

مقاله حاضر گزارش کاری است که توسط مؤلفان مقاله جهت نمایش نشست پوسته زمین در یکی از حوضه‌های نفتی ونزویلا از طریق ترکیب مشاهدات GPS با ترازبای دقیق^۲، صورت گرفته است. وسعت این منطقه ۰.۰۰۵ کیلومتر مربع می‌باشد. مدل ریاضی به کار برده شده، حاصل از روش دانشگاه نیوبرانسویک^۳ در تحلیل تغییر شکل^۴ از طریق مشاهدات ترکیبی GPS و ترازبای دقیق است. این گروه قبل از انجام پروژه حاضر، روش خود را در چند شبکه آزمایشی در کانادا (با اخلال ۰.۷ تا ۳ کیلومتر) با استفاده از گیرنده‌های

Adam Chrzanowski, Chen Yong-qj
Roger W. Leeman Julija Leal
ترجمه و تنظیم:
مهندس علیرضا آرموده اردلان

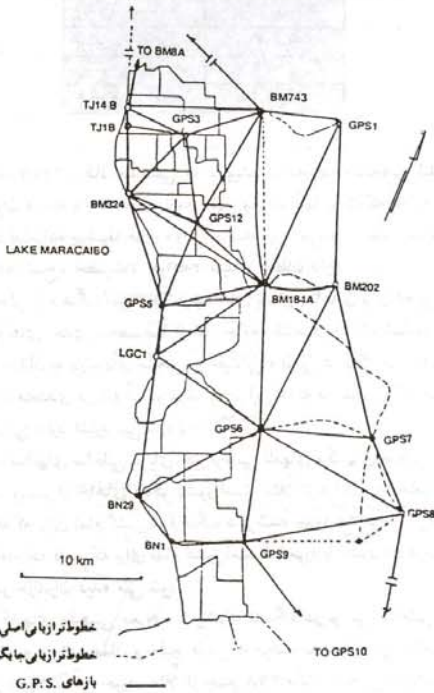
● (۱) درآمد

ترکیب اطلاعات GPS و ترازبای دقیق به منظور مطالعه در نشست زمین

در سال ۱۹۸۴ گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه نیوبرانسویک از طرف Maraven S.A. — یک شرکت نفتی در ونزویلا — دعوت به مطالعه تغییر شکل زمین در حوضه‌های نفتی شرق ساحل دریاچه Maracaibo گردید. به خاطر استخراج نفت، منطقه‌ای به وسعت ۰.۰۰۵ کیلومتر مربع در حال نشست بود، نشتی که مقدار آن در بعضی مناطق به ۲ سانتیمتر در سال می‌رسید. مطالعه در مورد نشست این منطقه از سال ۱۹۲۹ به کمک یک شبکه ترازبای دقیق متشکل از ۱۹۰ پنج مارک^۵ و اتصال این شبکه با بازوهای بلند — در حد ژئودزی درجه یک — به نقاطی در خارج منطقه در حال نشست آغاز گردیده بود. انجام عملیات ترازبای در این منطقه همواره کاری کند، گران و طاقت فرسا بوده، به طوری که ترازبای کل منطقه به سه گروه، نیازمند دو تا سه ماه کار مداوم است. حجم کار هنگامی روشن می‌گردد که بدانید، ترازبای کل شبکه هر دو سال و بعضی از شبکه — به وسعت یکسوم کل آن — هر شش ماه یک بار لازم به تکرار است.

در اوایل سال ۱۹۸۶، در بررسی که برای یافتن روشی اقتصادی تر صورت گرفت، UNB^۶ استفاده از GPS برای مطالعه نشست پیشنهاد نمود. در این بررسی برآورد گردید که اگر شبکه اصلی ترازبای و بازوهای اتصال دهنده شبکه به نقاط پایدار، با یک شبکه ترکیبی از GPS و ترازبای های درجات پایین — به منظور تراکم سازی شبکه — جایگزین گردد، صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان و هزینه ایجاد خواهد شد. با این همه، قبل از بازنگری GPS، لازم بود بررسیهای گسترده‌ای در مورد دقت قابل حصول آن در آب و هوای گرم و مرطوب منطقه صورت گیرد. به علاوه، می‌بایست مدلی ریاضی نیز برای ترکیب اندازه گیریهای GPS با ترازبای ابداع می‌گردید.

اولین اندازه گیریهای آزمایشی در سالهای ۱۹۸۶ و ۱۹۸۷ بر روی شبکه‌ای که توسط UNB، در نزدیکی فردریکتون^۷ واقع در نیوبرانسویک کانادا ایجاد گردیده بود، انجام گرفت. در این آزمایش‌ها سه نوع گیرنده Magnovox WM 101 و Trimble 4000 SX و Texas Instrument TI 4100 Wild/ مورد بررسی قرار گرفتند. دو عملیات با WM 101 و یک عملیات با هر یک از گیرنده‌ها صورت گرفت. این عملیات تأمین کننده اطلاعات سودمندی در خصوص دقت قابل حصول در آب و هوای معتدل بهاری و پاییزی کانادا بودند. برآورد دقت و مدل خطا از تئوری MINQUE^۸ استخراج گردید — (۲) و (۳). در بهار ۱۹۸۷، یک نقشه برداری آزمایشی در بخشی از شبکه ماراون^۹ در ونزویلا، به کمک گیرنده‌های WM 101 صورت گرفت (نگارم^{۱۰}). همین عملیات شش ماه بعد نیز تکرار گردید. بررسیهای اولیه بر روی دو عملیات انجام شده دقت GPS را در ونزویلا کمتر از کانادا نشان دادند. این کاهش دقت معلول آب و هوای گرم و مرطوب است، که موجب افزایش اثرات جوی بر مشاهدات می‌گردد. با وجود آنکه دقت نتایج کمی کمتر از میزان پیش بینی شده بود، در بهار ۱۹۸۸ استفاده کامل از GPS در منطقه مورد نظر در ونزویلا آغاز گردید. تمام بازوهای GPS



نگاره ۱: ترازبای اولیه و شبکه تسمین جابجایی با GPS.



