

بررسی تأثیر مدل‌های تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق

سعید فرزانه^{۱*}، عبدالرضا صفری^۲ و کمال پروازی^۳

۱. استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 ۲. استاد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 ۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 (دریافت: ۹۸/۷/۲۳، پذیرش نهایی: ۹۹/۳/۲۰)

چکیده

در روش کمترین مربعات نیازمند به کارگیری دو مدل تابعی و مدل تصادفی برای برآورد دقیق مجهولات هستیم. در این تحقیق به بررسی و مقایسه ۹ مدل تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها پرداخته شده است. این ۹ مدل تصادفی در قالب معادلاتی از چهار خانواده توابع مثلثاتی $\sin E$ ، $\cos E$ ، توابع مثلثاتی بهبودیافته و توابع نمایی بیان شده‌اند. برای این منظور از مشاهدات ماهواره‌ای مربوط به یک نقطه در دو اپک زمانی استفاده شده که جابه‌جایی کنترل شده آن توسط ابزار دقیق به آن اعمال شده است. با توجه به نتایج ارائه شده بالاترین دقت مربوط به استفاده از مدل تصادفی توابع مثلثاتی بهبودیافته می‌باشد. نهایتاً به کمک مدل انتخاب شده، میانگین دقت برای مختصات به دست آمد. میانگین دقت برای مؤلفه شرقی بین ۰/۰۳ تا ۲/۸ میلی‌متر و برای مؤلفه شمالی بین ۰/۰۴ تا ۳/۱ میلی‌متر به دست آمد. با توجه به دقت به دست آمده برای مؤلفه‌های مختصاتی افقی به کمک مدل هشت به عنوان بهترین مدل تصادفی، تعداد اپک‌های کمتری برای رسیدن به سطح دقت دسی‌متر، سانتی‌متر و میلی‌متر مورد نیاز می‌باشد. به گونه‌ای که برای نقطه مورد نظر تعداد ۲۷۷ اپک برای مؤلفه شرقی و تعداد ۴۰۵ اپک برای مؤلفه شمالی برای رسیدن به سطح دقت میلی‌متر مورد نیاز می‌باشد. در ادامه با در نظر گرفتن شرط همگرایی ۵ سانتی‌متر (در نظر گرفتن اختلاف ۵ سانتی‌متر برای دو اپک متوالی و برقراری این شرط تا اپک انتهایی) برای مؤلفه‌های افقی شرقی و شمالی با توجه به مدل هشت، شرط همگرایی بعد از ۵ دقیقه و ۵۰ ثانیه برای مؤلفه شرقی و بعد از ۸ دقیقه و ۵ ثانیه برای مؤلفه شمالی قابل دست‌یابی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستم تعیین موقعیت جهانی، تعیین موقعیت دقیق نقطه‌ای، مدل تصادفی، سرعت همگرایی، کمترین مربعات.

۱. مقدمه

شرایط آب و هوایی با استفاده از سیستم انتقال زمان و ناوبری-رادییوی برای رسیدن به موقعیت و زمان برای کاربردهای نظامی و غیرنظامی طراحی شده‌اند. GNSS نام مشترک برای سیستم ناوبری آمریکا (GPS)، سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی روسیه (GLONASS)، سیستم ماهواره‌ای ناوبری اروپا (Galileo) و سیستم ماهواره‌ای ناوبری چین (BeiDou) می‌باشد.

مفهوم اساسی تعیین موقعیت GNSS بر اساس اندازه‌گیری حداقل چهار فاصله بین ماهواره‌ها و گیرنده GNSS برای تعیین موقعیت می‌باشد. با این حال اندازه‌گیری‌های فاصله تحت تأثیر برخی از منابع خطا مانند خطای ساعت گیرنده و ماهواره، خطای مداری ماهواره و خطاهای جوی قرار دارند. به منظور بهبود

امروزه سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای در بسیاری از فعالیت‌های نظامی، علمی و روزمره مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعیین موقعیت نقطه‌ای بسته به نوع کاربرد ممکن است به‌طور غیردقیق و تنها با انجام مشاهدات شبه‌فاصله انجام گیرد و یا به‌صورت دقیق و با استفاده هم‌زمان از مشاهدات شبه‌فاصله کد و فاز انجام پذیرد. در هر دو مورد با انجام مشاهدات بیش از حد نیاز بایستی نتایج به دست آمده را از نظر دقت برآورد مجهولات ارزیابی کرد و از صحت و دقت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل کرد. سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS, Global Navigation Satellite System) سیستم‌هایی هستند که به‌صورت ۲۴ ساعته در تمام

سایر سیستم‌های تعیین موقعیت مانند GLONASS و Galileo می‌تواند مسائل مربوط به طولانی بودن زمان همگرایی و دقت تعیین موقعیت را تا حدود زیادی مرتفع سازد (ریزوس و همکاران، ۲۰۱۲؛ سپرساد و بیسناس، ۲۰۱۴).

در پردازش مشاهدات GNSS معمولاً از روش برآورد کمترین مربعات استفاده می‌شود. روش کمترین مربعات نیاز به به کارگیری دو مدل ضروری، یکی مدل تابعی و دیگری مدل تصادفی دارد. مدل تابعی در واقع ارتباط بین مشاهدات و پارامترهای مجهول را بیان می‌کند. مدل تصادفی ارائه دهنده ماتریس کوریانس و ویژگی‌های آماری (امیدریاضی expectation) و پراکندگی (dispersion) خطاهای تصادفی) مشاهدات می‌باشد که خود بیان کننده دقت و همبستگی متقابل بین انواع مشاهدات می‌باشد. مدل تصادفی در برآورد پارامترهای مجهول از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، زیرا تنها زمانی که مدل تصادفی صحیح اعمال شود، می‌توان به برآوردگرهای کمینه واریانس از پارامترها در یک مدل خطی رسید (کخ، ۱۹۹۹؛ لی و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه به اینکه مدل تصادفی در تعیین ماتریس وزن مجهولات دخیل می‌باشد و این ماتریس در آزمون‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد، آزمون‌های آماری نیز به مدل تصادفی حساس می‌شوند. از جمله این آزمون‌ها می‌توان به آزمون فیشر برای پایداری نقاط یک شبکه اشاره کرد (کخ، ۱۹۹۹؛ تیونیس، ۲۰۰۶؛ لی و همکاران، ۲۰۱۵). تنها با یک مدل تصادفی واقع‌بینانه می‌توان به برآوردگرهای مینیمم واریانس پارامترهای یک مدل خطی و همچنین توصیف مناسبی از کیفیت برآوردگرها رسید (امیری سیمکویی، ۲۰۰۷؛ لیک و همکاران، ۲۰۱۵؛ ریزوس، ۱۹۹۷). مدل تصادفی همانند مدل تابعی، نقش مهمی در برآورد پارامترهای مجهول، تست‌های آماری و حل ابهام فاز دارند (تیریوس و کنسلار، ۲۰۰۰؛ لی و همکاران، ۲۰۰۸).

