GPS و زلزله

در بین خرابیهای ناشی از زلزلهٔ اخیر کالیفرنیای شمالی، GPS توان خود را در شناخت و پیش‌بینی حرکات پوستهٔ زمین به‌اثبات رساند.

لوما پیرتا[1] با ارتفاع ۳۷۹۰ پا از سطح دریا، بلندترین نقطهٔ کوهستان سانتا کروز[2] به شمار می‌رود. قلهٔ سراسر جنگل آن از جنوب به خلیج مونتری[3] و از شمال شرقی مشرف به درهٔ سانتا کلارا[4] می‌باشد و در چند مایلی جنوب شرقی بزرگراه ۱۷ و کنار جادهٔ پرپیچ و خم کوهستانی واقع است. در طی سالها قلهٔ لوما پیرتا از درختان پاک شده و محل استقرار انواع آنتنها، بشقابهای میکروویو، و ساختمان‌های مربوطه گردیده است. نزدیک انتهای خط‌الرأس در قسمت جنوبی این منطقه، میلهٔ آهنی کوتاهی را می‌توان یافت که در زمین نصب شده است. در بالای این میله یک دیسک برنزی به‌قطر ۳ اینچ قرار دارد که روی آن این نوشته به‌چشم می‌خورد: « USGS NCER شبکهٔ شمارهٔ یک لوما پیرتا ». درسه‌سال گذشته حدوداً ماهی یکبار در طی روز و گاهی در اواسط شب، شخصی به این محل آمده، آنتنی را به یک وسیلهٔ الکترونیکی متصل کرده و پس از پنج تا شش ساعت توقف و نوشتن یادداشتهایی، پس از جمع‌آوری وسایل محل را ترک کرده است.

لوما پیرتا بر روی انتهای پلیت آمریکای شمالی قرار دارد ـ یکی از قطعات بزرگ تشکیل دهندهٔ پوستهٔ زمین که در حرکات آرام تکتونیکی به قطعات دیگر پوسته برخورد می‌کند. پلیت آمریکای شمالی در طول ۸۰۰ مایل از کنارهٔ غربی با پلیت اقیانوس آرام در تماس است (این دو تقریباً دارای جرم یکسانی هستند). این دو پلیت در امتداد محور شمال غرب (یا جنوب شرق) با سرعت چند اینچ در سال از مقابل یکدیگر عبور می‌کنند. شکستگی پیچیده و غیر پایدار و شکاف عمیق حاصل از فشار بی‌وقفه این دو پلیت معروفترین و شاید نگران کننده‌ترین پدیدهٔ زمین‌شناسی آمریکای شمالی است. این پدیده گسل سن آندریاز[5] نام دارد.

در ساعت حدود پنج بعد از ظهر هفدهم اکتبر ۱۹۸۹ هیچکس در کنار دیسک مشغول کار نبود. اما در حدود ۶۰ مایلی شمال غرب آن، بیش از ۶۰۰۰۰ نفر در استادیوم پارک کندل استیک واقع در سانفرانسیسکو در حال تماشای فوتبال بودند. در آن روز سه‌شنبه علاقه‌مندان به‌فوتبال بازی دو تیم «غول‌های سانفرانسیسکو» و «را کلند»

را در سومین مسابقه از سری مسابقات جهانی تماشا می کردند. تقریباً نیمی از بازی گذشته بود و ده‌ها میلیون نفر در خانه‌های خود از طریق کانال ABC یا ESPN مشغول تماشای مسابقه بودند.

پنج دقیقه بعد از ساعت پنج، زمین اطراف لوما پیرتا شروع به لرزش کرد. در چند مایلی غرب لوما پیرتا و ۱۱ مایلی زیر سطح زمین، قسمتی از پلیت اقیانوس آرام از پلیت مجاور آن رها شده بود. در طی هفت تا یازده ثانیهٔ بعد، شکافی به‌طول ۲۵ مایل در بین دو پلیت به‌وجود آمد، و انرژی معادل انرژی **نیم‌میلیون تن** بمب اتمی، به صورت امواج زلزله آزادگردید!! لرزش حاصل از این شکاف به مدت ۱۰ ثانیه ادامه یافته، و نیروی حاصل از آن به سرعت به لایه‌های مجاور گسترش یافت.