Trimble 4000SX و WM 101 و TI 4100 و در بخشی از شبکه ونزولا با بکارگیری گیرنده های WM 101 مورد بررسی و آزمایش قرار داده بودند. برای برآورد دقت از روش MINQUE مقایسه نشست تعیین شده با GPS و از طریق ترازبانی دقیق، استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که با گیرنده های C/A کد و ترکیب هندسی ماهواره ها در زمستان ۹۸، می توان مؤلفه ارتفاعی (h) را در بازهای کوتاه و متوسط (طولهای تا حداکثر ۳ کیلومتر)، در شرایط آب و هوایی مناسب به دقت ۵ میلی متر، و در هوای گرم و مرطوب به دقت ۳ میلی متر به دست آورد.

(نکته ۱) موجود در آن عملیات از طریق ترازبانی دقیق به هم متصل شدند، تا بتوان ارتفاع نسبی دقیق آنها را تعیین کرده و در عملیات آینده - که در آنها تنها از ترازبانی برای مترکم ساختن شبکه GPS استفاده خواهد شد - به عنوان شبکه مبنا استفاده کرد. در عملیات ۹۸، از بانهای مجهز به وسایل هواشناسی برای تعیین بروفیلهایی از جو منطقه استفاده گردید. در بخشهای بعدی مقاله به تعدادی از نکات مهم مطالعه نشست با GPS و خلاصه ای از نتایج شبکه های UNB و ماراون پرداخته خواهد شد.

۲) اختلاف ارتفاع حاصل از G.P.S.

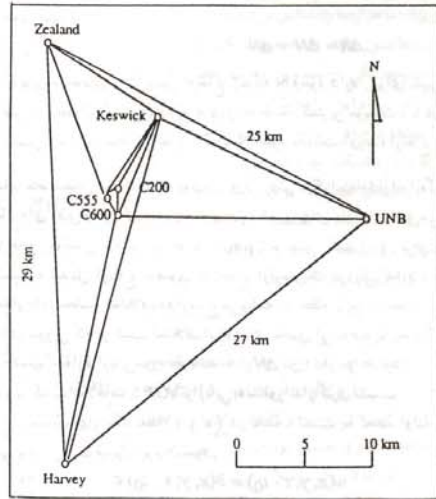
۲/۱) منابع خطا

دقت اختلاف ارتفاع حاصل از GPS بستگی به توزیع هندسی ماهواره های مشاهده شده و کیفیت مشاهدات دارد.

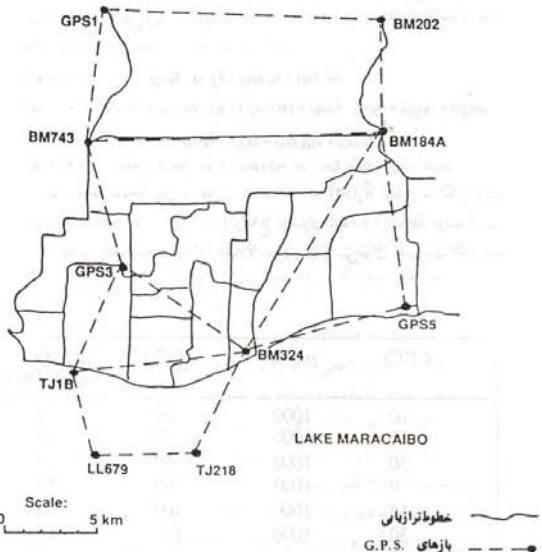
خطای مشاهدات را می توان ناشی از سه منشأ دانست: خطاهای مربوط به ماهواره، (عمدتاً خطاهای مداری) خطاهای گیرنده، مانند multipath، تغییر در مرکز فاز گیرنده، نویزهای گیرنده، خطای در انتشار امواج، انکسار یونسفریک و تریوسفریک. اثر خطای مداری بر روی بازهای GPS، تقریباً متناسب با طول باز است. اکثر خطاهای مربوط به گیرنده مستقل از طول باز بوده، و در نتیجه، اثر آنها بر روی بازهای کوتاه بازرزتر است. اثرات یونسفریک و تریوسفریک، اگر چه در مشاهدات تقاضایی "تا حدی کاهش می یابند، اما به هر حال از منابع خطرناک خطا به شمار می روند؛ در بازهای کوتاه، انکسار تریوسفریک ممکن است تاثیر عمده ای بر دقت باز اندازه گیری شده، خاصه اختلاف ارتفاع (مؤلفه ارتفاعی) پدید آورد.

اثر انکسار تریوسفریک را می توان با اعمال تصحیحات حاصل از مدل Hopfield یا Saastamoinen تا حدی حذف نمود. دقت تصحیحات نیز به نوبه خود معلول عوامل مختلفی است. به عنوان مثال خطای وسایل اندازه گیری شرایط جوی باعث ایجاد انحراف در دما، فشار و رطوبت ثبت شده می گردد. جدی ترین مسئله آن است که شرایط جوی اندازه گیری شده مربوط به سطح زمین در مجاورت ایستگاهها بوده و بنابراین، نشان دهنده خصوصیات جوی در طبقات بالا نمی باشند. این خطا به صورت تقاضل خطا، در اندازه گیری شرایط جوی بین دو ایستگاه بر روی اختلاف ارتفاع اندازه گیری شده اثر گذاشته، باعث انحراف آن می گردد. بدین خاطر در عمل، توصیه می گردد که از وضعیت جوی متوسط محیط، به صورت یکسان، برای کل شبکه، به جای مقادیر مشاهده شده شرایط جوی، استفاده گردد. جدول (۱) اثر دما (T)، فشار (P) و رطوبت نسبی (H) را بر طول سمت الراسی* نشان می دهد. این مقادیر از مدل Hopfield محاسبه گردیده اند.

