آموزشی

ابزارهای جدید اندازه‌گیری شتاب گرانی زمین

رضا قلی‌پور
کارشناس ارشد فیزیک، شهرستان‌های استان تهران، شهرری

چکیده

امروزه با پیشرفت فناوری در زمینه‌های مختلف، اندازه‌گیری دقیق شتاب گرانی زمین لازم و ضروری است. در این مقاله شما با ابزارهای جدید و دقیق‌تر اندازه‌گیری شتاب گرانشی و بعضی کاربردهای آن آشنا خواهید شد.

کلیدواژه‌ها: گرانش، گرانی‌سنج‌ها، کاربردهای گرانی‌سنجی

مقدمه

اجرام تشـکیل دهندهٔ جهان ما همگی با نیرویی گرانشی یکدیگر را جذب می‌کنند. شـتاب گرانـی زمین (g) به فاصلـه از مرکز زمین، شـکل زمین، به چگالی لایه‌های تشکیل دهندهٔ آن و به طول و عرض جغرافیایی و دوران زمین، ارتفاع آن نقطه، زمان اندازه‌گیری، کشند، جرم بین ایسـتگاه‌ها، سطح مبنا و جرم‌های مکان‌نگاری بستگی دارد که در گرانی‌سنجی در نظر گرفته می‌شود. شتاب گرانی معمول در زمین به‌طور قابل ملاحظه‌ای از یک نقطه به نقطه دیگر فرق می‌کند. این تغییرات با دقت کافی قابل پیش‌بینی و اندازه‌گیری است.

تاریخچهٔ اندازه‌گیری شتاب گرانی زمین

اولین بار **گالیله** در حدود سال ۱۵۸۹ م. تأثیر شتاب گرانی زمین بر روی اجسام با وزن‌های مختلف را کشف کرد. پس از او نیز **کپلر** قوانین حرکت سیارات را اثبات کرد و به‌دنبال او **نیوتون** قوانین عمومی گرانی زمیـن را در ۱۶۸۵ م. گزارش داد. پیر بوگر طی سـال‌های ۴۵-۱۷۳۵ بسیاری از روابط اساسـی گرانی‌سنجی از جمله تغییرات شتاب جاذبه با ارتفاع و عرض جغرافیایی را به‌دسـت آورد. اولین دستگاه اندازه‌گیری میدان جاذبه (آونگ مرکب) در ۱۸۱۷م. توسـط کاپیتان **هنری کیتر** ابداع شـد. در ۱۹۰۱ م. اولین برداشـت گرانی‌سنجی توسط رونالدفون اوتـوس روی دریاچـهٔ یخی والاتون انجام شـد و به‌تدریـج این روش مطالعاتی گسـترش یافت. اولین اکتشاف ژئوفیزیکی نفت در ۱۹۲۲ م. با اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی اجرا شد [۱]. اولین گرانی‌سنجی هوایی در ۱۹۶۰ م. انجام شد. از ۲۰۰۵ م. گرانی‌سنجی به روش تحلیل داده‌ها[1] صـورت می‌گیرد. با توجه به نیاز علوم مختلـف، روش‌های اندازه‌گیری شـتاب گرانی زمین امروزه کامل‌تر و دقیق‌تر شـده‌اند، اما همهٔ آن‌ها از اصول معینی پیروی می‌کنند.

انواع گرانی‌سنج[2]ها

در فعالیت‌های علمـی، تحقیقاتی و فناوری بـرای اندازه‌گیری g معمولاً از گرانی‌سنج‌های زیر استفاده می‌شود:

۱. گرانی‌سنج مطلق (Absolute Gravimeter)
۲. گرانی‌سنج نسبی (Relative Gravimeter)
۳. گرانی‌سنج وردن (Worden Gravimeter)
۴. گرانی‌سنج رومبرگ (Gravimeter Romberg)
۵. گرانی‌سنج ابررسانا (Superconducting Gravimeter)

۱. گرانی‌سنج مطلق

این نوع گرانی‌سنج می‌تواند مقدار حقیقی شتاب گرانی را با اندازه‌گیری سـرعت افتادن یک جرم، به‌وسیله پرتوهای لیزر اندازه‌گیری کند. اگر چه این گرانی‌سنج‌ها با دقت‌های یک صدم تا یک هزارم میلی‌گال[3] اندازه‌گیری می‌کنند اما، گران، سنگین و حجیم هستند. گرانی‌سنج مطلق (FG-۵) می‌توانـد با دقت 10^{-9} در یـک تا دو روز بدون تأثیر از اثرات محیطی g را اندازه‌گیری کند. شکل ۱ نمونه آن را نشان می‌دهد.

