

# ژئوتئید و کاربرد آن

ترجمه و تنظیم: مهندس منوچهر موسوی زاده بزوی

## پیشگفتار

به طور کلی ژئوتئید به عنوان یک سطح مینا، در علوم که به هر نحو با اندازه گیری کمتهای وابسته به فیزیک و هندسه زمین در ارتباط می باشند، از اهمیت خاصی برخوردار است. بخصوص در علم بنیادی ژئودزی، این سطح فرضی، پایه و اساس و همچنین ابزار مفیدی برای برآورد بسیاری از کمتهای مورد نیاز علم ژئودزی و علوم وابسته به آن است.

با توجه به اهمیت این سطح خاص و لزوم درک مفهوم آن، به نظر می رسد، مقاله زیر می تواند تا حد قابل توجهی مفید واقع شود. لازم به ذکر است، این مقاله برداشتی است از رساله دکتری یکی از فارغ التحصیلان رشته ژئودزی دانشگاه نیورانسویک<sup>۱</sup> کانادا، که به راهنمایی استاد ممتاز ژئودزی آقای پروفیسور «نیچک»<sup>۲</sup> تهیه شده است، امید است مورد استفاده متخصصان، کارشناسان، دانشجویان و علاقه مندان ذریعۀ قرار گیرد.

نامیده می شود،  $\eta$  عبارتست از مولفه عمود بر امتداد  $\xi$ ، و به عنوان انحراف قائم اولیه شناخته می شود. علامت قراردادی  $\xi$ ، وقتی ارتفاع ژئوتئید به سمت جنوب افزایش می یابد مثبت است و  $\eta$  نیز وقتی ارتفاع ژئوتئید به سمت غرب زیاد می شود، مثبت می باشد.

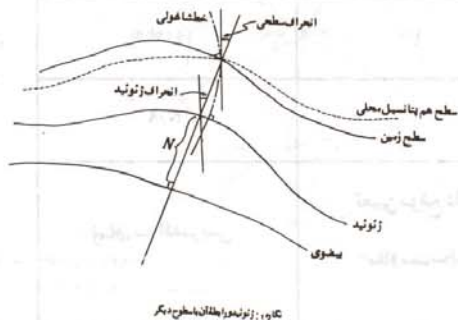
ژئوتئید سطحی است فیزیکی، اما در واقعیت فرضی، که به طرق مختلف دامنه علم نقشه برداری را تحت الشعاع قرار می دهد. محور قائم دستگاههای نقشه برداری هنگام اندازه گیری با بستی موازی با مماس بر خط شاتولنی محلی باشد. در ژئودزی کلاسیک، محاسبات نهایی بر روی یک بیضوی انجام می شود، بنابراین لازم است مشاهدات از سطح زمین به روی یک بیضوی مرجع آورده شوند. این تصحیح نیاز به آگاهی از ارتفاعات ژئوتئید و انحرافات سطحی قائم دارد.

در پردازش ترازهای دقیق، با وجود تصحیحات خاص مربوطه برای تغییرات ثقل، اختلاف ارتفاع بین سطوح هم پتانسیل حفظ می شود. این ارتفاعات به وسیله دستگاههای اندازه گیری جزو سده<sup>۳</sup> از سطح متوسط آب دریا اندازه گیری می شوند، بنابراین ژئوتئید را می توان تا حد خوبی سطح مینای ارتفاعات در نظر گرفت. با وجود این سطح متوسط آب دریاها کاسلا بر ژئوتئید منطبق نیست زیرا این سطح به علت تفاوت دما، فشار و نمک آب در نقاط مختلف تغییر می کند به طوری که موجب ایجاد اختلافی به اندازه یک تا دو متر از یک سطح هم پتانسیل می شود. در اینجا این سؤال مطرح می شود که آیا سطح متوسط آب دریاها می تواند به عنوان تقریبی از ژئوتئید، برای مقاصد ژئودتیک به کار رود؟ یا اینکه آیا ژئوتئید می تواند به عنوان

