رمزگشایی ساختارهای داخلی سیارات خاکی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی

فاطمه صفری یساقی[1]، سید هانی متولی عنبران[2]

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، fatemeh.safari@ut.ac.ir
[2]استادیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، motavalli@ut.ac.ir

چکیده

سیستم سیاره‌ای ما در بازوی مارپیچی بیرونی کهکشان راه‌شیری قرار دارد. منظومه شمسی ما از ستاره ما خورشید و هرچیزی که اطراف آن به وسیله گرانش قرار داشته باشد، شامل سیارات، سیارات کوتوله، ده‌ها قمر و میلیون‌ها خرده سیاره، ستاره دنباله‌دار و شهاب‌سنگ‌ها تشکیل شده است. سیارات درونی و صخره‌ای عبارتند از، عطارد، زهره، زمین، مریخ. در این مطالعه به بررسی سیارات خاکی، قمر زمین (ماه) و تعدادی از ماموریت‌های ژئوفیزیکی انجام شده برای این سیارات که انواع مختلفی نیز داشتند، پرداخته شده است. از جمله ماموریت‌های مورد بررسی: مسنجر و مارینر 10 برای عطارد؛ ماموریت‌های پایونیر زهره (1 و 2)، ونرا (15 و 16) و ماژلان برای زهره؛ ماموریت‌های آپولو، لونا، چاندارایان 1، LOR، لونار پراسپکتور، کاگویا و گریل برای ماه؛ ماموریت‌های مارینر 9، MGS، MRO و اینسایت برای مریخ می‌باشد. از داده‌های توپوگرافی، گرانش و مغناطیس به دست آمده از این ماموریت‌ها برای بررسی ساختار داخلی و تکامل ساختاری این سیارات استفاده شده است که این تحقیق به بررسی نتایج حاصله و کاربردهای آن می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: سیارات خاکی، ماه، عطارد، زهره، مریخ، مطالعات ژئوفیزیکی

Deciphering the interior structures of terrestrial planets using geophysical data

Fatemeh Safari-Yasaghi[1], Seyed-Hani Motavalli-Anbaran[2]

1*M.Sc. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.*
2*Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran*

Abstract

Our planetary system is located in an outer spiral arm of the Milky Way galaxy. Our solar system consists of our star (the Sun) and everything to be around by gravity including the planets, dwarf planets, dozens of moons and millions of asteroids, comets and meteoroids. The inner, rocky planets are Mercury, Venus, Earth and Mars. This research try to study the terrestrial planets and moon of the Earth (lunar) and a number of geophysical missions that try to investigate these planets. Missions under investigation are: Messenger and Mariner 10 missions for Mercury; Pioneer Venus (1 and 2), Venera (15 and 16) and Magellan missions for Venus; Apollo, Luna, Chandarayaan_1, LRO, Lunar Prospector, Kaguya and GRAIL missions for the Moon; Mariner 9, MGS, MRO and InSight missions for Mars. The topographic, gravity and magnetic data obtained from these missions were used to investigate the internal structure and geological evolution of these planets, so this study to do examine the results and their applications.

Keywords: Terrestrial planets, Moon, Mercury, Venus, Mars, Geophysical Studies.

1 مقدمه

یکی از دقیق ترین راه ها برای بررسی ساختار زیرسطحی یک سیاره تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای آن می‌باشد. استقرار یک شبکه ژئوفیزیکی شامل لرزه‌نگاری بر روی جسم‌های خاکی بسیار چالش برانگیز و پرهزینه است. روش جایگزین، بررسی ساختار داخلی سیارات از مدار آن‌ها می‌باشد. از منظر ژئوفیزیکی و مقایسه چشم اندازه سیاره‌شناسی، انگیزه برای به‌دست آوردن داده‌های گرانشی و توپوگرافی با وضوح بالا به منظور تعیین نحوه شکل‌گیری، ساختار داخلی و تکامل ساختاری یک سیاره است. هنگامی که داده‌های توپوگرافی و مفروضات زمین‌شناسی معقول ترکیب شود، می‌توان از پارامترهای مهم ژئوفیزیکی مانند ضخامت پوسته، ضخامت الاستیک و تراکم پوسته و گوشته استفاده کرد. سپس این پارامترهای مدل می‌توانند برای پرداختن به سوالات مربوط به تمایز سیاره‌ای، تشکیل پوسته، تکامل حرارتی و فرآیندهای ماگمایی مورد استفاده قرار گیرند (ویکزورک 2015). همچنین با استفاده از داده‌های مغناطیسی و چگونگی توزیع عناصر تولید گرما به‌دست آمده از ماموریت‌ها، آنومالی‌های مغناطیسی و عوامل آن بررسی می‌شود (لانول و همکاران 2018).

