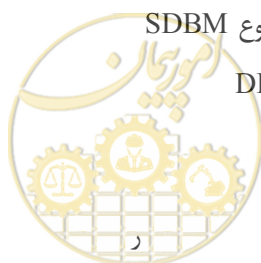
صفحه	عنوان
۵	شکل ۱-۱- زمین لغزش لاکونچیتا در کالیفرنیا
۶	شکل ۲-۱- زمین لغزش السالوادور در تگزاس
۷	شکل ۳-۱- نقشه توزیع زمین لغزش‌های ثبت شده در ایران
۸	شکل ۴-۱- زمین لغزش تاریخی سیمره
۹	شکل ۵-۱- زمین لغزش آبیکار که در اثر این لغزش روستای آبیکار با ۵۵ نفر سکنه آن مدفون گردید
۱۰	شکل ۶-۱- انسداد جاده هراز به مدت ۴۰ روز در اثر وقوع زمین لغزش در سال ۱۳۷۷
۱۲	شکل ۷-۱- اجزای تشکیل دهنده زمین لغزش
۱۴	شکل ۸-۱- الف- تصویری شماتیک از ریزش، ب- سنگ افت/ سنگ لغزش که در نزدیکی دره کلیپر کریک، کلرادو آمریکا در سال ۲۰۰۵ رخ داد. (عکس از سازمان زمین‌شناسی کلرادو)
۱۵	شکل ۹-۱- الف- نمایی شماتیک از حرکت واژگونی، ب- عکس واژگونی بلوکی در فورت سان جان، بریتیش کلمبیا، کانادا
۱۶	شکل ۱۰-۱- الف- نمایی شماتیک از حرکت لغزش دورانی، ب- یک زمین لغزش دورانی که در نیوزیلند رخ داده است.
۱۷	شکل ۱۱-۱- الف- نمایی شماتیک از لغزش انتقالی، ب- یک زمین لغزش انتقالی که در سال ۲۰۰۱ در دره رودخانه بیتون، بریتیش کلمبیا، کانادا رخ داد
۱۸	شکل ۱۲-۱- الف- نمایی شماتیک از لغزش گسترش جانبی، ب- خسارت گسترش جانبی به یک جاده در نتیجه زمین‌لرزه سال ۱۹۹۸ لوما پریتا، کالیفرنیا، آمریکا
۱۹	شکل ۱۳-۱- الف- نمایی شماتیک از روانه واریزه، ب- خسارت روانه واریزه به شهر کارابالدا، در شمال ساحل ونزوئلا. در دسامبر ۱۹۹۹ که ۳۰۰۰۰ نفر را به کام مرگ کشاند
۱۹	شکل ۱۴-۱- الف- نمایی شماتیک یک روانه خاک، ب- زمین لغزش لمیوکس در سال ۱۹۹۳، یک روانه خاک که به دره رودخانه سوز نیشن جریان یافته و سبب مسدود شدن رودخانه گردید.
۲۰	شکل ۱۵-۱- الف- نمایی شماتیک از خزش، ب- آثار خزش در منطقه‌ای نزدیک ساسکس شرقی، بریتانیا، به نام علفزارهای چالک.
۲۲	شکل ۱۶-۱- وقوع زمین لغزش ناشی از تحریک زلزله در شمال تایوان منجر به مسدود شدن اتوبان می‌شود
۲۷	شکل ۱۷-۱- ترک خوردگی زمین
۲۸	شکل ۱۸-۱- عقب نشینی پیاده‌رو از ساختمان





## فهرست شکل‌ها و نمودارها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۲۸	شکل ۱-۱۹- بالا آمدگی غیر معمول جاده
۲۹	شکل ۱-۲۰- کج شدن تیر برق
۳۴	شکل ۲-۱- موقعیت ماهواره‌های GPS در مدار
۳۴	شکل ۲-۲- چگونگی تعیین موقعیت گیرنده توسط ۴ شبه فاصله
۳۸	شکل ۲-۳- موقعیت ایستگاه کنترل اصلی و ایستگاه‌های ردیابی بخش کنترل
۳۹	شکل ۲-۴- موقعیت ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیکی IGS
۵۰	شکل ۲-۵- خطای چند مسیری
۵۳	شکل ۲-۶- ترکیب تفاضلی یگانه بین اپک‌ها
۵۴	شکل ۲-۷- ترکیب تفاضلی یگانه بین گیرنده‌ها
۵۴	شکل ۲-۸- ترکیب تفاضلی یگانه بین ماهواره‌ها
۵۶	شکل ۲-۹- ترکیب تفاضلی دوگانه ماهواره-گیرنده
۵۷	شکل ۲-۱۰- ترکیب تفاضلی سه گانه گیرنده - ماهواره - زمان
۵۸	شکل ۲-۱۱- الف- آرایش ماهواره‌ها در حالت مناسب. ب- آرایش ماهواره‌ها در حالت نامناسب
۶۲	شکل ۲-۱۲- نمای شماتیک از نحوه اندازه‌گیری ارتفاع سه پایه
۶۴	شکل ۲-۱۳- استفاده از مشاهدات GPS به منظور پایش حرکات سطحی
۶۵	شکل ۲-۱۴- بردارهای جابه‌جایی زمین لغزش کهرود در دو راستای افقی و قائم
۶۵	شکل ۲-۱۵- نمایی از زمین لغزش دنبلید طالقان
۶۶	شکل ۲-۱۶- نمونه‌ای از تخریب به بار آمده توسط زمین لغزش دنبلید طالقان
۶۷	شکل ۲-۱۷- نمایی از زمین لغزش دمدول خلخال
۶۷	شکل ۲-۱۸- نمایی از زمین لغزش طارش و استخرسر
۶۸	شکل ۲-۱۹- نمونه‌هایی از خرابی‌های به وجود آمده توسط زمین لغزش طارش و استخرسر
۶۸	شکل ۲-۲۰- نمودار جابه‌جایی ایستگاه MP10 که بیش‌ترین میزان جابه‌جایی را در بین ایستگاه‌ها به خود اختصاص داده است.
۷۴	شکل ۲-۲۱- نمونه‌ای از بنای DDBM
۷۵	شکل ۲-۲۲- نمونه‌ای از بنای ساخته شده از نوع SDBM
۷۶	شکل ۲-۲۳- مقطع ایستگاه با ساختمان DDBM



## فهرست شکل‌ها و نمودارها

### عنوان

### صفحه

۷۷	شکل ۲-۲۴- ابزار و وسایل جانبی متصل به بنایی از نوع SDBM
۷۸	شکل ۲-۲۵- نمونه از بنای ساخته شده از نوع SBNDM
۷۸	شکل ۲-۲۶- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت از نوع SBNDM
۷۹	شکل ۲-۲۷- نمای روبروی بنای ایستگاه
۸۰	شکل ۲-۲۸- نمونه‌ای از بنای ساخته شده به صورت پایه با پی سطحی
۸۱	شکل ۲-۲۹- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت به صورت پایه با پی سطحی
۸۱	شکل ۲-۳۰- نمونه‌ای از بنای ساخته شده از نوع پایه پیچ شده
۸۲	شکل ۲-۳۱- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت از نوع پایه پیچ شده
۸۳	شکل ۲-۳۲- جزئیات ساخت پایه
۸۴	شکل ۲-۳۳- نمونه از ایستگاه GPS با ساختمان پیلار
۸۵	شکل ۲-۳۴- اجزا سازنده یک پیلار بتنی
۸۶	شکل ۲-۳۵- اجزا سازنده یک پیلار بتنی
۸۷	شکل ۲-۳۶- نمونه‌ای از بنای ایستگاه GPS از پایه فولادی
۸۸	شکل ۲-۳۷- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت از نوع پایه فولادی
۸۸	شکل ۲-۳۸- نمونه‌ای از پایه آلومینیومی
۸۹	شکل ۲-۳۹- پایه متصل به بستر سنگی توسط پیچ و مهره‌های فولادی
۸۹	شکل ۲-۴۰- شابلن جهت دریل کاری موقعیت صحیح
۹۰	شکل ۲-۴۱- نمونه‌ای از بنای مورد استفاده
۹۱	شکل ۲-۴۲- اجزا تشکیل دهنده بنا (میله فولادی مرکزی و میله فولادی به کار رفته در طرفین صفحه)
۹۲	شکل ۲-۴۳- نمونه‌ای از بنای مورد استفاده توسط NGS
۹۳	شکل ۲-۴۴- اجزا تشکیل دهنده پایه و نحوه قرارگیری آن در بستر
۹۴	شکل ۲-۴۵- پین پیشنهاد شده توسط USGS
۹۴	شکل ۲-۴۶- پین پیشنهاد شده توسط VLNDEF
۹۵	شکل ۲-۴۷- بنای پیشنهاد شده توسط WCDA
۹۶	شکل ۲-۴۸- مقطع ایستگاه در مناطق غیرسنگی
۹۷	شکل ۲-۴۹- مقطع ایستگاه در مناطق سنگی



## فهرست شکل‌ها و نمودارها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۹۷	شکل ۲-۵۰- پیلار نقاط پایه
۹۸	شکل ۲-۵۱- مقطع آرماتوربندی پیلار ایستگاه
۱۰۱	شکل ۲-۵۲- چاله حفر شده
۱۰۱	شکل ۲-۵۳- نمایی از نحوه آرماتوربندی و بتن‌ریزی ایستگاه‌ها
۱۰۲	شکل ۲-۵۴- نمای کلی ایستگاه ساخته شده و نحوه قرارگیری GPS دو فرکانسه
۱۰۳	شکل ۲-۵۵- نمایی از مقطع ایستگاه‌های رفتارسنجی زمین‌لغزش (مبنا و شاهد)
۱۰۴	شکل ۲-۵۶- جزئیات ساختمان میله استیل در مقاطع طولی و عرضی
۱۱۳	شکل ۳-۱- شمایی از چگونگی کارکرد ابزار رادار
۱۱۶	شکل ۳-۲- شمایی از هندسه تصویربرداری راداری
۱۱۸	شکل ۳-۳- توان تفکیک در دو راستای آزیموت و رنج
۱۱۹	شکل ۳-۴- نحوه تصویربرداری SAR
۱۲۱	شکل ۳-۵- تشکیل پدیده سایه در تصویر رادار
۱۲۱	شکل ۳-۶- تشکیل پدیده کوتاه شدگی در تصویر رادار
۱۲۲	شکل ۳-۷- تشکیل پدیده وارونگی در تصویر رادار
۱۲۲	شکل ۳-۸- نمایش سه اعوجاج هندسی ذکر شده در یک تصویر رادار
۱۲۵	شکل ۳-۹- نمایی شماتیک از تداخل‌سنجی در راستای پرواز و راستای عمود بر راستای پرواز
۱۲۶	شکل ۳-۱۰- هندسه تداخل‌سنجی با تکرار مسیر
۱۲۸	شکل ۳-۱۱- هندسه نگاه تداخل‌سنجی SAR، در اینجا دو آنتن تداخل‌سنجی A1 و A2 وجود دارند. متغیر z ارتفاع سطح از یک سطح مبنای محلی است. طول خط مبنای عمود $B^{\wedge}$ حساسیت تداخل سنج به اندازه‌گیری z را نشان می‌دهد
۱۲۹	شکل ۳-۱۲- اینترفروگرام آتشفشان Alcedo که اثر توپوگرافی از روی آن برداشته نشده است
۱۳۱	شکل ۳-۱۳- تداخل نمای تفریقی
۱۳۲	نمودار ۳-۱- مراحل تشکیل اینترفروگرام
۱۳۴	شکل ۳-۱۴- هندسه مشاهده تداخل‌سنجی برای پراکنده‌سازی حجمی که A1 و A2 دو آنتن رادار هستند و e ثابت دی الکتریک موثر محیط برف، حاشیه نماینده عنصر تفکیک با محیط برف و یخ دچار شکست شده است
۱۳۷	شکل ۳-۱۵- حالت ایده‌آل جهت لغزش و راستای دید ماهواره Ascending



## فهرست شکل‌ها و نمودارها

### عنوان

### صفحه

- شکل ۳-۱۶- حالت نه چندان مناسب جهت لغزش و راستای دید ماهواره Ascending ۱۳۷
- شکل ۳-۱۷- حالت ایده‌آل زاویه شیب لغزش و زاویه تابش رادار ۱۳۸
- شکل ۳-۱۸- حالت نامناسب زاویه شیب لغزش و زاویه تابش رادار (عدم امکان اندازه‌گیری) ۱۳۸
- شکل ۳-۱۹- حالت نه چندان مناسب زاویه شیب لغزش و زاویه تابش رادار (اندازه‌گیری مولفه موازی با راستای دید ماهواره بردار جابه‌جایی) ۱۳۹
- شکل ۴-۱- روی هم قرار دادن نقشه‌های جابه‌جایی اینترفرومتریک در یک سیستم مختصات ۱۴۴
- شکل ۵-۱- چگونگی بازتاب سیگنال توسط پراکنده‌سازهای درون یک پیکسل زمینی ۱۵۰
- شکل ۵-۲- شبکه اینترفروگرام‌های تولید شده در مرحله SBAS ۱۵۱
- شکل ۵-۳- جابه‌جایی مطلق پیکسل‌های منتخب ۱۵۳
- شکل ۵-۴- هم‌پوشانی پیکسل‌های شناسایی شده بر روی تصویر Google Earth ۱۵۳
- شکل ۶-۱- نرخ رشد جابه‌جایی حاصل از تکنیک SBAS در سه منطقه Gámanjunni و Rismmalcohkka و Nordnes ۱۵۸
- شکل ۶-۲- نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی برای دو نقطه A و B به دو روش SBAS و ML-PS ۱۵۹
- شکل ۶-۳- نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی برای دو نقطه C و D به دو روش SBAS و ML-PS ۱۶۰
- شکل ۶-۴- نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی برای دو نقطه E و F به دو روش SBAS و ML-PS ۱۶۱
- شکل ۶-۵- تصویر زمینی از محدوده لغزشی ۱۶۲
- شکل ۶-۶- نقشه جابه‌جایی مطلق زمین لغزش Jiaju به دست آمده از تداخل‌سنجی راداری ۱۶۳
- شکل ۶-۷- نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری در منطقه لغزشی (A Alta Val Bardia) اینترفروگرام JERS در بازه زمانی ۲ جولای تا ۲۸ سپتامبر ۱۹۹۸ (B) اینترفروگرام JERS در بازه زمانی ۱۱ آگوست تا ۷ نوامبر ۱۹۹۵ (C) اینترفروگرام ERS در بازه زمانی ۹ آگوست تا ۱۳ سپتامبر ۱۹۹۷ (D) اینترفروگرام ERS در بازه زمانی ۱۳ سپتامبر تا ۱۸ اکتبر ۱۹۹۷ ۱۶۴
- شکل ۶-۸- نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری در منطقه لغزشی (A Alta Val Bardia) نقشه جابه‌جایی زمین مرجع شده حاصل از تصاویر JERS در راستای دید ماهواره در بازه زمانی ۲ جولای تا ۲۸ سپتامبر ۱۹۹۸ (B) نرخ اندازه‌گیری GPS (در واحد متر/ماه از سپتامبر ۲۰۰۱ تا سپتامبر ۲۰۰۳) (C) مقایسه بین اندازه‌گیری در راستای دید ماهواره‌ای JERS پنج مارک‌های GPS و پیکسل‌های متناظر در نقشه جابه‌جایی ۱۶۵



## فهرست شکل‌ها و نمودارها

- عنوان**
- صفحه**
- شکل ۶-۹- بزرگنمایی یک نمونه اینترفروگرام حاصل از تداخل‌سنجی در منطقه اردل چهارمحال بختیاری و شناسایی فرینج‌های جابه‌جایی در بخش‌های متفاوت آن ۱۶۶
- شکل ۶-۱۰- فرینج جابه‌جایی در منطقه قیصری ۱۶۶
- شکل ۶-۱۱- سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در کوه باباهور بر روی تصویر TM. نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته با مثلث و منطقه‌ی مبنا با مربع مشخص شده‌اند ۱۶۸
- شکل ۶-۱۲- سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در کوه باباهور بر روی تصویر TM. نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته با مثلث و منطقه‌ی مبنا با مربع مشخص شده‌اند. ۱۶۸
- شکل ۶-۱۳- نقشه‌ی حساسیت راستای دید سنجنده‌ی Terrasar-X در گذر بالارو از منطقه، به جابه‌جایی زمینی در راستای شیب. اندازه‌گیری در راستای خط دید سنجنده، در مناطق قرمز رنگ حساسیت بیش‌تر و مناطق آبی رنگ حساسیت کم‌تری به جابه‌جایی در راستای شیب دارند. ۱۶۹
- شکل ۶-۱۴- سری زمانی نقاط ۱ تا ۶. جابه‌جایی‌ها در راستای خط دید ماهواره و بر حسب میلی‌متر می‌باشند. نقاط ۱ تا ۳ در شیب‌های کوه پاگیج مشرف به شهر و نقاط ۴ تا ۶ در شیب‌های کوه باباهور قرار دارند. توجه شود که برای نمایش بهتر، بازه‌ی جابه‌جایی برای نقاط ۱ تا ۳ بین ۴۰- تا ۱۰ ۱۶۹
- شکل ۶-۱۵- نمای سه بعدی پیکسل‌های پایدار شناسایی شده در شیب کوه پاگیج مشرف به شهر دورود ۱۷۰
- شکل ۶-۱۶- نمای سه بعدی پیکسل‌های پایدار شناسایی شده در شیب باباهور مشرف به راه‌آهن دورود ۱۷۱
- شکل ۶-۱۷- سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در منطقه‌ی جبالبارز در دو مقیاس مختلف ۱۷۳
- شکل ۶-۱۸- سری زمانی نقاط مورد بررسی در منطقه‌ی جبالبارز. جابه‌جایی‌ها در راستای دید ماهواره و واحد‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند. ۱۷۴
- شکل ۶-۱۹- نمای سه بعدی از زمین لغزش در منطقه‌ی جبالبارز. محدوده‌ی زمین لغزش با خط سفید، محدوده‌ی مرجع با مربع و نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت با شماره مشخص شده‌اند. ۱۷۵
- شکل ۶-۲۰- سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در منطقه‌ی دلفارد در دو مقیاس مختلف ۱۷۶
- شکل ۶-۲۱- سری زمانی نقاط نشان مورد بررسی در منطقه‌ی دلفارد. جابه‌جایی‌ها در راستای دید ماهواره و واحد‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند. ۱۷۶
- شکل ۶-۲۲- نمای سه بعدی از زمین لغزش در منطقه‌ی دلفارد. محدوده‌ی زمین لغزش با خط سفید، محدوده‌ی مرجع با مربع و نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت با شماره مشخص شده‌اند. ۱۷۷



## فهرست شکل‌ها و نمودارها

### عنوان

### صفحه

- شکل ۶-۲۳- نمونه‌ای از یک نقشه جهت شیب ۱۷۹
- شکل ۶-۲۴- نمونه‌ای از یک نقشه زاویه شیب منطقه ۱۸۰
- شکل ۶-۲۵- نمونه‌ای از یک مدل سه بعدی اینترفروگرام که بیانگر قرار گرفتن تغییرات فاز شناسایی شده بر روی سطوح شیب‌دار می‌باشد. ۱۸۳
- شکل ۶-۲۶- نمونه‌ای از یک نمودار سری زمانی که جابه‌جایی معادل ۵ سانتی‌متر را در راستای دید ماهواره نشان می‌دهد ۱۸۳
- شکل ۶-۲۷- نمونه‌ای از یک نمودار سری زمانی که در آن زمان حرکت لغزش مشخص شده است. ۱۸۳
- شکل ۶-۲۸- نمایی از زمین لغزش یک دامنه که یک نمونه عینی از زمین لغزش چرخشی است ۱۸۴
- شکل ۶-۲۹- هم‌پوشانی پیکسل‌های PS بر روی نقاط مختلف دامنه لغزشی ۱۸۴
- شکل ۶-۳۰- نمای شماتیکی از یک لغزش چرخشی ۱۸۵
- شکل ۶-۳۱- سری زمانی نقطه واقع بر قله لغزش ۱۸۵
- شکل ۶-۳۲- سری زمانی نقطه میان دامنه لغزشی ۱۸۶
- شکل ۶-۳۳- سری زمانی نقطه میانی لغزش ۱۸۶
- شکل ۶-۳۴- سری زمانی نقطه واقع بر توده تجمع یافته لغزش ۱۸۷
- شکل پ.۱-۱- نحوه شبکه‌بندی منظم و میزان فشردگی شبکه در بخش‌های گوناگون لغزش ۱۹۶
- شکل پ.۱-۲- نمونه‌ای از شبکه‌بندی نامنظم، انتخاب جایگزین برای نقطه مبنای پنجم پس از تخریب ۱۹۸
- شکل پ.۱-۳- نحوه پیمایش توده لغزیده و انتخاب خطوط برداشت متقاطع ۱۹۹

## فهرست جدول‌ها

### عنوان

### صفحه

- جدول ۱-۱- طبقه‌بندی زمین لغزش از دیدگاه وارنز ۱۴
- جدول ۱-۲- بازه زمانی برداشت مشاهدات در چهار دسته ۶۱
- جدول ۲-۲- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش دنبلید طالقان ۶۶
- جدول ۳-۲- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش دنبلید طالقان ۶۷
- جدول ۴-۲- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش طارش و استخرسر ۶۸
- جدول ۵-۲- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش کلت علیا ۷۰
- جدول ۱-۶- سرعت جابه‌جایی سالیانه حاصل از مطالعه سه زمین لغزش مذکور در شمال نروژ ۱۶۲
- جدول ۲-۶- ماکزیمم مقدار جابه‌جایی در راستای افقی و قائم ۱۶۳



## مقدمه

رفتارسنجی به معنی نظارت می‌باشد و منظور از آن هشپاری از وضعیت یک سامانه یا پدیده از طریق مشاهده دگرگونی‌هایی است که ممکن است با گذر زمان در آن سامانه یا پدیده رخ دهد. امروزه رفتارسنجی در بسیاری از زمینه‌ها کاربرد دارد. برای نمونه می‌توان به شبکه‌های رفتارسنجی زمین‌لغزش اشاره نمود که به منظور آگاهی از چگونگی حرکت توده ناپایدار ایجاد می‌گردند. بدین منظور بایستی پروژه‌ای تعریف و طراحی شود تا تغییر شکل آن دامنه مورد بررسی قرار گیرد. لیکن پیش از ارائه طرح پروژه بایستی راهنمایی برای آگاهی از نحوه انجام کار در دست باشد. لذا این دستورالعمل برای طراحی و اجرای پروژه‌های رفتارسنجی زمین‌لغزش به کمک روش تعیین موقعیت ماهواره‌ای و تداخل‌سنجی راداری ارائه می‌شود. از آنجا که هیچ‌گونه دستورالعملی در ایران در زمینه رفتارسنجی زمین‌لغزش وجود ندارد، بر آن شدیم که دستورالعملی را برای چگونگی انجام مشاهدات رفتارسنجی به کمک دو تکنیک نوین نقشه‌برداری تهیه نماییم. در این راهنما با استفاده از استانداردها و روش‌های موجود در دنیا، سعی در ارائه راهکارهایی متناسب با امکانات موجود در کشور شده است.

لازم به ذکر است که سیستم اندازه‌گیری پیش فرض در فرمول‌ها سیستم متریک است و در مواردی که غیر از این بوده واحد مورد نظر ذکر شده است.

## - دامنه کاربرد

دامنه کاربرد این راهنما به ایجاد شبکه مشاهداتی جهت آشکارسازی حرکت دامنه‌های ناپایدار محدود می‌گردد و بررسی پدیده‌های دیگر در حوزه شمول این راهنما قرار نمی‌گیرد.

ابتدا در فصل اول مروری بر تعاریف و انواع زمین‌لغزش خواهیم داشت. سپس در فصل دوم به بحث در زمینه مبانی سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای و تداخل‌سنجی راداری پرداخته شد. در فصل سوم تا ششم مبانی، ضوابط و استانداردهای لازم در عملیات و محاسبات رفتارسنجی به کمک دو تکنیک ارائه شده است.







# فصل ۱

---

---

## زمین لغزش





## ۱-۱- تعریف زمین لغزش

تاکنون تعاریف و اصطلاحات متعددی از قبیل زمین لغزش، حرکت شیب، حرکت توده‌ای و... توسط محققین برای توصیف این پدیده زمین‌شناسی ارائه شده است. اما آنچه بیش‌تر مرسوم و متداول می‌باشد، عبارت و اصطلاح زمین لغزش است. لذا در این دستورالعمل نیز از این اصطلاح استفاده می‌گردد. به حرکت رو به پایین توده خاک یا سنگ از شیب، اصطلاحاً زمین لغزش گفته می‌شود [۳].

این پدیده بیشتر در مناطق کوهستانی و شیب‌دار رخ می‌دهد. البته عوامل زیادی از قبیل شرایط آب و هوایی، زمین‌شناسی منطقه و... در رخداد این پدیده موثر واقع می‌شوند که در (بخش ۱-۵) به تفصیل توضیح داده خواهند شد. این پدیده همه ساله در اکثر استان‌های کشور موجب خسارت‌های اقتصادی به راه‌ها، خطوط آهن، خطوط انتقال نیرو و ارتباطات، کانال‌های آبیاری و آبرسانی، تاسیسات معدنی، تاسیسات استخراج، پالایش نفت و گاز، شبکه شریان‌های حیاتی داخل شهرها، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی، سدها و دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی، جنگل‌ها و مراتع و منابع طبیعی، مزارع و مناطق مسکونی و روستاها گشته یا آن‌ها را مورد تهدید قرار می‌دهد و از آنجایی که زمین لغزش از خطرات قابل پیش‌بینی در زمین‌شناسی است می‌توان با شناسایی و بررسی آن‌ها تا حدی از میزان خسارات مالی و جانی ناشی از آن کاست. (شکل ۱-۱) و (شکل ۲-۲) تصاویری از زمین لغزش در لاکونچیتا و السالوادور را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- زمین لغزش لاکونچیتا در کالیفرنیا





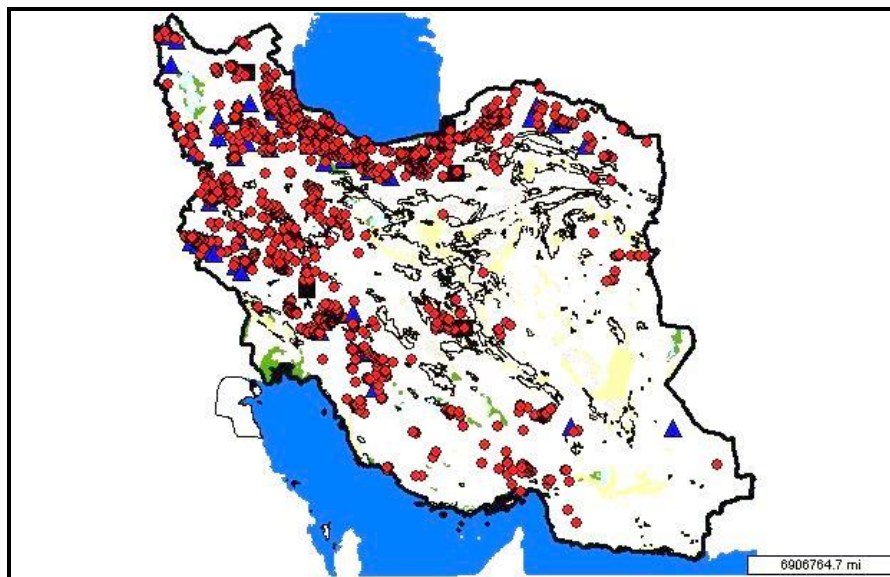
شکل ۱-۲- زمین لغزش السالوادور در تگزاس

## ۱-۲- وضعیت زمین لغزش در ایران و مرور کوتاهی بر چند زمین لغزش رخ داده شده

ایران از جمله کشورهای زلزله خیز جهان با شرایط زمین شناسی پیچیده و بارندگی‌های فصلی است. این عوامل در ایجاد مخاطرات طبیعی از قبیل زمین لغزش و انواع حرکات توده‌ای که منجر به تلفات جانی و خسارات مالی می‌شود، موثر می‌باشند. باید توجه داشت که به دلیل وجود شرایط خاص زمین شناسی (فعالیت گسل‌ها، سنگ‌شناسی، سازندهای فرسایش پذیر) شرایط آب و هوایی، لرزه‌خیزی، پوشش گیاهی و همچنین کم‌توجهی به قابلیت اراضی در مناطق مختلف، سالیانه بسیاری از کشورهای جهان متحمل هزینه‌های مالی و جانی هنگفتی می‌شوند.

با توجه به اینکه دو سوم از مساحت کشورمان از کوه‌ها و تپه‌ها تشکیل شده است، لذا با داشتن چنین شرایط طبیعی و با علم به اینکه زمین لغزش در مناطق شیب‌دار به وقوع می‌پیوندد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ایران یکی از کشورهای مستعد زمین لغزش می‌باشد. توزیع زمین لغزش‌ها در کشور (شکل ۱-۳) نشان می‌دهد که اکثر زمین لغزش‌ها در مناطق حاشیه ارتفاعات البرز و زاگرس قرار دارد. در این بخش به طور اجمالی و مختصر به شرح برخی از این زمین لغزش‌ها خواهیم پرداخت.



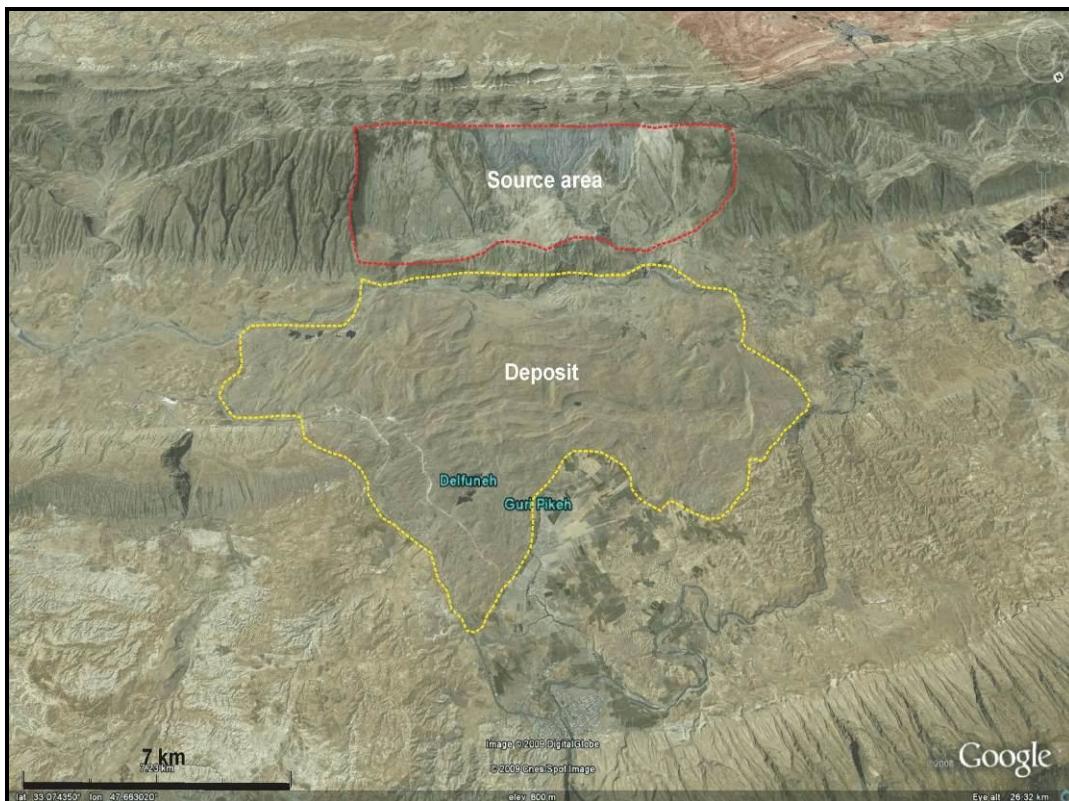


شکل ۱-۳- نقشه توزیع زمین لغزش‌های ثبت شده در ایران [۲]

#### ۱-۲-۱- زمین لغزش سیمره

زمین لغزش تاریخی سیمره، بزرگ‌ترین زمین لغزش شناخته شده جهان، در ایران در مرز بین استان‌های لرستان و ایلام، در جنوب غربی پلدختر به وقوع پیوسته است. بیش از ۱۰۰۰۰ سال قبل، ورقه‌ای از آهک‌های آسماری به طول ۱۵/۵ کیلومتر و حداقل ضخامت ۳۰۰ متر از ضلع شمال شرقی بزرگ تاقدیس کبیر کوه گسیخته شده و مصالح لغزیده در بیشینه جابه‌جایی خود به سمت شمال شرق ۱۹/۵ کیلومتر حرکت نموده و منطقه‌ای به وسعت ۱۷۳ کیلومترمربع را پوشانده است. با توجه به شیب عادی ۲۰ درجه‌ای این تاقدیس در ضلع شمال شرقی، عامل اصلی به وجود آورنده این زمین لغزش می‌بایست زلزله‌ای تاریخی بوده باشد [۳۳]. مصالح لغزشی با مسدود نمودن مسیر رودخانه‌های سیمره، کشکان و آبراهه‌های منطقه باعث ایجاد دریاچه‌هایی در حاشیه محدوده لغزشی شده که در حال حاضر رسوبات این دریاچه‌ها در اطراف مصالح لغزشی قابل مشاهده است (شکل ۱-۴).





شکل ۱-۴- زمین لغزش تاریخی سیمره

### ۱-۲-۲- زمین لغزش آبیکار کارکن علیا

در تاریخ دوازدهم فروردین ماه ۱۳۷۷ در منطقه لید و لملی (از توابع شهرستان فارس) واقع در ضلع شمال شرقی استان چهارمحال بختیاری، قسمتی از دامنه شمال شرقی کوه کینو پس از جدایی از پیکر کوه، به دره رودخانه لید سقوط کرد و یک بهمن سنگی را به وجود آورد که پس از عبور از دره روستای آبیکار کارکن علیا را با تمامی ۵۵ سکنه و دارایی‌هایشان در خود مدفون ساخت.

منطقه یاد شده در زاگرس مرتفع قرار گرفته و با توجه به ویژگی‌های زمین‌ساختی و زمین‌شناختی، این پدیده به شدت تکتونیزه و خرد شده می‌باشد. این عاملی است که در کنار برخی عوامل دیگر نظیر تناوب پدیده یخبندان و ذوب یخ در بازه‌های زمانی روزانه و فصلی، اختلاف ارتفاع بسیار زیاد بین قله کوه کینو و دره رودخانه لید، تخلخل فراوان و کارستیک بودن آهک‌های کرتاسه مصالح تشکیل دهنده بهمن سنگی، و بارندگی فراوان در روزهای پیش از رویداد، سبب وقوع بهمن سنگی آبیکار شده است. (شکل ۱-۵) نمایی از این زمین لغزش و روستای مدفون شده را نشان می‌دهد.

عوامل موثر در رخداد زمین لغزش آبیکار:

- ۱- کوهستانی بودن و وجود پرتگاه مرتفع و زمین ساخت جوان.
- ۲- گسله بودن، خرد شده بودن واحد آهکی صخره‌ساز و وجود پهنه شکستگی.
- ۳- کشش در گرده چین‌ها.



- ۴- وجود درزه‌های سیستماتیک و ایجاد گوه جدا شونده در اثر تلاقی چند سیستم درزه با هم.
- ۵- تخلخل فراوان و کارستیک بودن آهک‌ها که از نشانه‌های آن می‌توان غارهای فراوان و وجود حفرات فرو نشسته را نام برد که در کوه کینو به فراوانی دیده می‌شوند.
- ۶- بارندگی فراوان به مدت ۵ روز که باعث بالا رفتن سطح آب در حفرات و خلل و فرج سنگ‌ها شده و اصطکاک را در آن‌ها به شدت کاهش می‌دهد و وزن توده را به شدت و با سرعت افزایش می‌دهد. البته ذکر این نکته ضروری است که در مورد بهمن‌ها وجود آب ضرورتی ندارد ولی به عنوان کمک کننده موثر می‌باشد.
- ۷- تغییرات حرارتی (نوسانات حرارتی) فصلی و روزانه و تناوب پدیده یخبندان و ذوب یخ باعث خرد شدن و سست شدن و جدایش سنگ‌ها می‌شود. انطباق این رویداد دلخراش با زمان تغییرات شدید حرارتی و تبدیل روز گرم به شب یخبندان و همچنین تبدیل زمستان به بهار این عامل را به عنوان تیر خلاص این پدیده معرفی می‌کند.
- ۸- احتمال همراهی یک زمین‌لرزه کوچک با زمان رویداد این بهمن سنگی.
- ۹- تاثیر احتمال قرار گیری واحد صخره‌ساز آهکی بر روی واحد نرم و زود فرسای مارنی و شیلی.
- هماهنگی و ایفای نقش تمامی یا مجموعه‌ای از عوامل معرفی شده فوق عامل ایجاد بهمن گردید که با سرعت بسیار زیاد و زمان کوتاه چند ثانیه‌ای، روستایی را مدفون نمود [۳۴].



شکل ۱-۵- زمین لغزش آبیکار که در اثر این لغزش روستای آبیکار با ۵۵ نفر سکنه آن مدفون گردید [۳۹]

### ۳-۲-۱- زمین لغزش امامزاده علی

زمین لغزش امامزاده علی در خرداد سال ۱۳۷۷ در کیلومتر ۸۰ جاده تهران-آمل (هراز) در جنوب شرقی کوه دماوند به وقوع پیوسته است. منطقه دارای اقلیم کوهستانی و آب و هوای نیمه مرطوب می‌باشد. بارندگی سالیانه در این منطقه حدود ۵۰۰ میلی‌متر برآورد شده است (باقریان و همکاران، ۱۳۸۴).

براساس بررسی‌های صورت گرفته در اثر این زمین لغزش، بقعه امامزاده علی، امامزاده جعفر و امامزاده شیرین که در پایین دست جاده قرار داشته‌اند به طور کامل تخریب شده‌اند. همچنین این زمین لغزش باعث تخریب سه باب مغازه خوار و بار فروشی، یک تعمیرگاه، یک واحد رستوران و سالن غذاخوری بین‌راهی، چندین واحد مسکونی، مدفون شدن روستای ییلاقی بشنک امامزاده ۱۵ خانواری (بدون تلفات جانی)، انهدام تعدادی دکل فشار قوی برق و مخابرات، تخریب باغات میوه پایین دست جاده، تخریب تعداد ۱۱ مزرعه پرورش ماهی و حدود ۳۸۰ متر از طول جاده هرز شد که متعاقب آن جاده هرز حدود یک ماه مسدود گردید و منجر به گل آلودگی آب رودخانه در اثر سقوط مواد لغزشی شد. براساس اطلاعات محلی و نیز بازدید کارشناسان از محل حادثه میزان خسارت مستقیم ناشی از این زمین لغزش بالغ بر ۷۷۱۰ میلیون ریال می‌باشد [۳۶]. (شکل ۱-۶) نمایی از این زمین لغزش و مسدود شدن جاده هرز را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۶- انسداد جاده هرز به مدت ۴۰ روز در اثر وقوع زمین لغزش در سال ۱۳۷۷

### ۳-۱- اجزای تشکیل دهنده یک زمین لغزش

در (شکل ۱-۷) تصویر شماتیکی را مشاهده می‌نمایید که توسط وارنر در سال ۱۹۷۸ ارائه شد که در آن بخش‌های مختلف یک زمین لغزش معرفی شده‌اند و در ادامه به توصیف هر یک از اجزا می‌پردازیم.





تاج<sup>۱</sup>: به طور تجربی، بخش جابه‌جا نشده یک زمین لغزش است که در مجاورت بالاترین بخش افتگاه اصلی لغزش قرار دارد.

افتگاه اصلی<sup>۲</sup>: سطحی است با شیب تند، واقع در لبه بالایی لغزش که در اثر جدایی قطعه جابه‌جا شده از زمین، حاصل شده است. (سطح گسیختگی)

قله<sup>۳</sup>: بالاترین نقطه تماس بین توده جابه‌جا شده و افتگاه اصلی لغزش است.

سر<sup>۴</sup>: بالاترین سطح در زمین لغزش، در طول سطح تماس بین توده جابه‌جا شده و افتگاه اصلی لغزش است.

افتگاه‌های کوچک<sup>۵</sup>: سطوحی با شیب تند در توده جابه‌جا شده که در اثر رخ دادن لغزش‌های محلی، در داخل زمین لغزش اصلی به وجود می‌آیند.

توده اصلی<sup>۶</sup>: بخشی از توده جابه‌جا شده یک زمین لغزش است که صفحه گسیختگی را در بین افتگاه اصلی و پنجه لغزش پوشانده است.

پاشنه لغزش<sup>۷</sup>: آن بخش از زمین لغزش است که از محدوده پنجه صفحه گسیختگی فراتر رفته و سطح زمین (سطوح خارج از عملکرد زمین لغزش) را می‌پوشاند.

نوک لغزش<sup>۸</sup>: دور ترین نقطه مواد جابه‌جا شده از قله یک زمین لغزش واقع بر پنجه لغزش، نوک لغزش است.

پنجه<sup>۹</sup>: انحناى لبه توده جابه‌جا شده مواد، در پایین‌ترین سطح راه، پنجه زمین لغزش نامند که بیش‌ترین فاصله را تا افتگاه اصلی دارد.

صفحه گسیختگی<sup>۱۰</sup>: سطحی در زیر توده جابه‌جا شده که حرکت توده مواد در راستای آن صورت می‌پذیرد.

پنجه صفحه گسیختگی<sup>۱۱</sup>: محل تلاقی پایین‌ترین سطح صفحه گسیختگی با سطح اولیه زمین است.

سطح جدایش<sup>۱۲</sup>: بخشی از سطح کنونی زمین که توسط پاشنه لغزش پوشیده شده است.

توده جابه‌جا شده<sup>۱۳</sup>: توده‌ای از مواد تشکیل دهنده زمین که در اثر لغزش جابه‌جا شده‌اند.

پهنه تهی‌شدگی<sup>۱۴</sup>: پهنه‌ای از لغزش در توده جابه‌جا شده که قبل از رخداد، زیر سطح اولیه زمین واقع بوده است.

- 1- Crown
- 2- Main Scarp
- 3- Top
- 4- Head
- 5- Minor Scarps
- 6- Main Body
- 7- Foot
- 8- Tip
- 9- Toe
- 10- Surface of Rupture
- 11- Toe of Surface of Rupture
- 12- Surface of Separation
- 13- Displaced Material
- 14- Zone of Depletion



پهنه تجمع<sup>۱</sup>: پهنه‌ای از لغزش که پیش از رخداد، در بالای سطح ابتدایی زمین قرار داشته است.

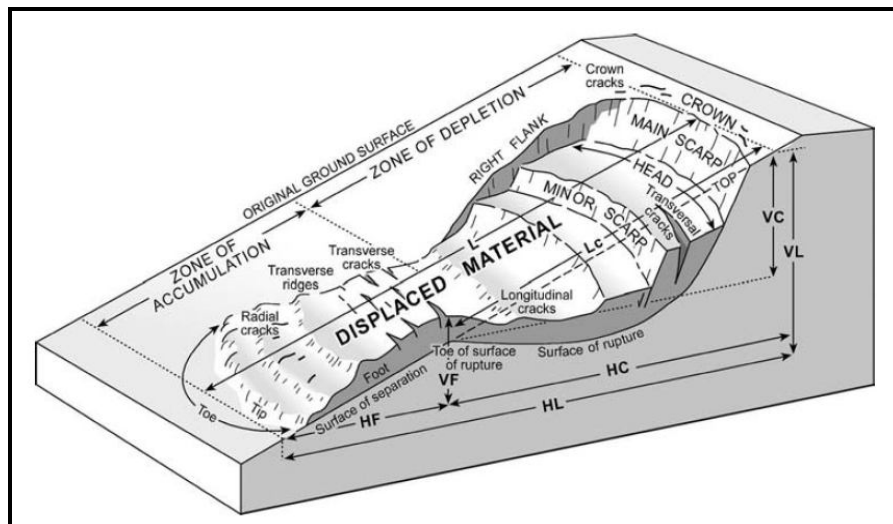
تهی‌شدگی<sup>۲</sup>: حجمی که توسط افتگاه اصلی لغزش، توده جابه‌جا شده از بخش تهی شده و سطح ابتدایی زمین محدود می‌شود.

توده تهی شده<sup>۳</sup>: بخشی از توده جابه‌جا شده که سطح گسیختگی را همپوشانی کرده و زیر سطح اولیه زمین بوده است.

تجمع مواد جابه‌جا شده<sup>۴</sup>: حجمی از مواد جابه‌جا شده که بالای سطح اولیه زمین تجمع یافته است.

جناحین لغزش<sup>۵</sup>: مواد جابه‌جا نشده مجاور جناحین سطح گسیختگی است که یا جناح راست و جناح چپ نامیده شده و یا با استفاده از جهات جغرافیایی معرفی می‌شوند.

سطح اولیه زمین<sup>۶</sup>: سطح شیب که قبل از رخداد زمین لغزش وجود داشته است.



شکل ۱-۷- اجزای تشکیل دهنده زمین لغزش

همان‌طور که از (شکل ۱-۷) اجزای تشکیل دهنده زمین لغزش بر می‌آید، در پهنه تهی‌شدگی ارتفاع سطح زمین در اثر لغزش زمین کاهش یافته و در پهنه تجمع ارتفاع سطح زمین افزایش یافته است. در صورتی که نقشه‌های توپوگرافی یا مدل‌های ارتفاعی رقومی زمین لغزش مورد بررسی برای هر دو بازه زمینی قبل و بعد از رخداد پدیده موجود باشد، می‌توان پهنه‌های تهی‌شدگی و تجمع را از اختلاف بین نقشه‌ها یا مدل‌ها به دست آورد. حجم در پهنه تهی‌شدگی یا

- 1- Zone of Accumulation
- 2- Depletion
- 3- Depleted Mass
- 4- Accumulation
- 5- Flank
- 6- Original Ground Surface



همان توده تهی شده، کاهش و در عین حال در پهنه تجمع افزایش یافته است. انتظار می‌رود که حجم پهنه تجمع بزرگ‌تر از حجم پهنه تهی‌شدگی باشد چرا که به طور کلی زمین در طی لغزش اتساع پیدا می‌کند [۳].

#### ۱-۴- طبقه‌بندی زمین لغزش‌ها

طبقه‌بندی زمین لغزش‌ها، نوع حرکت و پتانسیل مخرب آن‌ها را نشان می‌دهد. طبقه‌بندی‌های متفاوتی برای زمین لغزش ارائه شده است که اغلب بر اساس مکانیسم حرکت (ریزش، سیلان، واژگونی، لغزش، گسترش)، نوع مواد (سنگ، واریزه، خاک) و درجه شکستگی توده جا به جا شده بیان می‌شود. در سال ۱۹۷۸ وارنز (Varnes) نوعی طبقه‌بندی را ارائه نمود که در عین سادگی، براساس ویژگی‌هایی استوار بود که پس از رویداد یک زمین لغزش نیز حفظ و با گذشت زمان کم‌تر دست‌خوش تغییر می‌شد (جدول ۱-۱) بدین ترتیب این طبقه‌بندی جدید قادر به دسته‌بندی زمین لغزش‌های قدیمی‌تر نیز بود (Mathewson 1981). طبقه‌بندی وارنز بر دو مبنا استوار است:

الف- نوع حرکت مواد

ب- نوع مواد درگیر در حرکت

این طبقه‌بندی تاکنون به عنوان ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع دسته‌بندی زمین لغزش‌ها در سراسر دنیا به کار رفته است. همان‌طور که در (جدول ۱-۱) ملاحظه می‌نمایید وارنز پنج نوع حرکت توده‌ای بیان کرده است که هر یک بسته به نوع مصالح و سنگ بستر خود به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند.

خاک‌های مهندسی خود به دو دسته دانه ریز<sup>۱</sup> و دانه درشت<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. مصالح دانه ریز را به عنوان خاک<sup>۳</sup> و خاک‌های دانه درشت را به عنوان واریزه<sup>۴</sup> نام‌گذاری کرده‌اند.

خاک‌ها بیانگر مواد و مصالحی هستند که ۸۰ درصد ذرات آن‌ها یا بیش‌تر کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر می‌باشند. از طرفی واریزه‌ها شامل یک نسبت اعظمی از مواد درشت دانه هستند، به عبارتی ۲۰ تا ۸۰ درصد از ذرات آن‌ها بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر می‌باشند [۳].

- 1- Fine
- 2- Coarse
- 3- Earth
- 4- Debris



جدول ۱-۱- طبقه‌بندی زمین لغزش از دیدگاه وارنز [۳]

نوع مصالح		نوع حرکت	
سنگ بستر	خاک های مهندسی		
		عمدتا دانه درشت	عمدتا دانه ریز
ریزش سنگ	ریزش واریزه	ریزش خاک	سقوط
واژگونی سنگ	واژگونی واریزه	واژگونی خاک	واژگونی
لغزش دورانی در سنگ	لغزش دورانی در واریزه	لغزش دورانی در خاک	دورانی
لغزش بلوکی در سنگ	لغزش بلوکی در واریزه	لغزش بلوکی در خاک	لغزش‌ها
لغزش سنگی	لغزش در واریزه	لغزش در خاک	
گسترش سنگی	گسترش در واریزه	گسترش در خاک	گسترش های جانبی
روانه سنگی	روانه واریزه ای	خاکروانه	روانه‌ها
خزش عمیق			زمین لغزش‌های پیچیده
مجموع دو یا چند نوع عمده حرکت			

## ۱-۴-۱- ریزش

یک ریزش با جدا شدن سنگ یا خاک یا هر دو، از یک دامنه تند در طول سطحی بدون جابه‌جایی برشی یا برش اندک، آغاز می‌گردد. سپس مواد با افتادن، غلتیدن و یا جهش پایین می‌آیند. به عبارت دیگر اغلب در این نوع حرکت صفحه گسیختگی‌ای وجود ندارد. ریزش حرکات ناگهانی رو به پایین دامنه مواد سنگ، خاک یا هر دو هستند که از دامنه‌های تند یا صخره‌ها جدا شده‌اند [۱۳]. مواد افتان معمولا به دامنه پایینی با زاویه کم‌تر از زاویه افتادن برخورد کرده و سبب جهش می‌شوند. توده افتان ممکن است شکسته شده یا برخورد کند، ممکن است در دامنه‌های پرشیب‌تر شروع به غلتیدن کند و تا جایی ادامه دهد که زمین هموار می‌شود (شکل ۱-۷).



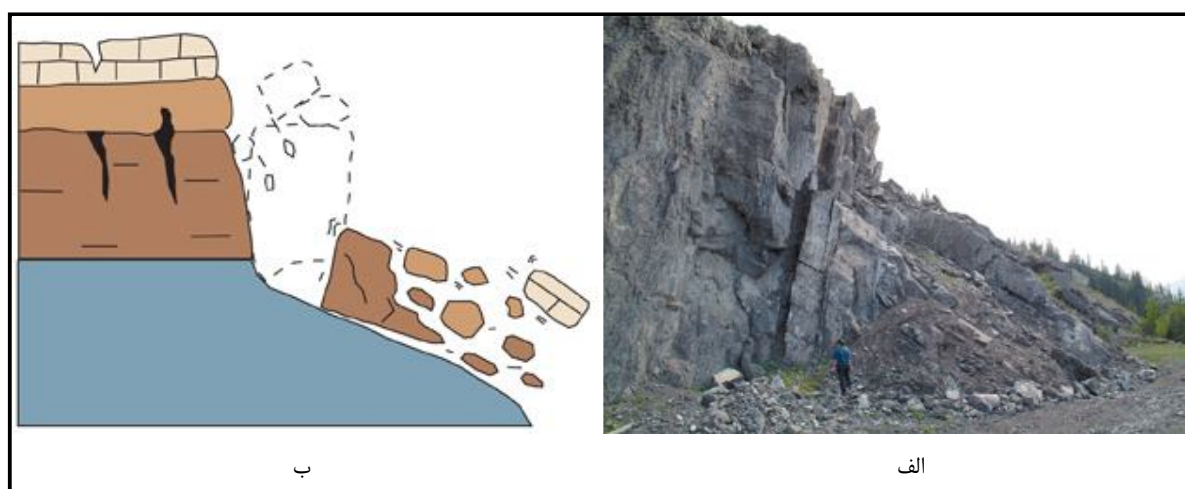
شکل ۱-۸- الف- تصویری شماتیک از ریزش، ب- سنگ افت/سنگ لغزش که در نزدیکی دره کلیبر کریک، کلرادو آمریکا در سال ۲۰۰۵ رخ داد. (عکس از سازمان زمین‌شناسی کلرادو) [۱۳]



## ۱-۴-۲- واژگونی

واژگونی عبارت است از چرخش پیشرونده توده‌ای از خاک یا سنگ بر روی دامنه حول یک محور یا نقطه زیر مرکز گرانش توده. واژگونی گاهی در اثر گرانش ناشی از وزن مواد دامنه در بالای توده جابه‌جا شده رخ می‌دهد. بعضی اوقات واژگونی در اثر آب یا یخ درون ترک‌ها در توده اتفاق می‌افتد. واژگونی‌ها متشکل از سنگ، واریزه (مواد درشت دانه) یا خاک (ریزدانه) هستند. واژگونی‌ها می‌توانند پیچیده و مرکب باشند [۱۳].

رنج سرعت حرکت واژگونی به شدت آهسته تا سریع، گاهی اوقات، بسته به مسافت در طی حرکت شتاب پیدا می‌کند (شکل ۱-۸).



شکل ۱-۹- الف- نمایی شماتیک از حرکت واژگونی، ب- عکس واژگونی بلوکی در فورت سان جان، بریتیش کلمبیا، کانادا

۱-۴-۳- لغزش<sup>۱</sup>

به حرکت دامنه‌ای توده خاک یا سنگ که بر سطح گسیختگی یا روی پهنه به نسبت نازک با کرنش برشی شدید رخ دهد لغزش گفته می‌شود. حرکت از ابتدا به طور هم‌زمان در همه آن چیزی که سرانجام به سطح گسیختگی تبدیل می‌شود، رخ نمی‌دهد. حجم مواد جابه‌جا شده از منطقه گسیختگی محلی توسعه پیدا می‌کند. اولین علایم نشان‌دهنده حرکت دامنه ناپایدار، وجود ترک‌های ایجاد شده در راستای لبه افتگاه اصلی بر روی سطح اولیه زمین است [۳].

۱-۴-۳-۱- لغزش دورانی<sup>۲</sup>

زمین‌لغزشی که در آن سطح گسیختگی به سمت بالا خمیده است (قاشق مانند) و حرکت لغزش کم و بیش در حول یک محور که موازی با کنتور دامنه است، دورانی است [۱۳]. توده جابه‌جا شده، در شرایط مشخصی ممکن است به

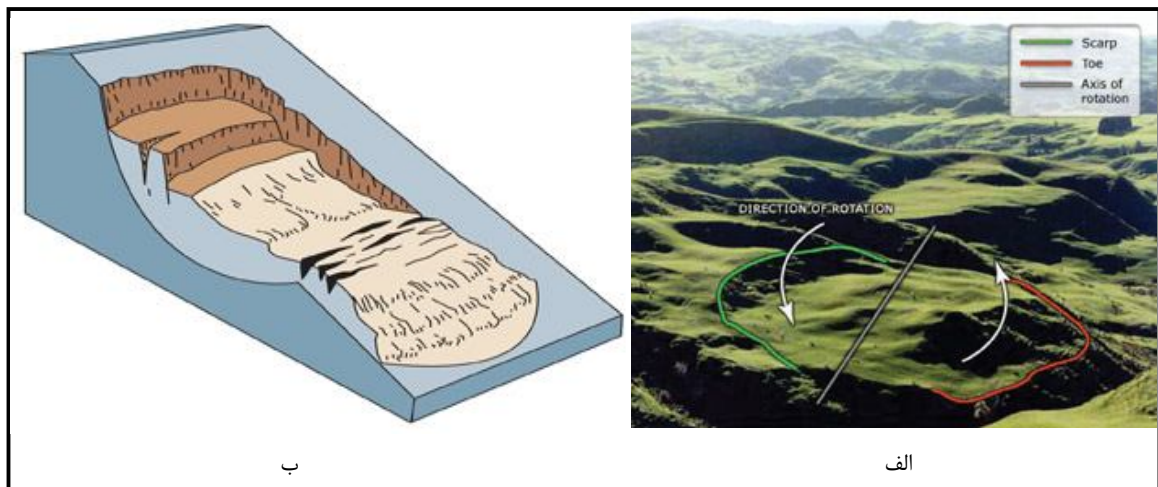
1- Slide

2- Rotational Slide



صورت توده‌ای به نسبت منسجم، در طول سطح گسیختگی با دگرشکلی درونی اندک حرکت کند. سر مواد جابه‌جا شده ممکن است تقریباً به صورت قائم به سمت پایین حرکت کند و سطح بالایی مواد جابه‌جا شده ممکن است به سمت عقب و پله کج شود. اگر لغزش دورانی باشد و چندین صفحه حرکت خمیده موازی داشته باشد به آن اسلامپ گویند [۳]. به این دلیل که لغزش‌های دورانی در مواد همگن بسیار بیش‌تر رخ می‌دهند، آن‌ها معمول‌ترین زمین‌لغزش‌ها در موارد مورد استفاده در خاکریزی‌ها هستند [۳].

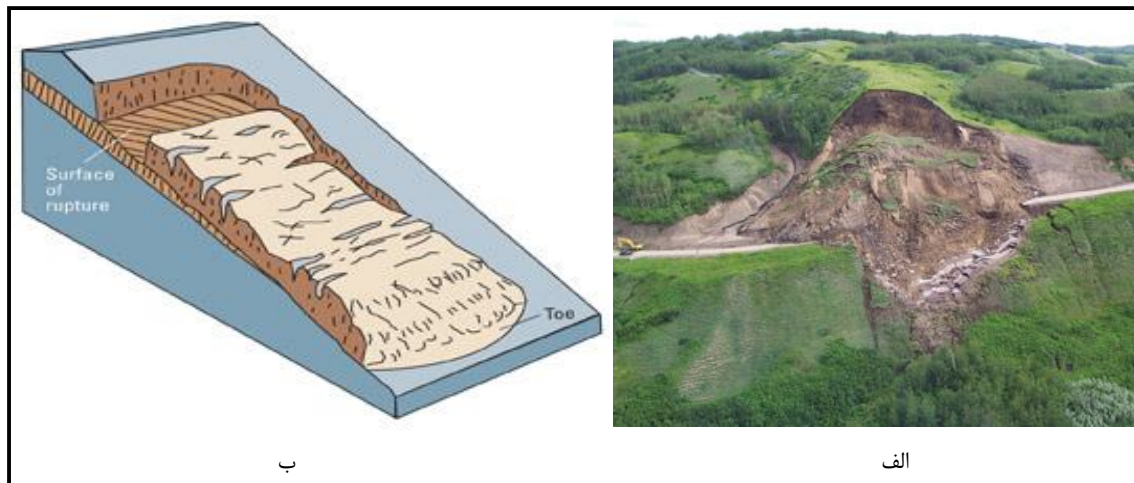
این نوع زمین‌لغزش در دامنه‌های با شیب ۲۰ تا ۴۰ درجه رخ می‌دهند (شکل ۱-۱۰)



شکل ۱-۱۰- الف- نمایی شماتیک از حرکت لغزش دورانی، ب- یک زمین‌لغزش دورانی که در نیوزیلند رخ داده است.

#### ۱-۴-۳-۲- زمین‌لغزش انتقالی<sup>۱</sup>

توده در یک زمین‌لغزش انتقالی در راستای یک صفحه گسیختگی مسطح یا مواج با به سمت بیرون بر فراز سطح اولیه زمین حرکت می‌کند. به طور کلی این نوع لغزش‌ها نسبتاً کم‌عمق‌تر از لغزش‌های دورانی هستند. این زمین‌لغزش ممکن است تا مسافت قابل ملاحظه‌ای، اگر سطح گسیختگی شیب کافی داشته باشد، ادامه پیدا کند، در تضاد با زمین‌لغزش دورانی که تمایل دارد به تعادل در لغزش دست یابد [۳]. ماده در این لغزش می‌تواند از خاک‌های سست و نامتراکم تا تیغه‌های گسترده‌ای از سنگ یا هر دو تشکیل شود. زمین‌لغزش‌های انتقالی معمولاً در طول ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، درزه‌ها، سطوح لایه‌بندی و یا سطح تماس بین سنگ و خاک گسیخته می‌شوند [۱۳]. در محیط‌های شمالی لغزش می‌تواند در طول لایه یخبندان دائمی نیز حرکت کند (شکل ۱-۱۱).



شکل ۱۱-۱- الف - نمایی شماتیک از لغزش انتقالی، ب- یک زمین لغزش انتقالی که در سال ۲۰۰۱ در دره رودخانه بیتون، بریتیش کلمبیا، کانادا رخ داد [۱۳].

#### ۱-۴-۴-۱- گسترش‌ها<sup>۱</sup>

کشیدگی یک توده سنگ یا خاک چسبنده همراه با فرونشینی کلی توده ترک دار مواد چسبنده به درون مواد نرم زیرین را گویند. سطح گسیختگی در این نوع حرکت توده‌ای یک سطح با کرنش برشی شدید نیست. گسترش‌ها ممکن است در اثر روان‌گرایی یا جریان مواد نرم‌تر زیرین ایجاد شوند. انواع گسترش‌ها عبارتند از گسترش بلوکی، گسترش روان‌گرایی و گسترش جانبی [۳].

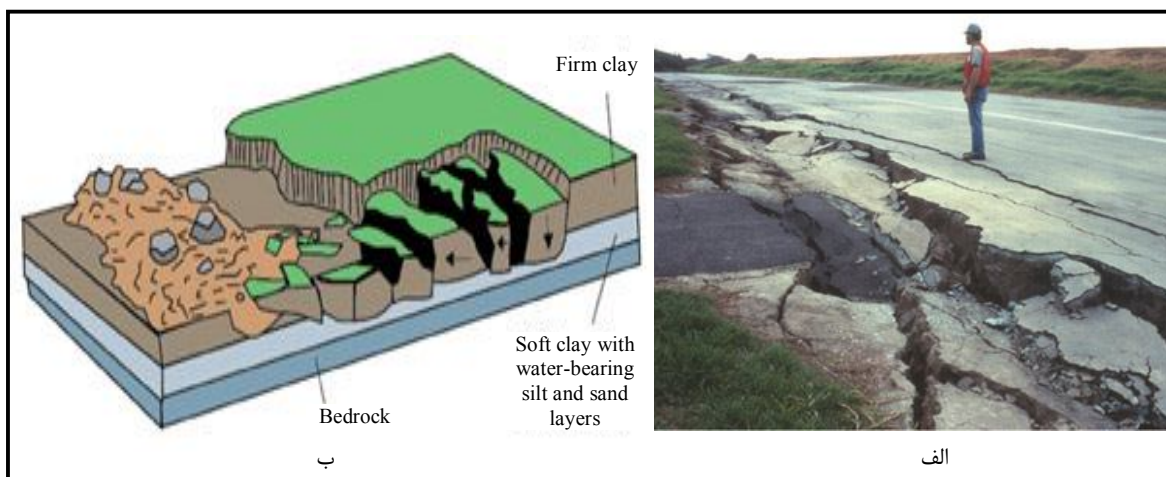
#### ۱-۴-۴-۱-۱- گسترش جانبی<sup>۲</sup>

گسترش جانبی معمولاً در دامنه‌های بسیار ملایم یا اساساً زمین‌های مسطح رخ می‌دهد، به ویژه جایی که لایه سنگ یا خاک مقاوم‌تر بالایی دچار کشیدگی شده و بر روی یک لایه نرم‌تر و ضعیف‌تر حرکت کند. چنین گسیختگی‌هایی معمولاً با برخی فرونشست‌ها درون لایه ضعیف‌تر همراه هستند. در گسترش سنگ، زمین جامد کشیده شده و ترک می‌خورد، به آهستگی از زمین پایدار جدا می‌شود و بر روی لایه نرم‌تر حرکت می‌کند بدون اینکه نیاز به تشکیل سطح گسیختگی مشخص باشد. لایه نرم‌تر ممکن است در شرایط معینی به درون شکستگی‌ها نفوذ کرده و لایه در حال کشش را به بلوک‌هایی تقسیم کند. در گسترش خاک لایه پایدار بالایی در طول واحد ضعیف زیرین که پس از روان‌گرایی یا دگر شکلی پلاستیک جریان یافته است، کشیده می‌شود.

- 1- Spreads
- 2- Lateral Spread



اگر لایه ضعیف‌تر نسبتاً ضخیم باشد، بلوک‌های رویی متحرک و ترک‌دار ممکن است در آن فرونشست کنند، جابه‌جا شوند، بچرخند، تکه تکه شوند، دچار روان‌گرایی شوند یا حتی جریان یابند (شکل ۱-۱۲).



شکل ۱-۱۲- الف- نمایی شماتیک از لغزش گسترش جانبی، ب- خسارت گسترش جانبی به یک جاده در نتیجه زمین‌لرزه سال ۱۹۹۸ لوما پریتا، کالیفرنیا، آمریکا [۱۳]

#### ۱-۴-۵- روانه‌ها

یک روانه عبارتست از حرکت مکانی پیوسته‌ای که در آن سطح برش عمر کمی دارد. سرعت بخش‌های مختلف در توده متحرک در یک روانه شبیه به یک مایع ویسکوز است. اغلب، تبدیل تدریجی بین لغزش‌ها و روانه‌ها وجود دارد، بسته به درصد آب، تحرک‌پذیری، و تکامل حرکت است [۳].

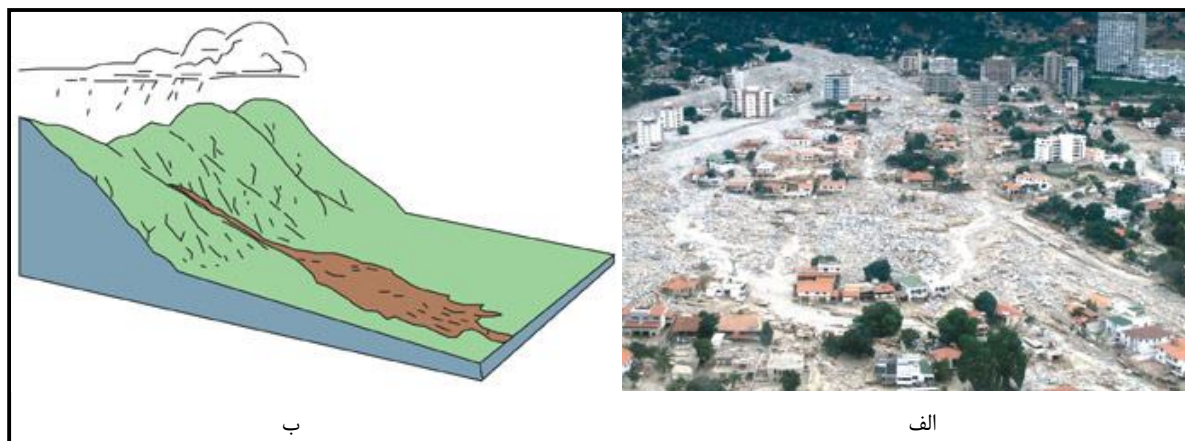
#### ۱-۴-۵-۱- روانه‌های واریزه<sup>۲</sup>

نوعی از حرکت توده‌ای سریع است که در آن خاک، سنگ و گاه مواد آلی سست با آب ترکیب شده و دوغابی تشکیل می‌دهند که به سمت پایین دامنه حرکت می‌کند. به طور غیر رسمی و نامناسب به آن‌ها لغزش گل نیز می‌گویند، زیرا حجم زیادی از مواد در روانه وجود دارد. گاه، با سرعت گرفتن یک لغزش انتقالی یا دورانی و از بین رفتن چسبندگی درونی توده یا جذب آب، آن لغزش به یک روانه واریزه تکامل پیدا می‌کند [۱۳]. روانه‌های خشک ممکن است گاه در ماسه‌های بدون چسبندگی تشکیل شوند (روانه ماسه). روانه واریزه می‌تواند مرگ آمیز باشد زیرا سرعت بالا داشته و ممکن است بدون هشدار رخ دهد (شکل ۱-۱۳).

- 1- Flow
- 2- Debris Flow



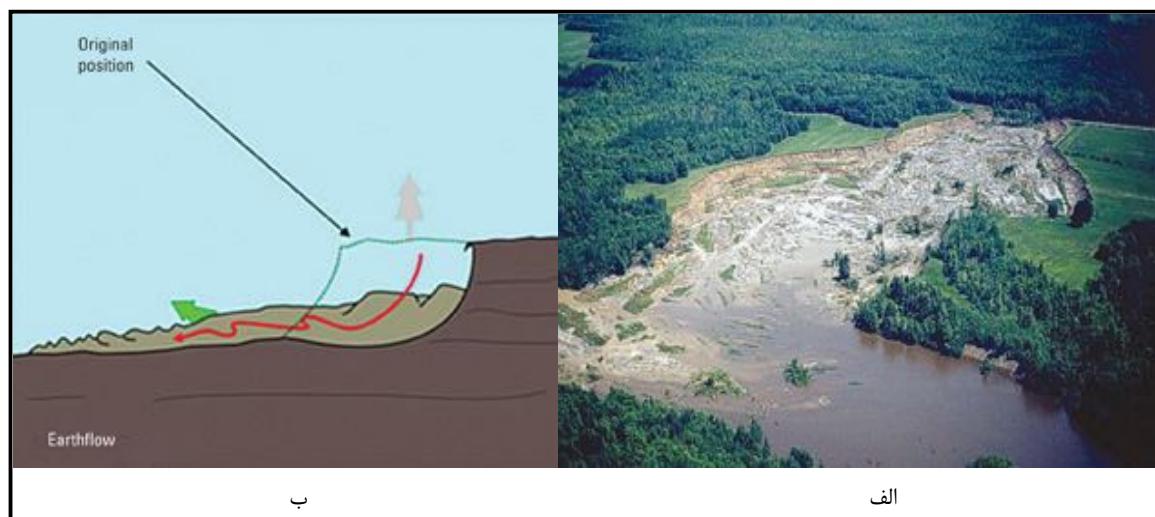




شکل ۱-۱۳- الف- نمایی شماتیک از روانه واریزه، ب- خسارت روانه واریزه به شهر کارابالدا، در شمال ساحل ونزوئلا. در دسامبر ۱۹۹۹ که ۳۰۰۰۰ نفر را به کام مرگ کشاند [۱۳].

#### ۱-۴-۵-۲- روانه خاک

روانه خاک بر دامنه‌های با شیب ملایم تا متوسط، در خاک‌های ریزدانه، معمولاً رس یا سیلت رخ می‌دهد، ولی در سنگ بستر رس‌دار به شدت هوازده نیز امکان‌پذیر است. توده در یک روانه خاک همانند یک جریان ویسکوز یا پلاستیک با دگرشکلی داخلی شدید حرکت می‌کند. لغزش‌ها یا گسترش‌های جانبی نیز ممکن است در فرودست به روانه خاک تکامل یابند. روانه‌های خاک از بسیار کند (خزش) تا سریع و ناگهانی نوسان می‌کنند [۱۳]. محرکان این نوع زمین لغزش عبارتند از اشباع‌شدگی خاک در اثر بارندگی طولانی مدت یا شدید یا ذوب برف، کاهش ناگهانی سطح آب مجاور که سبب کاهش ناگهانی سطح آب زیرزمینی می‌شود، فرسایش رودخانه در کف یک دامنه، فعالیت‌های حفاری و ساخت و ساز، بارگذاری بیش از حد بر یک دامنه، زمین‌لرزه، یا لرزش‌های مصنوعی (شکل ۱-۱۴).



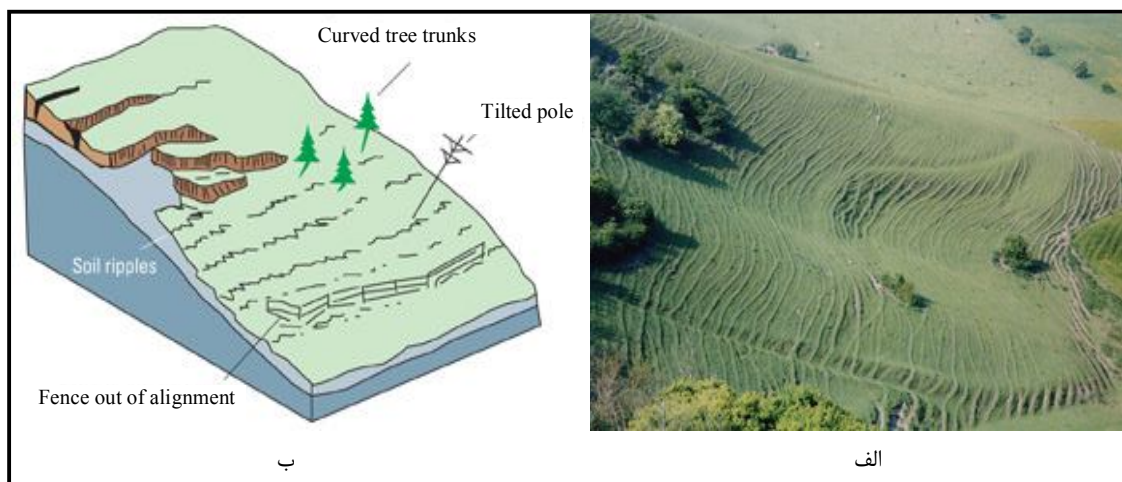
شکل ۱-۱۴- الف- نمایی شماتیک یک روانه خاک، ب- زمین لغزش لمیوکس در سال ۱۹۹۳، یک روانه خاک که به دره رودخانه سوز نیشن جریان یافته و سبب مسدود شدن رودخانه گردید.