## ژئوتئید و کاربرد آن

قبل از ورود به موضوع اصلی، لازم است جهت درک کامل مفهوم ژئوتئید، مرور مختصری به چند تعریف مقدماتی داشته باشیم. ژئوتئید، عبارت است از سطح هم پتانسیل خاصی از میدان ثقل زمین که به طور متوسط بر سطح متوسط آبهای آزاد منطبق است. ژئوتئید ممکن است با دقت خوبی به وسیله یک بیضوی تقریب شود، به طوری که جدایی بین این دو سطح به عنوان ارتفاع ژئوتئید<sup>۴</sup>، شناخته می شود.  $\Delta$  وقتی ژئوتئید بالای بیضوی است، مثبت می باشد (شکل ۱). خط شاتولنی عمود بر ژئوتئید و سطح هم پتانسیل دیگر میدان ثقل زمین است. زاویه بین مماس بر خط شاتولنی در یک نقطه و نرمال بر بیضوی گذرنده بر همان نقطه انحراف قائم<sup>۵</sup> نامیده می شود. انحرافات قائم در سطح زمین به عنوان «انحرافات سطحی» شناخته می شوند و به دلیل انحنای خط شاتولنی با انحرافات مربوطه در روی ژئوتئید، متفاوت هستند (شکل ۱).

کمان انحراف قائم در یک نقطه معمولاً به دو مقدار اسکالر،  $\xi$ ،  $\eta$  تجزیه می شود.  $\xi$  مولفه انحراف در امتداد شمال و جنوب است و انحراف نصف النهاری



تفاوت ژئوتئید با سطح هم پتانسیل دیگر

۵) ژئوئید آستروگراویتریک<sup>۱۲</sup> تلفیقی است از دو بند (۲) و (۴). این ژئوئید اساساً یک ژئوئید آستروژئودتیک است که در آن از انحرافات قائم نتیجه شده از انامولیهای نقل نیز استفاده شده است.

### سیستمهای مختصات

قبل از شرح استفاده از ژئوئید در تراسترفرماسیون بین سیستمهای مختصات، بد نیست مروری خلاصه به سیستمهایی که در ژئودزی به کار گرفته می‌شوند، داشته باشیم. به‌طور کلی دو نوع سیستم مختصات وجود دارد:

- ۱) منسوب به بیضوی<sup>۱۳</sup>؛
- ۲) قائم الزاویه‌ای (کارتزین).

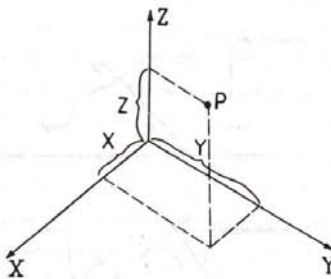
۱) سیستم مختصات منسوب به بیضوی به مولفه اسکالر  $\varphi$  و  $\lambda$  بر روی یک بیضوی دورانی خاص تعریف می‌شود. عبارت است از عرض جغرافیایی ژئودتیک که به مبداء استوا و در جهت شمال اندازه‌گیری می‌شود،  $\lambda$  طول جغرافیایی ژئودتیک به مبداء یک صفحه مرجع دلخواه در جهت شرق و  $h$  عبارت است از ارتفاع بالای بیضوی در امتداد شمال (قائم) وارد بیضوی (شکل ۲).

برای اینکه سیستم مختصات کاملاً مشخص باشد، بایستی اندازه‌ها با راستهای بیضوی که معمولاً  $a$  و  $f$  هستند معلوم باشد.  $f$  عبارتست از میزان فشردگی مولفه  $h$  به دو سمت:  $H$  ارتفاع بالای ژئوئید و  $N$  ارتفاع ژئوئید از بیضوی، تقسیم می‌شود (شکل ۱). سیستم مختصات ژئودتیک کلاسیک دو بعدی فقط شامل زوج مولفه  $\varphi$  و  $\lambda$  است و برای دستیابی به یک سیستم ژئودتیک سه بعدی هر دو مقدار  $H$  و  $N$  مورد نیاز هستند.