همان گونه که نتایج نشان می دهند، اثر خطای در اندازه گیری شرایط جوی، در آب و هوای گرم و مرطوب بازرزتر می گردد. به عنوان مثال هنگامی که $T = 30^{\circ}C$ و $H = 100\%$ باشد تنها وجود ۱٪ خطا در اندازه گیری رطوبت نسبی ۳.۸mm خطا در طول سمت الراسی ایجاد می کند، که بر حسب چگونگی توزیع هندسی



نگاره ۱- شبکه آزمایشی UNB



نگاره ۲- بخش آزمایشی شبکه ماراون

ماهورها، می‌تواند 8mm تا 25mm در مؤلفه ارتفاعی حاصل خطا پدید آید. عامل دیگری که بر دقت تصحیحات اثر می‌گذارد، کاسل نبودن مدل تریوسفریک مورد استفاده است. مدل‌های Hopfield و Saastamoinen بر پایه پروقیل عمودی تقریبی از شرایط جوی بنا نهاده شده‌اند. این پروقیل تقریبی برای مؤلفه خشک انکسار صادق بوده و در مورد مؤلفه تر آن دارای خطای بسیار است.

مؤلفان مقاله، در حوزه نفی ماراون و ونزولا با استفاده از ابزار نصب شده در بان آزمایشگاهی را جهت تعیین پروقیل از شرایط جوی در لایه‌های با تین جو ترتیب دادند. در این آزمایشها شرایط جوی در ارتفاعات مختلف تا ارتفاع ۱۰۰ متر اندازه‌گیری شد. نگاره ۳ و مقایسه‌ای بین تغییرات ضرایب انکسار بر اساس اطلاعات جوی ثبت شده، در دو ایستگاه مختلف، و ضرایب مشابه حاصل از مدل Hopfield است. همان‌گونه که در این نگاره ملاحظه می‌گردد، مؤلفه خشک انکسار به خوبی با مدل Hopfield مطابقت دارد. در حالی که، مؤلفه تر دارای تفاوت آشکار و فاحش است. برای به‌نمایش گذاشتن میزان اثر این مسئله، یکی از ایستگاه‌های شبکه آزمایشی ماراون (در نگاره ۳، با BM 184A - BM 743)، که در سه عملیات مختلف مشاهده شده بود، با دو مدل اتسفریک تصحیح گردید.

این دو مدل عبارت‌اند از: مدل Hopfield، و مدلی که در آن مؤلفه تر ارتفاع ۳ کیلو متر ثابت مانده و پس از آن مطابق مدل Hopfield کاهش می‌یابد. برای مؤلفه ارتفاعی باز مورد نظر، در عملیات اول تا سوم به ترتیب اختلاف‌های ۱، ۳، و ۷ میلی‌متر به دست آمد.

انحرافات مختصات افقی ایستگاه‌های ثابت در محاسبه بارها نیز منشاء خطای دیگر برای اختلاف ارتفاعها به‌شمار می‌روند. این خطا مانند خطای در امتداد مسیر ۱ و خارج از صفحه ۱' مدار ماهوره متناسب با طول بازو ستار از توجیه باز می‌باشد (۱). باز ۱' از GP.S. 1 - BM 184a - (نگاره ۳)، با طول ۱۲/۱ کیلو متر و آزیموت 27° 41 در شبکه ماراون، در یک سری محاسبات ساختمانی به کار برده شد. هنگامی که مختصات ایستگاه ثابت این باز ۱۰۰ متر در جهت شمال - جنوب و پس از آن به همین اندازه در جهت شرق - غرب تغییر داده شد، اختلاف ارتفاع حاصل به ترتیب 0.126mm و 0.88mm تغییر یافت.

با وجود آنکه تمامی منابع خطای موجود در اندازه‌گیری GP.S. و تأثیرات آنها بر اختلاف ارتفاعها هنوز کاملاً شناخته شده نیست، دقت اختلاف ارتفاع حاصل از GP.S. را می‌توان به فرم کلی زیر نوشت:

$$\sigma_{\Delta h}^2 = a^2 + b^2 s^2 \quad (2/1)$$

که در آن S طول باز بوده و مقادیر a و b بستگی به نوع گیرنده، چگونگی و کیفیت مشاهدات، وضعیت هندسی ماهورها، زمان مشاهده، روش پردازش اطلاعات و مدل تریوسفریک به کار برده شده دارند. مقادیر a و b را، در صورت

و بود درجه آزادی کافی، می‌توان به روش برآورد می‌نیمج مربع نرم ۱۳ برآورد کرد.

