

# سیستم ارتفاعی دوگانه جهت

## سطح مبنای NAD - 83

ترجمه: مهندس صالح آبادی

اثر: پرفسور تی - وینستی T. VINCENTY

### چکیده

سیستم ارتفاعی دوگانه در سرشکنی سطح مبنای آمریکای شمالی (NAD-83) به کار برده شده که کمتر افرادی در سطح دنیا از این موضوع باخبر هستند، و چنانچه درباره‌ی این مطلب از قبل چیزی شنیده باشند. کاربرد این موضوع در اینجا در واقع یک نوع یادآوری به حساب می‌آید زیرا که مسائل ژئودتیکی بسیاری وجود دارند که راه دسترسی به آنها از این قضیه آسانتر می‌باشد. این مقاله سعی دارد که بیان نماید این موضوع چیست، و چرا ما نیازمند کاربری آن هستیم؟

توجه: «قسمت کانادایی سطح مبنای (NAD-83) که در بعضی زمینه‌ها به طور متفاوت نسبت به مابقی قسمتهای سطح مبنای به کار برده شده، در این بحث شرکت ندارد».

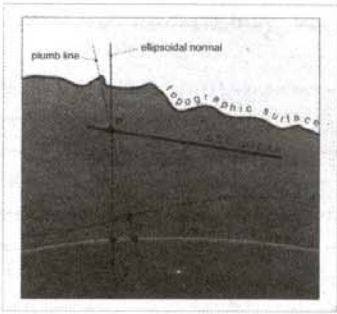
### ● بحث کلی در مورد ارتفاعات

وقتی که ما صحبت از ارتفاع یک نقطه می‌کنیم، در واقع منظور ما به دست آوردن فاصله‌ی نقطه‌ی مزبور از یک سری سطوح با ارتفاع صفر است. لذا در ارتباط با کارهای ژئودتیکی، سه نوع کلی از این چنین سطوح با ارتفاع صفر تعریف می‌شوند، سطوحی همانند ژئوئید، بیضوی و سطح متوسط آبهای آزاد.

ژئوئید طبیعت فیزیکی دارد. و در واقع یکی از سطوح هم پتانسیل زمین می‌باشد که ارتفاع نقاط بالای آن به عنوان ارتفاع ارتومتریک معرفی می‌گردد. بیضوی در واقع یک سطح فرضی مفید است که ارتفاع نقاط روی آن را به عنوان ارتفاع ژئودتیک یا ارتفاع بیضوی معرفی می‌نمایند و آنها نیز به نوبه

خود یک مفهوم مناسبی از ارتفاع نقاط هستند. ارتفاع ژئوئید از سطح بیضوی نیز به عنوان ارتفاع ژئوئید<sup>۱</sup> تعریف می‌شود. سومین سطح صفر به نام سطح متوسط آبهای آزاد (M.S.L) نام دارد، که ارتفاع نقاط بالای آن به ارتفاع تراز یا آنچه که از نظر عامه مرسوم است، به نام ارتفاع نامگذاری شده است. سطح ژئوئید و سطح متوسط آبهای آزاد، کاملاً بر همدیگر منطبق نمی‌باشند، هرچند که در بسیاری از کاربردهای عملی علم ژئودتیک از لحاظ مفهوم به عنوان یک سطح مشابه در نظر گرفته می‌شوند. با اشاره به کتاب بامفورد<sup>۲</sup> چاپ سالهای ۱۹۸۰ الی ۱۹۸۴ می‌خوانیم، به دلیل ابهامی که در مورد سطح متوسط آبهای آزاد وجود دارد، این سطح به علت وجود جذر و مد زمین دقیقاً نمی‌تواند یک سطح هم پتانسیل به شکل ژئوئید با تغییرات متناوب زمانی باشد. هر چند که مقدار این تغییرات از حدود ۱ الی ۲ متر بیشتر تجاوز نکند. مگر این که در عمل در مورد بعضی از مسائل ژئودتیکی مورد علاقه خودمان، تاثیر پدیده‌ی جذرومد را بر روی سطح متوسط آبهای آزاد ناچیز فرض نماییم. در آن صورت می‌توان به جای ژئوئید از سطح متوسط آبهای آزاد به عنوان یک سطح تراز صفر استفاده نمود. البته انجام این عمل به عنوان یک نگاه رضایتمندانه به قضیه تعریف ارتفاع نقاط است.