## ۱-۴-۵-۳- روانه خاک کند (خزش)

خزش نامی غیررسمی برای روانه خاک کند می‌باشد و عبارت است از حرکت کند و غیرقابل درک اما پیوسته رو به پایین دامنه خاک یا سنگ تشکیل دهنده دامنه. حرکت در اثر تنش برشی داخلی ایجاد می‌شود که برای اعمال دگر شکلی کافی است اما سبب گسیختگی نمی‌شود. در کل، سه نوع خزش وجود دارد:

- ۱- فصلی، که حرکت در عمقی از خاک است که از تغییرات فصلی رطوبت و دما متأثر می‌شود.
- ۲- پیوسته، جایی که تنش برشی، پیوسته فراتر از مقاومت ماده است.
- ۳- پیشرونده، جایی که شیب‌ها به نقطه‌ای می‌رسند که زمان گسیختگی دیگر انواع زمین لغزش‌ها است (شکل ۱-۱۵).



شکل ۱-۱۵- الف- نمایی شماتیک از خزش، ب- آثار خزش در منطقه‌ای نزدیک ساسکس شرقی، بریتانیا، به نام علفزارهای چالک.

خزش می‌تواند ناحیه‌ای باشد (ده‌ها کیلومتر مربع) یا تنها به محدوده‌ای کوچک بسنده کند. تعیین مرزهای خزش امری دشوار است زیرا این رخداد خود چنان کند است که عوارض سطحی نشان‌دهنده دگر شکلی ممکن است بروز نکنند. سرعت این نوع زمین لغزش، بسیار کند تا به شدت کند می‌باشد (معمولا کمتر از ۱ متر در دهه).

برای خزش فصلی بارندگی و ذوب یخ محرکان شاخص هستند، در حالی که برای انواع دیگر خزش عوامل متعددی مانند هوازدگی شیمیایی و فیزیکی، لوله‌های نشت کننده، زهکشی ضعیف، انواع ناپایداری ساخت و ساز و مانند آن‌ها از آنجا که به دلیل کندی حرکت، شناسایی آن در برخی مناطق دشوار است، خزش گاهی تا زمان رسیدن به محل یک ساختمان شناسایی نمی‌شود. خزش می‌تواند به آسانی خطوط لوله، ساختمان‌ها، جاده‌ها، حصارها، و مانند آن‌ها را پاره کند و می‌تواند به گسیختگی‌های شدیدتر زمین که مخرب‌تر بوده و سرعت بیشتری دارند، تبدیل شود [۱۳].



### ۱-۵- عوامل موثر در وقوع زمین لغزش

چندین عامل مانند شرایط زمین‌شناسی، مورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی منطقه، شرایط آب و هوایی و عوامل انسانی منجر به ناپایداری شیب می‌شوند اما تنها یک عامل آن را تشدید می‌کند و آغاز کننده لغزش شیب می‌باشد. به عبارت دیگر، عوامل رخداد لغزش عواملی هستند که شیب را برای شکست و گسیختگی آسیب‌پذیر می‌کنند و زمینه را برای ناپایدار شدن شیب مهیا می‌سازند و عامل ماشه‌ای پدیده منفردی است که در نهایت لغزش زمین را آغاز می‌کند. بنابراین، عوامل رخداد با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا یک شیب را برای گسیختگی آسیب‌پذیر سازند و عامل محرک در نهایت شروع کننده حرکت توده می‌باشد. به عبارت دیگر، عوامل موثر در وقوع لغزش یا همان عوامل ذاتی لازمه لغزش دامنه هستند. در واقع اگر هیچ یک از عوامل ذاتی در یک شیب وجود نداشته باشند عوامل ماشه‌ای نیز نمی‌توانند موجب لغزش شوند [۳].

#### ۱-۵-۱- عوامل ذاتی

عوامل متعددی مانند شرایط زمین‌شناسی، مورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی منطقه، شرایط آب و هوایی و هوازگی موجب ناپایداری شیب و رخداد زمین لغزش می‌شوند اما تنها یک عامل موجب شروع لغزش می‌شود. به عواملی که زمینه را برای لغزش آماده می‌کنند و شیب را آسیب‌پذیر می‌سازند عوامل ذاتی و به عواملی که آغاز کننده لغزش هستند عوامل ماشه‌ای یا محرک می‌گویند.

یک توده سنگی یا خاکی در یک سطح شیب‌دار طبیعی در معرض تنش‌های برشی ثقلی قرار دارد که معمولاً با مقاومت برشی در حال تعادل است. چنانچه تنش برشی دامنه بر مقاومت برشی آن غلبه یابد گسیختگی برشی ایجاد شده و سرانجام لغزش رخ می‌دهد. به طور کلی عوامل موثر در حرکت مواد توده‌ای را به دو دسته کلی می‌توان تقسیم کرد:

الف- عواملی که سبب افزایش تنش برشی می‌شوند.

ب- عواملی که سبب کاهش مقاومت برشی می‌شوند.

لازم به ذکر است که برخی عوامل هم موجب افزایش تنش برشی و هم موجب کاهش مقاومت برشی می‌گردند. در

بخش آتی عوامل تشدید کننده و محرک زمین لغزش به تفصیل شرح داده می‌شود [۳].

#### ۱-۵-۲- عوامل افزایش دهنده تنش برشی

تنش برشی ممکن است طی فرآیندهایی چون حذف تکیه‌گاه جانبی، تحمیل بار اضافی بر روی شیب، تنش‌های زودگذر ناشی از انفجار یا زلزله و بالا آمدگی سطح زمین افزایش یابد.



### ۱-۲-۵-۱- حذف تکیه‌گاه جانبی

کلیه فعالیت‌هایی که موجب از بین رفتن تکیه‌گاه جانبی و زیرین دامنه می‌شوند منجر به افزایش تنش برشی شده که در نهایت با غلبه بر مقاومت برشی لغزش رخ می‌دهد. پنجه لغزش به وسیله فرسایش برداشته شده و دامنه را پر شیب می‌کند. این فرسایش توسط عوامل طبیعی از قبیل نهرها، رودخانه‌ها، یخچال‌های طبیعی، امواج و جریان‌ات رخ می‌دهد. علاوه بر عوامل طبیعی برخی عوامل انسانی نیز منجر به لغزش دامنه می‌شوند که از آن جمله می‌توان به حفاری‌های لازم جهت ایجاد معادن، گودال‌ها، کانال‌ها و یا به فروکش سطح آب دریاچه‌ها و مخازن آب، ایجاد دریاچه‌های مصنوعی و مخازن و نوسانات سطح آب در آن‌ها اشاره کرد. برداشت بی‌رویه از مخلوط رودخانه‌ای و برهم زدن بستر و تعادل جریان نیز از جمله فعالیت‌های انسانی است که موجب از بین رفتن تکیه‌گاه جانبی شده و جزء عوامل محرک و ماشه‌ای لغزش به شمار می‌روند [۳].

### ۱-۲-۵-۲- افزایش روباره

افزایش وزن مواد و مصالح شیب منجر به ناپایداری شیب و در نهایت ایجاد لغزش می‌شود. هرگونه فعالیت انسانی و غیر انسانی که منجر به افزایش روباره شود می‌تواند در افزایش تنش برشی دامنه موثر واقع شود. به طور نمونه خاکریزها، دپو کردن مواد معدنی، سنگ یا مواد باطله حاصل از گودبرداری‌ها، انباشت زباله، ساختمان‌سازی و سازه‌ای دیگر، کشاورزی و آبیاری بر روی دامنه، وزن آب ناشی از نشت لوله‌های آب و فاضلاب از جمله فعالیت‌های انسانی هستند که منجر به افزایش روباره دامنه می‌شوند. افزایش وزن مواد ناشی از بارش باران و برف که موجب افزایش سطح آب زیرزمینی شده نیز منجر به افزایش تنش برشی شده و لغزش زمین را ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که محل احداث ساختمان‌ها نیز در ناپایداری شیب بسیار حائز اهمیت است. به طور مثال در صورتی که ساختمان‌ها در لبه بالای دامنه احداث شوند امکان لغزش به مراتب بیش‌تر خواهد شد [۳].



شکل ۱-۱۶- وقوع زمین لغزش ناشی از تحریک زلزله در شمال تایوان منجر به مسدود شدن اتوبان می‌شود [۲۷].

### ۱-۵-۲-۳- افزایش تنش‌های زودگذر

ایجاد ارتعاشات طبیعی مانند زمین‌لرزه، ارتعاشات مصنوعی ناشی از انفجارات و کار ماشین‌آلات ساختمانی در کارهای معدن و ارتعاشات ناشی از ترافیک می‌تواند تنش برشی را در طول یک سطح مستعد گسیختگی افزایش دهد. زلزله سال ۱۹۷۰ در پرو باعث شروع لغزش در کوه هاوس کاران گردید و تدریجاً تبدیل به جریان واریزه‌ای شد و به اندازه‌ای سرعت داشت که توانست از یک پشته ۱۵۰ متری عبور نموده و ۲۰۰۰ نفر را در یانگی مدفون سازد. همچنین وقوع بیش از صد زمین‌لغزش کوچک و بزرگ در پی زلزله ۳۱ خرداد ۶۹ گیلان نمونه‌های بارز از زمین‌لغزش‌های متاثر از این عامل است. (شکل ۱-۱۶) مسدود شدن یک اتوبان توسط زمین‌لغزش را نشان می‌دهد که در اثر تحریک زلزله‌ای به مقیاس ۶/۵ ریشتر در شمال تایوان در ۲۵ آوریل سال ۲۰۱۰ به وقوع پیوست [۲۷].

### ۱-۵-۲-۴- مقاومت پایین شیب

مقاومت پایین مواد خاکی یا سنگی که یک توده در حال لغزش را تشکیل می‌دهند ممکن است ناشی از مشخصات ذاتی مواد باشد یا ناشی از وجود ناپیوستگی‌های موجود در توده خاک و سنگ باشد.

**مشخصات مواد:** مصالح و مواد تشکیل دهنده توده خاک یا سنگ ممکن است به طور طبیعی سست باشند و یا در نتیجه فرآیندهای طبیعی از قبیل اشباع توسط آب سست شوند. مواد آلی و رس‌ها به طور طبیعی مقاومت پایینی دارند. سنگ‌هایی که به وسیله هوازدگی به رس‌ها تجزیه می‌شوند (توف‌های آتشفشانی هوازده، شیست‌ها و سرپنتینیت‌ها) نیز خواص متشابهی را ایجاد می‌کنند.

علاوه بر طبیعت ذرات تشکیل دهنده مواد و مصالح، آرایش ذرات ممکن است سبب کاهش مقاومت مصالح شود. به طور کلی مصالح حساس که هنگام مختل شدن مقاومت خود را از دست می‌دهند، بافت سست و ضعیفی دارند.

**مشخصات توده:** توده خاک یا سنگ ممکن است به دلیل ناپیوستگی‌هایی چون گسل‌ها، سطوح لایه لایه، ورقه ورقه شدن، درزها، شکاف‌ها سست شده باشد. همچنین در صورتی که در لایه‌های زیرین توده یک لایه غیر قابل نفوذ یا با نفوذپذیری کم نسبت به جریان آب وجود داشته باشد و در عین حال مصالح و مواد لایه‌های سطحی زمین از نفوذپذیری مناسبی نسبت به آب بر خوردار باشد [۳].

### ۱-۵-۳- عوامل کاهش دهنده مقاومت برشی

در کاهش مقاومت برشی نیز عوامل متعددی نقش به‌سزایی دارد که در اینجا به شرح مختصری از آن‌ها می‌پردازیم.

#### ۱-۵-۳-۱- تغییر کاربری اراضی (از بین بردن پوشش گیاهی جنگلی)

تبدیل زمین‌ها و نواحی شیب‌دار جنگلی به زمین‌های کشاورزی و مرتعی از مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی موثر در وقوع زمین لغزش است. قطع درختان جنگلی به کاهش مقاومت برشی توده و افزایش ناپایداری منجر می‌شود. مدت زمان لازم بعد از قطع درختان جنگلی و تبدیل آن‌ها به اراضی کشاورزی و مرتعی برای ظهور علائم ناپایداری برابر مدت

زمان لازم برای پوسیدن ریشه گیاهان جنگلی است. ریشه‌های درختان در هم فرو می‌روند و لایه محکمی ایجاد می‌نمایند که تکیه‌گاه محکمی برای خاک بالادستی می‌شود. مطالعات انجام شده در این زمینه در منطقه اوهایو امریکا نشان می‌دهد دامنه‌های جنگل کاری شده در زاویه ۳۵ درجه و حتی بیش‌تر به دلیل افزایش مقاومت برشی ناشی از شبکه ریشه‌ای گیاهان پایدارند در حالی که درجه پایداری دامنه‌های مشابه فاقد درخت حدوداً کم‌تر از ۱۴ درجه است. همچنین پوشش جنگلی از طریق جذب و تبخیر مقدار قابل توجهی آب باران و به طبع آن گرفتن مقدار زیادی از آب توده و تبخیر آن به پایداری شیب کمک می‌نماید [۳۰].

قطع بی‌رویه پوشش گیاهی باعث می‌شود که ریشه گیاهان که نقش مهمی در تثبیت اسکلت خاک دارند، از بین رفته و در نتیجه مقاومت برشی نیز کاهش می‌یابد. پوشش گیاهی از تابش مستقیم خورشید جلوگیری کرده و از تخریب ساختمان خاک می‌کاهد و مقداری از آب را به وسیله عمل تبخیر و تعرق کم کرده و برگ درختان از برخورد سریع آب باران به زمین جلوگیری می‌کند [۲۶].

آنچه امروزه در مورد نقش موثر این فاکتور در پایداری دامنه‌ها به اثبات رسیده، افزایش فوق‌العاده تعداد زمین لغزش‌های عمیق و کم عمق، پس از گذشت دوره‌های چند ساله از قطع پوشش درختی به‌ویژه در مناطقی است که از نظر جنس نهشته‌های زمین‌شناسی حساس هستند. مطالعات انجام شده در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد که چگونه پوشش گیاهی چوبی، به ویژه درختان، اثرات مکانیکی و هیدرولوژیکی مثبت در پایداری دامنه‌ها، اعمال می‌کند. این مساله به طور تجربی در بسیاری از مناطق لغزشی ایران مانند گیلان، مازنداران و چهارمحال و بختیاری به وضوح به چشم می‌خورد. به طور کلی اثر پوشش گیاهی بر پایداری دامنه‌ها را می‌توان به وسیله نقش آن در افزایش مقاومت مصالح دامنه و کنترل محتوی توده‌های خاکی به صورت زیر بیان کرد.

- اثرات هیدرولوژیکی: پوشش گیاهی میزان آب نفوذی ناشی از بارندگی را کاهش داده و موجب پایین بردن تراز آب زیرزمینی و کاهش درصد رطوبت خاک در بالای تراز آب زیرزمینی می‌گردد.
- اثرات مکانیکی: ریشه‌های گیاهان به طریق مشابه با مسلح نمودن بتن، خاک را مسلح می‌نماید.

- ساز و کار اجزاء گیاه در پایداری دامنه‌ها

#### الف- شاخ و برگ گیاهان

اثر شاخ برگ گیاه در مقابل باران، کنترل انرژی جنبشی قطرات باران بوده و در اثر برخورد با آن، قطرات بزرگ‌تر باران به قطرات ریز تر تقسیم شده، در محدوده وسیع‌تری پراکنده شده و زمینه تبخیر آن‌ها فراهم می‌شود (بهبهانی ۱۳۷۳). در خلال یک بارش سبک نزدیک به ۱۰۰٪ بارش و نیز درصد عمده‌ای از بارش در بارندگی شدید (حدود ۲۰٪ یک بارش ۷۵ میلی‌متری) توسط برگ‌ها، قبل از رسیدن به زمین، گرفته می‌شوند و میزان گیرایی کل بارش سالانه توسط جنگل‌های همیشه سبز را، بسته به شدت بارش تا ۶۰٪ کل بارندگی ذکر کرده‌اند (حق‌شناس و همکاران ۱۳۷۳). همچنین برگ‌ها و شاخه‌های گیاه در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک با عمل تعریق، آب را از طریق

روزنه‌های موجود در سطح برگ یا قسمت‌هایی از شاخه‌های گیاه با توجه به گرمای محیط، به صورت مداوم خارج ساخته که این امر سبب خروج دائمی آب از داخل خاک و در نتیجه لغزش‌هایی که رسیدن آب به سطوح لغزش موجب تشدید آن‌ها می‌گردد تا حدود زیادی کنترل می‌شوند.

### ب- ریشه گیاهان

ریشه گیاهان با فرو رفتن در خاک‌های مستعد لغزش مانند ستون‌هایی از داخل موجب استحکام و کنترل حرکت توده خاک می‌شوند. سیستم به هم پیوسته ریشه در لایه‌های سطحی، به خاک خاصیت اسفنجی داده و در تهویه و تبخیر سیستم‌های سطحی خاک و مصرف آب و خاک تاثیر فراوان دارد. همچنین ریشه‌ها پس از پوسیدن و افزودن مواد آلی به خاک موجب حفظ و ذخیره آب در لایه کم ضخامت سطحی شده و آب کم‌تری به داخل لایه‌های عمیق تر نفوذ می‌نماید. در نتیجه به سطح لغزنده، آب کم‌تری می‌رسد و پدیده لغزش کم‌تر اتفاق می‌افتد [۲۸].

برخی گونه‌های گیاهی از فرسایش‌های دامنه‌ای جلوگیری می‌کنند یا به عبارت دیگر در مقابل فرسایش‌های دامنه‌ای از خود مقاومت نشان می‌دهند. با انتخاب این گونه‌ها و مدل‌سازی لایه اطلاعاتی آن‌ها می‌تواند در تهیه نقشه پتانسیل خطر زمین لغزش از آن‌ها بهره گرفت.

### ۱-۵-۳-۲- تغییرات ناشی از هوازدگی و دیگر واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی

هوازدگی فرآیند تغییر سنگ تحت تاثیر مستقیم عوامل آب و هوایی می‌باشد و خود به دو دسته به شرح زیر تقسیم و می‌شود:

الف- هوازدگی فیزیکی که شامل شکسته شدن و خرد شدن سنگ‌ها بدون تغییرات مشخص در ماهیت کانی‌های تشکیل دهنده می‌باشد و شامل فرآیندهایی مانند تغییرات شار و حرارت (یخ زدن و آتش‌سوزی جنگل‌ها) است که به شکستگی سنگ‌ها منجر می‌شود.

ب- هوازدگی شیمیایی که با تجزیه و تغییر در ماهیت کانی‌های اولیه و ایجاد کانی‌های جدید همراه است. یون‌های معدنی محلول در آب‌های زیرزمینی غالباً نتیجه هوازدگی شیمیایی سنگ‌هایی است که آب از آن‌ها عبور کرده است. رس‌ها به طور تجربی مستعد هوازدگی و دیگر انفعالات فیزیکی شیمیایی (نرم شدن و ملایم شدن شکاف‌های رس‌ها، تخریب فیزیکی سنگ‌ها، آبگیری کانی‌های رس، خشک شدگی شکاف‌های رس‌ها و خشک شدگی رس و شیل و سنگ شدگی) می‌باشند. هیدراتاسیون مواد معدنی خاک رس منجر به کاهش چسبندگی می‌شود [۳]. کاهش چسبندگی سبب کاهش مقاومت برشی مواد تشکیل دهنده توده لغزشی می‌شود. اثر بارز این پارامتر را در زمین لغزش‌های زلزله‌ای ناشی از زلزله رودبار در سال ۱۳۶۹ می‌توان مشاهده کرد.



### ۱-۵-۳- عوامل موثر در تغییر نیروهای بین دانه‌ای

افزایش فشار آب در منافذ ناشی از ذوب برف و نفوذ باران و شکستگی‌های زمین عواملی هستند که در تغییر نیروهای بین دانه‌ای موثراند. اغلب گسیختگی‌های بزرگ در شیب‌ها بعد از ریزش باران‌های سنگین یا پس از ذوب برف‌ها در فصل بهار و نفوذ آب به داخل ترک‌ها و شکاف‌ها رخ می‌دهد. همچنین افزایش فشار آب منفذی در اثر فعالیت‌های عمرانی مانند ساخت سدها از دیگر عواملی است که منجر به کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود.

### ۱-۵-۳-۴- شرایط ذاتی اولیه مانند خواص کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی مصالح دامنه

کانی‌شناسی ذرات تشکیل دهنده خاک در رفتار زمین لغزش‌ها موثر می‌باشد. تحقیقات انجام شده نشان داده است که درصد خاک رس در محدوده ۰.۵٪-۲٪ تاثیر محدودی بر خواص مکانیکی خاک دارد ولی با افزایش درصد رس از این محدوده مقاومت خاک به طور ناگهانی شدیداً افت می‌نماید. نه تنها این روند در اکثر خاک‌ها صادق است بلکه نوع رس موجود در بافت خاک نیز تاثیر زیادی بر مقدار زاویه اصطکاک داخلی دارد. بنابراین نوع خاک در ناپایداری توده بسیار موثر می‌باشد. به عنوان نمونه خاک رس ابتدا آب را جذب ولی پس از جذب متورم می‌شود و دیگر نگهداری آن کم و اشباع می‌شود و نهایتاً اگر در جهت شیب باشد روی سنگ مادر غیرمقاوم به سمت پایین حرکت می‌کند. ویژگی فیزیکی خاک مانند بافت، ساختمان خاک، چسبندگی، شکل دامنه، تراکم نسبی، نفوذپذیری، تخلخل در تعیین مقاومت برشی موثر می‌باشند که ضعف در آن‌ها موجب کاهش مقاومت خواهد شد. اگر در رس یک برش ایجاد شود تنش‌های رس افت می‌کند و درزها به حدی باز می‌شوند که آب در آن عبور می‌کند. مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

### ۱-۵-۳-۵- عناصر ساختاری عمده و وضعیت هندسی دامنه

عناصر ساختاری عمده و اصلی از قبیل گسل‌ها، درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی عموماً به صورت سطوح ضعیف و ناپیوستگی علاوه بر عوامل موثر دیگر در ایجاد ناپایداری موثر می‌باشند و هر یک از این ساختارها به گونه‌ای در ایجاد حرکات دامنه‌ای نقش ایفا می‌کنند.

### ۱-۶-۱- علایم هشدار دهنده وقوع زمین لغزش

همانند سایر پدیده‌های طبیعی، زمین لغزش نیز قبل از وقوع، علایم و نشانه‌هایی دارد که در پیش‌بینی آن و انجام تمهیداتی جهت جلوگیری از وقوع آن و یا کاهش خسارات و صدمات بسیار موثر می‌باشند. عوارض و علایمی که ممکن است نشان‌دهنده وقوع این پدیده باشند عبارتند از:

– ایجاد شکاف‌ها و ترک‌ها در زمین، برف، یخ، خاک یا سنگ واقع بر روی دامنه‌ها یا در راس آن‌ها (شکل ۱-۱۷).





- عقب‌نشینی پیاپی از ساختمان‌های مجاور، اگر در کنار یک دامنه قرار دارند؛ عقب‌نشینی خاک از پی ساختمان (شکل ۱-۱۸).
- فاصله افتادن بین حصارها، که زمانی در یک خط قرار داشته و یا شکلی متفاوت داشته‌اند.
- برآمدگی‌ها یا تغییر ارتفاع غیرمعمول در زمین، کفپوش، مسیرها، یا پیاده‌رو (شکل ۱-۱۹)
- کج شدن تیرهای تلفن، درختان، دیوارهای حایل، حصارها (شکل ۱-۲۰).
- کج شدن بیش از حد یا ترک خوردن کف‌ها و پی‌های بتونی.
- شکستن لوله آب و دیگر امکانات زیرسطحی.
- افزایش سریع یا کاهش سطح آب رودخانه، ممکن است با افزایش آشفستگی همراه باشد (درصد خاک که آب را تیره می‌کند).
- گیر کردن درب‌ها، پنجره‌ها و فضاهای باز آشکار، که نشان می‌دهند دیوارها و چارچوب‌ها جابه‌جا شده و تغییر شکل داده‌اند.
- صداهای ترک خوردن، شکستن، یا انفجار از یک خانه، ساختمان یا گروهی از درختان (برای نمونه پاره شدن ریشه‌ها یا شکستن آن‌ها).
- نشست جاده‌ها یا راهروها.



شکل ۱-۱۷- ترک خوردگی زمین





شکل ۱-۱۸- عقب نشینی پیاده‌رو از ساختمان



شکل ۱-۱۹- بالا آمدگی غیر معمول جاده





شکل ۱-۲۰- کج شدن تیر برق

### ۱-۷- نتیجه گیری

در ابتدا با مروری به تاریخچه وقوع زمین لغزش در ایران دریافتیم که وقوع این پدیده طبیعی در ایران تا چه حد مهم و ضروری است و همانند سایر کشورهای مستعد لغزش، خسارات فراوانی را تا به حال بر ایران متحمل ساخته است. در این فصل با انواع زمین لغزش آشنا شده و متوجه شدیم که این پدیده قبل از این که موجب خسارات جبران ناپذیری شود، علائم و هشدارهایی را به همراه دارد. با شناسایی این علائم و مطالعه آن‌ها می‌توانیم از رخداد آن جلوگیری نموده و از تلفات آن در امان بمانیم.

در ادامه به طرح مبانی سیستم تداخل سنجی راداری پرداخته و با به کارگیری آن می‌توان نرخ جابه‌جایی را در مناطق مطالعاتی اندازه‌گیری نمود.





# فصل ۲

---

---

## سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای





## ۲-۱- تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GPS)

در این بخش ابتدا به کلیاتی در ارتباط با تعیین موقعیت ماهواره‌ای پرداخته می‌شود. در ادامه مطالب و نکاتی در ارتباط با استفاده از این سامانه در تعیین موقعیت ماهواره‌ای ذکر شده است.

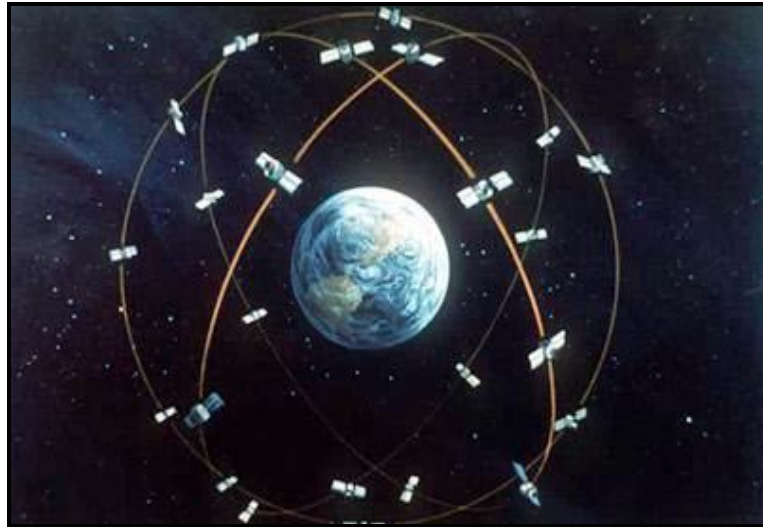
### ۲-۱-۱- تاریخچه سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای

در کنار سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای که متعلق به وزارت دفاع ایالات متحده می‌باشد، سامانه‌های تعیین موقعیت دیگری نظیر <sup>۱</sup>GLONASS متعلق به فدراسیون روسیه و سامانه در حال تکمیل و ساخت <sup>۲</sup>GALILEO متعلق به اتحادیه اروپا وجود دارند. با این حال به دلیل اینکه سامانه تعیین موقعیت GPS بیش‌تر در امور غیرنظامی فعالیت گسترده‌ای پیدا کرده است و استفاده از آن در امور ژئوماتیکی و عمرانی مرسوم شده است، در این بخش فقط به بررسی این سامانه خواهیم پرداخت. البته لازم به ذکر است که دیگر سامانه‌ها نیز از لحاظ تئوری و عملکرد بسیار نزدیک به GPS می‌باشند (شکل ۲-۱).

سیستم تعیین موقعیت GPS در بدو شروع فعالیت به گونه‌ای طراحی شده بود که ۲۴ ماهواره در ارتفاع حدودی ۲۰۰۰۰ کیلومتری و در ۶ مدار با زاویه حدودی ۵۵ درجه نسبت به کمر بند استوا به دور زمین در حال گردش باشند. ولی امروزه تعداد آن‌ها به بیش از ۳۰ ماهواره رسیده است که این امر خود به تعداد ماهواره‌های قابل دستیابی توسط گیرنده‌ها افزوده و متعاقباً به رسیدن گیرنده‌ها به یک آرایش مناسب به منظور تعیین موقعیت کمک شایانی می‌نماید. این ماهواره‌های در حال گردش گیرنده‌ها (بخش کاربر) را قادر به تعیین موقعیت، سرعت و جهت حرکت می‌سازد. اساس تعیین موقعیت ماهواره‌ها بر پایه زنجیره کدهای ارسالی بر روی امواج حامل در طیف مایکروویو از سوی ماهواره به گیرنده استوار است. آنتن‌ها نیز توانایی دریافت و معنادار نمودن کدها و سنجش زمان و فاز امواج را دارا بوده و از این طریق می‌توانند به تعیین موقعیت خود بپردازند.

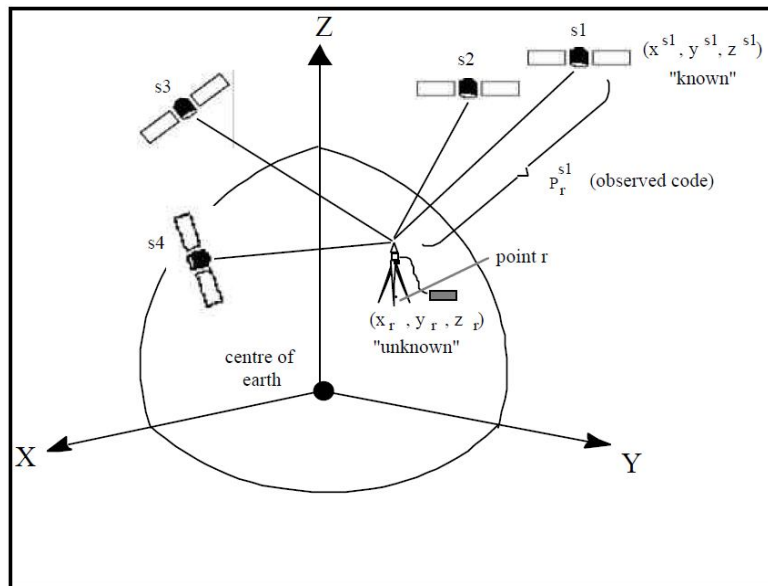
1- Global Orbiting Navigation Satellite System  
2- European Global Satellite Navigation System





شکل ۲-۱- موقعیت ماهواره‌های GPS در مدار

با اندازه‌گیری تاخیر زمانی میان ارسال امواج از سوی ماهواره‌ها و زمان دریافت آن توسط گیرنده، فاصله میان ماهواره‌ها و گیرنده با ضرب تاخیر زمانی در سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس به دست می‌آید. به این فاصله به دست آمده از طریق اطلاعات کدهای ارسالی از ماهواره‌ها اصطلاحاً شبه فاصله<sup>۱</sup> گفته می‌شود. با معلوم بودن حداقل ۴ شبه فاصله به ماهواره‌های مختلف به صورت هم‌زمان و معلوم فرض نمودن موقعیت ماهواره در لحظه ارسال امواج، موقعیت گیرنده قابل برآورد خواهد بود (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲- چگونگی تعیین موقعیت گیرنده توسط ۴ شبه فاصله [۸]

1- Pseudo Range





تمامی گیرنده‌های GPS نسبتاً ارزان قیمت نظیر GPS های دستی از روش فوق به منظور تعیین موقعیت استفاده می‌کنند. دقت حاصل از این روش تعیین موقعیت که یک روش تعیین موقعیت مطلق<sup>۱</sup> می‌باشد، با توجه به تعداد و هندسه ماهواره‌های مرتبط با گیرنده بین ۳ تا ۲۰ متر خواهد بود.

غالب استفاده از GPS در امور مختلف، به منظور ناوبری است که با توجه به سهولت و عدم نیاز به دقت خیلی زیاد، از روش تعیین موقعیت کد که توضیح داده شد، استفاده می‌شود؛ ولی امور پیچیده ژئودتیکی خصوصاً در پایش جابه‌جایی سطحی زمین بر خلاف امور رایج ناوبری به دقت بسیار بالایی در تعیین موقعیت نیاز دارد. به همین علت در این گونه فعالیت‌ها باید از گیرنده‌های بخصوص با دقت تعیین موقعیت بالا و از روش‌های مناسب تعیین موقعیت دقیق نظیر سنجش اختلاف فاز موج حامل در تعیین موقعیت تفاضلی - نسبی<sup>۲</sup> میان ایستگاهی استفاده نمود.

همان‌طور که اشاره شد، گیرنده‌های GPS با دقت بالایی که در فعالیت‌های ژئودتیکی نیز به کار برده می‌شود علاوه بر اندازه‌گیری شبه فاصله توسط کدهای ارسالی از ماهواره‌ها، توانایی سنجش فاز موج حامل را نیز دارا هستند. اندازه‌گیری فاز به دلیل طول موج کوتاه‌تر موج حامل، از توان تفکیک بالاتری نسبت به اندازه‌گیری کد برخوردار است. بدین ترتیب این روش به شکل محسوسی از دقت بالاتری در تعیین موقعیت سود می‌برد.

استفاده از گیرنده‌های دوفرکانسه که قابلیت دریافت دو موج با فرکانس‌های مختلف ارسالی از سوی ماهواره‌ها را دارد، می‌تواند چندین ترکیب مشاهده میان فرکانس‌های L1 و L2 ایجاد نماید. یکی از این ترکیب‌ها تحت عنوان ترکیب عاری از یونسفر، تاثیر قابل توجهی در بهبود دقت مشاهدات خواهد داشت. از این ترکیب می‌توان در تعیین موقعیت در فواصل بسیار بلند که تغییرات یونسفر در دو سر فاصله مورد نظر محسوس خواهد بود، استفاده نمود. در فواصل کوتاه‌تر (کم‌تر از ۱۰ کیلومتر)، می‌توان لایه یونسفر بالای گیرنده‌های هر دو سر فاصله مورد نظر را یکسان در نظر گرفت و به استفاده از مدل‌های یونسفری استاندارد در تصحیح اثر یونسفر اکتفا کرد. همچنین به منظور دستیابی به دقت بهتر از سانتی‌متر می‌بایست به خطای ناشی از تاثیر لایه تروپوسفر نیز توجه داشت. این اثر تنها با بالا بردن مدت مشاهدات و تکنیک‌های مختلف مشاهداتی مانند روش‌های مختلف مشاهده تفاضلی و البته استفاده از مدل‌های مختلف تروپوسفری قابل تعدیل است [۳۸].

## ۲-۲- اساس تعیین موقعیت در این سیستم

دو سیگنال L1, L2 که کدها و پیغام‌های ناوبری روی آن‌ها مدوله شده‌اند توسط ماهواره به زمین ارسال می‌شود. این سیگنال‌ها در ایستگاه‌های زمینی توسط گیرنده‌ها دریافت می‌گردند. با مقایسه سیگنال‌های دریافتی با سیگنال‌های تولید

1- Absolute Positioning  
2- Relative Positioning



شده در گیرنده (که مشابه سیگنال‌ها در لحظه ارسال می‌باشد) و معلوم بودن موقعیت ماهواره می‌توان به موقعیت ایستگاه زمینی دست یافت که موقعیت به دست آمده تحت تاثیر عوامل زیادی از جمله:

- هندسه ماهواره
  - استفاده از کد یا فاز موج حامل در اندازه‌گیری‌ها (دقت اندازه‌گیری)
  - استفاده از اطلاعات غیردقیق مداری یا اطلاعات دقیق مداری (دقت موقعیت ماهواره)
  - میزان تاثیر خطاهایی مانند اتمسفر، یونسفر و ... و روش‌های حذف یا کاهش آن‌ها
  - تعداد گیرنده‌ها و ماهواره‌های استفاده شده در اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.
- موقعیت ماهواره به دو طریق تعیین می‌شود: یا از طریق پیغام‌های ناوبری مدوله شده روی امواج ارسالی (اطلاعات غیردقیق مداری به صورت آنی) یا از اطلاعاتی که توسط برخی موسسات مانند IGS بعد از حدود ۲ هفته در اختیار استفاده کنندگان قرار می‌گیرد (اطلاعات مداری دقیق).

### ۲-۲-۱- پیغام ناوبری<sup>۱</sup>

به منظور تعیین موقعیت با استفاده از اندازه‌گیری فواصل بین گیرنده و ماهواره، موقعیت ماهواره باید معلوم باشد. برای آن‌که تعیین موقعیت به صورت آنی امکان‌پذیر باشد اطلاعاتی راجع به ساعت ماهواره، مدار ماهواره، وضعیت سلامت ماهواره و برخی داده‌های تصحیحاتی توسط ماهواره‌ها ارسال می‌گردد که به پیغام‌های ناوبری معروف هستند. این اطلاعات روی هر دو سیگنال L1 و L2 مدوله می‌شوند.

### ۲-۲-۲- افمیزیها<sup>۲</sup>

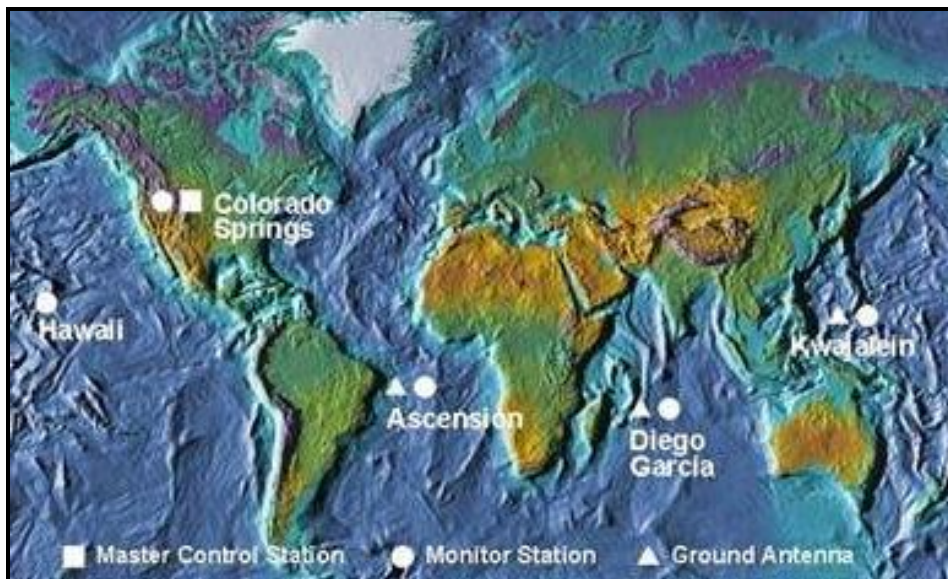
افمیزیها شامل اطلاعاتی در مورد ساعت ماهواره‌ها، موقعیت ماهواره‌ها در مدار و اطلاعات مورد نیاز دیگر می‌باشند. این اطلاعات سه نوع هستند:

- اطلاعات مداری کم دقت یا اطلاعات مداری تقویم نجومی (Almanac data)
- اطلاعات مداری غیردقیق (Broadcast ephemeris)
- اطلاعات مداری دقیق (Precise ephemeris)

1- Navigation Message  
2- Ephemeris







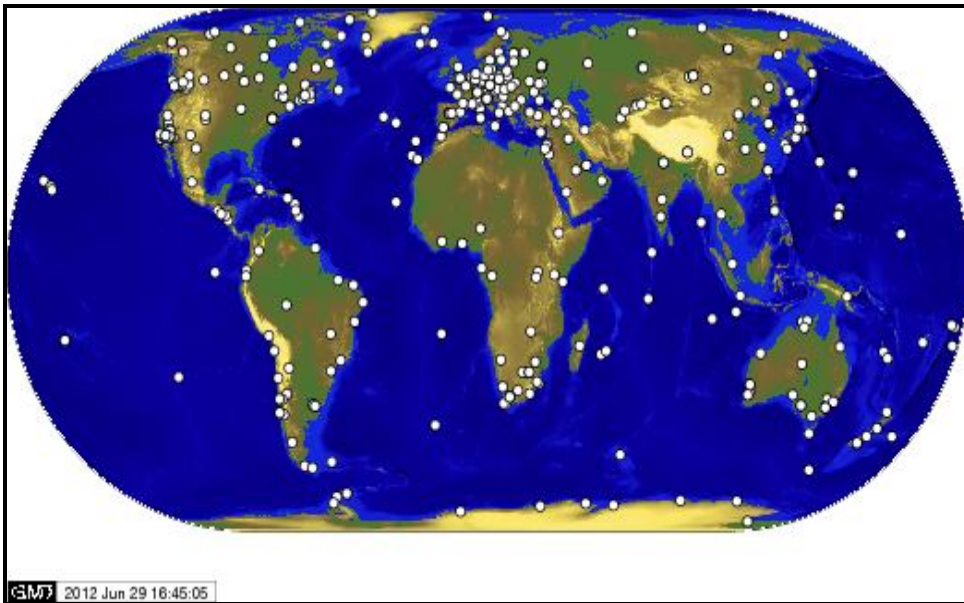
شکل ۲-۳- موقعیت ایستگاه کنترل اصلی و ایستگاه‌های ردیابی بخش کنترل

#### ۲-۲-۳- اطلاعات مداری دقیق

دقت تعیین موقعیت با استفاده از اطلاعات مداری غیردقیق با فعال بودن اثر SA حدود  $30^{\circ}$ - $50^{\circ}$  متر می‌باشد که البته در حال حاضر این دقت با خاموش شدن اثر SA بهبود قابل توجهی یافته است. اما برای رسیدن به دقت‌های بالاتر، نمی‌توان از این افم‌ریزها استفاده نمود. لذا ایجاب می‌کند که شبکه‌های ردیابی عمرانی ایجاد شده و مستقل از سیاست وزارت دفاع آمریکا جهت تعیین مدار با دقت بالا شروع به فعالیت نمایند. شبکه‌هایی که برای این منظور ایجاد می‌شوند، می‌توانند به صورت شبکه‌های جهانی و یا به صورت شبکه‌های محلی باشند. اما آنچه مسلم است این است که شبکه‌های جهانی دقت بالاتری را در محاسبات مداری در مقایسه با شبکه‌های ناحیه‌ای ارائه می‌دهند.

در سال ۱۹۹۰ انجمن بین‌المللی ژئودزی (IAG) تصمیم به ایجاد یک سرویس بین‌المللی GPS برای اهداف ژئودینامیکی (IGS) گرفت. بعد از یک عملیات آزمایشی در سال ۱۹۹۲، فعالیت‌های روتین موسسه در سال ۱۹۹۳ آغاز شد. هدف اصلی این موسسه استفاده از GPS در کاربردهای ژئودینامیکی است که مستلزم حصول به دقت‌های بالا می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، یکی از وظایف عمده در این سرویس، ایجاد اطلاعات مداری دقیق می‌باشد. شبکه‌های ردیابی IGS شامل  $90^{\circ}$ - $350^{\circ}$  ایستگاه دائمی GPS می‌باشد. اطلاعات مداری که توسط این موسسه در اختیار استفاده کنندگان قرار می‌گیرد به Precise ephemeris معروف هستند (شکل ۲-۴).





شکل ۲-۴- موقعیت ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیکی IGS

## ۲-۳- گیرنده

بخش‌های اصلی یک گیرنده عبارتند از:

- آنتن با Preamplifier.
- بخش RF (Radio Frequency).
- بلوک ردیابی سیگنال،
- واحد ورودی دستورات و واحد نمایش،
- واحد خروجی و ذخیره داده‌ها،
- منبع نیرو،
- میکروپروسسور.

## ۲-۳-۱- گیرنده‌های تک فرکانسه

گیرنده‌های تک فرکانسه تنها به فرکانس L1 دسترسی دارند. بیش‌تر گیرنده‌های مربوط به کارهای عمرانی از این نوع می‌باشند. گیرنده‌های تک فرکانسه code correlation تنها از کد C/A در لوپ ردیابی کد استفاده می‌کنند. گیرنده‌های تک فرکانسه ارزان‌تر از گیرنده‌های دو فرکانسه هستند. اما عیب این نوع گیرنده‌ها این است که امکان کاهش یا حذف اثر یونسفر به کمک تلفیق دو موج حامل وجود ندارد و جهت حذف اثر یونسفر از روی مشاهدات این گیرنده‌ها، باید از مدل‌های جهانی یا محلی یونسفری و یا از روش‌های تفاضلی در طول بازه‌های کوتاه استفاده نمود [۴۰].



## ۲-۳-۲- گیرنده‌های دو فرکانسه

گیرنده‌های دو فرکانسه به هر دو فرکانس  $L_1$  و  $L_2$  دسترسی دارند. بیش‌تر گیرنده‌های نظامی ۲ فرکانسه هستند. با ترکیب مشاهدات دو موج، امکان حذف تقریباً کل اثر یونسفر وجود دارد. اساساً سه نوع مشاهده توسط گیرنده‌های GPS ثبت می‌شود:

- مشاهدات شبه فاصله،
- مشاهدات فاز موج حامل،
- مشاهدات داپلر یا نرخ فاز موج حامل.

## ۲-۴- آنتن

آنتن گیرنده وسیله‌ای است جهت تبدیل انرژی الکترومغناطیسی موج به جریان الکتریکی. به عبارت ساده‌تر، آنتن سیگنال‌های ماهواره‌های بالای افق خود را دریافت و پس از برداشت نویزها به کمک فیلترها از روی سیگنال‌ها، آن را به بخش Rf انتقال می‌دهد.

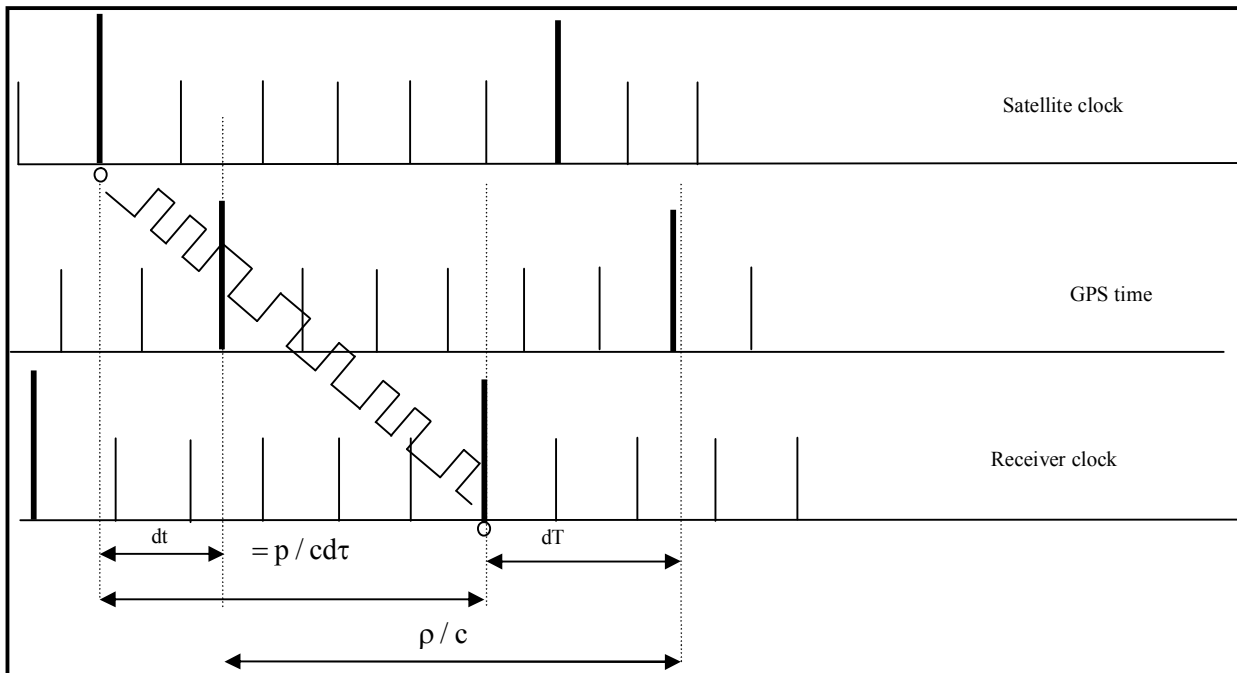
یک مشخصه اصلی در آنتن‌ها، الگوی حصول<sup>۱</sup> آن‌ها می‌باشد که حساسیت آن‌ها در دریافت سیگنال‌های ارسالی از زاویه ارتفاعی مشخصی را نشان می‌دهد. بر طبق این الگو، آنتن‌ها موظف می‌شوند که سیگنال‌های ارسالی از ماهواره‌ها را تا زاویه ارتفاعی مشخصی دریافت کنند. Gain آنتن باید متناسب با نوع کاربرد گیرنده باشد. به عنوان مثال، در کارهای Static در مکان‌های شهری، gain آنتن باید به گونه‌ای باشد که امواج ارسالی از ماهواره‌ها با زاویه ارتفاعی پایین را دریافت نکنند. (جهت اجتناب از بروز پدیده چند مسیری<sup>۲</sup> و در کاربردهای ناوبری در دریاها آنتن‌هایی با gain بالا نیاز است تا امواج مربوط به ماهواره‌ها با زاویه ارتفاعی پایین را نیز دریافت کنند.)

## ۲-۵- مشاهدات شبه فاصله

مشاهده شبه فاصله از اندازه‌گیری اختلاف زمانی بین لحظه ارسال (t) و دریافت سیگنال GPS(T) و ضرب آن در سرعت سیر نور در خلا (۳۰۰۰۰۰ کیلومتر در ساعت) به دست می‌آید.

1- Gain Pattern  
2- Multipath





زمان سیر نور از ماهواره تا گیرنده عبارت است از:

$$dt = T(\tau_b) - t(\tau_a) \quad (1-2)$$

با جمع و کم کردن عبارت  $(\tau_b - \tau_a)$  از معادله فوق داریم:

$$dt = (\tau_b - \tau_a) + [\tau_a - t(\tau_a)] - [\tau_b - T(\tau_b)] \quad (2-2)$$

که ترم اول در معادله فوق بیانگر سیر سیگنال (در سیستم زمانی GPS) است که اگر در سرعت سیر نور ضرب شود، با نادیده گرفتن اثرات اتمسفری فاصله واقعی  $P$  نهفته است. ترم‌های دوم و سوم به ترتیب، افست ساعت ماهواره و افست ساعت گیرنده از زمان GPS را نشان می‌دهد. اگر تاخیرات تروپوسفری و یونسفری نیز در نظر گرفته شود معادله مشاهده به صورت زیر خواهد بود:

$$p = c \cdot dt = \rho + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} \quad (3-2)$$

ما علاقه‌مند به دست آوردن مختصات گیرنده هستیم که در فاصله واقعی  $P$  نهفته است. اگر مختصات ماهواره به دقت معلوم باشد، داریم:

$$\rho = \sqrt{r - R} \quad (4-2)$$

اما مختصات ماهواره‌ها یا به عبارت دیگر  $r$  به دقت معلوم نیست. به همین دلیل ما یک ترم تصحیحی  $d\phi$  ناشی از عدم دقت در تعیین موقعیت ماهواره یا اصطلاحاً خطای مداری را نیز به معادله فوق اضافه می‌کنیم. همچنین ما باید اثرات خطاهای تصادفی به واسطه نویز مشاهدات (نویز ناشی از اثر چند مسیری به علاوه نویز ناشی از اندازه‌گیری شبه فاصله در گیرنده) را نیز در نظر بگیریم که بدین منظور یک ترم  $\epsilon$  به سمت راست معادله مشاهده اضافه می‌نماییم. در نتیجه معادله مشاهده‌ای به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\rho + d\rho = \sqrt{r - R} \quad (5-2)$$



$$P = \rho + dp + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop}$$

$\rho$ : فاصله هندسی

$dp$ : خطاهای مداری (خطای مورد ناشی از اثر SA + خطای مداری اسمی)

$dt$ : خطای ساعت ماهواره

$dT$ : خطای ساعت گیرنده

$d_{ion}$ : تاخیر یونسفری

$d_{trop}$ : تاخیر تروپوسفری

$\epsilon_p$ : نویز مشاهدات (نویز ناشی از چند مسیری + نویز اندازه‌گیری شبه فاصله)

## ۲-۶- مشاهدات فاز موج حامل

اندازه‌گیری فاز موج حامل اساساً بر مبنای اندازه‌گیری اختلاف بین فاز موج حامل دریافت شده از ماهواره و فاز موج حامل تولید شده توسط نوسان ساز گیرنده استوار است. (مشاهده فاز موج حامل به عنوان دقیق‌ترین مشاهده در GPS محسوب می‌شوند).

اندازه‌گیری کل فاز شامل:

۱- اندازه‌گیری بخش خرده فاز  $F_r(\varphi)$ ،

۲- شمارش سیکل‌های صحیح فاز  $\text{Int}(\varphi)$  در فاصله زمان  $t_0$  (لحظه Lock به ماهواره) تا  $t$  (لحظه دریافت موج در گیرنده)

۳- به علاوه یک عدد صحیح نامعلوم  $N$  در اپک  $t_0$  (تعداد سیکل‌هایی که از لحظه تولید موج در ماهواره تا زمان Lock به ماهواره گذشته است).

می‌باشد. یعنی:

$$\varphi_{\text{total}} = F_r(\varphi) + \text{Int}(\varphi, t, t_0) + N(t_0) \quad (۶-۲)$$

شمارش سیکل نامعلوم  $N$  به ابهام سیکل یا ابهام در فاز معروف است. اگر ارتباط بین ماهواره و گیرنده در طول مشاهده برقرار باشد، در طول مشاهده برای هر جفت ماهواره و گیرنده یک  $N$  خواهیم داشت. اما به محض قطع ارتباط،  $N$  تغییر خواهد نمود و باید دوباره محاسبه گردد. در مورد قطع ارتباط که به آن cycle slip معروف است و روش‌های حل ابهام فاز در بخش خطاهای موجود در GPS و نحوه برخورد با آن‌ها بحث خواهد شد.

آنچه توسط گیرنده اندازه‌گیری می‌شود:

$$\varphi_{\text{total}} = F_r(\varphi) + \text{Int}(\varphi, t, t_0) + N(t_0) \quad (۷-۲)$$

لذا:





$$\varphi_{\text{total}} = \varphi_{\text{measured}} + N(t_0) \quad (۸-۲)$$

اما اندازه‌گیری فاز در گیرنده به چه صورت انجام می‌شود؟

آنچه در گیرنده اندازه‌گیری می‌شود عبارت است از:

$$\varphi = \varphi_i(T) - \varphi^k(t) \quad (۹-۲)$$

که  $\varphi^k$  فاز سیگنال ارسالی از ماهواره  $k$ ام در زمان  $t$  و  $\varphi_i$  فاز سیگنال دریافتی در گیرنده  $i$ ام در زمان  $T$  است. می‌دانیم:

$$\varphi = \int f dt$$

$$\varphi(t + \delta t) = \varphi(t) + f \delta t$$

و با جای‌گذاری  $\delta t = T - t$  در فرمول فوق:

$$\varphi_i(T) = \varphi^k(t) + f(T - t)$$

در نتیجه:

و با توجه به معادله مشاهده خواهیم داشت:

$$t + dt + \frac{(\rho - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}})}{c} = T + dT \quad (۱۰-۲)$$

$$\Rightarrow T - t = dt - dT + \frac{(\rho - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}})}{c}$$

$$\varphi_{\text{measured}} = \frac{f}{c} \rho + f(dt - dT) + \frac{f}{c}(d_{\text{trop}} - d_{\text{ion}})$$

و  $\varphi$  کل عبارت است از:

$$\varphi_{\text{total}} = \varphi_{\text{measured}} + N(t_0) = \frac{f}{c} \rho + f(dt - dT) + \frac{f}{c}(d_{\text{trop}} - d_{\text{ion}}) \quad (۱۱-۲)$$

با ضرب معادله فوق در  $\lambda = \frac{c}{f}$  و تعریف شبه فاصله به صورت:

$$\phi = \lambda \varphi_{\text{total}}$$

داریم:

$$\phi = \rho + c(dt - dT) + \lambda N - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}} \quad (۱۲-۲)$$

این معادله مشاهده، مشابه با معادله شبه فاصله است و تنها دو ترم ابهام فاز و تصحیح منفی یونسفری با معادله شبه فاصله اختلاف دارد. در این مشاهده نیز اثرات خطاهای تصادفی و نویزها شامل اندازه‌گیری فاز موج حامل و نویز ناشی از پدیده چند مسیری و خطای مداری باید در نظر گرفته شود و در نتیجه معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$\phi = \rho + dp + c(dt - dT) + \lambda N - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}} + \varepsilon_{\phi} \quad (۱۳-۲)$$

$p$ : فاصله هندسی



dp: خطاهای مداری

dt: خطای ساعت ماهواره

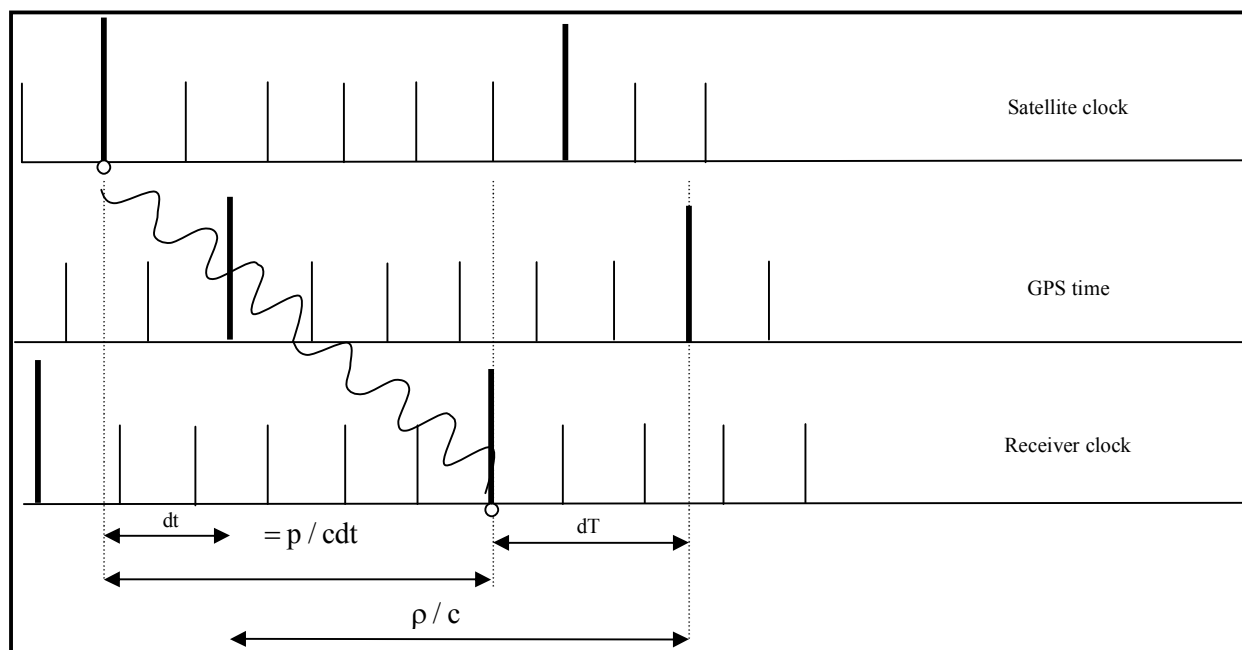
dT: خطای گیرنده

d<sub>ion</sub>: تاخیر یونسفری

d<sub>trop</sub>: تاخیر تروپوسفری

نویز مشاهدات (نویز ناشی از پدیده چند مسیری + نویز اندازه‌گیری فاز موج حامل)

در مشاهده فاز موج حامل، اثر نویز اندازه‌گیری فاز موج حامل و نویز ناشی از پدیده چند مسیری خیلی کم‌تر از نویز در مورد مشاهده شبه فاز می‌باشد و در نتیجه دارای دقت بالاتری است. اما یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در انجام این مشاهدات به خصوص در حالت آنی، وجود ابهام فاز در معادله مشاهده آن می‌باشد. ابهام فاز در واقع دوره‌های صحیحی از طول موج حامل است که در لحظه شروع برقراری ارتباط ماهواره با گیرنده وجود دارد و مادامی که این ارتباط قطع نشود مقدار آن ثابت باقی می‌ماند. به لحاظ وجود ابهام فاز، تعیین موقعیت به صورت آنی با اندازه‌گیری فاز موج حامل امکان‌پذیر نیست [۴۰].



## ۲-۷- منابع خطاها در سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای

در اندازه‌گیری‌ها عموماً با ۴ نوع کمیت روبه‌رو هستیم:

- اشتباهات (Blunder): شامل اشتباهات انسانی یا ماشینی هستند و عموماً (نه همیشه) بزرگ هستند. از این رو به راحتی قابل کشف می‌باشند. مانند اشتباه در قرائت، اشتباه در نوشتن اعداد، اشتباه نرم‌افزاری و ...



- **بایاس‌ها (خطای سیستماتیک) (Bias):** اثراتی که می‌توانند مدله شده و با مدله شدن تا اندازه‌ای حذف شوند. مانند: بایاس مداری، ساعت ماهواره و گیرنده و اتمسفر
  - **خطاها (Error):** شامل اثرات باقی‌مانده از مدله کردن بایاس‌ها و اثراتی که قابل مدله شدن نیستند می‌باشد. در برخی موارد، خطاها قابل کشف و حذف از روی مشاهدات بوده (مانند Cycle Slip) و در بعضی موارد قابل کشف بوده اما قابل تصحیح نیستند مانند اثر چند مسیری.
  - **خطاهای اتفاقی (Random Error):** خطاهایی که قابل پیش‌بینی نیستند و ما نمی‌توانیم با برخی از روش‌ها مانند میانگین اندازه‌گیری آن‌ها را حذف نماییم.
- در GPS با انواع بایاس‌ها و خطاهای زیر مواجه هستیم:
- بایاس‌های ماهواره (بایاس ساعت ماهواره و بایاس اطلاعات مداری ماهواره‌ای)
  - بایاس‌های ایستگاه (بایاس ساعت گیرنده و عدم اطمینان در مختصات ایستگاه‌های ردیابی)
  - بایاس‌های وابسته به مشاهدات (بایاس گسترش سیگنال (تاخیر یونسفری و تروپوسفری) و بایاس‌های وابسته به نوع مشاهدات مانند ابهام فاز موج حامل)
  - خطای SA
  - خطای چند مسیری
  - خطای Cycle slip
  - جا به جایی مرکز فاز آنتن
  - خطاهای اتفاقی مانند نویز گیرنده
- علاوه بر موارد فوق دقت موقعیت یا زمان به دست آمده از مشاهدات GPS به استحکام هندسی ساختار ماهواره‌ای مشاهده شده (DOP) نیز بستگی دارد [۴۰].

## ۲-۷-۱- بایاس‌های ماهواره‌ها

### ۲-۷-۱-۱- بایاس ساعت ماهواره

بایاس ساعت ماهواره ناشی از اختلاف زمان ساعت ماهواره نسبت به زمان GPS است. ماهواره‌های GPS حامل ساعت‌های اتمی ربیدیم و سزیم هستند که معمولاً باعث حفظ هم‌زمانی GPS با دقت بالا می‌شوند. در حالت فعال نبودن خطای SA، میزان بایاس ساعت ماهواره در حد زیر یک میکروثانیه یا معادل با ۳۰۰ متر می‌باشد. که با روش‌های تفاضلی بین گیرنده‌ها می‌توان این بایاس را به طور کامل حذف نمود [۴۰].



### ۲-۱-۷-۲- بایاس اطلاعات مداری ماهواره‌ای

بایاس مداری ناشی از مدلسازی ناقص دینامیک ماهواره در فضا می‌باشد. دقت مداری حاصل از Broadcast ephemeris یا اطلاعات مداری غیردقیق در حالت غیرفعال بودن SA،  $\pm 20$  متر و با استفاده از Precise ephemeris یا اطلاعات مداری دقیق در حدود  $\pm 5$  متر می‌باشد. با انجام روش‌های تفاضلی، اثرات بایاس مداری می‌توانند به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابند.

### ۲-۷-۲- بایاس ایستگاه‌ها

#### ۱-۲-۷-۲- بایاس ساعت گیرنده

عبارت است از اختلاف زمانی بین ساعت گیرنده و زمان GPS. معمولاً قبل از شروع هر پروژه نقشه‌برداری با GPS، گیرنده‌های ژنودتیک با زمان GPS هم‌زمان می‌شوند. اما این هم‌زمانی تنها تا کسری از یک میلی ثانیه امکان‌پذیر است و مقدار باقی‌مانده بایاس ساعت گیرنده را شکل می‌دهد. این نوع بایاس در گیرنده‌های مختلف دارای مقادیر مختلفی است که به سخت‌افزار داخلی و نوسان‌ساز به کار رفته در گیرنده بستگی دارد که عامل تعیین‌کننده‌ای در قیمت گیرنده‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که با استفاده از روش‌های تفاضلی بین ماهواره‌های این بایاس را می‌توان حذف نمود و یا به عنوان یکی از پارامترهای مجهول در تعیین موقعیت مطلق آن را برآورد نمود [۴۰].

### ۲-۷-۳- بایاس وابسته به مشاهدات

#### ۱-۳-۷-۲- بایاس گسترش سیگنال

#### ۱-۱-۳-۷-۲- تاخیر یونسفری

یونسفر لایه‌ای از جو است که به طور تقریبی در ارتفاع  $50$  تا  $100$  کیلومتری بالای سطح زمین قرار دارد. لایه یونسفر حاوی الکترون‌های آزاد است که بر روی سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی تاثیر می‌گذارد. بنابراین سیگنال‌های GPS در حین عبور از این لایه دچار ضایعه می‌شوند. به علت تغییر ضرایب انکسار محیط، مشاهدات شبه فاصله و فاز موج حامل به ترتیب دارای سرعت‌های کمتر و بیش‌تر از سرعت نور در خلا می‌شوند (تاثیر یونسفر روی کد به صورت تاثیر در سرعت گروه و روی فاز به صورت تاثیر در سرعت فاز می‌باشد). به راحتی می‌توان دریافت که این تغییر سرعت باعث تاخیر در مشاهده شبه فاصله و تقدم در مشاهده فاز موج حامل می‌شود. بنابراین تصحیحات مربوط به بایاس‌های یونسفری، برای مشاهدات شبه فاصله و فاز موج حامل دارای علامات مخالف می‌باشند.

از آن جا که مقدار این بایاس بعد از خطای ناشی از پدیده SA بزرگ‌ترین سهم را در برآیندکل خطاها دارد، مطالعات بسیار وسیعی برای مقابله با آن انجام شده است. میزان بایاس یونسفری متناسب با تعداد الکترون‌های آزاد موجود در



واحد سطح مسیر عبور از سیگنال است و این تعداد الکترون‌ها نیز به عواملی چون فعالیت‌های خورشیدی، فعالیت‌های مغناطیسی، تغییر فصول، زمان مشاهده، موقعیت استفاده کننده و زاویه ارتفاعی ماهواره وابسته است:

ماکزیمم مقدار بایاس در زنیت: ۵۰ متر

ماکزیمم مقدار بایاس در افق: حدود ۱۵۹ متر

تغییرات روزانه: در روز حدود ۵ برابر شب

تغییرات فصلی: در نوامبر ۴ برابر جولای

تغییرات فعالیت خورشیدی: در ماکزیمم فعالیت خورشیدی حدود ۴ برابر مینیمم فعالیت آن (دوره فعالیت خورشیدی ۱۱ سال است).

لذا مقدار بایاس از ۱۵۰ متر (در ماکزیمم فعالیت خورشیدی، وسط روز، زمستان و ماهواره نزدیک به افق) تا کم‌تر از ۵ متر (در مینیمم فعالیت خورشیدی، شب، تابستان و ماهواره در زنیت) نوسان می‌کند. لازم به ذکر است که در حال حاضر، استفاده از مشاهدات دو فرکانسه بهترین روش برای ارزیابی اثر یونسفری می‌باشد و به همین دلیل قیمت گیرنده‌های دو فرکانسه بیش‌تر از گیرنده‌های تک فرکانسه است.

الف- استفاده از موج عاری از اثر یونسفر:

$$\phi_{L_1} = \rho + d\rho + c(dt - dT) + N_1\lambda_1 - a\frac{TEC}{f_1^2} + d_{trop} + \varepsilon_1 \quad (14-2)$$

$$\phi_{L_2} = \rho + d\rho + c(dt - dT) + N_2\lambda_2 - a\frac{TEC}{f_2^2} + d_{trop} + \varepsilon_2$$

با ضرب رابطه اول در  $f_1^2$  و رابطه دوم در  $f_2^2$  و تقسیم تفاضل نتایج بر  $f_2^2 - f_1^2$  داریم:

$$\phi_{L_3} = \frac{f_2^2\phi_2 - f_1^2\phi_1}{f_2^2 - f_1^2} = \rho + c(dt - dT) + \frac{1}{f_2^2 - f_1^2}(\lambda_2 f_2^2 N_2 - \lambda_1 f_1^2 N_1) + \frac{1}{f_2^2 - f_1^2}[f_2^2\varepsilon_2 - f_1^2\varepsilon_1] \quad (15-2)$$

به معادله فوق معادله ترکیب عاری از یونسفر می‌گویند.

مزایا:

- موج حاصله عاری از اثر یونسفر است.

معایب:

- N حاصل از رابطه فوق عدد صحیحی نیست،

- با این روش نویز افزایش می‌یابد، اگر  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  را تقریباً برابر در نظر بگیریم، نویز موج حاصله حدود سه برابر

نویز اولیه است.

ب- استفاده از ترکیب امواج  $L_1$  و  $L_2$  معروف به Wide laning و Narrow laning:

$$\phi = n_1\phi_1 + n_2\phi_2 \quad (16-2)$$

$$\phi_\Delta = \phi_1 - \phi_2$$



$$\Rightarrow \lambda_{\Delta} = \frac{c}{f_{\Delta}} = 86.25$$

$$\phi_{\Sigma} = \phi_1 - \phi_2$$

$$\Rightarrow \lambda_{\Sigma} = \frac{c}{f_{\Sigma}} = 10.70$$

که در رابطه فوق، فرمول مربوط به Wide laning و فرمول سوم مربوط به Narrow laning می‌باشد که هر دو باعث کاهش اثر یونسفر می‌شوند. اما این دو با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند:

۱- در Wide laning چون طول موج حاصله نسبت به طول موج امواج اولیه بزرگ‌تر شده، لذا یافتن ابهام فاز صحیح در این طول موج آسان‌تر می‌باشد و این بزرگ‌ترین مزیت استفاده از این روش می‌باشد. اما نویز در این روش حدود ۶ برابر نویز اولیه خواهد بود.

در Narrow laning چون طول موج حاصله کوتاه‌تر است، یافتن ابهام فاز صحیح در آن مشکل‌تر می‌باشد/ اما نویز این روش بسیار کم‌تر از نویز Wide laning و دیگر ترکیبات دو موج حامل  $L_1$  و  $L_2$  (مانند موج عاری از یونسفر) می‌باشد.

در کل می‌توان چنین نتیجه گرفت که در مواقعی که نویز مشاهدات ناچیز است روش Wide laning در کاهش اثر یونسفر و حل ابهام فاز صحیح روش کاراتری است و در مواقعی که مقدار نویز حاصل از مشاهدات مقدار قابل توجهی می‌باشد، روش Narrow laning روش مناسبی در کاهش اثر یونسفر می‌باشد و در مواردی که مقدار نویز مشاهدات ناچیز و میزان تاثیر یونسفر مقدار قابل توجهی است، استفاده از موج عاری از یونسفر پیشنهاد می‌گردد.

۲- در گیرنده‌های تک فرکانسه می‌توان از مدل یونسفری ارسال شده توسط ماهواره، موجود در پیغام‌های ناوبری (مدل کلوبوچار که تا حدود ۵۰٪ این اثر را مهار می‌کند) یا از مدل‌های یونسفری محلی یا جهانی جهت حذف یا کاهش این بایاس استفاده نمود.

۳- با انجام روش‌های تفاضلی می‌توان تا حدی این اثر را کاهش داد. به خصوص در روش تفاضلی یگانه بین گیرنده یا در روش تفاضلی دوگانه گیرنده ماهواره اگر طول خط مبنا کوتاه باشد، این بایاس تقریباً قابل حذف است و به طور کلی در فواصل کوتاه علی‌رغم استفاده از گیرنده‌های دو فرکانسه، استفاده از ترکیب دو فرکانس توصیه نمی‌شود (به علت معایبی که ذکر شد) چرا که با روش تفاضلی در فواصل کوتاه قابل حذف می‌باشد [۴۰].

## ۲-۷-۳-۱-۲- تاخیر تروپوسفری

لایه تروپوسفر به بخشی از جو اطلاق می‌شود که از بالای سطح زمین تا ارتفاع تقریبی ۵۰ کیلومتر قرار دارد. انتشار سیگنال GPS در تروپوسفر مستقل از فرکانس است و تاخیر تروپوسفری روی هر دو موج حامل و روی فاز و کد تاثیر



یکسانی دارد و انکسار در محیط تروپوسفر را می‌توان به ۲ بخش خشک و تر تفکیک نمود. مولفه خشک تقریباً ۰.۹٪ کل خطای ناشی از انکسار تروپوسفری را تشکیل می‌دهد و می‌تواند با اندازه‌گیری و در دسترس بودن داده‌های اتمسفری در سطح، با دقت ۰/۲ درصد برآورد شود. مولفه تر انکسار تروپوسفری بستگی به شرایط جوی در طول مسیر سیگنال دارد. به منظور کاهش بایاس تروپوسفری از روش‌های تفاضلی استفاده می‌نماییم. مشاهدات تفاضلی بین گیرنده، اختلاف اثر تروپوسفر در دو انتهای خط مبنا یکسان است و با روش‌های تفاضلی این اثر می‌تواند حذف یا به میزان زیادی کاهش یابد. این فرض در مورد خط مبناهای کوتاه با ارتفاعات تقریباً یکسان که شرایط جوی در دو انتهای آن‌ها تقریباً یکسان است معتبر می‌باشد.