۲/۲ تفاوت ارتفاع بیضوی با ارتفاع ارتومتریک

تعیین باز GP.S. به صورت کلاسیک هندسی صورت می‌گیرد، و نتیجه آن اختلاف ارتفاع بیضوی Δh است که با اختلاف ارتفاع ارتومتریک ΔH تفاوت می‌کند. ارتفاع ارتومتریک دارای مفهوم فیزیکی بوده، و در پروژه‌های مهندسی غالباً از آن استفاده می‌گردد. این دو کمیت با از طریق ارتفاع ژئوئید نسبی ΔN می‌توان به هم ارتباط داد.

$$\Delta h = \Delta H + \Delta N \quad (2/2)$$

روشهای متعددی برای تعیین ارتفاع ژئوئید N وجود دارد. برای تعیین مقدار دقیق و منطقی آن می‌توان رویه‌ای را به طریقه‌ی کمترین مربعات، با در اختیار داشتن تعدادی نقاط با ارتفاع ژئوئید N معلوم به دست آورده، ارتفاع ژئوئید

سایر نقاط منطقه را به کمک آن به دست آورد. روش دیگر استفاده از اندازه‌گیریهای جاذبه‌ای دقیق و متر اکم است. گفته می‌شود که روشهای جاذبه‌ای دقیق می‌توانند ارتفاع ژئوئید را با دقتی در حد ± 2 ppm تعیین کنند (۵). برای نمایش نشست، تبدیل ارتفاع بیضوی به ارتفاع ارتومتریک ضرورتی ندارد، چرا که مقدار N در محاسبه اختلاف دوارتفاع مربوط به دو لحظه از زمان، حذف می‌گردد. اما در صورتی که ترکیب اختلاف ارتفاعهای حاصل از GP.S. با اندازه‌گیریهای به دست آمده از ترازیابی مورد نظر باشد مقدار ΔN مورد نیاز خواهد بود.

۳ ترکیب اطلاعات GP.S. با ترازیابی به منظور اندازه‌گیری نشست

نشست (W) یک نقطه (x و y) در لحظه ۲ نسبت به لحظه اولیه t_0 را می‌توان در قالب فرمول زیر بیان نمود.

$$w(x, y; t - t_0) = b(x, y; t - t_0) c \quad (3/1)$$

در رابطه فوق b بردار خامی از چند تابع پایه، و c بردار ضرایب مجهول است. اختلاف ارتفاع حاصل از GP.S. ($\Delta h_{ij}(t)$) و اختلاف ارتفاع به دست آمده از ترازیابی ($\Delta H_{ki}(t)$) می‌توانند با i و j برابر باشند) با مدل تغییر شکل (۳/۱) بدین صورت ارتباطی پیدا می‌کنند:

$$\Delta h_{ij}(t_0) + v_{ij}(t_0) = \hat{h}_j(t_0) - \hat{h}_i(t_0) \quad (3/2 a)$$

$$\Delta h_{ij}(t) + v_{ij}(t) = \hat{h}_j(t) - \hat{h}_i(t) + [M(x, y; t - t_0) - M(x, y; t - t_0)] c \quad (3/2 b)$$

$$\Delta H_{ki}(t_0) + v_{ki}(t_0) = \hat{h}_i(t_0) - \hat{h}_k(t_0) - (M_1 - M_2) \quad (3/2 c)$$

$$\Delta H_{ki}(t) + v_{ki}(t) = \hat{h}_i(t) - \hat{h}_k(t) + [M(x, y; t - t_0) - M(x, y; t - t_0)] c \quad (3/2 d)$$

در روابط صفحه قبل «خطای مشاهدات»، و $\hat{h}_i(t_0)$ مقدار سانگین (با expected value) ارتفاع بیضوی نقطه i در لحظه اولیه است. ارتفاع ژئوئید N موجود در معادلات (۳/۲) را می‌توان به صورت یک چند

جدول ۱ اثر خطای اندازه‌گیری پارامترهای جوی بر روی طول سمت‌الرأسی

T (°C)	p (mb)	H (%)	d p/dp (mm / mb)	dp/dT (mm / c)	dp/dH (mm / %)
0	1000	50	2.3	2.3	0.8
15	1000	50	2.3	5.0	1.7
30	1000	50	2.3	9.8	3.8
0	1000	100	2.3	4.5	0.8
15	1000	100	2.3	9.9	1.7
30	1000	100	2.3	19.6	3.8

جمله‌ای نوشت.

$$N(x, y) = g(x, y) e \quad (۳/۳)$$

که در آن g بردار خاصی از توابع پایه و e بردار ضرایب مجهول است. معادله این چند جمله‌ای، به عنوان مثال، هنگامی که می‌خواهیم صفحه‌ای را بر N ‌های معلوم میزان کنیم به صورت زیر خواهد بود:

$$N(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (۳/۴)$$

محاسبه ضرایب مجهول معادلات (۳/۳) و (۳/۴) نیاز به در اختیار داشتن ارتفاع ژئوئید دارد، که آنها را می‌توان از تفاضل ارتفاع حاصل از $G.P.S$ و ترازبانی در نقاط مشترک به دست آورد. در صورتی که به جای ارتفاعهای مطلق، اختلاف ارتفاعها را در اختیار داشته باشیم، که عملاً هم اکثرآ به همین نحو است. امکان محاسبه ضرایب $G.P.S$ در معادله (۳/۴) وجود نخواهد داشت. بیان ارتفاع ژئوئید به صورت یک چند جمله‌ای، امکان تبدیل ارتفاع بیضوی حاصل از $G.P.S$ را به ارتفاع اوتومتریک، برای کلیه نقاط، فراهم می‌آورد.

با جایگزین کردن معادله (۳/۳) در معادلات (۳/۲) و (۳/۲) خواهیم داشت:

$$\Delta h_{ki}(t_i) + v_{ki}(t_i) = \hat{h}_i(t_i) - \hat{h}_i(t_0) - (g(t_i, y_i) - g(t_0, y_i)) e \quad (۳/۵)$$

$$\Delta h_{ij}(t_i) + v_{ij}(t_i) = \hat{h}_i(t_i) - \hat{h}_i(t_0) - (g(t_i, y_i) - g(t_0, y_i)) e + (g(t_i, y_i) - g(t_0, y_i)) e \quad (۳/۵')$$

اگر تغییرات زیادی در مورد ارتفاع ژئوئید، بین دو لحظه مشاهده^۴ انتظار رود، می‌بایست در مدل (۳/۳) فاکتور زمان را نیز وارد کرد.