وقفه‌ای در فعالیت

در استادیوم پارک کندل استیک بسیاری از حاضرین ابتدا تصور کردند که لرزشی که احساس می‌شود حاصل از ضربات پای تشویق کنندگان است. درست لحظه‌ای که به یاد آوردند ساختمان‌های بتنی هیچگاه مرتعش نمی‌شوند و دریافتند که جمعیت در حال کوبیدن بانیست، بالکن بالای استادیوم مقدار زیادی نوسان کرده و ترکهایی در دیوارهای حائل پدید آمد. به‌طور اتفاقی گزارش مستقیم فوتبال باعث گردید که عدهٔ کثیری شاهد اثرات یک زمین‌لرزهٔ مهیب باشند. جامعهٔ علمی این زمین‌لرزه را به‌خاطر نزدیکی مرکز آن به لوما پیرتا، زلزلهٔ لوما پیرتا نامید، اما بیشتر این زمین لرزه به‌نام زلزلهٔ ۱۹۸۹ سانفرانسیسکو معروف گردید.

بر طبق گزارش رسمی ادارهٔ خدمات اضطراری ایالات متحده، اثر این زمین لرزه بیش از به‌تعویق افتادن یک مسابقهٔ فوتبال بوده است. براساس گزارش این ادارهٔ زلزله منجر به‌مرگ ۶۲ تن، و مجروح شدن ۳۷۵۶ نفر، و ۶ میلیون دلار خسارت مالی گردید و بیش از ۱۲۰۰ کالیفرنیایی بی‌خان و مان شدند.

زمین لرزهٔ لوما پیرتا با بزرگی ۷/۱ ریشتر سومین زلزلهٔ عظیم در طی ۸۳ سال گذشتهٔ ایالات متحده می‌باشد. همچنین بعد از زمین‌لرزهٔ ۱۹۰۶ که منجر به‌خسارات عظیم گردید، بزرگترین لرزه در امتداد گسل سن آندریاز به‌شمار می‌رود. در واقع شکستگی لوما پیرتا بخشی از گسلی به‌طول ۲۸۰ مایل است که بر اثر زمین‌لرزهٔ ۸/۳ ریشتر سال ۱۹۰۶ ایجاد گردید.

GPS می‌رود که کار ابی خود را به‌نمایش بگذارد

نصف شب پنج‌شنبه، دو روز بعد از وقوع زمین لرزه، بار دیگر شخص مورد نظر با وسیلهٔ الکترونیکی‌اش در لوما پیرتا حاضر گردید. این وسیله یک گیرندهٔ دقیق ماهواره‌ای بود که از چهار ماهوارهٔ سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) سیگنال دریافت می کرد. این شخص مجبور بود شبها کار کند تا از حضور ماهواره‌های کافی جهت حصول دقت لازم در طول مدت مشاهده بهره گیرد.

ایستگاههای GPS این منطقه که توسط USGS[9] ایجاد گردیده‌اند دارای موقعیت استراتژیکی خاصی در خلیج هستند. این ایستگاهها در ایگل راک[10] (واقع در ۲۰ مایلی غرب گسل سن آندریاز)، کوه آلیسون[11] (در شمال منطقهٔ گسلی های وارد[12]) و در کوههامیلتون[13] (موازی منطقهٔ گسلی کالاوراس[14]) قرار دارند.

ایستگاه‌گذاری این شبکه توسط گروه نقشه‌برداری «ادارهٔ زلزله‌ها، آتشفشانها و مهندسی» ایالات متحده انجام گرفته، که جانشین مرکز مطالعات زمین لرزهٔ USGS می‌باشد. مقر منطقه‌ای این سازمان در پارک منلو[15] دقیقاً روی منطقهٔ زلزلهٔ لوما پیرتا قرار داشت.