همچنین می‌توان از مدل‌های محلی و جهانی انکسار استفاده نمود. مدل‌های محلی با توجه به شرایط جوی محلی به دست می‌آیند. از جمله مدل‌های جهانی می‌توان به Hopfield و Saastamoinen اشاره نمود [۴۰].

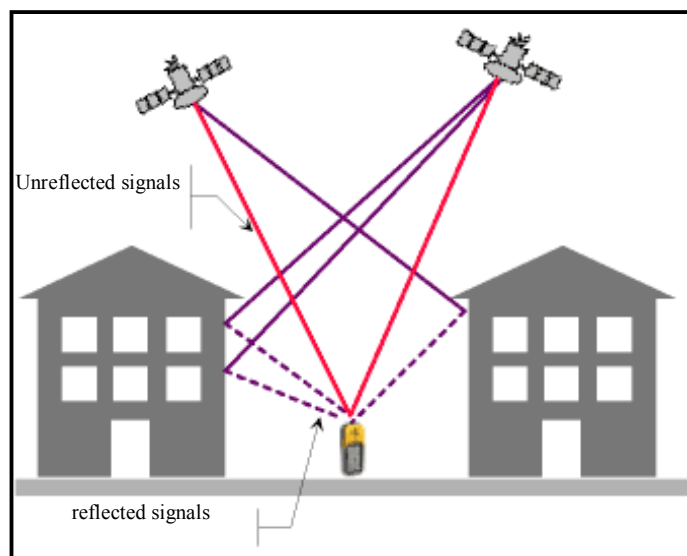
#### ۲-۷-۴- خطای SA

SA خطایی عمدی است که وزارت دفاع آمریکا از طریق اعمال به ساعت ماهواره (نوع δ) و مدار ماهواره‌های بلوک دوم (نوع ε) در سیستم GPS ایجاد می‌کند و باعث می‌شود که دقت‌های مسطحاتی و ارتفاعی به ترتیب تا ۱۰۰ متر و ۱۵۰ متر در سطح اطمینان ۰.۹۵٪ کاهش یابد (البته از اول می ۲۰۰۰ این اثر بنا بر تصمیم رییس‌جمهور آمریکا از روی سیستم برداشته شد).

#### ۲-۷-۵- خطای چند مسیری

یکی از اثرات و خطاهایی که در GPS با آن مواجه هستیم، اثر چند مسیری Multipath می‌باشد. این پدیده در اثر انعکاس امواج از سطوح منعکس‌کننده مانند ساختمان‌ها به وجود می‌آید. در اثر این پدیده آنچه گیرنده دریافت می‌کند، سیگنالی است که از دو یا چند مسیر مختلف به آن رسیده است. جهت اجتناب از این مساله، معمولاً الگوی حصول آنتن را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که سیگنال‌های ماهواره‌ها تا زاویه ارتفاعی مشخصی را ردیابی نمایند که به این زاویه ارتفاعی، Cut of Angle می‌گویند. معمولاً cut of angle را ۱۵ درجه در نظر می‌گیرند، یعنی آنتن‌ها سیگنال‌های ارسالی با زاویه ارتفاعی کمتر از ۱۵ درجه را دریافت نمی‌کنند. الگوی حصول آنتن باید به گونه‌ای باشد که اجازه ورود سیگنال‌های چند مسیری را به گیرنده ندهد (شکل ۲-۵).





شکل ۲-۵ - خطای چند مسیری

یک پدیده مشابه، imaging است. در این پدیده، موج انعکاس یافته باعث تغییر الگوی آنتن می‌شود. در کاربردهای استاتیک اثر چند مسیری و imaging در یک محیط با قابلیت انعکاس بالا، باعث کاهش دقت اندازه‌گیری شبه فاصله تا سطح ۱۰ متر و تا سطح چند سانتی‌متر در اندازه‌گیری‌های فاز موج حامل می‌باشد و در کاربردهای کینماتیک به واسطه سطح نویز بیش‌تر، این اثرات باعث قطع ارتباط و بروز Cycle slip می‌شود.

از آن جایی که اثر چند مسیری به صورت روزانه برای جفت آنتن و ماهواره در همان سایت تکرار می‌شود. به عبارت دیگر، همبستگی (correlation) روزانه دارد و با بررسی همبستگی روز به روز باقی‌مانده می‌توان به این اثر پی برد. ساده‌ترین روش جهت مقابله با این اثرات، انتخاب دقیق و محتاطانه نوع آنتن و محل استقرار آن است. به عنوان مثال، استفاده از آنتن‌های Choke-ring به طور قابل ملاحظه‌ای اثر خطای چند مسیری را کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از صفحه زمینی (Ground plane) نیز در کاهش این اثر موثر می‌باشد.

روش دیگر استفاده از متوسط‌گیری زمانی (روی یک فاصله زمانی بزرگ) است که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد و به طور موثری اثر چندمسیری را از بین می‌برد اما imaging با متوسط‌گیری از بین نمی‌رود. روش دیگر استفاده از ترکیب مشاهدات فاز و کد می‌باشد که میزان خطای چند مسیری شبه فاصله را کاهش می‌دهد.

در مواردی که استقرار آنتن در محل‌هایی در انعکاس اجتناب‌ناپذیر است، با انتخاب cut of angle مناسب، می‌توان تا حد زیادی از این اثر جلوگیری نمود [۴۰].

## ۲-۷-۶ - خطای cycle slip

جهش فاز یا cycle slip اکثراً در نتیجه وجود موانع بین گیرنده و ماهواره به وجود می‌آید و به طور کلی وقتی ارتباط بین گیرنده و ماهواره قطع شود، اندازه‌گیری هم انجام نشده لذا در اندازه‌گیری فاز موج حامل، عدد ابهام فاز از دست





خواهد رفت. پس از گذشت مدتی که سیگنال ماهواره مجدداً توسط گیرنده دریافت شود، اندازه‌گیری فاز نیز شروع خواهد شد و در این حالت مقدار ابهام فاز مانند شروع اندازه‌گیری مجهول است و باید تعیین گردد.

#### - علل قطع ارتباط و بروز جهش فاز:

- وجود مانع بین گیرنده و ماهواره،
- شتاب ناگهانی گیرنده،
- خرابی نرم‌افزار گیرنده.

علاوه بر قطع ارتباط، گاهی اختلالات یونسفریکی، پدیده چند مسیری، تداخل سیگنال ماهواره با سیگنال‌های دیگر و یا خطاهای ماهواره و گیرنده، باعث ایجاد جهش در فاز و اندازه‌گیری‌های نادرست می‌شوند. لازم به ذکر است که آن چه به عنوان خطای cycle slip در نظر گرفته می‌شود، جهش فاز ناشی از قطع ارتباط گیرنده با ماهواره است.

روش‌های کشف و حذف این اثر:

روش‌ها برای کشف cycle slip بستگی به مد اندازه‌گیری (استاتیک یا کینماتیک) و نوع گیرنده (تک فرکانسه و دوفرکانسه) دارد.

برازش یک چند جمله‌ای پیوسته برای داده‌های فاز هر ماهواره جهت مدله نمودن آن‌ها است.

استفاده از مشاهدات تفاضلی سه گانه: در این روش از روی اختلاف معادلات تفاضلی دوگانه مشاهده شده و اندازه‌گیری شده در دو اپک می‌توان به هر cycle slip پی برد.

$$\text{در اپک } K \quad \omega_k = \nabla \Delta \rho_k - \nabla \Delta \phi_k = \lambda \nabla \Delta N \quad (17-2)$$

$$\text{در اپک } K+1 \quad \omega_{k+1} = \nabla \Delta \rho_{k+1} - \nabla \Delta \phi_{k+1} = \lambda \nabla \Delta N$$

جهت محاسبه  $\nabla \Delta \rho$  نیاز است که مختصات ایستگاه‌ها معلوم باشند که با حل تفاضلی سه گانه می‌توان به این مقصود رسید.

در (فرمول ۱۷-۲)، اختلاف بین  $\omega_k$  و  $\omega_{k+1}$  بیانگر وجود cycle slip خواهد بود (زیرا در روش تفاضلی سه گانه عدد ابهام فاز ثابت می‌ماند، لذا در صورت وجود اختلاف بین  $\omega_k$  و  $\omega_{k+1}$  تنها توجیه، وجود cycle slip است. این روش عموماً در حالت استاتیک استفاده می‌شود [۴۰].

#### ۲-۷-۷- جابه‌جایی مرکز فاز آنتن

مرکز فاز آنتن نقطه‌ای است که اندازه‌گیری سیگنال‌های رادیویی به آن منسوب می‌شود و عموماً با مرکز فیزیکی آن منطبق نیست. در آنتن‌ها دو اثر باید مدنظر قرار بگیرد: افست مرکز فاز و تغییرات مرکز فاز. دقت یک آنتن به تغییرات مرکز فاز آن مرتبط می‌باشد نه به افست مرکز فاز آنتن، چرا که ثابت افست می‌تواند به آسانی تعیین شود اما مدله نمودن مرکز فاز آنتن کار دشواری است.



یک مشخصه دیگر آنتن‌ها، استحکام مرکز فاز آن‌ها می‌باشد. مرکز الکترونی آنتن‌ها باید بر مرکز فیزیکی آن‌ها نزدیک باشد و همچنین باید نسبت به دوران و میل غیرحساس باشد. برای آنتن‌های مورد استفاده در کاربردهای دقیق تعیین موقعیت، مرکز فاز آنتن یعنی مرکز الکتریکی آن که موقعیت به آن منسوب می‌شود باید از استحکام بالایی برخوردار باشد. میزان تغییرات مرکز فاز آنتن‌ها در حدود cm-mm می‌باشد. به عنوان مثال، برای آنتن‌های T14100 این تغییرات ۱ تا ۲ سانتی‌متر و برای آنتن‌های microstrip حدود میلی‌متر است [۴۰].

## ۲-۸- ترکیبات خطی مشاهدات

بسته به نوع کاربرد و سطح دقت مورد انتظار، روش‌های مختلف ترکیب مشاهدات فاز یا کد وجود دارند. در GPS هر دو تعیین موقعیت مطلق و نسبی امکان‌پذیر است. اما به علت وجود برخی خطاها مانند خطاها و بایاس‌های مدار، بایاس ساعت ماهواره و گیرنده و تاخیرات یونسفری و تروپوسفری، تعیین موقعیت مطلق عموماً با دقت کم‌تری انجام می‌شود. جهت تعیین موقعیت با دقت بالاتر، در کاربردهای ژئودتیکی از مد نسبی (تفاضلی) استفاده می‌شود. در تعیین موقعیت نسبی بسیاری از خطاهای ذکر شده کاهش یافته یا حذف می‌گردند و در واقع هدف از روند تفاضلی بهبود دقت تعیین موقعیت با کاهش یا حذف خطاهای موجود می‌باشد.

اندازه‌گیری‌های تفاضلی موجود در GPS می‌توانند به صورت‌های بین گیرنده‌ها، بین ماهواره‌ها و بین اپک‌ها و یا ترکیب این روش‌ها باشند.

ما جهت خلاصه‌نویسی از نمادهای زیر برای هر یک از روش‌های تفاضلی ذکر شده استفاده می‌نماییم:

–  $\Delta$ : معرف روش تفاضلی بین دو گیرنده

–  $\nabla$ : معرف روش تفاضلی بین دو ماهواره

–  $\bar{\Delta}$ : معرف روش تفاضلی بین دو اپک

## ۲-۸-۱- تفاضلی یگانه بین اپک‌ها

این روش بر مبنای مشاهده به یک ماهواره توسط یک گیرنده در طول یک بازه زمانی می‌باشد. با تفاضل دو معادله مشاهده فاز از یکدیگر، معادله زیر را داریم:

$$\delta\phi = \delta\rho + \delta d\rho + c(\delta dt - \delta dT) - \delta d_{ion} + \delta d_{trop} + \delta\varepsilon$$

ملاحظه می‌گردد که معادله فوق عاری از اثر ابهام فاز می‌باشد، زیرا اساس کار در این روش مشاهده به یک ماهواره در یک فاصله زمانی، بدون قطع ارتباط است. لذا در طول این بازه زمانی ثابت می‌ماند.

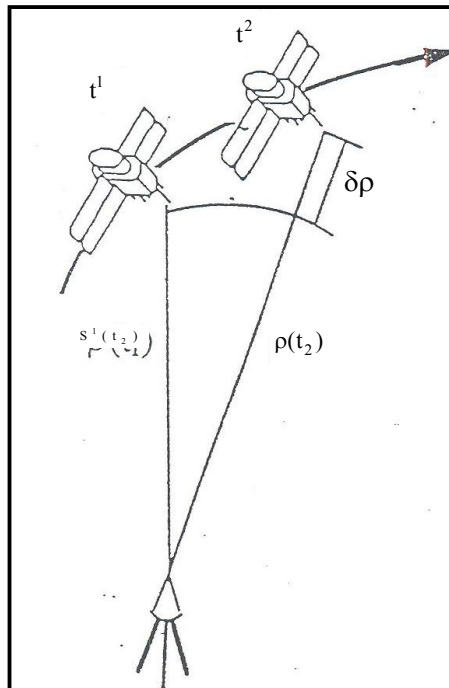
اما معادله مشاهده شبه فاصله به روش تفاضلی یگانه بین اپک‌ها به صورت زیر است:

$$\delta\phi = \delta\rho + \delta d\rho + c(\delta dt - \delta dT) + \delta d_{ion} + \delta d_{trop} + \delta\varepsilon$$



## - مزایای روش

- معادله مشاهده فاز در این روش عاری از اثر ابهام فاز می‌باشد.
- خطاهای مداری و اتمسفری کاهش می‌یابند (شکل ۲-۶). (هرچه فاصله زمانی بین دو اپک کم‌تر باشد، خطاها بیش‌تر کاهش می‌یابد).
- این روش، روش خوبی برای کشف cycle slip می‌باشد.
- SOP و LOP در این روش هذلولی است. لذا این روش استحکام هندسی خوبی ندارد.



شکل ۲-۶- ترکیب تفاضلی یگانه بین اپک‌ها

## ۲-۸-۲- تفاضلی یگانه بین گیرنده‌ها

این روش عبارت است از انجام مشاهداتی از دو گیرنده به یک ماهواره. با تفاضل دو معادله مشاهده فاز موج حامل داریم:

$$\Delta\phi = \Delta\rho + \Delta d\rho - c\Delta dT + \lambda\Delta N - \Delta d_{ion} + \Delta d_{trob} + \Delta\epsilon$$

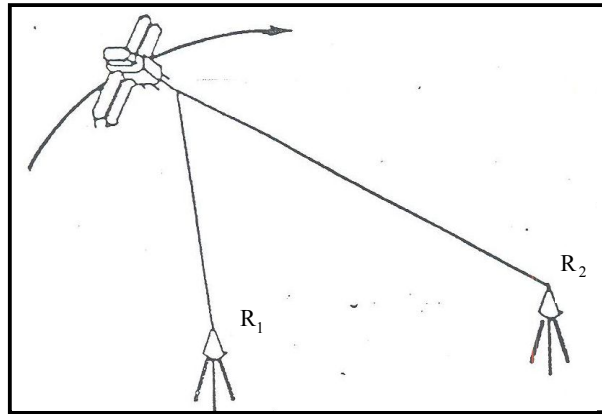
و معادله شبه فاصله:

$$\Delta\rho = \Delta\rho + \Delta d\rho - c\Delta dT + \Delta d_{ion} + \Delta d_{trob} + \Delta\epsilon$$

مزایای این روش:

- حذف خطای ساعت ماهواره،
- کاهش خطاهای مداری و تاخیر اتمسفری (شکل ۲-۷). (هرچه طول خط مبنا کوتاه‌تر باشد، میزان کاهش خطاهای فوق بیش‌تر است).





شکل ۲-۷- ترکیب تفاضلی یگانه بین گیرنده‌ها

## ۲-۸-۳- تفاضلی یگانه بین ماهواره‌ها

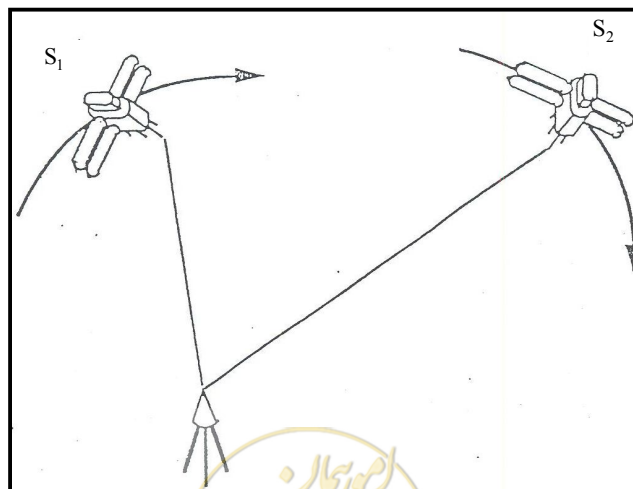
این روش بر مبنای مشاهده از یک ایستگاه به دو ماهواره استوار است:  
معادله فاز موج حامل:

$$\Delta\phi = \Delta\rho + \Delta d\rho + c\Delta dT + \lambda\Delta N - \Delta d_{ion} + \Delta d_{trob} + \Delta\epsilon$$

$$\Delta\rho = \Delta\rho + \Delta d\rho + c\Delta dT + \Delta d_{ion} + \Delta d_{trob} + \Delta\epsilon$$

با مشاهده به ماهواره  $n$  ام،  $n-1$  مشاهده خواهیم داشت. معمولاً یک ماهواره به عنوان ماهواره مبنا در نظر گرفته می‌شود که معمولاً مرتفع‌ترین ماهواره به جهت حداقل تأثیرپذیری در برابر خطاها به عنوان ماهواره مبنا انتخاب می‌شود.  
مزایا:

- حذف خطای ساعت گیرنده،
- کاهش خطاهای مداری و اتمسفری (شکل ۲-۸). (در صورتی که ماهواره‌ها به هم نزدیک‌تر باشند، میزان کاهش خطاها بیشتر خواهد بود).



شکل ۲-۸- ترکیب تفاضلی یگانه بین ماهواره‌ها

## ۲-۸-۴ - تفاضلی دوگانه گیرنده - زمان

این روش بر اساس مشاهده از دو ایستگاه به یک ماهواره در دو اپک زمانی (در طول یک بازه زمانی) می‌باشد. معادله مشاهده فاز موج حامل:

$$\Delta\delta\phi = \Delta\delta\rho + \delta\Delta d\rho - c\Delta\delta dT - \Delta\delta d_{ion} + \Delta\delta d_{trob} + \Delta\delta\epsilon$$

معادله شبه فاصله:

$$\Delta\delta\rho = \delta\Delta\rho + \Delta\delta d\rho - c\Delta\delta dT + \Delta\delta d_{ion} + \Delta\delta d_{trob} + \Delta\delta\epsilon$$

مزایا:

- حذف خطای ساعت ماهواره،
- حذف ابهام فاز،
- کاهش خطاهای مداری و اتمسفری (هرچه طول خط مبنا و طول بازه زمانی مشاهداتی کوتاه‌تر باشد، میزان کاهش خطاها بیشتر خواهد بود).

معایب:

- SOP و LOP در این روش هذلولی است. لذا این روش استحکام هندسی خوبی ندارد.

## ۲-۸-۵ - تفاضلی دوگانه ماهواره - زمان

این روش بر مبنای مشاهده از یک ایستگاه به دو ماهواره در دو اپک زمانی (در طول یک بازه زمانی) می‌باشد. معادله مشاهده فاز موج حامل:

$$\nabla\delta\phi = \delta\nabla\rho + \delta\nabla d\rho + c\delta\nabla dT + \lambda\delta\nabla N - \nabla\delta d_{ion} + \nabla\delta d_{trob} + \delta\nabla\delta\epsilon$$

و معادله مشاهده شبه فاصله:

$$\delta\nabla\rho = \delta\nabla\rho + \delta\nabla d\rho + c\delta\nabla dT + \nabla\delta d_{ion} + \delta\nabla d_{trob} + \delta\nabla\delta\epsilon$$

مزایا:

- حذف خطا ساعت گیرنده،
- حذف ابهام فاز دز معادله مشاهده فاز موج حامل،
- کاهش خطاهای مداری و اتمسفری (هرچه ماهواره‌ها به هم نزدیک‌تر باشند و بازه زمانی مشاهداتی نیز کوتاه‌تر باشد، میزان کاهش خطاها بیشتر است).

معایب:

- SOP و LOP در این روش هذلولی است. لذا این روش استحکام هندسی خوبی ندارد.



## ۲-۸-۶- تفاضلی دوگانه ماهواره- گیرنده

روش تفاضلی دوگانه ماهواره-گیرنده می‌تواند به دو صورت در نظر گرفته شود:

- انجام دو مشاهده تفاضلی یگانه بین گیرنده، با یک جفت گیرنده اما با دو ماهواره مختلف،

- انجام دو مشاهده تفاضلی یگانه بین ماهواره، با یک جفت ماهواره اما با دو گیرنده مختلف

هر دو صورت بالا یعنی  $\nabla\Delta$  و  $\nabla\Delta$  نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند.

معادله مشاهده فاز موج حامل:

$$\nabla\Delta\phi = \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \lambda\nabla\Delta N - \nabla\Delta d_{ion} + \nabla\Delta d_{trob} + \nabla\Delta\varepsilon$$

و معادله مشاهده شبه فاصله:

$$\nabla\Delta\rho = \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta d_{ion} + \nabla\Delta d_{trob} + \nabla\Delta\varepsilon$$

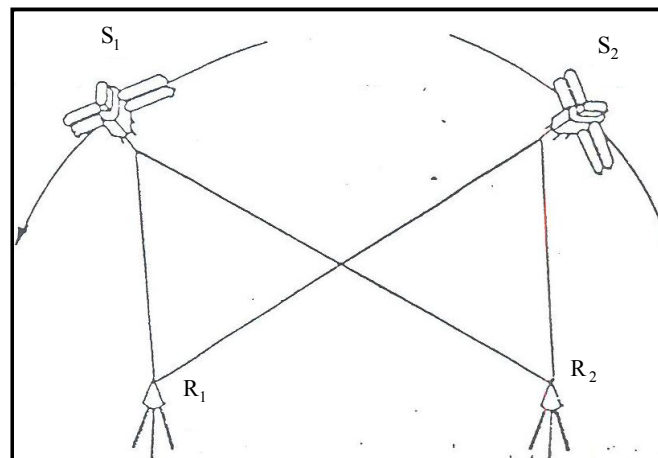
در این روش معمولاً یک ماهواره به عنوان ماهواره مبنا در نظر گرفته می‌شود. در انتخاب این ماهواره باید دقت کافی

را مبذول داشت. زیرا داده‌های این ماهواره روی مشاهدات دیگر اثر خواهد گذاشت. عموماً مرتفع‌ترین ماهواره به لحاظ

کم تاثیر بودن خطاها به عنوان ماهواره مبنا منظور می‌گردد.

مزایا:

- حذف خطاهای ساعت گیرنده و ماهواره،
- کاهش خطاهای مداری و اتمسفری (شکل ۲-۹). (هرچه طول خط مبنا کوتاه‌تر و دو ماهواره به هم نزدیک‌تر، میزان کاهش خطاها بیش‌تر خواهد بود).



شکل ۲-۹- ترکیب تفاضلی دوگانه ماهواره-گیرنده

## ۲-۸-۷- تفاضلی سه گانه گیرنده- ماهواره- زمان

این روش در واقع ترکیب سه روش تفاضلی یگانه می‌باشد، یعنی مشاهده از دو گیرنده به دو ماهواره در دو اپک زمانی.



معادله مشاهده فاز موج حامل:

$$\delta \nabla \Delta \phi = \delta \nabla \Delta \rho + \delta \nabla \Delta d_{\rho} - \delta \nabla \Delta d_{ion} + \delta \nabla \Delta d_{trob} + \delta \nabla \Delta \varepsilon$$

معادله شبه فاصله:

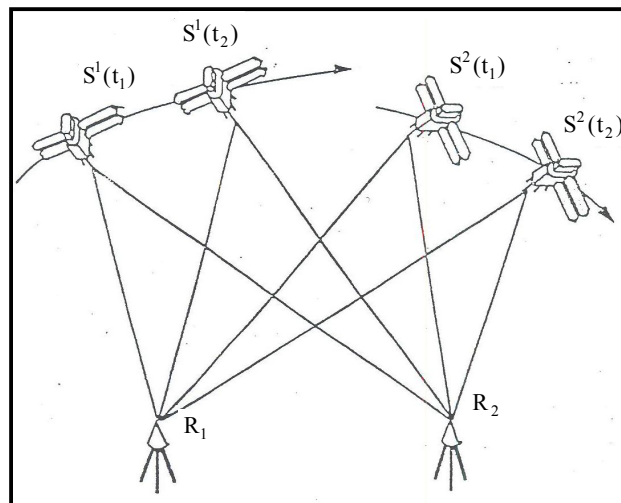
$$\delta \nabla \Delta \rho = \delta \nabla \Delta \rho + \delta \nabla \Delta d_{\rho} + \delta \nabla \Delta d_{ion} + \delta \nabla \Delta d_{trob} + \delta \nabla \Delta \varepsilon$$

مزایا:

- حذف خطاهای ساعت گیرنده و ماهواره،
- حذف خطای ابهام فاز،
- کاهش خطاهای مداری و اتمسفری (شکل ۲-۱) (هرچه ماهواره‌ها به هم نزدیک‌تر، طول خط مبنا کوتاه‌تر، بازه زمانی مشاهدات کوتاه‌تر، میزان کاهش خطاها بیش‌تر می‌باشد)،
- از این روش بیش‌تر جهت کشف قطع فازها (cycle slip) و برآورد مختصات اولیه استفاده می‌شود.

معایب:

- SOP و LOP در این روش هذلولی است. لذا این روش استحکام هندسی خوبی ندارد.



شکل ۲-۱۰- ترکیب تفاضلی سه گانه گیرنده - ماهواره - زمان

## ۲-۹- ضریب تعدیل دقت

هندسه ماهواره‌های قابل رویت یک فاکتور مهم در کیفیت نتایج به ویژه در نقشه‌برداری کینماتیک و تعیین موقعیت مطلق است. هندسه و آرایش ماهواره‌ها به واسطه حرکت نسبی آن‌ها در زمان تغییر می‌کند. کمیتی که بتوان با آن اثر ترکیب هندسی ماهواره‌ها را روی دقت تعیین موقعیت محاسبه نمود، DOP می‌باشد که مقدار آن عبارت است از:

$$\sigma = DOP \cdot \sigma_0$$

$\sigma$ : دقت موقعیت

$\sigma_0$ : دقت اندازه‌گیری (فاکتور واریانس اولیه)



به عبارت دیگر، DOP همان عناصر روی قطر ماتریس کوفاکتور است:

$$Q_N = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xy}q_{xt} \\ q_{xy} & q_{yy} & q_{yz}q_{yt} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zz}q_{zt} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zt}q_{tt} \end{bmatrix}$$

بسته به اینکه چه المان‌هایی در تعریف DOP به کار می‌روند، تعاریف مختلفی داریم:

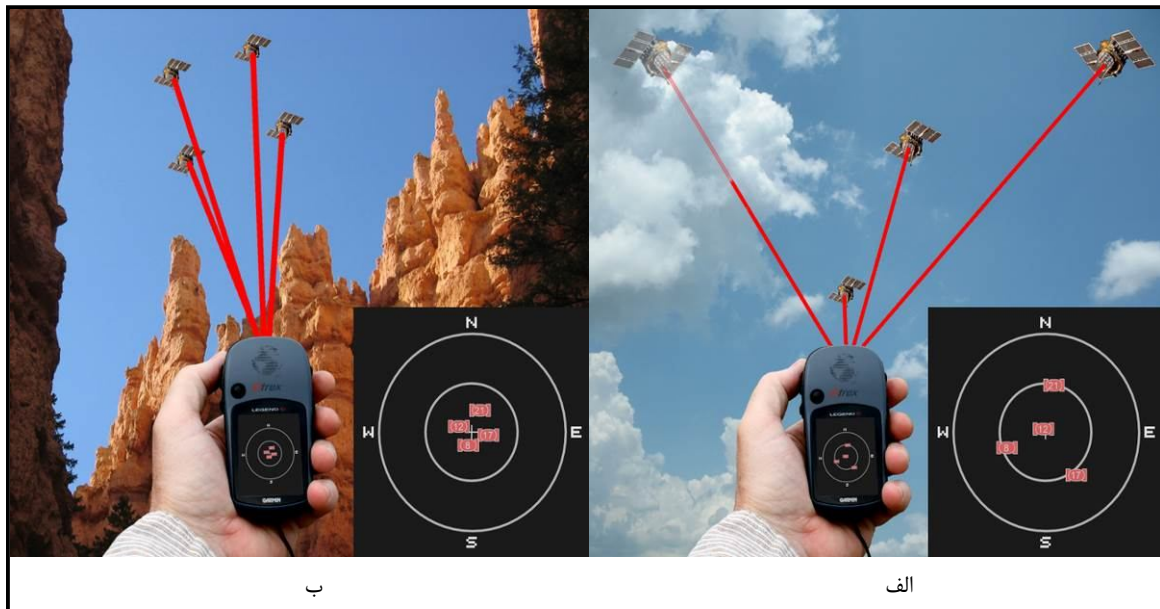
$$GDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}} \quad \text{ضریب تعدیل دقت هندسی}$$

$$PDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}} \quad \text{ضریب تعدیل دقت موقعیت ۳ بعدی}$$

$$TDOP = \sqrt{q_{tt}} \quad \text{ضریب تعدیل دقت زمان}$$

از DOP معمولا جهت طراحی مشاهدات استفاده می‌شود. محاسبه DOP به هیچ‌گونه اندازه‌گیری‌ای نیاز ندارد. موقعیت ماهواره می‌تواند از فایل آلمان‌کها به دست آید و موقعیت تقریبی نقاط نیز از نقشه‌های توپوگرافی منطقه قابل حصول است.

چنانچه ۴ ماهواره را در نظر بگیریم، بهترین وضعیت برای تعیین موقعیت زمانی است که یک ماهواره در بالای سر و سه ماهواره دیگر در سطح افق با فواصل زاویه‌ای ۱۲۰ درجه نسبت به محل گیرنده واقع شده باشند. به عبارت دیگر، هرچه حجم هرم متشکل از ماهواره‌ها با گیرنده بیش‌تر باشد مانند DOP کم‌ترین مقدار ممکن و در نتیجه بهترین دقت در تعیین موقعیت حاصل می‌شود (شکل ۲-۱۱). نیز آرایش ماهواره‌ها را در دو حالت مناسب و نامناسب نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱- الف- آرایش ماهواره‌ها در حالت مناسب. ب- آرایش ماهواره‌ها در حالت نامناسب

در طراحی یک عملیات نقشه‌برداری مانند رفتارسنجی زمین لغزش برای تعیین بهترین زمان به لحاظ داشتن بهترین آرایش هندسی ممکن بین ماهواره از DOP استفاده می‌گردد.





در تفسیر بردارهای خط مبنای پردازش شده DOP نقش مهمی ایفا می‌کند. برای مثال، داده‌ها با DOP ضعیف می‌توانند حذف شوند.

همان گونه که قبلاً ذکر شد:

$$\sigma = \text{DOP} \cdot \sigma_0$$

لذا براساس دقت‌های مختلفی قابل تعریف است:

$$\text{GOP} \cdot \sigma_0$$

دقت هندسی موقعیت و زمان

$$\text{PDOP} \cdot \sigma_0$$

دقت هندسی موقعیت

$$\text{TDOP} \cdot \sigma_0$$

دقت هندسی زمان

$$\text{HDOP} \cdot \sigma_0$$

دقت هندسی موقعیت مسطحاتی

$$\text{VDOP} \cdot \sigma_0$$

دقت هندسی موقعیت قائم

## ۲-۱۰- طراحی

نقشه‌برداری GPS اساساً متفاوت از نقشه‌برداری کلاسیک است، زیرا نقشه‌برداری GPS مستقل از شرایط آب و هوایی بوده و به دید مستقیم بین سایت‌ها نیازی ندارد.

بنا به این اختلافات، مراحل طراحی، اجرا و پردازش یک عملیات نقشه‌برداری GPS نیز متفاوت خواهد بود. در طراحی، پارامترهای مختلفی مانند بررسی محل مشاهده، آرایش هندسی ماهواره‌ها، تعداد و نوع گیرنده‌ها و جنبه‌های اقتصادی و ... مد نظر قرار می‌گیرد. در پروژه‌های بزرگ با تعداد سایت‌ها و گیرنده‌های زیاد جهت ذخیره زمان، طراحی می‌تواند با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری انجام شود.

## ۲-۱۰-۱- انتخاب محل ایستگاه

اولین مرحله در طراحی، انتخاب محل ایستگاه می‌باشد. در این مرحله استفاده از نقشه‌های کوچک مقیاس  $\frac{1}{500}$  بسیار مناسب است. همه نقاط عملیات روی این نقشه‌ها ترسیم می‌شوند. در طراحی یک عملیات GPS چندین مساله در انتخاب یک نقطه مورد توجه است:

موقعیت نقطه در ناحیه‌ای با قابلیت دید آسمانی خوب قرار داشته باشد.  
در نزدیکی نقطه مورد نظر، مانعی مانند ساختمان، درخت و ... وجود نداشته باشد.

به طور کلی خصوصیات یک سایت GPS عبارت است از:

- دید آسمانی خوب بالای زاویه ارتفاعی  $20^\circ$  درجه
- دسترسی آسان (ترجیحاً با وسایط نقلیه)



- وجود فضایی برای پارک وسایط نقلیه
- مکانی مناسب برای ایجاد علامت ایستگاه

## ۲-۱۰-۲- تعیین اپتیمم پریود مشاهدات

دومین مرحله در طراحی، تعیین اپتیمم پریود مشاهدات و تعیین session هاست. اپتیمم پنجره مشاهده، مدتی است که ماکزیمم ماهواره‌ها به طور هم‌زمان می‌توانند مشاهده شوند. اپتیمم پنجره توسط چارت‌های آزیموت-ارتفاع که در نرم‌افزارهای GPS قابل نمایش است، تعیین می‌شود.

### Session - 1-2-10-2

پریود زمانی انتخاب شده برای یک مشاهده، یک session نامیده می‌شود. فرض نمایید از ساعت ۱ تا ۲ زمان UTC برای مشاهده مناسب باشد. اگر در این زمان قرار باشد اولین مشاهده انجام شود، این زمان session A نامیده می‌شود و اگر به فرض زمان ۲:۳۰ تا ۳:۳۰ UTC نیز برای مشاهده مناسب باشد، session B نامیده می‌شود. یک زمان مناسب برای شروع یک session در نقشه‌برداری استاتیک زمانی است که تعداد ماهواره‌ها ۴ یا بیش‌تر با زاویه ارتفاعی ۱۵ تا ۲۰ درجه در افق دید قرار داشته باشند و آخرین مشاهده این session زمانی است که یکی از ۴ ماهواره زیر زاویه ارتفاعی ۱۵ تا ۲۰ باشد و در واقع زمانی که تعداد ماهواره‌ها به ۳ عدد برسد. ۵ فاکتور عمده به منظور تعیین طول یک مشاهده وجود دارد:

- هندسه نسبی ماهواره و تغییر در هندسه،
  - تعداد ماهواره‌ها،
  - طول خط مبنا،
  - مقدار موانع موجود در ایستگاه‌ها،
  - درجه تاثیر یونسفری (شب یا روز، تابستان یا زمستان، زمان مینیمم فعالیت خورشیدی یا ماکزیمم فعالیت آن).
- ماهواره‌هایی که دارای هندسه بهتری هستند، به مدت مشاهده کوتاه‌تری نیاز دارند. طول یک session همچنین در مورد خط مبناهای کوتاه‌تر کاهش می‌یابد. برای مثال، در مورد خطوط مبنای ۱-۲ کیلومتر، با دسترسی به ۵ ماهواره و استفاده از گیرنده‌های تک فرکانسه، طول sessionها حدود ۴۵ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. خطوط بلندتر به مدت زمان بیشتری برای حصول به نتایج خوب نیاز دارند. جدول زیر می‌تواند به عنوان یک راهنما برای طراحی طول زمان مشاهده، وقتی تعداد ۴ ماهواره یا بیش‌تر در افق دید وجود داشته باشند و شرایط یونسفری هم نرمال بوده و مقدار GDOP کم‌تر از ۶ باشد، استفاده شود:



جدول ۲-۱- بازه زمانی برداشت مشاهدات در چهار دسته

طول خط مبنا (km)	Session(min)
۰/۱-۱/۰	۱۰-۳۰
۱/۱-۵/۱	۳۰-۶۰
۵/۱-۱۰/۰	۶۰-۹۰
۱۰/۱-۳۰/۰	۹۰-۱۲۰

در اندازه‌گیری فاز موج حامل، روی یک خط مبنای کوتاه (کم‌تر از یک کیلومتر) عدد ابهام فاز معمولاً می‌تواند با ۵-۱۰ دقیقه مشاهده از فاز L1 حل شود. با گیرنده‌های دو فرکانسه که کد p و با استفاده از wide-laning، خطوط بلند (مثلاً ۱۵ کیلومتری) می‌توانند با ۱۰ دقیقه جمع‌آوری داده‌ها به دقت اندازه‌گیری شوند. در واقع وابستگی زمان مشاهده به طول باز به واسطه عدد ابهام فاز می‌باشد. هرچه طول خط مبنا کوتاه‌تر باشد، زمان کم‌تری برای حل ابهام فاز نیاز است.

### ۲-۱۰-۳- شناسایی منطقه

بعد از آن که نقاط GPS روی نقشه ترسیم و چگونگی رسیدن به آن نقاط مشخص گردید، نوبت به شناسایی منطقه می‌رسد. بدین منظور شخصی به محل مورد نظر در منطقه می‌رود. در مرحله شناسایی، معمولاً باید اثر چند مسیری (Multipath) و موانع موجود در محل (وضعیت دید آسمانی منطقه) بررسی شود. وقتی ایستگاه به موانع منعکس کننده مانند ساختمان‌ها نزدیک باشد تنها راه عملی جابه‌جایی نقطه به مکان دیگر است. همچنین اگر در این مرحله، در منطقه‌ای موانعی در اطراف نقطه دیده شود و چاره‌ای جز انتخاب نقطه مورد نظر نباشد، در این مورد می‌توان آنتن را بالای یک دیرک نقشه‌برداری که ارتفاع آن تا حدود ۳۰ متر هم می‌رسد قرار داد.

نکته!! در صورتی که مجبور به استفاده از سه پایه و بالا بردن ارتفاع آنتن شدیم، بایستی موارد زیر را به منظور بهبود نتایج در نظر بگیریم:

- وضعیت وزش باد قبل از رفتن به سر زمین چک گردد زیرا قرار است از سه پایه استفاده شود.
- ترجیحاً از سه پایه‌های ثابت استفاده شود.
- هرچه ارتفاع سه پایه کم‌تر باشد بهتر است. حداقل ارتفاع را برای رفع مشکل در نظر بگیرید.
- تراز سه پایه و گیرنده چند دقیقه (حدود ۲-۳ دقیقه) قبل از شروع برداشت تنظیم باشد.
- اگر سه پایه صفحه دورانی و چرخشی دارد برای تنظیم و تراز حباب‌ها باید صفحه را ۱۸۰ چرخاند و تنظیم دوباره انجام شود.
- نحوه اندازه‌گیری صحیح ارتفاع آنتن بسیار مهم است. ارتفاع آنتن در NGS عبارت است از فاصله قائم بین نقطه دیتوم ایستگاه datum point و نقطه مرجع آنتن (ARP). مشاهده کننده‌ها بایستی با دقت این ارتفاع را اندازه‌گیری و چک کنند. تمام اندازه‌گیری‌ها و ثوابت آنتن‌ها را ثبت نمایند. تمامی مقادیر باید تا



۰/۰۰۰۱ متر اندازه‌گیری شوند. همچنین محاسبات تمام اندازه‌گیری‌ها بایستی به وسیله فرد دیگری دوباره تکرار شود و چک گردد.

سه پایه‌های ثابت: (با ارتفاع ثابت): این نوع سه پایه‌ها را اندازه‌گیری ارتفاع آنتن را آسان می‌کنند. ارتفاع سه پایه کالیبره شده (A) باید با یک اندازه‌گیری سریع چک شود. از چفت شدن آنتن با سر سه پایه مطمئن شوید. هر فاصله‌ای بین سر سه پایه و (B) ARP اندازه‌گیری شود. ارتفاع آنتن می‌تواند از معادله زیر محاسبه شود:

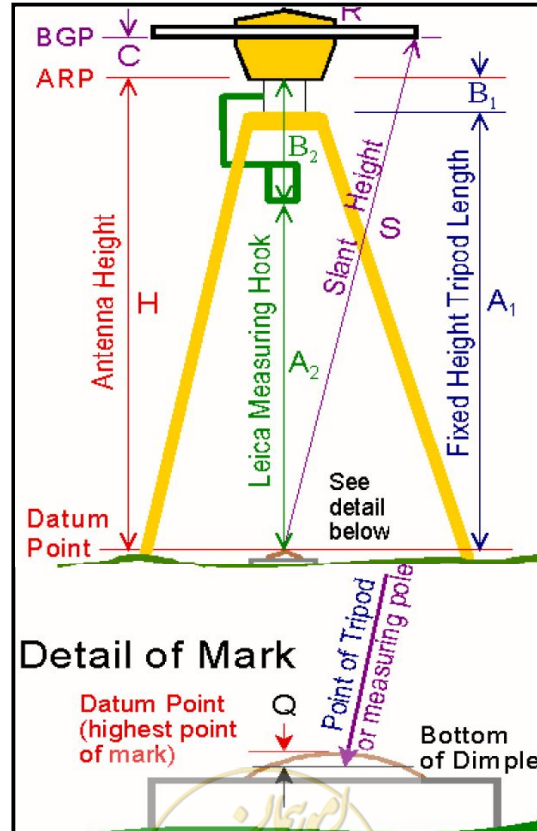
$$H=(A+B)-Q \quad \text{ارتفاع آنتن}$$

نکته!! آنتن‌های Leica از یک قالب اندازه‌گیری برای تعیین فاصله قائم بین آنتن و نشانه استفاده می‌کنند. فاصله

اندازه‌گیری شده از نشانه تا قلاب را به عنوان A و افست قلاب تا ARP را به عنوان B در نظر بگیرید.

سه پایه‌های با پایه‌های متحرک: ارتفاع آنتن معمولاً به وسیله ارتفاع اریب، فاصله وتر از نقطه دیتوم ایستگاه تا لبه پایین صفحه زمینی آنتن (BGP) اندازه‌گیری می‌شود. ارتفاع مایل به حداقل سه نقطه اطراف آنتن را اندازه‌گیری کنند. این اندازه‌گیری‌ها باید همگی تا ۱ میلی‌متر با یکدیگر یکسان باشد. اندازه‌گیری‌های مستقل ارتفاع آنتن بالای نشانه در واحد متر بایستی قبل و بعد از هر استقرار انجام شوند. از برگه مشخصات آنتن می‌توانید شعاع صفحه زمینی (R) و ثابت افست (C) بین BGP و ARP را پیدا کنید (شکل ۲-۱۲). بنابراین ارتفاع آنتن از رابطه فیثاغورث به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H=(\text{sqrt}(S^2-R^2)-C)-Q$$



شکل ۲-۱۲- نمای شماتیک از نحوه اندازه‌گیری ارتفاع سه پایه

بعد از آن که همه نیازهای ایستگاه‌ها بررسی شد، شخص شناسایی کننده باید موقعیت سایت انتخابی را روی یک نقشه بزرگ مقیاس تر مشخص و راه رسیدن به آن نقطه را نیز توصیف نماید. در برخی موارد تهیه کروکی از منطقه و تهیه عکس از محوطه ایستگاه، مشخص نمودن اسم و آدرس، مختصات تقریبی و... برای هر یک از آن‌ها ضروری است.

## ۲-۱۰-۴- انتخاب تجهیزات

### ۲-۱۰-۴-۱- آنتن و گیرنده

از آن جایی که دقت مورد نظر برای کارهای ژئودتیکی تنها از طریق تعیین موقعیت نسبی قابل حصول است، حداقل ۲ گیرنده بایستی در هر پروژه نقشه برداری باید مورد استفاده قرار گیرند. اما چون مزایای استفاده از گیرنده‌های بیش تر نرخ تولید (اتصال و ارتباط چندگانه با ایستگاه‌های مجاور، بیس لاین‌های تکراری و طراحی هندسی قوی‌تر) را افزایش می‌دهد، استفاده از حداقل ۴ گیرنده توصیه می‌گردد.

هر آنتن تعریف مرکز فاز خودش را دارد که ممکن است با جهت ماهواره‌ها تغییر کنند. به طور ایده‌آل، یک نوع آنتن با کم‌ترین حساسیت به خطای multipath و کم‌ترین تغییرات مرکز فاز بایستی انتخاب گردد. اگرچه استفاده از آنتن یکسان برای همه گیرنده‌ها در پروژه توصیه می‌گردد تا بایاس‌های مرکز فاز آنتن به حداقل برسد، استفاده از چند آنتن مجاز است اما بایستی در طی برداشت مورد تست قرار گیرند. ارتفاع آنتن باید یک بار قبل و یک بار بعد از برداشت یا هر reset فیزیکی آنتن اندازه‌گیری شود.

### ۲-۱۰-۴-۲- گیرنده‌های تک فرکانسه در مقابل گیرنده‌های ۲ فرکانسه

اثرات یونسفر سبب نویزی شدن مشاهدات هم در گیرنده‌های تک فرکانسه و هم ۲ فرکانسه می‌گردد. (بایاس‌های یونسفری تصحیح نشده). نویز می‌تواند به صورت سیکل وار یا بزرگ‌تر باشد که سبب می‌شود تشخیص بین تغییرات یونسفری و cycle slip غیر ممکن شود. با گیرنده‌های دوفرکانسه اثر اصلی یونسفر می‌تواند تصحیح شود.

## ۲-۱۱- کاربرد مشاهدات GPS در پایش جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از پدیده زمین لغزش

استفاده از مشاهدات GPS به منظور پایش حرکات سطحی ناشی از زمین لغزش در سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای داشته است. امروزه به اثبات رسیده است که مشاهدات GPS یکی از گونه‌های کارا و قابل اطمینان خصوصا به منظور پایش جابه‌جایی‌هایی با نرخ کم یا زیاد است. دقت قابل دستیابی به کمک مشاهدات GPS به طور متوسط حدود  $\pm 4$  میلی‌متر (در حالت ۱S) در مولفه مسطحاتی و حدود  $\pm 8$  میلی‌متر (در حالت ۱S) برای مولفه ارتفاعی برآورد شده است. یک شبکه ژئودتیک به منظور پایش حرکت سطحی ناشی از زمین لغزش از چندین نقطه مشاهداتی در نقاط مشکوک به لغزش به عنوان نقاط شاهد و از چند نقطه خارج منطقه لغزشی تحت عنوان نقاط مبنا تشکیل شده است. تعداد نقاط در حالت ایده‌آل ۴ نقطه خواهد بود. از لحاظ هندسی نیز بهتر است که این نقاط در گوشه‌های منطقه لغزشی و البته خارج از آن

طوری قرار گیرند که اضلاع و زوایای شکل هندسی به وجود آمده از لحاظ اندازه نزدیک به هم باشند و تشکیل یک شکل هندسی تقریباً منظم را بدهند. البته تعداد نقاط مبنا را غالباً ۳ نقطه با شکل هندسی مثلث که ساده‌ترین شکل یک شبکه ژئودتیک خواهد بود در نظر می‌گیرند. در مناطق با وسعت کم و در صورت اطمینان از ثابت و بی حرکت بودن نقاط مبنا می‌توان حتی با ۲ نقطه نیز این مشاهدات را انجام و به نتایج مطلوب دست یافت. افزونگی مشاهدات در عملیات صحرائی در تمامی روش‌های مشاهداتی ژئودتیکی بسیار مهم و با اهمیت خواهد بود. به صورتی که باید هر نقطه شاهد حداقل از ۲ نقطه مبنا مشاهده شود. بدین ترتیب می‌توان روی مشاهدات کنترل داشت و شبکه ژئودتیک ایجاد می‌شود به درجه آزادی خواهد رسید و نتایج حاصل از محاسبات نهایی سرشکنی، نتایج با قابلیت اطمینان بالا خواهد بود (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳- استفاده از مشاهدات GPS به منظور پایش حرکات سطحی

#### ۲-۱۱-۱- پیشینه مطالعات رفتارسنجی زمین لغزش به کمک GPS در ایران

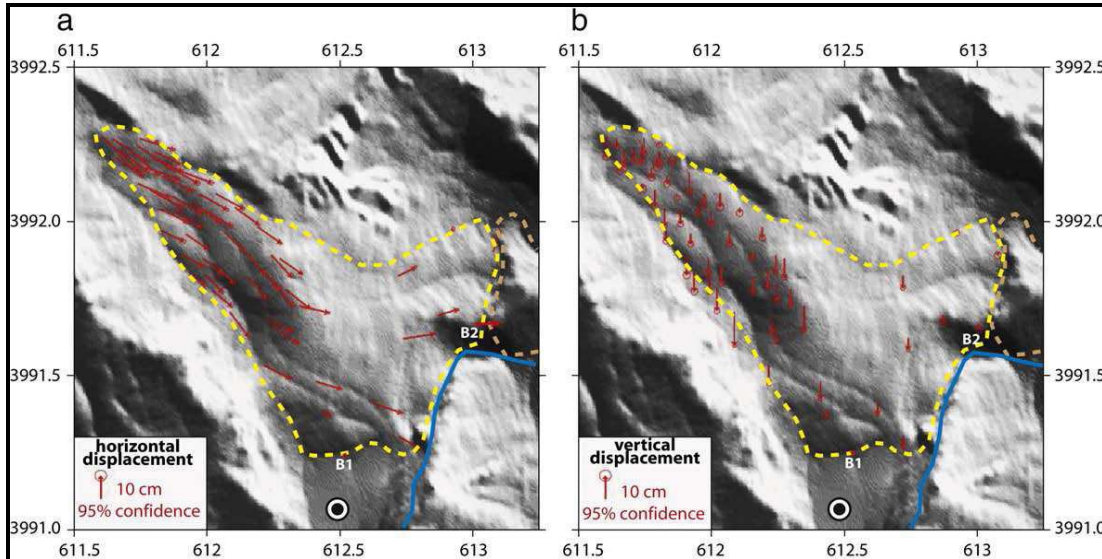
تاکنون (تابستان ۱۳۹۱) مطالعات رفتارسنجی زمین لغزش متعددی در ایران توسط سازمان‌های نقشه‌برداری و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور انجام شده که اکثر آن‌ها از روش GPS استفاده نموده‌اند. در این بخش قصد داریم به برخی از این مطالعات اشاره نماییم.

#### ۲-۱۱-۱-۱- بررسی زمین لغزش کهرود

گودرزی، جمور و نانکلی (۱۳۸۶) نیز در تحقیقی به بررسی زمین لغزش بزرگ کهرود واقع در مرکز رشته‌کوه‌های البرز و در دره هراز پرداختند. در این تحقیق از دو روش تداخل‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات دوره‌ای GPS استفاده شد. بدین منظور از تصاویر سنجنده ASAR ماهواره Envisat در بازه زمانی مهر ۱۳۸۴ تا فروردین ۱۳۸۵ استفاده شد. علاوه بر این، سه مرحله مشاهدات GPS با فاصله زمانی حدود ۱ سال از تیر ۱۳۸۲ تا مرداد ۱۳۸۴ نیز انجام شد. نتایج



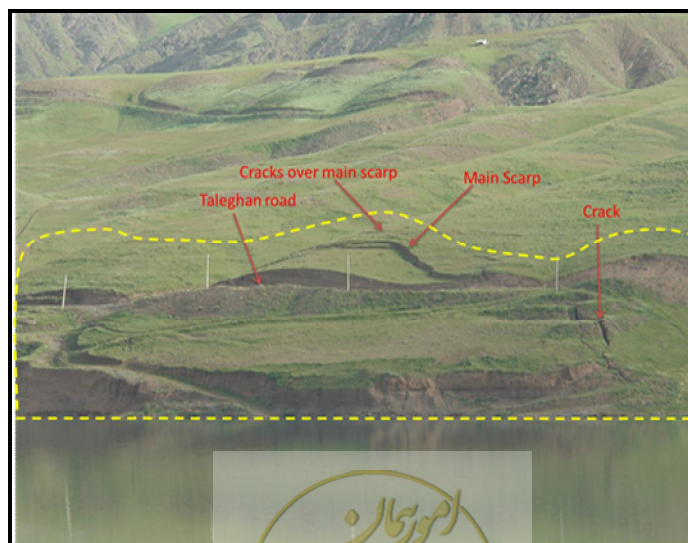
این تحقیق، نشان‌دهنده مطابقت خوب نتایج هر دو روش مورد استفاده است. این نتایج حاکی از جابه‌جایی به دست آمده با نرخ ۲۵ سانتی‌متر در سال را ارائه می‌دهند (گودرزی، جمور و نانکلی، ۱۳۸۶) (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۴- بردارهای جابه‌جایی زمین لغزش کهرود در دو راستای افقی و قائم

#### ۲-۱۱-۱۱-۲- زمین لغزش دنبلید طالقان

یکی از زمین لغزش‌های شناسایی شده که در دو سال اخیر با نظارت و کنترل پروژه تثبیت فرسایش توده‌ای و زمین لغزش متعلق به سازمان مراتع، جنگل‌ها و آبخیزداری کشور مورد پایش قرار گرفته، در نزدیکی روستای دنبلید واقع شده است. این دامنه لغزشی بالای دریاچه سد طالقان در حال وقوع است. لازم به ذکر است که در پایین دست آن، جاده اصلی شهرک طالقان به محور سد قرار گرفته که در اثر حرکت آن در حال تخریب می‌باشد و این جاده تنها جاده دسترسی به ۲۵ روستای پایین طالقان است. بنابراین پایش و در نهایت پایدارسازی این دامنه از اهمیت بسزایی برخوردار است (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵- نمایی از زمین لغزش دنبلید طالقان



شکل ۲-۱۶- نمونه‌ای از تخریب به بار آمده توسط زمین لغزش دنبلید طالقان

همان‌طور که در (شکل ۲-۱۶) نشان داده شده، حرکت دامنه لغزشی موجب تخریب و بالا آمدگی جاده شهرک طالقان به محور سد گردیده است. این زمین لغزش موجب تخریب ۴۰۰ متر از جاده شده که هزینه بازسازی آن توسط سازمان مراتع، جنگل‌ها و آبخیزداری کشور حداقل ۶۰۰ میلیون تومان برآورد شده است. همچنین در صورتی که این دامنه به طور کامل وارد دریاچه طالقان شود، حدود ۲/۵ میلیون مترمکعب رسوب وارد آن می‌نماید که ۱۳۲/۵ میلیارد تومان هزینه ناشی از رسوب‌گذاری است. هزینه‌های برآورد شده هزینه‌های مستقیمی است که ممکن است این زمین لغزش به وجود آورد. در حالی که هزینه‌های غیر مستقیم بسیار بیش‌تر از این مقادیر می‌باشد [۳۹].

جدول ۲-۲- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش دنبلید طالقان

حداکثر جابه‌جایی ارتفاعی (mm)		حداکثر جابه‌جایی مسطحاتی (mm)		شبکه ماهواره‌ای
Point Name	$\Delta Z$ (mm)	Point Name	D(mm)	
SP5	-421.9	SP5	1750.9	نقاط اصلی (Ref. Table 4)
P7	-1120.4	P15	2233.8	نقاط نشانه روی منطقه زمین لغزشی (Ref. Table 6)

### ۲-۱۱-۱-۳- زمین لغزش دمدول خلخال استان اردبیل

یکی دیگر از زمین لغزش‌های شناسایی شده که در دو سال اخیر با نظارت و کنترل پروژه تثبیت فرسایش توده‌ای و زمین لغزش متعلق به سازمان مراتع، جنگل‌ها و آبخیزداری کشور مورد پایش قرار گرفته، در نزدیکی روستای دمدول خلخال واقع شده است (شکل ۲-۱۷). خلاصه نتایج این پروژه طی پنج مرحله مشاهدات در بازه زمانی دی ماه ۱۳۸۸ تا اسفندماه ۱۳۸۹ به شرح زیر می‌باشد:







شکل ۲-۱۷- نمایشی از زمین لغزش دمبول خلخال

جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش دنبلید طالقان

حداکثر جابه‌جایی ارتفاعی (cm)		حداکثر جابه‌جایی مسطحاتی (cm)		شبکه ماهواره‌ای
Point Name	$\Delta Z$ (CM)	Point Name	D(cm)	
SP5	-0.67	SP4	0.75	نقاط کنترلی (Ref. Table 4)
P6	-742.6	P6	2112.6	نقاط شاهد روی منطقه زمین لغزشی (Ref. Table 6)

## ۲-۱۱-۱-۴- زمین لغزش طارش و استخرسر

یکی دیگر از پروژه‌های انجام گرفته در ایران زمین لغزش طارش و استخرسر می‌باشد که در چهار مرحله مشاهداتی رفتارسنجی در بازه‌های زمانی آبان ۱۳۸۹ تا فروردین ۱۳۹۱ آن انجام گرفته است (شکل ۲-۲۰). نمونه‌هایی از خرابی‌های به بار آورده توسط این زمین لغزش را می‌توانید در (شکل ۲-۱۸) و (شکل ۲-۱۹) مشاهده نمایید.



شکل ۲-۱۸- نمایشی از زمین لغزش طارش و استخرسر

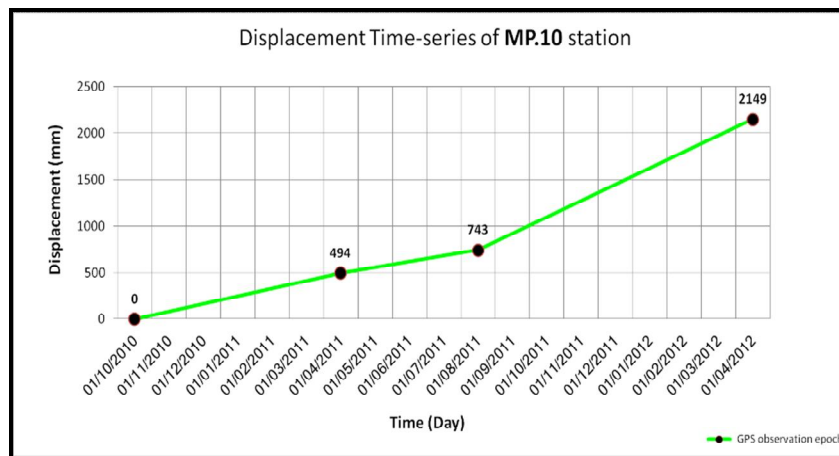




شکل ۲-۱۹- نمونه‌هایی از خرابی‌های به وجود آمده توسط زمین لغزش طارش و استخرسر

جدول ۲-۴- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش طارش و استخرسر

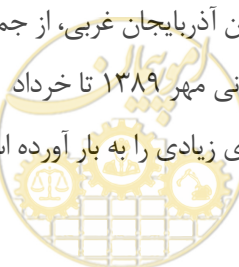
شبکه ژئودتیک	حداکثر جابه‌جایی مسطحاتی		حداکثر جابه‌جایی ارتفاعی	
	Point Name	D (mm)	Point Name	Δz (mm)
مینا (حد فاصل مرحله ۱ و ۲ مشاهداتی)	BM.1	24	BM.1	15
شاهد (حد فاصل مرحله ۱ و ۲ مشاهداتی)	MP.10	494	MP.10	- 213
مینا (حد فاصل مرحله ۲ و ۳ مشاهداتی)	BM.1	16	BM.1	22
شاهد (حد فاصل مرحله ۲ و ۳ مشاهداتی)	MP.10	249	MP.10	- 71
مینا (حد فاصل مرحله ۳ و ۴ مشاهداتی)	BM.3	30	BM.1	22
شاهد (حد فاصل مرحله ۳ و ۴ مشاهداتی)	MP.10	1406	MP.10	- 657
حد فاصل کل بازه ۱ ساله مشاهدات	MP.10	2149	MP.10	- 941



شکل ۲-۲۰- نمودار جابه‌جایی ایستگاه MP10 که بیش‌ترین میزان جابه‌جایی را در بین ایستگاه‌ها به خود اختصاص داده است.

### ۲-۱۱-۱-۵- زمین لغزش کلت علیا

زمین لغزش کلت علیا واقع در روستای گوگرد استان آذربایجان غربی، از جمله زمین لغزش‌های مورد بررسی در ایران است که در چهار مرحله مشاهداتی رفتارسنجی در بازه‌های زمانی مهر ۱۳۸۹ تا خرداد ۱۳۹۱ انجام گرفته است. همان‌طور که در تصاویر زیر دیده می‌شود، این زمین لغزش خسارات و خرابی‌های زیادی را به بار آورده است که نمونه‌هایی از آن‌ها را مشاهده نمایید.





جدول ۲-۵- خلاصه‌ای از نتایج جابه‌جایی به دست آمده در پروژه زمین لغزش کلت علیا

شبکه ژئودتیک	حداکثر جابه‌جایی مسطحاتی		حداکثر جابه‌جایی ارتفاعی	
	Point Name	D (mm)	Point Name	$\Delta z$ (mm)
مبنا (حد فاصل مرحله ۱ و ۲ مشاهداتی)	BM.1	21	-	-
شاهد (حد فاصل مرحله ۱ و ۲ مشاهداتی)	MP.2	994	MP.1	-267
مبنا (حد فاصل مرحله ۲ و ۳ مشاهداتی)	BM.1	10	BM.2	8
شاهد (حد فاصل مرحله ۲ و ۳ مشاهداتی)	MP.2	1261	MP.2	-256
مبنا (حد فاصل مرحله ۳ و ۴ مشاهداتی)	-	-	-	-
شاهد (حد فاصل مرحله ۳ و ۴ مشاهداتی)	MP.2	436	MP.2	-91
حد فاصل کل بازه ۱ سال و نیم مشاهدات	MP.2	2691	MP.2	-519

### ۲-۱۱-۲- طراحی نقاط مبنا در پروژه‌های رفتارسنجی به کمک GPS

به طور کلی در طراحی نقاط مبنا و مشاهداتی، ایستگاه‌ها به گونه‌ای طراحی گردند که هیچ‌گونه مانعی بر فراز گیرنده GPS وجود نداشته باشد. در واقع نباید مانعی بر سر راه سیگنال‌های ارسالی از طرف ماهواره به گیرنده وجود داشته باشد زیرا باعث به وجود آمدن خطای cycle slip خواهد شد. همچنین در مجاورت گیرنده نباید سازه یا هر گونه عارضه دیگری وجود داشته باشد که منجر به ایجاد پدیده چند مسیری گردد. لذا لازم است ایستگاه‌ها از ارتفاع نسبی مناسبی برخوردار باشند.

همچنین از آنجا که نقاط رفرنس بایستی در طول انجام پروژه ثابت و بدون حرکت باشند لذا ایستگاه‌های مبنا بایستی بر روی سطحی احداث شوند که سست و ناپایدار نبوده و از استحکام بالایی برخوردار باشند. لذا بایستی در طراحی آن‌ها این موارد را در نظر گرفت.

منظور از بنای ایستگاه GPS، سازه‌ای (مانند پیلار، ساختمان و ...) به همراه پاشنه اتصال آنتن GPS می‌باشد. مهم‌ترین مساله در ساخت یک بنا اطمینان از به حداقل رسیدن ناپایداری آن می‌باشد. در صورتی که بتوان یک بنا را به صورت متصل به سنگ بستر ایجاد نمود، ناپایداری بنا به حداقل خواهد رسید. برخی از الزامات مورد نیاز برای یک بنای ایستگاه عبارتند از:

- امکان دستیابی به سنگ بستر با کیفیت در عمق کم از سطح زمین،
- میدان دید وسیع و افق باز،
- محافظت در برابر تخریب،
- دوری از سطوح منعکس کننده (نرده‌ها، سطوح فلزی و غیره)،
- نزدیک به گیرنده،
- سهولت دسترسی به ایستگاه،
- دسترسی آسان به داده‌ها،
- منبع انرژی الکتریکی،



- عدم وجود پوسته ناپایدار،

- پوشش گیاهی.

البته مکانی با تمام ویژگی‌های فوق را به راحتی نمی‌توان پیدا کرد و یا از لحاظ اقتصادی یا اجرایی قابل دستیابی نمی‌باشد. اما بایستی مکانی را انتخاب نمود که بیش‌ترین ویژگی از موارد فوق را دارا باشد.

## ۲-۱۲- معیارهای انتخاب ایستگاه در پروژه‌های رفتارسنجی به کمک GPS

نوع بنا به طور عادی به ویژگی‌های منطقه و همچنین به میزان پایداری و دوام ایستگاه مورد نیاز بستگی دارد. توصیه می‌شود بنا هم‌تراز با سطح زمین ساخته نشود. صرف نظر از رسانایی زمین در سیگنال‌های دریافتی، رشد گیاهان و تردد درختان در حال رشد باعث عدم دریافت سیگنال‌های ماهواره می‌شوند؛ همچنین ممکن است لانه‌سازی حشرات و حیوانات باعث آب گرفتگی و نشست ایستگاه شود.

برای پیدا کردن یک محل مناسب، بایستی مکان مناسب جهت ایجاد بنا را انتخاب نمود که این مهم با در نظر گرفتن موارد زیر قابل تحقق است [۱۰].

### ۲-۱۲-۱- ماسک افق (Horizon Mask)

برای اینکه امکان دریافت سیگنال از ماهواره‌های بیش‌تری در گیرنده زمینی وجود داشته باشد، لازم است ایستگاه در محلی انتخاب شود که محدودیتی از لحاظ دریافت سیگنال به وجود نیاید. وقتی دید را از محل آنتن در نظر بگیریم موانع موجود در اطراف ایستگاه باعث ایجاد مانع در رسیدن سیگنال ماهواره به آنتن می‌باشند. به صورت ایده‌آل هیچ مانعی نباید بالای افق وجود داشته باشد؛ اما در عمل رسیدن به این هدف ممکن نیست لذا بایستی بهترین مکان را انتخاب نمود.

اجسام جامد مثل کوه‌ها و ساختمان‌ها و نیز درختان و سازه‌ها می‌توانند باعث مسدود شدن سیگنال ماهواره شوند. در این حالت سیگنال تا زمانی که ماهواره پشت جسم مسدود کننده است قطع می‌شود. برای مثال در دره‌های عمیق یا در شهرهایی با ساختمان‌های بلند، اطلاعات قابل توجهی می‌تواند به علت عدم دید کافی از بین برود. در مورد پوشش گیاهی و اجسامی که کاملاً جامد نیستند، از دست دادن سیگنال‌های ماهواره می‌تواند به صورت تناوبی و وابسته به شفافیت جسم مسدود کننده باشد. انسداد ممکن است در زمان‌های مختلف، متفاوت با هم باشد. درختان پاییزی که برگ‌هایشان ریخته است، انسداد کم‌تری در مقایسه با درختانی که کاملاً برگ دارند، ایجاد می‌کند. برخی از آنتن گیرنده‌ها طوری طراحی شده‌اند که زیر پوشش درختان نیز دریافت داشته باشند در حالی که برخی دیگر اینگونه نیستند. بدیهی است که درختان رشد می‌کنند و بدین گونه به مرور زمان باعث مسدود شدن افق می‌شوند. مثال دیگر اینکه رشد شهری یا توسعه در مناطقی که ایستگاه‌های مرجع نصب شده‌اند به مرور زمان می‌تواند باعث مسدود شدن افق گردند.



توجه به این نکته مهم است که باید محلی را انتخاب نمود که از لحاظ انسداد حداقل باشد و اطمینان حاصل شود که به مرور زمان تغییر چشمگیری در افق روی ندهد. ممکن است لازم شود که میزان رشد را از زمین‌های مجاور پیش‌بینی کرد.

## ۲-۱۲-۲- خطای چند مسیری

چند مسیری شدن سیگنال می‌تواند باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌های GPS گردد. شدت این خطا وابسته به وسعت و نوع چند مسیری بودن سیگنال است. همان‌طور که می‌دانیم، خطای چند مسیری سیگنال مربوط به سیگنال‌هایی است که از مسیرهای مختلف به آنتن می‌رسد؛ به طوری که این سیگنال‌ها ناشی از سطوح منعکس کننده در مجاورت ایستگاه مرجع می‌باشد. چند مسیری باعث تداخل یا اعوجاج می‌شود، در نتیجه یک نوع خطا است و عمدتاً در شبه کد و یا فاز موج حامل تاثیر می‌گذارد.

انواع سطوح بازتابنده می‌تواند باعث چند مسیری شدن سیگنال دریافتی شود. بارزترین سطوح با بازتابندگی بالا، ساختمان‌ها، پانل‌های خورشیدی، خودروها و غیره هستند. همچنین تجمع برف یا یخ در مجاورت ساختمان‌ها یا زمین اطراف به طور موثر می‌تواند خواص انعکاس سیگنال رادیویی را به عنوان یک تابع از زمان تغییر دهد. سازه‌های فلزی مانند دکل‌های رادیویی بزرگ و نرده‌های نیز باعث پراکندگی سیگنال‌های ماهواره می‌شوند.

مکان نصب آنتن و نظارت بر هر تغییری در اطراف منطقه بسیار مهم می‌باشد. قبل از احداث ایستگاه، جمع‌آوری اطلاعات بایستی با همان نوع دستگاه‌هایی انجام شود که قرار است در آینده نصب گردند و همچنین تا حد امکان به مکانی که برای آنتن در نظر گرفته شده است نزدیک باشد. تجزیه و تحلیل اطلاعات بیش‌تر، به طور مثال ۷۲ ساعت، می‌تواند نشانه خوبی از خطای چند مسیری از محیط سایت را فراهم کند. همچنین ممکن است لازم باشد که چندین بار آنتن را در ارتفاع‌های مختلف تست کرد تا بهترین ارتفاع برای آنتن ایستگاه مرجع انتخاب گردد. علاوه بر این ممکن است هموارسازی زمین و یا استفاده از مواد جذب رادیویی لازم باشد. همچنین باید توجه داشت که امواج بازتابی از سطوح زیر آنتن، مانند زمین و بالای پایه بتنی نیز می‌تواند باعث بروز مشکلاتی گردد.

این خطا زمانی رخ می‌دهد که منعکس کننده‌هایی مانند اشیای فلزی یا سایر سطوح انعکاس کننده نزدیک گیرنده‌ها باشند. به منظور مینیمم کردن این مشکل و خطا، تا فاصله حدوداً ۵۰ متر از نقاط (گیرنده) بایستی عاری از ساختارهای مصنوعی مانند نرده‌ها و دیوارهای فلزی یا منابع منعکس کننده طبیعی باشد هر زمان که نزدیکی مجاورت با سطوح منعکس کننده غیرقابل اجتناب باشد، مانند مناطق شهری، یک دوره tracking تمدید شده گاهی اوقات می‌تواند اثر multipath را از طریق میانگین‌گیری کاهش دهد و باید در نظر گرفته شود [۱۰].



## ۲-۱۲-۳- فرکانس رادیویی محیطی

فرکانس رادیویی (RF) سیگنال دریافت شده توسط گیرنده ماهواره می‌تواند تحت تاثیر تداخل دیگر منابع رادیویی قرار گیرند. این تداخل به سادگی می‌تواند به عنوان نویز اضافی در داده‌ها نشان داده شود همچنین باعث از دست رفتن متناوب یا قسمتی از داده‌ها می‌گردد.

نزدیکی به تاسیسات ارسال سیگنال‌های رادیویی و تلویزیون، رادار، خطوط فشار قوی و غیره می‌تواند باعث اختلال در امواج دریافتی آنتن گیرنده شوند. همچنین باید توجه داشت که در نزدیکی زمین، امواج کاذب فرستنده‌ها می‌تواند باعث اختلال یا ایجاد پارازیت در سیگنال ماهواره در یک ایستگاه گیرنده مرجع زمینی گردد.

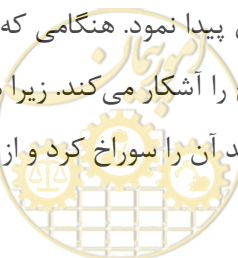
بنابراین لازم است اطلاعات زیادی قبل از ایجاد سایت در مورد فرستنده‌ها (موجود، و برنامه‌ریزی شده) و استفاده از تجهیزات رادیویی قابل حمل در منطقه جمع‌آوری نمود. علاوه بر جمع‌آوری و تحلیل مجموعه داده‌ها (۷۲ ساعت اگر امکان‌پذیر باشد) یک تحلیل‌گر طیف برای شناسایی هرگونه RFI در باند اختصاص داده شده به سیگنال‌های ماهواره بایستی مورد استفاده قرار داد.