شکل ۱: گرانی‌سنج مطلق (FG-۵)

۲. گرانی‌سنج نسبی

این نوع گرانی‌سنج‌ها تغییرات شتاب گرانی بین دو محل را اندازه می‌گیرند. در این دسـتگاه‌ها یک جرم به کار می‌رود که به انتهای یک فنر متصل اسـت. این نوع از گرانی‌سنج‌ها می‌توانند

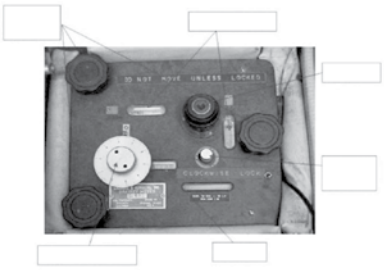
شـتاب گرانی را با دقت یک صـدم میلی‌گال[3] در ۵ دقیقـه اندازه‌گیری کنند. یک گرانی‌سنج نسبی می‌تواند در کنار نزدیک‌ترین ایستگاه مطلق گرانی‌سنجی، برای پایه‌گذاری ایستگاه‌های شبکه‌ای و اینترنتی گرانی به‌کار رود. گرانی‌سنج‌های نسبی در نقاط گرهٔ شبکه گرانی مطلق قرار می‌گیرند. آرایه‌ای از گرانی‌سنج مطلق می‌توانند پایگاه‌های مرجع برای GPS باشند و می‌توانند مطالعات علمی مانند تغییر شکل مناطق زلزله زده، بالاآمدگی سطح دریا و نظارت بر توده‌های هیدرولوژی را حمایت کنند.

۳. گرانی‌سنج وردن

این نوع گرانی‌سنج (شکل ۲) کاملاً مکانیکی و نوری است و می‌تواند تنها با یک باتری قلمی برای تاباندن نور به عدسی‌های ضخیم کار کند و در آن از فنر با طول ثابت شده و وزنهٔ متصل به یک فنر مدرج کردن و ورنیه مقیاس برای اندازه‌گیری شتاب گرانی استفاده شده است. [۲]

شـــکل ۲:
گرانی‌سنج وردن

۴. گرانی‌سنج رومبرگ



شکل ۳: گرانی‌سنج رومبرگ

گرانی‌ســنج رومبرگ رایج‌ترین نوع گرانی‌ســنج اســت که در اکتشــاف مورد اســتفاده قرار می‌گیرد و دارای دستگاه جرم- فنر اســت. تناسب بین کشــش فنر و شــتاب گرانی، مقدار g را نشان می‌دهد. این نوع از گرانی‌ســنج قادر اســت تغییرات شتاب گرانی را یک قســمت از هزار میلیون اندازه‌گیری کند که این دقت برابر ۰/۰۰۱ میلــی‌گال اســت. این گرانش‌ســنج‌ها به‌گونــه‌ای طراحی شــده‌اند که بتواننــد تغییرات ویژهٔ میدان گرانشــی را اندازه‌گیری کننــد.[۲]

۵. گرانی‌سنج ابررسانا

گرانی‌ســنج‌های ابررســانا حســاس‌ترین ابزارهایی هستند که تغییرات سطحی زمین را در بسامد پایین اندازه می‌گیرند. در حال حاضر در حدود ۲۵ عدد گرانی‌سنج ابررسانا در شبکه جهانی در حال کار و گسترش است و می‌توانند در زمینه ثابت گرانش عمومی و امواج گرانشــی به آزمایش بپردازند. در یک گرانی‌ســنج ابررسانا به‌جای وزنه فنر در گرانی‌سنج‌های