در این ایستگاهها مشاهدات ماهواره‌ای به‌صورت همزمان صورت می‌گیرد، تا بتوان تغییر

شکل و جابجایی پوستهٔ منطقه را در سه بعد مورد بررسی قرار داد.

اکیپ USGS با استقرار بر شبکهٔ لوما پیرتا سعی داشتند بفهمند که آیا می‌توان جابجایی اخیر را توسط مشاهدات GPS و زلزله سنجها تعیین کرد ؟ یا خیر؟ روزشنبهٔ بعد از زلزله، گزارشی که در تهیهٔ آن مشاهدات GPS نیز سهمی داشت بدین قرار انتشار یافت: «پلیت اقیانوس آرام درحدود ۶/۲ فوت به صورت جانبی و ۴/۳ فوت به صورت قائم بسمت بالای پلیت آمریکای شمالی حرکت کرده است».

این ارقام مربوط به جابجاییهای زیر پوستهٔ زمین، در محل اصلی گسل واقع در چند مایلی زیر سطح زمین می‌باشند. بر روی سطح زمین، حداکثر جابجایی قائم در پلیت اقیانوس آرام یک و نیم فوت، همراه با شصت اینچ نشست پلیت آمریکای شمالی است.

علتگرایش به سمت GPS

پریسکات می‌گوید: «یکی از نقاط قوت GPS امکان دستیابی به یک بررسی نسبتاً سریع در ارتفاع نقاط کنترل منطقه بعد از زمین لرزه است».

وی همچنین می‌افزاید: «با اندازه‌گیریهایی که از طریق وسایل دیگر حاصل می‌شوند، ما نمی‌توانیم مستقیماً به ارتفاعات دست یابیم، درحالی که GPS این امکان را برای ما فراهم می‌آورد.»

دیگر مزایای GPS مانند تعیین موقعیت در سه بعد و سرعت استقرار از جمله مواردی هستند که با فعالیتهای مؤثر USGS بعد از زمین لرزه به اثبات رسیده‌اند. بدین خاطر علاوه بر انجام مشاهدات برروی شبکهٔ قبلی گروهی نیز دست اندرکار احداث شبکه‌ای جدید به طول ۵۰ کیلومتر و عمود برگسل هستند تا اثرات پس لرزه را مورد بررسی قرار دهند. هدف اصلی از توسعهٔ شبکه، اندازه‌گیری حرکات زمین در دو جهت عمود و موازی خط گسل است.

پریسکات می‌افزاید: «با وسایل اندازه‌گیری معمولی نمی‌توان اطلاعاتی بدین شکل را از چنین شبکه‌ای به دست آورد، رسیدن به چنین اطلاعاتی از طریق روشهای زمینی نیازمند شبکه‌ای با تعداد ایستگاههایی به مراتب زیادتر است، بعلاوه با چنین شبکه‌هایی بازهم نمی‌توان به دقت حاصل از شبکهٔ GPS رسید». کارل گراس زمین شناس USGS می‌افزاید: « بدون GPS تحقیقاتی از این نوع نیازمند ترکیب اطلاعات حاصل از دو یا سه نوع مشاهدهٔ مختلف است، که موجب کاهش کیفیت نتایج می‌گردد».

سادگی وسایل و سهولت روش کار از مزایای عملی GPS به شمار می‌روند. گراس می‌گوید: «شرایط جوی در مورد GPS برخلاف وسایل دیگر موجب ایجاد وقفه نمی گردند؛ به عنوان نمونه باران سنگینی که هفتهٔ بعد از زمین لرزه خلیج را کاملا شست، موجب توقف کار گروههایی گردید که از طریق تراز یابی سنتی دست اندر کار اندازه‌گیری حرکت قائم پوستهٔ زمین بودند».