## ۲-۱۲-۴- شناسایی محل ایجاد ایستگاه

نکته حائز اهمیت در شناسایی محل احداث نقاط آن است که در این مرحله از دانش و اطلاعات یک زمین‌شناس متبحر نیز بهره‌گرفت تا منطقه‌ای را انتخاب نمود که از نظر زمین‌شناسی ثابت و پایدار باشد و حتی‌المقدور خارج از محدوده دارای تغییر شکل و جابه‌جایی باشد. هنگامی که محلی برای نصب انتخاب شد و اطلاعات موجود در مورد زمین‌شناسی و ژئوتکنیک را مطالعه گردید، شناسایی در منطقه نیز باید صورت بگیرد تا اطلاعات محل پیشنهاد شده از قبیل: جستجو برای یافتن سنگ بستر، توجه به شکستگی و زاویه لایه سنگ، فاصله مفاصل سنگی و شرایط آن گردآوری گردد. به خاطر داشته باشیم که هدف یافتن یک محل مناسب با پایداری بالا می‌باشد. عواملی که ممکن است روی پایداری بنا بر روی سنگ اثر بگذارند عبارتند از:

- ۱- وجود گسل،
- ۲- اتصالات، شکستگی، مناطق برشی،
- ۳- سطح متغیر آب‌های سطحی،
- ۴- عدم ثبات شیب سنگ،
- ۵- سنگی با مشکلاتی مثل انحلال و انقباض ناشی از تورم روبرو باشد،
- ۶- فعالیت مهندسی، گاز، لوله‌های آب و فاضلاب، زهکشی، کانال
- ۷- نوع و شرایط سنگ.

گاهی اوقات می‌توان سنگ بستر را که در زیر خاک پنهان شده است را با استفاده از تکنیک‌های ژئوفیزیک مثل تست‌های مقاومت و اندازه‌گیری‌های گراویمتری پیدا نمود. هنگامی که یک نقطه مناسب پیدا شد، حفاری تنها ابزاری خواهد بود که به طور مستقیم شرایط زیر سطح را آشکار می‌کند. زیرا ممکن است که بنا بر روی سنگ معلق برپا شود. بعد از پیدا کردن یک سنگ بستر کامل، اول باید آن را سوراخ کرد و از سنگ هوا زده و شکسته شده بخش بالایی پاک



نمود تا به سنگ بستر سالم رسید. بنا با فوم از خاک جدا شده و با یک سازه فولادی و بتنی به سنگ بستر متصل می‌شود. البته تعداد حفاری‌ها زمانی که توده سنگ‌ها از کیفیت عالی برخوردار هستند کاهش می‌یابد. پس بیش‌تر زمان صرف مکان‌یابی جایی می‌شود که سنگ بستر نزدیک به سطح زمین باشد. تمام بناها را نمی‌توان به سنگ بستر متصل نمود، ممکن است مجبور باشیم آن را روی ماسه، روی یک ساختمان، داخل خاک و یا خاک رس متورم شونده نصب کنیم. خاک رس متورم شونده، یک فنداسیون پایدار نیست و باید یک مراقبت ویژه هنگام طراحی بنا در نظر گرفت. تعداد بسیار زیادی از بناهای ایستگاه‌های GPS وجود دارد که به سنگ بستر متصل نیستند و نتایج خوبی ارائه می‌دهند. با این حال باید مطمئن شد که انبساط حرارتی، نشست بلند مدت یا کوتاه مدت ساختمان فنداسیون، تغییرات شیب، فرونشست محلی به علت استخراج آب‌های زیر زمینی و... در اندازه‌گیری‌ها دخیل نبوده است.

## ۲-۱۳- انواع ساختمان ایستگاه‌های GPS

با توجه به کاربرد و زمین‌شناسی منطقه، روش‌های مختلفی برای ایجاد ساختمان نقاط توسط انجمن‌های بین‌المللی پیشنهاد شده است که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد. در این بخش به چندین روش مرسوم برای ایجاد این ایستگاه‌ها اشاره می‌شود.

### ۲-۱۳-۱- بنای مهارشده با حفاری عمیق (Braced Monument Deep Drilled)

این بنا از استحکام و ماندگاری بسیار بالایی برخوردار بوده و قابلیت نصب بر روی بستر سخت و سست را دارا می‌باشد. این بنا به شکل سه پایه می‌باشد به طوری که هر پایه حدود ۱۳ متر در زمین فرو رفته است و در بالای سطح زمین توسط بست به یکدیگر متصل شده‌اند. در صورت وجود بستر سنگی می‌توان عمق پایه‌ها را کاهش داد و از بنای معرفی شده در (بخش ۲-۱۳-۲) استفاده نمود. (شکل ۲-۲۱) نمونه از این نوع بنا را نشان می‌دهد [۱۲].



شکل ۲-۲۱- نمونه‌ای از بنای DDBM





مزایا:

- ثبات بسیار بالا،
- ماندگاری بالا،
- قابل نصب بر روی هر نوع بستر.

معایب:

- گران قیمت،
- زمان بر،
- امکان نصب آن در برخی مکان‌های دور از دسترس وجود ندارد.

برای ساخت این بنا به پیمانکار حفاری نیاز می‌باشد. هزینه با توجه به تجهیزات حفاری مورد استفاده و مسافت ایستگاه، نوع بستر و ... تغییر می‌کند. جهت کسب اطلاعات بیشتر می‌توانید به مراجعه نمایید.

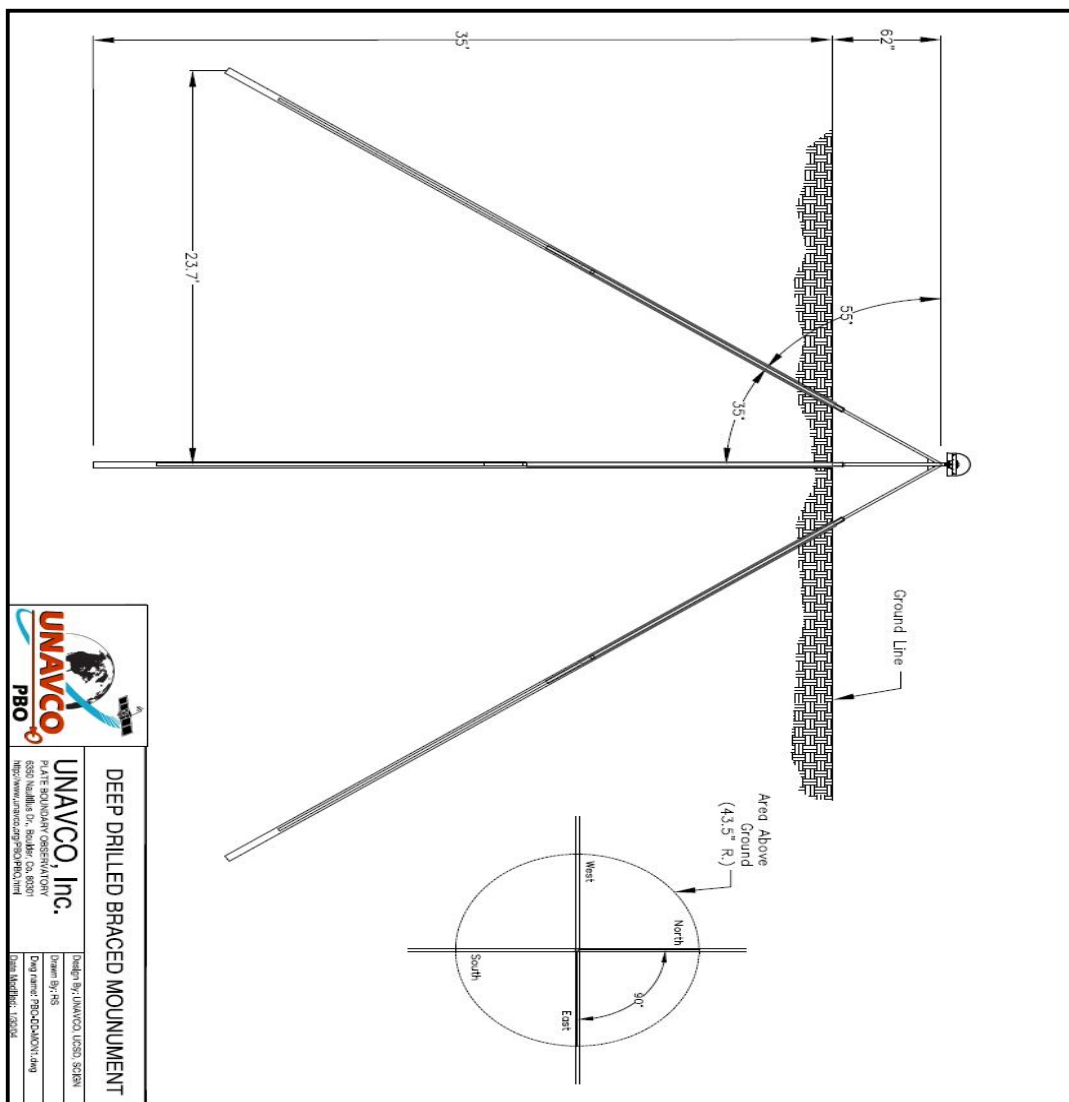
### ۲-۱۳-۲- بنای مهارشده با حفاری کم عمق (Shallow Drilled Braced Monument)

این بنا شامل سه میله استیل به قطر ۲۵ میلی‌متر که به شکل سه پایه به یکدیگر متصل شده‌اند می‌باشد. به طوری که هر پایه به اندازه ۱/۵ الی ۲ متر در بستر فرو رفته است. این نوع بنا در مکان‌هایی قابل استفاده است که از بستر مناسبی برخوردار باشد در صورت وجود شکاف عمیق در بستر و یا هوازدگی زیاد این نوع بنا را نمی‌توان برپا نمود. (شکل ۲-۲۲) نمونه‌ای از این بنا را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۲- نمونه‌ای از بنای ساخته شده از نوع SDBM





شکل ۲-۲۳- مقطع ایستگاه با ساختمان DDBM



مزایا:

- بسیار پایدار،
- مصالح و ابزار مورد نیاز ارزان قیمت می‌باشند،
- بسیار سریع ساخته می‌شوند،
- ماندگاری بالا.

معایب:

- جهت ساخت بنا به بستر سنگی با کیفیت بالا نیاز است،
- به دلیل عمق کم حفاری نسبت به بناها با عمق بیش‌تر از پایداری پایین‌تری برخوردار است،
- هزینه اولیه جهت خرید ابزار لازم بالا می‌باشد،
- دریل چکشی برای ایجاد حفره‌های بنا مورد نیاز می‌باشد (شکل ۲-۲۴).



شکل ۲-۲۴- ابزار و وسایل جانبی متصل به بنایی از نوع SDBM

### ۲-۱۳-۳- بنای مهارشده بدون حفاری کم عمق (Shallow Braced non-drilled Monument)

این بنا مشابه SDBM می‌باشد با این تفاوت که این نوع بنا بر روی بستر سست نیز قابل اجرا می‌باشد. (شکل ۲-۲۵) نمونه‌ای از این نوع بنا را نشان می‌دهد. از این نوع بنا در مکان‌هایی استفاده می‌شود که هیچ بستری وجود نداشته باشد [۱۲].





شکل ۲-۲۵- نمونه از بنای ساخته شده از نوع SBNDM



شکل ۲-۲۶- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت از نوع SBNDM

مزایا:

- قابل نصب بر روی بسترهای سست (شکل ۲-۲۶)،
- مصالح مورد نیاز تقریباً ارزان می‌باشند،
- بسیار سریع ساخته می‌شوند.

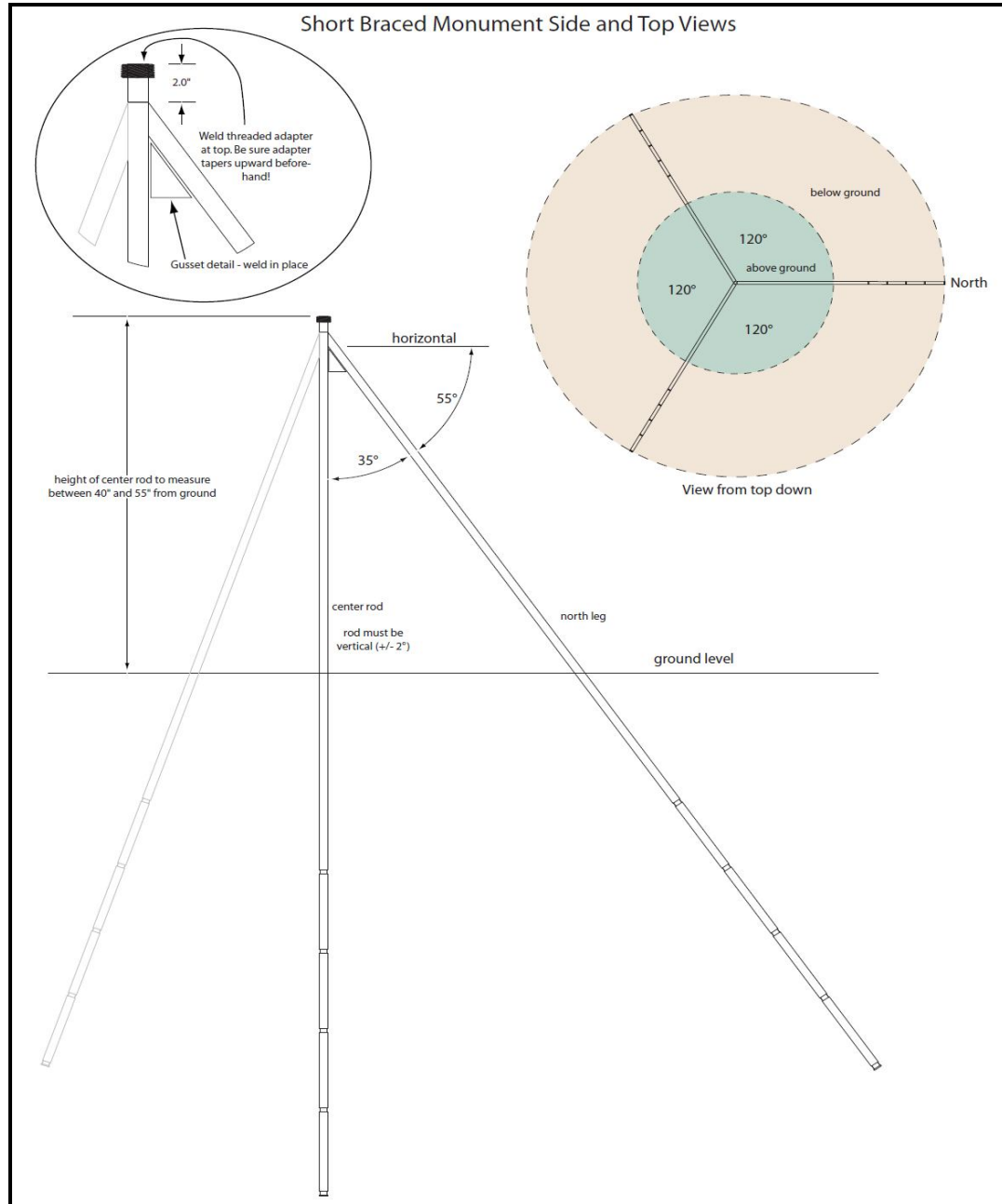
معایب:

- به دلیل عمق کم حفاری نسبت به بناها با عمق بیش‌تر از پایداری پایین‌تری برخوردار است،
- هزینه اولیه جهت خرید ابزار لازم بالا می‌باشد.



طراحی و ساخت:

(شکل ۲-۲۷) نمایی از بالا و روبروی این نوع بنا را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۷- نمای روبروی بنای ایستگاه

## ۲-۱۳-۴- پایه با پی سطحی (Shallow Foundation Mast)

این بنا شامل ۳ میله فولادی به قطر ۳۲ میلی‌متر می‌باشد که به بستر سنگی و یا سیمانی متصل شده است. ارتفاع

این بنا با توجه به شرایط سایت متفاوت می‌باشد. (شکل ۲-۲۸) نمونه‌ای از این نوع بنا را نشان می‌دهد.





شکل ۲-۲۸- نمونه‌ای از بنای ساخته شده به صورت پایه با پی سطحی

مزایا:

- ارزان،
- مصالح مورد نیاز قابل دسترس.

معایب:

- فقط بر روی بستر سنگی قابل اجرا می‌باشد،
- به دریل چکشی با قدرت بالا نیاز است.

طراحی و ساخت:

تنها ابزار مورد نیاز دریل چکشی می‌باشد. (شکل ۲-۲۹) نمونه‌ای از بنای در حال ساخت را نشان می‌دهد.





شکل ۲-۲۹- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت به صورت پایه با پی سطحی

نوع دیگر از این نوع بناها، بناهایی به صورت پایه‌های متصل به پین‌های فولادی می‌باشند. این نوع پایه‌های فولادی دارای طراحی‌های متفاوتی می‌باشد. ولی در حالت کلی آن‌ها شامل یک پین حدیده شده می‌باشند که در داخل بستر سنگی و یا سیمانی قرار گرفته‌اند؛ سپس پایه آنتن بر روی پین پیچ می‌گردد. هر پین دارای طول ۲۵ سانتی‌متر و پایه دارای ارتفاع ۵/۰ متر و قطر ۳ سانتی‌متر می‌باشد. (شکل ۲-۳۰) نمونه‌ای از این نوع بنا را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۰- نمونه‌ای از بنای ساخته شده از نوع پایه پیچ شده

مزایا:

- ارزان قیمت،
- می‌توان بنا را با استفاده از یک دریل ایجاد نمود،
- زمان ساخت بنا کم می‌باشد،
- بر روی سقف ساختمان و یا سازه‌های بتنی یا سنگی قابل نصب می‌باشد.

معایب:

- تنها بر روی بسترهای سخت قابل اجرا می‌باشد.

طراحی و ساخت:

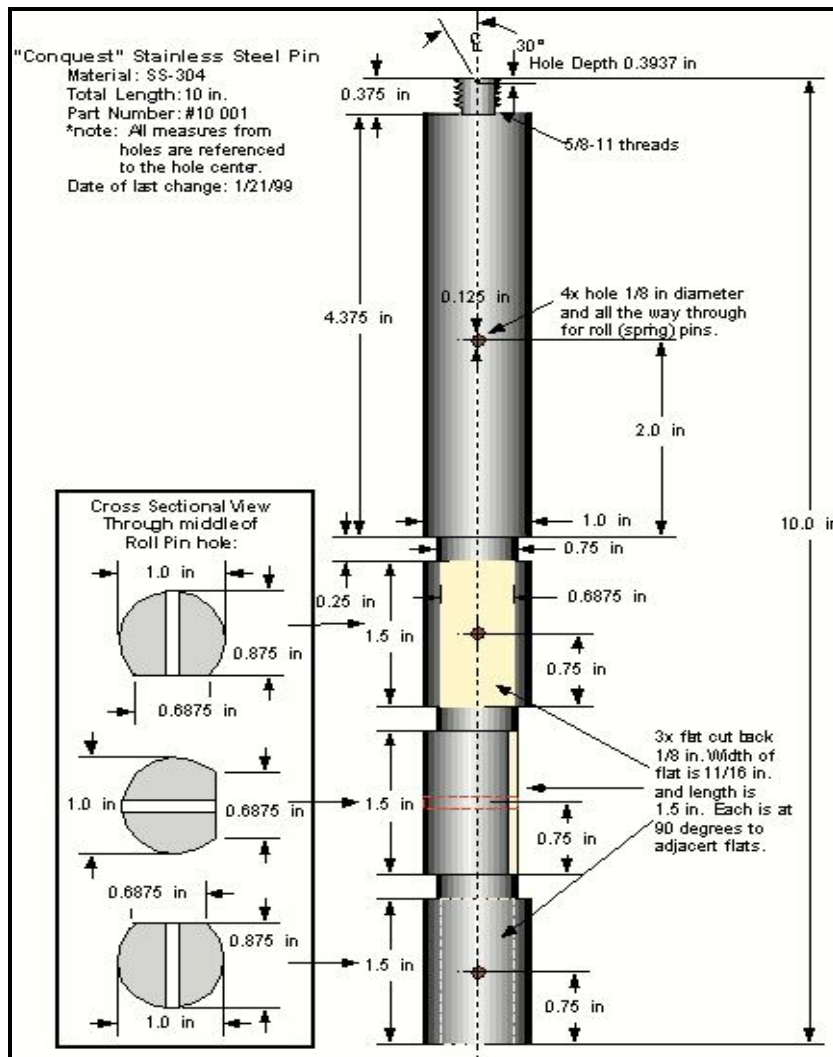
جهت ساخت بنا تنها به یک دریل نیاز می‌باشد. (شکل ۲-۳۱) نمونه‌ای از بنای در حال ساخت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۱- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت از نوع پایه پیچ شده







شکل ۲-۳۲- جزئیات ساخت پایه

## ۲-۱۳-۵- پیلار بتنی

این نوع پیلارها دارای تنوع بسیار در طرح می‌باشند اما هسته اصلی آن‌ها از بتن مسلح تشکیل شده است. GPS و آنتن بر روی پین فولادی مستقر بر روی پیلار پیچ می‌شوند. فونداسیون پیلار می‌تواند به سنگ بستر متصل شده و یا به مجموعه بتن‌ریزی شده در قشر زیرین متصل شود.

طرح نهایی پیلار وابسته به مصالح موجود، موقعیت، شرایط و نیازهای پروژه تغییر می‌نماید (شکل ۲-۳۳) نمونه‌ای از این پیلار را نشان می‌دهد [۱۲].





شکل ۲-۳۳- نمونه از ایستگاه GPS با ساختمان پیلار

مزایا:

- بسیار ارزان قیمت،
- مصالح و وسایل مورد نیاز به راحتی قابل دسترس می‌باشد،
- ساخت آسان،
- قابلیت اجرا بر روی انواع بستر.

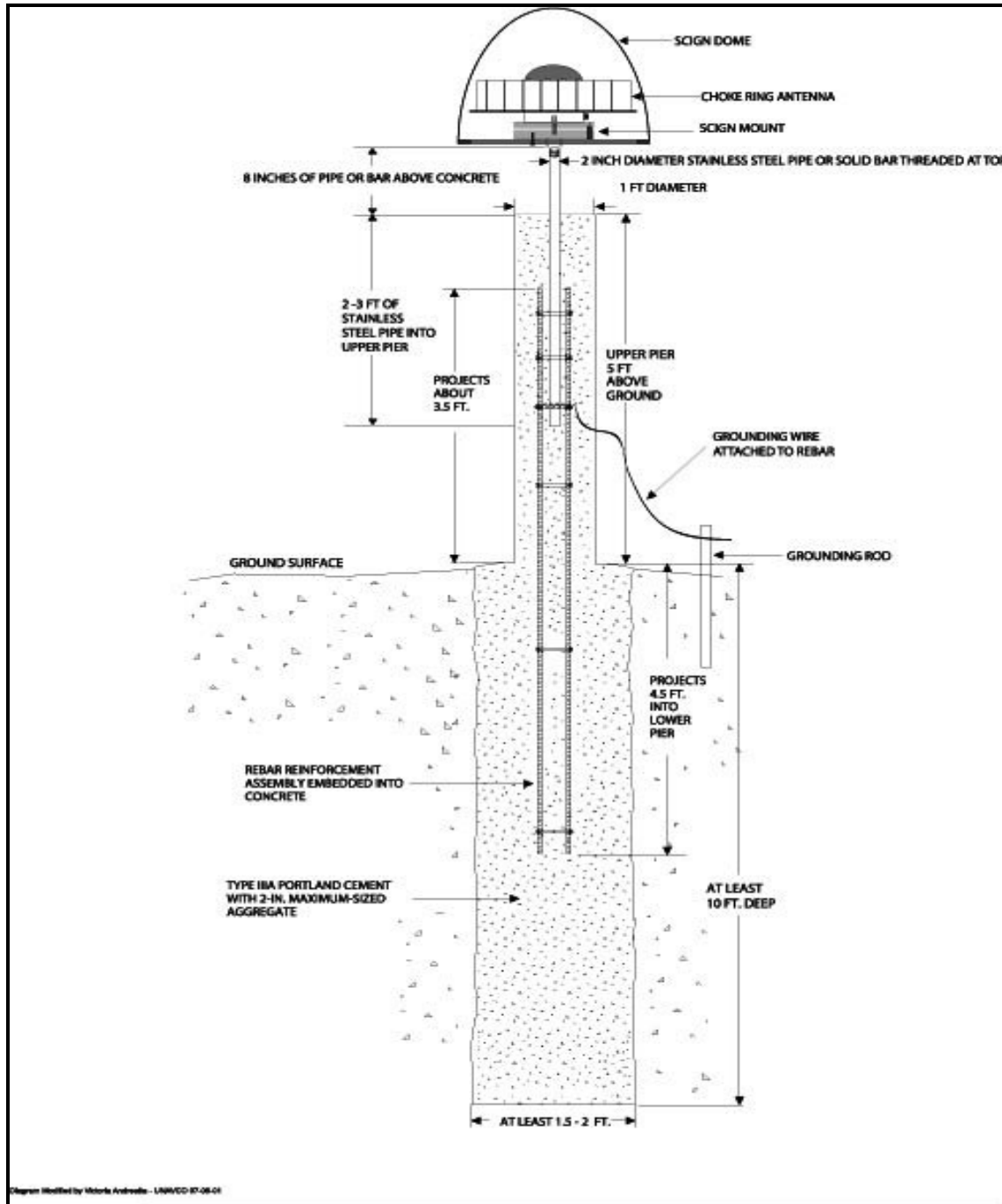
معایب:

- بتن به مرور زمان در اثر عوامل آب و هوایی تخریب می‌گردد،
- امکان نشست بنا در بسترهای سست وجود دارد،
- از پایداری پایینی در دراز مدت برخوردار می‌باشد.

طراحی و ساخت:

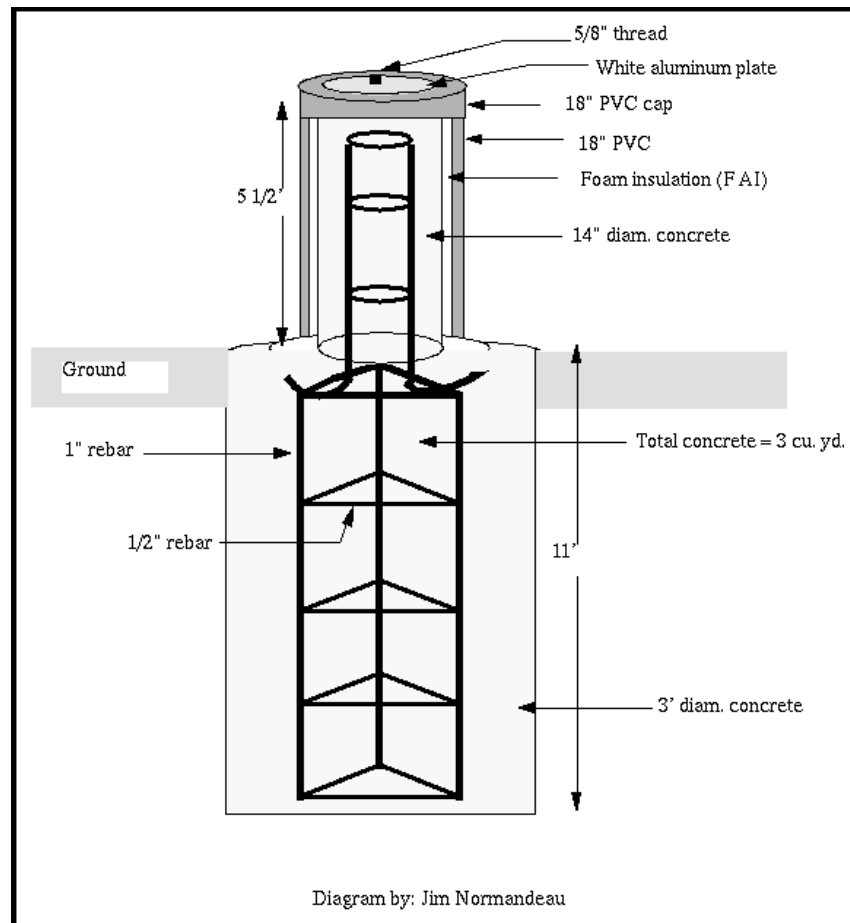
(شکل ۲-۳۴) و (شکل ۲-۳۵) اجزا سازنده این نوع بنا را نشان می‌دهند [۱۲].





شکل ۲-۳۴- اجزا سازنده یک پیلار بتنی [۱۲]





شکل ۲-۳۵- اجزا سازنده یک پیلار بتنی [۱۲]

### ۲-۱۳-۶- پایه فولادی

این بنا ساده‌ترین نوع ساختمان جهت ایستگاه‌های GPS می‌باشد. این بنا شامل یک میله فولادی تمام حدید شده به طول ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. این تیر مستقیماً به طور قائم در بستر سخت قرار می‌گیرد. پاشنه فولادی به همراه رابط برنجی معمولاً به عنوان پایه آنتن در این بنا استفاده می‌شود. این پاشنه مانع از تراز شدن دقیق می‌گردد اما امکان چرخش و توجیه آنتن به سمت شمال را فراهم می‌آورد (شکل ۲-۳۶).





شکل ۲-۳۶- نمونه‌ای از بنای ایستگاه GPS از پایه فولادی

مزایا:

- ارزان قیمت،
- امکان نصب آن به وسیله دریل وجود دارد،
- کوتاه بودن زمان نصب،
- مصالح مورد نیاز در دسترس می‌باشد،
- امکان نصب آن بر بالای بنا و یا سنگ و یا سازه‌های بتنی وجود دارد،

معایب:

- تنها بر روی مصالح سخت قابل نصب می‌باشد.

طراحی و ساخت:

تنها وسیله مورد نیاز برای برپا نمودن بنا دریل به همراه منبع تغذیه می‌باشد. (شکل ۲-۳۶) نمونه‌ای از ایستگاه در

حال ساخت را نشان می‌دهد [۱۲].





شکل ۲-۳۷- نمونه‌ای از بنای در حال ساخت از نوع پایه فولادی

### ۲-۱۳-۷- پایه آلومینیومی

این بنا شامل یک تیر آلومینیومی سبک وزن به همراه پایه آنتن سفارشی می‌باشد. این تیر به همراه چهار پیچ واشو که در بتن و یا بستر سنگی قرار گرفته متصل می‌گردد. ارتفاع دکل بسته به تراکم و ارتفاع ساختمان‌های اطراف بین ۵/۰ الی ۲ متر می‌باشد. (شکل ۲-۳۸) نمونه‌ای از این نوع بنا را نشان می‌دهد [۱۲].



شکل ۲-۳۸- نمونه‌ای از پایه آلومینیومی

مزایا:

- مصالح قابل حمل و سبک می‌باشد.
- جهت نصب تنها به دریل به همراه منبع تغذیه می‌باشد.



- کوتاه بودن زمان نصب
  - امکان نصب آن بر روی سقف ساختمان‌ها و یا سازه‌های بتنی و یا بستر سنگی وجود دارد.
- معایب:
- تنها بر روی بستر سخت امکان نصب وجود دارد.
- (شکل ۲-۳۹) و (شکل ۲-۴۰) نحوه قرارگیری و ساخت بلت‌ها را نشان می‌دهند [۱۲].



شکل ۲-۳۹- پایه متصل به بستر سنگی توسط پیچ و مهره‌های فولادی



شکل ۲-۴۰- شابلن جهت دریل کاری موقعیت صحیح



علاوه بر تحقیق مذکور انجمن و موسسات مختلفی پیشنهاد‌های دیگری نیز ارائه داده اند که در ذیل به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

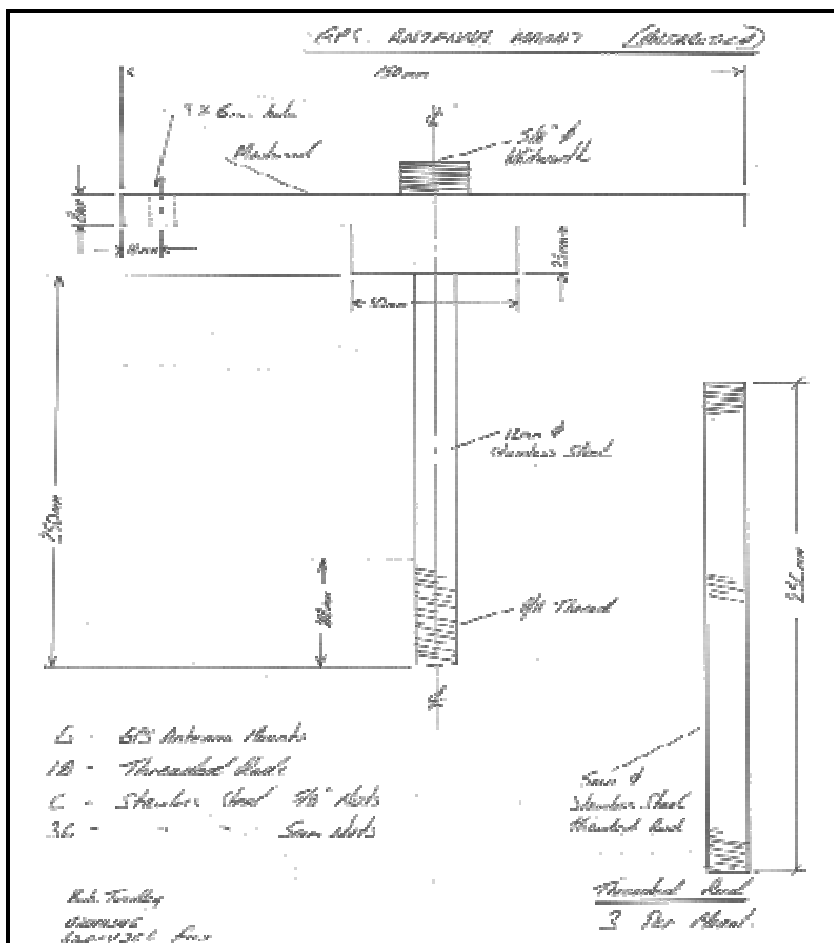
### ۲-۱۳-۸- بنای پیشنهادی<sup>۱</sup> NMD در کشور استرالیا

پاشنه آنتن GPS از یک صفحه فولادی به ضخامت ۸ میلی‌متر و قطر ۵۰ میلی‌متر تشکیل شده است به طوری که در مرکز آن میله حدید شده‌ای به ضخامت ۱۵.۸۷۵ میلی‌متر جهت استقرار آنتن و در اطراف آن به فاصله زاویه‌ای ۱۲۰ درجه سه سوراخ حدید شده به قطر ۳/۶ میلی‌متر جهت اتصال صفحه به زمین ایجاد شده است. این صفحه توسط چهار میله فولادی مطابق (شکل ۲-۴۱) توسط حفره‌های ایجاد شده به بستر متصل می‌گردد. ارتفاع این میله‌ها متغیر و بسته به خصوصیات سایت خواهد داشت. خصوصیات میله مرکزی و سه میله طرفین صفحه در (شکل ۲-۴۲) بیان شده است [۴۲].



شکل ۲-۴۱- نمونه‌ای از بنای مورد استفاده

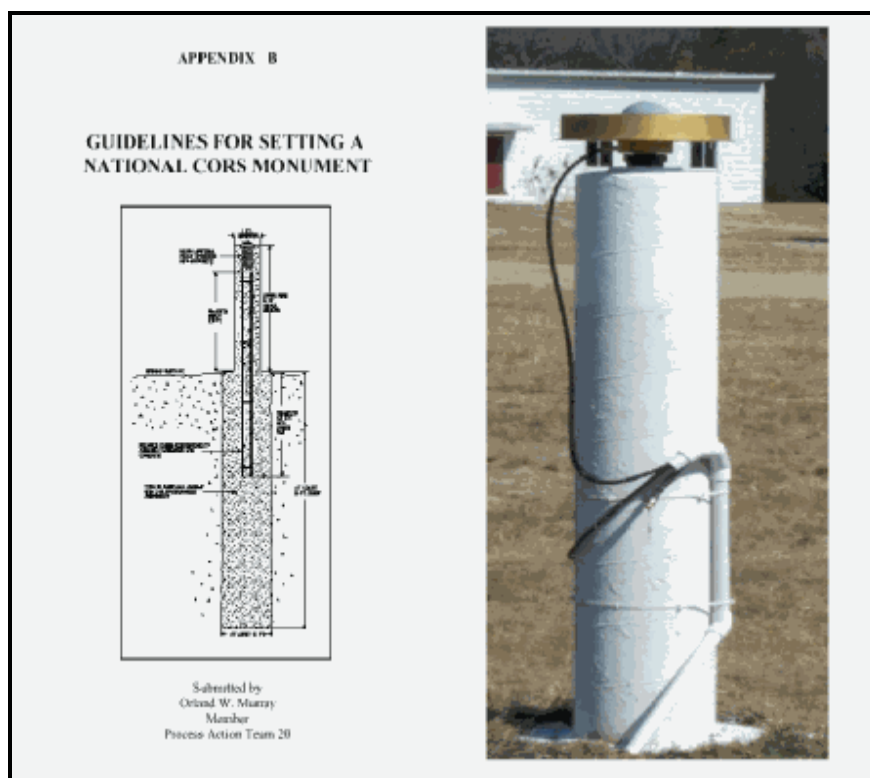




شکل ۲-۴۲- اجزا تشکیل دهنده بنا (میله فولادی مرکزی و میله فولادی به کار رفته در طرفین صفحه)

## ۲-۱۳-۹- بنای پیشنهاد شده توسط NGS<sup>۱</sup>

این بنا همان طوری که در (شکل ۲-۴۳) نشان داده شده است، از یک ستون استوانه‌ای بتنی تشکیل شده است به طوری که قسمت داخل بستر دارای قطر ۰/۴۶ متر و ارتفاع ۳ متر و قسمت بیرونی آن دارای قطر ۰/۳ متر و ارتفاع ۱/۵ متر می‌باشد. از خصوصیات بارز این بنا ماندگاری و قابلیت استفاده در هر شرایط محیطی می‌باشد [۴۲].

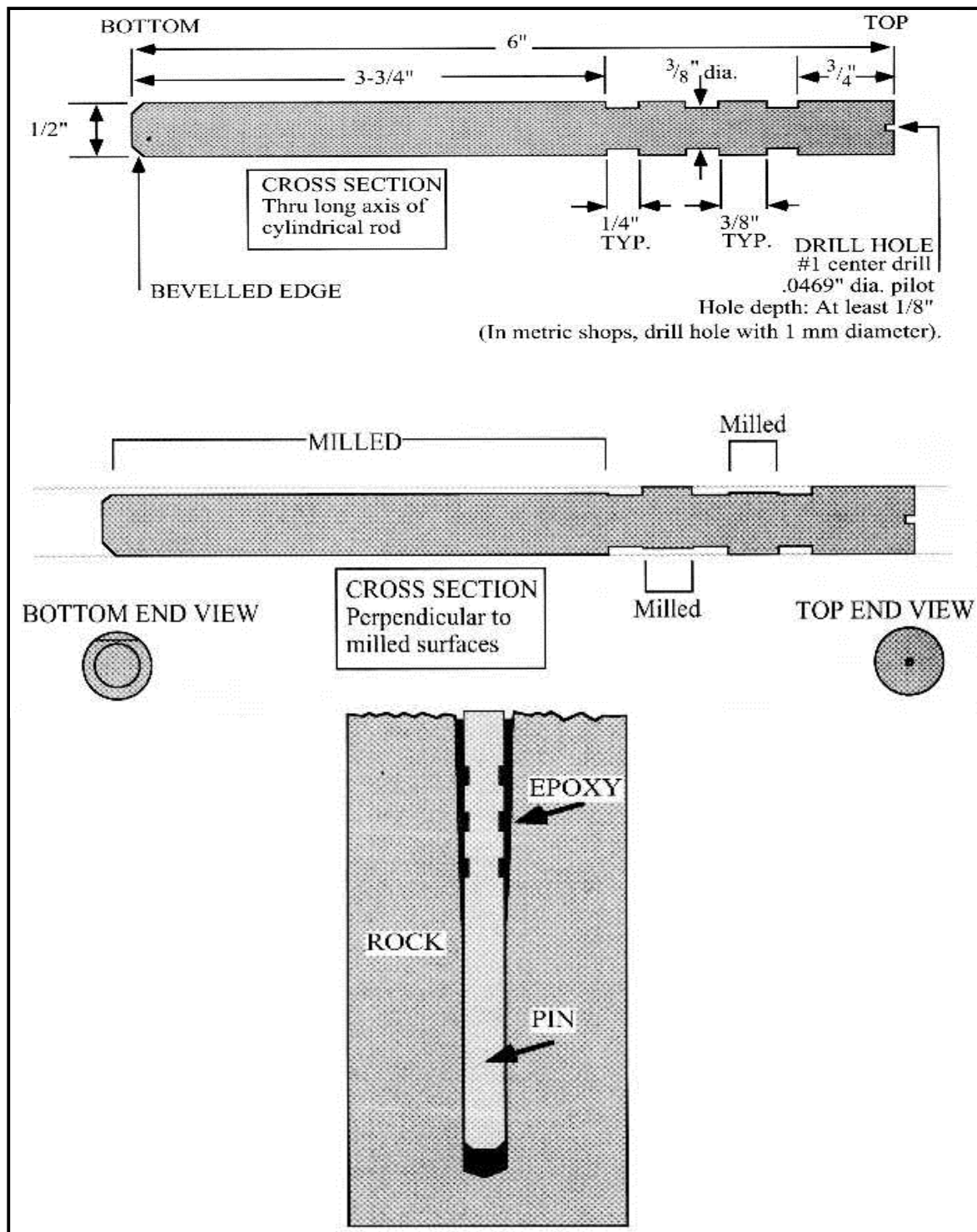


شکل ۲-۴۳- نمونه‌ای از بنای مورد استفاده توسط NGS

### ۲-۱۳-۱۰- بنای پیشنهادی HIGP<sup>۱</sup>

در این بنا از یک میله فولادی با مقاومت بسیار بالا که مطابق شکل تراشکاری شده است استفاده می‌گردد. این میله به صورت قائم در محل مناسب از لحاظ جنس بستر توسط اپکسی در حفره ایجاد شده قرار می‌گیرد (شکل ۲-۴۴).

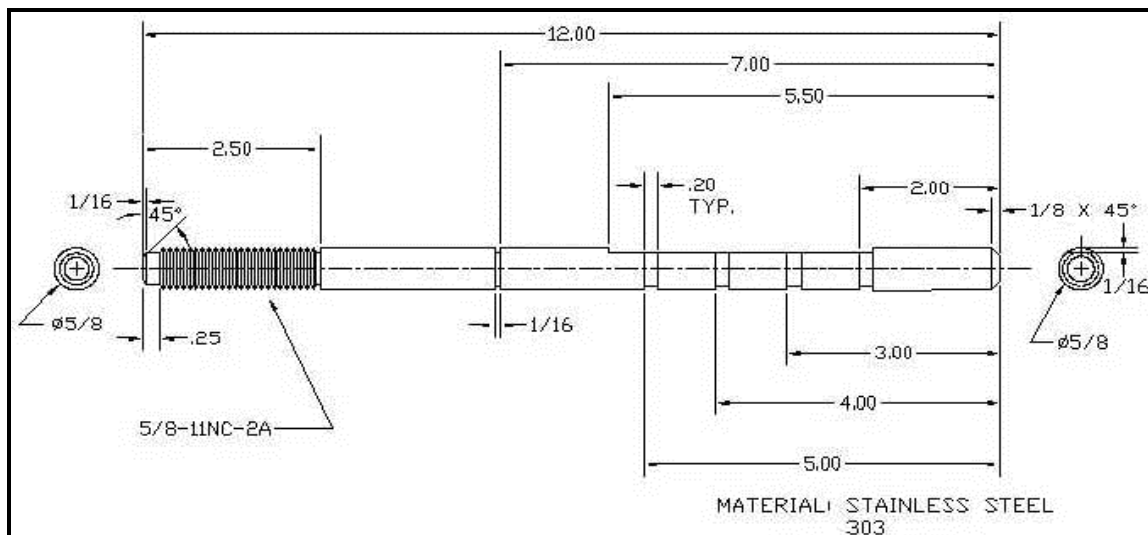
1- Hawaii Institute of Geophysics and Planetology



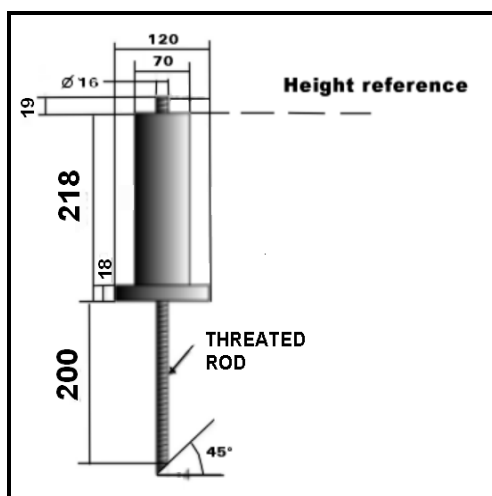
شکل ۲-۴۴- اجزا تشکیل دهنده پایه و نحوه قرارگیری آن در بستر



بنای فوق توسط USGS<sup>۱</sup> و VLNDEF<sup>۲</sup> نیز پیشنهاد شده است با این تفاوت که طراحی پین مورد استفاده متفاوت می‌باشد. به (شکل ۲-۴۵) و (شکل ۲-۴۶) توجه نمایید.



شکل ۲-۴۵- پین پیشنهاد شده توسط USGS



شکل ۲-۴۶- پین پیشنهاد شده توسط VLNDEF

## ۲-۱۳-۱۱- بنای پیشنهادی WCDA<sup>۳</sup>

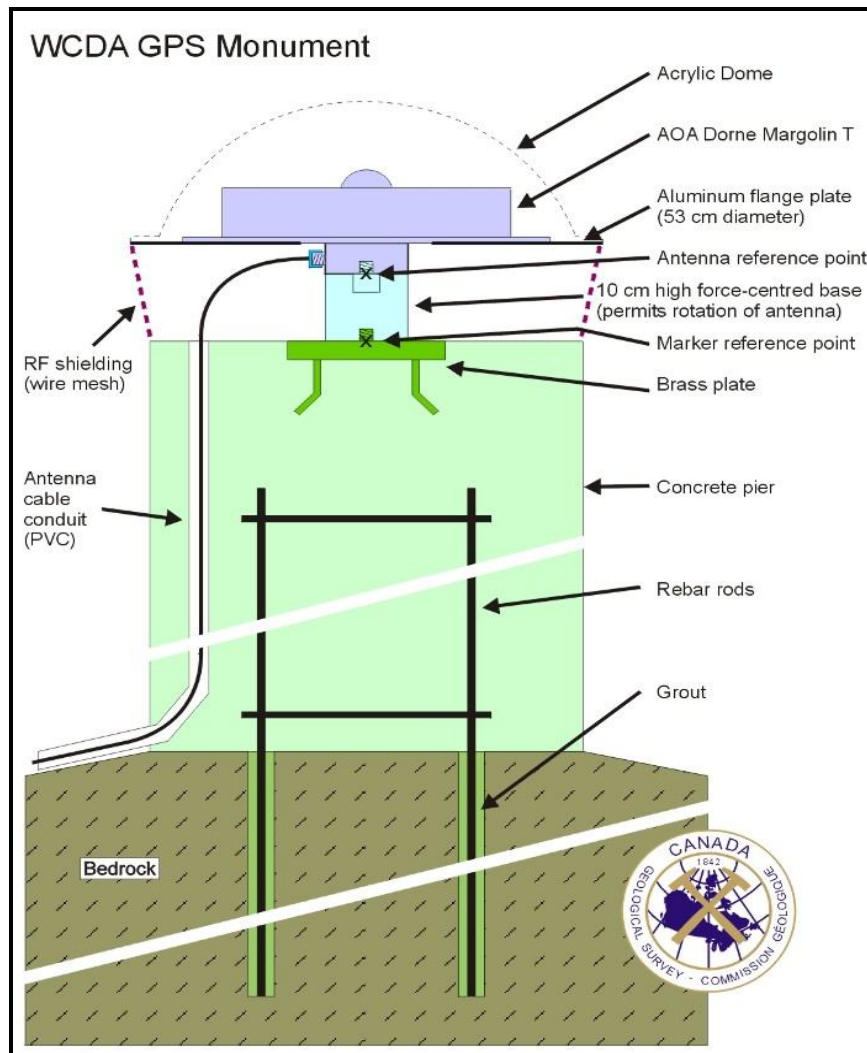
این بنا از یک پیلار بتنی مسلح مطابق (شکل ۲-۴۷) تشکیل شده است؛ این پیلار به عمق ۳ متر در بستر زیرین قرار گرفته است در قسمت فوقانی آن از یک پاشنه برنجی جهت پایه آنتن استفاده شده است.

1- U.S. Geological Survey

2- Victoria Land Network for Crustal DEFormation control

3- Western Canada Deformation Array





شکل ۲-۴۷- بنای پیشنهاد شده توسط WCDA

## ۲-۱۳-۱۲- پیشنهاد سازمان نقشه‌برداری کشور

سازمان نقشه‌برداری کشور به عنوان یکی از متولیان تولید نقشه در کشور، اقدام به ایجاد ایستگاه‌های مبنا در سطح کشور می‌نماید. در ایجاد این ایستگاه‌ها عمدتاً از ساختار بناهای پیلارهای بتنی استفاده می‌شود. در این قسمت به صورت مختصر کلیات انتخاب و ساخت این ایستگاه‌ها که در قالب دستورالعمل ایجاد ایستگاه‌های ژئودزی تدوین شده است، ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است این دستورالعمل‌ها براساس نیاز ایستگاه‌های ژئودزی تدوین شده و الزاماً برای ایستگاه‌های مبنای شهری کاربری نخواهد داشت.

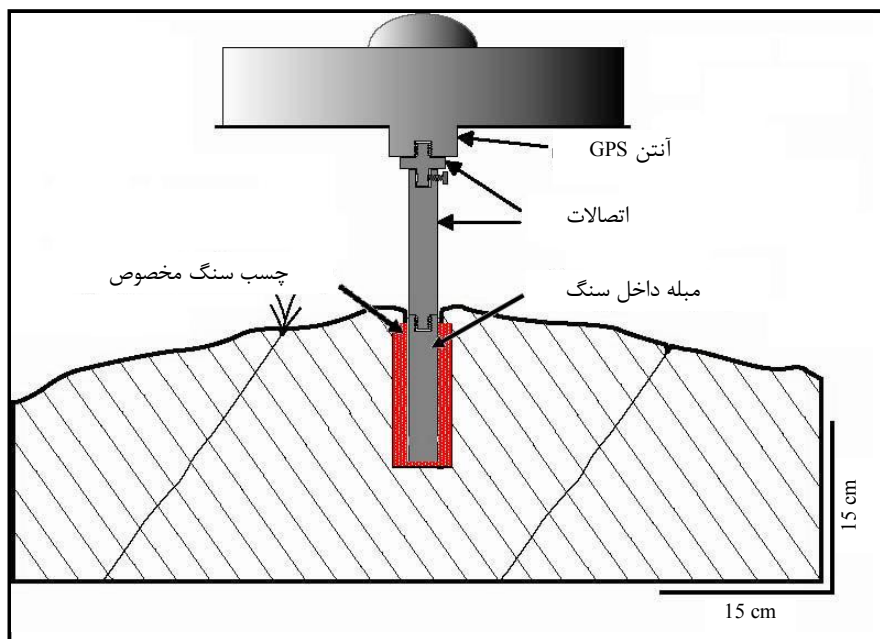
## ۲-۱۳-۱۲-۱- نکات مورد توجه در انتخاب محل ایستگاه

- به طور کلی نقاط شبکه ژئودزی باید دور از موانع و در ارتفاعات انتخاب گردند.
- به طور کلی موقعیت نقاط، براساس ماکزیمم دید ۱۵ درجه بالای افق انتخاب گردند.

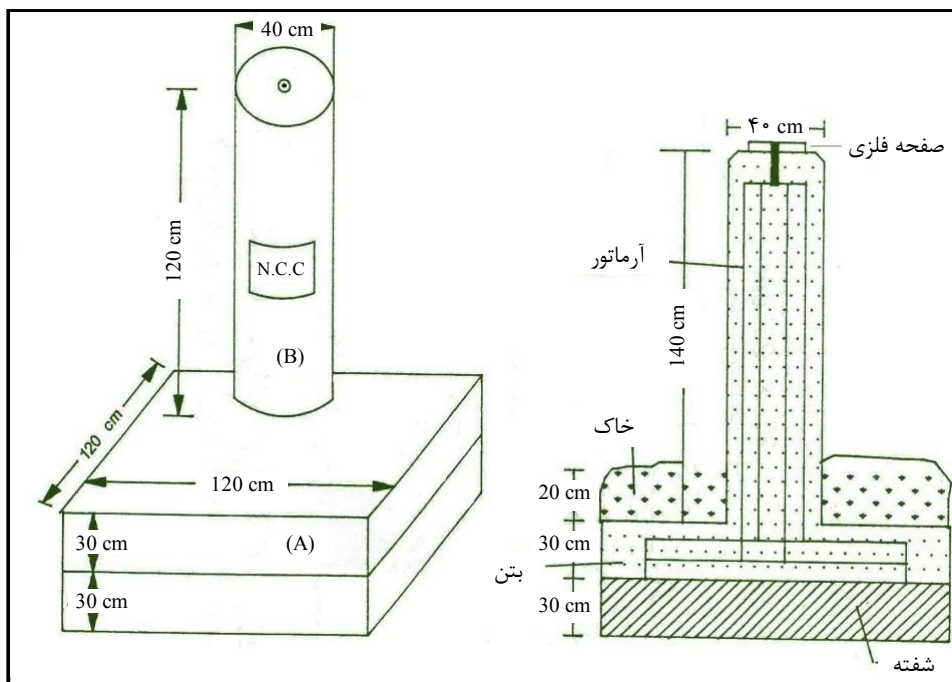




مناطق سنگی (شکل ۲-۴۹)

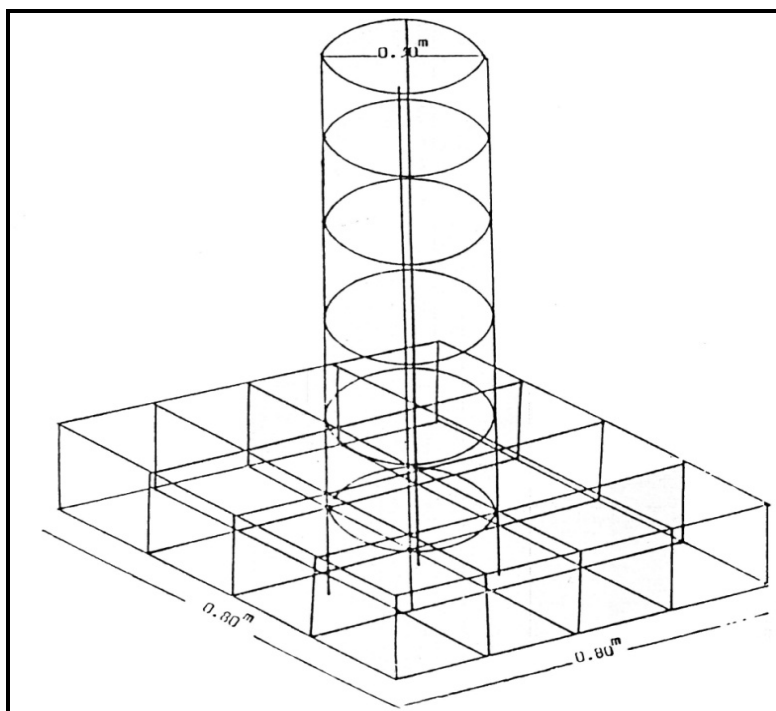


شکل ۲-۴۹- مقطع ایستگاه در مناطق سنگی



شکل ۲-۵۰- پیلار نقاط پایه





شکل ۲-۵۱- مقطع آرماتوربندی پیلاز ایستگاه

## ۲-۱۴- طراحی نقاط مشاهداتی

به منظور رفتارسنجی دامنه لغزشی بایستی نقاطی را بر روی آن تعبیه نمود که چگونگی حرکت و مقدار جابه‌جایی توده در حال حرکت را در طی برداشت‌های متفاوت نشان دهد. همانند آنچه که در بخش قبل برای نقاط مبنا سازه‌هایی را تعریف نمودیم در این بخش نیز سازه‌هایی معرفی می‌شوند که تا کنون در برخی از کشورهای دنیا مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲-۱۴-۱- پیشنهاد سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزدای کشور

#### ۲-۱۴-۱-۱- مشخصات و خصوصیات مصالح مورد استفاده در ساختمان ایستگاه‌ها

سیمان: براساس جنس زمین، نوع سیمان مورد نظر مشخص می‌گردد. در مناطق شوره‌زا و در مناطقی که احتمال خطر سولفات‌ها وجود داشته باشد باید از سیمان پرتلند نوع ۲ استفاده شود. در بقیه موارد از سیمان پرتلند نوع ۱ می‌توان استفاده کرد.

نکات لازم:

رنگ سیمان باید سبز تیره مایل به خاکستری یک دست باشد.

اگر دست در کیسه سیمان فرو رود باید احساس خنکی شود نه گرمی





اگر در کیسه سیمان گلوله‌های به هم چسبیده وجود داشته باشد، باید به راحتی به وسیله انگشتان نرم شود و در صورتی که نرم نگردد سیمان رطوبت کشیده و خراب است.

پودر سیمان وقتی ما بین انگشتان لمس می‌شود، باید بسیار نرم و صاف باشد و هر گونه زبری و ناهمواری دلیل خرابی و نامرغوبی سیمان است.

**مصالح سنگی:** انواع مصالح سنگی با توجه به اندازه آن‌ها به سه دسته زیر تقسیم می‌شود:

الف- ماسه: ماسه به مصالح سنگی گفته می‌شود که اندازه آن‌ها بین  $4^{mm} - 0/15^{mm}$  باشد.

ب- شن: به مصالح سنگی اطلاق می‌شود که اندازه آن‌ها بین  $4^{mm} - 20^{mm}$  باشد.

ج- خرده سنگ: ابعاد خرده سنگ بزرگ‌تر از شن بوده و اندازه آن حداکثر ۵ cm می‌باشد. سنگ مورد استفاده نباید حالت ورقه‌ای داشته باشد و قبل از استفاده سطح آن‌ها کاملاً خیس گردد و نیز از به کارگیری آن‌ها به مقدار زیاد در سطح فوقانی بتن و در اطراف آرماتور خودداری گردد.

مصالح سنگی که در ساختن بتن استفاده می‌شود باید دارای خصوصیات زیر باشد:

- از نظر شیمیایی خنثی باشد.

- مصالحی که انتخاب می‌شود دارای خلل و فرج کم بوده و در ضمن سطح آن‌ها زبر باشد.

- باید سطوح آن‌ها تمیز بوده و عاری از گچ، مواد گیاهی، مواد رسی و غیره باشد.

- باید تا حدودی شکل منظم هندسی داشته باشند.

- وزن مخصوص مصالح سنگی حدوداً بین  $2.6-2.9 \text{ ton/m}^3$  می‌باشد.

آب: آب جزء بسیار مهم بتن است زیرا با سیمان ترکیب شده و ماده چسبنده بتن را به وجود می‌آورد. آب آشامیدنی، مناسب‌ترین آب برای ساخت بتن است. آب مصرفی در ساخت بتن باید تمیز و صاف بوده و از مصرف آب حاوی موادی که قادر به صدمه زدن به بتن یا آرماتور باشد از قبیل روغن‌ها، اسیدها، قلیایی‌ها، املاح، مواد قندی، مواد آلی و کلر خودداری گردد.

تذکر: از مصرف آب دریا خودداری شود.

## ۲-۱۴-۱-۲- طرح اختلاط مصالح در ساخت بتن

- نسبت آب به سیمان

در ساخت بتن، مقدار آب مصرفی نقش اساسی را در مقاومت بتن ایفا می‌نماید. اگر مقدار آب مخلوط کم باشد، کار با مخلوط تازه مشکل می‌گردد و اگر مقدار آب زیاد باشد آب و اجزاء ترکیبی از یکدیگر جدا می‌شود و مقاومت لازم ایجاد نمی‌گردد.

به طور معمول نسبت آب به سیمان حدود ۴۰٪ می‌باشد. باید توجه داشت که مقدار آب مصرفی با توجه به شرایط آب و هوایی و میزان رطوبت ماسه و شن متغیر می‌باشد.



### - نسبت سیمان به مصالح سنگی

نسبت سیمان به مصالح سنگی (ماسه، شن، خرده سنگ) در بتن عامل ایجاد مقاومت لازم می‌باشد. در صورتی که مقدار سیمان زیاد باشد بتن حاصله جمع می‌شود یعنی حجم آن در اثر خشک شدن کم می‌شود و باعث ترک خوردگی می‌گردد. از سوی دیگر اگر سیمان کم مصرف شود باعث خواهد شد که رپر<sup>۱</sup>، مقاومت لازم را به دست نیاورد. بنابراین لازم است که اجزاء بتن را با نسبت‌های کاملاً مشخص با هم مخلوط نمائیم. بهترین نسبت برای ساختن رپرهای مورد نظر طبق تجربه، نسبت‌های حجمی ۴ شن، ۲ ماسه، ۱ سیمان یا ۳ شن، ۱/۵ ماسه ۱ سیمان پیشنهاد می‌گردد. تذکر: لازم است که در انتخاب شن و ماسه دقت کافی به عمل آید و ابعاد آن‌ها بیش از معمول کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر انتخاب نشوند تا بتن حاصله مقاومت کافی را داشته باشد.

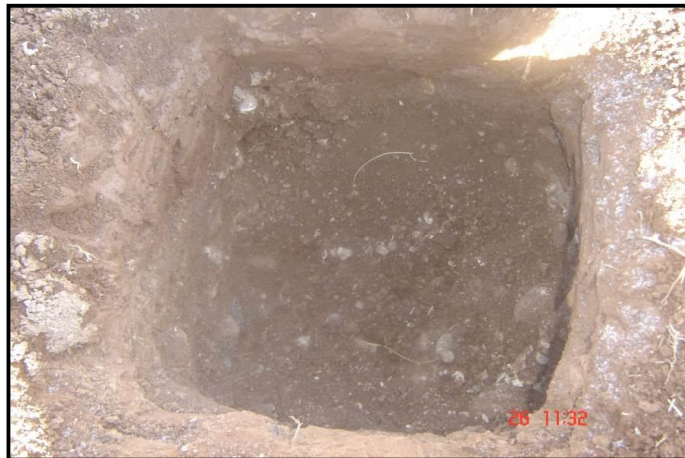
### ۲-۱۴-۱-۳- ساختمان ایستگاه‌های رفتارسنجی

ایستگاه‌های رفتارسنجی زمین لغزش شامل ایستگاه‌های مبنا و ایستگاه‌های شاهد می‌باشند. ایستگاه‌های مبنا حداقل به تعداد ۵ مورد و در خارج از توده در مکان‌هایی که زمین ثابت و حرکت ندارد ساخته می‌شوند. ایستگاه‌های شاهد در داخل توده لغزشی و به منظور ثبت مقدار، جهت و سرعت جابه‌جایی توده لغزشی ساخته می‌شوند. لازم به ذکر است که هر ایستگاه شاهد و مبنا حداقل باید از سه ایستگاه مبنا در هر مرحله از رفتارسنجی تعیین موقعیت گردد. چگونگی پراکنش و تعداد ایستگاه‌های شاهد در هر پروژه متفاوت می‌باشد. محل ساختمان ایستگاه‌های شاهد بر اساس عوارضی مانند ترک‌های کششی حاصل از لغزش، چشمه‌ها، زه‌آب‌ها، پرتگاه‌های لغزشی و ... تعیین می‌گردد. به این منظور، پس از شناسایی و انتخاب نهایی محل ایستگاه، جهت ساخت آن به ترتیب زیر عمل می‌شود:

چاله‌ای استوانه‌ای به قطر ۴۵ سانتی متر و عمق ۴۰ سانتی متر حفر می‌شود. در زمین‌های سست و نرم، حفاری آن قدر ادامه یابد تا به زمین سفت و محکم رسیده شود (شکل ۲-۵۲).



۱- رپر: اصطلاحاً به ایستگاه‌ها و نقاطی که ساختمان آن‌ها بتنی می‌باشد، اطلاق می‌گردد.



شکل ۲-۵۲- چاله حفر شده

چاله را به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر با بتن مگر<sup>۱</sup> (نظافت) پر نموده و سپس آرماتورهای اصلی و عرضی در وسط آن قرار داده می‌شود (شبکه آرماتور به شکل هرم ناقص می‌باشد که آرماتورهای اصلی آن شامل ۴ عدد میل‌گرد به ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و به قطر ۱۲ میلی‌متر و همچنین مشتمل بر ۴ آرماتور عرضی به قطر ۸ میلی‌متر که در فواصل مساوی از هم قرار داده می‌شوند می‌باشد. پس از خشک شدن بتن زیرین (معمولاً یک روز بعد) قالب رپر به شکل هرم ناقص به ابعاد ۴۰\*۴۰ و ۲۰\*۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر را در چاله به سمت شمال مغناطیسی قرار داده و به تدریج ملات بتن را در آن ریخته و سپس آن را کوبیده تا پر شود. ارتفاع کلی ایستگاه ۸۰ سانتی‌متر است که ۴۰ سانتی‌متر آن در زیر سطح زمین و ۴۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح زمین قرار دارد (شکل ۲-۵۳).



شکل ۲-۵۳- نمایی از نحوه آرماتوربندی و بتن‌ریزی ایستگاه‌ها

میله، صفحه و پیچ استیل وسط رپر ۱۲ سانتی‌متر طول دارد و در مرکز بتن به شکل عمودی قرار داده می‌شود.

۱- بتن مگر، بتنی است که نسبت سیمان و ماسه در آن تقریباً یک به چهار باشد و کم آب نباشد.  
 ۲- بهتر است از یک ویبراتور برای متراکم کردن بتن استفاده شود.



صفحه و پیچ استیل که محل استقرار GPS دو فرکانسه است از سطح فوقانی رپر بالاتر قرار می‌گیرند. برای حفاظت بیشتر تر پیچ می‌توان از درپوش‌های پلاستیک فشرده استفاده نمود (شکل ۲-۵۳).

میله، صفحه و پیچ استیل وسط بتن دارای مشخصات زیر است:

۱- جنس آن استیل ۳۱۶، ۲- سطح بالایی پیچ آن به شکل نیم‌کره، ۳- قطر میله ۲ سانتی‌متر و قطر پیچ ۱ سانتی‌متر، ۴- طول میله، صفحه و پیچ استیل جمعاً ۱۲ سانتی‌متر (شکل ۲-۵۴)

به منظور سهولت در حک نمودن نام ایستگاه حدود ۳ سانتی‌متر از سطح بالای قالب رپر با سیمان و ماسه نرم پر شود. البته باید دقت نمود که این قسمت با بتن اصلی به صورت یکپارچه در آید. قالب رپر پس از خشک شدن نسبی رپر (معمولاً روز بعد) برداشته می‌شود.

پس از برداشتن قالب، در سه روز متوالی روی آن آب ریخته سپس اطراف آن را با ماسه نرم پر کرده و حدود ۵ سانتی‌متر آخر آن را تا سطح زمین، خاک ریخته تا از پراکندگی ماسه جلوگیری شود. این عمل برای حذف اثر نیروهای جانبی به بتن ساخته شده انجام می‌گیرد. جزئیات مقطع، شبکه آرماتور و میله استیل ایستگاه رفتارسنجی زمین لغزش در (شکل ۲-۵۵) آورده شده است.



شکل ۲-۵۴- نمای کلی ایستگاه ساخته شده و نحوه قرارگیری GPS دو فرکانسه

#### ۲-۱۴-۱-۴- حک نام

پس از صاف کردن سطح نرمة بتن (واقع در سطح بالایی ایستگاه‌ها)، حروف و اعداد مربوط طوری داخل آن فرو شود تا سطح بتن از حالت صاف و مسطح خارج نگردد. پس از آن که سطح نرمة بتن حالت اعداد و حروف را گرفت، حروف و اعداد را به آهستگی از سطح بتن خارج کرده به طوری که لبه حروف و اعداد حک شده صدمه نبیند. برای حک حروف و اعداد بهتر است از قالب‌های آلومینیومی استفاده شود.

نام نقطه باید قبلاً تعیین و مشخص شده باشد و قبل از خشک شدن کامل بتن روی آن حک شود.

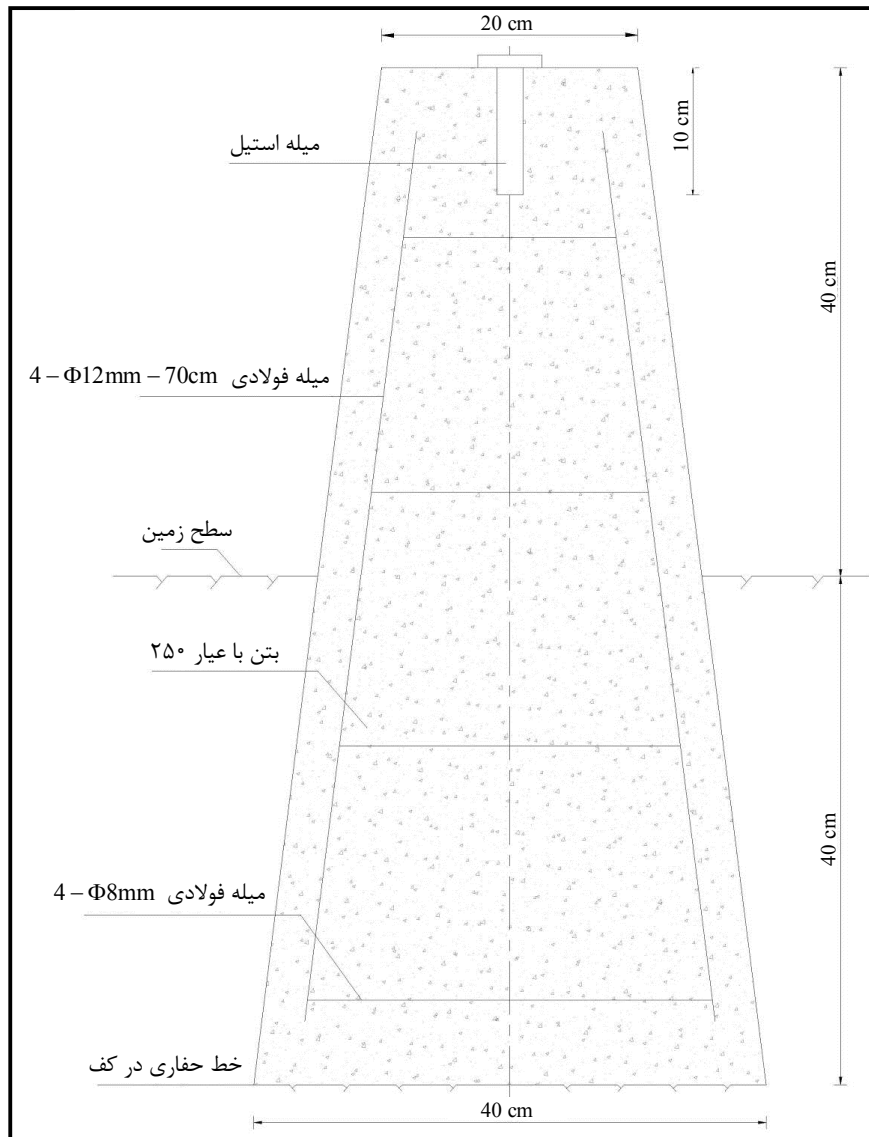
#### - حک نام بر روی ایستگاه‌ها

نام ایستگاه‌ها در سه سطر و به سمت شمال مغناطیسی و به فاصله ۳ سانتی‌متر از لبه‌های رپر به صورت زیر حک می‌شود (شکل ۲-۵۵).



سطر اول LSG<sup>۱</sup>

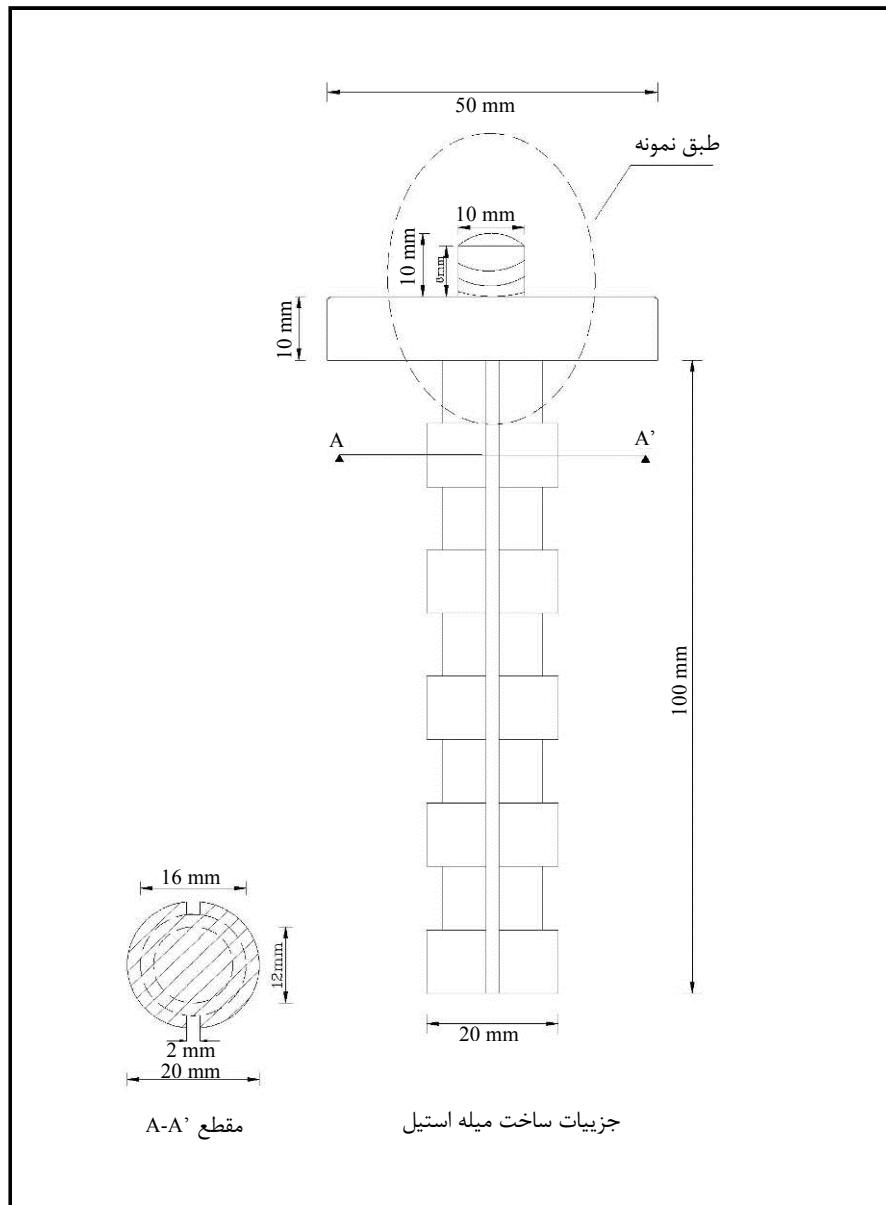
سطر دوم دو طرف میله، حروف مربوط به نام ایستگاه: برای ایستگاه‌های ثابت BM<sup>۲</sup> و برای ایستگاه‌های شاهد MP<sup>۳</sup> سطر سوم: شماره ایستگاه حک می‌گردد.