شـــکل ۴:
گرانی‌سنج ابررسانا

مکانیکی، یک کرهٔ ابررســانا در میدان مغناطیسی ناشی از یک سیم‌پیچ ابررســانا معلق و در حال تعادل اســت. قطر آن در حدود ۲/۵ سانتی‌متر و جرم آن بین ۴ تا ۸ گرم اســت، با تنظیم جریان‌های ســیم‌پیچ معلق ضریب سختی مغناطیسی در اطراف صفر تنظیم می‌شود. حرکت جزئی جرم بر اثر تغییر گرانش محیط به‌وســیلهٔ حسگرهای خازنی که جرم را احاطه کرده‌اند، نظارت می‌شود. در عمل جرم در همان وضعیت اولیهٔ خود از طریق یک دستگاه بازخوردی نگهداری می‌شود. جریان‌های سیم‌پیچ معلق با ضریب سختی بسیار کوچک مغناطیسی گرانی‌سنج ابررسانا، بسیار پایدارند و در اندازه‌گیری گرانی بسیار حساس‌اند. حساسیت گرانی‌سنج ابررسانا در یک مکان آرام، بسیار خوب و تقریباً برابر یک نانوگال یا 10^{-11} متر بر مجذور ثانیه در سال است و در بسامدهای متغیر، کار می‌کند. در حال حاضر این دستگاه جدیدترین گرانی‌سنج ابررساناست و با حساسیت نانوگال و با دقت بالا، می‌تواند تغییرات زمانی هر یک از مؤلفه‌های مؤثر در تغییر زمانی گرانی و بعضی از اثرهای جدید ویژه گرانشی[4] را تعیین کند. امروزه این ابزارها در اندازه‌گیری میدان جاذبه با دقت‌های بسیار بالا به‌کار برده می‌شوند. با استفاده از به‌روزترین گرانی‌سنج ابررسانا با دقت نانوگال می‌تــوان هر پدیدهٔ قابل تصوری را کــه روی گرانی تأثیر می‌گذارد مورد مطالعه و بررسی قرار داد[۳].

جدول ۱. دقت نسبی در اندازه‌گیری شتاب گرانی

وسیلهٔ اندازه‌گیری	دقت نسبی	سطح
آونگ سادهٔ ریاضی	$10^{-4} \div 10^{-3}$	mGal
آونگ فیزیکی مخصوص	10^{-5}	
آونگ‌های وارون		
گرانی‌سنج‌های کوارتز	$10^{-7} \div 10^{-6}$	
گرانی‌سنج‌های روزآمد (LCR)	$10^{-8} \div 10^{-7}$	
گرانی‌سنج‌های لیزری مطلق	10^{-8}	µGal
گرانی‌سنج‌های ابررسانا	10^{-11}	nGal

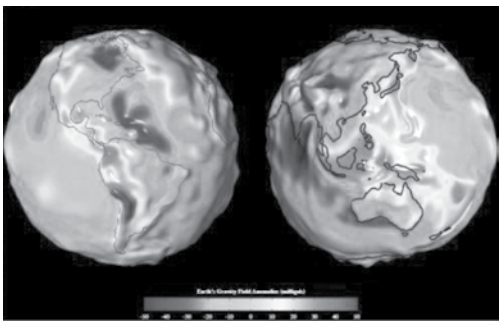
جدول ۱، پیشرفت در دقت نسبی گرانی‌سنج‌های مختلف را نشان می‌دهد[۴]. قرائت گرانی خطوط ایستگاه‌های شبکه چندمنظوره ایران توسط گرانی‌سنج‌های نســبی انجام می‌گیرد. در سازمان نقشه‌برداری کشور سه دستگاه گرانی‌سنج نسبی ۳M-CG و سه دستگاه گرانی‌سنج نسبی CG-۵ موجود است[۵]. در شکل ۵ می‌توان دید.