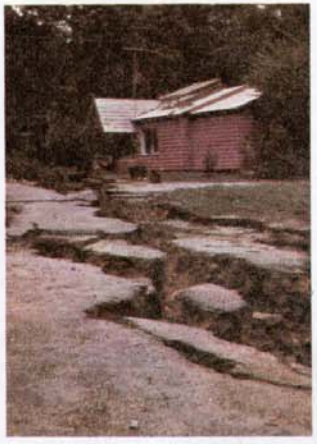
بعلاوه کار با GPS نیازمند حداقل آموزش است و با آن، رسیدن به دقت‌هایی بیش از روشهای سنتی به تلاش کمتری نیاز دارد. گراس که کار با GPS را از سال ۱۹۸۵ بدون هیچگونه دانش قبلی در مورد نقشه‌برداری آغاز کرده می‌گوید: « GPS برای بسیاری درحکم یک جعبهٔ سیاه بوده و دارای کمترین وابستگی به دنیای قدیم نقشه برداری است». گراس همچنین می‌افزاید: « در ایستگاه GPS عامل آنتن را بر روی ایستگاه مستقر کرده، برنامهٔ جمع‌آوری اطلاعات گیرنده را راه‌اندازی می کند؛ بعد از آن نقش عامل تنها ثبت اطلاعات جوی و گه‌گاه کنترل دستگاه است».

از طرفی دیگر...

GPS در وضعیت کنونی از نقطه نظر کاربردهای ژئودزی دارای ضعفهایی است . اگر در وسایل اشکالی ایجاد شود ، امکان تعمیر صحرایی این جعبهٔ سیاه وجود ندارد. فاصلهٔ زمانی بین لحظاتی که ماهواره‌های کافی در معرض دید آنتن قرار می‌گیرند ، باعث ایجاد وقفه در اجرای پیوستهٔ عملیات می‌گردد ، به‌عنوان شاهد این مدعا کار شبانه در شبکهٔ لوما پیرتا را که ابتدا بدان اشاره شد را به‌خاطر بیاورید ! به هر حال با تجدیدنظری که در برنامهٔ پرتاب ماهواره‌های بلوک ۲ پدید آمده ، پوشش ماهواره‌ای به‌سرعت بهبود خواهد یافت .

به‌گفتهٔ پریسکات : « بزرگترین ضعف GPS ، مشکل ووقت‌گیر بودن پردازش اطلاعات در رسیدن به دقتهای بالاست . این نقطهٔ ضعف مثلا در لوما پیرتا هنگامی که ما سعی داشتیم سریعاً به نتایج دست یابیم کاملا مشهود بود » .

متخصصان USGS می‌بایست موقعیت‌های تعیین شده توسط گیرنده‌های مختلف مستقر درشبکهٔ خود را با اطلاعات گیرنده‌هایی که در ایستگاههایی به نام فیدوشال[۱۸] مستقرند و همچنین اطلاعات شبکه‌های قدیمی ترکیب کنند . این کارشناسان با استفاده از شبکهٔ کنترل فیدوشال و شبکه‌های نقشه‌برداری قدیمی موقعیت‌ماهواره‌ها را در زمان مشاهده تعیین می‌کنند، و به‌علاوه بدین شکل آنها می‌توانند خطاهای ناشی از گیرنده‌ها، تأخیر یونسفر و چیزهایی مانند آن را در شبکه حذف یا به حداقل برسانند. انجام این مراحل باعث‌می‌گردد که USGS بیست وچهارساعت دیرتر ازروشهای



دیگر (مانند راههای استفاده از طولیابهای الکترونیکی بسیار دقیق بنام جئودولیت[۱۹]) به نتایج حاصل از GPS دست یابند .

انتظارات و انجام شده ها

GPS پتانسیل تبدیل شدن به وسیلهٔ استاندارد ژئودزی دقیق را دارا می‌باشد. ژئودزی دقیقی که کاربرد آن نه‌تنها در تعیین جابجاییها پس از وقوع زلزله، بلکه تعیین تغییرات جزیی در مناطق با پوستهٔ تحت‌فشار ، و کنترل جابجاییهای کوچک در مناطق مستعد زلزله است. تعیین جابجایی ۱ سانتیمتری حاصل از زمین‌لرزهٔ لوما پیرتا تنها یکی ازکاربردهای GPS است . با GPS از طریق اندازه‌گیریهایی که طی ماهها یا سالها در منطقه‌ای به وسعت چندین هزار مایل مربع صورت می‌گیرد می‌توان به دقتی در حد میلیمتر رسید .