شکل ۲-۵۵- نمایشی از مقطع ایستگاه‌های رفتارسنجی زمین لغزش (مبنا و شاهد)

- 1- Landslide Stabilization Group(LSG)
- 2- Bench Mark
- 3- Measuring Point





شکل ۲-۵۶- جزئیات ساختمان میله استیل در مقاطع طولی و عرضی

#### نکات مهم:

قبل از جای‌گذاری میل‌گردها باید اطمینان حاصل شود که رویه آن‌ها از هر نوع عامل و اثر زیان‌بر از قبیل گل، روغن، قیر، دوغاب سیمان خشک شده، زنگ پوسته شده و برف و یخ عاری باشد. باید کنترل‌های لازم برای ساختن بتن اعمال شود یکی از موارد مهم، ایجاد شرایط مناسب برای شروع و تکامل فعل و انفعالات شیمیایی ما بین آب و سیمان می‌باشد که تا چند روز ادامه دارد. اگر هوا سرد باشد آب موجود درون بتن دچار یخ‌زدگی می‌گردد و اگر هوا گرم باشد آب موجود در بتن تبخیر می‌گردد لذا برای تهیه بتن مناسب، شرایط محیطی طوری انتخاب شود که بتن در فصول مناسب در مناطق مختلف ساخته شود و یا اگر الزاماً در شرایطی ساخته می‌شود که مناسب به نظر نمی‌رسد شرایط مصنوعی به وجود آید، مثلاً در شرایط گرم روی بتن با گونی خیس پوشانده شود و به

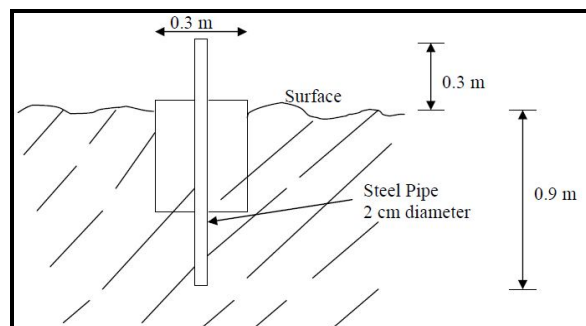
طور مرتب روی آن آب ریخته شود تا آب بتن به تدریج بخار شود و اگر در هوای سرد بتن ساخته می‌شود باید طوری اطراف آن را پوشاند که از یخ‌زدگی جلوگیری به عمل آید.

مطابق آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، درجه حرارت مناسب برای ساختن بتن بین  $5^{\circ}\text{C}$ – $30^{\circ}\text{C}$  باشد که در هنگام بتن‌ریزی هیچ قسمت از بتن نباید دمایی کم‌تر از  $5^{\circ}\text{C}$  و بیش‌تر از  $30^{\circ}\text{C}$  سانتی‌گراد داشته باشد. حداقل زمان مراقبت و عمل آوردن بتن در دمای محیط  $5^{\circ}\text{C}$ – $10^{\circ}\text{C}$ ، ۴ روز و در دمای بالاتر از  $30^{\circ}\text{C}$ ، ۳ روز می‌باشد. قالب‌ها در صورت تغییر شکل الزاما تعویض گردد.

## ۲-۱۴-۲- پیشنهاد دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تکنولوژی مالزی

طبق پایان‌نامه دکتری OTHMAN BIN ZAINON، نقاط مشاهداتی که بر روی توده در حال حرکت تعبیه شده‌اند به شکل زیر طراحی شده‌اند. از این نوع طراحی در مطالعات رفتارسنجی زمین‌لغزش‌های Vallcebre در اسپانیا که توسط Gili و همکاران در سال ۱۹۹۹، زمین‌لغزش Romanian که توسط Corbeanu در سال ۲۰۰۰ و زمین‌لغزش Slumgullion در منطقه Colorado که توسط همکاران در سال ۲۰۰۰ انجام شده‌اند مورد استفاده قرار گرفته است.

این بنا از یک میله استیل به قطر ۲ سانتی‌متر و طول ۱۲۱/۹۲ سانتی‌متر تشکیل شده است که ۹۱/۴۴ آن در زیر خاک فرو می‌رود. طراحی این بنا به شکل زیر است:



همان‌طور که مشاهده می‌نمایید این بنا از یک ستون بتونی به ابعاد  $30\% \times 30\% \times 60\%$  نیز تشکیل شده است که میله استیل ۱۲۰ سانتی‌متری در مرکز آن قرار گرفته است.



## ۲-۱۴-۳- پیشنهاد موسسه GNS نیوزلند

بنا به این پیشنهاد، طراحی نقاط مشاهداتی همانند پیشنهاد سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری است با این تفاوت که از ابعاد  $30^{\circ} \times 30^{\circ} \times 30^{\circ}$  استفاده می‌کنند.

## ۲-۱۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد دستورالعمل ارائه شده

بنا به تجربیات متعددی که در سال‌های اخیر در زمینه رفتارسنجی زمین لغزش در پروژه‌های داخل کشور، دو طرح برای نقاط مشاهداتی پیشنهاد می‌گردد:

### ۲-۱۵-۱- پیشنهاد ساخت نقاط مینا

در صورتی که در محل‌های در نظر گرفته برای ساخت ایستگاه‌های مینا تخته سنگ ثابت در زمین وجود داشته باشد، از پایه با پی سطحی و پایه متصل شده به پین‌های فولادی که در (بخش ۲-۱۳-۴) توضیح داده شد استفاده می‌گردد. در غیر این صورت بایستی با توجه به نوع خاک و زمین‌شناسی منطقه یکی از روش‌های DDBM یا SDBM را مورد استفاده قرار داد که در (بخش‌های ۲-۱۳-۱ و ۲-۱۳-۲) در مورد آن‌ها توضیح داده شد. انتخاب یکی از این دو روش بستگی دارد که سنگ بستر در چه عمقی وجود دارد. نکته!! انتخاب نوع بنا بایستی با مشورت و مشاوره با متخصص زمین‌شناسی و نقشه‌برداری صورت گیرد.

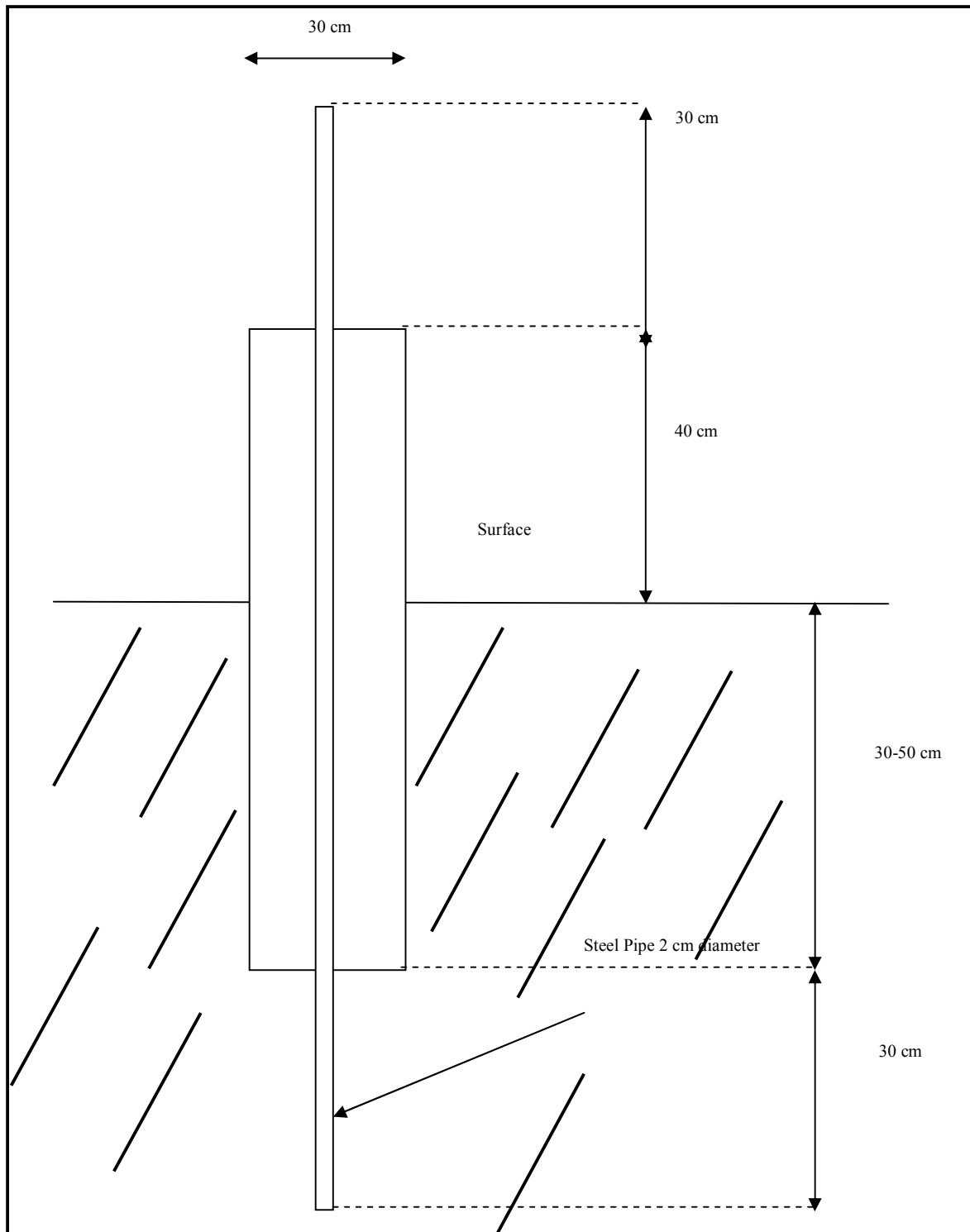
### ۲-۱۵-۲- پیشنهاد ساخت نقاط مشاهداتی

از آن جا که در برخی از مناطق، به خصوص مناطق شمالی کشور که زمین لغزش‌های متعددی به دلیل نوع زمین‌شناسی منطقه و بارندگی فراوان رخ می‌دهد، دامنه‌های لغزشی پوشش گیاهی بلندی دارند لذا لازم است ایستگاه‌ها به گونه‌ای طراحی شوند که بتوان از بروز خطاهایی چون پدیده چند مسیری، cycle slip جلوگیری نمود و میزان تاثیر آن‌ها را به حداقل رساند. در مناطق بوته‌ای و مناطقی که پوشش گیاهی وجود دارد که ناگزیر به ساخت ایستگاه‌ها در مجاورت آن‌ها هستیم، به طور کلی به منظور غلبه بر این مشکل پیشنهاد می‌گردد از پایه آلومینیومی که در (بخش ۲-۱۳-۷) توضیح داده شد استفاده نمایند.

در صورتی که پوشش گیاهی در منطقه مورد نظر وجود ندارد می‌توان از ترکیب طرح پیشنهادی دانشگاه مالزی و سازمان جنگل‌ها بهره گرفت.







۲-۱۶- روش قرائت مشاهدات:

روش اول: از آنجا که هر نقطه مشاهداتی درون محدوده لغزشی باید توسط دو نقطه مبنا قرائت شود، لذا حداقل دو نقطه مبنا مورد نیاز است. برای اتصال این دو نقطه مبنا و تعیین دقیق مختصات آنها می‌توان از نزدیک‌ترین نقطه IGS



به عنوان نقطه سوم شبکه مبنا استفاده نمود. به این صورت که دو گیرنده بر روی نقاط مبنا قرار داده شود و به مدت ۶-۷ ساعت داده جمع‌آوری گردد. سپس به کمک نقطه IGS، که یک نقطه بین‌المللی است، مختصات آن را تصحیح نمود. این کار لازم است در دو مرحله اول و دوم مشاهدات انجام شود. زیرا به این روش می‌توانیم متوجه شویم که آیا نقاطی که به عنوان نقاط مبنا در نظر گرفته‌ایم نقاط پایدار و ثابتی بوده‌اند یا خیر. پس از تعیین مختصات دقیق نقطه اول شبکه مبنا در سیستم مختصات جهانی، می‌توانیم مختصات نقطه دوم را نیز محاسبه نماییم. از آنجا که احتمالاً فاصله نقاط IGS به نقاط شبکه مبنا زیاد است، لذا لازم است که از گیرنده‌های دو فرکانسه استفاده گردد تا بتوان ابهام فاز را حل نمود. در حالی که می‌توان برای تعیین موقعیت نقاط داخل محدوده لغزشی از گیرنده‌های تک فرکانسه استفاده نمود، زیرا معمولاً فاصله نقاط مبنا از نقاط داخل محدوده لغزشی چندان زیاد نیست. بنابراین شرایط جوی و اتمسفری سیگنال‌ها یکسان خواهد بود و با تفاضل معادلات، خطاهای ناشی از اثرات یونسفری و تروپوسفری را کاهش داد و یا حذف نمود. در انتها می‌توان مدت زمان استقرار گیرنده در نقاط مشاهداتی را بر اساس جدول زیر و نوع گیرنده مورد استفاده تعیین نمود.

برای تعیین موقعیت نقاط داخل محدوده لغزشی لازم است دو گیرنده بر روی نقاط مبنا و سایر گیرنده‌ها بر روی نقاط مشاهداتی واقع بر محدوده لغزشی مستقر شوند. همان‌طور که ذکر گردید در این حالت دیگر لازم نیست که گیرنده‌ها دو فرکانسه باشند. همچنین پس از تعیین مختصات نقاط مبنا توسط نقاط IGS و اطمینان یافتن از پایداری آن‌ها دیگر لازم نیست مختصات آن‌ها در مراحل بعدی محاسبه شود. کافی است مختصات آن‌ها را در مراحل دیگر ثابت در نظر گرفت.

**روش دوم:** در روشی دیگر می‌توانیم از ۲ نقطه IGS به عنوان نقاط مبنا استفاده نماییم. از آنجا که این نقاط نقاط ثابت و پایداری هستند نیازی به شبکه مبنا نخواهیم داشت و این موضوع از هزینه‌های ساخت ایستگاه‌های مبنا که هزینه هنگفتی خواهد داشت می‌کاهد. البته قابل ذکر است که در این حالت بایستی حتماً حتماً از گیرنده دو فرکانسه استفاده نمود. همچنین بازه زمانی طولانی‌تری برای استقرار در هر یک از نقاط صرف کرد. زیرا نقاط IGS در ایران به ندرت یافت می‌شوند و مجبور خواهیم بود از نقاط IGS در کشورهای همسایه استفاده نماییم که بالطبع فاصله آن‌ها زیاد خواهد بود و عدد ابهام فاز به سختی حل می‌شود. از مزیت‌های این روش دقت بسیار بالای آن است. همچنین هزینه‌ای برای ساخت ایستگاه نخواهیم داشت.

**روش سوم:** روش دیگر استفاده از نقاط ژئودتیکی سازمان است. در این حالت بایستی یک گیرنده را بر روی نقطه سازمان و گیرنده دوم و سوم را بر روی شبکه مبنا مستقر نماییم. (از آنجا که نقاط سازمان از دقت نامناسبی برخوردار هستند لذا بهتر است از خرید داده‌ها به صورت RINEX فایل خودداری نمود و اکیپ مورد نظر گیرنده را بر روی آن مستقر نماید.) در این حالت بایستی از گیرنده‌های دو فرکانسه بهره‌برداری کرد زیرا فاصله در این جا نیز زیاد خواهد بود.

**روش چهارم:** روش دیگر در نظر گرفتن یک نقطه مبنا برای انتقال مختصات از سیستم محلی به سیستم جهانی است. لازم به ذکر است که بنا به فاصله زیاد بین ایستگاه مبنا و نقطه IGS گیرنده مستقر بر روی نقطه مبنای مورد نظر



بایستی از نوع دو فرکانسه باشد و تا پایان برداشت مشاهدات روشن باشد تا ابهام فاز برای بیس لاین بزرگ بین خود و نقطه IGS حل شود. از آنجا که بایستی هر نقطه از نقاط مشاهداتی به طور هم‌زمان توسط دو نقطه دیگر تعیین مختصات شود لذا لازم است دو گیرنده دیگر بر روی دو نقطه مشاهداتی مستقر شود. در این حالت چون نقاط مشاهداتی فاصله کوتاهی دارند می‌توان از گیرنده‌های تک فرکانسه استفاده نمود.

**روش پنجم:** روش نهایی استفاده از نزدیک‌ترین نقطه سازمان نقشه‌برداری به عنوان نقطه مبنا است. در این حالت دیگر نیازی به ساخت ایستگاه مبنا نخواهیم داشت و تنها کافیست گیرنده را روی آن مستقر نمود و مانند روش قبلی ادامه داد. در این روش هزینه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

لازم به ذکر است که در صورتی که از گیرنده‌های دو فرکانسه برای رفتارسنجی استفاده گردد می‌توان از بیس لاین مربوط به نقاط مشاهداتی و نقطه IGS نیز در اجسمنت شبکه استفاده نمود و مختصات نقاط مشاهداتی را با درجه آزادی بیش‌تری محاسبه کرد. تاکید می‌گردد که تمامی گیرنده‌ها بایستی دو فرکانسه باشند تا اثر خطاهای یونسفر و تروپوسفر کاهش یابد. همچنین مدت بیش‌تری باید مشاهدات ماهواره‌ها برداشت شوند تا ابهام فاز برای بیس لاین‌های طولانی حل شود.

## ۲-۱۷- تعداد مراحل و زمان مشاهدات

در هر پروژه، تعداد مراحل و زمان مشاهدات بسته به نوع منطقه و میزان حرکت توده ناپایدار و همچنین بسته به درخواست کارفرما متغیر می‌باشد. به عنوان نمونه، در صورتی که حرکت دامنه نسبتاً کند باشد ترجیحاً بهتر است بازه زمانی برداشت را طولانی‌تر و فاصله بین هر دو برداشت را چندین ماه در نظر گرفت. البته لازم به ذکر است که چون پس از بارندگی‌های طولانی و شدید توده ناپایدار حرکت بیش‌تری می‌کند لذا لازم است قبل و بعد از فصل بارندگی برداشت صورت بگیرد. همچنین در برخی مناطق به دلیل برداشت بی‌رویه آب از آب‌های زیرزمینی و یا تبخیر آن در فصل گرما بایستی مشاهده انجام شود. در اکثر مواقع، علت وقوع لغزش پیش از انجام مطالعات ژئوتکنیکی و مطالعات زمین‌شناسی منطقه تا حدودی مشخص می‌باشد. بنابراین بهتر است یک مهندس زمین‌شناسی کاملاً آگاه به پدیده زمین‌لغزش تعداد و زمان انجام مشاهدات را برای اکیپ نقشه‌برداری تعیین نماید. لازم به ذکر است که بهره‌گیری از داده‌های هواشناسی اعم از بارندگی، تبخیر، ریزش برف و ... کمک شایانی در تعیین زمان مشاهده و همچنین تعداد مراحل می‌کند.

## ۲-۱۸- خروجی گزارش

شرکت مهندسی نقشه بردار موظف است نتایجی را در گزارش به کارفرما ارائه دهد که در شرح خدمات به آن ابلاغ شده است. اما آن چه که در یک گزارش رفتارسنجی زمین‌لغزش به کمک GPS بایستی ارائه شود عبارتند از:

- داده‌های خام،
- نام ایستگاه‌ها و ارتفاع آنتن،



- نقشه توپوگرافی منطقه و جانمایی ایستگاه‌های مبنا و شاهد (نحوه تهیه نقشه توپوگرافی در پیوست ۱ آورده شده است.)،
- RINEX فایل‌های هر مرحله،
- تعداد و زمان دقیق مشاهدات،
- موقعیت جغرافیایی و نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد نظر،
- شکل شبکه نقاط مبنا و شاهد به طور مجزا،
- ارائه جدولی مبنی بر مشخصات ابزارهای مورد استفاده در پروژه،
- موقعیت جغرافیایی نقطه یا نقاط مربوط به شبکه سراسری سازمان نقشه‌برداری یا IGS،
- طریقه محاسبه و تعیین نقطه پایدار،
- توضیحاتی درباره نحوه انجام مشاهده و محاسبات،
- جدول مختصات نقاط مبنا و شاهد در هر مرحله به همراه ابعاد بیضی خطاها،
- جدول بردارهای جابه‌جایی افقی و قائم تمامی نقاط اعم از مبنا و شاهد،
- جدول سرعت حرکت نقاط در واحد میلی‌متر بر سال،
- نمودارهای جابه‌جایی افقی و قائم هر یک از نقاط به طور جداگانه،
- نمودارهای جابه‌جایی- زمان- آزمون برای هر یک از نقاط (در این نمودار مقادیر جابه‌جایی و آزمون در دو محور قائم و زمان برداشت مشاهدات در محور افقی به صورت هم‌زمان ترسیم می‌گردد. در واقع در این نمودار دو گراف ترسیم می‌گردد که یکی از آن‌ها مربوط به بردار جابه‌جایی است و دیگری مربوط به آزمون).



# فصل ۳

---

---

## اصول و مبانی تداخل سنجی راداری

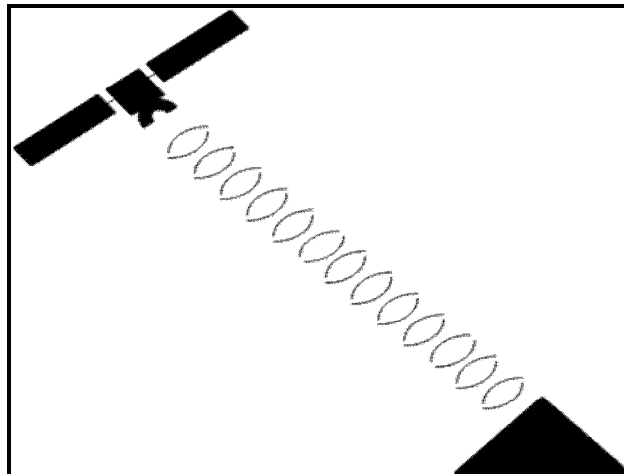




### ۳-۱- تعریف رادار<sup>۱</sup>

در تصویربرداری توسط سنجنده‌های ماهواره‌ها دو سیستم کلی وجود دارد: سیستم فعال و سیستم غیرفعال. در سیستم فعال نخست سنجنده امواج را به سطح زمین می‌تاباند، سپس انعکاس آن را دریافت می‌کند. در سیستم غیرفعال سنجنده امواجی را ارسال نمی‌کند. بلکه تنها امواج موجود در محیط (معمولاً امواج خورشیدی) که توسط زمین بازتاب می‌شود را دریافت می‌کند. برخلاف سیستم‌های تصویربرداری نوری غیرفعال که به امواج خورشیدی وابسته‌اند، تصویرسازی رادار یک سیستم پرتوافشانی فعال است.

رادار مخفف عبارت RadioDetection And Ranging<sup>۲</sup>، به معنای شناسایی و اندازه‌گیری اشیاء به کمک امواج رادیویی است. رادار به یک تکنیک و یک ابزار اطلاق می‌شود. ابزار رادار پالس‌های الکترومغناطیسی را در محدوده مایکروویو و رادیویی گسیل می‌کند و پالس‌های منعکس شده از اشیاء مستقر در راستای خط دید<sup>۲</sup> خود را دریافت می‌کند. تکنیک رادار با استفاده از زمان رفت و برگشت پالس، فاصله تا شیء شناسایی شده و به کمک شدت (قدرت) پراکنش امواج دریافتی از شیء، خصوصیات فیزیکی آن چون زبری و صافی سطح یا اندازه آن را تعیین می‌کند (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- شمایی از چگونگی کارکرد ابزار رادار

### ۳-۲- تاریخچه رادار

اولین امواج رادیویی در سال ۱۸۸۶ توسط هرتز کشف و تولید گردید. وی اولین کسی بود که متوجه شد این امواج می‌توانند توسط اشیاء منعکس شوند. اگرچه اولین سیستم رادار در اوایل سال ۱۹۰۳ برای ردیابی کشتی و اجتناب از برخورد دو کشتی به هم توسعه پیدا کرد.

1- RADAR  
2- Line Of Sight



کاوک مغناطیسی ابداع انگلیسی بسیار مهمی بود که توانست رادارهای کوچک با پالس‌های کوتاه، توان گسیل بالا و طول موج‌های سانتی‌متری بسازد. این وسیله عامل محرکی برای پیشرفت‌های مهم و اساسی در تکنولوژی رادار گردید که به وسیله آزمایشگاه رادیویی MIT در دهه ۴۰ حاصل شد.

این تکنولوژی در سال‌های اولیه ظهور خود برای مقاصد و کاربردهای نظامی به کار برده می‌شد اما پس از آن در کاربردهای علمی و مهندسی نیز مورد استفاده قرار گرفت.

رادارهای زمین مرجع<sup>۱</sup>، ایده مطالعه اجرام آسمانی مانند ماه، ونوس، مریخ و خورشید را به وجود آوردند. در ژانویه ۱۹۴۶ اولین اکوی راداری از ماه دریافت شد. با استفاده از آنتن نجومی- رادیویی در Goldstone-Arecibo مشاهدات راداری سیارات ونوس و مریخ به ترتیب در سال‌های ۱۹۶۱ و ۱۹۶۳ انجام شد. مهم‌ترین نتیجه این اندازه‌گیری‌ها این بود که متوجه دوران قهقرایی<sup>۲</sup> ونوس شدند.

اولین آزمایشات که رادار را به فضا وارد کرد با تلاش‌های JPL در سال ۱۹۶۲ آغاز گردید و مشاهدات راداری قمری از آپولو ۱۷ در سال ۱۹۷۲ موفق از آب در آمد. اندازه‌گیری‌های حاصل از آلتی متر رادار قائم نگر<sup>۳</sup> از ماهواره‌های در حال دوران به دور زمین پس از Skylab (۱۹۷۳) و GEOS-3 (۱۹۷۵) جمع آوری گردید. ونوس اولین بار توسط رادار نصب شده بر روی Pioneer 1 که در سال ۱۹۷۸ پرتاب شد مشاهده گردید که یک آلتی متر راداری قائم نگر را که قادر به نقشه‌برداری جهانی با دقت تقریباً ۳۰۰ متر و رزولوشن مکانی ۵۰ کیلومتر حمل می‌کرد. Verna 15, 16 شوروی رزولوشن را تا تقریباً ۲ کیلومتر بهبود دادند [۱۶].

### ۳-۳- تصویربرداری در راستاهای رنج و آزیموت

همان‌طور که در (شکل ۳-۲) نمایش داده شده است، سیستم‌های تصویربرداری راداری دارای یک الگوی جانب‌نگر می‌باشند و پالس را عمود بر مسیر پرواز با زاویه دید  $\theta$  نسبت به قائم هدایت می‌کنند. به دلیل شکل آنتن که در یک لحظه همانند یک نقطه عمل می‌کند، بازتابش از زمین محدود به منطقه‌ای است که به آن فوت پرنیت<sup>۴</sup> آنتن گفته می‌شود. همچنان که سیستم SAR با سرعت  $V$  در راستای مسیر فرضی و در ارتفاع  $H$  از سطح زمین حرکت می‌کند، پهنه‌ای از زمین را از طریق ارسال و دریافت یک سری پالس‌های میکروویو تصویربرداری می‌کند که نرخ این پالس‌ها را فرکانس تکرار پالس (PRF) گویند.

- 1- Earth-based
- 2- Retrograde
- 3- Nadir-Looking
- 4- Foot Print



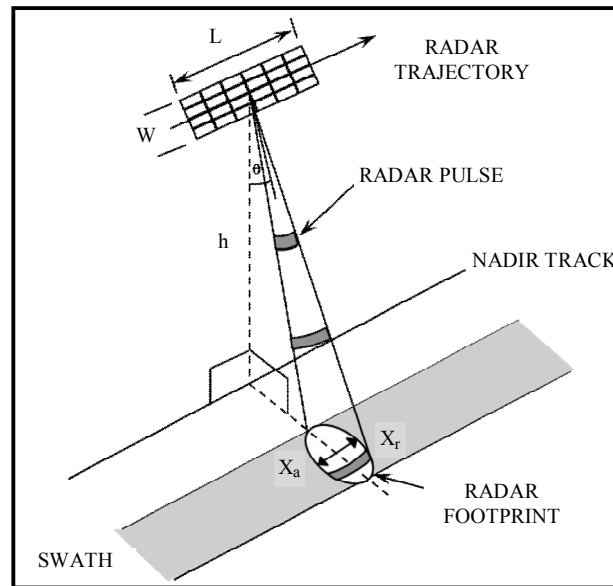


در سیستم‌های راداری دو سازوکار متفاوت تصویربرداری به کار برده می‌شود. نخست هر پالس تابیده شده، سطح زمین را به عرض Swath جاروب می‌کند. در این حالت در راستای عمود بر مسیر پرواز ماهواره، زمین انرژی را به رادار منعکس می‌کند. چون زمین از گستره‌ی پیوسته‌ای از پراکنده‌سازها تشکیل یافته، انرژی منعکس شده به صورت اکو پیوسته است. این اکو هم‌زمان با فرکانس نمونه رقومی می‌شود. در همین حال در سازوکار دوم، در راستای پرواز و با سرعت حرکت سکو (ماهواره) سطح زمین تصویربرداری شده و با PRF رقومی می‌شود. مقیاس زمانی دو سازوکار across-track و along-track تفاوت بسیار آشکاری داشته که تفکیک آن‌ها را امکان‌پذیر می‌کند. داده‌های خام SAR و متعاقب آن داده‌های تصحیح شده SAR به صورت ماتریس دو بعدی هستند که مختصات آن شامل رنج<sup>۱</sup> R، فاصله از SAR و آزیموت X نماینده مکان پراکنده‌ساز در مسیر سنجنده است (شکل ۳-۲). برای مولفه رنج در راستای Y از نام رنج زمینی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. اجزای دو بعدی ماتریس، یک پیکسل یا جزء تصویر را تشکیل می‌دهند. درباره داده‌های خام SAR، به هر پیکسل مقادیر مختلفی نسبت داده می‌شود که از فاز و دامنه و یا مولفه‌های حقیقی و یا مجازی، براساس نوع بیان، تشکیل یافته است [۲۴].

به زبان ساده‌تر، پالس‌های رادار همچنان که در راستای رنج ارسال و دریافت می‌شود در راستای آزیموت نیز ضمن حرکت سنجنده ارسال و دریافت می‌شوند. در راستای رنج سیگنال‌های برگشتی از اشیا با رنج‌های مختلف به ترتیب زمان ورود آن‌ها مرتب می‌شوند و در راستای آزیموت پالس‌های دریافتی با زاویه‌های مختلف نسبت به رادار بر اساس شیفت‌های داپلر آن‌ها مرتب می‌شوند. شیفت داپلر در واقع همان شیفت فرکانس است که به دلیل حرکت نسبی بین فرستنده و گیرنده در اثر پدیده داپلر ایجاد می‌شود. بنابراین مدت زمان بین ارسال و دریافت پالس  $(\Delta t - 2\Delta r/c)$  و شیفت داپلر  $f_D$  دو مولفه برای تصویر تولید می‌کند که یکی در راستای رنج (فاصله، تاخیر زمانی پالس) و دیگری در راستای آزیموت (موقعیت سنجنده در طول مسیر مداری آن) می‌باشد. بنابراین تصویر راداری دو بعدی ایجاد می‌شود. هر المان این آرایه دو بعدی شامل اطلاعات دامنه و فاز است.

1- Range  
2- Ground Range





شکل ۳-۲- شمایی از هندسه تصویربرداری راداری

### ۳-۴- سیستم‌های تصویربرداری راداری

از آنجایی که سیستم‌های تصویربرداری راداری از امواج ماکروویو استفاده می‌کنند، بنابراین قابلیت نفوذ در پوشش‌های ابر را دارد. به عبارتی دیگر قادر به اخذ تصویر در هر شرایط آب و هوایی می‌باشند. همچنین با توجه به این که یک سیستم تصویربرداری فعال است، قادر به اندازه‌گیری در تمامی ساعات شبانه روز می‌باشد. این دو ویژگی از مهم‌ترین مزایای سیستم تصویربرداری راداری در مقابل سیستم‌های اپتیکی به شمار می‌روند.

دو نوع سیستم تصویربرداری راداری داریم که عبارتند از:

- سیستم تصویربرداری راداری با دهانه واقعی<sup>۱</sup>
- سیستم تصویربرداری با دهانه ترکیبی<sup>۲</sup>
- که در ادامه به تفسیر هر یک از آن‌ها می‌پردازیم.

### ۳-۵- توان تفکیک تصاویر راداری

توان تفکیک عبارت است از توانایی سنجنده راداری در تشخیص و تمایز بین دو شیء بسیار نزدیک به هم. توان تفکیک مکانی در تصاویر راداری در دو راستای آزیموت و رنج تعریف می‌شود.

1- Real Aperture RADAR  
2- Synthetic Aperture RADAR

رزولوشن در راستاهای رنج و آزیموت تصویر خام رادار ضعیف است. این پارامتر در راستای رنج پردازش نشده،  $R_r$ ، با مدت زمان پالس گسیل شده،  $\tau_p$  و سرعت نور  $C$  به دست می‌آید:

$$R_r = \frac{c\tau_p}{2} \quad (۱-۳)$$

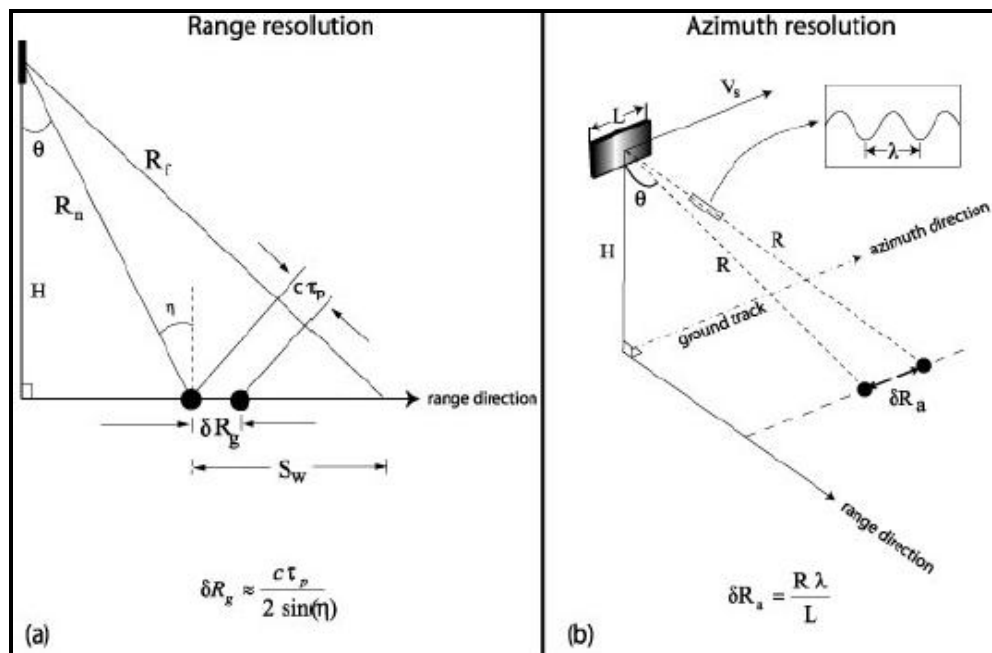
به عنوان مثال، توان تفکیک در راستای رنج برای داده‌های پردازش نشده سنجنده ERS در حدود ۵ کیلومتر است. توان تفکیک آزیموتی پردازش نشده به کمک اندازه فوت پرنیت آنتن به دست می‌آید:

$$R_{a,unprocessed} = \frac{R\lambda}{L_a} \quad (۲-۳)$$

که  $L_a$  طول آنتن به موازات مسیر پرواز،  $\lambda$  طول موج و  $R$  فاصله شی از سنجنده است. از آنجا که  $\frac{R}{L_a}$  بیانگر عرض فوت پرنیت بر روی زمین است، در صورتی که دو شی در مقدار شاخص  $L_a$  در رادار فضا برد ۱۰ متر است که میزان رزولوشن آزیموتی پردازش نشده را حدود ۵ کیلومتر به دست می‌دهد.

در رابطه (۱-۳) ملاحظه می‌نمایید که هر چه طول پالس یا همان مدت زمان پالس گسیل شده کم‌تر باشد، قدرت تفکیک در راستای رنج بالاتر می‌رود. اما از آنجا که کاهش طول پالس توان ارسالی را نیز کم می‌کند، نسبت سیگنال به نویز پالس برگشتی کاهش خواهد یافت. بنابراین بایستی به دنبال راه حلی برای افزایش قدرت تفکیک در راستای رنج باشیم. همچنین با توجه به (رابطه ۲-۳)، در صورتی که بخواهیم رزولوشن آزیموت را افزایش دهیم یا بایستی طول موج را کم کنیم یا بایستی آنتن را بلندتر کنیم. اما قادر به کاهش طول موج نیستیم زیرا از امواج مایکروویو دور می‌شویم و مزایای این امواج مانند کاهش حساسیت به ناهمواری‌ها و نفوذ در پوشش‌های ابری و مه را از دست می‌دهیم. از طرف دیگر به دلیل محدودیت فنی و فیزیکی قادر به افزایش طول آنتن نیستیم. بنابراین برای افزایش رزولوشن در راستای آزیموت دارای محدودیت‌های مذکور هستیم که برای حل این مشکل سیستم SAR ابداع شد.





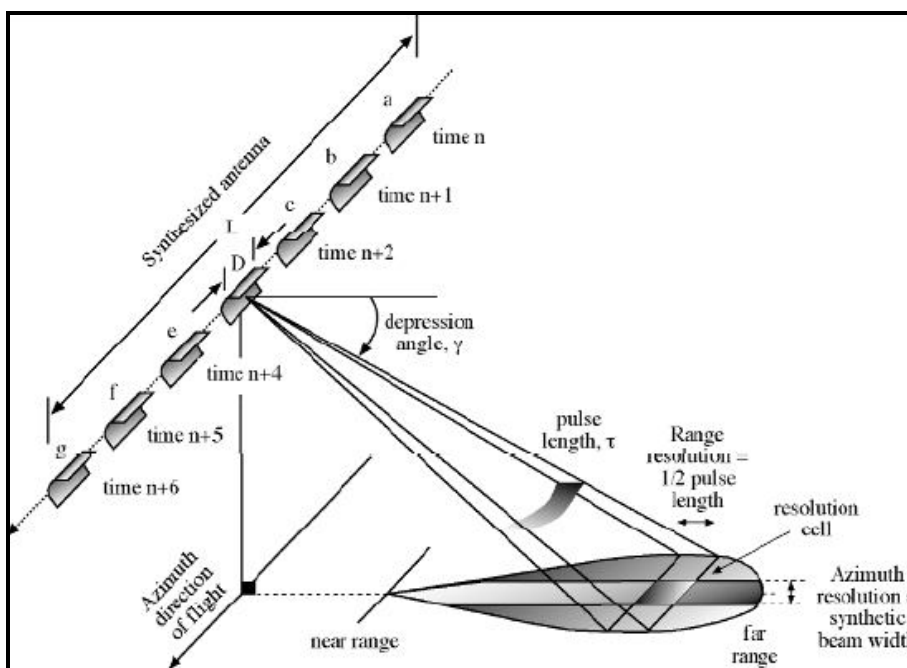
شکل ۳-۳- توان تفکیک در دو راستای آزیموت و رنج [۳۱]

همان‌طور که در (شکل ۳-۳) مشاهده می‌نمایید، در صورتی که دو شی در راستای رنج، فاصله کم‌تر از  $C\tau_p$  داشته باشند قابل شناسایی نیستند. همچنین در صورتی که دو شی که دارای رنج یکسانی می‌باشند در یک زمان در یک باریکه قرار گیرند و در روی تصویر به صورت دو شی مجزا تشخیص داده شوند، این دو شی حداقل در فاصله‌ای مساوی با عرض فوت پرینت نسبت به یکدیگر قرار دارند.

### ۳-۶- سیستم تصویربرداری راداری با دهانه ترکیبی

همان‌طور که در بالا ذکر شد، سیستم تصویربرداری دهانه واقعی دارای محدودیت‌هایی است که سیستم SAR با تغییراتی در چگونگی حرکت سکوی رادار و ثابت و پردازش سیگنال‌های بازتابیده شده بر این محدودیت‌ها غلبه می‌کند. بدین طریق که با تغییر در نحوه رفتار رادار به صورت مجازی طول آنتن رادار افزایش می‌یابد (شکل ۳-۴) چگونگی رسیدن به این خواسته را تشریح می‌کند. در این روش با استفاده از تکنیک‌های سیگنال پیشرفته، آنتن طویل مجازی ایجاد می‌شود.





شکل ۳-۴ - نحوه تصویربرداری SAR

(شکل ۳-۴) نحوه تصویربرداری SAR را نشان می‌دهد. (۱) ابتدا شی هدف سیگنال‌های ماکروویو را به صورت پالس دریافت می‌کند و پژواک‌های هر پالس توسط رادار ثبت می‌شوند. سکوی رادار در مسیر مستقیم به طور پیوسته در حال حرکت است. در طول زمانی که شی هدف در معرض پالس‌های رادار قرار دارد عمل ثبت سیگنال‌های بازتابیده شده از شی توسط رادار انجام می‌پذیرد. (۲) زمان چندانی طول نمی‌کشد تا طول آنتن ترکیبی مشخص گردد. این روش با افزایش پهنای زاویه‌ای و همچنین کاهش سرعت سکو توان تفکیک آزمون را در محدوده دور افزایش می‌دهد. در نتیجه توان تفکیک در راستای آزمون ثابت باقی می‌ماند. به تکنولوژی فوق که جهت افزایش دقت برد صورت می‌پذیرد SAR گفته می‌شود. این روش در اکثر رادارهای هوایی و فضایی استفاده می‌شود [۹].

همچنین جهت غلبه بر کاهش نسبت سیگنال به نویز در اثر کاهش طول پالس در سیستم RAR، سیستم SAR از پالس‌های مدوله شده فرکانس استفاده می‌کند، این پالس به اندازه کافی بلند است تا توان تفکیک در راستای رنج بالایی تولید کند و بعد از فشرده‌سازی به اندازه کافی کوچک می‌شود تا رزولوشن بالایی در راستای رنج تولید کند. با استفاده از این تکنیک که فشرده‌سازی پالس نامیده می‌شود، تصویر راداری می‌تواند تفکیکی تا ۴ متر روی زمین در راستای عمود بر حرکت ماهواره تولید کنند [۹].



دریافت کننده SAR به وضوح جریان بازگشتی از زمین را ثبت می‌کند و آن‌ها را به اکوهای مجزا تقسیم می‌کند، به نحوی که هر اکو با یک پالس مطابقت داشته باشد. اکو یا امواج بازگشتی در اثر پراکنده‌سازها<sup>۱</sup> ایجاد می‌شوند. سطح زمین از پراکنده‌سازها که در واقع همان اشیاء و اجسام هستند، تشکیل شده است مثل درختان، زمین، یخ که این اشیاء با امواج رادیویی گسیل شده از ماهواره واکنش نشان می‌دهند.

از آنجا که در سیستم SAR تابش و دریافت سیگنال در مکان تقریباً یکسانی از فضا صورت می‌گیرد، واکنش‌هایی که در هندسه SAR اهمیت دارند، انعکاس‌های امواج تابیده شده رادار است. این نوع اندرکنش، پراکنده‌گی برگشتی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و پراکنده‌سازهای عمل کننده را پراکنده‌ساز برگشتی<sup>۳</sup> گویند. یک پراکنده‌ساز خوب میزان انرژی بیشتری را نسبت به انواع پراکنده‌سازهای ضعیف یا غیرموثر منعکس می‌سازد. سیگنال ارسالی و اکو دریافت شده از یک پراکنده‌ساز مشخص، مختلط است و از دو مولفه دامنه و فاز تشکیل شده است. دامنه اکو از بازده پراکنده‌ساز و عوامل هندسی سیستم تعیین می‌شود. در واکنش ساده پراکنده‌سازی، فاز اکو از فاز سیگنال ارسالی، خواص دی الکتریک محیط و مکان پراکنده‌ساز نسبت به SAR تعیین می‌شود [۲۴].

### ۳-۷- اوجاجات هندسی در تصاویر راداری

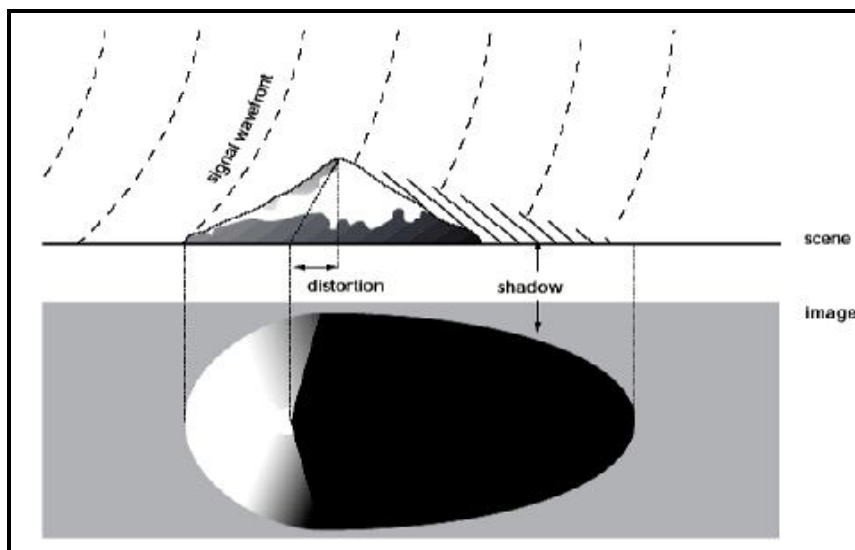
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، سیستم‌های تصویربرداری راداری جانب‌نگر هستند و در راستای رنج سیگنال‌های برگشتی از اشیاء، با رنج‌های مختلف به ترتیب زمان ورود آن‌ها مرتب می‌شوند. به این ترتیب در تصویربرداری از مناطق دارای توپوگرافی زیاد مانند کوهستان‌ها، اوجاجات هندسی‌ای در تصاویر به وجود می‌آید که آن‌ها را به سه دسته تقسیم می‌کنند: سایه<sup>۴</sup>، کوتاه شدگی<sup>۵</sup> و وارونگی<sup>۶</sup>.

#### ۳-۷-۱- سایه

در تصاویر راداری، سایه به مناطقی اطلاق می‌شود که سیگنال رادار به آن‌ها نرسیده باشد. این پدیده ناشی از وجود ارتفاعات و زاویه تابش رادار بزرگ‌تر از زاویه شیب عارضه به وجود می‌آید. به این ترتیب هیچ سیگنالی به این ناحیه برخورد نمی‌کند و بالطبع هیچ سیگنال بازگشتی هم ثبت نخواهد شد [۱۶]. بنابراین مناطق سایه به رنگ سیاه در تصویر دیده می‌شوند و عملاً هیچ‌گونه اندازه‌گیری‌ای در این ناحیه نخواهیم داشت (شکل ۳-۵).

- 1- Scatterer
- 2- Back Scatter
- 3- Back Scatterer
- 4- Shadow
- 5- Layover
- 6- Shortening

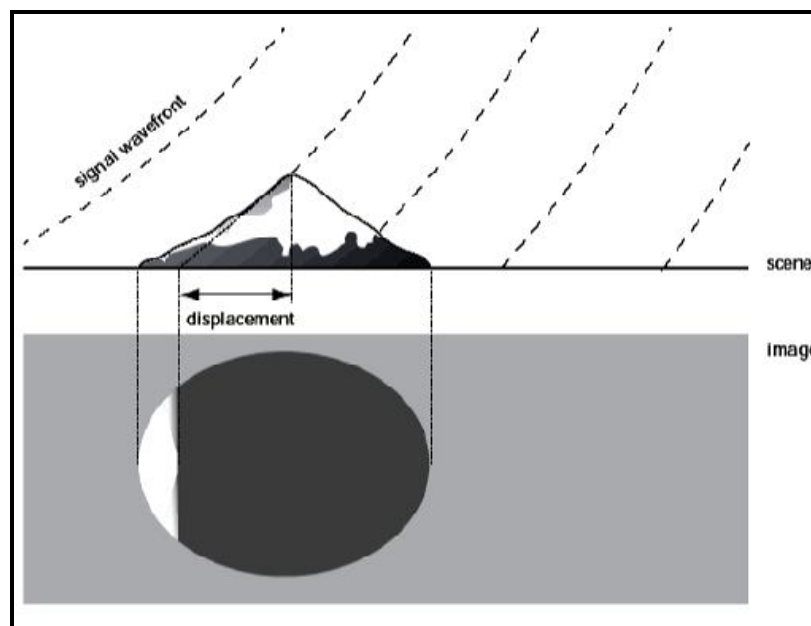




شکل ۳-۵- تشکیل پدیده سایه در تصویر رادار [۲۵]

### ۳-۷-۲- کوتاه شدگی

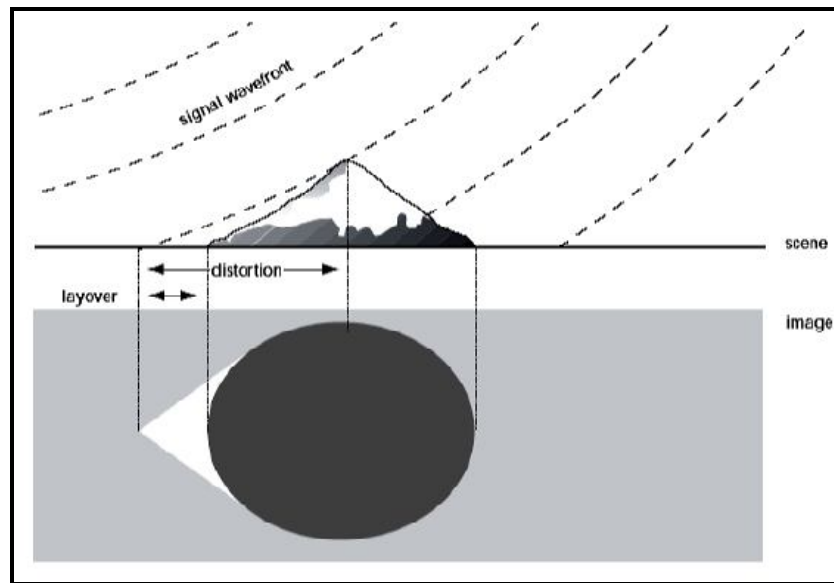
پدیده کوتاه شدگی در یک تصویر رادار، زمانی رخ می دهد که زاویه برخورد محلی کوچکتر از زاویه تابش باشد [۱۶]. این نوع از اعوجاج باعث کوتاه شدن فاصله واقعی سطح مقابل به سنجنده، در تصویر می شود (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- تشکیل پدیده کوتاه شدگی در تصویر رادار [۲۵]

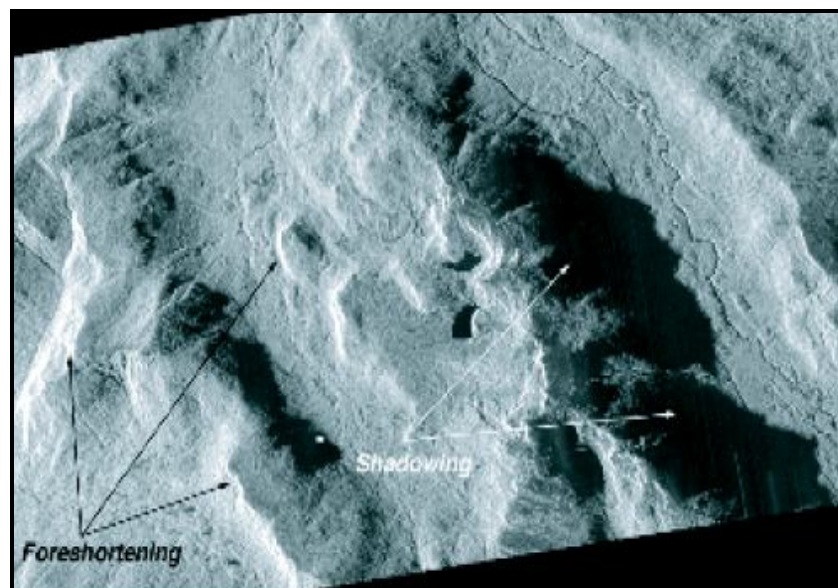
### ۳-۷-۳- وارونگی

در مناطق با شیب تند، موج ارسالی از سنجنده، ابتدا به دامنه کوه برخورد می کند و سپس به قله کوه. بنابراین ابتدا موج بازگشتی از دامنه کوتاه در تصویر ثبت می شود و سپس موج بازگشتی از قله [۱۶]. نتیجه این اعوجاج، جابه جایی موقعیت قله و پای عارضه ارتفاعی نسبت به سنجنده خواهد بود (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷- تشکیل پدیده وارونگی در تصویر رادار [۲۵]

در (شکل ۳-۸) می‌توانید تمامی این اعوجاجات را در یک تصویر راداری مشاهده نمایید.



شکل ۳-۸- نمایش سه اعوجاج هندسی ذکر شده در یک تصویر رادار [۳۱]





### ۳-۸- تداخل‌سنجی دهانه مصنوعی راداری<sup>۱</sup>

در مقایسه با تکنیک‌های ژئودتیکی متداول و مرسوم، رادار قادر به اندازه‌گیری زاویه نیست. همانند یک چشم منفرد انسان که قادر به تشخیص فاصله تا شی نیست، رادار نیز نمی‌تواند دو شی مستقر در یک فاصله اما با زوایای متفاوت را متمایز کند. برای حل این مشکل از دو سنجنده استفاده می‌کنند. این ایده و استفاده از اطلاعات فاز، راه را برای تداخل‌سنجی فراهم کرد. با استفاده از دو تصویر SAR که یا از دو آنتن متفاوت و یا از دو عبور متوالی یک آنتن به دست آمده‌اند، می‌توان فاصله و همچنین اندازه‌گیری‌های زاویه‌ای را به دست آورد.

بنابراین با استفاده از اندازه‌گیری‌های فاز می‌توان فاصله نسبی را با دقت معادل کسری از طول موج رادار و به کمک اختلاف موقعیت‌های سنجنده، اختلافات زاویه‌ای را که برای پایش توپوگرافی<sup>۲</sup> ضروری است به دست آورد. به این روش تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی یا InSAR گفته می‌شود [۱۶].

تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی یک فناوری دورسنجی است که به منظور مطالعه‌ی حرکات سطح زمین در زمین‌لرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا ابداع شد. در این فناوری، با استفاده از تلفیق داده‌های به دست آمده از سیستم‌های تصویربرداری رادار نصب شده بر سکوه‌های ماهواره‌ای یا هواپیمایی، حرکت، ارتفاع و تغییرات سطح زمین نقشه‌برداری می‌شوند. اساس کار در اندازه‌گیری حرکات سطح زمین استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در یک زمان مشخص برداشت می‌شود (زمان مرجع) با تصویر که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می‌شود، تلفیق می‌شود [۴۳].

با این فناوری می‌توان حرکات و تغییرات ناشی از پدیده‌هایی مانند زمین‌لرزه، آتشفشان، یخچال‌ها، زمین‌لغزش و دیابیرهای نمکی و یا پدیده‌های نامنظم مانند خروج آب‌های زیرزمینی و نفت، آبگیری مزارع و انفجارات زیرزمینی را مطالعه نمود. علاوه بر این پدیده‌های سطحی مانند آتش‌سوزی، سیلاب، تغییرات رطوبت و رشد گیاهان نیز قابل تشخیص‌اند. بنابراین کاربردهای آن شامل بررسی و شناسایی خطرات طبیعی و بشری و کمی‌سازی رابطه بشر با منابع طبیعی است.

اولین کاربری InSAR برای مطالعه حرکات سطح زمین توسط Gabriel et al. (1989) انجام شد. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره SEASAT برپایی زمین را در اثر آب‌دهی انتخابی زمین‌های امپریال کالیفرنیا مطالعه کردند. با این حال تا زمان انتشار نقشه‌ی دقیق جابه‌جایی زمین در اثر زمین‌لرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا و حرکات یخی داخل رودخانه یخی روتفرد، سودمندی این روش به عنوان یک ابزار ژئودزی برای جامعه‌ی علوم زمین شناخته نشده بود [۴۳].

1- Differential Synthetic Aperture Radar (DInSAR)  
2- Monitoring Topography



Goldstein et al. (1993) سرعت جریان رودخانه‌های یخی قطب جنوب را با استفاده از تصاویر ERS-1، که با فاصله شش روز برداشت شده بود، مطالعه کرد. این اولین باری بود که سرعت جریان‌های یخی به طور مستقیم از فضا و بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی اندازه‌گیری می‌شد. Massonet et al. (1994) جابه‌جایی هم‌زمان با زمین‌لرزه لندرز را با استفاده از تصاویر ERS-1، که با چند ماه اختلاف تهیه شده بودند محاسبه کردند. این اولین تصویر کاملی بود که از تغییر شکل حین زمین‌لرزه به دست آمده بود.

Massonet et al. (1995) تغییر شکل سطحی کوه آتشفشانی اتنا را با InSAR محاسبه کردند. از آنجا که تغییرات سطحی می‌تواند از فوران‌های آینده یک آتشفشان فعال خبر دهد، توانایی اندازه‌گیری این تغییرات از فضا بدون کنترل زمینی، پیشرفتی اساسی در قابلیت‌های فرانگری محسوب می‌شود. این مطالعات اولیه، انگیزه فراوانی را در بین جامعه علوم زمین برای بررسی و تکمیل جنبه‌های مختلف این فناوری ایجاد کرد. از آن زمان تا به حال کارهای متعددی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های RADARSAT و JERS, ERS, Space Shuttle, SIR-C, X-SAR برای مطالعه‌ی زمین‌لرزه، آتشفشان، یخچال‌ها، زمین‌لغزش و فرونشست زمین و تغییر شکل مرز ورقه‌ها صورت گرفته است. با توجه به کاربردهای این فناوری و با توجه به اینکه هیچ یک از ماهواره‌های قبلی به این روش اختصاص نداشتند، ماهواره‌هایی جدیدتر و اختصاصی طراحی و به فضا فرستاده شده و خواهند شد [۴۳].

به طور کلی دو روش برای تداخل‌سنجی وجود دارد:

- تداخل‌سنجی تک مسیره<sup>۱</sup>
- تداخل‌سنجی با مسیر تکراری<sup>۲</sup>

### ۳-۸-۱- تداخل‌سنجی تک مسیره

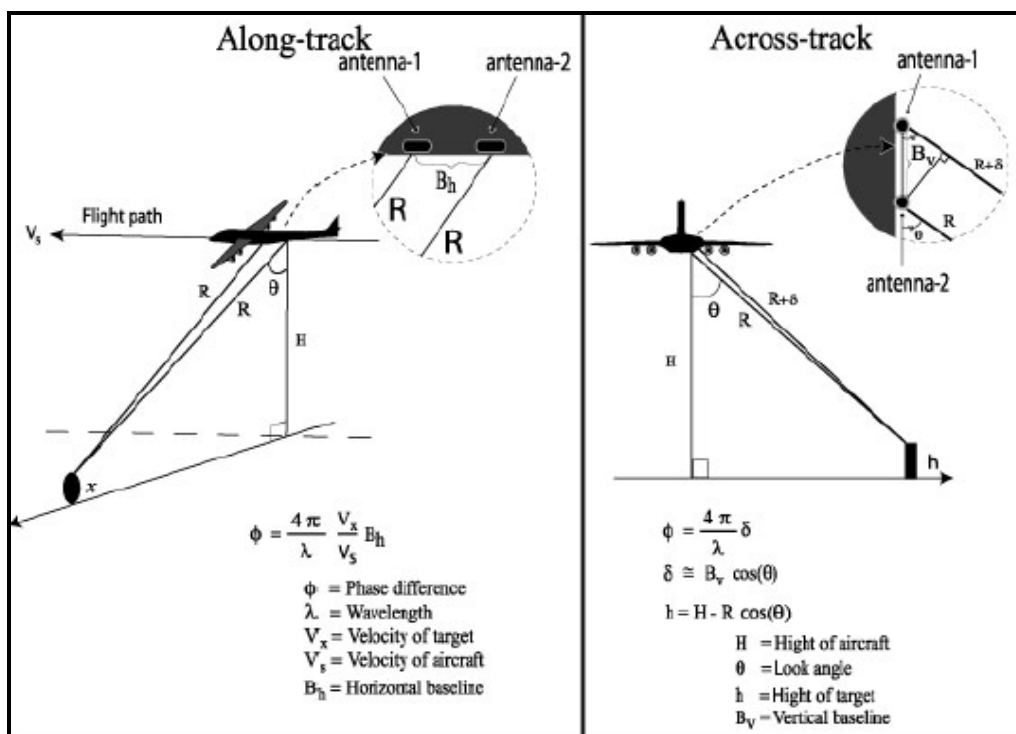
در این روش دو آنتن بر روی یک سکو قرار گرفته‌اند و به طور هم‌زمان تصویربرداری انجام می‌شود. دو حالت مختلف جهت نصب آنتن‌ها وجود دارد، در حالت اول، موقعیت دو آنتن در راستای جهت پرواز است که اصطلاحاً به آن تداخل‌سنجی در راستای جهت پرواز<sup>۳</sup> گفته می‌شود. از این روش برای نظارت بر حرکت یخچال‌ها، بلوک‌های یخی و سرعت امواج اقیانوس استفاده می‌شود.

- 1- Single Pass Interferometry
- 2- Repeat-Pass Interferometry
- 3- Along-Track



در حالت دوم که مشهورترین روش مورد استفاده در تداخل‌سنجی است، موقعیت دو آنتن در راستای عمود بر مسیر پرواز می‌باشد. به این روش تداخل‌سنجی در راستای عمود بر پرواز<sup>۱</sup> گفته می‌شود. این نوع تداخل‌سنجی بیش‌ترین کاربرد را در تهیه مدل‌های ارتفاعی زمین دارد [۲].

دو آنتن  $A_1$  و  $A_2$  مورد استفاده در این روش در (شکل ۳-۹) نمایش داده شده است که در آن راستای پرواز به سمت خارج از صفحه است. در الگوی تک مسیر، آنتن‌ها هم‌زمان به صورت فیزیکی با یکدیگر متصل شده‌اند که نمونه این حالت در سنجنده‌های TOPSAR و SRTM وجود دارد.



شکل ۳-۹- نمایش شماتیک از تداخل‌سنجی در راستای پرواز و راستای عمود بر راستای پرواز

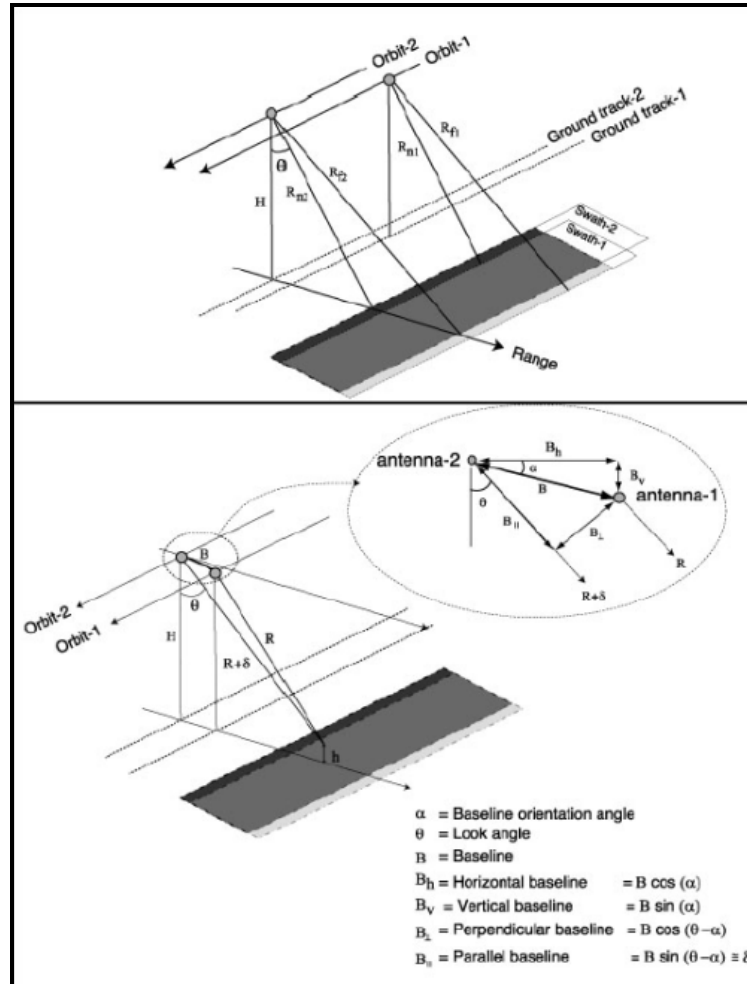
### ۳-۸-۲- تداخل‌سنجی با تکرار مسیر

روش جایگزین دیگر تهیه تصویر زمین با یک آنتن SAR و در دو زمان مختلف است. این روش بر پایه اطلاع دقیق از مسیر پرواز است، بنابراین برای سیستم‌های ماهواره‌ای مناسب‌تر می‌باشد. به این روش تداخل‌سنجی مسیر مکرر<sup>۲</sup> گفته می‌شود (شکل ۳-۱۰). روشی که در سنجنده ERS استفاده می‌شود. از آنجا که ماهواره‌های ERS-1, 2 چندین سال به

- 1- Across-Track
- 2- Repeat -Pass Interferometry



طول هم‌زمان تصویربرداری می‌کرده‌اند، استفاده مشترک از آن‌ها را به اصطلاح (tandem mode) گویند که فاصله زمانی مسیرهای این دو ماهواره ۲۴ ساعت است.



شکل ۳-۱۰- هندسه تداخل‌سنجی با تکرار مسیر [۳۱]

فاصله بین مسیرهای پرواز را خط مبنا<sup>۱</sup> (B) گویند و مولفه عمود آن نسبت به خط رادار تا ساختگاه زمینی، خط مبنای موثر یا عمود<sup>۲</sup> نامیده می‌شود برای هر سیستم تصویربرداری SAR، خط مبنای بحرانی وجود دارد که در صورتی که جدایی مکانی دو تصویر از این مقدار بیش‌تر شود تداخل‌سنجی غیر ممکن می‌گردد. مقدار این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$B_c = \frac{\lambda R}{2\delta R_g \cos \theta} \quad (۳-۳)$$

- 1- Baseline
- 2- Perpendicular Baseline



که  $R_g$  توان تفکیک زمینی در راستای رنج،  $\theta$  زاویه میل ماهواره،  $\lambda$  طول موج رادار و  $R$  فاصله بین سنجنده و نقطه مورد نظر روی زمین می‌باشند.

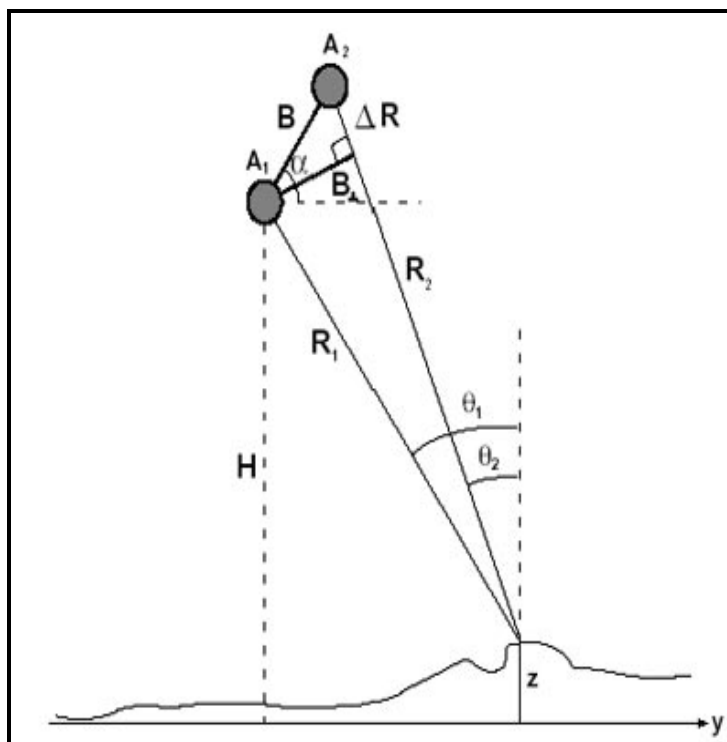
از آنجایی که فاز خودش به تنهایی اندازه‌گیری رنج است، اختلاف فاز اندازه‌گیری شده اختلاف رنج پیکسل‌های متناظر که از دو انتهای خط مبنا مشاهده شده‌اند را ارائه می‌دهد. این اختلاف رنج، اندازه‌گیری بنیادین تداخل‌سنجی راداری می‌باشد. تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که به وسیله آن می‌توانیم اختلاف فاز بین تصاویر راداری اخذ شده از یک منطقه را محاسبه کنیم. این اختلاف فاز از اختلاف مسیر به وجود آمده از تصویربرداری در دو موقعیت متفاوت به دست می‌آید. به عبارت دیگر، در این روش دو تصویر SAR اخذ شده در زمان‌ها و مکان‌های متفاوت به صورت پیکسل به پیکسل در هم ضرب متقاطع می‌شوند و اینترفروگرام تولید می‌شود. برای تداخل‌سنجی راداری، نه تنها دامنه  $A$  بلکه فاز  $\varphi$  سیگنال دریافتی نیز ذخیره می‌شود.

$$c_1 = A_1 e^{i\varphi_1} \quad c_2 = A_2 e^{i\varphi_2} \quad (4-3)$$

$$I = c_1 \cdot c_2^* = A_1 A_2 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (5-3)$$

محصول جدید که مهم‌ترین محصول تداخل‌سنجی شمرده می‌شود، اینترفروگرام نامیده می‌شود. همان‌طور که از معادله فوق ملاحظه می‌کنید، دامنه یک اینترفروگرام مختلط حاصل ضرب (با میانگین) دامنه‌های پیکسل‌های متناظر در دو تصویر SAR می‌باشد، در حالی که فاز، فاز اینترفرومتریک، اختلاف فاز بین پیکسل‌های متناظر است. دو آنتن  $A_1$  و  $A_2$  مورد استفاده در این روش در (شکل ۳-۱۱) نمایش داده شده است که در آن راستای پرواز به سمت خارج از صفحه است. در الگوی تک مسیر آنتن‌ها هم‌زمان، به صورت فیزیکی با یکدیگر متصل شده‌اند که نمونه این حالت در سنجنده‌های TOPSAR و SRTM وجود دارد.





شکل ۳-۱۱- هندسه نگاه تداخل سنجی SAR، در اینجا دو آنتن تداخل سنجی A1 و A2 وجود دارند. متغیر ارتفاع سطح از یک سطح مبنای محلی است. طول خط مبنای عمود  $\hat{B}$  حساسیت تداخل سنج به اندازه گیری z را نشان می‌دهد [۱۱].

در شکل فوق ارتفاع اولین سنجنده از زمین H است و زاویه نگاه (تابش) رادار آن  $\theta_1$  است. فاصله بین مسیرهای پرواز را خط مبنا<sup>۱</sup> (B) گویند و مولفه عمود آن نسبت به خط رادار تا ساختگاه زمینی، خط مبنای موثر یا عمود<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. (B<sup>^</sup>) زاویه خط مبنا با افق a است. در اینجا ابتدا پراکندگی سطحی را بررسی می‌کنیم و بعد به ارتفاع می‌پردازیم. برای یک پیکسل پیچیده SAR که مرکز آن در رنج R و آزیموت x واقع شده است داریم:

$$s(R, X) = S(R, X) e^{j\phi(R, X)} \quad (۶-۳)$$

که  $\phi$  فاز حاصل برای پیکسل است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، فاز به دلیل پراکنده‌سازهای فراوان موجود در عنصر تفکیک، تصادفی است. با این وجود به دلیل حرکت بین رادار و زمین، فاز تنها به فاصله و خاصیت شکست اتمسفر در طول موج رادار بستگی دارد که در این هنگام آن را واحد فرض می‌کنیم:

$$\phi(R, X) = \frac{-4\pi}{\lambda} R + \phi_{\text{scat}}(R, X) \quad (۷-۳)$$

- 1- Base Line
- 2- Perpendicular Baseline



که اولین عبارت سمت راست رابطه فاز ناشی از مسیر مدور بین سنجنده و مرکز عنصر تفکیک و  $\phi_{\text{scat}}$  فاز پراکنده‌سازی است.