شکل ۵: گرانی‌سنج سازمان نقشه‌برداری

کاربردها

اندازه‌گیری میدان گرانی از فضا

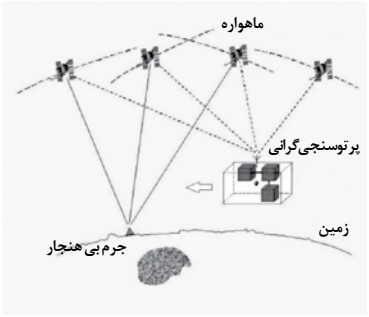
گرانی‌سنجی ماهواره‌ای (شکل ۶) می‌تواند تغییرات جرم آب‌های زیرزمینی، مانند دستگاه‌های دینامیکی آب درون بستر دریاچه‌ها، را بررسی کند. گرانی‌سنجی ماهواره‌ای می‌تواند در کامل‌تر و دقیق‌تر شدن الگوی زمین پیمایی به‌کار رود.



شکل ۶: مطالعه میدان گرانی زمین از فضا

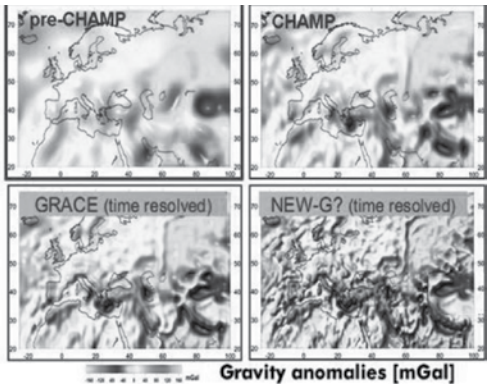
تحقیقات مربوط به میدان‌های پتانسیلی، به زمین‌شناسان به‌طور غیرمستقیم کمک می‌کند تا زیر سطح زمین را با استفاده از ویژگی‌های مختلف سنگ‌ها مطالعه کنند. تحقیقات گرانشی می‌تواند در پیدا کردن گسل‌های محلی، معادن و چاه‌های نفت و منابع آب‌های زیرزمینی به‌کار برده شوند. بررسی‌های میدان پتانسیل گرانشی، گران نیست و مزیت آن این است که می‌تواند خیلی سریع مناطق وسیع از سطح زمین را پوشش دهد.

گرانی‌سنجی می‌تواند به بهبود استانداردسازی ارتفاع، GPS ، و سطح متوسط آب آزاد کمک کند (شکل ۷). به روز کردن شبکه گرانی‌سنجی مطلق برای مدیریت تغییر گسل در منطقهٔ زلزله‌خیز، بالا آمدن آب، نظارت توده هیدرولوژیکی و کنترل داده‌های گرانشی ضروری است. با مأموریت انقلابی سه ماهوارهٔ گرانشی به‌نام‌های CHAMP، GRECE و GOCE در دهه گذشته مطالعه میدان گرانشی زمین با سرعت زیاد در حال پیشرفت است. با اندازه‌گیری تغییرات میدان جاذبهٔ زمین در نقاط مختلف و با توجه به وابستگی میدان گرانشی و چگالی توده‌های مختلف زیرسطحی، با ثبت میدان جاذبه می‌توان مواد معدنی با چگالی بیشتر یا کمتر از سنگ‌های درونی آن‌ها را کشف کرد این روش را می‌توان در سطح زمین یا در داخل تونل‌های زیرزمینی اجرا کرد. در اکتشافات، این روش به‌همراه روش مغناطیس‌سنجی به‌عنوان یک ابزار شناسایی توانمند به‌کار می‌رود که ارزان‌تر از لرزه‌نگاری است. در مطالعات مهندسی و در باستان‌شناسی به‌ویژه برای کشف حفره‌های



شکل ۷: اصول گرانی سنجی ماهواره‌ای و ارتباط ماهواره به ماهواره، پرتو سنجی گرانشی زمین