انتخاب مدل تصادفی وابسته به نوع مدل تابعی است. به‌طور

دقت تعیین موقعیت باید روشی مورد استفاده قرار گیرد که خطاهای ایجادشده را حذف یا حداقل کاهش دهد. برای این منظور از روش تعیین موقعیت تفاضلی (DGPS, Differential Global Positioning System) استفاده می‌شود که منابع خطا را با اندازه‌گیری هم‌زمان از یک ایستگاه مرجع حذف کرده و یا کاهش می‌دهد. با این حال کاهش خطای مداری و جوی (یونسفر و تروپوسفر) به شدت وابسته به اندازه طول‌بازه‌ها بین دو ایستگاه مرجع و سیار می‌باشد. تعیین موقعیت مطلق دقیق یکی دیگر از روش‌های تعیین موقعیت می‌باشد که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای ساعت و مدار دقیق ماهواره‌ها توسط سامانه بین‌المللی ناوبری جهانی (IGS, International GNSS Service) برای بهبود دقت تعیین موقعیت، زمانی که تنها از یک گیرنده استفاده می‌شود، ارائه می‌شوند (زومبرگ و همکاران، ۱۹۹۷؛ کوبا و هروکس، ۲۰۰۱). در مقایسه دو روش ارائه شده، روش تعیین موقعیت مطلق دقیق با کاهش هزینه و تجهیزات و سادگی با توجه به اینکه به تنها یک ایستگاه نیاز می‌باشد چه در کاربردهای مهندسی و چه کاربردهای تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است. با این حال روش تعیین موقعیت مطلق دقیق به همگرایی زمانی ۳۰ دقیقه‌ای یا بیشتر برای رسیدن به سطح دقت سانتی‌متری نیاز دارد (گنج و همکاران، ۲۰۱۱). در واقع زمان ۳۰ دقیقه‌ای ذکر شده در بالا برای همگرا شدن پارامتر ابهام فاز به اعداد ثابت در مشاهدات فاز موج حامل احتیاج می‌باشد (ریزوس و همکاران، ۲۰۱۲). زمان همگرایی عمدتاً به هندسه ماهواره‌ها وابسته می‌باشد زیرا ماتریس طرح استفاده شده برای برآورد مجهولات وابسته به مختصات ماهواره‌ها می‌باشد. از طرفی با توجه به سرعت پایین حرکت ماهواره‌ها (حدود ۴ کیلومتر بر ثانیه) تغییر هندسه ماهواره‌ها نسبت به کاربری که بر روی زمین قرار دارد بسیار کندتر می‌باشد که این در واقع منجر به طولانی شدن زمان همگرایی می‌شود. ترکیب GPS با

همچنین همبستگی متقابل بین مشاهدات پرداختند (جانکمن، ۱۹۸۸؛ وانگ و همکاران، ۱۹۹۸). بررسی دقیق، همبستگی متقابل و همچنین همبستگی زمانی مشاهدات کد و فاز سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) با استفاده از هفت نوع گیرنده مختلف توسط بونا مورد بررسی قرار گرفت (بونا، ۲۰۰۰). تیبریوس و کنسلار برآورد مؤلفه‌های واریانس برای مشاهدات GPS در هنگامی که یک زیرو بیس‌لاین (zero baseline) در اختیار باشد را مورد تحلیل قرار دادند. بر اساس نتایج ارائه شده، وابستگی به ارتفاع ماهواره و همبستگی زمانی معنی‌داری برای مشاهدات وجود داشت. در صورتی که همبستگی بین کانال‌ها یا ماهواره‌های مختلف کاملاً ناچیز می‌باشد (تیبریوس و کنسلار، ۲۰۰۳). ارزیابی مدل تصادفی برای انواع مختلف مشاهدات GPS و همچنین گیرنده‌های مختلف برای یک بیس‌لاین (baseline) خیلی کوچک توسط لی و همکاران انجام گرفت (لی و همکاران، ۲۰۰۸). بر اساس نتایج آنها همبستگی به ارتفاع، همبستگی بین مشاهدات و همبستگی زمانی به‌طور مشخصی وجود داشت. بر این اساس، باید مدل تصادفی برای انواع مشاهدات و همچنین گیرنده‌های مختلف در نظر گرفته شود. امیری سیمکویی و همکاران به بررسی مدل تصادفی برای مشاهدات GPS برای یک بیس‌لاین پرداختند و نشان داده شد که ارتباط معنی‌داری بین مشاهدات کد C1 و P2 و مشاهدات فاز L1 و L2 وجود دارد (امیری سیمکویی و همکاران، ۲۰۰۹).

یک مدل تصادفی دقیق برای مشاهدات، در واقع بیان کننده نویز داخلی گیرنده، خطاهای باقی‌مانده، و همبستگی بین متغیرها می‌باشد (لی و همکاران، ۲۰۱۷؛ لی، ۲۰۱۶). از طرفی با انتخاب یک مدل تصادفی مناسب می‌توان پیش شرط‌های لازم برای حل ابهام فاز قابل اعتماد و همچنین تعیین موقعیت دقیق را فراهم آورد (امیری سیمکویی و همکاران، ۲۰۱۶؛ تیونسن، ۲۰۰۷). در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق وابستگی به ایستگاه مبنا از بین می‌رود (زومبرگ و همکاران، ۱۹۹۷). PPP تک گیرنده، تکنولوژی مستقلی است که از تولیدات ساعت و مدار

مثال در روش تعیین موقعیت نسبی، تکنیک تفاضلی دوگانه به‌طور معمول به‌عنوان مدل تابعی انتخاب می‌شود به این دلیل که در روش تفاضلی می‌توان با اعمال این شرط که طول باز در نظر گرفته شده کوچک باشد، تعدادی از بایاس‌های موجود در تعیین موقعیت ناوبری ماهواره‌ای را حذف و یا تا حدودی کاهش داد. همچنین مدل تابعی مرسوم در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق استفاده از ترکیب خطی عاری از یونسفر می‌باشد. مدل‌های تابعی مربوط به PPP توسط محققان به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. اکثر مدل‌های تصادفی GNSS موجود، از توابع تجربی نظیر \sin ، \cos ، توابع نمایی و چند جمله‌ای استفاده می‌کنند. با این فرض که تمام مشاهدات GNSS از لحاظ آماری مستقل و با کیفیت یکسان می‌باشند (یانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ اسپچون و برانر، ۲۰۰۸؛ الربانی، ۱۹۹۶). به‌طور معمول این مدل‌های تصادفی تابعی از زاویه ارتفاعی ماهواره می‌باشند (السویی و الربانی، ۲۰۱۰؛ لندرو و سانتوس، ۲۰۰۷).