دو تصویر SAR به اصطلاح co-registered شده و بنابراین پیکسل‌های مشابه در هر تصویر متناظر با نقطه‌ای مشابه در روی زمین خواهند بود. اینترفروگرام از تلفیق متناظر دو تصویر SAR از یک منطقه به دست می‌آید:

$$i = s_1(R_1, x_1) s_2^*(R_2, X_2) = \square s_1(R_1, x_1) \square s_2(R_2, X_2) \square \exp(j\phi_{\text{int}}(R_1, R_2, X_1, X_2)) \quad (۸-۳)$$

که فاز تداخل‌سنجی برابر است با:

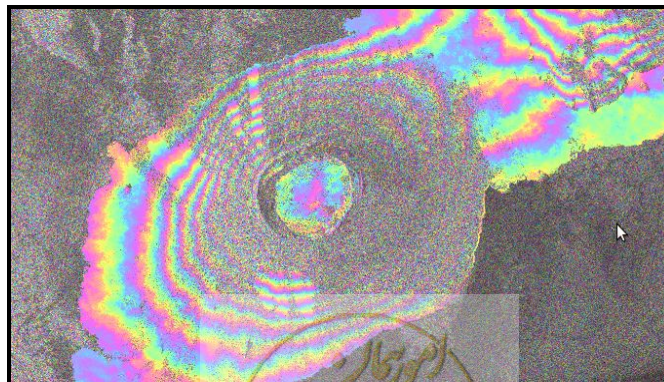
$$\phi_{\text{int}}(R_1, R_2, X_1, X_2) = \frac{-4\pi}{\lambda} \Delta R + \phi_{\text{scat},1}(R_1, x) - \phi_{\text{scat},2}(R_2, x) \quad (۹-۳)$$

و اختلاف مقادیر رنج همان‌طور که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است برابر است با  $\Delta R$ .

چنانچه در بالا ثابت شد  $\phi_{\text{scat}}$  تعیینی است و در نتیجه این معنی دار خواهد بود اگر انتظار داشته باشیم که  $\phi_{\text{scat},1}$  برابر با  $\phi_{\text{scat},2}$  باشد. این مساله کاملاً صحیح نیست، چراکه اختلاف در زاویه‌های تابش در دو مشاهده باعث مقدار فاز نویزی باقی‌مانده می‌شود.

$$\phi_{\text{int}} = \frac{-4\pi}{\lambda} \Delta R + \phi_{\text{noise}}$$

البته منشاءهای دیگری از فازهای نویز می‌توانند وجود داشته باشند و در واقع اطلاعات بیش‌تری در بزرگای نسبی  $\phi_{\text{noise}}$  وجود دارد. اختلاف فاز برای هر نقطه روی زمین در اینترفروگرام عددی است که بین صفر تا  $360^\circ$  درجه تغییر می‌کند. نقطه مجاور زمینی مقدار دیگری از اختلاف فاز به دست می‌دهد که نشان‌گر تاثیر اختصاصی تغییر مسیر است. برای مجموعه‌ای از نقاط روی زمین، دامنه  $360^\circ$  درجه تغییر فاز را می‌توان با  $256$  سطح خاکستری و به صورت فرینج‌هایی با سطوح مختلف نمایش داد. یک تصویر اینترفروگرام از تعداد زیادی از چنین فرینج‌هایی ساخته شده است (شکل ۳-۱۲). یک فرینج را می‌توان مجموعه‌ای از کنتورها دانست که هر یک سطح خاکستری واحدی را نمایان می‌کنند. اختلاف فاز ثابت در یک فرینج به طور مستقیم با اختلاف مسیر ثابت وابسته است. به بیانی اختلاف مسیر نیز تابعی از ارتفاع زمین است، چراکه به فاصله زمین تا ماهواره تاثیر می‌گذارد. بنابراین اختلاف مسیر ثابت را می‌توان به ارتفاع ثابت نسبت داد. مثلاً کنتورهای اختلاف فاز داخل یک فرینج، شبیه کنتورهای ارتفاعی هستند [۲۴].



شکل ۳-۱۲- اینترفروگرام آتشفشان Alcedo که اثر توپوگرافی از روی آن برداشته نشده است [۴۳]



با توجه به (شکل ۳-۱۱) با داشتن اطلاعات  $H$  و رنج  $R_1$ ، اگر زاویه  $\theta_1$  به دقت معلوم باشد، می‌توان  $Z$  را برای هر نقطه از زمین به دست آورد. از آنجا که  $\theta_1$  با دقت کم‌تر از یک درجه در اختیار است، پس می‌توانیم توپوگرافی را با دقت کافی به دست آوریم. تنها با تلفیق اطلاعات تصویر دوم SAR است که می‌توان مقدار دقیق  $\theta_1$  و سپس  $Z$  را به دست آورد. هندسه تصویربرداری تداخل‌سنجی SAR مشابه تصاویر استریوگرافیک است، دو خط پرواز موازی که زمین را با دو زاویه نگاه متفاوت نگاه می‌کنند. برخلاف فنون استریوگرافیک که به کنتراست تصویر نیاز دارد و پارالاکس پراکنده‌سازهای انتخاب شده برای تعیین ارتفاع به کار برده می‌شود، تداخل‌سنجی SAR از اطلاعات فاز تداخل‌سنجی استفاده می‌کند.

بر اساس روابط کسینوس‌ها:

$$\sin(a-\theta) = \frac{(R_2 + \Delta R)^2 - R_1^2 - B^2}{2R_1B} \quad (11-3)$$

$$Z = H - R_1 \cos\theta$$

مقدار یا زاویه فاز (و در نتیجه اختلاف فاز در یک تداخل نما) کاملاً مشخص نیست، ولی مقدار آن از  $0^\circ$  تا  $360^\circ$  درجه تغییر می‌کند. مثلاً فاز در یک دامنه ثابت از زاویه بین  $0^\circ$  تا  $360^\circ$  درجه قرار گرفته است. برای محاسبه مدل ارتفاعی و ارتفاع یک منطقه، فرینج‌های تداخل نما بایستی واپیچیده<sup>۱</sup> شوند. مثلاً مضرب صحیحی از  $360^\circ$  درجه به اختلاف فاز در هر پیکسل اضافه شود. اگر زمین هموار باشد، واپیچش چنین تداخل‌نمایی به ایجاد تصویری با شدت خاکستری ثابتی منجر می‌شود. اگر اینترفروگرام از یک منطقه کوهستانی باشد، واپیچش به تصویری با افزایش شدت خاکستری همراه با افزایش ارتفاع می‌انجامد [۲۴].

در روش مسیر مکرر، جدایش زمانی<sup>۲</sup> و همچنین مکانی دو مشاهده مهم است. همانند خط مبنای مکانی، زمان بین مشاهدات خط مبنای زمانی  $T$  نامیده می‌شود. خط مبنای زمانی غیر صفر به معنای تغییر سطح زمین در فاصله زمانی دو مشاهده است. این تغییر نیازمند تغییر شکل بزرگ مقیاس پوسته (کم‌تر از یک کیلومتر) است که طی حوادثی مانند زمین‌لرزه، حرکت یخچال یا فرونشینی رخ می‌دهد. اگر حرکت منطقی باشد، سپس فاز همراه با تغییر در رنج اضافه شده به طور مستقیم به فاز تداخل‌سنجی برابر است با:

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{motion}} + \phi_{\text{noise}} \quad (12-3)$$

- 1- Unwrapping
- 2- Temporal Baseline



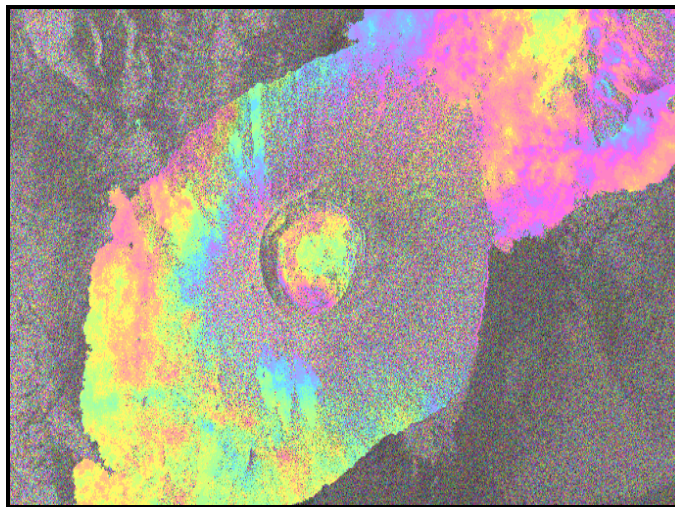


InSAR به شدت به تغییر شکل حساس است به نحوی که اندازه‌گیری در حد سانتی‌متر و کم‌تر را امری معمول ساخته است. در عین حال فاز تداخل‌سنجی کل شامل اثرات توپوگرافی، حرکت پوسته زمین، اثرات متغیر اتمسفر بین مشاهدات و نویز است.

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{moion}} + \phi_{\text{atmos}} + \phi_{\text{noise}} \quad (۱۳-۳)$$

### ۳-۹- تداخل‌سنجی تفریقی<sup>۱</sup>

کاربرد اولیه تداخل‌سنجی SAR تخمین توپوگرافی است. با این وجود یکی از کاربردهای پیشرفته این روش در شناسایی جابه‌جایی سطح ناشی از حوادث طبیعی مانند زمین‌لرزه و زمین‌لغزش و یا غیرطبیعی همانند فرونشست ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی است. در این روش از تصویر SAR در دو زمان مختلف استفاده می‌شود تا جابه‌جایی سطح در آن دوره شناسایی گردد. نخست یک تداخل نما ایجاد می‌شود و با آن توپوگرافی قبل از حادثه تعیین می‌گردد. سپس تداخل‌نمای دوم توپوگرافی بعد از حادثه را نمایان می‌کند. با تفریق یک تداخل‌نما از دیگری، فرینج‌های مربوط به توپوگرافی معمول حذف شده و آنچه باقی می‌ماند، تغییر ایجاد شده در توپوگرافی یا جابه‌جایی است (شکل ۳-۱۳).



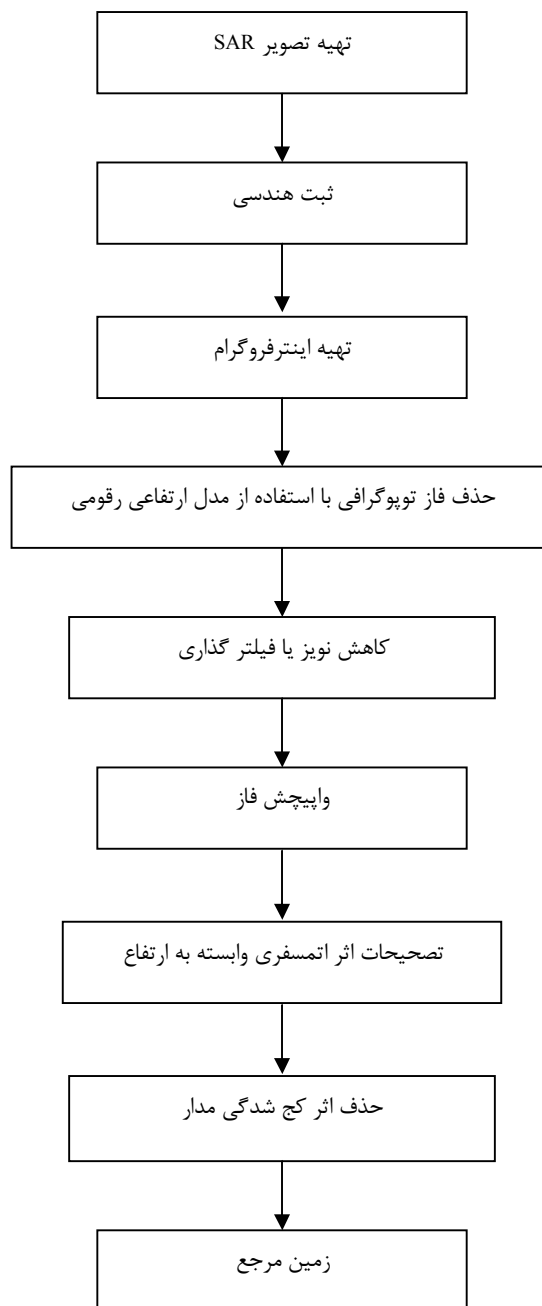
شکل ۳-۱۳- تداخل‌نمای تفریقی [۴۳]

هم اکنون دو روش برای تداخل‌سنجی تفریقی وجود دارد:

استفاده از سه دسته داده (یا بیش‌تر) که به اختصار ۳-Pass نامیده می‌شود. در این روش یک تداخل‌نما با استفاده از اختلاف فاز دو تصویر اول و دوم و تداخل‌نمای دوم نیز از اختلاف فاز دو تصویر دوم و سوم ایجاد می‌شوند. سپس دو تداخل‌نمای حاصل از هم تفریق می‌شوند تا تداخل‌نمای تفریقی حاصل گردد.

استفاده از دو دسته داده به همراه یک مدل ارتفاعی: در این روش تنها دو تصویر SAR به کار می‌روند. تداخل‌نما با استفاده از یک مدل ارتفاعی رقومی اولیه (و اطلاعات دقیق محل ماهواره در زمان تصویربرداری، بردارهای مداری) ایجاد می‌شود. سپس تداخل‌نمای بعدی از تداخل‌نمای اولیه تفریق می‌شود تا اثر ارتفاع زمین حذف شود. آنچه باقی می‌ماند نشان دهنده تغییر یا جابه‌جایی است [۴۳].

نمودار (۱-۳) مراحل تشکیل یک تداخل‌نمای تفریقی و یا به عبارتی نقشه جابه‌جایی سطحی را نشان می‌دهد.



نمودار ۱-۳- مراحل تشکیل اینترفروگرام [۱۳]



### ۳-۱۰- شرط تداخل سنجی

سطح ناحیه‌ای از زمین که با یک پیکسل تصویربرداری نشان داده می‌شود شامل صدها عارضه زمینی است. هر کدام از این عوارض با یک ضریب انعکاسی مختلط در تشکیل یک پیکسل نقش دارند. با فرض این که  $L$  بیانگر طول پیکسل زمینی در راستای عمود بر محور پرواز ماهواره باشد،  $\lambda$  طول موج رادار و  $\theta_1$  و  $\theta_2$  بیانگر زوایای میل به ترتیب برای تصویر اول و دوم باشند، تفاضل فاصله رفت و برگشت تارگت‌های دو انتهای یک پیکسل  $2L \sin \theta$  است. از این رو شرط اصلی برای تداخل سنجی به صورت رابطه ریاضی ۳-۱۴ می‌باشد.

$$2L(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) < \lambda \quad (3-14)$$

شرط تداخل سنجی راداری این است که اختلاف فاز پیکسل‌های متناظر دو تصویر بیش از نیمی از طول موج نباشد. این شرط جدایی (فاصله) مسیر مداری ماهواره‌ها را در حین اخذ دو تصویر را محدود به ۱ کیلومتر یا کم‌تر می‌کند. خوشبختانه مدارهای ماهواره طوری طراحی شده‌اند که به طور یکسان بعد از طی پریود زمانی (سیکل مداری) تصویربرداری را تکرار می‌کنند و به طور کلی این شرط در آن‌ها برقرار است. شیب محلی زمین در این شرایط تاثیر دارد. در شرایط نزدیک به حد تداخل سنجی (۳-۱۴) حتی یک شیب ملایم با توجه اشتباه، فرینج‌ها را محو خواهد کرد. طبق رابطه (۳-۱۴) زاویه میل تند، توان تفکیک زیاد و طول موج کوتاه همگی شرایط را سخت‌تر می‌کنند. همچنین راستای مشاهده نیز باید برای دو تصویر مشابه باشد [۹].

### ۳-۱۱- تطابق<sup>۱</sup>

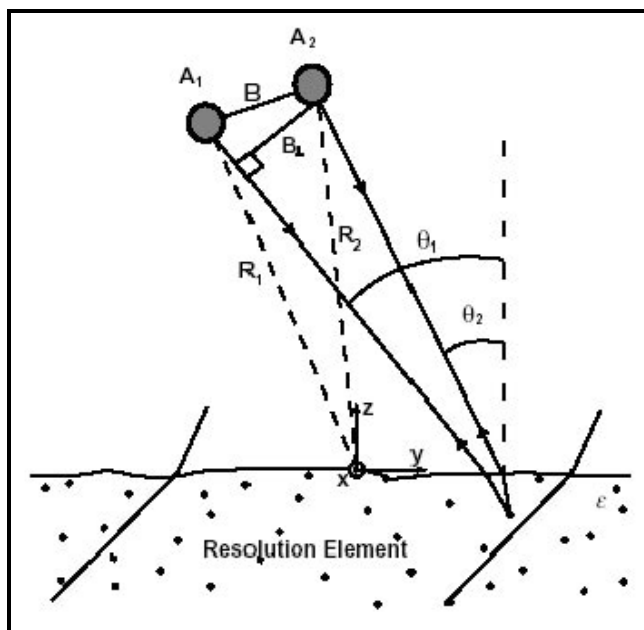
تطابق تداخل سنجی یا وضوح یک اینترفروگرام، مقایسه‌ای آماری بین پیکسل‌ها در مکان مشابه‌ای بین دو تصویر SAR است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، مولفه تصادفی فاز  $\phi_{\text{noise}}$  است که در کنار مولفه‌های منطقی  $\phi_{\text{topo}}$ ،  $\phi_{\text{motion}}$  و  $\phi_{\text{atmos}}$  قرار می‌گیرد. مقدار تطابق معیاری است از مقدار مشارکت  $\phi_{\text{noise}}$  در فاز تداخل سنجی کل است. در منابع مختلف از تطابق برای بررسی دقت فاز منطقی تخمین‌زده شده استفاده می‌شود. براین اساس عوامل ایجاد عدم تطابق<sup>۲</sup> عبارت هستند از: عدم تطابق مکانی، عدم تطابق زمانی و عدم تطابق حرارتی [۴۳].

1- Correlation  
2- Decorrelation



### ۳-۱۱-۱- عدم تطابق مکانی<sup>۲</sup>

به دلیل جدایش مکانی دو آنتن که تداخل سنج را تشکیل می‌دهند، زاویه تابش یک تصویر کمی از دیگری متفاوت است که در (شکل ۳-۱۴) نشان داده شده است. عدم تطابق ناشی از این جدایش، عدم تطابق مکانی نامیده می‌شود، ولی با نام‌های عدم تطابق خط مبنا و یا هندسی نیز شناخته شده است.



شکل ۳-۱۴- هندسه مشاهده تداخل سنجی برای پراکنده‌سازی حجمی که A1 و A2 دو آنتن رادار هستند و  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک موثر محیط برف، حاشیه نماینده عنصر تفکیک با محیط برف و یخ دچار شکست شده است [۲۴].

### ۳-۱۱-۲- عدم تطابق حرارتی

زمانی که سیگنال دریافتی به سطح نویزی حرارتی برخورد کند، می‌تواند عدم تطابق وجود داشته باشد، چراکه نویزها در دو سیگنال با هم تطبیق نمی‌کنند.

### ۳-۱۱-۳- عدم تطابق زمانی<sup>۱</sup>

ضریب تطابق همراه با تغییرات غیرمنطقی محیط پراکندگی بین دو مشاهده همانند تغییر تصادفی مکان و اندازه پراکنده‌سازها یا نوسانات مکانی خواص الکتریکی محیط پراکندگی را  $R_{temporal}$  گویند. برای مثال نواحی با پوشش گیاهی متراکم اغلب مقدار بیش‌تری از عدم تطابق را به دلیل حرکت برگ‌ها و شاخه‌ها در باد و یا رشد آن‌ها در طول



زمان باعث می‌شوند. آب مایع نقش مهمی در عدم تطابق ایفا می‌کند. زمین‌هایی که محتوی آب مایع متغیر هستند، خواص پراکندگی امواج رادیویی آن‌ها نیز بین دو مشاهده تغییر خواهد کرد.

### ۳-۱۲- هم‌دوسی<sup>۱</sup> تعیین‌کننده کیفیت اینترفروگرام

میزان همبستگی دو تصویر SAR با همدیگر توسط هم‌دوسی  $\gamma$  برآورد می‌شود که مشابهت دو تصویر SAR مختلط را ارائه می‌کند و به عنوان شدت ضریب همبستگی مختلط تعریف می‌شود. تصویر هم‌دوسی مختلط بین دو تصویر به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\gamma_c = \frac{E\{M.S^*\}}{\sqrt{E\{M.M^*\}.E\{S.S^*\}}} = |\gamma_c| \exp(j\phi_0) \quad (15-3)$$

که در آن  $\gamma_c$  هم‌دوسی مختلط،  $M$  تصویر اصلی مختلط،  $S$  تصویر فرعی مختلط،\* مزدوج مختلط،  $E\{\cdot\}$  امید ریاضی می‌باشد. مقدار هم‌دوسی توسط  $|\gamma_c|$  و برآورده‌کننده آن به صورت زیر تعریف می‌شود:  
از هم‌دوسی با میانگین‌گیری تعدادی پیکسل به صورت زیر برآورد می‌شود.

$$\hat{\gamma} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i S_i^*}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i M_i^* \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i S_i^*}} \quad (16-3)$$

مقدار هم‌دوسی اینترفرومتریک از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، مقدار ۰ دلالت بر عدم هم‌دوسی کامل و نویزی دارد و هیچ اطلاعات مفیدی در اینترفروگرام قابل استخراج نیست و مقدار ۱ دلالت بر عدم وجود نویز در اینترفروگرام و هم‌دوسی کامل دارد. در اغلب موارد مقدار هم‌دوسی بین  $0 < \hat{\gamma} < 1$  متغیر است.

### ۳-۱۳- مزایا و معایب تکنیک تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی

هر تکنیکی مزایا و معایب مختص به خود را دارد. برخی از آن‌ها با وجود مشکلاتی که دارند به دلیل داشتن مزایای زیاد مانند تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد استقبال دانشمندان گردیده است. در این جا به برخی از مزایا و معایب این تکنیک می‌پردازیم.



## ۳-۱۳-۱- مزایا

- چون یک سیستم فعال است، قابلیت اندازه‌گیری در تمامی ساعات شبانه روز را دارا می‌باشد.
- چون از امواج مایکروویو استفاده می‌کند، قابلیت نفوذ در پوشش‌های ابری را دارد، بنابراین در شرایط آب و هوایی متفاوت می‌تواند تصویربرداری کند.
- قدرت تفکیک مکانی بالایی دارد.
- پوشش وسیعی از منطقه مورد مطالعه خواهد داشت.

## ۳-۱۳-۲- معایب

- اندازه‌گیری تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی تنها از یک بعد یعنی راستای دید ماهواره صورت می‌گیرد و ما قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های افقی زمین نیستیم.
  - در مناطق با تطابق<sup>۱</sup> پایین نمی‌توان از آن استفاده کرد [۴۳].
- معایب ذکر شده در بالا، معایب کلی تداخل‌سنجی راداری هستند. در حالی که برای پایش زمین لغزش محدودیت‌های دیگری برای ما به وجود می‌آورد. از آنجایی که زمین لغزش در مناطق کوهستانی رخ می‌دهد و هندسه تداخل‌سنجی راداری جانب‌نگر است، تمام شیب‌ها در این مطالعه قابل پایش نیستند، بنابراین لازم است به بررسی رابطه بین زاویه شیب و زاویه تابش رادار<sup>۲</sup> و رابطه بین راستای دید ماهواره<sup>۳</sup> و جهت لغزش (جهت شیب) بپردازیم.

## ۳-۱۴- رابطه بین زاویه شیب و جهت لغزش با زاویه تابش رادار و راستای دید ماهواره

پایش دامنه‌های لغزشی در تداخل‌سنجی راداری بستگی به جهت لغزش و زاویه شیب دارد. به عنوان مثال، لغزش‌های غربی-شرقی در اینترفروگرام‌های حاصل از تصاویر مربوط به مدار شمالی-جنوبی<sup>۴</sup> قابل پایش نیستند. در این بخش به بررسی رابطه بین راستای دید ماهواره و جهت لغزش می‌پردازیم.

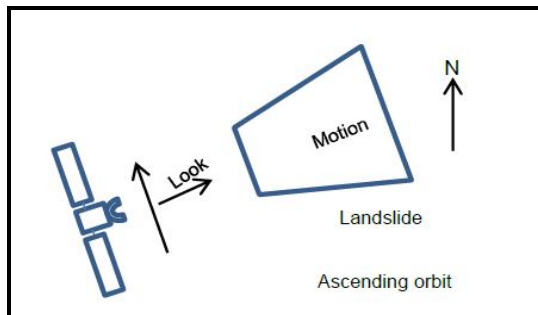
## ۳-۱۴-۱- رابطه بین راستای دید ماهواره و جهت لغزش

حالت ایده‌آل: همان‌طور که در (شکل ۳-۱۵) دیده می‌شود، بهترین حالت این است که بردار لغزش در راستای دید ماهواره باشد. در این وضعیت، سطح دامنه و لغزش آن در اینترفروگرام‌ها قابل مشاهده می‌باشد. به عبارت دیگر، شیب‌های

1- Coherence  
2- Incidence angle  
3- Line of Sight (LOS)  
4- Descending

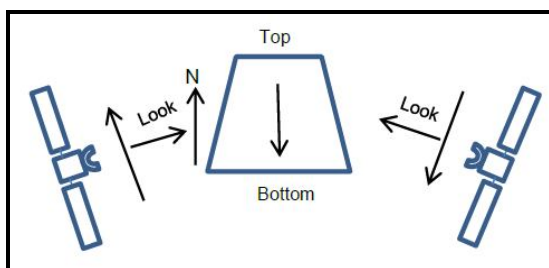


غربی - شرقی در اینترفروگرام‌های حاصل از تصاویر به دست آمده از مدارهای جنوبی- شمالی<sup>۱</sup> قابل شناسایی و پایش می‌باشند [۱۱].



شکل ۳-۱۵- حالت ایده‌آل جهت لغزش و راستای دید ماهواره Ascending

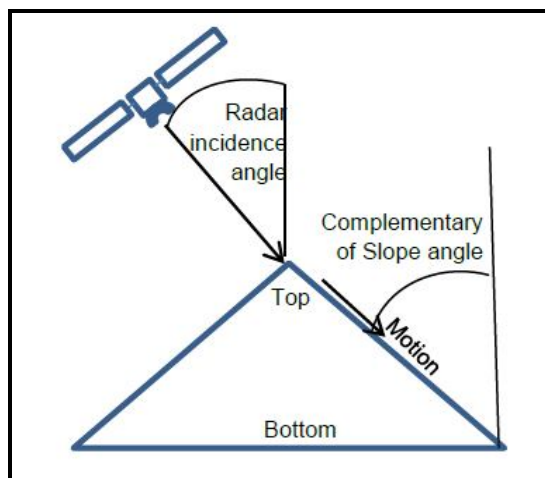
حالت نه چندان مناسب: زمانی که متمم زاویه بین دو بردار لغزش و راستای دید ماهواره زاویه بزرگی باشد (شکل ۳-۱۶). به عبارت دیگر شیب‌های شمالی- جنوبی برای پایش چندان مناسب نیستند.



شکل ۳-۱۶- حالت نه چندان مناسب جهت لغزش و راستای دید ماهواره Ascending

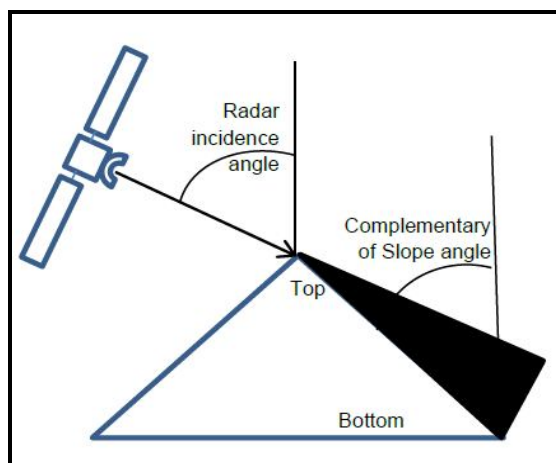
### ۳-۱۴-۲- رابطه بین زاویه شیب و زاویه تابش رادار

حالت ایده‌آل: ایده‌آل‌ترین حالت زمانی رخ می‌دهد که متمم زاویه شیب لغزش برابر با زاویه تابش رادار باشد (شکل ۳-۱۷). در این حالت قادر به اندازه‌گیری صحیح بردار حرکت و جابه‌جایی هستیم [۱۱].



شکل ۳-۱۷- حالت ایده‌آل زاویه شیب لغزش و زاویه تابش رادار

حالت نامناسب: در صورتی که متمم زاویه شیب کوچک‌تر از زاویه تابش رادار باشد به دلیل رخداد پدیده سایه هیچ مشاهده‌ای از میزان جابه‌جایی نخواهیم داشت (شکل ۳-۱۸).

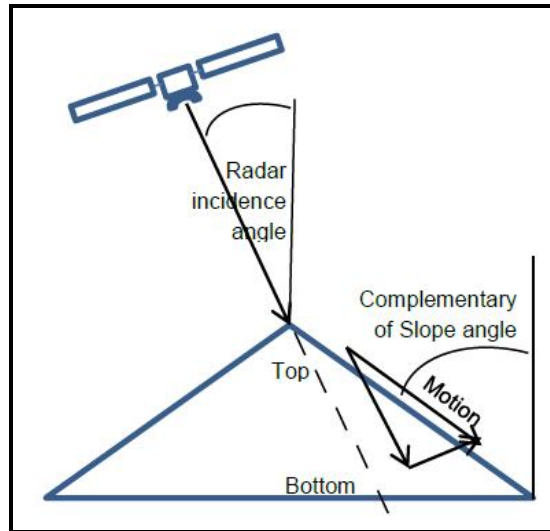


شکل ۳-۱۸- حالت نامناسب زاویه شیب لغزش و زاویه تابش رادار (عدم امکان اندازه‌گیری)

حالت نه چندان مناسب: زمانی که متمم زاویه شیب بزرگ‌تر از زاویه تابش رادار باشد تنها بردار جابه‌جایی در راستای مولفه موازی با راستای دید ماهواره قابل اندازه‌گیری می‌باشد [۱۱]. به این ترتیب نبایستی انتظار داشته باشیم که تمامی دامنه‌های تحت لغزش را در منطقه مورد نظر پایش و شناسایی کنیم (شکل ۳-۱۹). به این ترتیب، شیب‌های شرقی - غربی در اینترفروگرام‌های حاصل از تصاویر به دست آمده از مدارهای جنوبی - شمالی و شیب‌های غربی - شرقی در اینترفروگرام‌های حاصل از مدارهای شمالی - جنوبی قابل پایش است.







شکل ۳-۱۹- حالت نه چندان مناسب زاویه شیب لغزش و زاویه تابش رادار (اندازه‌گیری مولفه موازی با راستای دید ماهواره بردار جابه‌جایی)

### ۳-۱۵- نتیجه‌گیری

ابتدا به تعریفی از رادار و تاریخچه آن پرداختیم و سپس چگونگی پیدایش تداخل‌سنجی راداری دهانه مصنوعی و علت پیدایش آن را ارائه نمودیم. همچنین چگونگی محاسبه اختلاف فاز و جابه‌جایی ناشی از آن را در رابطه بیان کردیم. در انتها نیز به برخی از مزایا و معایب آن پرداختیم. اما از آنجا که اثرات اتمسفری و دیگر مولفه‌های نویزی ناخواسته موجب کاهش نسبت سیگنال به نویز می‌شود بایستی از تکنیک مجموعه کوتاهی خطوط مبنا و روش کم‌ترین مربعات استفاده نمود. در فصل آینده تئوری و مبانی این تکنیک به تفصیل بیان می‌شود.





# فصل ۴

---

---

## مبانی و تئوری مجموعه کوتاه‌ها خطوط مبنا و روش کمترین مربعات





## ۴-۱- مقدمه

در فصل سوم تئوری و مبانی تداخل‌سنجی راداری و نحوه تصویربرداری راداری به تفصیل ارائه گردید. سپس چگونگی محاسبه اختلاف فاز حاصل از تداخل‌سنجی بیان شد. دیدیم که مولفه‌های نویزی ناخواسته‌ای ناشی از اتمسفر و خطاهای پردازشی و... در معادلات وارد می‌شوند و سبب کاهش نسبت سیگنال به نویز می‌گردند. حال بایستی به کمک تکنیک مجموعه خط مبناهای کوتاه و روش کم‌ترین مربعات اثرات اتمسفری و نویزی دیگر را مینیمم کنیم.

## ۴-۲- اساس روش مجموعه خطوط مبنا

تکنیک تداخل‌سنجی راداری قادر به شناسایی و کشف پدیده‌های با فرکانس بالا مانند آتشفشان و زلزله است و برای جابه‌جایی‌های آهسته جوابگو نمی‌باشد، چرا که با عدم همبستگی زمانی روبه‌رو می‌شویم. بنابراین نمی‌توانیم از اینترفروگرام‌های حاصل از فواصل زمانی طولانی، اطلاعاتی را بازیابی نماییم.

راه حل پیشنهادی به جای استفاده از اینترفروگرام‌های با فواصل زمانی طولانی، استفاده از اینترفروگرام‌های با فواصل زمانی کوتاه می‌باشد که البته بایستی محدودیت کوتاه بودن خط مبنا را نیز در نظر بگیریم. در این حالت بایستی سه شرط برای تولید اینترفروگرام‌های جدید اعمال نماییم که عبارتند از: کوتاهی بازه زمانی، کوتاهی خط مبنا، مناسب بودن مقادیر همدوسی. با اعمال این قیود، جفت‌های تشکیل دهنده اینترفروگرام‌های موسوم به کوتاهی خطوط مبنا تشکیل می‌شوند و پردازش تداخل‌سنجی برای هریک به صورت جداگانه انجام می‌گیرد.

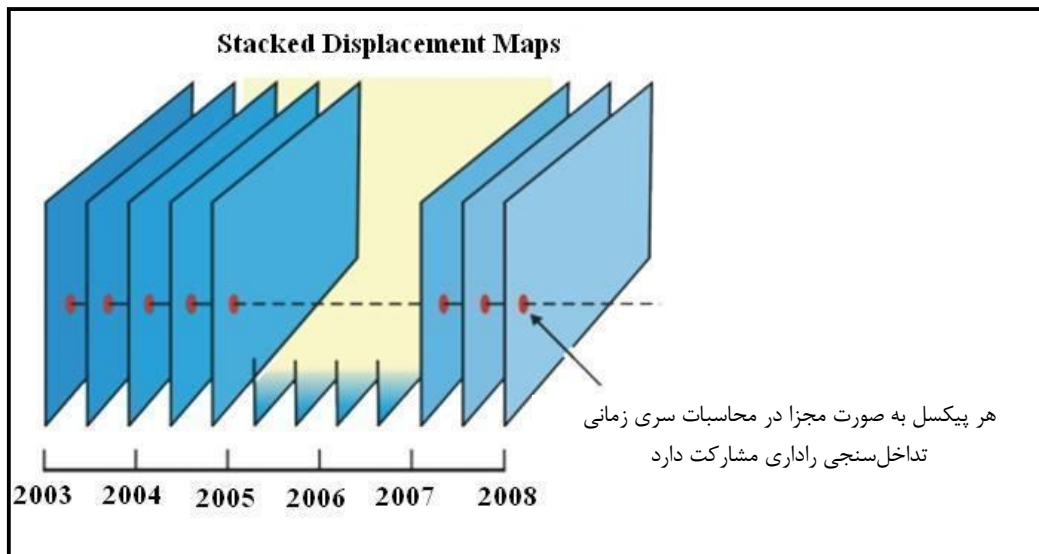
عموماً بهبود قابلیت تداخل‌سنجی راداری برای مطالعات مخاطرات طبیعی می‌باشد در این راهنما روشی برای حل این مساله ارائه می‌شود. در روش کم‌ترین مربعات، مجموعه‌ای از تصاویر اینترفرومتریک با همدیگر ادغام می‌شوند که در نهایت سری‌های زمانی رشد جابه‌جایی‌ها حاصل شود. این روش با استفاده از افزونگی اطلاعات در اینترفروگرام‌های از نظر زمانی پوشش دار به دست می‌آید. بنابراین تاثیرات هم خطاهای پردازشی و نویز عدم همبستگی کاهش پیدا می‌کند.

## ۴-۳- روش کم‌ترین مربعات

روش ارائه شده روی مجموعه‌ای از تصاویر جابه‌جایی اینترفرومتریک منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد. تمام نقشه‌های جابه‌جایی نسبت به تاثیرات توپوگرافی، جابه‌جایی مدارات تصحیح شده‌اند و بعد از عملیات بازیابی فاز، تبدیل به جابه‌جایی مطلق در راستای خط دید ماهواره شده‌اند. بنابراین، روش کم‌ترین مربعات، مستقل از پردازش تداخل‌سنجی راداری می‌باشد و به عنوان یک مرحله بعد از پردازش تداخل‌سنجی به طور مجزا در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، هنگام ایجاد پایگاه داده به منظور استفاده از این روش، بهتر است از یک فرایند پردازش تداخل‌سنجی کاملاً سازگار و واحد استفاده گردد که به طور بنیادی شامل ثبت هندسی همه تصاویر SAR به یک مرجع یکسان برای همه پایگاه داده قبل از تشکیل اینترفروگرام‌ها می‌باشد. مزیت این کار این است که اینترفروگرام‌های منتخب همه با همدیگر



در یک سیستم مختصات مشترک در حد زیر پیکسل قرار داده می‌شوند، که در نتیجه امکان ادغام آن‌ها به طور مستقیم در قالب مقادیر فاز مطلق بازیابی شده (منظور همان نقشه‌های جابه‌جایی در واحد اندازه‌گیری مطلوب) میسر می‌سازد. در این صورت نیازی به زمین مرجع کردن تصاویر (به عنوان مرحله پردازشی که منبع خطای اضافی را به داده‌های ورودی برای سرشکنی کم‌ترین مربعات تحمیل می‌کند) نیست. بنابراین ورودی به روش کم‌ترین مربعات مجموعه‌ای از تصاویر جابه‌جایی اینترفرومتریک می‌باشد که همه با دقت زیر پیکسل با هم ادغام شده‌اند و بیانگر جابه‌جایی مطلق در واحد فاز یا سانتی‌متر در امتداد دید ماهواره می‌باشند (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱- روی هم قرار دادن نقشه‌های جابه‌جایی اینترفرومتریک در یک سیستم مختصات [۱]

ورودی کم‌ترین مربعات، نقشه‌های جابه‌جایی مطلق به دست آمده از جفت داده‌های با فواصل زمانی کوتاه و با در نظر گرفتن محدودیت کوتاه بودن خط مبنا می‌باشد. به عبارت دیگر اینترفروگرام‌های حاصل از جفت داده‌ها نسبت به تاثیرات توپوگرافی و جابه‌جایی مدارات تصحیح شده‌اند و بعد از عملیات بازیابی فاز تبدیل به جابه‌جایی مطلق در راستای دید ماهواره شده‌اند که به صورت بردار زیر نمایش داده شده است:

$$y = [I_1 I_2 \dots I_N] \quad (1-4)$$

مولفه‌های بردار  $y$  بیانگر  $N$  نقشه جابه‌جایی مطلق حاصل از  $M$  تصویر SAR اخذ شده در روزهای می‌باشند. بنابراین مشاهدات  $M$ ، نقشه جابه‌جایی مطلق است و با استفاده از مدل زیر مجهولات که عبارتند از جابه‌جایی در  $M$  تصویر اخذ شده در زمان‌های برآورد می‌شوند:

$$X = [D_{T_1} D_{T_2} \dots D_{T_M}] \quad (2-4)$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= d_{t_2} - d_{t_1} \\ I_2 &= d_{t_3} - d_{t_2} \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow y = Ax$$



که ماتریس ضرایب  $A$  به صورت زیر است:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \dots \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P Y$$

به این ترتیب می‌توانیم مقدار جابه‌جایی را برآورد کنیم.

#### ۴-۴- نتیجه‌گیری

روش سرشکنی کم‌ترین مربعات نسبت به برآورد تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌ها از طریق آنالیز هر اینترفروگرام به تنهایی دارای چند مزیت است. کم‌ترین مربعات برای استخراج پیشرفت مکانی و زمانی جابه‌جایی یعنی تصویری از رشد جابه‌جایی در طول زمان میسر می‌گردد. حتی اگر هیچ اینترفروگرام مستقیمی بین تاریخ‌های پشت سرهم در دسترس نباشد به دلایلی چون نداشتن منطقه تصویر نشده باشد یا خط مبنای مکانی بزرگ باشد. علاوه بر این استفاده از روش کم‌ترین مربعات تاثیر خطاهای پردازشی تداخل‌سنجی از مرحله قبل تا حدی کاهش پیدا می‌کند که در هر اینترفروگرام می‌تواند متفاوت باشد.

از طرف دیگر به کمک روش کم‌ترین مربعات اغتشاشات اتمسفری قابل شناسایی یا حذف کردن نیستند. در حقیقت، از آنجایی که تاثیرات اتمسفری به تصاویر مرتبط می‌شوند، فرض اینکه اینترفروگرام‌های محاسبه شده از دو جفت پشت سرهم کاملاً از هم مستقل هستند، منطقی است. بنابراین، روش ارائه شده از این لحاظ نسبت به اینترفروگرام‌های تنها یک مزیت محسوب می‌شود. البته الگوریتم‌های دیگری برای شناسایی تاثیرات اتمسفریک می‌تواند استفاده شود و همچنین می‌تواند تاثیرات خطاهای توپوگرافی، خطاهای مداری نیز به عنوان ترم‌های اضافی به مدل استفاده شده در سرشکنی کم‌ترین مربعات در نظر گرفته شد. مشابه آنچه که lanari و همکاران برای نظارت بر تغییر شکل‌ها به کمک خط مبناهای کوتاه<sup>۱</sup> انجام داده‌اند.

روش کم‌ترین مربعات در آنالیز سری زمانی نیاز به ثبت هندسی تمام تصاویر نسبت به یک تصویر اصلی دارد که این محدودیت اصلی این روش به شمار می‌رود. هر چند این محدودیت در برخی از نرم‌افزارهای محاسبه مجموعه کوتاه‌ی خطوط مبنا مانند نرم‌افزار StaMPS حل شده است.

1- Small Baseline Subset (SBAS)







# فصل ۵

---

---

تداخل سنجی به کمک

پراکنده‌سازهای پایا و آنالیز سری

زمانی





## ۵-۱- مقدمه

تداخل سنجی به روش عبورهای متوالی، همان گونه که در فصل سوم شرح داده شد، یک روش دقیق و با هزینه‌ی کم، جهت تهیه‌ی مدل رقومی زمین و اندازه‌گیری تغییرات و حرکات سطح زمین در یک پهنه‌ی بزرگ می‌باشد، که در نهایت توانایی تولید DEM با دقت چند متر و پایش تغییرات با دقت سانتی‌متر و در بهترین حالت چند میلی‌متر، را دارا می‌باشد. در حین پردازش‌های تداخل سنجی به منظور شناسایی اعوجاجات سطحی با سه منبع عمده‌ی خطا روبرو هستیم که باعث می‌شوند تا دقت تداخل سنجی کاهش پیدا کند. این سه عامل عبارت‌اند از: ناهمبستگی زمانی، نابستگی مکانی و یک‌نواخت نبودن اتمسفر در طول دوره‌ی تصویربرداری. این مشکلات سبب می‌شوند تا این روش با محدودیت باز فضایی اینترفروگرام‌های مورد استفاده و محدودیت روش در مناطقی که مقدار همبستگی پایینی دارند، مواجه باشد. یک راه حل استفاده از روش (PS) Permanent/Persistent Scatterer در تداخل سنجی راداری<sup>۱</sup> می‌باشد.

## ۵-۲- مبانی و تئوری روش (PS) Permanent/Persistent Scatterer

هدف اصلی PSInSAR شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که در بازه‌ی طولانی مدت تصویربرداری به هم‌بسته و هم‌دوس باقی می‌مانند. گاهی اوقات یک Scatterer بر سیگنال بازگشتی غالب می‌شود و سبب می‌شود تا همبستگی به مقدار زیادی افزایش پیدا کند. اساس این روش، شناسایی این نقاط، PSها است. در این صورت، از تمام زوج عکس‌ها می‌توان استفاده کرد و از آن‌ها جهت تشکیل اینترفروگرام استفاده نمود. برای این پیکسل‌ها می‌توان سیگنال متناظر با تاخیر اتمسفری را تخمین زد و سپس با پالایش کردن سری زمانی فازهای به دست آمده، برای هر پیکسل PS، این تاثیر را حذف نمود و در نهایت میزان جابه‌جایی در این نقاط را محاسبه کرد.

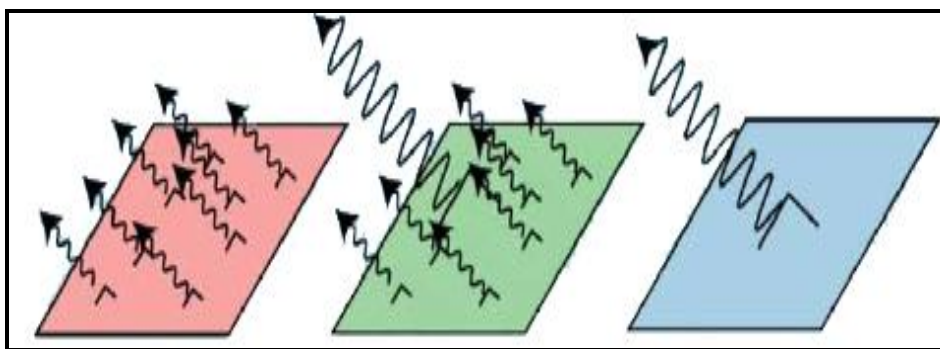
ناهمبستگی زمانی سبب می‌شود تا اندازه‌گیری‌های تداخل سنجی قابل اطمینان نباشد و یا به طور کلی میسر نشود (مخصوصاً در مناطق با پوشش گیاهی و دارای پوشش برف). به عبارتی، چنانچه خصوصیات الکترومغناطیس یا وضعیت Scatterer در محدوده‌ی زمانی اخذ داده تغییر کند ناهمبستگی زمانی افزایش می‌یابد. غیر یکنواختی اتمسفر سبب ایجاد یک پوشش فاز اتمسفری (APS<sup>۲</sup>) می‌شود که روی هر تصویر SAR قرار می‌گیرد و دقت تخمین تغییرات را به طور جدی تحت تاثیر قرار می‌دهد. رفتار طیفی APS مانند یک موج با طول موج کوتاه (متناسب با توزیع بخار آب در تروپوسفر) است و تاثیر آن بر روی مقدار هم‌دوسی متناظر با هر اینترفروگرام اجتناب‌ناپذیر است.

1- PSInSAR

2- Atmospheric Phase Screen



اگر ابعاد PS کوچک‌تر از ابعاد سلول تفکیک باشد، که به طور کلی نیز این چنین است، میزان هم‌بستگی این پیکسل‌ها، حتی برای اینترفروگرام‌های با باز بزرگ‌تر از طول مبنای بحرانی، مناسب است. به این ترتیب از مجموعه داده‌های بیش‌تری می‌توان جهت تداخل‌سنجی استفاده کرد. (شکل ۵-۱) چگونگی بازتاب سیگنال توسط پراکنده‌سازهای درون یک پیکسل زمینی را نشان می‌دهد. در مرحله‌ی آخر با حذف تاثیر اتمسفری می‌توان نتایج دقیق‌تری به دست آورد. در واقع مجموعه PSها، یک شبکه‌ی ژئودتیکی طبیعی، یا یک شبکه از نقاط کنترل ارتفاعی با تراکم بالا را ایجاد می‌کنند که به کمک آن‌ها می‌توان میزان تغییرات و جابه‌جایی‌ها را استخراج کرد. جهت شناسایی این پیکسل‌ها، در این روش به تعداد زیادی تصویر SAR (در الگوریتم‌های معمولی PS، معمولاً بیش از ۲۰ عدد) مورد نیاز است.



شکل ۵-۱- چگونگی بازتاب سیگنال توسط پراکنده‌سازهای درون یک پیکسل زمینی [۱]

نقطه‌ی آغاز کار مجموعه‌ای از اینترفروگرام‌های تفاضلی است که از یک تصویر اصلی مشترک استفاده می‌کنند. برای تهیه‌ی اینترفروگرام‌های تفاضلی نیاز به یک مدل رقومی زمین می‌باشد، که این مدل رقومی زمین می‌تواند از قبل موجود باشد یا با استفاده از بهترین زوج عکس راداری و شبیه‌سازی مدل رقومی زمین، تهیه شود.

تغییرات فاز یک پیکسل در تصاویر SAR به‌طور معمول ناشی از چند مورد می‌تواند باشد:

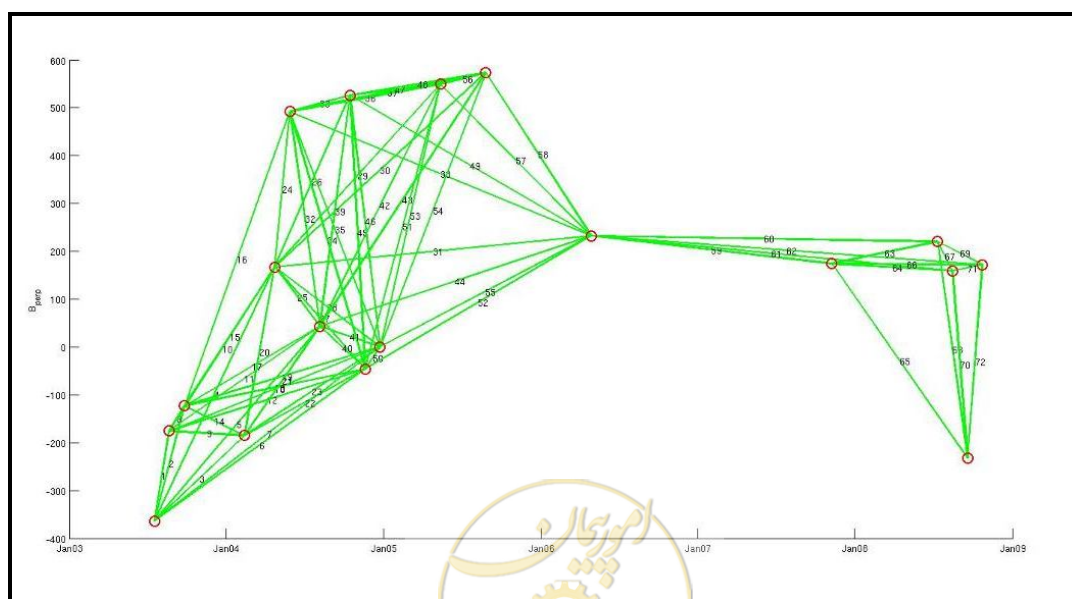
- تغییر موقعیت نسبی ماهواره و Scatterer.
  - تغییرات فیزیکی، الکترومغناطیسی و زمانی Scattererها.
  - تغییرات اتمسفری که به صورت APS روی اینترفروگرام‌ها تاثیر گذار است.
- هرچه جدایی زمانی و مکانی اخذ تصاویر کوتاه‌تر و شرایط اتمسفری آن‌ها مشابه‌تر باشد، دقت و کیفیت نتایج بهتر خواهد بود. با زیاد شدن طول جدایی مکانی به سمت مقدار بحرانی، فقط Scattererهای پایا، که ابعادشان کوچک‌تر از ابعاد سلول تفکیک است، جهت اندازه‌گیری قابل اعتماد هستند.
- بنابراین بعد از این که جفت تصاویر مناسب با سه شرط کوتاهی مربعات را انتخاب نمودیم، بایستی روش کم‌ترین مربعات را بر روی پیکسل‌های پایا انجام دهیم و آنالیز سری زمانی را برای آن‌ها انجام داد. به این ترتیب نتایج کم‌تر دارای اثرات اتمسفری هستند.



### ۵-۳- آنالیز سری زمانی

ورودی به آنالیز سری زمانی به روش کمترین مربعات، مجموعه‌ای از تصاویر جابه‌جایی اینترفرومتریک می‌باشد که همه با دقت زیر پیکسل با هم ادغام شده‌اند و بیانگر جابه‌جایی مطلق در واحد فاز یا سانتی‌متر در امتداد دید ماهواره می‌باشند. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، به کمک شروط کوتاهی خط مبنا می‌توانیم تعداد قابل توجهی اینترفروگرام تهیه نماییم. اما قبل از انجام بازیابی فاز و محاسبه فاز مطلق و در نهایت محاسبه جابه‌جایی مطلق و آنالیز سری زمانی، لازم است که اینترفروگرام‌های نویزی را حذف نماییم. اینترفروگرام‌های نویزی آن دسته از اینترفروگرام‌هایی هستند که جدایی مکانی و زمانی بالایی دارند و در عین حال مقدار همدوسی پایینی دارند. زیرا این اینترفروگرام‌های نویزی در مرحله بازیابی فاز دچار اشکال شده و منجر به ایجاد خطا در پردازش بازیابی فاز و در نهایت محاسبه جابه‌جایی مطلق خواهد شد. لذا بایستی آن‌ها را شناسایی کنیم تا موجب کاهش خطاهای بازیابی شویم.

لازم به ذکر است که جهت انجام آنالیز سری زمانی از نرم‌افزار StaMPS که توسط Andy Hooper در دانشگاه Delft توسعه داده شده، استفاده گردد. در این نرم‌افزار جهت انجام آنالیز سری زمانی به کمک روش SBAS، شبکه ایاز اینترفروگرام‌های به دست آمده از شروط کوتاهی خط مبنا ساخته می‌شود که همانند سایر شبکه‌های ژئودتیکی بایستی از پایداری و استحکام مناسبی برخوردار باشد. به عبارت دیگر، یال شناور نبایستی در آن وجود داشته باشد. همانند شبکه‌های ترازابی که ارتفاع یک نقطه را ثابت در نظر می‌گیریم و به کمک روش کمترین مربعات و با مشاهده اختلاف ارتفاع بین نقاط شبکه، ارتفاع نقاط دیگر را به دست می‌آوریم، در اینجا نیز بایستی تصویر مرجع اولیه را به عنوان مبنای زمانی در نظر بگیریم. به این ترتیب با به دست آوردن اینترفروگرام‌های با شروط کوتاهی خط مبنا و انجام عملیات بازیابی فاز جهت محاسبه فاز مطلق و در نهایت جابه‌جایی مطلق ورودی لازم جهت روش کمترین مربعات آماده خواهد بود. (شکل ۵-۲) شبکه مورد استفاده شده برای آنالیز سری زمانی یک پروژه که شامل ۱۷ بازه زمانی می‌شود را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲- شبکه اینترفروگرام‌های تولید شده در مرحله SBAS

توجه نمایید که این شبکه، شبکه اولیه SBAS می‌باشد و با شناسایی اینترفروگرام‌های نویزی (بال‌های شبکه) دست خوش تغییر می‌شود. لازم است خاطر نشان شود که هنگام حذف اینترفروگرام‌های نویزی بایستی به استحکام و پایداری شبکه توجه شود تا حتی‌المقدور از استحکام آن کاسته نشود و یال منفرد و شناور ایجاد نگردد. البته ضعیف شدن استحکام شبکه باعث سینگولاریتی سرشکنی نخواهد شد بلکه باعث اطمینان کم به نتایج به دست آمده خواهد شد. همچنین لازم به یادآوری است که وجود نقطه منفرد بدون اتصال به شبکه همانند دیگر شبکه‌های ژئودتیکی، منجر به سینگولاریتی و عدم امکان سرشکنی خواهد شد. به زبان ساده‌تر، کلیه ملزومات مورد استفاده در سرشکنی شبکه‌های ژئودتیکی بایستی در این جا نیز رعایت گردد.

همان‌طور که در ابتدای فصل بیان شد، بازیابی فاز و آنالیز سری زمانی برای تمام نقاط اینترفروگرام‌ها انجام نمی‌شود، بلکه تنها برای تعداد محدودی از پیکسل‌ها عملیات صورت می‌گیرد.

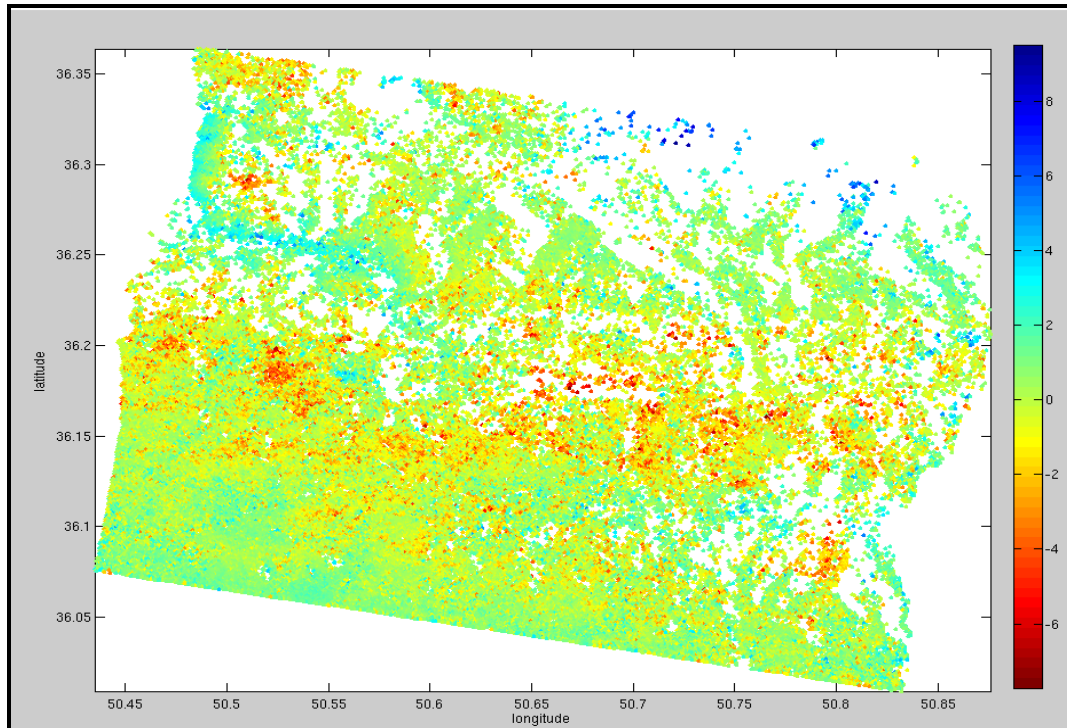
به این ترتیب می‌توانیم عملیات را برای پیکسل‌های منتخب ادامه دهیم. در مرحله بعد، می‌توانیم با محاسبه انحراف معیار فاز هر پیکسل، پیکسل‌های نویزی را حذف کرد. به این صورت که انحراف معیار فاز هر پیکسل، که در مرحله قبل انتخاب گردید، محاسبه شده و با معرفی حد استان‌های مانند ۱ یا ۱/۵ پیکسل‌هایی که انحراف معیار بزرگ‌تر از آن دارند را از ادامه عملیات حذف می‌کنیم. سپس عملیات بازیابی فاز برای پیکسل‌های باقی‌مانده انجام می‌گیرد.

حال ورودی کم‌ترین مربعات آماده شده و در مرحله آخر بایستی همانند شبکه ترازبایی عمل کرده و مقادیر مربوط به اینترفروگرام‌های اولیه را با مبدا زمانی تصویر مرجع yyyy/mm/dd برآورد می‌کنیم. همانند تمام سرشکنی‌ها یک ماتریس باقی‌مانده خواهیم داشت که طول آن برابر با تعداد اینترفروگرام‌های تهیه شده در SBAS می‌باشد. روابط روش کم‌ترین مربعات در فصل گذشته ارائه گردیده و در این جا از تکرار آن‌ها جلوگیری می‌کنیم.

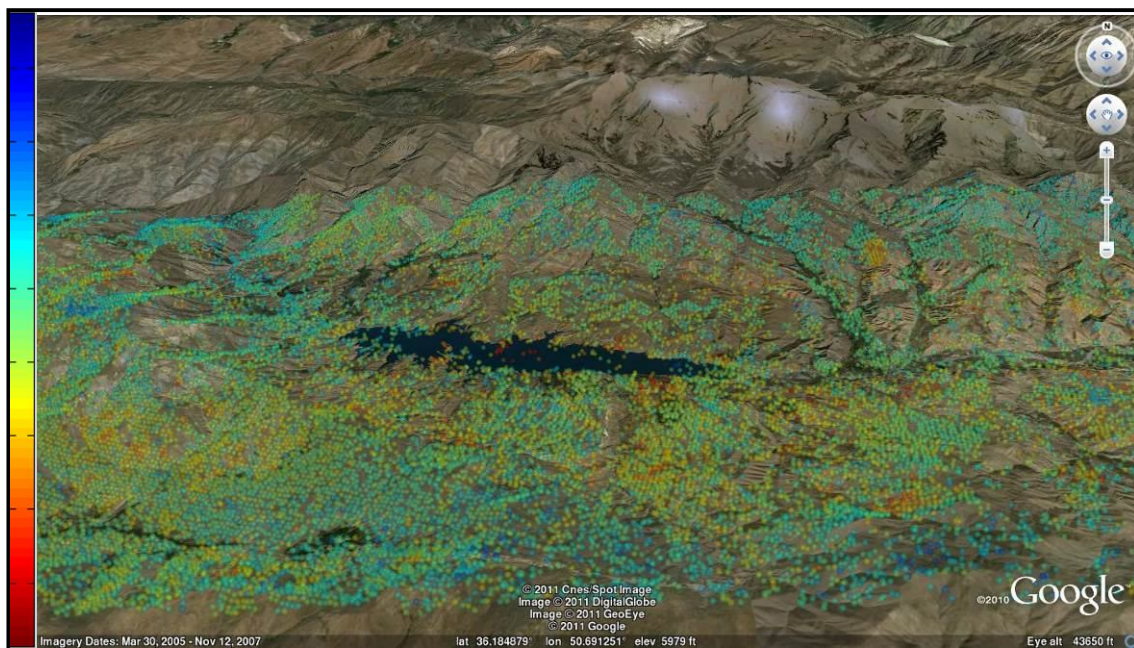
بهترین حالت آن است که باقی‌مانده حاصل از سرشکنی در بازه  $[-\pi, \pi]$  رادیان قرار داشته باشد. در صورتی که باقی‌مانده یک اینترفروگرام بیش‌تر از این مقادیر باشد آن اینترفروگرام را بایستی بررسی کرد. در صورتی که جدایی مکانی و زمانی آن بالا باشد بنابراین آن اینترفروگرام نویزی بوده است و موجب ایجاد خطا در بازیابی فاز و نتایج گردیده است. البته لازم به ذکر است که این اینترفروگرام در صورتی اجازه حذف دارد که منجر به سینگولاریتی شبکه نشان داده شده در (شکل ۵-۲) نگردد.

سرانجام می‌توانیم با انتخاب یک محدوده که جابه‌جایی آن‌ها صفر است، مقادیر مطلق جابه‌جایی را به دست آوریم و نمودارهای سری زمانی مربوط به هر زمین لغزش را ترسیم نماییم. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مقادیر جابه‌جایی تنها برای پیکسل‌های منتخب غیرنویزی به دست آمده است. (شکل ۵-۳) جابه‌جایی مطلق تمامی پیکسل‌ها را در یک نمونه پروژه نشان می‌دهد. جهت نمایش بهتر، مقادیر جابه‌جایی پیکسل‌های به دست آمده را بر روی تصویر Google Earth قرار داده‌ایم که می‌توانید آن را در (شکل ۵-۴) ملاحظه نمایید.





شکل ۵-۳- جابه‌جایی مطلق پیکسل‌های منتخب [۳۷]



شکل ۵-۴- هم‌پوشانی پیکسل‌های شناسایی شده بر روی تصویر Google Earth







# فصل ۶

---

---

رفتار سنجی زمین لغزش با استفاده از

تکنیک تداخل سنجی راداری





## ۶-۱- پیشینه تحقیق

تاکنون روش‌های متعددی جهت پایش زمین لغزش در جهان مورد استفاده قرار گرفته است، اما در این جا تنها به نمونه‌هایی اشاره خواهیم نمود که از تکنیک تداخل سنجی و آنالیز سری زمانی مجموعه خطوط مبنا استفاده شده است.

Squarzoni و همکاران (۲۰۰۲) جهت پایش یک دامنه جنوب- جنوب غربی واقع در آلپ فرانسوی جنوبی، از تصاویر نزولی ERS1 و ERS2 در بازه زمانی ۱۹۹۱-۱۹۹۹ استفاده نموده و به این نتیجه دست یافتند که این دامنه در سال ۱۹۹۱ با سرعت ۱ سانتی متر در روز، در سال ۱۹۹۶ با سرعت ۲ سانتی متر در روز جابه‌جایی داشته و در سال ۱۹۹۹ سرعت حرکت آن به ۰/۴ سانتی متر در روز کاهش یافته است [۱۸].

Singhroy و همکاران (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای به بررسی زمین لغزشی واقع در کانادا پرداختند. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای ERS1 و ERS2 استفاده گردید که نتیجه آن جابه‌جایی ۲ سانتی متر را در بازه زمانی دو سال نشان می‌دهد [۲۳].

Jonsson و Agustsson (۲۰۰۶) چندین زمین لغزش را در ایسلند به کمک تداخل سنجی راداری مورد بررسی قرار دادند. این زمین لغزش‌ها در سه منطقه به نام‌های seyoisfjorour، Neskaupstaour و Vopnafjorour رخ داده‌اند. در دو زمین لغزش اول با استفاده از اندازه‌گیری‌های GPS نرخ جابه‌جایی به ترتیب ۳۳ سانتی متر و ۱۳۸ سانتی متر گزارش داده شده است. اما این مقادیر مربوط به سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۲ می‌باشد در حالی که تصاویر SAR مورد استفاده در seyoisfjorour به یک ماه در تابستان ۱۹۹۵ و ۳/۵ ماه در تابستان ۱۹۹۷ مربوط می‌باشند. اینترفروگرام‌های حاصل هیچ جابه‌جایی‌ای را در این منطقه نشان نمی‌دهد. احتمالاً علت آن است که بعد از سال ۲۰۰۰ یک زمین لغزش آنی رخ داده است. در منطقه Neskaupstaour نیز علاوه بر تصاویر SAR از داده‌های GPS نیز استفاده شده است که مقادیر GPS در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۰۱ حرکت غیرثابتی از زمین لغزش را در هر سال نشان می‌دهد. به گونه‌ای که یک نشان<sup>۱</sup> در سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۹۳ جابه‌جایی برابر ۱۳۸ سانتی متر را نشان می‌دهد در حالی که در بازه ۱۹۹۴-۱۹۹۶ تنها ۱۱ سانتی متر جابه‌جایی رخ داده است. اما از آنجا که این زمین لغزش روی یک شیب رو به جنوب شرقی قرار گرفته است و تصاویر مورد استفاده مربوط به مدارهای descending می‌باشند، جابه‌جایی رخ داده در سایه<sup>۲</sup> قرار گرفته و قابل اندازه‌گیری نبوده است. بر خلاف بررسی‌های بالا، در منطقه Vopnafjorour تنها از تصاویر SAR برای شناسایی زمین لغزش احتمالی استفاده شده است. اینترفروگرام‌های حاصل، ۱۰ سانتی متر جابه‌جایی را در این منطقه نشان می‌دهند [۱۹].

Walther و Reidel (۲۰۰۷) در تحقیقی از داده‌های ماهواره‌ای ERS1 و ERS2 و Envisat برای اندازه‌گیری جابه‌جایی ناشی از چندین زمین لغزش در prinotopa در یونان و Baota در چین استفاده کردند. بررسی‌های انجام شده بر زمین لغزش

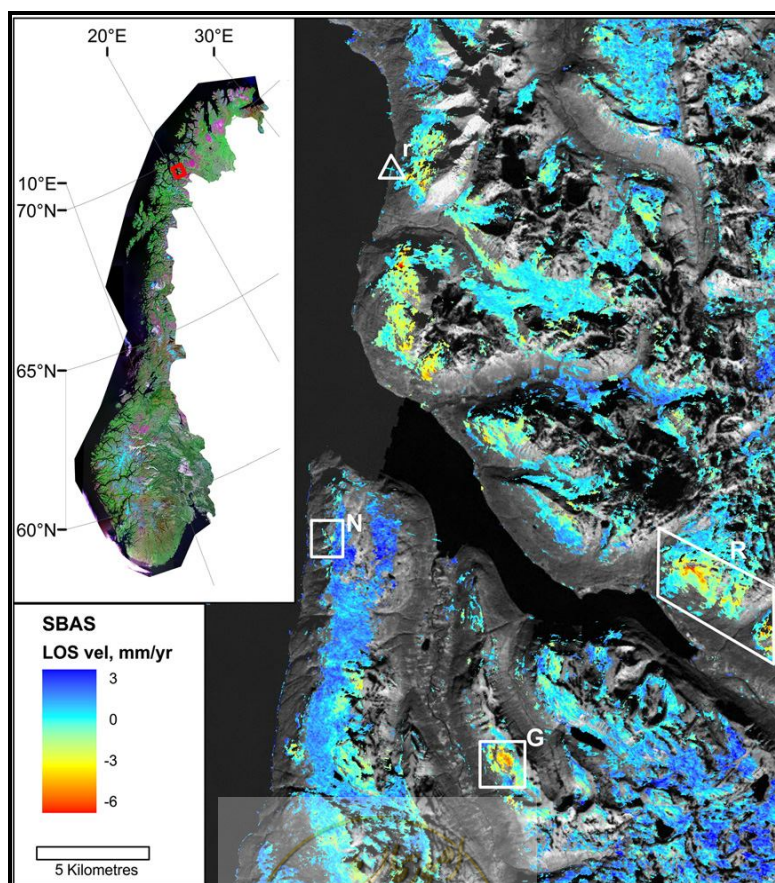
1- BenchMark  
2- Shadow



Baota ۱۴ میلی‌متر جابه‌جایی در راستای دید ماهواره در مدت زمان شش ماه را نشان داد. در این روش از مشاهدات GPS نیز استفاده گردید. به این صورت که یک شبکه GPS شامل پنج ایستگاه کنترل ثابت و ۱۲ نقطه مشاهداتی روی شیب در حال حرکت ایجاد شد که نتیجه سه بار اندازه‌گیری آن مشاهده پنج تا ۱۱ میلی‌متر جابه‌جایی زمین لغزش در بازه زمانی ژانویه تا نوامبر را گزارش داد. همچنین بررسی‌های انجام شده در منطقه Prinotopa در یونان نشان‌دهنده ۱۴ میلی‌متر جابه‌جایی در مدت سه ماه می‌باشد که این نتایج با مشاهدات حاصل از شبکه GPS در تطابق است [۶].

Delacourt و همکاران (۲۰۰۸) شش تصویر JERS-1 که از طول موج L-band استفاده می‌کند را پردازش نموده و جابه‌جایی دامنه ناپایدار واقع در جزیره La Reunion را ۱۱/۵ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. همچنین لازم به ذکر است که علاوه بر این تصاویر، از تصاویر مربوط به باند C نیز استفاده نموده‌اند، اما به دلیل پوشش گیاهی زیاد دامنه نتیجه‌ای حاصل نشده است.

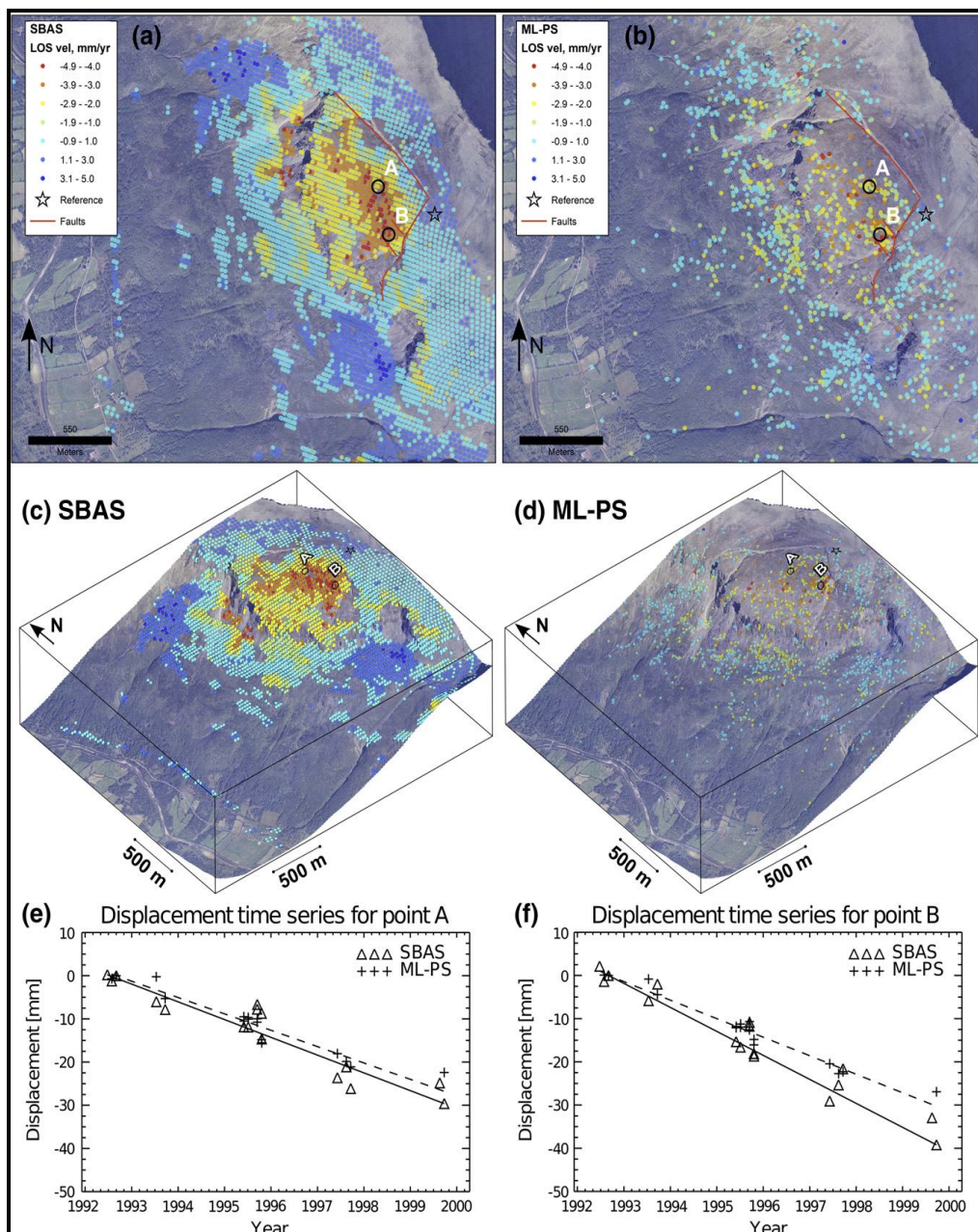
T.R. Lauknes و همکاران از ۱۸ تصویر ERS-1 و ERS-2 در مدار نزولی در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۹ به بررسی و رفتارسنجی زمین لغزش‌های Gámanjunni و Rismmalcohkka و Nordnes در شمال نروژ پرداخته‌اند. لازم به ذکر است که در این مطالعه از دو تکنیک SBAS و PS که در فصل‌های چهارم و پنجم توضیح داده شده‌اند استفاده شده است. (شکل ۶-۱) نتایج حاصل از SBAS را برای هر سه منطقه که با حروف R، G و N نمایش داده شده‌اند، ارائه می‌دهد [۲۰].