در بسیاری از موارد عملی، تعیین سرعت نشست نقاط مورد نیاز است. در نتیجه فرمول تغییر شکل در نقطه^۵ به صورت زیر درخواهد آمد:

$$w(x_i, y_i; t - t_0) = (t - t_0) \dot{h}_i \quad (۳/۵)$$

که در آن \dot{h}_i سرعت نشست نقطه^۵ است.

اگر کل مشاهدات صحرائی - اندازه‌گیریهای $G.P.S$ با ترازبانی - را بتوان در فاصله زمانی کوتاهی انجام داد - در مدت زمانی که در آن نشست ملموس نباشد - لازم است سرشکنی شبکه نیز انجام گیرد، تا بدین ترتیب هم بتوان مشاهدات اشتباه را تشخیص داده و هم بتوان برآوردی از خطا بدست آورد. در صورت وجود چنین امکانی، ارتفاعهای سرشکن شده همراه ماتریس واریانس - کوواریانس مربوطه وارد محاسبات تغییر شکل ترکیبی - ترکیب مشاهدات $G.P.S$.

و ترازبانی می‌گردند. ارتفاعهای سرشکن شده مثلاً ارتفاعهای بیضوی سرشکن شده^۸ - به صورت زیر در مدل تغییر شکل وارد می‌شوند:

$$h_i(t_0) + v_{hi}(t_0) = \hat{h}_i(t_0) \quad (۳/۶ a)$$

$$h_i(t) + v_{hi}(t) = \hat{h}_i(t_0) + b(x_i, y_i; t - t_0) c \quad (۳/۶ b)$$

بر اساس روابط فوق، ارتباط بین مشاهدات $(K+L)$ عملیات و مدل تغییر شکل را می‌توان به شکل ماتریسی زیر بیان داشت:

$$\begin{bmatrix} N(0) \\ N(1) \\ \vdots \\ N(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(0) \\ v(1) \\ \vdots \\ v(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & 0 & 0 \\ A_1 & G_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_k & G_k & B_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ c \\ c \end{bmatrix} \quad (۳/۷)$$

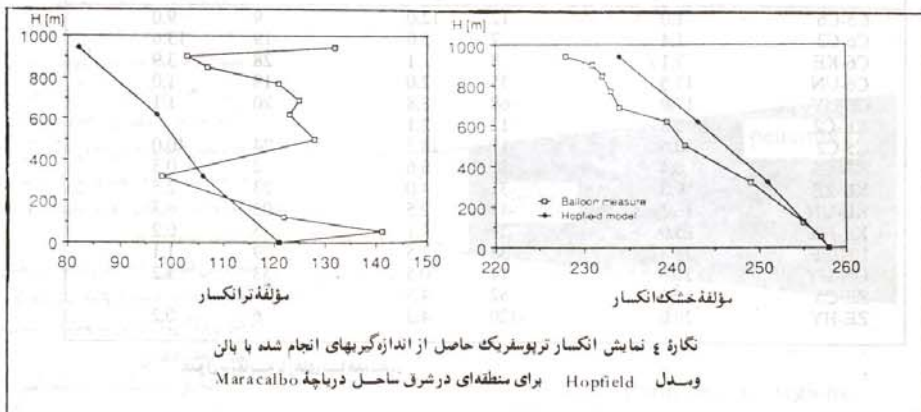
در معادله فوق $L_i(t_i)$ بردار مشاهدات در عملیات در عملیات i ام (که جایگزین $\Delta h_{ki}(t_i)$ و $\Delta h_{ij}(t_i)$ در معادله (۳/۲) است) و $v(t_i)$ بردار باقیمانده‌ها، \hat{h}_i بردار میانگین ارتفاعهای بیضوی در زمان اولیه (مشابه $h_i(t_0)$ در معادله (۳/۲) همان کمیتهایی هستند که قبلاً تعریف شده‌اند. ماتریسهای A_i و G_i و B_i حاوی ضرایب موجود در معادله (۳/۲) هستند. با اعمال قاعده کمترین مربعات به معادله (۳/۷)، می‌توان ضرایب c و c به همراه ماتریس واریانس - کوواریانس مربوطه برآورد کرد. پس از این مرحله می‌توان اعتبار مدل تغییر شکل را تست کرد. برای آگاهی از جزئیات روند تحلیل تغییر شکل مطالعه^۹ مآخذ^{۱۰} توصیه می‌گردد.

● (۴) نتایج حاصل از اندازه‌گیری نشست به کمک G.P.S.

۴/۱ شبکه آزمایش UNB

شبکه^{۱۱} آزمایشی UNB که قبلاً بدان اشاره شد (نگاره ۲)، از ۷ ایستگاه با فواصل ۷/ تا ۳۰ کیلومتر تشکیل شده است. در این شبکه سه عملیات زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت:

- عملیات WM86 - در اکتبر ۹۸، با گیرنده WM101^{۱۲}
- عملیات Trimble87 - در آوریل ۹۸، با گیرنده Trimble 4000sx^{۱۳}
- عملیات WM87 - اکتبر ۹۸، با گیرنده WM101^{۱۴}





۱۶ میلتر را برای اختلاف ارتفاع انتظار داشت.