برای رسیدن به بهترین برآورد برای مختصات، در اختیار داشتن وزن دقیق مشاهدات از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، زیرا پردازش‌ها شامل استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای مختلف می‌باشد که کیفیت اندازه‌گیری‌های آنها با توجه به سطح نویز و خطاهای باقی‌مانده متفاوت می‌باشد. با استفاده از مدل‌سازی تصادفی مناسب سیگنال‌های GNSS، دقت و زمان همگرایی PPP بهبود می‌یابد (افیف و الربانی، ۲۰۱۳). از این رو تلاش‌های قابل توجهی در زمینه بهبود مدل تصادفی GNSS صورت گرفته است و مشخصه وابستگی به ارتفاع برای مشاهدات GNSS به ارتفاع، همبستگی بین انواع مشاهدات و همبستگی زمانی تأیید شده است (امیری سیمکویی، ۲۰۱۳؛ امیری سیمکویی و همکاران، ۲۰۱۳). ایلر و گود، گردان، جین و جونگ وابستگی واریانس مشاهدات به ارتفاع را مورد بررسی قرار دادند (ایلر و گواد، ۱۹۹۱؛ گردان، ۱۹۹۵؛ جین و جونگ، ۱۹۹۶). جانکمن و وانگ و همکاران به بررسی همبستگی زمانی و

۲. روش تحقیق

امروزه با توجه به گسترش کاربرد GNSS در کاربردهای نظامی و تحقیقاتی و نیز متأثر بودن مشاهدات GNSS از شرایط فیزیکی محیط، براساس تئوری‌های مختلف مدل‌های متفاوتی جهت تعدیل، حذف یا مدل‌سازی خطاهای سیستماتیک به وجود آمده است. همچنین این مدل‌ها در بحث تعیین موقعیت مطلق دقیق وارد شده و سعی در بالا بردن دقت مشاهدات در این روش تعیین موقعیت دارند. در این تحقیق در ابتدا به بررسی روش تعیین موقعیت مطلق دقیق بر اساس ترکیب مشاهدات مختلف GNSS پرداخته می‌شود. سپس جهت بررسی مدل تصادفی مشاهدات، مدل تابعی در نظر گرفته شده مبتنی بر استفاده از ترکیب مشاهداتی عاری از یونسفر، برای هر دو نوع مشاهدات فاز و مشاهده شبه‌فاصله تشکیل شده است. همچنین سعی شده بسیاری از خطاها از جمله خطای ساعت ماهواره، خطای جدایی مرکز فاز از مرکز جرم ماهواره، خطای جدایی مرکز فاز آنتن گیرنده، تأثیر جزر و مد خشکی و خطای اثر نسبیّت توسط مدل‌ها و اطلاعات مداری دقیق، تا حد امکان کاهش یافته و یا حذف شوند. در ضمن دیگر عوامل عمده خطا مثل تأثیر تروپوسفر و خطای ساعت گیرنده به عنوان مجهول به‌طور هم‌زمان با دیگر مجهولات برآورد می‌شوند.

۲-۱. مدل تابعی تعیین موقعیت مطلق دقیق دوفراکانسه مشاهده عاری از یونسفر با ترکیب مشاهدات انجام شده دو موج L1 و L2 با یکدیگر امکان‌پذیر است. در این تحقیق مدل تعیین موقعیت مطلق دقیق مورد استفاده از مشاهدات عاری از یونسفر فاز و کد به‌طور هم‌زمان تشکیل شده است و با توجه به خطاهای موجود، این مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله مشاهده شبه‌فاصله و فاز موج حامل برای تعیین موقعیت مطلق دقیق به صورت معادله ۱ می‌باشد (دفرانگن و بییر، ۲۰۱۱؛ کائی و ژائو، ۲۰۱۳؛ چن و همکاران، ۲۰۱۵):

دقیق استفاده می‌کند. بنابراین رسیدن به نتایجی با کیفیت بالا به شدت وابسته به کیفیت محصولات ساعت و مدار ماهواره‌های مورد استفاده می‌باشد. این تولیدات در یک فرآیند پس پردازش و پس از گذشت چند روز در اختیار کاربران قرار می‌گیرد (داو و همکاران، ۲۰۰۹).

هدف از این تحقیق در مرحله اول بررسی تأثیری است که مدل‌های تصادفی مختلف در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق می‌تواند ایفا کنند. برای بررسی این تأثیر از دو شاخص استفاده می‌شود. یک دقت مؤلفه‌های مختصاتی برآورد شده با استفاده از هر کدام از مدل‌های تصادفی در نظر گرفته شده و دوم بررسی زمان همگرایی است که استفاده از هر کدام از این مدل‌های تصادفی می‌تواند ارائه کند. استفاده از این مدل‌ها در شرایط یکسان در روش سرشکنی در نظر گرفته می‌شود. در مرحله دوم بعد از اینکه مدل تصادفی مناسب بر اساس این دو شاخص انتخاب شد، با توجه به اهمیتی که تشخیص دقیق جابه‌جایی با صرف کمترین زمان و هزینه می‌تواند داشته باشد و همچنین کاربردی که امروزه استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای دارا می‌باشد، به بررسی استفاده از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق برای این کاربرد مهم در نقشه‌برداری پرداخته می‌شود. ساختار مقاله به شرح زیر است: بخش ۲ به معرفی مدل تابعی و مدل تصادفی در روش Multi-GNSS PPP عاری از یونسفر پرداخته می‌شود. در بخش ۳ بررسی انواع مدل‌های تصادفی مختلف در تعیین موقعیت مطلق دقیق به کمک مشاهدات فاز و کد عاری از یونسفر ارائه خواهد شد. نتایج و تجزیه و تحلیل در بخش ۴ نشان داده خواهد شد و تأثیر مدل‌های تصادفی برآورد شده در دقت تعیین موقعیت مطلق دقیق و همچنین زمان همگرایی ارائه خواهد شد. برای این منظور با در نظر گرفتن مشاهدات ماهواره‌ای دقت مربوط به هر مدل تصادفی بررسی می‌شود. و در ادامه نتایج حاصل از این تحقیق با سرویس‌های برخط مقایسه خواهد شد. در نهایت نتیجه‌گیری این تحقیق در بخش ۵ انجام خواهد گرفت.