همان طور که در ژئودزی مقدماتی معلوم شده، ارتفاع بیضوی یک نقطه در واقع جمع دو مؤلفه است. یکی مؤلفه ارتفاعی ژئوئید از بیضوی و دیگری مؤلفه ارتفاع ارتومتریک نقطه مزبور است. این تعریف از ارتفاع بیضوی (ژئودتیک) به خودی خود بسیار ساده و درست است. اما این درستی و سادگی معمولاً در عمل به وسیله موانع و مشکلات مختلف از بین می‌رود. به عنوان مثال، یکی از این موانع را می‌توان ارتفاعات بالای سطح دریاها یا آزاد عنوان نمود. زیرا منظور از ارتفاع بالای سطح دریا، در واقع ارتفاع به دست آمده از طریق ترازبایهائی مستقیم زمینی است، که دقیقاً و به ندرت



سیستم کنترل ارتفاعی قابل نمایان هستند. بنابراین به راحتی مشاهده می‌شود که دقت و اعتبار مقیاس شبکه‌های ارتفاعی نه تنها به مقیاس اندازه‌گیریهای فاصله، بلکه به دقت و اعتبار ارتفاعات نیز بستگی دارد.

### ● ترکیب شبکه‌های زمینی با موقعیت نقاط داپلر

حال اجازه بدهید که به شبکه ژئودتیک زمینی مورد نظر تعدادی نقاط داپلر نیز بیفزاییم، و اگر مشاهدات ژئودتیک زمینی هم تنها شامل زوایا باشند (بدون وجود طولها و آزیموتها) در آن صورت نیز کاربرد این مشاهدات یک راه‌حل ریاضی، برای تمامی نقاط شبکه ارائه می‌دهد. در این حالت، این احتمال وجود دارد که به آسانی ما فریب این باور را بخوریم که موقعیت نقاط ناشی از سیستم داپلر به تنهایی می‌تواند مقیاس شبکه را معرفی نماید. اما در واقع مقیاس شبکه‌های زمینی تنها بستگی به مقیاس نقاط داپلر نداشته، بلکه به مقیاس اندازه‌گیریهای فاصله و اعتبار ارتفاعات فرض شده‌ی تمامی نقاط شبکه نیز بستگی دارد. مقیاس ارائه شده توسط موقعیتهای داپلر نمی‌تواند در جهت افقی باشد بلکه تنها در امتداد قائم نقطه به سمت بالا و پائین معرفی می‌گردد. در چنین حالتی از شبکه‌های ژئودتیک، فقط طول و عرضهای ژئودتیک ناشی از موقعیتهای داپلر مفید هستند. در حالی که ارتفاعات ژئودتیک داپلر از اهمیت کمی برخوردار می‌باشند. لذا سیستم داپلر فقط زوایای بین تمامی طولهای ناشی از موقعیتهای داپلر را ارائه می‌دهد. بنابراین چیزی از مقیاس بیان نمی‌کند. این وضعیت مشابه مسئله مربوط به مثلثهای کروی است. جایی که اضلاع مثلثهای کروی نه به صورت طول بلکه به صورت زاویه بیان می‌شوند. در آنجا شعاع کره زمین به عنوان مقدار واحد طول معرفی می‌گردد. بنابراین چنانچه فقط مقیاس را برای کره به صورت معرفی یک مقدار عددی جهت شعاع آن در نظر بگیریم در آن صورت اضلاع مثلثهای کروی فوق می‌توانند برحسب واحد طول بیان شوند. معمولاً موقعیت نقاط واقع بر کره برحسب زوایای بیان می‌شوند، همانند مختصات میل و بعد یک نقطه‌ی اختیاری بر روی کره سماوی که در نجوم ژئودزی به کار برده می‌شود. در حقیقت در سرشکنی سطح مبنای NAD-83 ارتفاعات داپلر به عنوان مشاهدات به کار برده شده‌اند. اما پس از سرشکنی از آنها صرف‌نظر شده است، این عمل تنها جهت راحتی در به کارگیری داده‌ها انجام پذیرفته است، و تأثیری مشابه حالتی که در ارتفاعات فوق به کار برده شده، بر روی نتایج سرشکنی نخواهد داشت.