2 روش تحقیق و ماموریت‌های صورت گرفته:

در این بخش برای هر سیاره داده‌های به دست آمده از هر ماموریت ژئوفیزیکی و هدف آن ذکر شده است و در بخش 3 به نتایج به دست آمده به همین ترتیب پرداخته می‌شود.

2-1 سیاره عطارد. ویکزورک (2015) ویژگی‌های توپوگرافی عطارد را با استفاده از داده‌های برداشت شده از ارتفاع‌سنج لیزری، فتوگرامتری و گرفتگی رادیویی فضاپیما از ماموریت مسنجر و میدان گرانش عطارد را از داده‌های ردیابی رادیویی فضاپیماهای مارینر 10 و مسنجر مورد برسی قرار داده است. داده‌های ردیابی مارینر10 تنها در طی دو پرواز به دست آمده و ردیابی رادیویی فضاپیمای مسنجر نیز منجر به پیشرفت چشمگیر درک ما از میدان گرانش عطارد شده است (ویکزورک 2015). ترکیب داده‌های توپوگرافی و گرانشی به‌دست آمده از مسنجر برای برآورد ضخامت پوسته در نیمکره شمالی استفاده شده است. برای این کار نسبت‌های ژئوئید به توپوگرافی (GTRs) محلی سازی شده مکانی بر سطح عطارد محاسبه می‌شود (سباستین پادوان و همکاران 2015). در ادامه برای گرانش و توپوگرافی درجه پایین عطارد، واکنش مکانیکی و گرانشی، لیتوسفر و گوشته به ناهمگونی های حرارتی داخلی ناشی از توزیع دمای سطح، ارتباط بین آفتاب‌دهی، ژئوئید و توپوگرافی بررسی می‌شود (توسی و همکاران 2015).

2-2- سیاره زهره. سیاره زهره به دلیل وجود جو متراکم، برای به‌دست آوردن اندازه‌گیری‌های سطح آن لازم است از فرکانس‌های الکترومغناطیسی، مانند مایکروویوها استفاده شود. ارتفاعات سطح زهره با استفاده از رادارهای ارتفاعی ماموریت‌های مدارگرد، پایونیر زهره، ونرا (15 و 16) و ماژلان از مدار اندازه گیری شده و از این میان فضاپیمای ماژلان که بین سال‌های 1990 تا 1994 در مدار قرار داشته، بیشترین اندازه‌گیری را انجام داده است. مدل‌های میدان گرانشی زهره نیز از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های ردیابی از فضاپیماهای مدارگرد پایونیر زهره و ماژلان ساخته شده است (ویکزورک 2015).

2-3- ماه. تجزیه و تحلیل اندازه‌گیری استریو و ارتفاع‌سنجی از ماموریت‌های اخیر به طور قابل توجهی اطلاعات توپوگرافی ماه را بهبود بخشیده و یک تحلیل دقیق از مورفولوژی ماه را ممکن ساخته است. جومن وهمکاران (2012) با استفاده از تصاویر با وضوح بالا دوربین‌های LROC از ماموریت LRO به بررسی دهانه‌های ماه پرداخته است. ایزوستازی در ماه می‌تواند اشکال مختلفی ازجمله دو مکانسیم جبران، ایزوستازی ایری و پرات و همچنین ایزوستازی خمشی داشته باشد. برای ارزیابی اهمیت سراسری ایزوستازی پرات روی ماه، مایکل و همکاران (2018) به دنبال یک همبستگی منفی بین ارتفاع و تراکم با استفاده از ارتفاع گرفته شده از LOLA، تراکم دانه‌ای (grain)گرفته شده از ماموریت لونار پراسپکتور و تراکم توده‌ای (bulk) مشتق شده از ماموریت گریل بوده‌اند. همچنین آزمایش برای اینکه آیا ایزوستازی ایری مکانیسم مهم پشتیبانی توپوگرافی است، تفسیری با استفاده از توابع هارمونیکی کروی GTR بر روی ماه انجام داده‌اند. مقادیر GTR از نقشه ارتفاعی LOLA بر روی ماموریت LRO و نقشه ژئوئیدی از ماموریت گریل محاسبه شده است (مایکل و همکاران 2018). بازالت‌های دریایی سنگ‌های آذرین خروجی هستند که از ذوب گوشته ماه حاصل می‌شوند و به طور