۴/۴) نمایش نشست در حوزة نفتی ماراون

در حد فاصل آوریل ۱۹۸۷، تا آوریل ۱۹۸۸، سه عملیات نقشه برداری با G.P.S. در حوزة نفتی ماراون، واقع در ونزوئلا، با استفاده از گیرنده های WM 101 صورت گرفت. دو عملیاتی که ابتدا در آوریل ۱۹۸۷ و اکتبر ۱۹۸۸ انجام پذیرفت، چون جنبه آزمایشی داشت، تنها بر روی بخشی از شبکه ترازبانی شکل ۳ ترتیب داده شد. عملیات سوم - عملیات آوریل ۱۹۸۸ - که در واقع آغاز جایگزینی G.P.S. به جای ترازبانی سنتی بود، در کل منطقه نشست (نگاره ۱) صورت گرفت. در طراحی کلیه عملیات G.P.S. همزمانی آنها با ترازبانی سنتی در حال اجرای در منطقه رعایت گردید. در کلیه عملیات، مدت مشاهده بر روی هر ایستگاه ۲ ساعت بود. نکته قابل ذکر آن است که در انجام کلیه مشاهدات، ماهواره ها از توزیع هندسی ضعیفی برای تعیین مؤلفه ارتفاعی برخوردار بودند. به عنوان نمونه ای از چگونگی توزیع ماهواره ها در سه عملیات انجام شده، یک ترسیم قطبی از توزیع ماهواره ها در نگاره ۲ آورده شده است.

باقیمانده های سوسین عملیات به همراه حد قابل قبول خطای ترازبانی ($4\text{mm} \sqrt{1.5k}$)

در عملیات WM 86 و WM 87 پانزده باز با زمان مشاهده متوسط به ترتیب ۱/۲ و ۲/۰ ساعت مشاهده گردیدند. در عملیات Trimble 87 هندسه باز با زمان متوسط ۱/۵ ساعت مورد مشاهده قرار گرفتند. جدول ۳ خطای بست حلقه های این سه عملیات را مشخص ساخته و جدول ۴ در برگرنده مقایسه ای از اختلاف ارتفاع بازهای مختلف. آخرین ستون جدول ۲ خطای مورد قبول در ترازبانی درجه یک کانادا را نشان می دهد. طول هر حلقه ترازبانی، ۱/۵ برابر حلقه G.P.S. فرض شده است. شایان توجه است که، کلیه اختلاف بستهای مربوطه به عملیات WM 87 در محدوده دقت مورد قبول ترازبانی درجه یک کانادا قرار دارند. نتایج زیر، برآوردی است که با استفاده از تکنیک MINQUE در مورد دقت اختلاف ارتفاعهای حاصل از G.P.S. به عمل آمده است. برای عملیات

$$\sigma_{\Delta h}^2 = (10 \text{ mm})^2 + 2.2 \times 10^{-6} S^2 \quad \text{Trimble 87}$$

و متوسط دو عملیات

$$\sigma_{\Delta h}^2 = (7 \text{ mm})^2 + 1.4 \times 10^{-6} S^2 \quad \text{WM 87, WM 86}$$

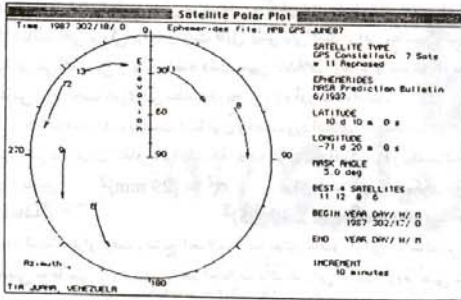
نتایج فوق نشان می دهند که برای بازهای متوسط G.P.S. - معمولاً به طول ۱۰ کیلومتر - با استفاده از گیرنده های WM 101 می توان انحراف معیاری در حد

Loop	Perimeter k(km)	(mm)	WM86 (ppm)	(mm)	WM87 (ppm)	Trimble87 (mm)	(ppm)	$4\text{mm} \sqrt{1.5k}$ (mm)
HY-UN-C6	71	22	0.3	25	0.3	46	0.7	42
KE-UN-C6	41	40	1.0	1	0.0	30	0.7	31
KE-UN-ZE	51	8	0.2	34	0.7	130	2.5	35
HY-ZE-C5-C6	69	77	1.1	27	0.4	14	0.2	41
KE-C6-C5	15	31	2.1	5	0.3	34	2.3	19
C6-C2-C5	3	4	1.3	6	2.0	12	4.0	8
UN-HY-ZE	82	98	1.2	6	0.1	74	0.9	44
Mean:			1.4		0.5		1.6	

جدول ۳ خطای بست اختلاف ارتفاعهای G.P.S. در مقایسه با ترازبانی

Baselines	Length (km)	WM87-WM86 (mm)	(ppm)	Trimble87-WM87 (mm)	(ppm)
C5-C6	1.0	12	12.0	9	9.0
C6-C2	1.4	7	5.0	-19	13.6
C6-KE	7.1	-8	1.1	28	3.9
C6-UN	17.5	-35	2.0	-18	1.0
C6-HY	17.9	-68	3.8	20	1.1
KE-C2	5.8	12	2.1		
C5-C2	0.6	17	28.3	24	40.0
KE-C5	6.4	-36	5.6	-2	0.3
KE-ZE	9.3	-37	4.0	23	2.5
KE-UN	16.1	-41	2.5	-102	6.3
KE-HY	25.0	-27	1.1	-5	0.2
UN-ZE	25.4	-38	1.5	29	1.1
UN-HY	27.5	14	0.5	-33	1.2
ZE-C5	11.6	-52	4.5		
ZE-HY	29.0	-120	4.3	6	0.2

جدول ۴ مقایسه بازهای مشاهده شده.