۲) سیستم مختصات کارتزین شامل سه مولفه اسکالر  $X$  و  $Y$  و  $Z$  است که موقعیتهای نقاط را نسبت به سه محور قائم نمایش می‌دهند (شکل ۳) وقتی مبداء این سیستم مختصات بر مرکز سیستم منسوب به بیضوی منطبق و محور  $Z$  آن با قطر کوچک بیضوی یکسان باشد حتماً صفحه  $(X-Z)$  صفحه نصف النهاری مرجع در نظر گرفته شود، می‌توان سیستم کارتزین را به کمک معادلات زیر به سیستم مختصات منسوب به بیضوی (ژئودتیک) ربط داد:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N(\varphi)+h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N(\varphi)+h) \cos \varphi \sin \lambda \\ ((1-e^2)N(\varphi)+h) \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$N(\varphi)$  شعاع انحنای بیضوی در مقطع قائم اولیه و  $e$  خروج از مرکزیت اول



نگاره ۳: سیستم مختصات کارتزین

یک سطح مبداء برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب دریاها مورد استفاده قرار گیرد؟ ژئوئید، به تنهایی یک سطح متحرک است با برداشته‌ای گذرنده بر مرکز نقل زمین. حرکت سبکی مرکز نقل زمین که ناشی از نیروی جاذبه خورشید و ماه است، موجب تغییری به اندازه یک متر در ژئوئید می‌شود.

ژئودزیهایی متعددی در زمینه کار بدون ژئوئید تحقیق کرده‌اند. نتایج حاصل از مشاهدات کلاسیک به نشانه‌های زمینی، مشخص کرده است که به علت تأثیرات نامعلوم انکسار جوی روی زوایای قائم و در حقیقت اثر انحرافات قائم بر مشاهدات، کاربرد ژئوئید غیرممکن است. تکنیکی که مستقل از ژئوئید است، ژئودزی هندسی ماهواره‌ای است. به هر حال انجام مشاهدات ماهواره‌ای در تمام ایستگاههای ژئودتیک امکان پذیر نمی‌باشد و مشاهدات کلاسیک با مشاهدات ماهواره‌ای کامل می‌شوند. استفاده از این دو نوع مشاهده موجب ایجاد رابطه مهمی بین ارتفاعات ژئوئید و سیستمهای مختصات می‌شود که در قسمت بعد مورد آن صحبت خواهد شد.

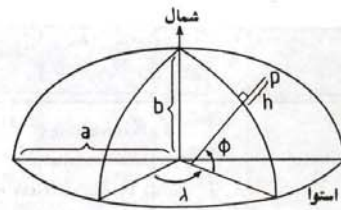
اگر چه ممکن است، ژئوئید فقط به یک سطح هم بتانسیل اطلاق شود، اما روشهای گوناگونی برای محاسبه ارتفاعات ژئوئید وجود دارد به گونه‌ای که موجب نتیجه شدن انواع ژئوئید، به شرح زیر شده است.

۱) ژئوئید ماهواره‌ای بر اساس تجزیه و تحلیل اغتشاشات<sup>۸</sup> مسیر ماهواره‌های در حال حرکت حول زمین نتیجه می‌شود. ژئوئید حاصل از این روش دارای کیفیت یکنواختی است و نوعی ژئوئید اصلاح شده است که به یک بیضوی ژئوستریک مربوط می‌باشد.

۲) در محاسبه ژئوئید گراویتریک<sup>۹</sup> برای تعیین ارتفاعات ژئوئید از مقدار نقل اندازه‌گیری شده روی سطح زمین استفاده می‌شود. این کار معمولاً به مرجع یک بیضوی ژئوستریک انجام می‌شود و به دلیل نیاز به اطلاعات نقلی در نقاط مختلف و خاص جهان دارای کیفیت ثابتی نیست.

۳) ژئوئید ترکیبی ماهواره‌ای - گراویتریک تلفیقی است از دو روش بند (۱) و (۲). تغییرات جزئی در ارتفاع ژئوئید با استفاده از انامولیهای نقل و تغییرات با مقیاس بزرگ، به کمک اطلاعات ماهواره‌ای مشخص می‌شوند.