ترجیحی در نیمکره نزدیک ماه قرار دارند. ضخامت و حجم کل این بازالت‌ها پارامترهای اساسی هستند که محدوده وسیعی از تحقیقات ماه‌شناسی و ژئوفیزیکی را محدود می‌کنند. در این مطالعه، از داده های گرانشی با وضوح بالا به‌دست آمده توسط ماموریت گریل استفاده شده است (شنگشیا گونگ و همکاران 2016). توزیع عناصر تولید گرما تاثیر عمده‌ای بر تکامل سراسری داخلی ماه دارد. لانول و همکاران (2018) به توزیع سراسری منابع گرمایی رادیوژنیک توسط داده‌های سنجش از دور طیف‌سنج اشعه گاما که از هر دو ماموریت لونار پراسپکتور و کاگویا ثبت شده است، می‌پردازد. حوضه‌های برخورد (دهانه‌های برخوردی بر روی ماه که قطر آن‌ها بیش از 300 کیلومتر است، حوضه می‌گویند) مدت طولانی است که روی ماه شناخته شده‌اند. ماموریت گریل یک میدان گرانشی از ماه در سطح سراسری (زوبر و همکاران 2013) به‌دست آورده است که عناصر ساختاری اصلی حوضه‌های برخوردی، تازه و تخریب شده را آشکار می‌کند (گرگوری و همکاران 2015)

2-4- سیاره مریخ. ویکزورک (2015) با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنج لیزری (MOLA) روی فضاپیمای MGS که در سال 1997در مدار مریخ قرار گرفته و بیش از 640 میلیون داده‌برداری بر روی سطح را در طی چهار سال انجام داده است، به بررسی توپوگرافی مریخ می‌پردازد. مریخ در حال حاضر هیچ میدان دینامو ندارد اما داده‌های ماموریت MGS یک میدان مغناطیسی باقیمانده از پوسته را نشان می‌دهد. نقشه‌برداری سیستماتیک میدان مغناطیسی مریخ توسط ماموریت MGS (1997-2006) و MAVEN (2014 تا الان) انجام شده است. مهمترین و پیشرفته‌ترین ماموریت تا به امروز برای مریخ، ماموریت اینسایت می‌باشد. ماموریت اینسایت اولین داده لرزه‌ای و جریان گرما را برای مریخ فراهم و قیود بی سابقه‌ای را در ساختار داخلی و تکامل ایجاد می‌کند. سه ابزار اصلی که اینسایت برای ماموریتش به کار می‌گیرد عبارتند از: آزمایش لرزه‌ای برای ساختار داخلی (SEIS) بسته حرارتی و خصوصیات فیزیکی (HP^3) و آزمایش چرخش و ساختار داخلی (RISE). اینسایت با استفاده از داده‌های سه ابزار اصلی خود، شش هدف علمی را انجام می‌دهد (باندرت و همکاران 2013): تعیین اندازه، ترکیب و وضعیت فیزیکی هسته، ضخامت و ساختار پوسته، ترکیب و ساختار گوشته، وضعیت حرارتی داخلی، اندازه‌گیری نرخ و توزیع فعالیت لرزه‌ای و نرخ ضربه‌ها روی سطح (سوزان اسمریکار و همکاران 2019).

3 نتیجه‌گیری و نتایج مدل‌سازی:

3-1- سیاره عطارد. توپوگرافی سراسری عطارد حاصل از تصویربرداری استریو نشان می‌دهد این سیاره تا حد زیادی توسط فرآیندهای ضربه یا برخورد شکل گرفته است. متمایز نبودن بزرگترین حوضه‌ها مانند توپوگرافی ماه و مریخ، نشان می‌دهد که پس از تشکیل، فرآیندهای اصلاح بر روی آن‌ها شکل گرفته است. دشت‌های صاف نیز وجود دارد که به احتمال زیاد نمایانگر جریان‌های آتشفشانی هستند. آنومالی گرانشی کل از مدل GGMES_20v04 ترسیم شده، که در آن برخی از این آنومالی‌های مثبت مشاهده شده با نشانه‌های توپوگرافی همراه هستند. مناطق بزرگی از توپوگرافی‌های مرتفع ، هیچ آنومالی گرانشی قابل توجهی ندارد، که به احتمال زیاد نشان دهنده جبران ایزوستاتیک هستند (ویکزورک 2015). با تجزیه و تحلیل GTR و مرزهای محاسبه شده تراکم پوسته (2700 و 3100 کیلوگرم بر مترمکعب)، به طور متوسط ضخامت پوسته سیاره 18 ± 35 کیلومتر به‌دست می‌آید (سباستین پادوان و همکاران 2015). هر دو ژئوئید و توپوگرافی با درجه پایین به طور طبیعی می‌توانند از طریق تغییر شکل لیتوسفر الاستیک و گوشته زیرین ناشی از آنومالی‌های دمای عمیق از تعادل حفظ شوند. پاسخ‌های مکانیکی و گرانشی لیتوسفر و گوشته محاسبه شده به درجه حرارت مطلق گوشته بستگی ندارد و کمی تحت تاثیر حضور همرفت قرار می‌گیرند. با این حال به دلیل خنک شدن گوشته، ضخامت لیتوسفر به مرور زمان مقدار متوسط آن از 100-85 کیلومتر پس از 1 میلیارد سال به 190-170 کیلومتر در دوره کنونی افزایش می‌یابد (توسی و همکاران 2015).