می‌توان آنها را به عنوان ارتفاعات ارتومتریک محسوب نمود. از طرف دیگر ارتفاعات بالای سطح بیضوی را می‌توان ارتفاعات به دست آمده از طریق ترازپایی مثلثاتی محسوب نمود. به شرط آن که فاصله ترازپایی کوتاه، و زاویه قائم با دقت خاص اندازه‌گیری شده باشند. در سایر شرایط، ممکن است ارتفاعات به دست آمده از این روش کاملاً بی‌دقت باشند. از طرف دیگر به دست آوردن ارتفاع دقیق ژئوئید از سطح بیضوی کار بسیار مشکلی است. تمامی این عوامل تأثیر نامطلوب بر روی ارتفاعات داشته و باعث می‌گردند که ارتفاعات به دست آمده از طریق روشهای زمینی و در مقایسه با اختلاف ارتفاعات به دست آمده از طریق سیستمهای فضائی GPS و VLBI، مقادیر تقریبی از ارتفاعات را ارائه نمایند. همان طوری که بعدها نشان داده خواهد شد، سیستم ارتفاعات دوگانه بر این مشکلات غلبه خواهد نمود. یک ارتفاع دوگانه از یک نقطه در حقیقت بدان معنی نمی‌باشد که نقطه مورد نظر مکان و موقعیت متفاوتی را در فضا اشغال می‌نماید، بلکه در یک زمان به دو ارتفاع متفاوت از دو سطح صفر اشاره خواهد نمود. به طوری که، یکی از آن دو ارتفاع معمولاً تقریبی و دیگری به طور یقین دارای دقت بالاتری است. این دو ارتفاع را در هنگام کاربرد نباید هرگز با یکدیگر معاوضه و جایگزین نمود. زیرا این امر موجب اعوجاجهای موضعی و یا جهانی در شبکه‌های ژئودتیک می‌شود. اگر هر دوی آن ارتفاعات را بتوان با دقت یکسان به دست آورد. در آن صورت آنها بر روی یکدیگر منطبق میشوند. بنابراین دیگر نیازی به کاربرد سیستم ارتفاعات دوگانه نیست. اما با روشهای اندازه‌گیری مرسوم فعلی نمی‌توان به این هدف نایل شد.

### ● ارتفاعات در یک شبکه ژئودتیک زمینی

یک شبکه‌ی ژئودتیک شامل مشاهدات زمینی (آزیموت، طول، زاویه) را در نظر بگیرید، برای سرشکنی این شبکه نیازمند به ارتفاع بیضوی تمامی نقاط شبکه هستیم. در مورد سطح مبنای NAD-83<sup>۲</sup> به وسیله ترازپایی (یا به روش مستقیم یا به روش مثلثاتی) و معلوم بودن ارتفاع تقریبی ژئوئید از بیضوی، ارتفاع بیضوی تمامی نقاط شبکه سطح مبنای NAD-83 به دست آمده است. اگرچه در سیستمهای کنترل ارتفاعی، رابطه صریحی جهت تبدیل طولهای مایل به افق وجود ندارد. (به منابع Vincenty 1980, 1982 و یا Steeves 1984 مراجعه شود). بنابراین جهت اجرای اهداف ژئودتیک، بهتر است تصور شود که چنین روابط صریحی موجود است. لذا خطای فواصل تبدیل شده به وسیله روابط فوق، ناشی از خطای ارتفاعات یا به عبارتی جمع خطای ارتفاع از سطح دریا و ارتفاع ژئوئید است. این خطاها می‌توانند به دو قسمت عمده تقسیم شوند. اولین و مهمترین قسمت خطا در واقع وابسته به خطای موجود در ارتفاع متوسط نقاط انتهایی طول مایل مورد نظر است، که مقدار آن حدود 0.16 ppm در متر اندازه‌ی خطای ارتفاع است. دومین قسمت از خطای فوق بستگی به خطای موجود در اختلاف ارتفاعات ترازپایی و میل خطوط تراز (عدم توازی سطوح تراز) دارد. به این مطلب در کتاب Vincenty 1986 صفحه ۲۲۸ اشاره شده است. این خطا در روی تمامی خطوط تراز بسیار کوچک است، به دلیل آن که این خطوط تقریباً افقی می‌باشند. خطاهای فوق به خوبی در یک