زیرزمین کاربرد ویژه دارد. گرانی‌سنج‌ها همهٔ پدیده‌هایی را که روی گرانی زمین تأثیر دارند اندازه می‌گیرند. خیلی از این پدیده‌ها بیشتر، از عوامل شناخته شده مانند چرخش زمین، مکان‌نگاری، تغییرات جزرومد هستند. گرانی بر اثر چشمه‌های معلوم می‌تواند به‌وسیلهٔ الگوهای واقعی محاسبه شود و تأثیر چشمه‌های نامعلوم از آن داده‌های گرانشی که به آن بی‌هنجاری گرانشی گفته می‌شود به‌دست آید. این می‌تواند به زمین‌شناسان کمک کند تا چشمه‌های نامشخص و مهمی را که در توزیع بی‌قاعدهٔ سنگ‌های زیرزمینی و با چگالی‌های مختلف تأثیر دارند تعیین کنند. یک نقشهٔ گرانی بااستفاده از اندازه‌گیری‌های عددی در سطح منطقهٔ مورد نظر ساخته می‌شود و تغییرات گرانی در نقشه به‌وسیلهٔ رنگ‌های مختلف که رنگ‌های گرم مانند قرمز و نارنجی، مناطقی با مقادیر گرانی زیاد را نشان می‌دهد و رنگ‌های سرد مانند آبی و سبز بیانگر مقادیر با گرانی کمتر هستند (شکل ۸). همچنین خط پربندهای نقشه نشان دهندهٔ مناطقی است که دارای مقدار گرانی یکسان هستند. تعیین نقشه گرادیان میدان گرانشی با استفاده از روش‌های ریاضی و داده‌کاوی می‌تواند در تفسیرهای دقیق زمین‌شناسی به‌کار برده شود.[۶]



شکل ۸: بی‌هنجاری‌های گرانی (mGal)

محاسبه دقیق شتاب گرانی در حرکت ماهواره‌ها و اجسام متفاوتی که دارای حرکت دورانی هستند، در صنایع خودروسازی و حرکت ماشین‌ها، محاسبه فشار مایعات و گازها و تأیید نظریه‌های فیزیک گرانش ضروری است. همچنین در تحقیقات کشاورزی، میکروبیولوژی، هوا و فضا، پرتاب ماهواره بسیار ضروری است. به‌روز کردن اندازه‌گیری g در صنایع راهبردی مانند تهیه نقشه‌های ظریف برای زیردریایی‌ها مورد نیاز است.

نتیجه‌گیری

ارائه روش‌های دقیق اندازه‌گیری g در آموزش فیزیک نیاز امروز فناوری است و باعث رشد علم فیزیک و ارتباط بهتر دانشگاه‌ها و مدارس با صنعت خواهد شد.

پیشنهاد

اندازه‌گیری دقیق و ایجاد نقطه و فراوانی اندازه‌گیری‌های دقیق محلی g و مدرج کردن آن، باعث می‌شود زمین‌پیمایی ایران دارای دقت اندازه‌گیری بالا باشد. بنابراین فعالیت‌های ظریف در فناوری نو از کارایی و ضریب اطمینان بالاتری برخوردار خواهد شد.

پی‌نوشت‌ها

۱. تحلیل داده‌ها: داده‌پردازی (Data Processing)
۲. گرانی‌سنج: (Gravimeter) ابزار اندازه‌گیری شتاب گرانی یا همان جاذبهٔ زمین
۳. گال: (Gal) یکای عملیاتی شتاب گرانی زمین و برابر یک سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است. ($1Gal=1cm/s^2$)
۴. مانند تغییر زمانی ثابت گرانی، که در ۱۹۳۷ م. توسط دیراک برنده جایزه نوبل (۱۹۳۳م.) پیشنهاد شد که می‌تواند گرانی زمین را به مقدار ۰/۱ میکروگال بر سال کاهش دهد و دیگری انبساط زمین است که توسط زمین‌شناسان مجارستانی در ۱۹۷۰ پیشنهاد شده و می‌تواند جاذبه زمین را به اندازهٔ ۰/۲ میکروگال بر سال کاهش دهد.

منابع

[1] http://www.ngdir.ir
[2] Diadaptasi;D., Gravity Methods, Kursus ES 304 -Geophysical Prospecting, Earth Science Department, University of Melbourne, Australia (2004)
[3] Shiomi; S., Progress of Theoretical Physics Supplement No. 172, (2008)
[4] VÖlgyesi; L., Some possible physical reason of time variation of Earth's gravity field (a possible proof of time change of gravitational constant). Australia, August 26-22 (2005)
[5] http://www.ncc.org.ir
[6] Hill;P.,Science for a changing world. FS- 239-95, October, (1997)