3-2- سیاره زهره: به استثنای چند شکاف داده نسبتا جزئی که حدود 2/6 درصد از مساحت سیاره را پوشش می‌دهد، پوشش این سیاره نسبتا یکنواخت است. توپوگرافی زهره (برگرفته از مدل هارمونیک کروی VenusTopo719) نشان می‌دهد که هیپسومتری زهره بی بدیل است بر خلاف زمین که دو حالته است. زهره را می‌توان به طور گسترده با دشت‌های کم ارتفاع، فلات‌های قاره‌ای وبرجستگی‌های آتشفشانی مشخص کرد. میدان گرانش شعاعی و ژئوئید MGNP180U نشان می‌دهد در نتیجه‌ی چرخش عقب‌گرد آهسته زهره، هیچ سطح چرخشی قابل توجه‌ای از

سیاره وجود ندارد همچنین بیشتر آنومالی‌های گرانشی و ژئوئیدی با توپوگرافی سطح ارتباط زیادی دارند.

3-3- ماه. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی با منشاء آتشفشانی در دریا ماه (حوضه‌های برخوردی که 1/2 تا 4/2 میلیارد سال پیش با گدازه پر شدند.) شامل (1) جریان گدازه، (2) طوفان‌های سینوسی، (3) گنبدها و مخروط‌های آتشفشانی، و (4) رسوبات حلقوی می‌باشد. خصوصیات تکتونیکی ماه هم به ضربه و هم به آتشفشان مربوط می‌شود و با ویژگی‌های کششی و فشاری مانند گسل، گرابن، دایک و پشته‌های چین خورده آشکار می‌شود. واترز و همکاران (2012) توانستند ساختارهای تکتونیکی کششی را در تصاویر با وضوح بالا LROC از ارتفاعات نیمکره دور و دریای نیمکره نزدیک شناسایی کنند. مشاهدات اخیر با استفاده از تصاویر LRO، طیف وسیعی از ویژگی‌های تکتونیکی را نشان می‌دهد، از جمله فرورفتگی‌های باریک یا گرابن، گسل‌های گسترده، و چندین سطح با برآمدگی کم ارتفاع (جومن و همکاران 2012). برای بررسی ایزوستازی پرات فرض شده است که ارتفاعات ماه دارای حداکثر ارتفاع تقریبا 10 کیلومتر است. یک مکانیزم خالص پرات دلالت بر این دارد که تراکم پوسته 2040 کیلوگرم بر متر مکعب در چنین ارتفاعی و 2270 کیلوگرم بر متر مکعب در ارتفاع 5 کیلومتر است، با توجه به ضخامت پوسته 40 کیلومتر و تراکم پوسته 2550 کیلوگرم بر متر مکعب در ارتفاع صفر (ویکزورک و همکاران 2013)، این مقادیر را می توان رد کرد: چرا که اگر تراکم دانه‌ای پوسته در ارتفاعات 2900 کیلوگرم بر متر مکعب باشد، تراکم پوسته به تخلخل 30 درصد نیاز دارد. چنین تخلخل‌های بالایی در پوسته ماه امکان پذیر نیست، بنابراین می‌توان مکانیسم خالص پرات را رد کرد. همچنین با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های GTR ماه، مقدار متوسط GTR در نیمکره نزدیک به $25/8^{+7/5}_{-5/7}$ متر بر کیلومتر و مقدار متوسط GTR برای ارتفاعات نیمکره دور $39/3^{+5/7}_{-6/2}$ متر بر کیلومتر می‌باشد. در نتیجه ارتفاعات ماه می‌توانند با الگوی جبران ایری از ایزوستازی به عنوان وضعیتی تعریف شوند که در آن فشارهای برابر در امتداد سطوح هم‌پتانسیل