## ● ترکیب شبکه‌ها با دیگر سیستم‌های فضایی تعیین موقعیت

حال در نظر بگیرید، برداری‌های سه‌بعدی حاصل از سیستم‌های GPS و VLBI و غیره نیز در شبکه ژئودتیکی مورد نظر موجود باشند. در آن صورت وضعیت به طور ظاهری پیچیده می‌شود، زیرا ارتفاعاتی که برای مشاهدات زمینی شبکه به دست می‌آیند معمولاً خام هستند. و تصور می‌شود که آنها دقت کافی جهت کاربرد در شبکه را دارا هستند. اما این گونه ارتفاعات معمولاً با مشاهدات بسیار دقیق سیستم VLBI ناسازگار هستند. بنابراین مجبور نمودن بردارهای VLBI جهت منطبق شدن با ارتفاعات زمینی ثابت شده، موجب تخریب استحکام هندسی و دقت شبکه VLBI می‌شوند. البته در اینجا ممکن است بیان شود که این عمل تأثیر ناچیزی بر روی موقعیتهای افقی خواهد داشت، اما حقیقتی که باقی می‌ماند این است که، بردارهای VLBI باقیمانده‌های بزرگتری را نسبت به مقادیر برآورد شده اولیه تصاحب می‌نمایند. این امر موجب افزایش خطای استاندارد وزن واحد (فاکتور واریانس ثانویه) و نابودی داده‌های آماری می‌گردد. این روش دسترسى اصولاً یک امر غیرقابل قبول است. بنابراین جهت تمامی نقاط یا بردارهای سه‌بعدی مشاهده شده ما نیازمند به یک سیستم ارتفاعی دوگانه هستیم.

## ● اجرای مفهوم ارتفاع دوگانه

همان طوری که قبلاً به طور اساسی بیان گردید، مقیاس سیستم‌های فضایی، به وسیله روش VLBI تعیین می‌شود. و این سیستم یک درجه بهتر از سیستم داپلر می‌باشد. سرانجام (National Geodetic Survey) یا NGS تصمیم گرفت تا خلاف واقعیت فوق عمل نماید. بدان معنی که اندازه‌گیریهای سیستم VLBI را مجبور نمود تا مقیاس سیستم داپلر را همراه با کاهش دقت حدود 0.1 ppm پذیرا باشند. این عمل از نظر تئوری صحیح است. زیرا هر مقیاسی را برای اندازه‌گیریهای شبکه می‌توان انتخاب نمود. اما این روش در عمل و در واقعیت، مقیاس سیستم VLBI را تا حدود -0.075 PPM تغییر می‌دهد. این عمل باعث منقبض شدن شبکه ژئودتیکی و کاهش حدود ۳۰ سانتیمتر (در مقایسه با آنچه که مستقیماً از روشهای اندازه‌گیری دقیق حاصل می‌شود) در فاصله مستقیم بین سواحل شرقی - غربی کشور آمریکا گردید. و چون سیستم ارتفاعی دوگانه جهت شبکه ژئودتیکی مزبور مورد استفاده واقع گردید، لذا این تغییر مقیاس هیچ گونه تأثیری بر روی مقیاس فواصل اندازه‌گیری شده به روشهای زمینی نداشت.

در اجرای واقعی سیستم ارتفاعی دوگانه اگر یک اندازه‌گیری به طور کامل جزو مشاهدات زمینی همانند امتداد، آزیموت، و یا طول باشد در آن صورت مجهولات در دو انتهای خط اندازه‌گیری، فقط شیفتهای افقی مختصات هستند. در حالی که در مورد ارتفاعات دو نقطه انتهایی خط اندازه‌گیری این چنین نیست. و مقادیر آنها قبلاً از طریق اندازه‌گیری زوایای قائم، ترازبایی و ارتفاع ژئوئید محاسبه و ثابت شده‌اند. اگر مشاهدات ما، بردارهای سه بعدی ناشی از سیستم VLBI، داپلر<sup>۱</sup> و یا روشهای زمینی باشند، در آن صورت ارتفاعات نیز جزو مجهولات هستند. در این حالت شیفتهای افقی مختصات