$$\begin{aligned}
 P_i^G &= \rho^G + c(dt_G - dT^G) + d\rho^G + \frac{I^G}{f_i^2} + m_{dry}(E_r^G)Z_{dry} + m_{wet}(E_r^G)(Z_{total} - Z_{dry}) + cb_{r,P_i}^G - cb_{s,P_i}^G \\
 &+ \delta_{sag}^{rel} + M_{P_i}^G + \varepsilon_{P_i}^G \\
 \Phi_i^G &= \rho^G + c(dt_G - dT^G) + d\rho^G + \frac{I^G}{f_i^2} + m_{dry}(E_r^G)Z_{dry} + m_{wet}(E_r^G)(Z_{total} - Z_{dry}) + cb_{r,\Phi_i}^G - cb_{s,\Phi_i}^G \\
 &+ \lambda_i(\overline{N_i^G} + \Phi_{r_{0,i}}^G - \Phi_{s_{0,i}}^G) + d_{pco}^S + d_{set} + d_{oc} + d_{rel} + \lambda_i\Phi_{pw} + M_{\Phi_i}^G + \varepsilon_{\Phi_i}^G
 \end{aligned} \tag{1}$$

روی موج حامل $\Phi_{s_{0,i}}^G$ ، L_i بایاس مقدار جزئی فاز ماهواره GPS بر روی موج حامل L_i ، تصحیح d_{pco}^S تصحیح آفست مرکز فاز آنتن ماهواره، Φ_{pw} تصحیح پیچش فاز، d_{set} تصحیح جزر و مد خشکی، d_{oc} تصحیح جزر و مد اقیانوسی، d_{rel} تصحیح اثر نسبیت، δ_{sag}^{rel} تصحیح اثر Sagnac. تعدادی از پارامترهای ارائه شده در معادله (۱) می‌توانند حذف یا اینکه مدل شوند. دو پارامتر خطای آفست ساعت و مدار ماهواره با استفاده از محصولات ساعت و مدار دقیق ماهواره‌ها دارای مقدار معلوم بوده و از معادله حذف می‌شوند. علاوه بر آن بایاس تأخیر سخت‌افزاری فاز و کد ماهواره نیز توسط این تولیدات از دو معادله بالا حذف می‌شوند (دفرانگن و بییر، ۲۰۱۱؛ کائی و ژائو، ۲۰۱۳؛ چن و همکاران، ۲۰۱۵). پارامتر بایاس تأخیر سخت‌افزاری گیرنده وابسته به فرکانس ارسالی ماهواره‌ها می‌باشد. این پارامتر برای سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای GPS با توجه به اینکه ماهواره‌های آن دارای فرکانس یکسانی هستند، این پارامتر برای تمام کانال‌های آن یکسان می‌باشد. بنابراین، ترم بایاس تأخیر سخت‌افزاری کد گیرنده بر روی آفست ساعت گیرنده انتقال می‌یابد، به همین دلیل تنها پارامتر آفست ساعت گیرنده در نظر گرفته می‌شود (کائی و ژائو، ۲۰۱۳؛ ابدلسلام، ۲۰۰۵). با توجه به اینکه پارامتر ابهام فاز در طول زمان بسیار پایدار می‌باشد ترم بایاس تأخیر سخت‌افزاری فاز، بر روی پارامتر ابهام فاز انتقال می‌یابد (کائی و ژائو، ۲۰۱۳؛ افیف و الربانی، ۲۰۱۵). پارامتر خطای تأخیر یونسفری نیز می‌تواند با استفاده از ترکیب خطی عاری از یونسفر حذف شود.

در معادله (۱) ρ^G مشاهده شبه فاصله GPS بر روی موج حامل Φ_i^G ، L_i مشاهده فاز موج حامل GPS بر روی موج حامل L_i ، اشاره به سیستم تعیین موقعیت GPS، اشاره به i اشاره به موج دارد و می‌تواند مقادیر ۱، ۲ و ۵ اختیار کند، ρ^G فاصله هندسی بین مراکز فاز آنتن‌های ماهواره و گیرنده، c سرعت نور در خلا، dt_G آفست ساعت گیرنده در سیستم زمانی GPS، dT^G آفست ساعت ماهواره در سیستم زمانی GPS، $d\rho^G$ خطای مداری ماهواره‌های سیستم GPS، $\frac{I^G}{f_i^2}$ تأخیر یونسفری بین ماهواره‌های GPS و گیرنده بر روی موج حامل L_i ، m_{dry} تابع تصویر برای قسمت خشک تروپوسفر، m_{wet} تابع تصویر برای قسمت تر تروپوسفر، Z_{dry} تأخیر تروپوسفری برای قسمت خشک، Z_{total} تأخیر تروپوسفری کلی، E_r^G زاویه ارتفاعی برای ماهواره‌های GPS، b_{r,P_i}^G بایاس تأخیر سخت‌افزاری مشاهده کد برای گیرنده GPS بر روی موج حامل L_i ، b_{s,P_i}^G بایاس تأخیر سخت‌افزاری مشاهده کد برای ماهواره GPS بر روی موج حامل L_i ، b_{r,Φ_i}^G بایاس تأخیر سخت‌افزاری مشاهده فاز برای گیرنده GPS بر روی موج حامل L_i ، b_{s,Φ_i}^G بایاس تأخیر سخت‌افزاری مشاهده فاز برای ماهواره GPS بر روی موج حامل L_i ، $M_{P_i}^G$ خطای چندمسیری مشاهده شبه فاصله GPS بر روی موج حامل L_i ، $\varepsilon_{P_i}^G$ نویز مشاهده شبه فاصله GPS بر روی موج حامل L_i ، $M_{\Phi_i}^G$ خطای چندمسیری مشاهده فاز GPS بر روی موج حامل L_i ، $\varepsilon_{\Phi_i}^G$ نویز مشاهده فاز GPS بر روی موج حامل L_i ، $\overline{N_i^G}$ پارامتر ابهام فاز GPS بر روی موج حامل L_i ، $\Phi_{r_{0,i}}^G$ بایاس مقدار جزئی فاز گیرنده GPS بر

ترکیب عاری از یونسفر به صورت معادله ۲ نوشت:

$$\begin{cases} P_{IF}^G = \rho^G + c\tilde{d}t_G + \\ m_{wet}(E_r^G)[Z_{total}] + \varepsilon_{PIF}^G \\ \Phi_{IF}^G = \rho^G + c\tilde{d}t_G + \\ m_{wet}(E_r^G)[Z_{total}] + \tilde{N}_{IF}^G + \varepsilon_{\Phi}^G \end{cases} \quad (۲)$$

در معادله (۲) P_{IF}^G ترکیب عاری از یونسفر مشاهده شبه فاصله، Φ_{IF}^G ترکیب عاری از یونسفر مشاهده فاز موج حامل، ε_{PIF}^G نویز مشاهده شبه فاصله عاری از یونسفر، ε_{Φ}^G : نویز مشاهده فاز موج حامل عاری از یونسفر، $c\tilde{d}t_G$ خطای ساعت گیرنده GPS، \tilde{N}_{IF}^G ابهام فاز غیر صحیح عاری از یونسفر است.