در عمق رخ می‌دهد و نه وضعیتی که در آن ستون‌های پوسته یک سطح معین حاوی توده‌های مساوی باشد. دوگانگی نیمکره مشاهده شده در مقادیر GTR به عنوان یک نتیجه از تفاوت نیمکره در ضخامت پوسته رخ می‌دهد. ضخامت مدل ایزوستاتیک ایری می‌تواند با یک پوسته یک لایه یا پوسته دو لایه مناسب باشد (مایکل و همکاران 2018). اقیانوس طوفان‌ها (یکی از دشت‌های بازالتی بسیار بزرگ بر روی ماه است که به این نام شناخته می‌شود) بزرگترین فضای وسیع جریان گدازه در کره ماه است به طوریکه این منطقه بیش از 50 درصد از گدازه‌های ماه را تشکیل می‌دهد. بر اساس تجزیه و تحلیل انجام گرفته، ضخامت متوسط این بازالت‌ها در حدود $0/97^{+0/38}_{-0/85}$ کیلومتر است. مورد دیگر حوضه ایمبریوم یکی از بزرگترین حوضه‌های برخوردی بر روی ماه می‌باشد که حدود 3/85 میلیارد سال قبل تشکیل شده است. ضخامت حاصل از این مطالعه برای این حوضه تا حدودی نامشخص است و دامنه آن از 0/2 تا 2/45 کیلومتر برآورد شده است (شنگشیا گونگ و همکاران2016). داده‌های میدان مغناطیسی به‌دست آمده از هر دو فضاپیمای کاگویا و لونار پراسپکتور برای ساختن مدل سراسری میدان مغناطیسی ماه استفاده شده‌اند. مدل به‌دست آمده نشان می‌دهد که قدرت میدان در ارتفاع 30 کیلومتری به طور متوسط چند میکرو تسلا است و در چندین ناحیه جدا شده به حدود 20 میکرو تسلا می‌رسد (لانول و همکاران 2018). داده‌های گرانشی گریل در ترکیب با توپوگرافی با وضوح بالا جمعیت و ساختار سه بعدی حوضه‌های برخورد ماه را آشکار کرده است. اختلاف نیمکره در توزیع بزرگترین حوضه‌ها ممکن است نتیجه تغییرات جانبی در دمای پوسته باشد، اما تفاوت‌های نیمکره در حوضه‌های اوج حلقه کوچکتر توسط این مکانیسم توضیح داده نشده است. تفاوت نیمکره‌ای در تعداد حوضه‌های اوج حلقه ناشی از تغییرات مکانی در شار ضربه است (گرگوری و همکاران 2015).

4-3- سیاره مریخ. دو مورد از برجسته‌ترین ویژگی‌های دوگانگی، ارتفاع بین نیمکره شمالی و جنوبی و ارتفاعات منطقه‌ای زیاد، منطقه آتشفشانی تارسیس است. این دو ویژگی باعث ایجاد انحراف 3/3 کیلومتر مرکز شکل (figure) از مرکز جرم می‌شود. علاوه بر این ویژگی‌های طول موج بلند، بین شعاع قطبی و استوایی نیز تقریبا 20 کیلومتر اختلاف وجود دارد که این امر در نتیجه پخ‌شدگی چرخش سیاره است (ویکزورک 2015). تعبیر کانونی آنومالی‌های مغناطیسی مریخ این است که آن‌ها از مغناطش باقیمانده حرارتی (TRM) ناشی می‌شوند، که هنگام خنک شدن سنگ‌های پوسته با حضور یک میدان سراسری به‌دست می‌آیند (سوزان اسمریکار و همکاران 2019). ضبط لرزه‌نگاری نوارهای چکش HP^3 (کیدا و همکاران 2017) و سیگنال‌های لرزه‌ای به دلیل گرداب‌های جوی (لورنز و همکاران 2015؛ کندا و