نگاره ۱ نمونه‌ای از ترسیم قطبی توزیع ماهواره‌های GPS به هنگام انجام مشاهدات درون‌روز

در جدول ۱ به نمایش گذاشته شده است. مقایسه نشست تعیین شده برای پنج-مارکها، توسط GPS و ترازبانی دقیق، در جدول (۵) مندرج است. جدول ۶ تغییرات ارتفاعی تعیین شده توسط GPS و ترازبانی را با هم مقایسه می‌کند.

نحوه مطالعه دقت و تعیین مدل خطای ناشی از GPS روش MINQUE بوده است. با استفاده از مدل (۶/۱) در مورد مقادیر حاصل از عملیات شماره ۳ GPS، مقداری قابل اغماض برای مؤلفه b بدست آمد. این مسئله باعث تغییر مدل خطا به فرم $\sigma_{\Delta h} = a$ و محاسبه σ و $\sigma_{\Delta h}$ میلیمتر برای a گردید. این در حالی است که ادعای کارخانه سازنده برای دقت گیرنده‌های $WM 101: wild$ $\sigma_{\Delta h} = 10 \text{ mm} + 0.5 \text{ m} \times 10^{-6}$ است که برای فاصله متوسط ۲۰ کیلومتر مقدار $\sigma_{\Delta h} = 22 \text{ mm}$ را نتیجه می‌دهد. نتیجه آنکه، مدل خطا در شبکه GPS ماراون مستقل از طول است. این مطلب را می‌توان ناشی از آب و هوای بسیار گرم و مرطوب منطقه دانست. این شبکه در امتداد دریاچه Maracaibo واقع است. چند ایستگاه

Loop	Perimeter (km)	Misclosure (mm)	(ppm)	4mm $\sqrt{1.5k}$
TJ1B-BM8A-BM743	58.2	-18	0.3	37
TJ14B-BM743-GPS3-TJ1B	29.0	-101	3.5	26
TJ1B-GPS3-BM32	22.0	36	1.6	23
BM324-GPS3-GPS12	24.5	41	1.7	24
GPS3-BM743-GPS12	28.1	-5	0.2	26
GPS12-BM743-BM184A	38.3	117	3.1	30
BM184-BM743-GPS	40.9	-87	2.1	31
IBM202-BM184-GPS1	28.5	-94	3.3	26
GPS12-GPS5-BM324	28.9	11	0.4	26
BM324-BM184A-GPS5	39.3	4	0.1	31
LGC1-GPS5-BM184A	26.0	-32	1.2	25
LGC1-BM184A-GPS6	39.0	-32	0.8	31
BM184A-BM202-GPS6	33.5	61	1.8	28
GPS7-GPS6-BM202	40.3	-40	1.0	31
BN1-BN29-GPS6-GPS9	36.8	30	0.8	30
GPS6-GPS7-GPS8	34.0	25	0.7	29
GPS9-GPS6-GPS8	41.2	-13	0.3	31
GPS9-GPS8-GPS10	71.5	-36	0.5	41
Mean:			1.3	

جدول ۱ خطای بست حلقه‌ها در عملیات شماره ۲ و ۳

Point	Campaign #2-Campaign #1		Campaign #3-Campaign #1			
	GPS leveling	GPS-leveling	GPS leveling	GPS-leveling		
BM202	(fixed)					
GPS1	23	0	23	-31	7	-38
BM184A	14	5	9	-31	6	-37
BM743	15	2	13	2	-2	4
GPS3	5	-11	16	-21	-25	4
BM324	12	-1	13	-3	-5	2
TJ1B	-3	-17	14	-54	-27	-27
GPS5	-62	-30	-32	-23	-46	23
Average:			17 mm			19 mm

جدول ۲ نشست تعیین شده با GPS و از طریق ترازبانی (بر حسب میلیمتر)

نتایج

از بررسیهای انجام شده می توان به نتایج ذیل رسید.

- ۱) در اندازه گیری بازهای کوتاه، خطای تروپوسفریک نسی (خاصه در آب و هوای گرم و مرطوب) اثر عمده ای بر دقت اختلاف ارتفاع حاصل از G.P.S. دارد.
- ۲) انحراف مختصات مسطحاتی ایستگاه ثابت، باعث ایجاد خطا در مؤلفه ارتفاعی باز حاصل از G.P.S. می گردد. در نتیجه برای بررسی نشست می بایست به مقدار تقریبی مختصات ایستگاههای ثابت توجه بسیار داشت.
- ۳) برای اعمال وزنه های صحیح به مشاهدات G.P.S. و نیز درک بهتر اثر منابع مختلف خطا بر روی مشاهدات لازم است مدل خطا از طریق مشاهدات انجام شده برآورد گردد. استفاده از مدل ارائه شده توسط کارخانه سازنده به هیچ عنوان صحیح نیست. مدل خطا را می توان از روش MINQE برآورد کرد.
- ۴) روش UNB در تجزیه و تحلیل نشست، ابزاری انعطاف پذیر در ترکیب مشاهدات G.P.S. و ترازبانی است. به کمک این مدل می توان ارتفاع ژئوئید نقاط مختلف منطقه را تعیین کرد.
- ۵) نتایج نشان می دهند که با گیرنده های C/A کد و تعداد ماهواره های موجود در چند سال قبل رسیدن به مؤلفه ارتفاعی به دقت ۱ تا ۳ میلیمتر (بسته به شرایط آب و هوایی) در بازه های متوسط (با طول حداکثر ۳ کیلومتر) امکان پذیر بوده است.