۲-۲. مدل‌های تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاع ماهواره‌ها

تاکنون مدل‌های تصادفی بسیاری برای مشاهدات GNSS در کنار مدل‌های تابعی پیشنهاد شده است. برخی از مدل‌های پیشنهاد شده جهت وزن‌دهی دقیق به مشاهدات در روند سرشکنی، بدون استفاده از روش‌های برآورد مؤلفه‌های واریانس، تنها سعی در ارائه روش‌هایی برای بیان وابستگی نوع مشاهدات به شرایط مشاهده داشته‌اند. البته این روش‌ها در نوع خود کارآمد بوده و تا حدی می‌توانند برآورد را به برآورد با کمترین واریانس نزدیک کنند. این مدل‌ها از این حیث که شرایط تأثیرگذار در طول بازه مشاهداتی ثابت نیست و نیز برخی شرایط ممکن است در این مدل‌ها لحاظ نشوند، به‌طور کامل نمی‌توانند شرایط آماری حاکم بر مشاهدات را نشان دهند. به‌طور معمول برای تعیین مدل تصادفی، ارتفاع ماهواره، نسبت سیگنال به نویز یا ترکیبی از هر دو مورد استفاده قرار می‌گیرد (وانگ، ۲۰۰۲؛ ستیراپود و لوانسانگ، ۲۰۰۸). در اینجا به بررسی بعضی از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

در مورد ترم خطای تأخیر تروپوسفری نیز تنها مقدار مجهول Z_{total} می‌باشد. آفست مرکز فاز آنتن ماهواره، اثر جهش فاز، اثر جزرومد پوسته، اثر جزرومد اقیانوسی، اثر نسبیت، اثر Sagnac. در نهایت اثر خطای چندمسیری را می‌توان با استفاده از روش‌های موجود کاهش داد. یک راه حل دیگر برای جلوگیری از این منبع خطا، قرار دادن آنتن گیرنده در مکانی بدون بازتاب است. با این حال این همیشه عملی نیست، به‌خصوص هنگامی که گیرنده GNSS روی یک جسم متحرک قرار داشته باشد. روش دیگر برای کاهش خطای چندمسیری، طراحی گیرنده یا آنتن است. آنتن "ring choke" یکی از مشهورترین آنتن‌ها است که اثر چندمسیری را کاهش می‌دهد. برخی گیرنده‌های مدرن از تکنیک‌هایی با تکیه بر چندین آنتن (Multiple Antenna) یا آنچه به‌عنوان آرایه آنتن (Antenna Array) شناخته می‌شود استفاده می‌کنند. با استفاده از این تکنولوژی، گیرنده می‌تواند خود را تنظیم کند به گونه‌ای که فقط سیگنال (LOS, Direct line-of-sight) را ردیابی کند و سایر سیگنال‌های مزاحم را مسدود کند. اثر خطای چند مسیری همچنین در سطح مشاهدات در هنگام پردازش داده‌ها می‌تواند کاهش یابد. یک روش ساده دیگر وزن‌دهی به مشاهدات بر اساس زاویه ارتفاعی است، چرا که خطای چند مسیری با کاهش زاویه ارتفاعی افزایش می‌یابد. یک روش پیشرفته برای شناسایی اثر چند مسیری استفاده از اطلاعات کد-فاز می‌باشد. از این مشاهدات حتی برای سرشکنی وزن ماهواره‌ها و همچنین حذف اندازه‌گیری‌هایی که تحت تأثیر چند مسیری شدید قرار دارند نیز استفاده می‌شود (کراییم و همکاران، ۲۰۱۸؛ هافمن و همکاران، ۲۰۰۷؛ کونیسز، ۲۰۰۰؛ دانشمند و همکاران، ۲۰۱۳؛ زو و همکاران، ۲۰۱۶).

با توجه به نکات گفته شده می‌توان معادله مشاهده شبه فاصله و موج حامل را به صورت زیر براساس

۲-۲-۱. وزن‌دهی مشاهدات بر اساس دقت اسمی و

تغییرات زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها

در صورتی که از دقت‌های اسمی معمول برای مشاهدات فاز و کد استفاده شود مقدار واریانس مربوط به مشاهدات عاری از یونسفر طبق قانون انتشار خطاها به صورت معادله (۳) خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{P_{1,0}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{P_{2,0}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Phi_{1,0}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\Phi_{2,0}}^2 \end{bmatrix} J^T \quad (3)$$

در معادله ۳، $\sigma_{\Phi_{1,0}}^2$ و $\sigma_{\Phi_{2,0}}^2$ دقت اسمی مشاهدات فاز، $\sigma_{P_{1,0}}^2$ و $\sigma_{P_{2,0}}^2$ دقت اسمی مشاهدات کد می‌باشند. در این معادله ماتریس ژاکوبین J ، به صورت معادله (۴) ارائه می‌شود:

$$J = \begin{bmatrix} FR1 & -FR2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & FR1 & -FR2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در معادله ۴، $FR1$ و $FR2$ فرکانس امواج $L1$ و $L2$ ، (یعنی f_1 و f_2) می‌باشند. که بر اساس معادله ۵ محاسبه می‌شوند.

$$FR1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, FR2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (5)$$

فرض می‌شود که مشاهدات شبه‌فاصله، P_1 و P_2 دارای دقت یکسان باشند. همین فرض برای مشاهدات فاز موج

حامل، Φ_1 و Φ_2 نیز در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه بعد از به‌دست آوردن مقدار واریانس اولیه مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز حالت‌های متداول برای مدل تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاعی ماهواره در نظر گرفته می‌شود. خطاها در مشاهدات GNSS عمدتاً شامل خطاهای تأخیر تروپوسفر، خطای یونسفر و خطای چند مسیری می‌باشد. تمامی این خطاها با زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها در ارتباط هستند. به‌منظور تضعیف این خطاها، می‌توان مدل‌های تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها را در نظر گرفت. مدل‌های تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاعی عمدتاً شامل توابع مثلثاتی و توابع نمایی هستند (ویتچایانگون، ۲۰۰۰؛ هان، ۱۹۹۷).