بنا به‌گفتهٔ پریسکات : « ماهنوز احساس می کنیم که در مورد GPS در مراحل آزمایشی قرار داریم ، اگر چه نتایج حاکی از نزدیکی به‌ثمر نشستن آزمایشها هستند،این نتیجه‌ها آنقدر امیدوار کننده‌اند که ما را وادار به استفادهٔ تدریجی آنها در عمل می‌سازند » . **«اما به‌هر حال نباید فراموش کرد که GPS هنوز یک سیستم در حال تحول است .»**

به عنوان پیشگامان استفادهٔ از GPS در کاربردهای خیلی دقیق می‌توان از USGS ، NGS[۲۰] و چندین مرکز دیگر دانشگاهی در آمریکا نام برد . بیشترین فعالیتهای اخیر با همکاری مجمع دانشگاهی NAVSTAR صورت‌گرفته، که تحت‌مدیریت موسسهٔ تحقیقات دانشگاه کلورادو[۲۱] در زمینهٔ علوم زمینی اداره می‌شود .

شبکهٔ GPS خوبی برای اندازه‌گیری تنشهای پوستهٔ زمین در امتدادگسل سن‌آندریاز ایجاد شده است . همچنین USGS دارای شبکه‌های متعددی درتنگهٔ جان دی‌فا کا[۲۲] ، آلاسکا وجزایرفارالون[۲۳] و سیراس[۲۴] است. دیگر بخشهای این سازمان از GPS درامورآبشناسی وتهیهٔ نقشه استفاده‌می برند. می‌توان از اندازه‌گیری ارتفاع قلل اورست، K - 2 و مک کینلی[۲۵] ، و تعقیب تغییرات سطح آب‌دریا به‌عنوان کاربردهای دقیق دیگر نام برد .

درمورد زمان‌وقوع زلزله چه می‌توان گفت؟

تحقیقاتی که امروزه به‌صورت متقطع در مورد تغییرات پوستهٔ زمین صورت می‌گیرند با استفادهٔ از ایستگاههای دائمی GPS تبدیل به‌مراکز

کنترل همیشگی خواهند شد. به‌عنوان مثال پریسکات در فکر ایجاد طرحی برای استقرارگیرنده‌های GPS به‌صورت دائمی در خلیج شرقی است. بنابرگزارش ۱۹۸۸ USGS قسمت شمالی وشرقی گسل «**های‌وارد**» که منطقهٔ بسیار پرجمعیتی است، در ۳۰ سال آینده به احتمال ۲۰ درصد شاهد وقوع زلزله‌ای عظیم خواهد بود. درگزارش ۱۹۸۱ ادارهٔ کنترل امور اضطراری آمریکا برآورد ذیل درمورد اثرات ناشی از زلزله در خلیج شرقی صورت گرفته است: ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰ نفر کشته، ۴۵۰۰۰ تا ۱۳۵۰۰۰ مجروح، بسته شدن هر چهار پل این خلیج، و بالاخره ۴۰ میلیون دلار خسارت مالی.

استقرار بلنه مدت‌گیرنده‌های GPS در خلیج شرقی، همراه با مخابرهٔ خود کار اطلاعات به دفاتر USGS ، می‌تواند امکان تحقیقات‌گسترده‌ای را درمورد جابجایی و تغییر شکل پوسته فراهم آورد. همچنین تلفیق این اطلاعات زمین‌شناسی می‌تواند گامی مؤثر در جهت تعیین نشانه‌های واقعی بروز زمین‌لرزه و نهایتاً برآورد زمان وقوع زمین‌لرزه‌باشد.

پریسکات می‌گوید: «ما مشغول بررسی اثرات درازمدت قبل از زمین‌لرزه بوده و سعی داریم محل جابجایی‌هایی که در اعماق زمین صورت می‌گیرند را از طریق ارتباط دادن سیگنالهای رسیده از این جابجایی‌ها به زمان، تعیین کنیم».