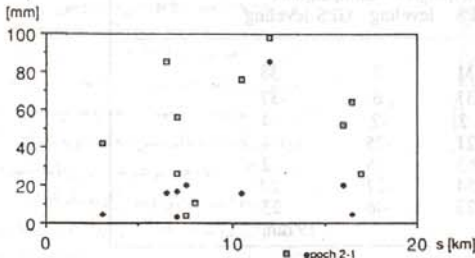
آن تقریباً در خط ساحلی و سابق در فاصله ۲ کیلومتری ساحل واقع اند. بنابراین گردایانته افقی بزرگی برای رطوبت قابل پیش بینی است. این مطلب تأثیر تروپوسفریک نسی را بر تر ساخته دقت تعیین اختلاف ارتفاع را مستقل از طول بازمی سازد. بحث تنوری این مطلب در بخش ۱/۲ آورده شده است.

با استفاده از دقت به دست آمده فوق و دقت مورد ادعای کارخانه سازنده، دو سرشکنی با وزنه های متفاوت برای شبکه G.P.S. ترتیب داده شد. در یک سرشکنی و اربانس $\sigma^2 = (29 \text{ mm})^2$ فرض شده، و در دیگری مقدار ادعا شده $\sigma^2 = (10 \text{ mm})^2 + (2 \times 10^{-6} S)^2$ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج اختلاف ارتفاعهای حاصل از این دو سرشکنی در بعضی جاها حتی ۲ میلیمتر با هم اختلاف داشتند. این مطلب لزوم تعیین مدل خطا و عدم تبعیت کور کورانه از دقت پیشنهاد شده از سوی کارخانه سازنده را روشن می سازد.

جدول ۱ نشان می دهد که اختلاف متوسط بین نتایج حاصل از G.P.S. و ترازبانی در حد ۱۸ میلیمتر است. از آنجایی که دقت برآورد شده ترازبانی ۲ تا ۳ برابر G.P.S. است، خطای نشست تعیین شده با G.P.S. را می توان در حد ۱۰ میلیمتر در نظر گرفت. نموداری از قدر مطلق اختلافات ترازبانی و G.P.S. جدول ۲ در نگاره ۲ آورده شده است. به وضوح می توان دید، که هیچ تفاوت قابل ملاحظه ای بین مقادیر اختلافات در بازه های با طولهای متفاوت وجود ندارد. به طریقه کمترین برعکس، خطی بر مریخ اختلافات برآورد شده ضریب وابسته به طول این بسیار کوچک به دست آمد، که نتیجه حاصل از روش MINQE تطابق دارد. از اختلافات (G.P.S. و ترازبانی) مندرج در جدول ۲ برای به دست آوردن انحراف معیار اختلاف ارتفاعهای حاصل از G.P.S. استفاده گردید. در این مقایسه انحراف معیاری برابر ۲۲ میلیمتر به دست آمد؛ که با مقدار حاصل از روش MINQE (۲۹ mm) تفاوت چندانی ندارد. این مطلب دال بر عدم وجود خطای سیستماتیک در نتایج به دست آمده است. چون مقدار به دست آمده از روش MINQE حاصل از باقیمانده های یک مرحله مشاهده (epoch) بوده، در حالی که مقداری که از مقایسه نتایج G.P.S. و ترازبانی برآورد شده مربوط به مشاهدات G.P.S. و ترازبانی در دو زمان متفاوت است.

از مقایسه نتایج فوق با مشاهدات انجام شده در شبکه آزمایشی UNB نتیجه می گردد که خطای اختلاف ارتفاع حاصل از G.P.S. در ونزوئلا دو برابر بیشتر از نیویورک است. این مطلب را می توان همان گونه که پیش تر نیز اشاره شد، حاصل اثر انکسار تروپوسفریک شدید و توزیع هندسی ضعیف ماهواره ها دانست (در UNB $VDOP = 2.5$ و در ونزوئلا $VDOP = 4.0$).

- ۱) Venezuela
- ۲) ترازبانی که با اندازه گیری شب ثقل همراه بوده و بعد از آن ارتفاع اورتومتريک (Orthometric) نقاط ترازبانی است.
- ۳) University of New Brunswick (UNB)
- ۴) deformation
- ۱) Bench Mark
- ۲) دانشگاه نیویورک
- 7) Fredericton
- 8) Minimum Norm Quadratic Estimation (MINQE)
- 9) Maraven
- ۱۰) Differential
- * نکته: نتایج توسط G.P.S. اندازه گیری می شود، فاصله بین گیرنده و ماهواره است. تصور این طول را بر روی امتداد ثانوی طول سمت الراس می نامند (مترجم).
- ۱۱) along-track
- ۱۲) out of Plane
- ۱۳) MINQE (Minimum Norm Quadratic Estimation)
- ۱۴) epoch



نگاره ۲: تغییر در اختلاف ارتفاع حاصل از G.P.S. و ترازبانی در طول بازه های مختلف

Baseline	Length (km)	Campaign#2-campaign#1		Campaign#3-campaign#2	
		GPS level	GPS-level	GPS level	GPS-level
GPS1-BM202	15.8	-4	12	-16	43
GPS1-BM743	7.3	-14	1	-15	-11
BM202-184A	4.6	11	6	5	-42
BM743-GPS3	7.0	-8	-7	-1	-50
BM743-184A	17.0				22
GPS3-TJ1B	6.4	-17	-3	-14	-63
GPS3-BM324	8.0				22
TJ1B-BM324	7.6	30	10	20	12
BM324-184A	16.6	5	-1	6	-42
BM324-GPS5	12.1	-118	-23	-85	83
GPS5-BM184A	10.6	39	26	13	-56

جدول ۱: تغییر در اختلاف ارتفاعهای حاصل از G.P.S. و ترازبانی (بر حسب میلیمتر)