شکل ۶-۱- نرخ رشد جابه‌جایی حاصل از تکنیک SBAS در سه منطقه Gámanjunni و Rismmalcohkka و Nordnes



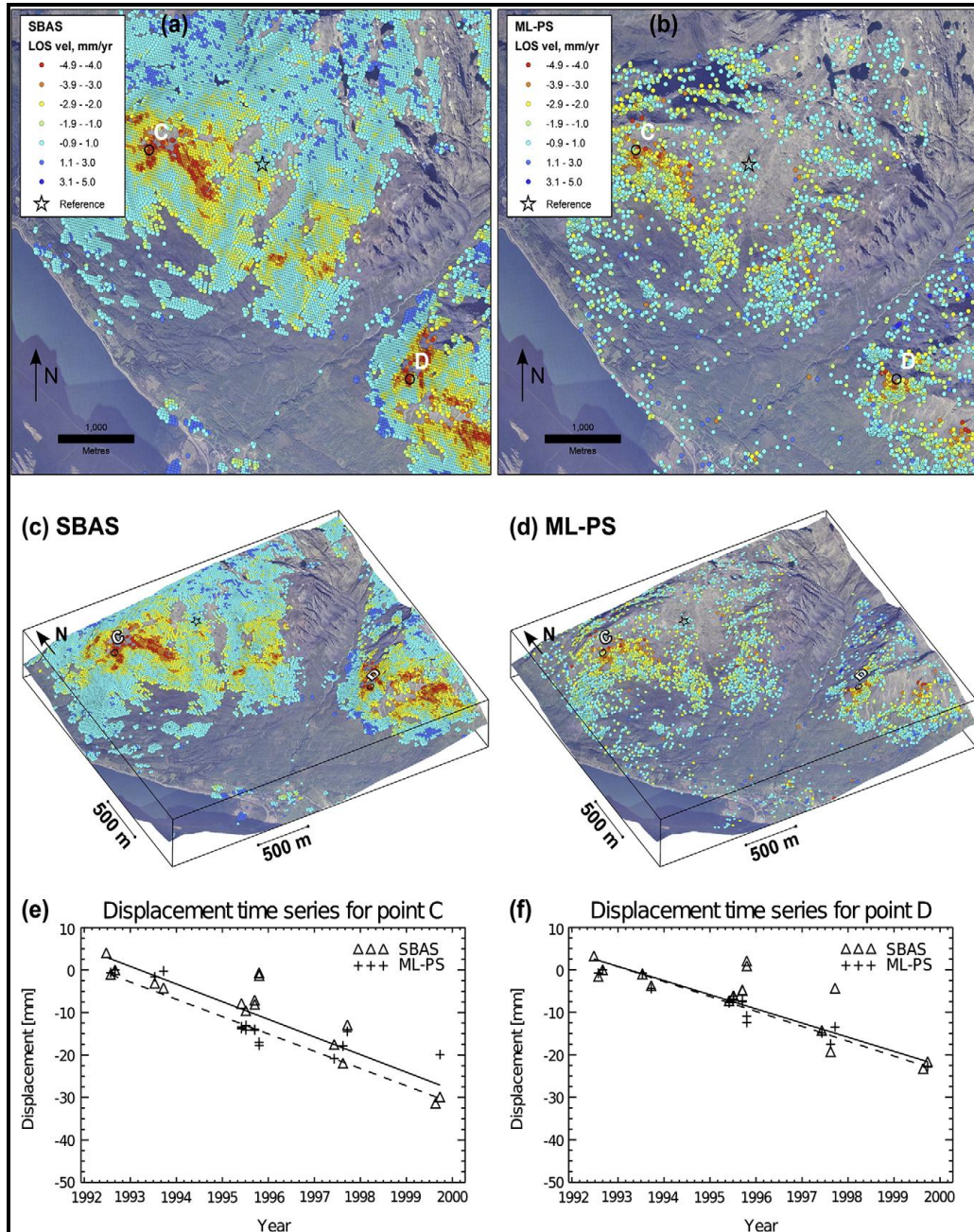
لازم به ذکر است که در این تحقیق، T.R. Lauknes و همکاران از الگوریتم ML-PS استفاده نموده‌اند. همان‌طور که در (شکل ۶-۲) ملاحظه می‌نمایید، در دامنه لغزشی Gámanjinni آنالیز سری زمانی به کمک دو تکنیک SBAS و ML-PS برای دو نقطه A و B انجام شده است. جابه‌جایی‌ای که برای نقطه A برآورد شده معادل حدود ۳۰ میلی‌متر به روش SBAS و ۲۷ میلی‌متر به روش ML-PS می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که نقطه B به کمک روش SBAS حدود ۴۰ میلی‌متر و به روش ML-PS حدود ۳۰ میلی‌متر جابه‌جا شده است.



شکل ۶-۲- نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی برای دو نقطه A و B به روش SBAS و ML-PS



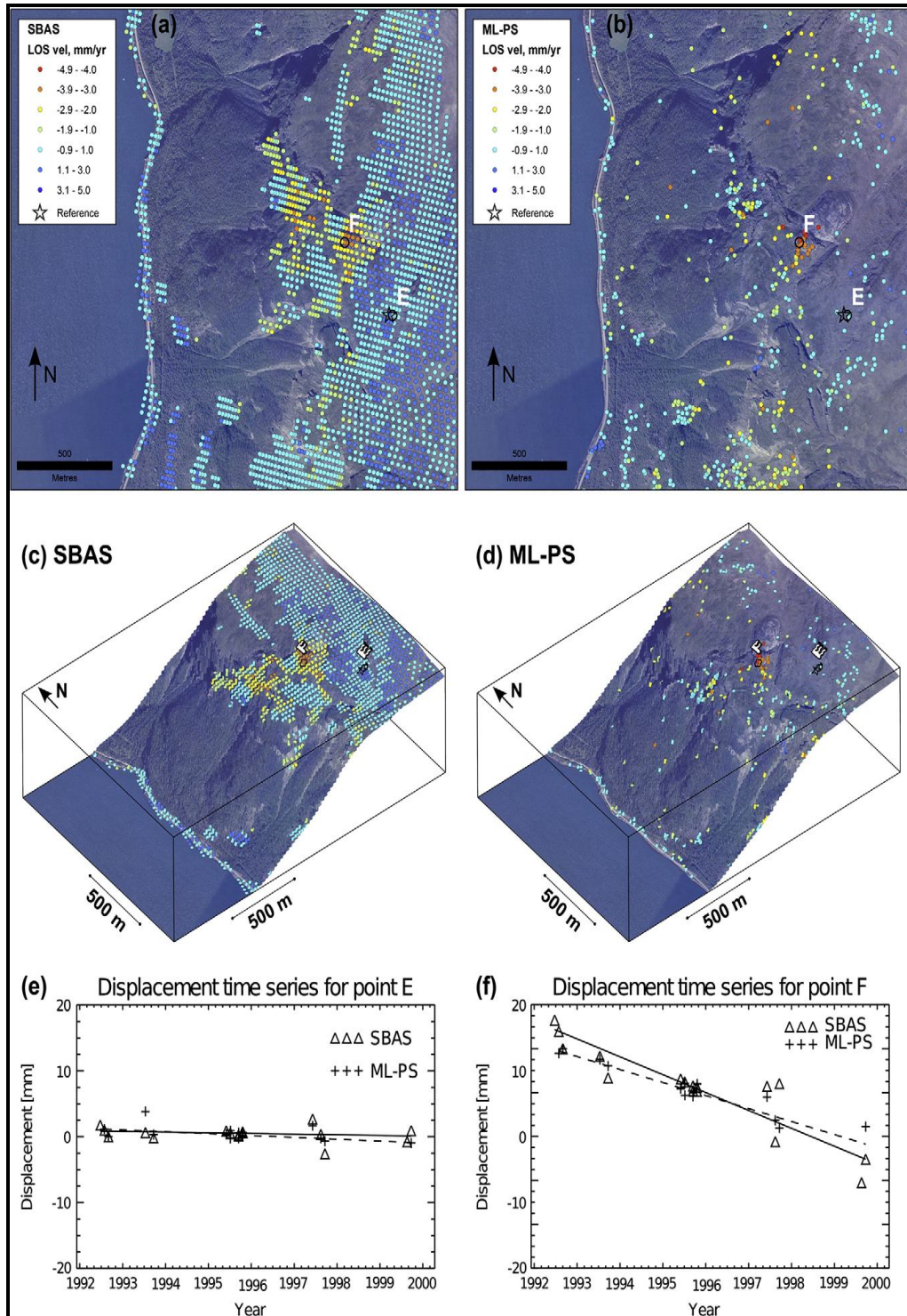
همچنین دو نقطه C و D در منطقه لغزشی Rismmalcohkka به روش SBAS به ترتیب دست‌خوش جابه‌جایی حدود ۳۰ میلی‌متر و ۲۲/۵ میلی‌متر و به روش ML-PS حدود ۲۷/۵ میلی‌متر و ۲۵ میلی‌متر شده‌اند (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی برای دو نقطه C و D به روش SBAS و ML-PS

(شکل ۴-۶) نیز جابه‌جایی نقاط E و F را در دامنه لغزشی Nordnes را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید جابه‌جایی ثبت شده برای این دو نقطه مقدار بسیار کوچکی است.





شکل ۶-۴- نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی برای دو نقطه E و F به دو روش SBAS و ML-PS



جدول ۶-۱- سرعت جابه‌جایی سالیانه حاصل از مطالعه سه زمین لغزش مذکور در شمال نروژ

Area	SBAS mean (mm/year)	PSI mean (mm/year)	SBAS RMSE (mm)	PS RMSE (mm)
Gámanjuni				
Point A	-3.80	-4.12	3.17	2.00
Point B	-5.57	-4.30	3.27	1.54
Rismmalčohkka				
Point C	-4.16	-4.08	4.43	3.92
Point D	-3.34	-3.52	4.92	1.80
Nordnes				
Point E	-0.10	-0.28	1.06	0.98
Point F	-4.08	-2.97	3.92	1.80

در مطالعه‌ای دیگر، Yueping Yin و همکاران در سال ۲۰۰۶ طی یک همکاری مشترک سازمان زمین‌شناسی چین و کانادا به مطالعه و رفتارسنجی زمین لغزش Jiaju در Sichuan غربی به کمک دو روش GPS و تداخل‌سنجی راداری پرداختند. در این مطالعه از تصاویر RADARSAT\_1 و ERS1/2 به همراه ۱۰ رفلکتور مخصوص تداخل‌سنجی راداری (corner reflector) استفاده گردید. زیرا پوشش گیاهی در این منطقه سبب incoherent شدن نتایج می‌شد. یک corner reflector از سه صفحه فلزی مثلثی شکل تشکیل شده که به آسانی در منطقه مورد مطالعه نصب می‌شود و عکس‌برداری از آن شروع می‌شود. این رفلکتورها همانند ایستگاه‌های GPS در نقاطی از دامنه لغزشی نصب می‌شوند که خواهان به دست آوردن میزان جابه‌جایی در آن‌ها هستیم [۲۲]. در این پروژه از ۱۰ رفلکتور استفاده شده که ۸ عدد در دامنه لغزشی و ۲ عدد در محدوده خارج لغزش در سنگ بستر نصب گردند (شکل ۶-۵).



شکل ۶-۵- تصویر زمینی از محدوده لغزشی

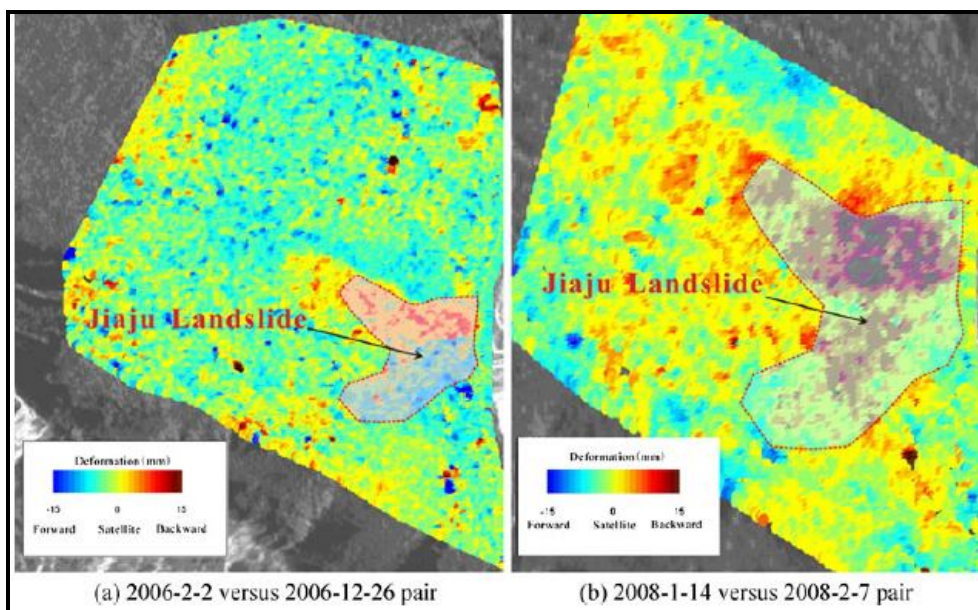




جدول ۶-۲- ماکزیمم مقدار جابه‌جایی در راستای افقی و قائم [۲۲]

Deformation	December 2 to 26, 2006 Northern part	Southern part	January 14 to February 17, 2008 Northern part	Southern part
Maximum value in vertical	8.126	5.910	17.729	18.468
Maximum value in horizontal	7.415	5.392	16.177	16.851
Average value in vertical	1.589	0.820	4.189	1.492
Average value in horizontal	1.4496	0.748	3.822	1.362

همان‌طور که از (جدول ۶-۲) بر می‌آید، بخش شمالی سریع‌تر از بخش جنوبی دامنه حرکت می‌کند. علاوه بر این، جابه‌جایی در سال ۲۰۰۸ بزرگ‌تر از جابه‌جایی در سال ۲۰۰۶ برآورد شده است. با توجه به (شکل ۶-۶) رنگ نقاط نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی در بخش شمالی، زرد و قرمز و در بخش جنوبی، آبی است. همان‌طور که مشاهده می‌نماید نقاط زرد و قرمز نشان‌دهنده حرکت رو به پایین و نقاط آبی نشان‌دهنده حرکت رو به بالا هستند. علت این موضوع آن است که تصاویر در حال descending هستند و این دو بخش دو شیب روبه‌روی هم هستند و یکی از آن‌ها در حال دور شدن از سنجنده (بخش شمالی) و دیگری در حال نزدیک شدن به سنجنده (بخش جنوبی) است [۲۲].

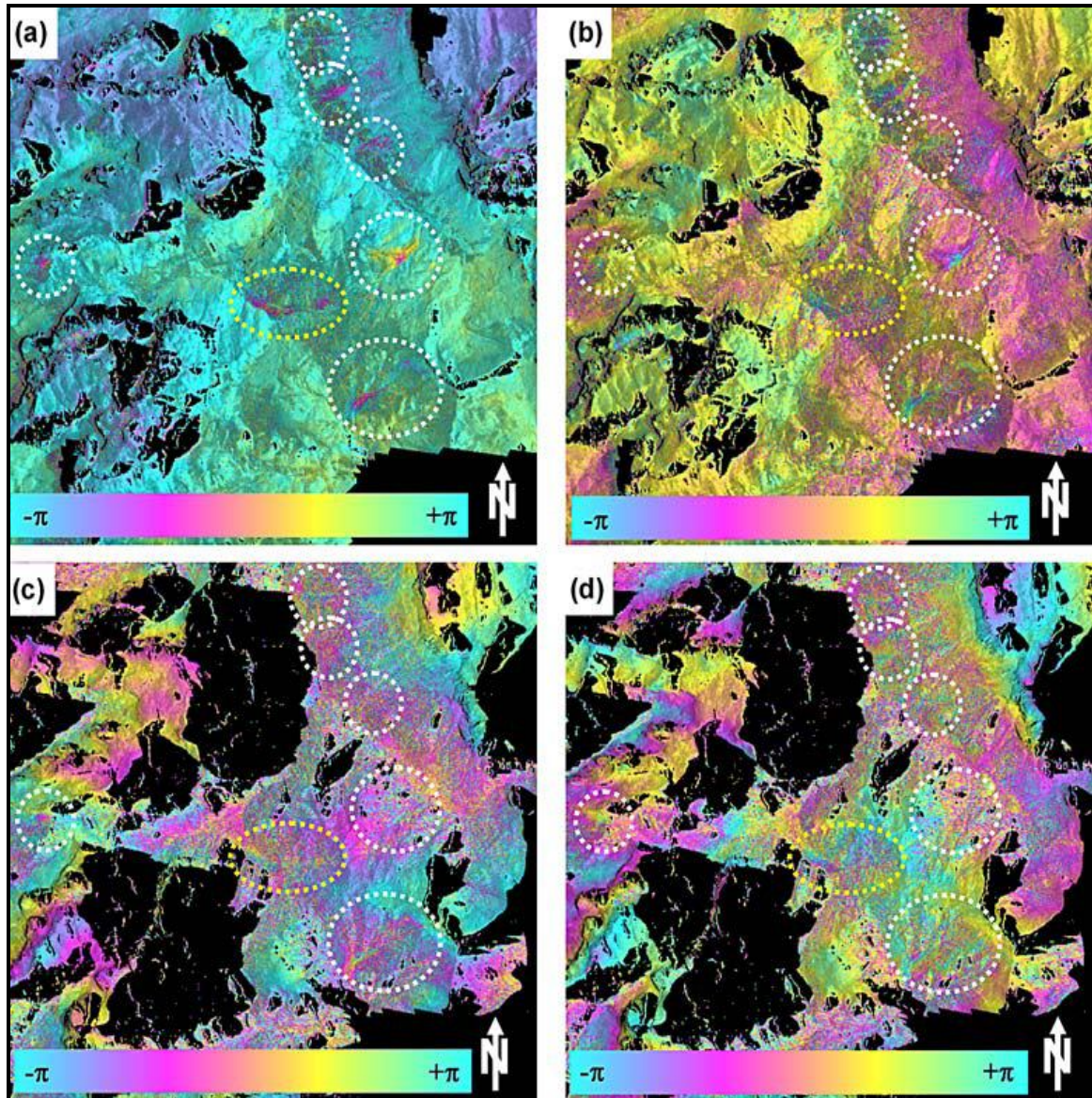


شکل ۶-۶- نقشه جابه‌جایی مطلق زمین لغزش Jiaju به دست آمده از تداخل سنجی راداری [۲۲]

(شکل ۶-۷) Tazio Strozzi و همکاران در آلپ سوییس و ایتالیا با استفاده از تصاویر JERS و ERS1/2 نتایج حاصل

از تداخل سنجی در دو محدوده طول موج L و C را به شرح زیر بیان نموده‌اند [۲۱]:





شکل ۶-۷- نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری در منطقه لغزشی Alta Val Bardia

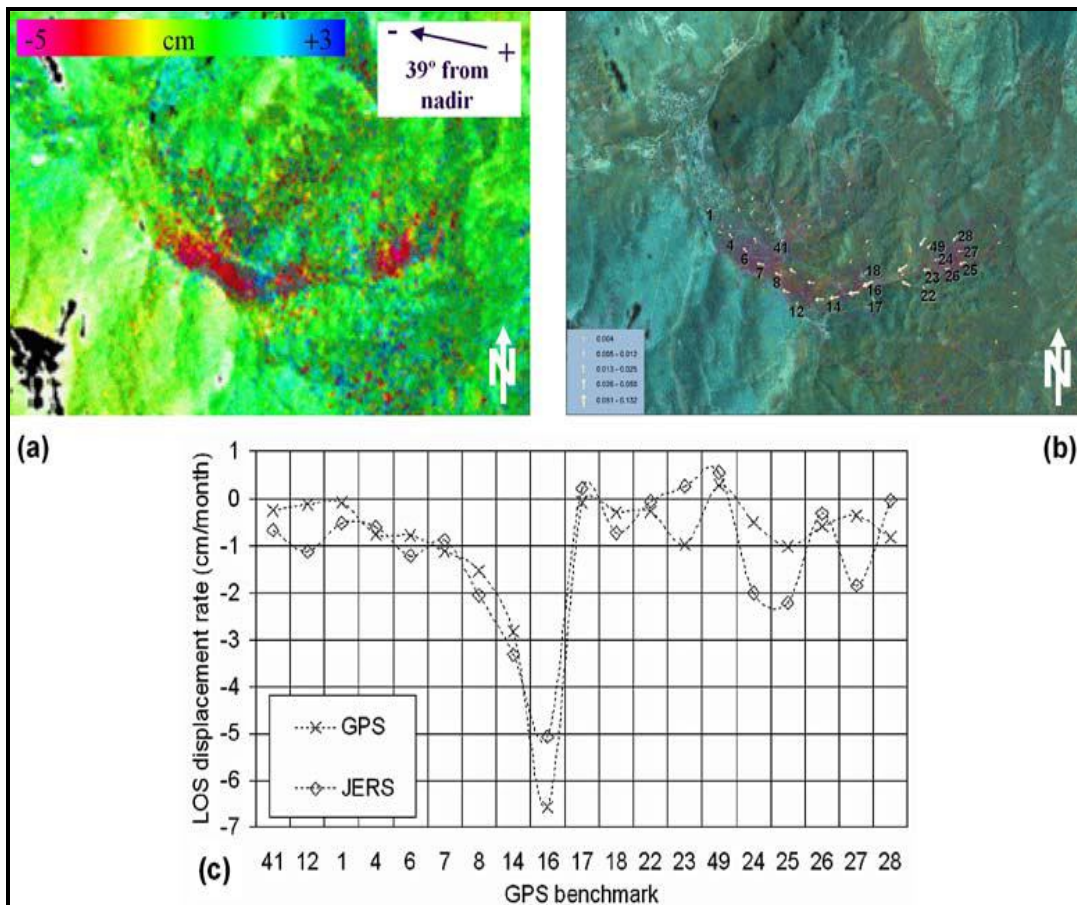
(A) اینترفروگرام JERS در بازه زمانی ۲ جولای تا ۲۸ سپتامبر ۱۹۹۸

(B) اینترفروگرام JERS در بازه زمانی ۱۱ آگوست تا ۷ نوامبر ۱۹۹۵

(C) اینترفروگرام ERS در بازه زمانی ۹ آگوست تا ۱۳ سپتامبر ۱۹۹۷

(D) اینترفروگرام ERS در بازه زمانی ۱۳ سپتامبر تا ۱۸ اکتبر ۱۹۹۷ [۲۱]





شکل ۶-۸- نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری در منطقه لغزشی Alta Val Bardia

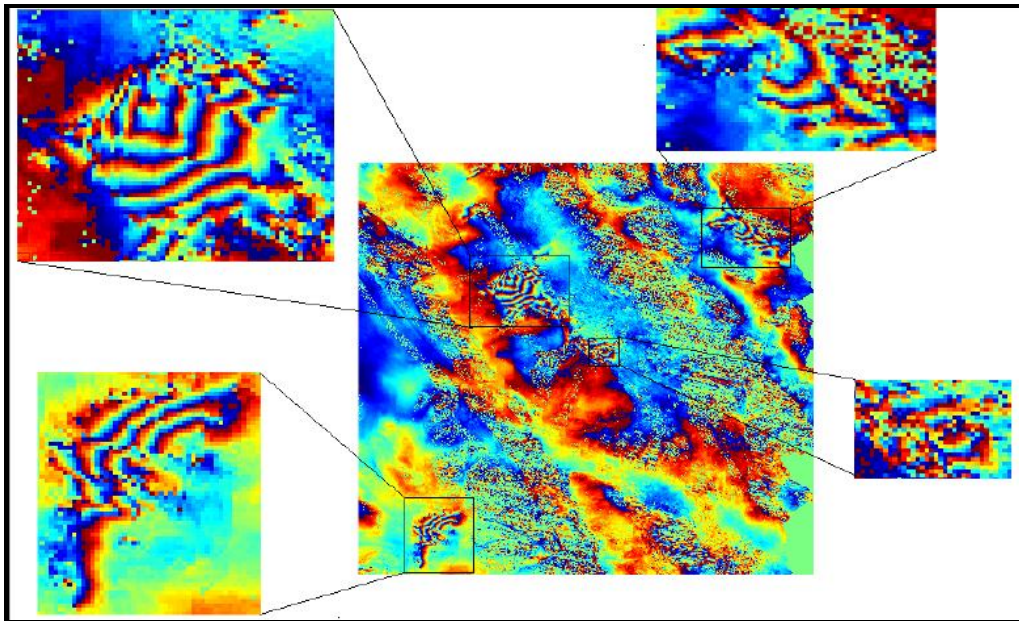
(A) نقشه جابه‌جایی زمین مرجع شده حاصل از تصاویر JERS در راستای دید ماهواره در بازه زمانی ۲ جولای تا ۲۸ سپتامبر ۱۹۹۸

(B) نرخ اندازه‌گیری GPS (در واحد متر/ماه از سپتامبر ۲۰۰۱ تا سپتامبر ۲۰۰۳)

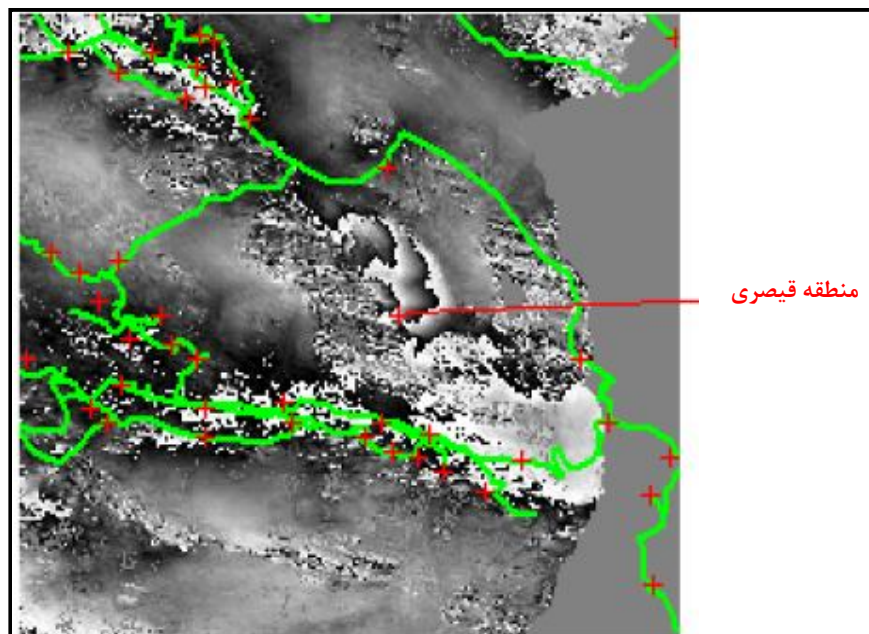
(C) مقایسه بین اندازه‌گیری در راستای دید ماهواره‌ای JERS، پنج مارک‌های GPS و پیکسل‌های مناظر در نقشه جابه‌جایی [۲۱]

نمونه‌های ذکر شده از تحقیقات انجام شده برای پایش زمین لغزش‌های رخ داده شده در جهان به شمار می‌روند. این مطالعات در ایران قدمت زیادی ندارد. به طوری که می‌توان به شناسایی زمین لغزش قیصری از توابع شهرستان اردل واقع در استان چهارمحال بختیاری اشاره نمود که سال ۱۳۸۸ توسط سازمان مراتع، جنگل‌ها و آبخیزداری کشور انجام شده است (شکل ۶-۹) و (شکل ۶-۱۰).





شکل ۶-۹- بزرگنمایی یک نمونه اینترفروگرام حاصل از تداخل سنجی در منطقه اردل چهارمجال بختیاری و شناسایی فرینج‌های جابه‌جایی در بخش‌های متفاوت آن



شکل ۶-۱۰- فرینج جابه‌جایی در منطقه قیصری

همچنین دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تهران با همکاری سازمان مذکور به مطالعه زمین‌لغزش درود استان لرستان در سال ۱۳۸۸ پرداخت که نتایج آن به شرح زیر است [۲۳]:

در این مطالعه ۱۷ تصویر از گذر بالارو سنجنده‌ی Terrasar-X در بازه‌ی زمانی ۲۸۷ روزه (۹ ماه و ۱۳ روز) بین تاریخ ۲۱ ژانویه ۲۰۱۰ تا ۳ نوامبر ۲۰۱۰ استفاده شده است.

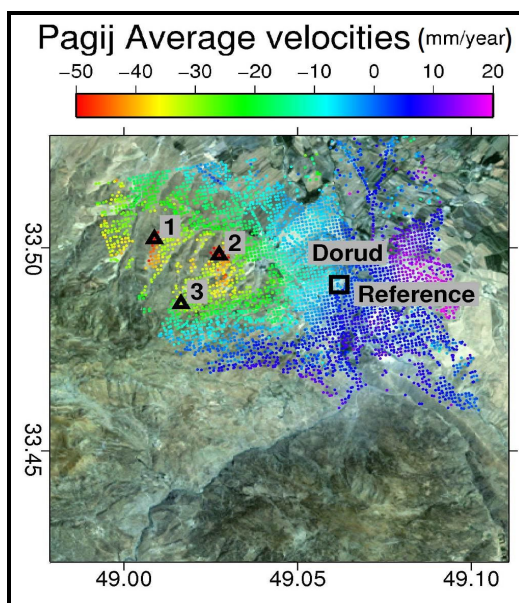


دو (شکل ۶-۱۱) و (شکل ۶-۱۲) سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌های پایدار شناسایی شده را بر روی یک ترکیب رنگی از باندهای ۳، ۲ و ۱ از تصویر سنجنده‌ی TM اخذ شده در تاریخ ۲ مارس ۲۰۱۰ در منطقه‌ی دورود نشان می‌دهد [۱۷]. در این دو شکل تنها پیکسل‌های پایدار نقاطی که راستای شیب مناسب برای بررسی زمین لغزش با تصاویر گذر بالا رو دارند نشان داده شده‌اند و سایر پیکسل‌های پایدار نمایش داده نشده‌اند. این دو شکل نشان‌دهنده‌ی سرعت متوسط سالیانه در راستای خط دید سنجنده در شیب‌های کوه پاگیچ مشرف به شهر دورود به میزان حداکثر  $5^{\circ}$ - میلی‌متر و در شیب‌های کوه باباهور مشرف به راه‌آهن به میزان حداکثر  $15^{\circ}$ - میلی‌متر می‌باشد.

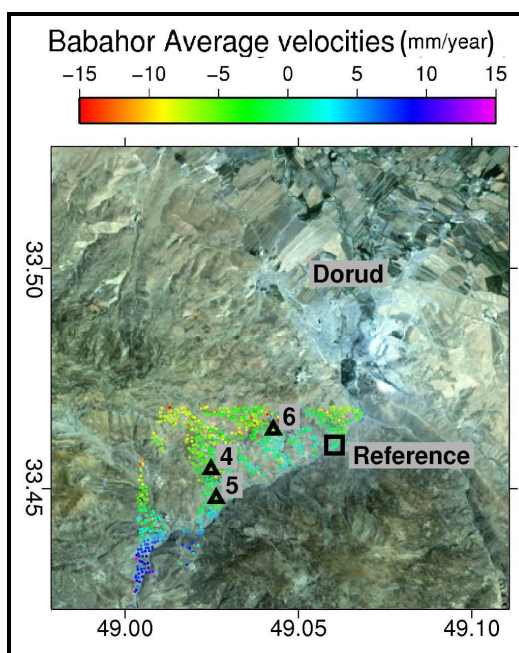
به منظور بررسی رفتار حرکت لغزشی در طول زمان، سری زمانی ۶ نقطه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این نقاط با مثلث در (شکل ۶-۱۱) و (شکل ۶-۱۲) مشخص شده‌اند. نقاط ۱ تا ۳ در شیب کوه پاگیچ که مشرف به شهر دورود است، قرار گرفته‌اند. جابه‌جایی این نقاط نسبت به یک منطقه‌ی مبنا در شهر که در شکل با مربع نشان داده شده است، اندازه‌گیری شده است. نقاط ۴ تا ۶ در شیب کوه باباهور قرار گرفته‌اند که مشرف به راه‌آهن شهر دورود است. برای محاسبه‌ی جابه‌جایی این نقاط، منطقه‌ی مبنا در نقطه‌ای واقع در پایین شیب در نظر گرفته شده است. منطقه‌ی مبنا در شکل با مربع نشان داده شده است. (شکل ۶-۱۴) سری زمانی نقاط ۱ تا ۶ را در بازه‌ی زمانی ۲۸۷ روزه بین تاریخ‌های ۲۱ ژانویه ۲۰۱۰ و ۳ نوامبر ۲۰۱۰ مصادف با ۱ بهمن ۱۳۸۸ تا ۱۲ آبان ۱۳۸۹ نشان می‌دهد. سری زمانی نقاط بیانگر جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره به میزان ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر ناشی از حرکت خزشی در نقاط ۱ تا ۳ و جابه‌جایی حدود ۱۰ میلی‌متر در نقاط ۴ تا ۶ است. با توجه به نقشه‌ی حساسیت، جابه‌جایی زمینی در نقاط ۱ تا ۳ تقریباً برابر با جابه‌جایی به دست آمده در راستای خط دید سنجنده است. ولی در مورد نقاط ۴ تا ۶ جابه‌جایی واقعی زمین بیش‌تر از جابه‌جایی به دست آمده در راستای خط دید سنجنده است.

(شکل ۶-۱۵) و (شکل ۶-۱۶) نمای سه بعدی از زمین لغزش مورد بررسی به ترتیب در شیب کوه پاگیچ مشرف به شهر دورود و شیب کوه باباهور مشرف به راه‌آهن شهر دورود را نشان می‌دهد. را نشان می‌دهد. در این دو شکل به خوبی پیدا است که پیکسل‌های پایدار زیادی به خصوص در شیب مشرف به شهر که از اهمیت زیادی برخوردار است، شناسایی شده‌اند. پیکسل‌های پایدار استخراج شده بر اساس میزان جابه‌جایی از قرمز (جابه‌جایی منفی) تا آبی (جابه‌جایی مثبت) در راستای خط دید سنجنده رادار نشان داده شده‌اند. در این شکل تراکم بالا و پراکندگی مناسب پیکسل‌های استخراج شده به کمک تصاویر Terrasar-X به خوبی مشخص است [۳۵].



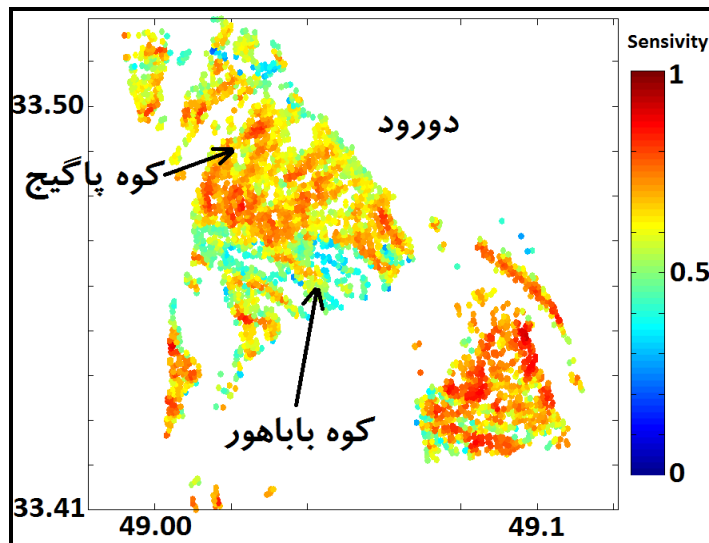


شکل ۶-۱۱- سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در کوه بابهور بر روی تصویر TM. نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته با مثلث و منطقه‌ی مبنا با مربع مشخص شده‌اند [۳۵].

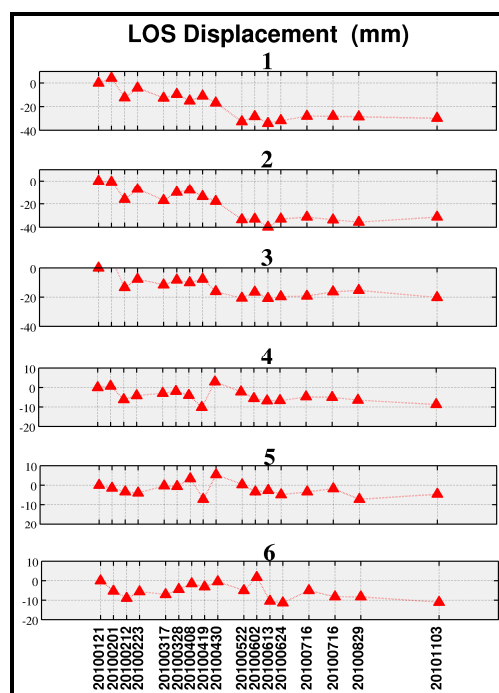


شکل ۶-۱۲- سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در کوه بابهور بر روی تصویر TM. نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته با مثلث و منطقه‌ی مبنا با مربع مشخص شده‌اند.



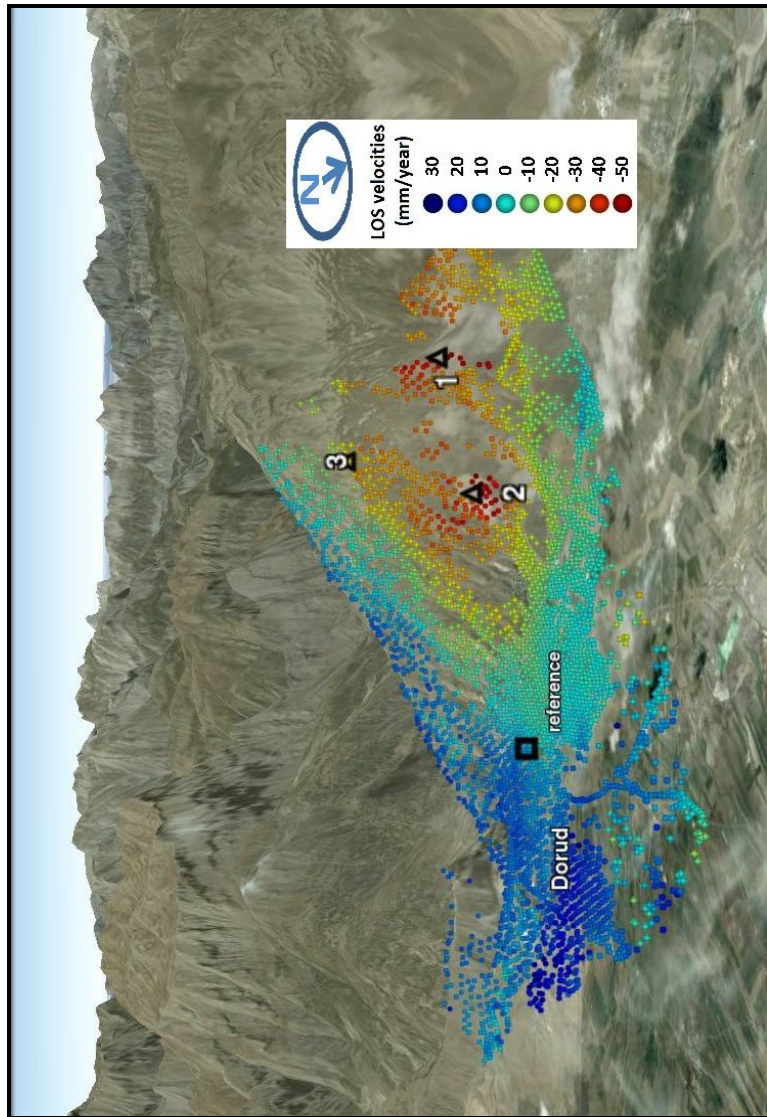


شکل ۶-۱۳- نقشه‌ی حساسیت راستای دید سنجنده‌ی Terrasar-X در گذر بالارو از منطقه، به جابه‌جایی زمینی در راستای شیب. اندازه‌گیری در راستای خط دید سنجنده، در مناطق قرمز رنگ حساسیت بیش‌تر و مناطق آبی رنگ حساسیت کم‌تری به جابه‌جایی در راستای شیب دارند.



شکل ۶-۱۴- سری زمانی نقاط ۱ تا ۶. جابه‌جایی‌ها در راستای خط دید ماهواره و بر حسب میلی‌متر می‌باشند. نقاط ۱ تا ۳ در شیب‌های کوه پاگیج مشرف به شهر و نقاط ۴ تا ۶ در شیب‌های کوه باباهور قرار دارند. توجه شود که برای نمایش بهتر، بازه‌ی جابه‌جایی برای نقاط ۱ تا ۳ بین ۴۰- تا ۱۰-

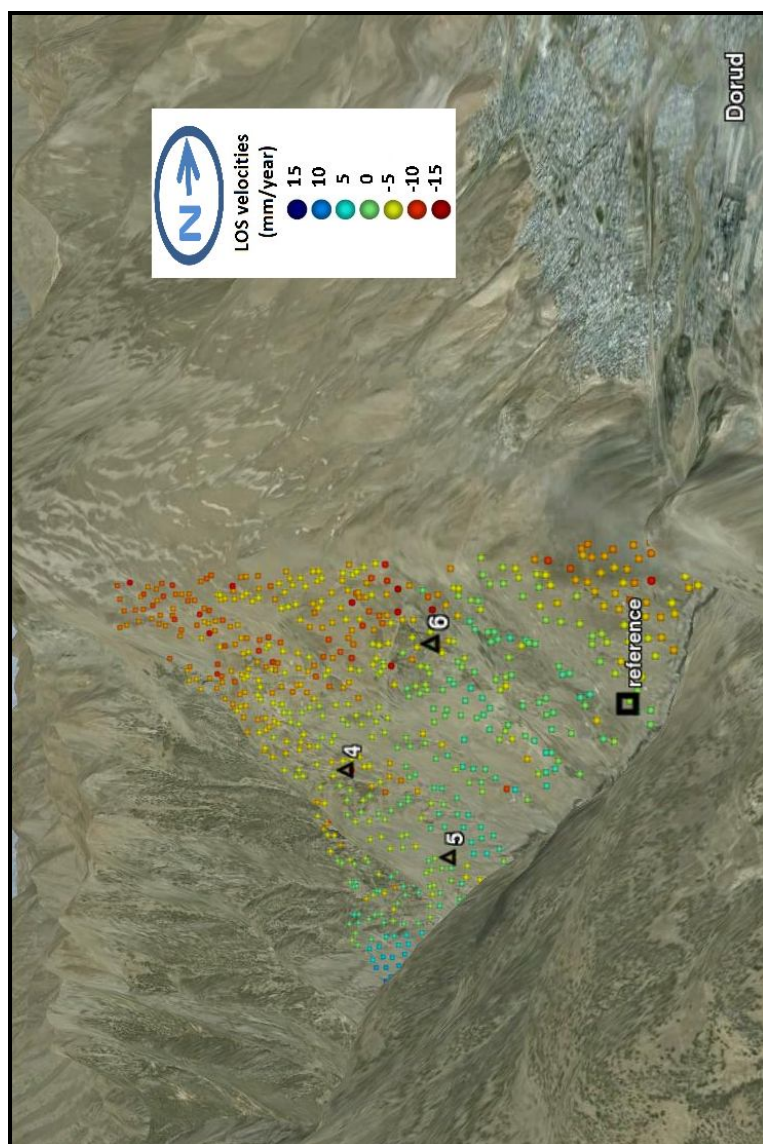




شکل ۶-۱۵- نمای سه بعدی پیکسل‌های پایدار شناسایی شده در شیب کوه پاگیج مشرف به شهر دورود







شکل ۶-۱۶- نمای سه بعدی پیکسل‌های پایدار شناسایی شده در شیب باباهور مشرف به راه آهن دورود

در مطالعه‌ای دیگر در استان کرمان شهرستان جیرفت-کهنوج گزارشی برای سازمان جنگل‌ها ارائه گردید که به بررسی زمین لغزش و رفتارسنجی آن پرداخته شده است. در این مطالعه ۱۷ تصویر از گذر پایین‌رو سنجنده‌ی Envisat در بازه‌ی زمانی ۸۰۵ روزه (۲ سال و ۲ ماه و ۱۳ روز) بین تاریخ ۳۰ ژوئن ۲۰۰۳ تا ۱۲ سپتامبر ۲۰۰۵ استفاده شده است [۲۹].

#### - منطقه‌ی جبالبارز

(شکل ۶-۱۷) نقشه‌ی سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌های پایدار شناسایی شده در منطقه‌ی جبالبارز را نشان می‌دهد. منطقه‌ی مبنا در این شکل با مربع نشان داده شده است. سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در منطقه‌ی مبنا صفر در نظر گرفته شده و سرعت سایر نقاط با توجه آن محاسبه شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر جابه‌جایی لغزشی

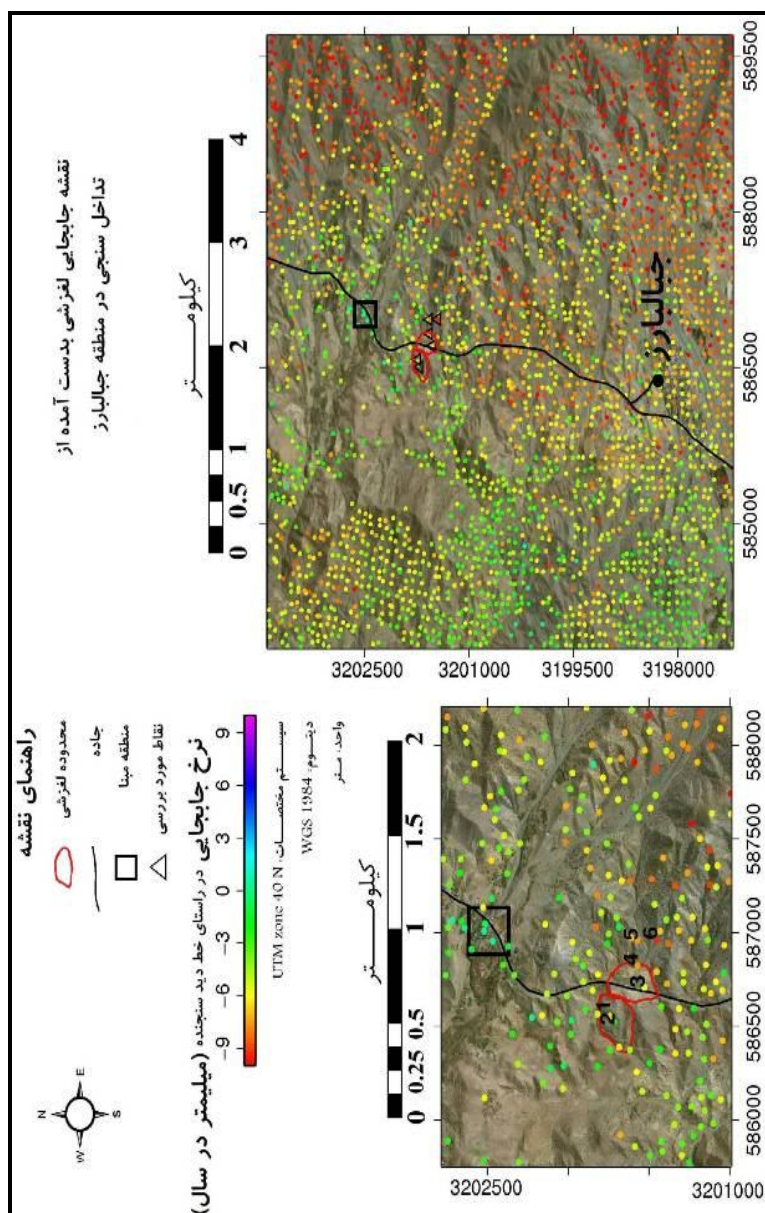


نقاط، سری زمانی چند نقطه که در این شکل با مثلث نشان داده شده‌اند، استخراج شد. (شکل ۶-۱۸) سری زمانی این نقاط را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده در این شکل بیانگر حرکت خزشی نقاط مورد بررسی بر اثر زمین لغزش به میزان ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر در راستای خط دید سنجنده، نسبت به منطقه‌ی مبنا، در بازه‌ی زمانی مورد بررسی است. برای نمایش بهتر نتایج، در (شکل ۶-۱۹) دو نمای سه بعدی از زمین لغزش مورد بررسی در منطقه‌ی جبالبارز و نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته نشان داده شده است.

#### - منطقه‌ی دلفارد

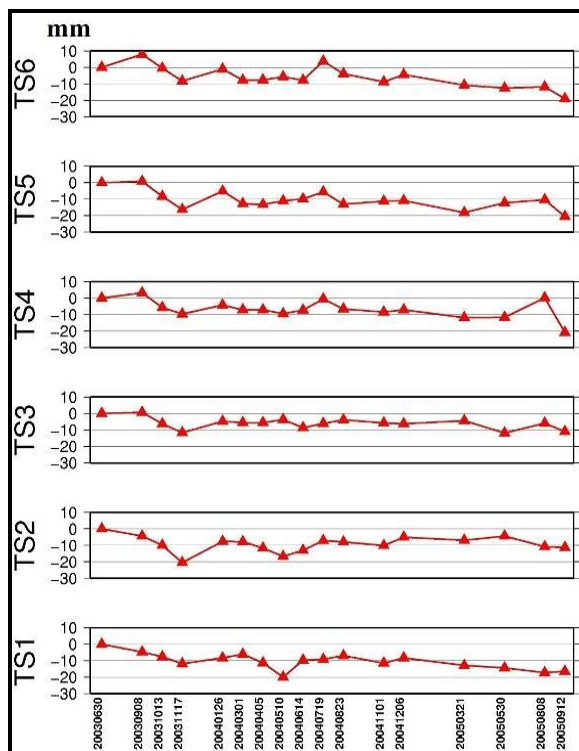
(شکل ۶-۲۰) نقشه‌ی سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌های پایدار شناسایی شده در منطقه‌ی دلفارد را نشان می‌دهد. سری زمانی جابه‌جایی تعدادی از نقاط در (شکل ۶-۲۱) نشان داده شده است. منطقه‌ی مبنا در این شکل با مربع نشان داده شده است. سرعت متوسط سالیانه در منطقه‌ی مبنا صفر فرض شده و سرعت سایر پیکسل‌های پایدار نسبت به آن محاسبه شده است. این نتایج بیانگر حرکت خزشی نقاط مورد بررسی به میزان حداکثر ۱۰ میلی‌متر در راستای خط دید سنجنده، نسبت به منطقه‌ی مبنا، در بازه‌ی زمانی مورد بررسی است. (شکل ۶-۲۲) دو نمای سه بعدی از زمین لغزش مورد بررسی در منطقه‌ی دلفارد و نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته را نشان می‌دهد [۲۹].





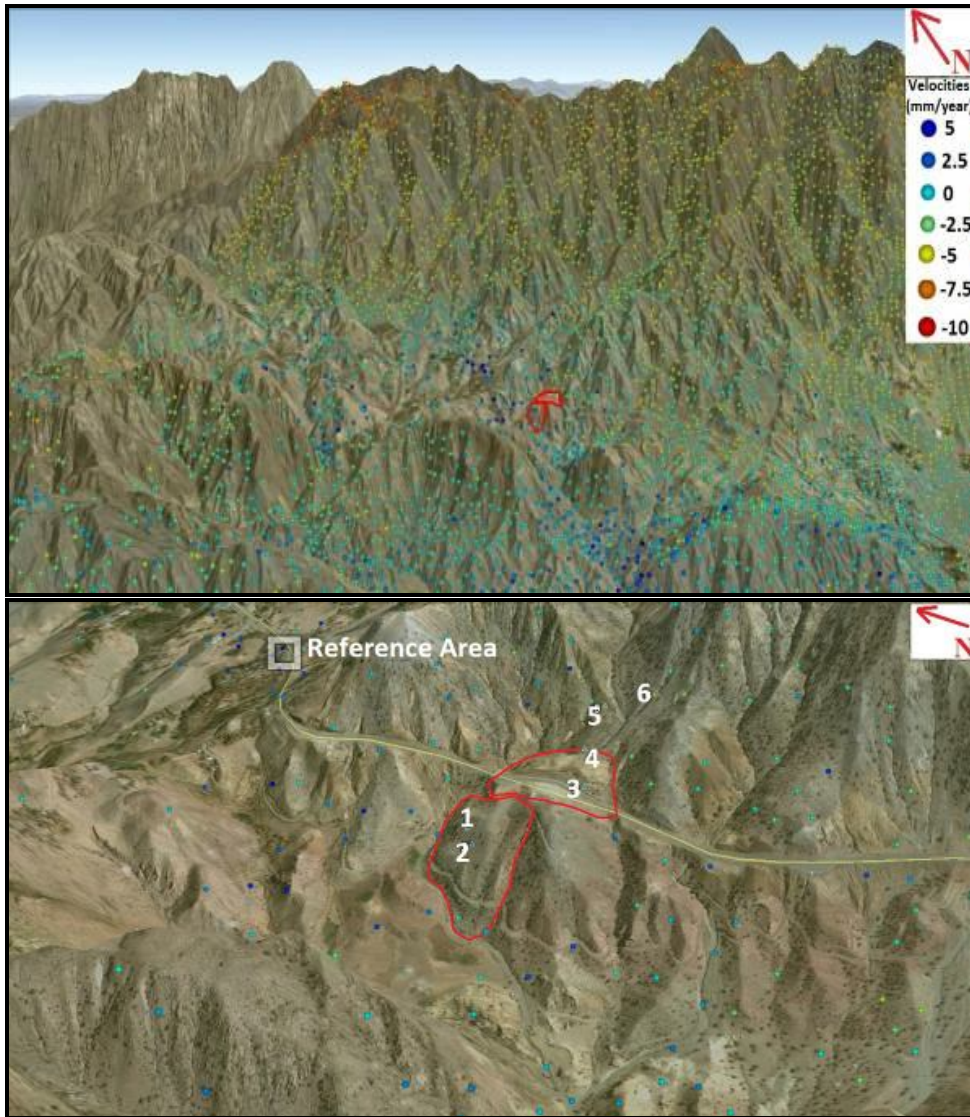
شکل ۶-۱۷- سرعت متوسط سالیانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در منطقه‌ی جبالبارز در دو مقیاس مختلف





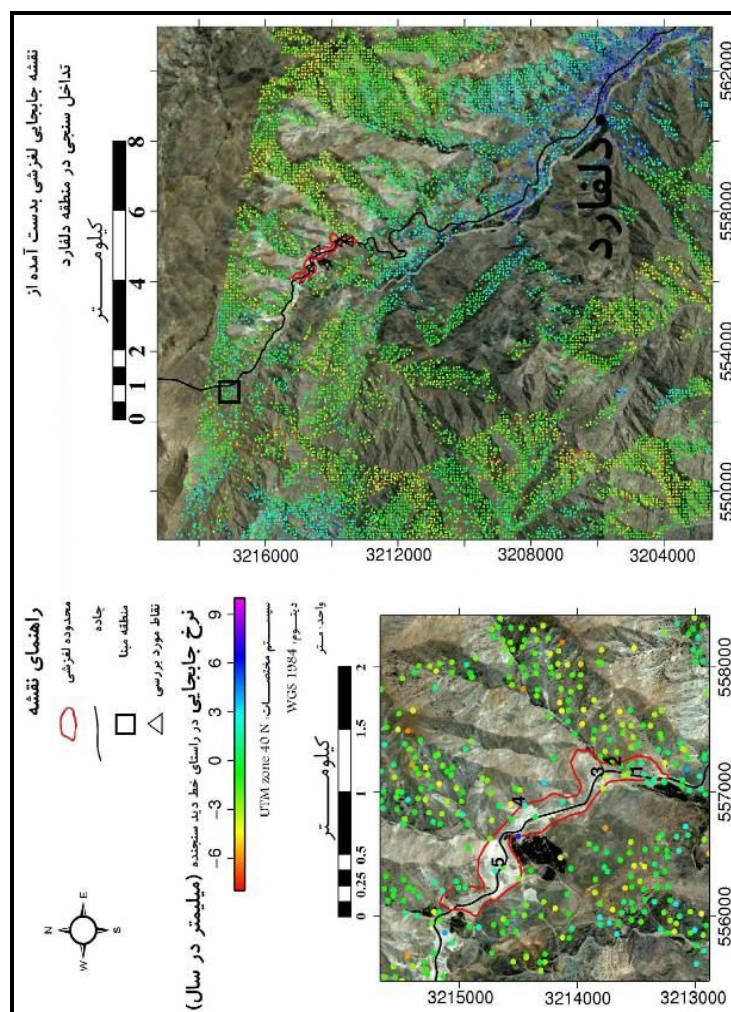
شکل ۶-۱۸- سری زمانی نقاط مورد بررسی در منطقه‌ی جبالبارز. جابه‌جایی‌ها در راستای دید ماهواره و واحد‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند.



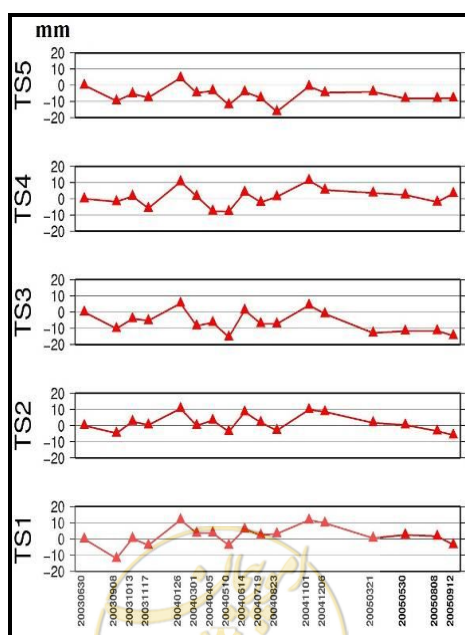


شکل ۶-۱۹- نمای سه بعدی از زمین لغزش در منطقه‌ی جبالبارز. محدوده‌ی زمین لغزش با خط سفید، محدوده‌ی مرجع با مربع و نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت با شماره مشخص شده‌اند.

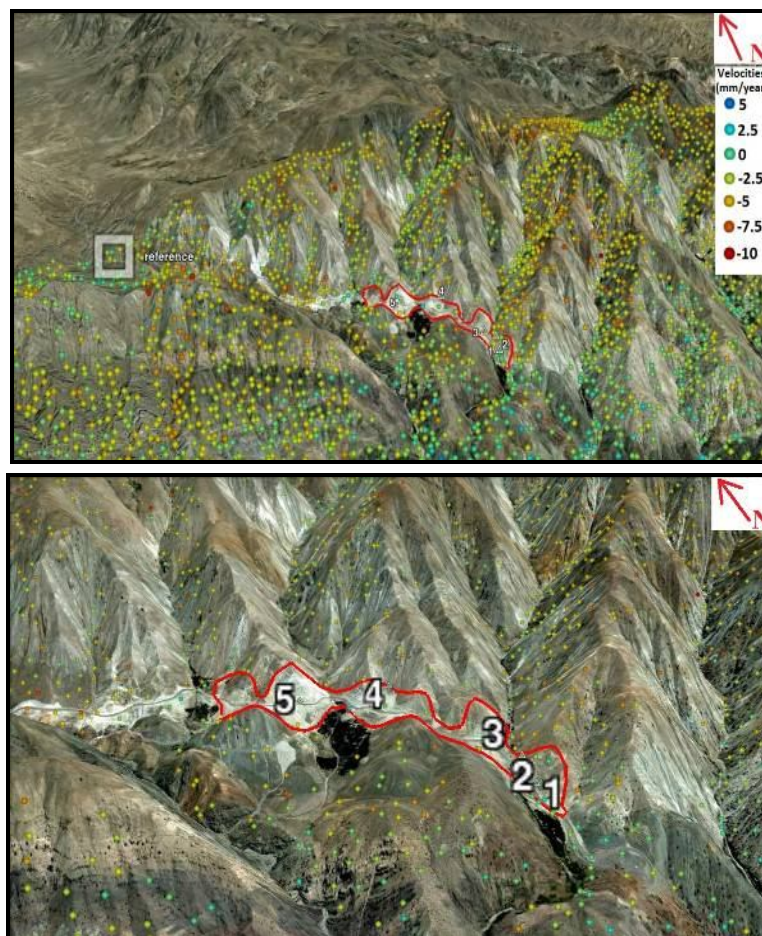




شکل ۶-۲۰- سرعت متوسط سالانه‌ی پیکسل‌ها در راستای خط دید ماهواره در منطقه‌ی دلفارد در دو مقیاس مختلف



شکل ۶-۲۱- سری زمانی نقاط نشان مورد بررسی در منطقه‌ی دلفارد. جابه‌جایی‌ها در راستای دید ماهواره و واحد‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۶-۲۲- نمای سه بعدی از زمین لغزش در منطقه‌ی دلفارد. محدوده‌ی زمین لغزش با خط سفید، محدوده‌ی مرجع با مربع و نقاطی که سری زمانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت با شماره مشخص شده‌اند.

### ۶-۲- نکات مورد نظر در انجام یک پروژه رفتارسنجی به کمک روش تداخل سنجی راداری

با توجه به مباحثی که در فصل پیش ارائه گردید، این روش نیاز به مطالعه و دانش در زمینه مباحث تداخل سنجی راداری دارد. در واقع، فردی که مسئول انجام پروژه رفتارسنجی به کمک تداخل سنجی راداری است بایستی از قبل دانش کافی درباره این روش داشته باشد و با تصاویر آشنایی کافی را داشته باشد. در این صورت می‌توان بهترین تصاویر متناسب با دامنه مد نظر به تعداد کافی و در بازه‌های زمانی مناسب انتخاب نماید. همچنین لازم به ذکر است که این فرد باید اطلاعات به روز در زمینه آخرین محصولات و تصاویر از ماهواره‌های راداری داشته باشد.

### ۶-۳- هدف از انجام پروژه

به طور کلی باید هدف از انجام پروژه به طور کاملاً واضح و شفاف مشخص شود. استفاده از تداخل سنجی راداری برای مطالعه دامنه‌های لغزشی دارای چندین کاربرد متفاوت است.



- ۱- در بعضی از مناطق به دلیل کوهستانی بودن و عدم دسترسی به تمامی دامنه‌ها و نداشتن نقشه پراکنش، خواهان تهیه یک نقشه پراکنش هستند. خوشبختانه از این تکنیک به منظور تهیه نقشه‌های پراکنش می‌توان بهره گرفت. در ادامه این فصل نمونه‌ای از یک خروجی تداخل‌سنجی که همانند یک نقشه پراکنش عمل می‌کند نشان داده شده است.
- ۲- در بعضی از مناطق خواهان کشف و شناسایی دامنه‌های ناپایدار در حال حرکت هستیم. در واقع برخی از دامنه‌های لغزشی دارای حرکت بسیار کند و آهسته هستند که در روی زمین به راحتی دیده نمی‌شود. به کمک تصاویر راداری در بازه‌های زمانی کوتاه می‌توان جابه‌جایی ناچیز و آهسته دامنه مورد نظر را به دست آورد.
- ۳- در بعضی مواقع لازم است بدانیم زمان شروع حرکت چه زمانی بوده است. به منظور تعیین زمان دقیق حرکت دامنه لغزشی می‌توان از تصاویر رادار و روش تداخل‌سنجی راداری استفاده نمود. در این حالت با توجه به انتخاب تصاویر متعدد در سال‌های متمادی و در سال‌های گذشته و آنالیز جابه‌جایی و تهیه نمودارهای سری زمانی، می‌توان زمان حرکت برخی از دامنه را به دست آورد.
- ۴- مهم‌ترین و شاید پر کاربردترین مورد، به دست آوردن جابه‌جایی و آنالیز سری زمانی برای یک دامنه لغزشی منحصر به فرد است. در این حالت می‌توان سرعت حرکت و جابه‌جایی زمین لغزش را محاسبه نمود.
- ۵- یکی از دیگر کاربردهای تداخل‌سنجی در مطالعه رفتارسنجی زمین لغزش، به دست آوردن نوع زمین لغزش است. به عبارتی دیگر، در برخی از موارد می‌توان متوجه شد که زمین لغزش از نوع چرخشی است یا نه. در فصل هفتم به ذکر یک نمونه عملی خواهیم پرداخت.

#### ۴-۶- مواردی که باید در انتخاب تصاویر در نظر گرفته شود

بنابراین پس از مشخص شدن هدف پروژه بایستی شیئی را جهت مطالعه رفتارسنجی راداری انتخاب نماییم که از تمام لحاظ بهینه باشد. ممکن است که در یک منطقه نقشه پراکنش و ریسک خطر دامنه لغزشی از قبل موجود باشد. به این ترتیب با کمک این نقشه می‌توان دامنه‌ای را برای مطالعه انتخاب نمود که علاوه بر داشتن ریسک و خطر برای این تکنیک مناسب باشد. در بیش تر موارد شیب مورد نظر از قبل مد نظر بوده باشد. لذا لازم است قبل از اینکه به سفارش تصاویر و شروع مطالعه رفتارسنجی آن دامنه لغزشی بپردازیم، دامنه لغزشی را بررسی و شناسایی نماییم.

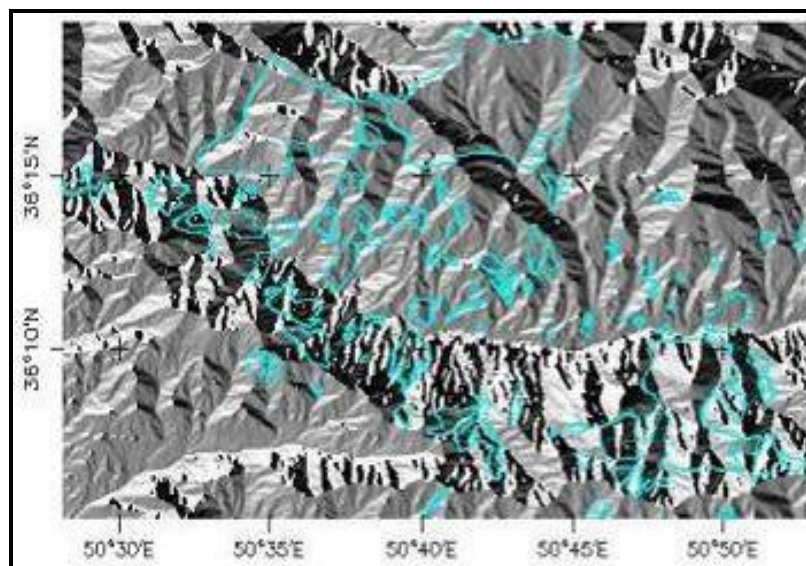
به این گونه که توسط تصاویر ماهواره‌ای Google Earth جهت دامنه را شناسایی کنیم. به عنوان مثال یک شیب می‌تواند شمالی- جنوبی یا شرقی- غربی باشد. بنابراین می‌توانیم نوع تصویر مورد نظر را از لحاظ قرار گرفتن روی مدار Ascending یا Descending در نظر بگیریم تا بتوان آن شیب را در تصویر راداری سفارش داده شده مشاهده نمود. در (بخش ۳-۷) و (بخش ۳-۱۴) درباره مشکلاتی که ممکن است در یک پروژه تداخل‌سنجی از نظر ارتباط بین زاویه دید ماهواره و راستای شیب به طور مفصل بحث شد.

در ادامه جهت بررسی (بخش ۳-۱۴-۱) در یک نمونه منطقه به تفسیر نقشه جهت شیب منطقه می‌پردازیم.





به کمک (شکل ۶-۲۳) می‌توانیم روابط بین راستای دید رادار و جهت لغزش را مورد بررسی قرار دهیم. لازم به ذکر است که پلیگون‌های آبی رنگ در نقشه نشان‌دهنده مناطق مستعد زمین لغزش هستند که توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور شناسایی شده‌اند. همان‌طور که در (شکل ۶-۲۳) مشخص است، شیب‌های غربی- شرقی به رنگ خاکستری تیره در آمده‌اند، یعنی ما قادر به اندازه‌گیری لغزش این دامنه‌ها نیستیم (البته این به معنی پدیده سایه نخواهد بود بلکه در تداخل نماهایمان به دلیل عمود بودن رادار بر شیب، تغییر فازی مشاهده نخواهد شد). این مساله با این تئوری که شیب‌های غربی - شرقی در تصاویر مربوط به مدارهای شمالی - جنوبی قابل پایش نیستند کاملاً مطابقت دارد، چرا که تصاویر مورد استفاده در این تحقیق از نوع شمالی - جنوبی است. به این ترتیب ما انتظار داریم که در این تصویر راداری تنها شیب‌های شمالی - جنوبی و شرقی - غربی را شناسایی کنیم.



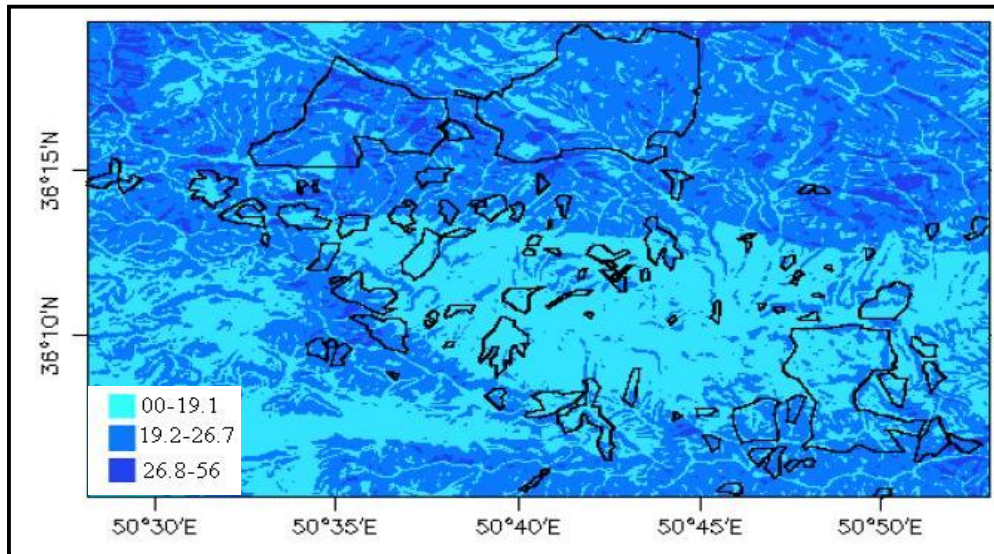
شکل ۶-۲۳- نمونه‌ای از یک نقشه جهت شیب [۳۷]

همچنین با کمک تصاویر Google Earth یا هر روش دیگری باید ابعاد و محدوده لغزش مشخص شود. در این صورت می‌توان نوع تصاویر را از لحاظ طول موج و رزولوشن مکانی انتخاب نمود. به عنوان نمونه تصاویر Envisat دارای رزولوشن بیش‌تری نسبت به TerraSAR\_x است.

مورد دیگری که باید قبل از سفارش داده‌ها در نظر گرفت این است که اگر هدف از پروژه تعیین زمان حرکت زمین لغزش باشد می‌بایست از تصاویر مربوط به ماهواره‌هایی استفاده نماییم که بدانیم در آن زمان در حال تصویربرداری بوده‌اند. به عنوان مثال، در یک منطقه می‌دانیم که دامنه لغزشی حدوداً ۱۰ سال پیش رخ داده است. بهتر است در این حالت از تصاویر ERS1/2 نیز استفاده شود که در آن زمان در حال تصویربرداری بوده است. بنابراین مسئول انجام پروژه همان‌طور که در فوق ذکر شد بایستی بر انواع ماهواره و زمان و مشخصات تصویربرداری آن‌ها کاملاً اشراف داشته باشد تا تصاویر مناسبی برای کار انتخاب گردند.



همچنین باید با کمک نقشه‌های ارتفاعی رقومی و نرم‌افزارهایی مانند ArcGIS نقشه شیب منطقه را تهیه نمود تا متوجه شویم که این دامنه دارای چه زاویه‌ای است. به کمک زاویه شیب می‌توانیم نوع تصویر انتخابی را از لحاظ نوع سنجنده انتخاب نماییم. علت در نظر گرفتن این نکته در (بخش ۳-۱۴) و (بخش ۳-۷) به طور مفصل به بحث پرداخته شد. به عنوان نمونه، سنجنده‌های IS2 دارای زاویه تابش بین  $19/2$  تا  $26/7$  درجه می‌باشند. به عنوان نمونه می‌توانید به (شکل ۶-۲۴) مراجعه نمایید.