مسلماً نیاز به توان پیش‌بینی زلزله در آینده افزایش خواهد یافت.

رگریبل‌هام[۲۶]، استاد زمین‌شناسی دانشگاه «کلورادو» براین عقیده‌است که: «در ۳۰ سال آینده قریب ۴۰۰ میلیون نفر در شهرهایی با جمعیت بیش از دومیلیون در فاصلهٔ ۱۲۰ مایلی کانونهای زلزله‌هایی به بزرگی ۷ ریشتر زندگی خواهند کرد». شاید بتوان GPS را بهترین وسیلهٔ اندازه‌گیری تنشها یا تغییر شکلهای پوستهٔ زمین در نزدیکی چنین شهرهایی دانست.

بیل‌هام همچنین ادامه می‌دهد: «با ترکیب اطلاعات ژئودزی GPS با سایر مشاهدات‌فیزیکی انجام شده در محلسهایی که احتمال می‌رود کانون زلزله‌های آینده باشند می‌توان در پیشگویی‌زلزله و برنامه‌ریزی‌های شهری در آن مناطق (از طریق تجدیدنظر در استانداردهای شهرسازی) اقدامات مؤثری انجام داد».

پریسکات می‌گوید: «اگر طرح ایجاد شبکهٔ GPS در خلیج شرقی به تصویب برسد احتمالا گیرنده‌های دیگری را جایگزین‌گیرنده‌هایی خواهد کرد که از آغاز مورد استفادهٔ USGS بوده‌اند». مدلهای قدیمی‌تر گیرنده‌های GPS تنها چهار کانال داشته و می‌بایست آنها را برای تعقیب ماهواره‌هایی ویژه در زمانهای مورد نظربرنامه‌ریزی کرد. درحالی که گیرنده‌های جدیدتر دارای ۱۰ کانال یا بیشتر هستند و به‌طور خود کار ماهواره‌ها را تعقیب کرده‌و بهترین ترکیب هندسی‌ماهواره‌ها موجود درشعاع دید را برای حصول بیشترین دقت برمی‌گزینند.

پریسکات می‌افزاید: «اما این بدان معنانیست که‌گیرنده‌های قدیمی‌تر دور ریخته خواهند شده»، و ادامه می‌دهد که وی جز برای ایستگاههای دائمی، طرحی را برای جایگزینی سریع سایرگیرنده‌های مورد استفاده در نظر ندارد. او می‌گوید: «به نظرمن بهتر آن است که کمتر اقدام به تعویض گیرنده کرد، اما مسلماً در کاربردهای ژئودزی خیلی دقیق می‌بایست به نوع گیرنده اهمیت داد. در حال حاضر تلاش ما آن است که تعیین کنیم وسایل موجود هریک درچه اموری‌مناسب‌اند، و در چه مواردی از طریق آنها می‌توان به‌نتایج جالبی رسید».

پریسکات ادامه می‌دهد: «با وجودپیشبینیهای متخصصان، GPS می‌رود که به‌یک وسیلهٔ‌عملی و ابزار مورد قبول کاربردهای ژئودزی تبدیل گردد». و درخاتمه بیان می‌دارد که: «گرچه ما در بررسی توان ابزارهای موجود خود بسیار دقت مبذول داشته و در تغییر آنها بسیار محتاطایم، اما درحال حاضر درمرحلهٔ تغییر وسایل قرارگرفته‌ایم».

1) Loma Prieta
2) Sants Cruz
3) Monterey
4) Santa Clara
5) Earth Observation Satellite Company (EOSAT)
6) San Andreas
7) Candlestick
8) Oakland
9) U. S. Geological Survey (USGS)
10) Eagle Rock
11) Alison
12) Hayward
13) Hamilton
14) Calaveras
15) Menlo
16) Prescott
17) Karl Gross
18) Fiducial
19) Geodolite
20) National Geodetic Survey (N G S)
21) Colorado
22) Juan de Fuoa
23) Farallon
24) Sierras
25) McKinley
26) Roger Bilham