۴) در محاسبه ژئوئید آستروژئودتیک<sup>۱۱</sup> برای تعیین ارتفاعات ژئوئید بجای استفاده از مقدار نقل از امتداد نقل که به بیضوی مرجع وابسته است استفاده می‌شود و لازم نیست که این بیضوی حتماً ژئوستریک باشد؛ بنابراین مشاهدات این روش، ژئوئید فقط می‌تواند برای خشکیهای کره زمین محاسبه شود و این کار نیاز به توزیع خوبی از اطلاعات دارد.



نگاره ۲: سیستم مختصات منسوب به بیضوی

وقتی سیستم منسوب به بیضوی ( همراه با سیستم کارتیزین مربوطه) به عنوان یک پایه برای محاسبات ژئودتیک به کار می رود یک سیستم ژئودتیک را مشخص می کند و بیضوی نیز یک بیضوی مربع ژئودتیک خواهد بود و زمانی که یک سیستم کارتیزین به گونه ای تعریف شود که مبدا آن بر مرکز ثقل زمین منطبق باشد و محور Z آن با محور متوسط دوران زمین یکسان در نظر گرفته شود، و نیز صفحه (X-Z) شامل صفحه نصف النهار گرینویچ باشد ( یعنی منطبق بر صفحه نصف النهار گرینویچ باشد ) بنابراین به عنوان یک سیستم ژئوستریک شناخته می شود ( طبیعتاً یک سیستم منسوب به بیضوی ژئوستریک مربوط به آن نیز وجود خواهد داشت ) . سیستمهای مختصات ژئوستریک و ژئودتیک عموماً برهم منطبق نیستند و ممکن است مبدا آنها یکسان نباشد. همچنین ممکن است اختلاف مقیاسهایی در سیستمها وجود داشته باشد. در عمل این انتقالها، دورانها و تغییرات مقیاس ( در صورت وجود تغییرات مختصات تا ... متر) کوچک هستند، معمولاً محاسبات مربوط به مشاهدات روی موضوعات زمینی در سیستم ژئودتیک دوبردی انجام می شود، در صورتی که محاسبات مربوط به مشاهدات ماهواره ای در سیستم کارتیزین ژئوستریک است. جهت برقراری ارتباط بین مختصات این دو سیستم، مؤلفه های انتقال، دوران، تغییر مقیاس و ارتفاعات  $\Delta$  و  $\lambda$  مورد نیاز هستند. از مختصات نجومی  $(\phi, \lambda)$  نیز در اینجا باید صحت شود. عرض نجومی  $\phi$  در نقطه P عبارت است از زاویه متشکل بین نرمال بر ژئوئید گذرنده بر p و استوای عمود بر محور دوران متوسط زمینی ( شکل ۱ الف). طول نجومی  $\lambda$  در صفحه استوای مبدا نصف النهار گرینویچ در جهت شرق تا صفحه شامل محور دوران متوسط که موازی با نرمال بر ژئوئید در نقطه P می باشد اندازه گیری می شود ( شکل ۱ ب). چنانچه سیستم کارتیزین ژئودتیک موازی با سیستم کارتیزین ژئوستریک باشد، نتیجتاً مؤلفه های انحراف قائم استروژئودتیک با روابط زیر مشخص می شوند:

$$\begin{aligned} \xi^A &= \phi - \phi \\ \eta^A &= (\lambda - \lambda) \cos \phi \end{aligned} \quad (2)$$

### ● دقت کار

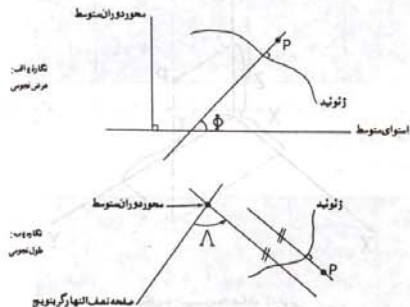
موارد استفاده ارتفاعات ژئوئید استروگرومتریکی ( یا استروژئودتیک) ممکن است به صورت زیر تقسیم شود:

۱) به منظور تصحیح طولها و امتدادهای مشاهده شده از روی زمین به بیضوی مربع ژئودتیک؛

- ۲) به منظور انتقال سیستم ژئودتیک دو بعدی کلاسیک به یک سیستم مختصات ژئودتیک سه بعدی؛
- ۳) به منظور برقراری ارتباط بین سیستم مختصات ژئودتیک با یک سیستم مختصات ژئوستریک ( یعنی انتقال مستقیم مؤلفه ها و دورانها)؛
- ۴) مشخص کردن یک سطح مبنا از تغییرات سطح متوسط آنها.
- ۱-۱) دقتهای مورد نیاز برای تصحیح طولها و امتدادها تابعی از دقتهای لازم برای شبکه های کنترل مسطحاتی درجه اول هستند. در کشور کانادا دقتهای مورد لزوم  $\pm 0.01$  p.p.m. و  $\pm 0.01$  p.p.m. برای طولها و  $\pm 0.01$  ثانیه درجه ای برای امتدادهای درجه اول می باشند. از آنجاییکه خطاها در ارتفاع ژئوئید و انحرافات قائم، دقت طولها و امتدادهای تصحیح شده را تحت تأثیر قرار می دهند، اثر آنها با بستی لزوماً کمتر از  $\pm 0.01$  p.p.m. و  $\pm 0.01$  p.p.m. باشد. با این فرض که خطاها در ارتفاعات ژئوئید و انحرافات قائم تصادفی هستند ( که در هر حال ممکن نیست، مخصوصاً برای ارتفاعات ژئوئید)، بنابراین برای اثر آنها مقدار دقت  $\pm 0.01$  p.p.m. و  $\pm 0.01$  متر و انحرافات قائم آن بهتر از  $\pm 0.01$  p.p.m. باشد (Z فاصله زمینی از نشانه است برای مشاهده خاص).

۲-۲) بند ۲ در حقیقت زیر مجموعه ای از بند ۱ است، بنابراین ممکن است با هم در نظر گرفته شوند. هیچ معیاری برای استانداردهای دقت در ترانسفر ماسیون از سیستم ژئودتیک به سیستم مختصات ژئوستریک وجود ندارد. یک برآورد تخمینی مفید این است که با راسرهای استفاده شده در ترانسفر ماسیون کم دقت تر از اطلاعات ترانسفر شده نشوند. با تغییرات سریعی که در تکنولوژی ماهواره ای رخ می دهد، در نظر گرفتن معیاری برای دقت مختصات ژئوستریک کاری مشکل است به عنوان مثال به کمک سیستمهای ماهواره ای نوری با دقتی برابر با ۱ تا ۱۰ متر، در آینده ای نزدیک، دستیابی به دقت  $\pm ۱$  متر از سیستمهای داپلر امکان پذیر خواهد شد. این عمل ممکن است با سیستمهای لیزری دارای دقت کمتر از یک متر نیز انجام شود. به هر حال برای نیازهای فوری آینده دقتی تا اندازه  $\pm ۱$  متر برای ارتفاعات ژئوئید، جوابگوی مقاصد ترانسفر ماسیون خواهد بود.

۱-۴) همان گونه که ذکر شد، تغییرات سطح متوسط آنها به یک تا  $\pm ۱$  متر می رسد، برای اینکه این تغییرات کلاسیک مطالعه شوند، ارتفاعات ژئوئید با دقتی بیش از درجه یک (  $\pm ۱$  تا  $\pm ۱$  متر) مورد نیاز است. واضح است که از ژئوئید استروگرومتریکی که به اندازه گیریهای زمینی و موارد دیگر ذکر شده محدود می شود. نمی توان انتظار این دقت را داشت.



1) Geoid	8) Perturbations
2) New Brunswick	9) Gravimetric
3) Vaniček	10) Satellite - Gravimetric
4) Geoidal height	11) Astrogeodetic
5) Deflection of the vertical	12) Astrogravimetric
6) Surface deflections	13) Ellipsoidal
7) Tide gauges	14) Part per million