شکل ۶-۲۴- نمونه‌ای از یک نقشه زاویه شیب منطقه

همان‌طور که در (شکل ۶-۲۴) مشاهده می‌کنید، شیب‌های  $0-19/1$ ،  $19/2-26/7$  و  $26/8-56$  درجه به ترتیب با رنگ‌های آبی روشن، آبی تیره و آبی متوسط مشخص شده‌اند. اگر تصاویر مورد استفاده در پروژه به گونه‌ای باشد که زاویه تابش راداری آن از  $19/2$  تا  $26/7$  درجه متغیر باشد مانند IS2، به این ترتیب بنا بر توضیحات ارائه شده در (بخش ۳-۱۴)، در شیب‌هایی که متمم زاویه شیب آن‌ها در این محدوده قرار می‌گیرد میزان صحیح جابه‌جایی محاسبه می‌شود (حالت ایده‌آل). به عبارتی دیگر این تکنیک در این تصاویر خاص تنها قادر به اندازه‌گیری مولفه صحیح جابه‌جایی برای دامنه‌هایی می‌باشد که زاویه شیب آن‌ها در بازه  $70/8-63/3$  قرار می‌گیرند. از آنجایی که منطقه فوق دارای زوایای شیب کم‌تر از  $56$  درجه است (متمم زوایای شیب بیش‌تر از  $34$  درجه) لذا ما با حالت نه چندان مناسب (زاویه متمم شیب بزرگ‌تر از زاویه تابش رادار) روبرو هستیم، به عبارت دیگر قادر به اندازه‌گیری مولفه‌ای از جابه‌جایی هستیم که موازی با راستای دید رادار می‌باشد [۳۷].

## ۶-۵- مواردی که در پردازش تصاویر راداری بایستی در نظر گرفت

پس از انتخاب تصاویر متناسب با دامنه لغزشی، بایستی عملیات تداخل‌سنجی راداری را با در نظر گرفتن موارد زیر

شروع نماییم:



ابتدا برای تعیین جفت‌های مناسب تداخل‌سنجی باید به صورت زیر عمل کرد:

ابتدا بازه زمانی کل تصاویر را محاسبه نموده و بازه میانی آن را به دست می‌آوریم. نزدیک‌ترین تصویر از نظر زمانی را به عنوان یک کاندید برای مرجع در نظر گرفتن، انتخاب می‌کنیم. سپس جدایی مکانی عمودی جفت‌های تداخل‌سنجی را محاسبه می‌نماییم. در صورتی که این مقادیر، مقادیر مناسبی باشند یا به عبارتی از جدایی مکانی بحرانی تجاوز نمایند تصویر منتخب، تصویر مناسبی برای مرجع بودن بوده است اما در صورتی که مقادیر به دست آمده، مقادیر نامناسبی به شمار آیند (از جدایی مکانی عمودی بحرانی بزرگ تر باشند) تصویر دیگری را بایستی به عنوان مرجع در نظر گرفت. تصویری که در نظر خواهیم گرفت تصویر قبل یا بعد از تصویر مرجع اولیه است. به این ترتیب پردازش‌های لازم جهت محاسبه جدایی مکانی جفت‌های تداخل‌سنجی را برای هر یک انجام می‌دهیم. بهترین تصویر از نظر مناسب بودن مقادیر مکانی به عنوان تصویر مرجع در نظر گرفته می‌شود و ادامه پردازش‌ها بر اساس آن صورت خواهد گرفت. لازم به ذکر است که اثر مولفه مداری به کمک اطلاعات مداری دقیق مربوط به هر زمان موجود در ftp سایت DEOS حذف گردید. جهت حذف مولفه توپوگرافی نیز می‌توان از مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک ۹۰ متری استفاده نمود.

ممکن است که در اینترفروگرام‌های به دست آمده برای تصاویر اولیه موجود، فرینج‌های قابل ملاحظه‌ای مشاهده نگردید. همچنین جهت کاهش اثرات اتمسفری و جهت محاسبه سری زمانی می‌توان از مجموعه خط مبناهای عمودی کوتاه یا SBAS استفاده شود که تئوری آن در فصل پنجم ارائه خواهد شد. در این روش، تصویر مرجع اولیه نادیده گرفته می‌شود و بر اساس یک سری قیود و شروط که به نرم‌افزار معرفی می‌شود، دو به دو اینترفروگرام‌ها تشکیل می‌شوند. لازم به ذکر است که جهت انجام روش SBAS بهتر است از نرم‌افزار رایگان StaMPS بهره گرفت که توسط دانشگاه Delft توسعه داده شده است. شرط اول آن است که مولفه عمودی خط‌مبنا<sup>۱</sup>ی دو تصویر تشکیل دهنده اینترفروگرام کوچک‌تر از x متر باشد. در این حالت ناهمبستگی مکانی<sup>۲</sup> کاسته می‌شود و اینترفروگرام‌های با کیفیتی به دست می‌آیند.

کوتاهی بازه زمانی<sup>۳</sup> (جدایی زمانی) دو تصویر از دیگر شروط استفاده شده می‌باشد. هرچه جدایی زمانی کم‌تر باشد ناهمبستگی زمانی<sup>۴</sup> کم‌تر خواهد بود اما باید توجه نمود که این جدایی زمانی کم‌تر از بازه زمانی وقوع پدیده مورد بررسی نباشد. به عبارتی دیگر، در این بازه زمانی زمین لغزش رخ داده باشد. در غیر این صورت تغییرات فازی مشاهده نخواهد شد. به عنوان مثال، فاصله زمانی جفت تصاویر انتخاب شده از  $\Delta$  روز کم‌تر باشد.

- 1- Spatial Baseline
- 2- Spatial Decorrelation
- 3- Temporal Baseline
- 4- Temporal Decorrelation

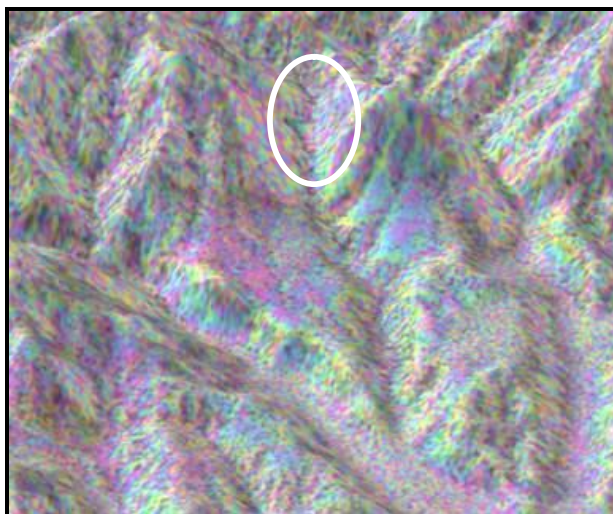


آخرین شرط، شرط همدوسی<sup>۱</sup> است. تصاویری جهت تشکیل اینترفروگرام در نظر گرفته می‌شوند که همدوسی مناسبی داشته باشند. همدوسی کمیتی است بین صفر و یک که وابستگی رفتار عارضه را در مقابل رادار در دو تصویر نشان می‌دهد. هرچه این عدد به یک نزدیک باشد رفتار عارضه در دو تصویر تشکیل دهنده اینترفروگرام وابستگی بیشتری دارند. به عنوان مثال تصاویری انتخاب شوند که همدوسی پیکسل‌های نظیر به نظیر از  $Z$  بیش‌تر باشد. به زبان ساده‌تر، نرم‌افزار جفت تصاویری را در نظر می‌گیرد که جدایی مکانی کوچک‌تر از  $X$  متر، جدایی زمانی کم‌تر از  $Y$  روز و مقادیر همدوسی بزرگ‌تر از  $Z$  داشته باشند.

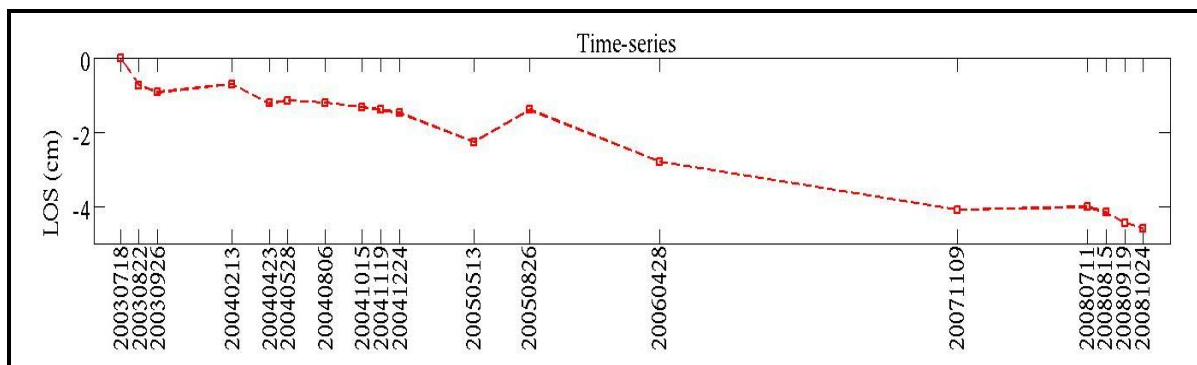
پس از انتخاب تصاویر با قیود معرفی شده، تداخل‌سنجی مانند آنچه که در قسمت قبل گفته شد انجام گرفته شود. در این حالت تعداد قابل توجهی اینترفروگرام به دست می‌آید که جدایی مکانی و زمانی کوچکی داشتند و با کیفیت‌تر از اینترفروگرام‌های اولیه می‌باشند.

بر خلاف فرینج‌های ناشی از زلزله، آتشفشان و فرونشست، فرینج‌های واضح و قابل ملاحظه‌ای در اینترفروگرام‌ها مشاهده نمی‌شود. چرا که ابعاد اینترفروگرام‌ها وسیع و مناطق لغزشی کوچک هستند. بنابراین بایستی با دقت و بزرگنمایی بیش‌تری به بررسی آن‌ها پردازیم. پس از بررسی بیش‌تر، ممکن است فرینج‌هایی در مناطق کوچکی یافت شوند که از صحت آن‌ها اطمینان نداشته باشیم، چرا که ممکن است ناشی از پدیده‌های مختلف و حتی ناشی از اثرات اتمسفری باشد. در این حالت بایستی به کمک نقشه‌های ارتفاعی رقومی و اینترفروگرام‌هایی که در آن‌ها دامنه‌هایی مشکوک به لغزش وجود دارند اینترفروگرام‌هایی سه بعدی تهیه نمود. در اینترفروگرام‌های سه بعدی، که می‌توان به کمک نرم‌افزار Arc scene تهیه نمود، می‌توان متوجه شد که فرینج بر روی شیب و دامنه قرار می‌گیرند یا خیر. در صورتی که در سطح صاف قرار بگیرند ممکن است نشان‌دهنده نشست زمین باشند. در حالی که قرارگیری آن‌ها بر روی دامنه تا حدی ما را به اطمینان از حرکت دامنه لغزشی وا می‌دارد. البته این کافی نیست و باید به منظور اطمینان به منطقه مراجعه کرد تا آثار حرکت توده ناپایدار را مشاهده نمود. نمونه‌ای از یک اینترفروگرام سه بعدی را می‌توانید در (شکل ۶-۲۵) مشاهده نمایید. همچنین می‌توانیم از نقشه پراکنش زمین لغزش موجود در آن منطقه نیز به منظور اطمینان اولیه از نتیجه به دست آمده استفاده نمود.



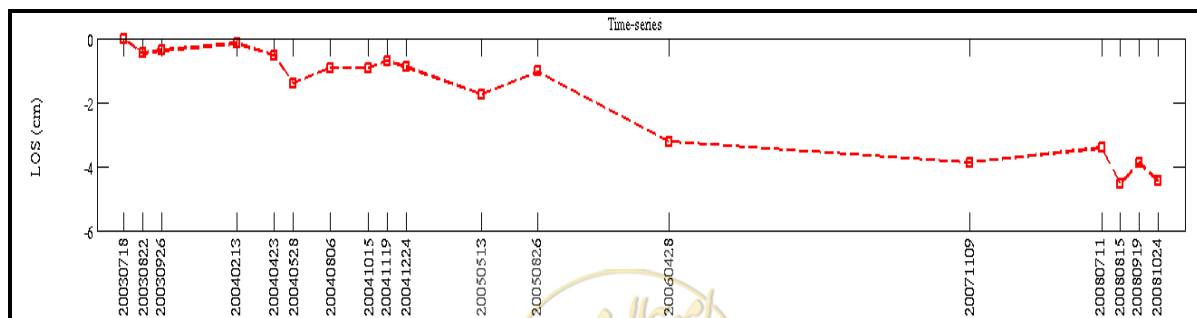


شکل ۶-۲۵- نمونه‌ای از یک مدل سه بعدی اینترفروگرام که بیانگر قرار گرفتن تغییرات فاز شناسایی شده بر روی سطوح شیب‌دار می‌باشد.



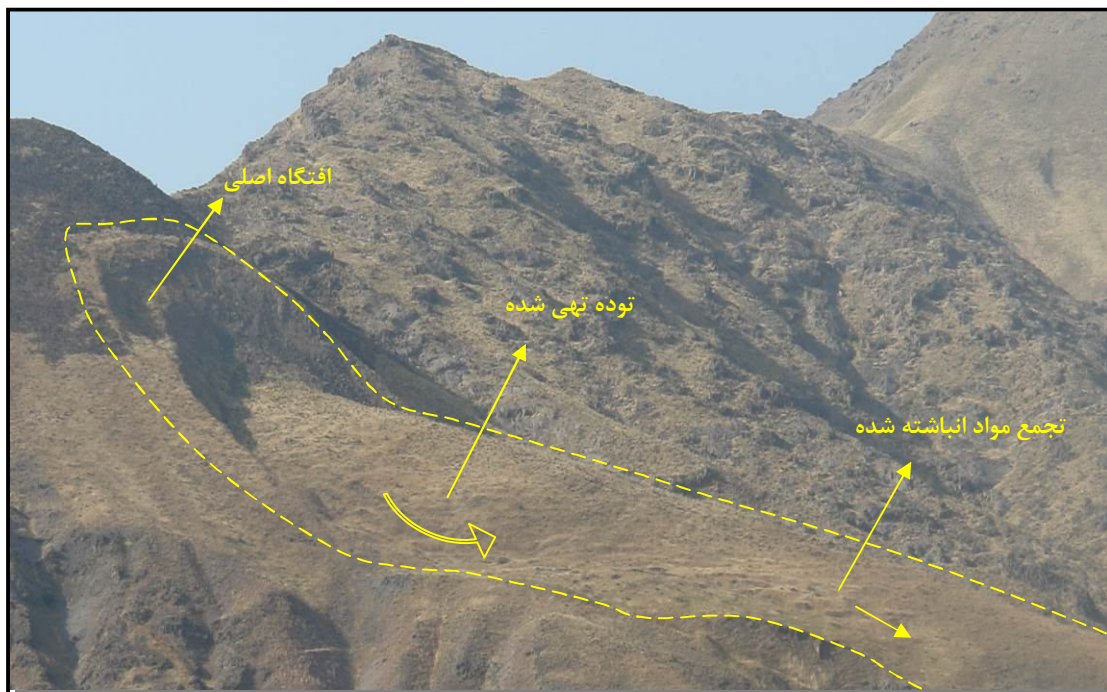
شکل ۶-۲۶- نمونه‌ای از یک نمودار سری زمانی که جابه‌جایی معادل ۵ سانتی‌متر را در راستای دید ماهواره نشان می‌دهد [۳۷].

در پایان لازم است به ذکر نمونه‌ای بپردازیم که در بخش اهداف استفاده از تداخل سنجی برای مطالعه رفتارسنجی راداری موارد ۳ و ۵ به آن‌ها اشاره شد. در مورد ۳ اهداف پروژه بیان شد که در نمونه‌ای از پروژه انجام شده در دانشگاه تهران توانستیم زمان حرکت یک لغزش را مشخص نماییم. این کار به کمک آنالیز سری زمانی آن دامنه میسر گردید. همان‌طور که در (شکل ۶-۲۷) ملاحظه می‌نمایید، پیکسل مورد نظر که تقریباً نشان‌دهنده میانگین تمامی پیکسل‌های شناسایی شده بر روی آن دامنه بود، حرکت خاصی را نشان نمی‌دهد. اما در ادامه متوجه جابه‌جایی آن می‌شویم.

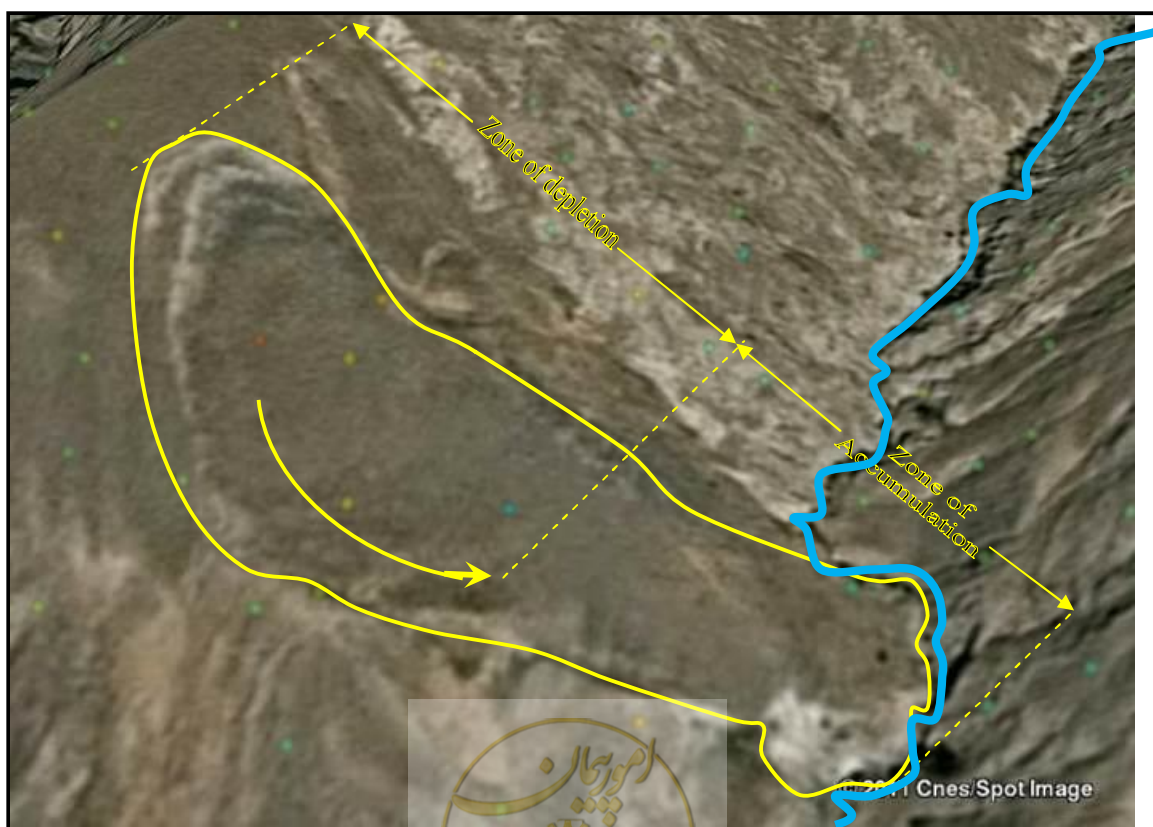


شکل ۶-۲۷- نمونه‌ای از یک نمودار سری زمانی که در آن زمان حرکت لغزش مشخص شده است.

در مورد ۵ اهداف پروژه رفتارسنجی به کمک تداخل‌سنجی راداری، اشاره شد که به کمک این تکنیک می‌توانیم نوع زمین لغزش را مشخص نماییم. عکس زمینی که از منطقه گرفته شده درستی نتیجه حاصله را نشان می‌دهد.

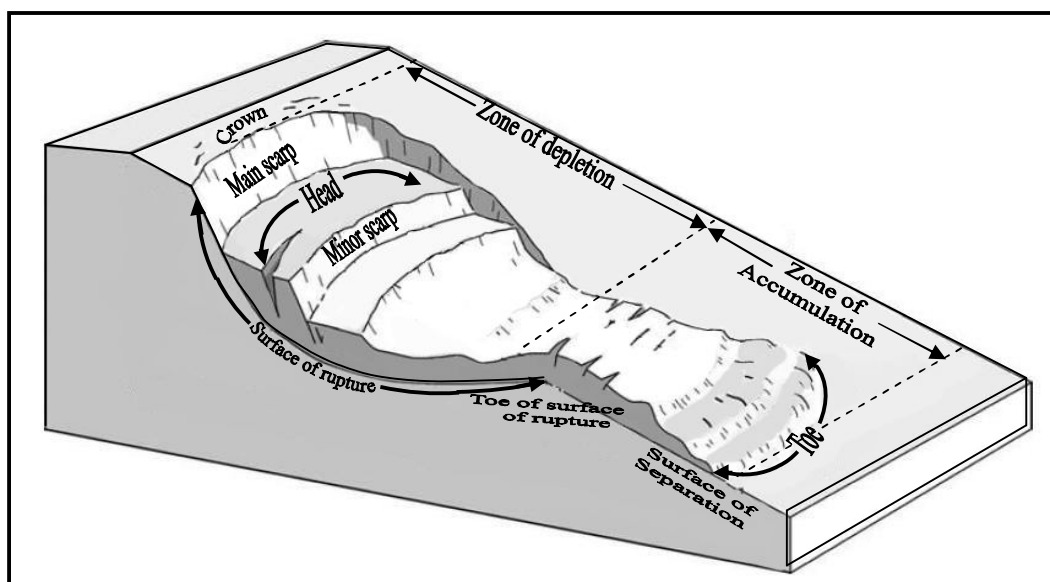


شکل ۶-۲۸- نمایی از زمین لغزش یک دامنه که یک نمونه عینی از زمین لغزش چرخشی است [۳۷]

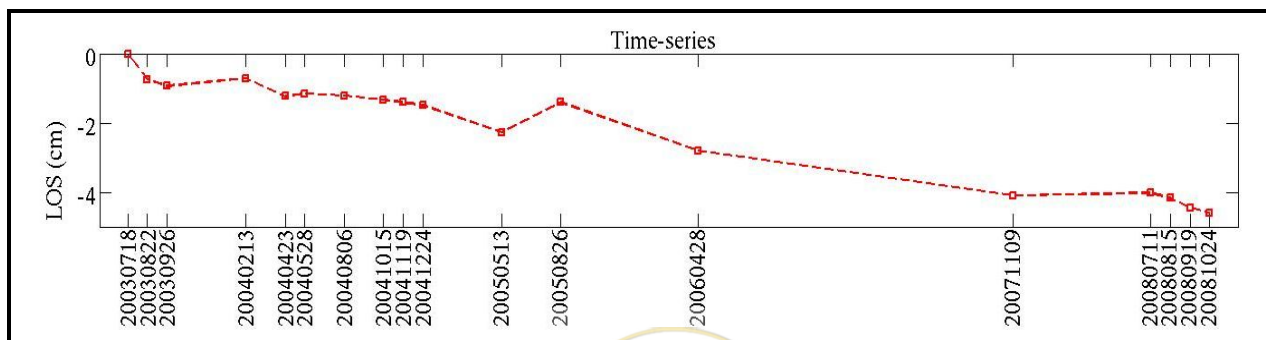


شکل ۶-۲۹- هم‌پوشانی پیکسل‌های PS بر روی نقاط مختلف دامنه لغزشی [۳۷]

همان طور که در (شکل ۶-۲۸) مشاهده نمودید، زمین لغزش مورد نظر از نوع چرخشی است. (شکل ۶-۳۰) نمای شماتیکی از یک زمین لغزش چرخشی را نشان می دهد. در صورتی که بتوانیم پیکسل هایی در نقاط مختلف این دامنه شناسایی کنیم، می توان مکانیزم حرکت آن را بررسی نمود. در این دامنه پنج پیکسل در نقاط مختلف شناسایی گردیده که نتایج آنالیز سری زمانی آن را در این بخش ملاحظه می نماییم. (شکل ۶-۲۹) چگونگی قرار گرفتن این پیکسل ها را نشان می دهد. همان طور که از (شکل ۶-۲۹) برمی آید، انتظار می رود که پیکسل شناسایی شده بر روی افتگاه اصلی بیشترین جابه جایی را در نتایج آنالیز سری زمانی از خود نشان دهد. همچنین ترند این جابه جایی بایستی منفی باشد. جهت بررسی و صحت این مطلب نمودار سری زمانی را برای پیکسل مورد نظر را در شکل (شکل ۶-۳۱) ترسیم می نماییم. همان طور که در این شکل دیده می شود، این پیکسل که بر روی افتگاه اصلی قرار گرفته است، حداکثر ۴/۵ سانتی متر جابه جایی از خود نشان می دهد. این نقطه با یک ترند منفی و به صورت پیوسته در حال حرکت بوده است. حال بایستی نمودار سری زمانی دیگر نقاط را نیز بررسی نماییم.



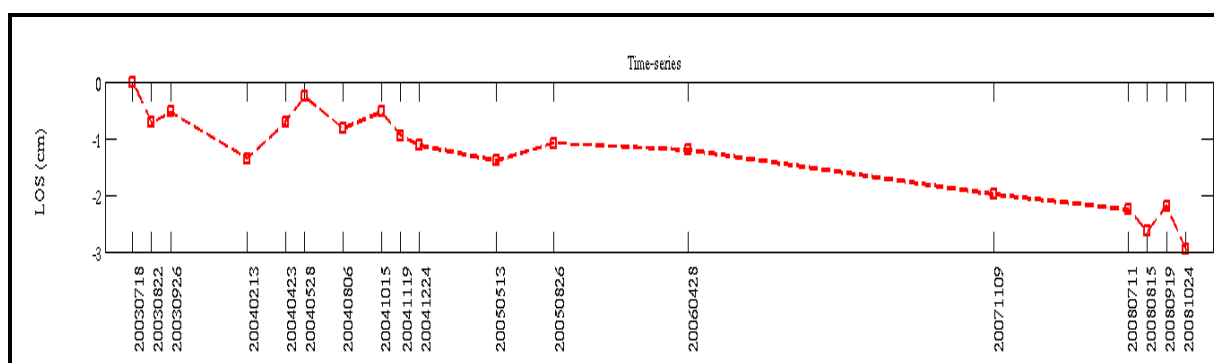
شکل ۶-۳۰- نمای شماتیکی از یک لغزش چرخشی



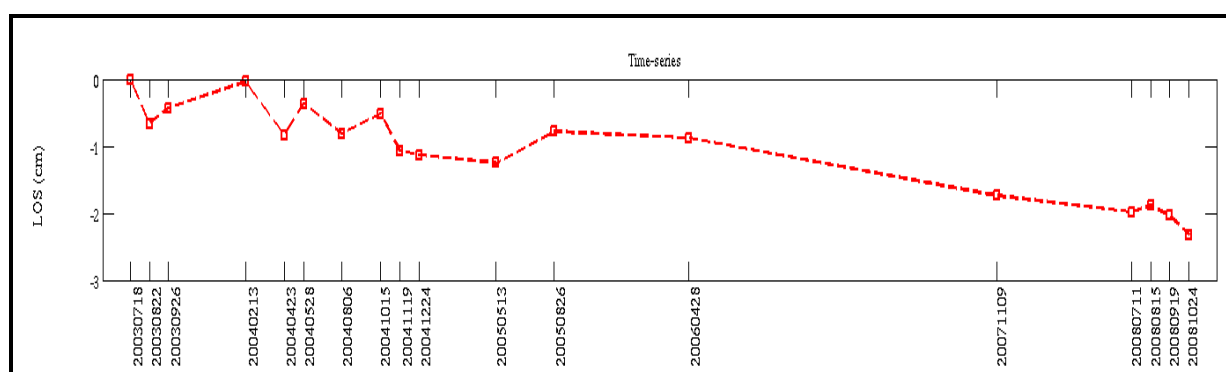
شکل ۶-۳۱- سری زمانی نقطه واقع بر قله لغزش



دو PS دیگر نیز بر روی توده اصلی شناسایی شده است که انتظار می‌رود که جابه‌جایی کم‌تری نسبت به PS شناسایی شده بر روی افتگاه لغزش را نشان دهند. این تئوری بر اساس مکانیزم لغزش چرخشی در نظر گرفته شده است. خوشبختانه نمودار سری زمانی این نقاط، صحت تئوری مورد انتظار را تایید می‌نماید. این نقاط دارای جابه‌جایی‌های حداکثر ۲ و ۳ سانتی‌متر را نشان می‌دهند. شکل‌های (شکل ۶-۳۲) و (شکل ۶-۳۳) بیانگر حرکت پیوسته نزولی این دو پیکسل هستند. در هر دو پیکسل، بیش‌ترین نرخ جابه‌جایی در بازه زمانی ۲۰۰۷/۱۱/۹-۲۰۰۶/۴/۲۸ ثبت شده است. به این ترتیب این تئوری که توده اصلی دارای جابه‌جایی کم‌تری نسبت به قله زمین لغزش دارد را اثبات می‌نماید.



شکل ۶-۳۲- سری زمانی نقطه میان دامنه لغزشی

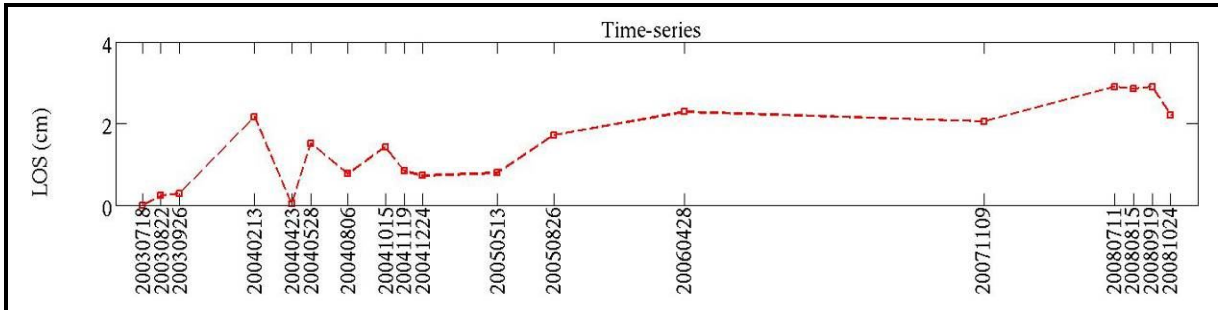


شکل ۶-۳۳- سری زمانی نقطه میانی لغزش

حال کافی است که نمودار سری زمانی مربوط به نقطه واقع بر توده تجمع یافته لغزش را مورد بررسی قرار دهیم و مکانیزم حرکت چرخشی را تکمیل نماییم. (شکل ۶-۳۴) جابه‌جایی این پیکسل را در بازه زمانی مورد نظر نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت این نقطه در طول بازه مورد بررسی دارای حرکت مثبت و صعودی است. به طوری که معادل ۲/۵ سانتی‌متر در راستای دید ماهواره جابه‌جایی را از خود نشان داده است. همان‌طور که در (شکل ۶-۲۹) مشاهده نمودید، این پیکسل بر روی توده تجمع یافته قرار گرفته است. لازم به ذکر است که این توده، توده تجمع یافته، پس از مدت زمانی خود دچار لغزش و جابه‌جایی می‌شود. به عبارت دیگر، ما انتظار داریم که جابه‌جایی این نقطه دارای یک ترند منفی بوده و پس از مدت زمانی ترند منفی داشته باشد. این مساله در نمودار سری زمانی نشان داده شده در (شکل ۶-۳۴) اثبات می‌شود. به این ترتیب، پیکسل شناسایی شده در بازه ۲۰۰۸/۱/۲۴-۲۰۰۸/۹/۱۹ دچار لغزش جدیدی شده



و جابه‌جایی منفی‌ای را از خود نشان داده است. تغییر مسیر شدید آبراهه پایین دست این توده لغزشی که در شکل (شکل ۶-۲۹) به وضوح مشخص است، دلالت بر حرکت توده تجمع یافته پس از انباشتگی دارد.



شکل ۶-۳۴- سری زمانی نقطه واقع بر توده تجمع یافته لغزش





# پیوست ۱

---

---





### پ.۱-۱- تعریف توپوگرافی

توپوگرافی از نظر لغوی، به معنی پستی و بلندی می‌باشد و در این دست‌ورالعمل منظور از توپوگرافی، پستی و بلندی‌های سطح زمین و یا همان ارتفاع عوارض زمین از سطح دریا می‌باشد. ارتفاع گاهی به صورت نسبی و گاهی به صورت مطلق بیان می‌گردد. به طور مثال اگر ارتفاع کوه دماوند را نسبت به ارتفاع تهران مقایسه نمائیم به آن ارتفاع نسبی می‌گویند. (مثلا بگوییم کوه دماوند به اندازه  $h$  متر از تهران بلندتر می‌باشد). ولی چنانچه ارتفاع یک عارضه نسبت به یک سطح مبنا بیان گردد به آن ارتفاع مطلق می‌گویند. سطح مبنای ارتفاعات عموماً سطح دریاها و آب‌های آزاد می‌باشد. که در ایران سطح دریای آب‌های بندر فاو در خلیج فارس انتخاب شده است و ارتفاع تمام عوارض خشکی، اعم از کوه، دشت، دامنه و ... نسبت به آن سنجیده می‌شود.

### پ.۱-۲- نقشه‌های توپوگرافی

#### پ. ۱-۲-۱- دیدگاه کلی

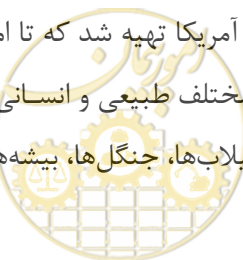
نقشه‌های توپوگرافی نقشه‌هایی بامقیاس‌های بزرگ و کوچک هستند که برای نشان دادن خصوصیات فیزیکی سطح زمین به کار می‌روند. این نقشه‌ها برای مطالعات زمین‌شناسی بخاطر اطلاعات مفید آن از جمله قابلیت اندازه‌گیری فواصل افقی و یا ارتفاع عمودی نقاط مختلف یک وسیله اساسی به شمار می‌روند.

#### پ.۱-۲-۲- منحنی‌های میزان

منحنی‌های میزان خطوط فرضی هستند که تمام نقاط واقع در آن‌ها دارای ارتفاع یکسان نسبت به سطح دریا و یا یک مبدا مشخص هستند. منحنی‌های میزان علاوه بر مشخص نمودن وضعیت پستی و بلندی ناحیه ارتفاع و شیب واقعی محل را نیز مشخص می‌نمایند.

فواصل منحنی‌های میزان بیانگر مسافت عمودی بین دو منحنی هستند. این فاصله معمولاً برای تمام منحنی‌های متوالی ثابت نگه داشته می‌شود، مگر در مواقعی که ارتفاع منطقه معینی مانند قله و غیره را نشان دهند. نخستین مجموعه چندبرگ نقشه توپوگرافی از سرتاسر یک کشور، «Carte géométrique de la France» فرانسه بود که در سال ۱۷۸۹ کامل شد. نقشه‌های توپوگرافی توسط ارتش و با هدف سهولت طرح‌ریزی برای جنگ و نیز تعیین محل‌های دفاعی ایجاد شد. بنابراین اطلاعات پیرامون ارتفاع، از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده‌است. پس از آن نقشه‌های توپوگرافی به یکی از منابع پایه ملی کشورهای پیشرفته در طراحی زیرساخت‌ها و بهره‌برداری از منابع تبدیل شد. در آمریکا در سال ۱۸۷۹ نقشه توپوگرافی سرتاسر آمریکا تهیه شد که تا امروز نیز باقی مانده است.

محتوی نقشه‌های توپوگرافی شامل عناصر مختلف طبیعی و انسانی می‌باشد. ناهمواری‌های سطح زمین تا حد کوچک‌ترین تپه‌ها و حتی شیارهای ناشی از سیلاب‌ها، جنگل‌ها، بیشه‌ها، باتلاق‌ها، ماسه‌زارها، دریاچه‌ها، آب‌های جاری،



انواع راه‌ها، پل‌ها، کانال، از شهرهای بزرگ گرفته تا روستاها بعضاً تا حد خانه‌های منفرد و ده‌ها عناصر دیگر روی این نقشه‌ها نشان داده می‌شود.

### پ.۱-۲-۳- قوانین مربوط به منحنی‌های میزان

- خطوط تراز به طرف بالادست رودها یا به طرف بالادست دره خم می‌شوند. در محل دره‌ها این منحنی‌ها، شکل V به وجود می‌آورند که نوک آن به طرف بالادست رود است و به طرف بالادست رود منحنی میزان پی‌درپی ارتفاعات بالاتری را نشان می‌دهند.
- خطوط تراز در قسمت‌های فوقانی تپه‌ها منحنی‌های بسته‌ای را به وجود می‌آورند. قله تپه بالاتر از بالاترین منحنی میزان بسته قرار دارد.
- گودال‌های (فرورفتگی‌های) فاقد راه خروجی را با منحنی‌ها بسته هاشوردار نشان می‌دهند. هاشورها طوری زده می‌شوند که نوک خط‌های هاشور طرف داخل گودی را نشان دهند.
- فاصله خطوط تراز در دامنه‌های کم‌شیب بیشتر می‌شود.
- فاصله خطوط تراز در دامنه‌های پرشیب کم می‌شود.
- خطوط تراز دارای فواصل یکسان نشان‌گر دامنه‌های دارای شیب یک‌نواخت است.
- خطوط تراز در موارد استثنایی همچون صخره‌های آویزان، از روی یکدیگر عبور نکرده و همدیگر را قطع نمی‌کنند. تمام خطوط تراز، در نهایت یا در روی خود نقشه یا در حاشیه نقشه بسته می‌شوند.
- یک خط تراز بالا هیچ وقت بین دو خط تراز پایین‌تر از خود قرار نمی‌گیرد و بالعکس، به عبارت دیگر تغییر در جهت شیب زمین همیشه با تکرار خطوط تراز هم ارتفاع به صورت دو خط تراز جداگانه هم ارتفاع و یا بر روی یک خط تراز که دور می‌زند همراه است.
- ارتفاع نقاط مرتفع بین خطوط تراز در بسیاری از جاها همچون تقاطع جاده‌ها، قله کوه‌ها و سطح دریاچه داده می‌شود.

### پ.۱-۲-۴- مقیاس نقشه

مقیاس (Scale) نقشه ارتباط بین مسافت یا سطح را روی نقشه نسبت به مسافت یا سطح در روی زمین را نشان می‌دهد. این مقدار را عموماً به صورت نسبی همچون یا ۱:۲۴۰۰۰ نشان می‌دهند. صورت معمولاً ۱ است و نشان‌گر فاصله روی نقشه است و مخرج یک عدد بزرگ است که نشان‌گر فاصله در روی زمین است. بدین ترتیب ۱:۲۴۰۰۰ به معنی آن است که یک واحد روی نقشه معادل ۲۴۰۰۰ برابر همان واحد روی زمین است.

این امر بستگی به اندازه واحد ندارد. اغلب، یک مقیاس ترسیمی، یا پاره خطی، مفیدتر از مقیاس کسری است، زیرا اندازه‌گیری فاصله با آن آسان‌تر است. مقیاس پارخطی، شامل پاره‌خطی است که به فواصل مساوی تقسیم شده که

نمایان گر فواصل مساوی روی نقشه است. برای اندازه‌گیری دقیق کسری از واحد، معمولا یک قسمت در طرف چپ، به واحدهای کوچک‌تری تقسیم شده است.

### پ.۱-۳- نمایش عوارض مختلف سطح زمین در نقشه‌های توپوگرافی

قبل از کار با نقشه‌های توپوگرافی لازم است کاربر، شناخت جامعی نسبت به چگونه تشخیص دادن عوارض سطح زمین، به کمک خطوط توپوگرافی را داشته باشد. در همین خصوص چند عارضه مهم، از قبیل: کوه دامنه ملایم، دامنه تند، دشت، گودال، آبراهه، یال، قله، گردنه و پرتگاه با رسم شکل تشریح می‌گردد.

#### پ.۱-۳-۱- نمایش کوه بر روی نقشه توپوگرافی

کوه غالبا به شکل دوایر بسته نشان داده می‌شوند. به این صورت که، اولین دایره‌ای که کوچک‌تر از دیگر دوایر می‌باشد، مربوط به قله کوه و سایر دوایر که دایره قله را احاطه می‌کنند، دامنه کوه می‌باشد. این دوایر از سمت قله به طرف پای کوه بزرگ‌تر می‌گردند و بزرگ‌ترین دایره مربوط به پای کوه می‌باشد.

#### پ.۱-۳-۲- دامنه ملایم و دامنه تند

دامنه‌های کم‌شیب تپه‌های و کوه‌ها در نقشه‌های توپوگرافی از روی فواصل خطوط توپوگرافی آن‌ها، نسبت به دامنه‌های پر شیب متمایز می‌گردند. بدین صورت که فواصل منحنی‌های میزان، در دامنه‌های کم‌شیب، تقریبا، یکسان بوده و فاصله آن‌ها از یکدیگر، کمی بیش‌تر از دامنه‌های پر شیب دیده می‌شود. همچنین نوعی دیگری از دامنه هم وجود دارد که شیب آن در طول دامنه، گاهی تند و گاهی کند می‌شود، که به آن دامنه غیر یک‌نواخت گویند.

#### پ.۱-۳-۳- دشت و اراضی مسطح

ارضی دشتی بر روی نقشه‌های توپوگرافی، توسط فاصله بین خطوط میزان، مشخص می‌شوند. در یک نقشه توپوگرافی با مقیاس مشخص، مثلا ۱:۵۰۰۰۰ مناطق مسطح دارای منحنی‌های میزان، تقریبا صاف و فاصله خطوط منحنی آن نسبت به بخش کوهستان بیش‌تر می‌باشد. در کویرها فواصل خطوط میزان منحنی از یکدیگر به اندازه‌ای زیاد می‌شود که حتی خطوط میزان فرعی (خطوط ۱۰ متری) هم قابل نمایش می‌باشند.



### پ.۱-۳-۴- گودال

نمایش گودال، بر روی نقشه‌های، ظاهراً شبیه به منحنی‌های میزان کوهستان می‌باشد، با این تفاوت که ارتفاعات، بر عکس می‌گردد.

### پ.۱-۳-۵- یال و آبراهه

یال و آبراهه از نظر شکل خطوط منحنی میزان شبیه به هم می‌باشد و تنها از روی ارتفاع خطوط میزان مشخص می‌گردند هر چند در نقشه‌های توپوگرافی، آبراهه‌های اصلی به رنگ آبی می‌باشند، ولی بسیاری از آبراهه‌های فرعی، فاقد رنگ آبی بوده و تنها از روی ارتفاع خطوط میزان مشخص می‌گردند. برای رسیدن به یک قاعده کلی، جهت تشخیص یال و آبراهه می‌توان گفت: چنانچه بر روی نقشه توپوگرافی، از ارتفاعات کم، به سمت ارتفاع زیاد نگاه کنیم، هر کجا خطوط میزان به شکل علامت ۷ باشند نشانه یال و چنانچه به شکل ۸ باشند نشانه آبراهه می‌باشد.

### پ.۱-۳-۶- قله، گردنه، دامنه و پرتگاه

**الف- قله:** شکل قله بر روی نقشه‌های توپوگرافی به شکل دوایر بسته بوده و کوچک‌ترین دایره که عموماً بالاترین ارتفاع را نسبت به خطوط منحنی میزان اطراف خود دارد، قله کوه با قله تپه نامیده می‌شود. همچنین گاهی یک علامت ضربدر، درون دایره قله مشاهده می‌کنیم که در کنار آن یک عدد نوشته شده و آن نشان می‌دهد که انتهایی ترین نقطه قله، چه ارتفاعی دارد.

**ب- گردنه:** هنگامی که دو قله، کنار هم قرار بگیرند، بین آن‌ها یک گردنه وجود دارد که در نقشه‌های توپوگرافی به صورت یک فاصله مشاهده می‌شود.

گردنه از نظر تعریف، یک منطقه نسبتاً مسطح می‌باشد که همیشه بین دو قله قرار دارد.

**ج- دامنه:** فاصله بین دو یال و آبراهه، دامنه نامیده می‌شود.

**د- پرتگاه:** چنانچه خطوط توپوگرافی یک دامنه، خیلی به یکدیگر نزدیک شوند؛ به طوری که تقریباً روی یکدیگر قرار بگیرند، به معنی آن است که دامنه دارای شیب بی‌نهایت بوده و به شکل دیواره و یا پرتگاه در سطح زمین مشاهده می‌شود.

۱- ناهمواری‌های متقارن،

۲- ناهمواری‌های نامتقارن،

۳- ترکیبی از ناهمواری‌های متقارن و نامتقارن (ناهمواری‌های مرکب)،





در ناهمواری‌های متقارن فواصل منحنی‌های تراز دو دامنه شیب به یکدیگر یک خط الراس تقریباً یک‌نواخت است اگر در محل تلاقی منحنی‌های تراز زاویه تند تشکیل شود ناهمواری را زاویه دار متقارن می‌خوانند اگر محل تلاقی منحنی‌های تراز زاویه تند تشکیل دهند ناهمواری‌ها را منحنی وار و متقارن می‌نامند (مانند قله دماوند). در ناهمواری‌های نامتقارن فواصل منحنی‌های تراز دو دامنه نسبت به یک خط الراس یک‌نواخت و یکسان نمی‌باشد.

#### پ.۱-۴- تهیه نقشه توپوگرافی در رفتارسنجی زمین لغزش

در هر پروژه نقشه‌برداری بایستی هدف از انجام کار کاملاً مشخص باشد تا نتایج مفید و مناسبی به دست آوریم. به همین منظور، نقشه‌های توپوگرافی نیز بایستی در راستای هدف پروژه تهیه شوند. به عنوان مثال، در رفتارسنجی زمین لغزش هدف تعیین میزان جابه‌جایی دامنه مورد بررسی است. لذا بایستی قبل از انجام عملیات تعیین موقعیت، محل ایستگاه‌های شاهد مورد بررسی قرار گرفته و جانمایی گردند. بدین منظور لازم است نقشه توپوگرافی منطقه در مقیاس مورد نظر که معمولاً ۱/۵۰۰ در نظر می‌گیرند تهیه گردد. زیرا لازم است تمامی عوارض زمینی که رخداد زمین لغزش را در دامنه اثبات می‌کند در نقشه تعیین شود تا محل صحیح ایستگاه‌های شاهد جا نمایی گردد. مواردی که در نقشه‌های توپوگرافی در رفتارسنجی زمین لغزش بایستی مشخص گردد به شرح زیر است:

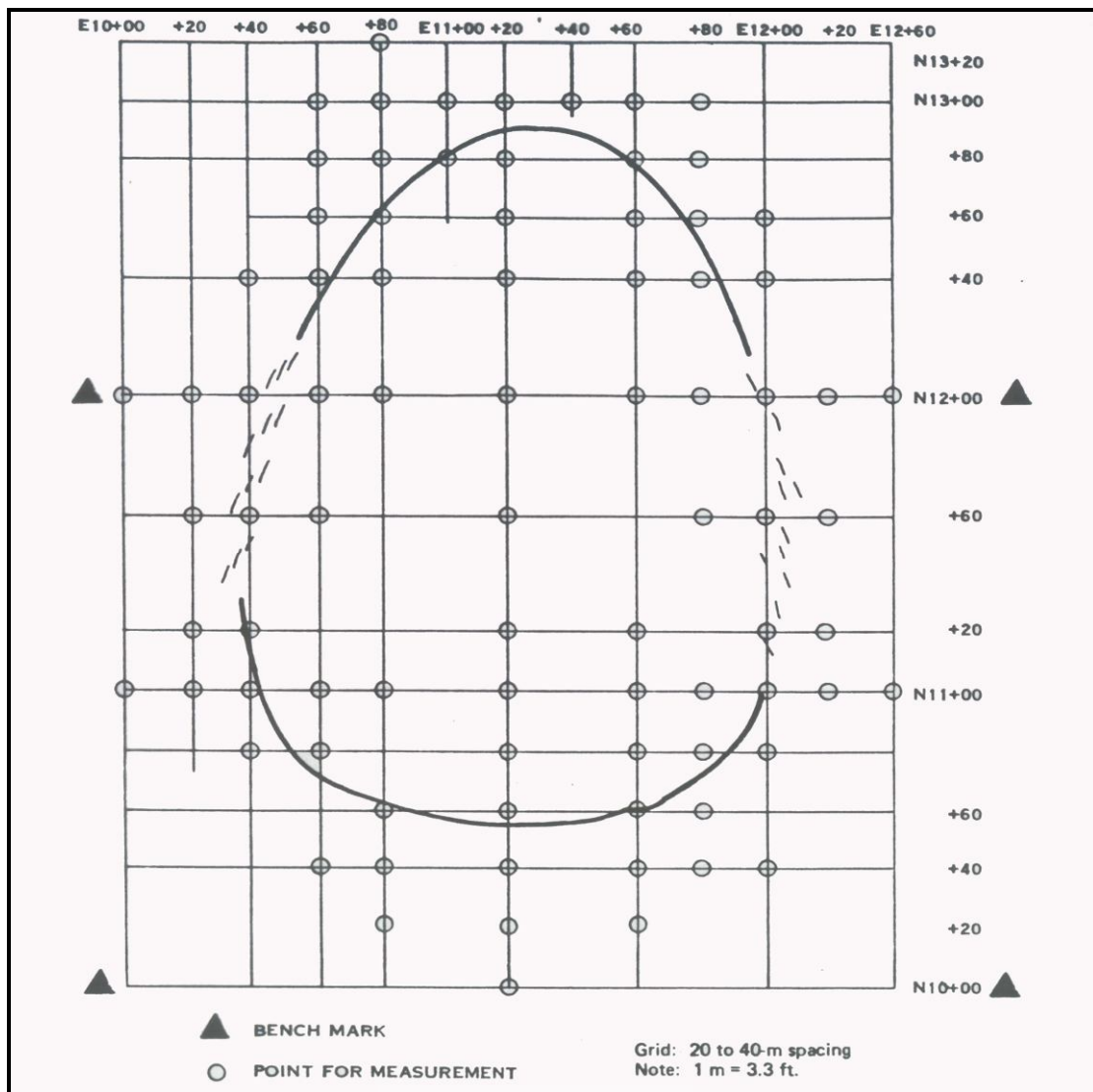
- محدوده لغزش،
- شکاف‌ها و ترک‌های ناشی از رخداد لغزش،
- افتادگی‌های اصلی و فرعی،
- هرگونه سازه دست ساز بشر مانند ساختمان، نرده، حصار و ...،
- پوشش گیاهی،
- محل دقیق درختان، بوته‌ها و ...،
- راه‌ها و جاده‌ها،
- آبراهه‌ها و رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و ...،
- زمین‌های کشاورزی،
- باغات و جنگل‌ها،
- چاه‌ها،
- چشمه‌های فصلی و دائمی،
- ترانشه.

سپس بایستی محل اولیه نقاط مورد نظر برای ایستگاه‌سازی بر روی نقشه توپوگرافی جانمایی گردد. مجموعه نقاط اندازه‌گیری جابه‌جایی در زمین لغزش را می‌توان به صورت شبکه‌ای منظم یا نامنظم و یا به صورت خطوط برداشت در



نظر گرفت. کارهای انجام شده توسط محققین مختلف در شبکه‌بندی نقاط رفتارسنجی، دو دسته شبکه منظم و نامنظم را نشان می‌دهد.

**الف- شبکه‌بندی منظم:** معمولاً به گونه‌ای انجام می‌شود که یکی از خطوط شبکه دارای راستایی به موازات جهت حرکت لغزش باشد و راستای دیگر عمود بر آن انتخاب می‌گردد. فاصله بین نقاط رفتارسنجی به طور معمول ۱۵ تا ۳۰ متر است و بسته به موقعیت مکانی این نقاط در توده لغزیده و بسته به اهمیت بخش‌های مختلف، این فاصله کم یا زیاد می‌شود. معمولاً در محدوده‌های راسی و پنجه لغزش‌ها، شبکه فشرده‌تر انتخاب می‌شود، در حالی که در بخش‌های مرکزی و یا یکپارچه این فاصله تا ۴۰ یا ۵۰ متر می‌رسد. مساحت تقریبی تحت پوشش هر ایستگاه از ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمربع متغیر است (شکل پ.۱-۱).



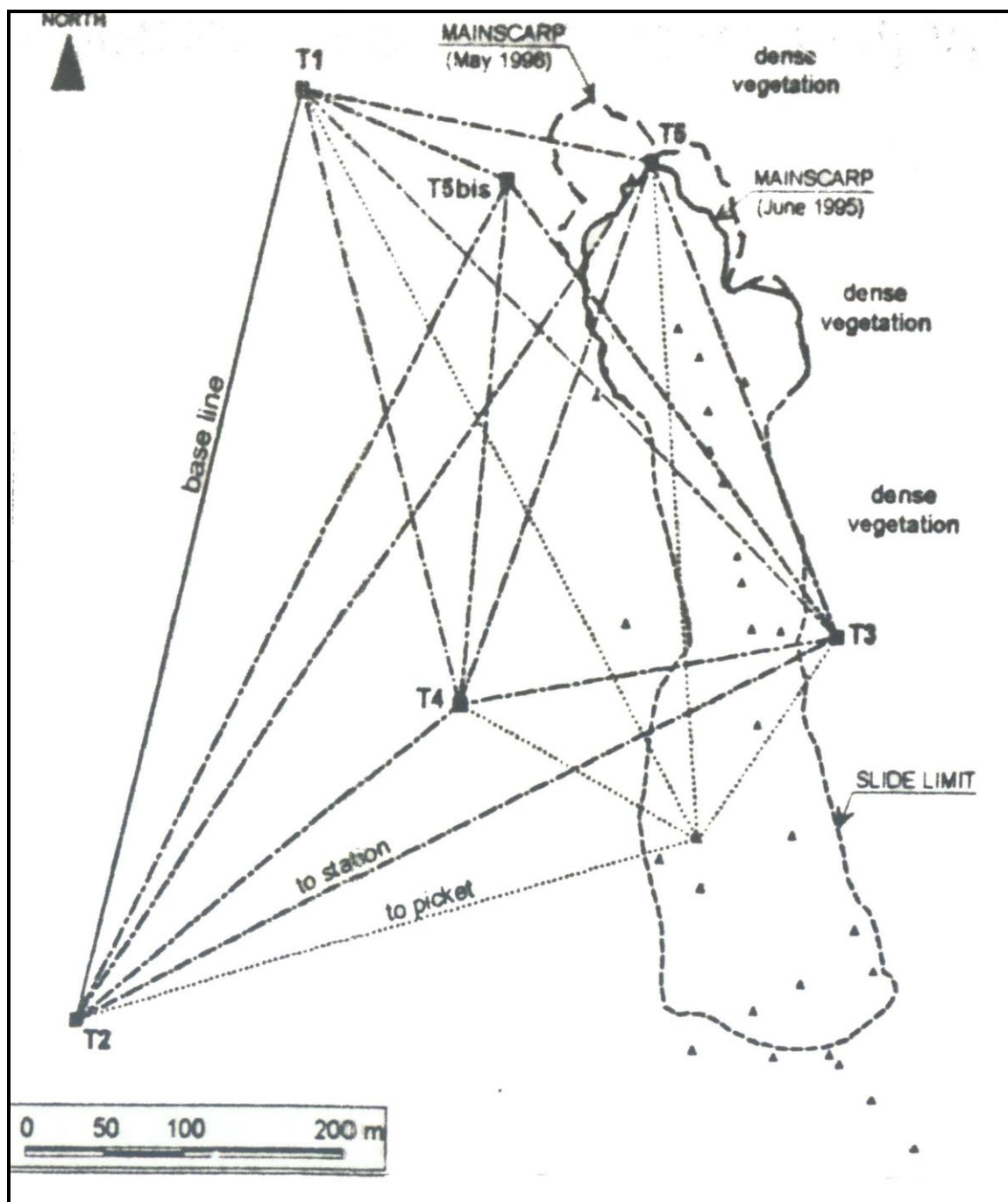
شکل پ.۱-۱- نحوه شبکه‌بندی منظم و میزان فشردگی شبکه در بخش‌های گوناگون لغزش (Sowers & Royster, 1978)



لازم به ذکر است که شبکه نقاط رفتارسنجی باید در حدود ۱۵ تا ۳۰ متر از حاشیه توده را نیز در بر بگیرد. به عنوان مثال برای زمین لغزشی به طول ۱۰۰ و عرض ۵۰ متر با افزودن ۱۵ متر در هر سوی لغزش، محدوده تحت پوشش شبکه باید در حدود ۱۳۰ × ۸۰ مترمربع در نظر گرفته شود، در این محدوده با در نظر گرفتن فاصله های ۱۵ متری در پنجه و راس لغزش و فاصله ۳۰ متری در بخش های مرکزی حدودا نیاز به ۳۴ نقطه رفتارسنجی است که از این تعداد در حدود ۱۷ نقطه در محدوده توده قرار می گیرند و مابقی بخش های مرزی توده را پوشش می دهند. استفاده از این نوع شبکه بندی زمانی مناسب است که مرزهای توده تا حدی نامشخص بوده و حرکت توده در مراحل اولیه می باشد.

**ب- شبکه بندی نامنظم:** این نوع شبکه بندی با توجه به وضعیت و موقعیت عوارض گوناگون طبیعی و یا اهمیت عوارض مصنوعی بر اساس دید کارشناسی صورت می پذیرد. محدوده شکستگی ها، پرتگاه ها، مناطقی که بیم آن می رود که حرکت در آنها رخ داده و گسترش توده قابل انتظار است، و مناطق مشرف به تاسیسات گوناگون شریان های حیاتی به عنوان نقاط برداشت در نظر گرفته می شوند. نکته قابل ملاحظه در این گونه شبکه بندی آن است که دقت شود برای بررسی نرخ حرکت در بخش های مختلف توده لغزیده نقاطی در نظر گرفته شود که معرف ساز و کار و میزان فعالیت در آن محدوده ها باشد (شکل پ. ۱-۲).

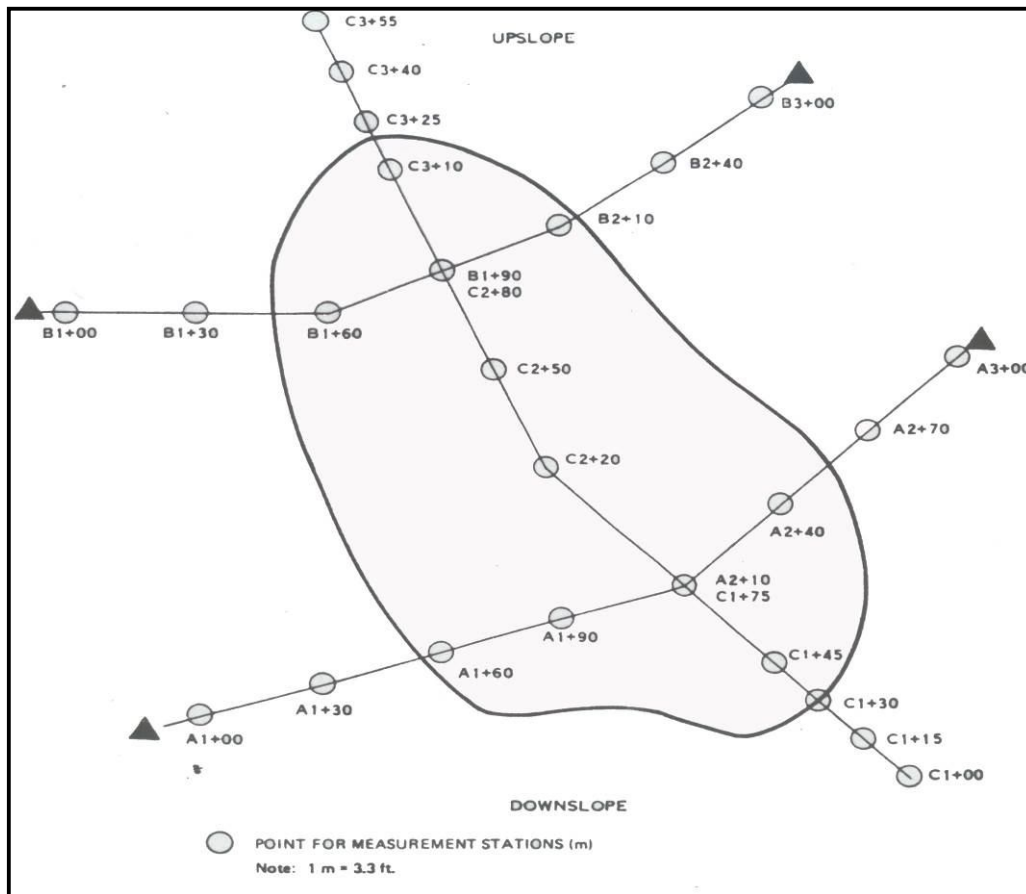




شکل پ.۱-۲- نمونه‌ای از شبکه‌بندی نامنظم، انتخاب جایگزین برای نقطه مبنای پنجم پس از تخریب

از پیمایش - خطوط برداشت - برای رفتارسنجی زمین لغزش‌هایی استفاده به عمل می‌آید که در دامنه‌هایی با توپوگرافی خشن و با ناهمواری‌های شدید قرار دارند و امکان بررسی (قراول‌روی) کل توده لغزیده از دامنه روبرو و نقاط ثابت وجود ندارد، و یا فاصله نقاط استقرار دوربین در دامنه‌های مشرف به توده لغزیده بیش از ۱/۵ کیلومتر است (شکل پ.۱-۳).





شکل پ. ۱-۳- نحوه پیمایش توده لغزیده و انتخاب خطوط برداشت مقاطع (Sowers & Royster, 1978)





# پیوست ۲

---

---







## پ.۲-۱- رفتارسنجی زیرسطحی

پیزومترها: برای تعیین سطح ایستابی و فشار آب بین منفذی در دامنه  
تنش‌سنج‌ها: برای تعیین جهت مقدار نیروهای فعال در درون زمین  
تنجش‌سنج‌ها: برای تعیین جهت و مقدار تغییر شکل نسبی مصالح  
شتاب‌نگار و لرزه‌نگار: برای ثبت لرزش‌های طبیعی و مصنوعی زمین

## پ.۲-۲- سایر روش‌های رفتارسنجی سطحی

بررسی‌های صحرائی: مطالعه دقیق وضعیت دامنه، اندازه‌گیری آبدهی چشمه‌ها، تعیین محل‌های جدید نشت آب، ثبت آثار حرکات دامنه‌ای مثل ترک‌ها و شکاف‌ها  
عکس‌های هوایی: بررسی تغییرات در عکس‌های هوایی که در فواصل زمانی از دامنه ناپایدار گرفته شده است. انتخاب چند نقطه مشخص در روی دامنه و رصد کردن آن‌ها از محلی واقع در خارج دامنه توسط دوربین‌های دقیق نقشه‌برداری، در صورتی که این عملیات با دقت انجام شود می‌توان خطوط تراز نمایان‌گر مقدار جابه‌جایی در سطح دامنه را رسم نمود.

شکاف‌سنج‌ها: اندازه‌گیری تغییرات طولی و بازشدگی شکاف‌ها به صورت‌های مختلفی امکان‌پذیر است. ساده‌ترین روش در این مورد مشخص کردن دو انتهای شکستگی، مثلاً با رنگ است. به این ترتیب هرگونه افزایش در طول شکاف به آسانی قابل رویت و اندازه‌گیری خواهد بود. تعیین مقدار بازشدگی یک شکاف یا حرکات قائم آن، با استقرار دو پایه ثابت در دو سوی شکاف و اندازه‌گیری حرکات آن‌ها نسبت به هم توسط یک خط کش دقیق و تراز بنایی امکان‌پذیر است. در دامنه‌های سنگی باز شدن شکاف‌ها را می‌توان با ابزار ساده‌ای اندازه‌گیری کرد.

آونگ‌های مستقیم و معکوس: که معمولاً برای تعیین حرکات افقی در دامنه‌های خاکی مصنوعی مثل سدهای خاکی و خاکریزها به کار می‌رود.

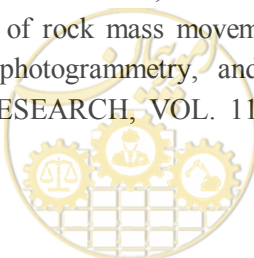
نشست‌سنج‌ها: به منظور تعیین حرکات قائم در دامنه‌ها و مقدار نشست زمین و پی به کار گرفته می‌شود.





## منابع و مراجع

- 1- A. Hooper, "Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation", Phd Thesis, 2006.
- 2- A.K. Gabriel R.M. Goldstein, H.A. Zebker, 1989, "Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry", J. Geophys. Res., 94(B7), 9183- 9191.
- 3- A.K. Turner, R. L.Shuster,"Landslide; investigation and mitigation", Special report (National Research Council (U.S) Transportation Research Board, Ch.9, pp 199-209, 1996.
- 4- A. Sharaf, "Differential SAR Interferometry for crustal deformation study," M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-Information science and earth observation (ITC), Enschede, Netherlands, Mar. 2003.
- 5- B. Kampes and S. Usai. Doris: The Delft object-oriented Radar Interferometric software. In: proceedings ITC 2nd ORS symposium, 1999.
- 6- B.Riedel and A. Walther," InSAR processing for the recognition of landslide," Adv.Geosci.,No. 14,pp. 189-194, 2008.
- 7- C. Delacourt, P. Allemand, B. Casson and H. Vadon, "Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images". Geophys. Res. Lett. 31, p. L15619, 2004.
- 8- "GPS POSITIONING GUIDE" ,Published by authority of Natural Resources Canada, July 1993.
- 9- D.Massonnet, K.L. Feigl, (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface." Reviews of Geophysics, v. 36, p. 441-500.
- 10- "Province of British Columbia Standards, Specifications, and Guidelines for resource Surveys Using Global Positioning System (GPS) Technology", April 2008.
- 11- E.Settles, "Slope monitoring methods – A state of the art report ", 2008.
- 12- UNAVCO Resources: "GNSS station monumentation, Permanent and Long-term monument comparision table".
- 13- L. M. Highland, P. Bobrowsky, "The Landslide Handbook-A Guide to Understanding Landslides", U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2008.
- 14- P. Bernardino, G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR Interferograms," IEEE Trans. Geosci. and RemoteSensing, Vol. 40, No.11, pp.2375-2383, Nov. 2002.
- 15- P. Tizzani, P. Berardino, F. Casu, P. Euillades, M. Manzo, G.P. Ricciardi, G. Zeni and R. Lanari, "Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California,investigated with the SBAS-InSAR approach,"Remote Sensing of Environment Journal, No. 108,pp. 277–289, 2007.
- 16- R. F. Hanssen (2001). "Radar interferometry: data interpretation and error analysis".Chapter 2, pp. 10-15, Pub.Springer.
- 17- R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorque, P. Berardino and E. Sansosti, "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 42, pp. 1377-1386, Jul. 2004.
- 18- Tazio Strozzi, Reynald Delaloye, Andreas Käab, Christian Ambrosi, Eric Perruchoud, and Urs Wegmüller"Combined observations of rock mass movements using satellite SAR interferometry, differential GPS, airborne digital photogrammetry, and airborne photography interpretation", JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, F01014, doi:10.1029/2009JF001311, 2010



- 19- S. jonsson, K. Agustsson, "landslide in Iceland studies using SAR interferometry", Proc. Envisat Symp. Salzburg, European Space Agency, 2004.
- 20- T.R. Lauknes, A. Piyush Shanker, J.F. Dehls, H.A. Zebker, I.H.C. Henderson, Y. Larsen, "Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series", Remote Sensing of Environment, vol.114, pp. 2097–2109, 2010.
- 21- Tazio Strozzi, Paolo Farina, Alessandro Corsini, Christian Ambrosi, Manfred Thuring, Johannes Zilger, Andreas Wiesmann, Urs Wegmuller, Charles Werner, "Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry", Landslides (2005) 2: 193–201, DOI: 10.1007/s10346-005-0003-2, Springer-Verlag 2005.
- 22- Yueping Yin, Wamo Zheng, Yuping Liu, Jialong Zhang, Xiaochun Li, "Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiayu landslide in Sichuan, China", Landslides (2010) 7:359–365, DOI 10.1007/s10346-010-0225-9, Springer-Verlag 2010.
- 23- V. Singhroy and K. Matta, "SAR IMAGE TECHNIQUES FOR MAPPING AREAS OF LANDSLIDES", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B7. Amsterdam 2000.
- 24- W.Hoen, "A Correlation-based applied approach to modeling interferometric Radar observations of the greenland Ice sheet", Phd thesis, 2001.
- 25- W. G. Kropatsch and D. Strobl, "The generation of SAR layover and shadow maps from digital elevation models", IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, v28, p98-107, 1990.
- 26- <http://www.geography-ird.blogfa.com/post-16.aspx>
- 27- <http://www.mailbrunch.com/email/Taiwan-Landslide-Buried-Highway/2a0d7e07-d876-4341-9846-fe229a48dc4f>.
- 28- <http://www.ngdir.ir>
- ۲۹- مهدی معتق، «گزارش نهایی پروژه بررسی زمین لغزش در منطقه جیرفت کهنوج با استفاده از سیستم تداخل سنجی راداری، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، بهار ۱۳۹۱.
- ۳۰- زهرا اسکندری، «مطالعه زمین لغزش و اندازه‌گیری جابه‌جایی در صفحه و خارج از صفحه نسبی زمین در چند منطقه در استان زنجان با استفاده از تکنیک ماره»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، گروه فیزیک، بهمن ۱۳۸۸.
- ۳۱- ساناز واجدیان، «پایش دگرشکلی پوسته با استفاده از تکنیک تداخل سنجی رادار با دریچه مصنوعی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده نقشه‌برداری، گروه سنجش از دور، مهر ۱۳۸۶.
- ۳۲- دستورالعمل همسان نقشه‌برداری - جلد پنجم: میکروژئودزی، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- ۳۳- مرتضی سیارپور و محمد قبادی، «بهمن سنگی سیمره، ابر زمین لغزش شناخته شده در جهان» دومین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران
- ۳۴- محمد جواد بلورچی و فرهاد انصاری، «بهمن سنگی روستای آبیکار کارکن علیا، ایتان چهار محال بختیاری». اولین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران
- ۳۵- مهدی معتق، «گزارش نهایی پروژه پژوهشی بررسی زمین لغزش در منطقه دورود با استفاده از سیستم تداخل سنجی راداری توسط سنجنده TerraSAR-X»، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، اسفند ۱۳۹۰.

- ۳۶- گروه زمین لغزش و پایدارسازی حرکات توده‌ای، دفتر حفاظت خاک، «گزارش سالیانه برآورد خسارت زمین لغزش در ایران و پایدارسازی آن‌ها»، تابستان ۱۳۸۹
- ۳۷- نغمه خوانین‌زاده، «پایش زمین لغزش به کمک تداخل‌سنجی راداری»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه ژئودزی، دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تهران، بهار ۱۳۹۰.
- ۳۸- نغمه خوانین‌زاده، «معرفی روش‌های نوین نقشه‌برداری جهت رفتارسنجی زمین لغزش»، نشریه زمین لغزش در ایران، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، زمستان ۱۳۹۰.
- ۳۹- گروه زمین لغزش و پایدارسازی حرکات توده‌ای، دفتر حفاظت خاک، «گزارشات و مطالعات گروه زمین لغزش و پایدارسازی حرکات توده‌ای».
- ۴۰- مرضیه باعث، «جزوه آموزشی ژئودزی ماهواره‌ای»، دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تهران، پاییز ۱۳۷۹.
- ۴۱- وحید اکبری، «نظارت بر فرونشست زمین در دشت مشهد با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده نقشه‌برداری، گروه سنجش از دور، دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تهران، بهمن ۱۳۸۷.
- ۴۲- «گزارش طراحی نقاط مبنای شهر تهران، فاز تدوین مشخصات و دستورالعمل ایستگاه‌های مبنای، نسخه ۶»، سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران، خرداد ۱۳۸۹.
- ۴۳- نغمه خوانین‌زاده، «پایش زمین لغزش به کمک تداخل‌سنجی راداری»، سمینار کارشناسی ارشد، گروه ژئودزی، دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تهران، زمستان ۱۳۸۸.
- ۴۴- مصطفی اسمعیلی، «کاربرد روش تداخل‌سنجی به کمک پراکنده‌سازهای پایا، PSInSAR، جهت اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در مناطق شهری و غیرشهری»، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در گرایش سنجش از دور، تابستان ۱۳۸۹.





## خواننده گرامی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هشتصد عنوان نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی [nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir) قابل دستیابی می‌باشد.









Islamic Republic of Iran  
Plan and Budget Organization

# Guideline for Study and Implementation of landslide Stabilization Operations

*(Vol I. Landslides Behavior Studies)*

**No. 829-1**

**Last Edition: 12-16-2020**

Deputy of Technical, Infrastructure and  
Production Affairs

Forest, Range & Watershed Management  
Organization

Department of Technical & Executive affairs,  
Consultants and Contractors

Water Harvesting & Flood Control Office

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

[www.frw.org.ir](http://www.frw.org.ir)



[omoorepeyman.ir](http://omoorepeyman.ir)



## این ضابطه

راهنمای مطالعه و اجرای عملیات  
پایدارسازی زمین لغزش‌ها (جلد اول -  
مطالعات رفتارسنجی زمین لغزش‌ها)، دو  
تکنیک نوین نقشه‌برداری برای رفتارسنجی  
و پایش جابه‌جایی سطحی در زمین لغزش‌ها  
شامل: مشاهدات GPS و تداخل‌سنجی  
راداری را مورد توجه قرار می‌دهد و معیارها  
و ضوابط مربوط به این فن‌آوری‌های نوین  
نقشه‌برداری، نحوه اندازه‌گیری و روش  
محاسبات در تعیین میزان جابه‌جایی  
زمین لغزش‌ها را بیان می‌کند.