۲-۲-۲. مدل‌های تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاعی

در این حالت برای به‌دست آوردن ماتریس وزن مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز (مدل تصادفی مبتنی بر ارتفاع ماهواره‌ها) از توابعی بر حسب \sin ، \cos ، توابع مثلثاتی بهبودیافته و توابع نمایی استفاده می‌شود. حالت‌های مختلف مربوطه به این مدل‌های تصادفی در جدول ۱ ارائه شده است.

در جدول ۱، E زاویه ارتفاعی ماهواره، $\sigma_{\Phi_{0,0}}^2$ دقت اسمی مشاهدات فاز، $\sigma_{P_{0,0}}^2$ دقت اسمی مشاهدات کد و $E_0 = 20$ برای مشاهدات کد و فاز عاری از یونسفر می‌باشد (لی و ژانگ، ۲۰۱۴؛ کیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ وو و همکاران، ۱۹۹۲).

جدول ۱. انواع مختلف مدل‌های تصادفی مبتنی بر زاویه ارتفاعی بر حسب چهار مدل \sin ، \cos ، توابع بهبودیافته و توابع نمایشی.

$Q_8 = \begin{cases} \sigma_P^2 = e^{\left(\frac{-E}{E_0}\right)} \times \sigma_{P,0}^2 \\ \sigma_\Phi^2 = e^{\left(\frac{-E}{E_0}\right)} \times \sigma_{\Phi,0}^2 \end{cases}$ $Q_9 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \left(e^{\left(\frac{-E}{E_0}\right)}\right)^2 \times \sigma_{P,0}^2 \\ \sigma_\Phi^2 = \left(e^{\left(\frac{-E}{E_0}\right)}\right)^2 \times \sigma_{\Phi,0}^2 \end{cases}$	توابع نمایشی	مدل تصادفی بر حسب
$Q_7 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \left(a^2 + \frac{b^2}{\sin^2(E)}\right) \times \sigma_{P,0}^2 \\ \sigma_\Phi^2 = \left(a^2 + \frac{b^2}{\sin^2(E)}\right) \times \sigma_{\Phi,0}^2 \end{cases}$	توابع مثلثاتی بهبودیافته	
$Q_4 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \cos(E) \times \sigma_{P,0}^2 \\ \sigma_\Phi^2 = \cos(E) \times \sigma_{\Phi,0}^2 \end{cases}$ $Q_5 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \cos^2(E) \times \sigma_{P,0}^2 \\ \sigma_\Phi^2 = \cos^2(E) \times \sigma_{\Phi,0}^2 \end{cases}$ $Q_6 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \cos^4(E) \times \sigma_{P,0}^2 \\ \sigma_\Phi^2 = \cos^4(E) \times \sigma_{\Phi,0}^2 \end{cases}$	توابع \cos	
$Q_1 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \frac{\sigma_{P,0}^2}{\sin(E)} \\ \sigma_\Phi^2 = \frac{\sigma_{\Phi,0}^2}{\sin(E)} \end{cases}$ $Q_2 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \frac{\sigma_{P,0}^2}{\sin^2(E)} \\ \sigma_\Phi^2 = \frac{\sigma_{\Phi,0}^2}{\sin^2(E)} \end{cases}$ $Q_3 = \begin{cases} \sigma_P^2 = \frac{\sigma_{P,0}^2}{\sin^4(E)} \\ \sigma_\Phi^2 = \frac{\sigma_{\Phi,0}^2}{\sin^4(E)} \end{cases}$	توابع \sin	

۳. مشاهدات مورد استفاده و نتایج عددی

ترکیب عاری از یونسفر با استفاده از مشاهدات Multi-GNSS شامل سیگنال‌های $L1/L2$ برای GPS، $G1/G2$ برای Galileo و $E1/E5a$ برای GLONASS ایجاد می‌شود. بر این اساس می‌توان مختصات ایستگاه، خطای ساعت گیرنده، پارامترهای اختلاف زمان سیستم‌ها با

سیستم GPS، پارامتر تروپوسفر و ابهام فاز را برآورد کرد. برای ارزیابی مدل‌های تصادفی در نظر گرفته شده و تأثیر آنها بر پارامترهای دقت تعیین موقعیت روش PPP، و همچنین ارزیابی این روش برای آشکارسازی جابه‌جای‌های میلی‌متری، مشاهدات GNSS در شهر Gavle کشور Sweden با استفاده از گیرنده Multi-

است. در جدول ۲، استراتژی پردازش مشاهدات و مدل‌کردن خطاها برای ترکیب تعیین موقعیت مطلق دقیق Multi-GNSS در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق عاری از یونسفر با استفاده از برنامه PPPteh تحت نرم‌افزار Matlab (ارائه‌شده توسط نویسندگان مقاله) انجام گرفته است.

GNSS (Leica GS16) در حالت استاتیک و در تاریخ ۲۴ آوریل ۲۰۱۸ در دو بازه زمانی ۳:۵۰ دقیقه‌ای و ۴:۱۲ دقیقه‌ای با نرخ نمونه‌برداری ۵ ثانیه جمع‌آوری شده است. زاویه ارتفاعی برشی (Cut-off angle) ماهواره‌ها ۱۰ درجه در نظر گرفته شد. در شکل ۱، دستگاه مورد استفاده به همراه جابه‌جایی کنترل‌شده و میزان جابه‌جایی ارائه شده

جدول ۲. استراتژی پردازش مشاهدات در روش تعیین مطلق دقیق ترکیب Multi-GNSS

تنظیمات	پارامترهای مورد استفاده
مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز	مشاهدات
GPS: L1/L2 ; GLONASS: G1/G2; Galileo: E1/E5a	فرکانس
۱۰ درجه	زاویه برشی
۵ ثانیه	نرخ نمونه برداری
GFZ multi-GNSS (GBM)	مدار و ساعت ماهواره
GPS, GLONASS, Galileo: IGS14.atx	آفست و تغییرات مرکز فاز آنتن ماهواره
Corrected by IGS14.atx	آفست و تغییرات مرکز فاز آنتن گیرنده
Saastamoinen model and global mapping function (GMF) (بوهم و همکاران، ۲۰۰۶)	تأخیر تروسفری خشک
تصحیح شد (کوبا، ۲۰۰۹)	اثر نسبیت
تصحیح شد (وو و همکاران، ۱۹۹۲)	جهش فاز
جزر و مد خشکی، اقیانوسی و قطبی (پتیت و لوزام، ۲۰۱۰)	مدل جابه‌جایی ایستگاه
استفاده از مدل‌های تصادفی وابسته به ارتفاع	وزن مشاهدات
استاتیک	روش برداشت مشاهدات
روش کمترین مربعات بازگشتی	روش پردازش
مؤلفه‌های مختصات، خطای ساعت گیرنده، تروپسفر، ابهام فاز و پارامتر اختلاف زمان بین سیستم‌ها	پارامترهای برآوردشده