همکاران، 2017) یک لایه با تخلخل بالا، سختی کم، و ضخامت تقریبا 3 متر، بالای یک لایه بسیار سفت و سخت‌تر را تایید می‌کند (لگنون و همکارن 2020). سرانجام، رادیومتر مادون قرمز میزان تحرک حرارتی نزدیک سطح را (گلومبک و همکاران 2020)، 230-$160\,J\,m^{-2}\,s^{-\frac{1}{2}}\,K^{-1}$ را به‌دست آورده است. میدان پوسته استاتیک اندازه گیری شده توسط اینسایت دارای قدرت 53 ± 2013 نانوتسلا و اوج دامنه‌های تغییرات روزانه نیز 20 نانوتسلا است و انتظار نمی‌رود به تنهایی از میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای باشد، در نتیجه نشان دهنده سهم جریان‌های یونوسفری است. کاتالوگ مریخ لرزه اینسایت (از تاریخ 30 سپتامبر 2019) شامل 174 رویداد می‌باشد (جاردینی و همکارن 2020). پس از بررسی سیگنال‌های لرزه‌ای و مقایسه آن با زمین‌لرزه‌ها به این نتیجه رسیدند که مریخ لرزه‌ها پس از هر بار رسیدن به لرزه‌نگار، کدهای نسبتا طولانی را نشان می‌دهند که نشان دهنده پراکندگی شدید پوسته است و فاقد امواج سطحی می‌باشند. میزان وقوع لرزه‌نگاری سراسری برآورد شده از حوادث مشاهده شده، سیاره‌ای نسبتا فعال را نشان می‌دهد (بروس باندرت و همکاران 2020).

منابع

W. Bruce Banerd et al. 2020. Initial results from the InSight mission on Mars: NATURE GEoSCIENCE, VOL 13,183–189.

Giardini, D. et al., 2020. The seismicity of Mars. Nat. Geosci. https://doi.org/10.1038/s41561-020 0539-8

Golombek, M. et al. 2020, Geology of the InSight landing site on Mars. Nat. Commun. https://doi.org/10.1038/s41467-020-14679-1

R. Jaumann, H. et al. 2012, Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding. Planetary and Space Science.

Kedar, S.et al.2017, Analysis of regolith properties using seismic signals generated by InSight's HP3 penetrator. Space Sci. Rev. 211, 315–337.

Kenda, B. et al. 2017, Modeling of ground deformation and shallow surface waves generated by martian dust devils and perspectives for near-surface structure inversion. Space Sci. Rev. 211, 501–524.

Kobayashi, S., et al. 2012. Lunar farside Th distribution measured by Kaguya gamma-rays pectrometer. Earth and Planetary Science Letters, 337-338, 10–16.

Lawrence, D. J. et al. 2007. Global spatial deconvolution of Lunar Prospector Th abundances. Geophysical Research Letters,34,L03201.https://doi.org/10.1029/2006GL028530.

Lognonné, P. et al. 2020.Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. Nat. Geosci. https://doi.org/10.1038/s41561-020-0536-y.

Lorenz, R. D. et al. 2015. Seismometer detection of dust devil vortices by ground tilt. Bull. Seismol. Soc. Am. 105, 3015–3023

Michael M. Sori, et al. 2018, Isostatic Compensation of the Lunar Highlands, Journal of Geophysical Research: Planets, 10.1002/2017JE005362.

N. Tosi, O. Cadek. 2015. Mercury's low-degree geoid and topography controlled by insolation-driven elastic deformation. Geophysical Research Letters2015/10.1002،GL.065314

Sebastiano Padovan, et al. 2015. Thickness of the crust of Mercury from geoid-to-topography ratios. Geophysical Research Letters2014/10.1002،GL062487.

Shengxia Gong, et al. 2016, Thicknesses of mare basalts on the Moon from gravity and topography. Journalof Geophysical Research: Planetst, 10.1002/2016JE005008.

Suzanne E. Smrekar et al. 2019. Pre-mission InSights on the Interior of Mars. https://doi.org/10.1007/s11214-018-0563-9

Watters, T.R, et al. 2012. Recent extensional tectonics on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. Nature Geoscience 5, 181–185.69, 18–27.

Wieczorek, M. A. et al. 2012. An impactor origin for lunar magnetic anomalies. Science, 335, 1212. https://doi.org/10.1126/science.1214773.

Wieczorek, M. A. 2015, Gravity and topography of the terrestrial planets, in Planets and Moons, edited by T. Spohn, Treatise on Geophysics, vol. 10, 2nded., edited by G. Schubert, Elsevier, Amsterdam

Zuber, M.T., et al. 2013. Gravity field of the Moon from the Gravity Recovery And Interior Laboratory (GRAIL) mission, Science, 339(6120), 668–671,doi:10.1126/science.1231507.