به عنوان عامل وجه اشتراک با سیستم زمینی معرفی می‌شوند. بردارهای سه‌بعدی روشهای زمینی در واقع همان بردارهای مشتق شده از اندازه‌گیریهای زمینی (طول - آزیموت - امتداد و زاویه قائم دقیق) بر روی فواصل کوتاه مجاور چند ایستگاه VLBI هستند. که جهت اتصال داده‌های سه‌بعدی سیستم فضایی VLBI به مابقی شبکه ژئودتیکی مزبور در حقیقت مشاهده می‌شوند. این بردارها از طریق سرشکنیهای محلی نقشه برداری<sup>۲</sup> به دست می‌آیند، تمامی آنان در یک سرشکنی کلی و هم‌آهنگ از ارزشی مشابه برخوردار می‌گردند، در حقیقت تعداد نقاط کمی در سطح مبنای NAD-83 موجود هستند، که به وسیله آنها می‌توان ارتفاعات دوگانه را تعیین نمود. لذا جهت این عمل فقط ایستگاههای VLBI و نقاط مجاور با آنها را مقایسه نمودند. این نقاط مجاور ممکن است جزو نقاط داپلر باشند یا ممکن است نباشند. این نقاط در حالت سه بعدی به یک دیگر و شبکه VLBI متصل هستند.

اکثر ایستگاههایی که توسط مشاهدات داپلر محصور شده‌اند، نمی‌توانند آن چنان به یکدیگر مرتبط باشند. لذا ارتفاعات آنها نهایتاً بی تأثیر باقی می‌ماند. اساس ارتفاعات دوگانه ممکن است به چندین طریق جهت مسائل فزاینده تراکم‌سازی<sup>۳</sup> شبکه‌های ژئودتیکی ارتفاعی و افقی توسط سیستم‌های GPS و اندازه‌گیریهای زمینی به اجراء درآیند. در این کاربردها، استفاده از پارامترهای انحراف<sup>۴</sup> که از طریق سرشکنی تولید می‌شوند یک امر اساسی است. مخصوصاً این پارامترها در زمینه تعیین ارتفاعات از سطح دریاهای آزاد (همان ارتفاعات مرسوم در بین عامه) از اهمیت بسیاری برخوردار هستند. □

## منابع

- بافورد، جی، ۱۹۸۰: ژئودزی، چهارمین تصحیح، چاپ دانشگاه آکسفورد.
- استیوز، آر.آر، ۱۹۸۴: مدلهای ریاضی جهت استفاده در سرشکنی مجدد شبکه‌های ژئودتیکی آمریکای شمالی، گزارش تکنیکی شماره ۱، نقشه برداری ژئودتیکی کانادا.
- وینستی، تی، ۱۹۸۰: سرشکنی کنترلهای ارتفاعی سه‌بعدی شبکه‌های افقی، بولتن ژئودزی، فصل ۵۴، شماره ۱ از صفحات ۲۷ الی ۴۳.
- وینستی، تی، ۱۹۸۲: روشهای سرشکنی داده‌های سیستم‌های فضایی و اندازه‌گیریهای زمینی، بولتن ژئودزی فصل ۵۶، شماره ۲، از صفحات ۲۳۱ الی ۲۴۱.
- وینستی، تی، ۱۹۸۶: تصحیح هندسی خطوط اندازه‌گیری شده، کتاب نقشه برداری "SURVEYING, MAPPING" فصل ۴۶، شماره ۱، از صفحات ۲۲۵ الی ۲۲۹.
- وینستی، تی، کاربرد بردارهای GPS در سرشکنی تراکمی، کتاب "SURVEYING, MAPPING"، فصل ۴۷، شماره ۲، از صفحات ۱۰۳ الی ۱۰۸.

- |                 |                      |                  |
|-----------------|----------------------|------------------|
| ۱) Undulation   | 2) Bomford (1980,94) | 3) Datum         |
| 4) Doppler      | 5) Table top         | 6) Densification |
| 7) Trend & Bias |                      |                  |