(ب)

(الف)

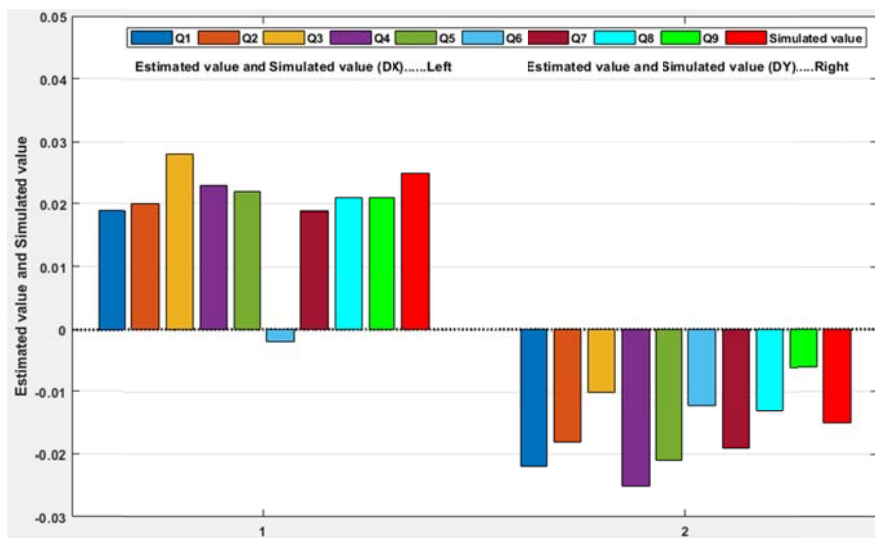
شکل ۱. دستگاه استفاده‌شده برای اعمال جابه‌جایی کنترل‌شده (شبیه‌سازی‌شده) به همراه گیرنده Leica GS16. الف) جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر، ب) جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر به ترتیب برای مؤلفه‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی.

پردازش به صورت تعیین موقعیت مطلق دقیق در هر دو اپک انجام گرفته است. نتایج مربوط به این تعیین موقعیت برای مؤلفه‌های افقی دو نقطه مورد نظر در جدول ۳، ارائه شده است. برای این منظور موقعیت نقطه در اپک اول به عنوان مبدأ سیستم مختصات ژئودتیک محلی (Local Geodetic) در نظر گرفته شده است. سپس موقعیت نقطه در اپک دوم محاسبه و مقایسه‌ها انجام گرفت. به این صورت که ابتدا موقعیت ژئودتیک (φ, λ, h) نقطه اول به سیستم مختصات (ECEF, Earth Center Earth) (Fixed) انتقال داده شد و سپس از سیستم مختصات ECEF به سیستم مختصات ژئودتیک محلی تبدیل صورت گرفت. و موقعیت نقطه در اپک اول به عنوان مبدأ سیستم مختصات ژئودتیک محلی انتخاب شد. پس از آن برای به دست آوردن جابه‌جایی در نقطه مورد نظر در اپک دوم، با این فرض که موقعیت نقطه در اپک اول به عنوان مبدأ سیستم مختصات ژئودتیک محلی انتخاب شده بود، تبدیل از سیستم مختصات ECEF به سیستم مختصات ژئودتیک محلی انجام گرفت. به این صورت مقدار جابه‌جایی نقطه در اپک دوم نسبت به مبدأ (اپک اول) محاسبه شده است. در شکل ۲، اختلاف مقدار جابه‌جایی شبیه‌سازی شده با مقدار جابه‌جایی برآورد شده برای مؤلفه‌های افقی شمالی- جنوبی و شرقی- غربی در حالت استفاده از ماتریس وزن‌های مختلف ارائه شده است.

در این تحقیق از مشاهدات مربوط به دو نقطه استفاده شده است. به این صورت که نقطه دوم نسبت به نقطه اول جابه‌جایی کنترل شده در مؤلفه‌های شرقی- غربی و شمالی- جنوبی آن اعمال شده است. بنابراین میزان تغییرات مختصات بین دو نقطه با دقت بالایی معلوم می‌باشد. مقایسه مختصات دو نقطه در دو اپک زمانی انجام می‌شود. یک ابزار دقیق که می‌تواند حرکات افقی را شبیه‌سازی کند، در ساختمان شماره یک، دانشکده مهندسی دانشگاه KTH به همراه گیرنده GNSS قرار گرفته است. شکل ۱، دستگاه و گیرنده GNSS مورد استفاده را نشان می‌دهد. این دستگاه قادر خواهد بود که حرکت در جهت افقی را با دقت $0/01$ میلی‌متر اعمال کند. این شبیه‌سازی، شامل اعمال جابه‌جایی (۱۵ و ۲۵ میلی‌متر) برای مؤلفه‌های افقی شمالی- جنوبی و شرقی- غربی می‌باشد. مقدار جابه‌جایی کنترل شده بین دو اپک به عنوان جابه‌جایی واقعی در نظر گرفته شده است. هر مجموعه داده‌ها با استفاده برنامه PPPteH تحت نرم‌افزار Matlab برای روش تعیین موقعیت PPP پردازش شده است. محاسبه موقعیت حاصل از این پردازش به این صورت انجام گرفته است که برای هر آزمایش، داده‌های پردازش شده در اپک اول به عنوان اپک رفرنس در نظر گرفته می‌شود. به کمک ۹ مدل وزن‌دهی مختلف در نظر گرفته شده برای مشاهدات عاری از یونسفرکد و فاز،

جدول ۳. جابه‌جایی برآورد شده برای نقطه مورد نظر با استفاده از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق با استفاده از ماتریس وزن‌های مختلف.

جابه‌جایی برآورد شده		
ماتریس وزن	مؤلفه شمالی- جنوبی (میلی‌متر)	مؤلفه شرقی- غربی (میلی‌متر)
Q_1	۱۹/۸	-۲۳/۱
Q_2	۲۰/۸	-۱۵/۹
Q_3	۲۹/۹	-۱۱/۵
Q_4	۲۲/۳	-۲۶/۷
Q_5	۲۲/۲	-۲۲/۳
Q_6	۱۲/۴	-۱۱/۶
Q_7	۱۸/۵	-۱۹/۸
Q_8	۲۳	-۱۶/۶
Q_9	۲۷/۶	-۷/۴



شکل ۲. مقایسه مقدار جابه‌جایی برآوردشده با استفاده از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق با مقدار شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن ماتریس وزن‌های مختلف. نمودار سمت راست مربوط به مؤلفه شمالی-جنوبی، نمودار سمت چپ مربوط به مؤلفه شرقی-غربی.

مناسب‌تری را ارائه کرده است. مقایسه دیگری که می‌توان از جدول ۳، ارائه کرد به این صورت است که در حالتی که ماتریس وزن یا مدل تصادفی متناسب با زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها بر اساس توابع $\sin E$ ، $\cos E$ و توابع بهبودیافته به سه حالت توابع $\sin E$ ، $\cos E$ و توابع بهبودیافته می‌تواند نتایج بهتری را برای روش تعیین موقعیت مطلق دقیق ارائه کند. در جدول ۴، مقایسه بین اختلاف جابه‌جایی برآوردشده برای نقطه مورد نظر با مقدار جابه‌جایی واقعی شبیه‌سازی شده در اپک دوم ارائه شده است.

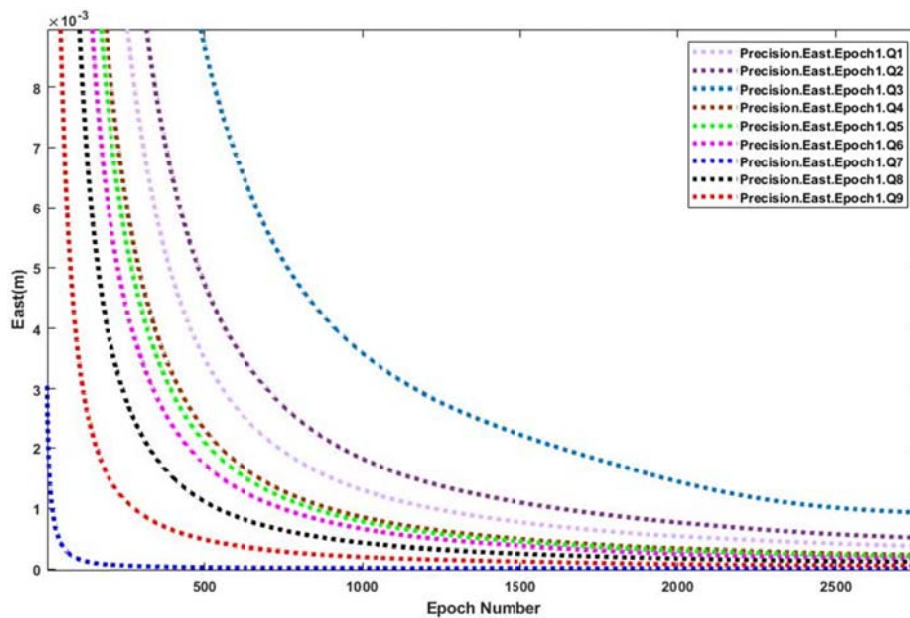
بر اساس شکل ۲ و جدول ۳، نتایج مربوط به ۹ نمونه مدل تصادفی برای تعیین ماتریس وزن مشاهدات عاری از یونسفرکد و فاز ارائه شده است. در حالت اول که ماتریس وزن بر اساس توابع $\sin E$ ارائه شده است، مدل وزن Q_2 نسبت به دو مدل دیگر توابع $\sin E$ از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. برای حالتی که ماتریس وزن بر اساس توابع $\cos E$ ایجاد شده باشد، مدل وزن Q_5 نتایج بهتری را ارائه کرده است. و در آخر با در نظر گرفتن ماتریس وزن بر اساس توابع $\sin E$ می‌توان نتیجه را به این صورت نشان داد که مدل وزن Q_8 عملکرد

جدول ۴. اختلاف مختصات افقی برآوردشده با جابه‌جایی شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن ماتریس وزن‌های مختلف در اپک دوم.

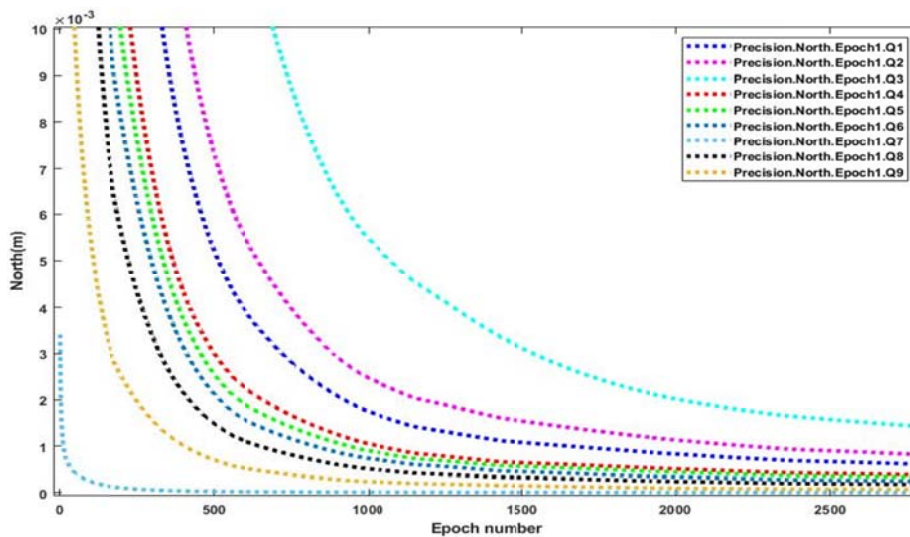
اختلاف جابه‌جایی شبیه‌سازی شده و برآوردشده		
ماتریس وزن	مؤلفه شمالی-جنوبی (میلی‌متر)	مؤلفه شرقی-غربی (میلی‌متر)
Q_1	۵/۲	۸/۱
Q_2	۴/۲	۰/۹
Q_3	-۴/۹	-۳/۵
Q_4	۲/۷	۱۱/۷
Q_5	۲/۸	۷/۳
Q_6	۱۲/۶	-۳/۴
Q_7	۶/۵	۴/۸
Q_8	۲	۱/۶
Q_9	-۲/۶	-۷/۶

Q_8 ارائه کرده است. در قسمت بعد با در نظر گرفتن بردار جابه‌جایی عملکرد این ۹ مدل مورد بررسی قرار گرفته است که بر این اساس کمترین اختلاف بین بردار واقعی شبیه‌سازی شده و بردار برآورد شده بین دو نقطه بر اساس ماتریس وزن Q_8 که مدل تصادفی نمایی را نشان می‌دهد ارائه شده است. دقت مؤلفه‌های افقی (شرقی و شمالی) نقطه مورد نظر در دو اپک زمانی بر اساس تأثیر ۹ مدل تصادفی بر روی نتایج تعیین موقعیت در شکل‌های ۳ تا ۶، نشان داده شده است.

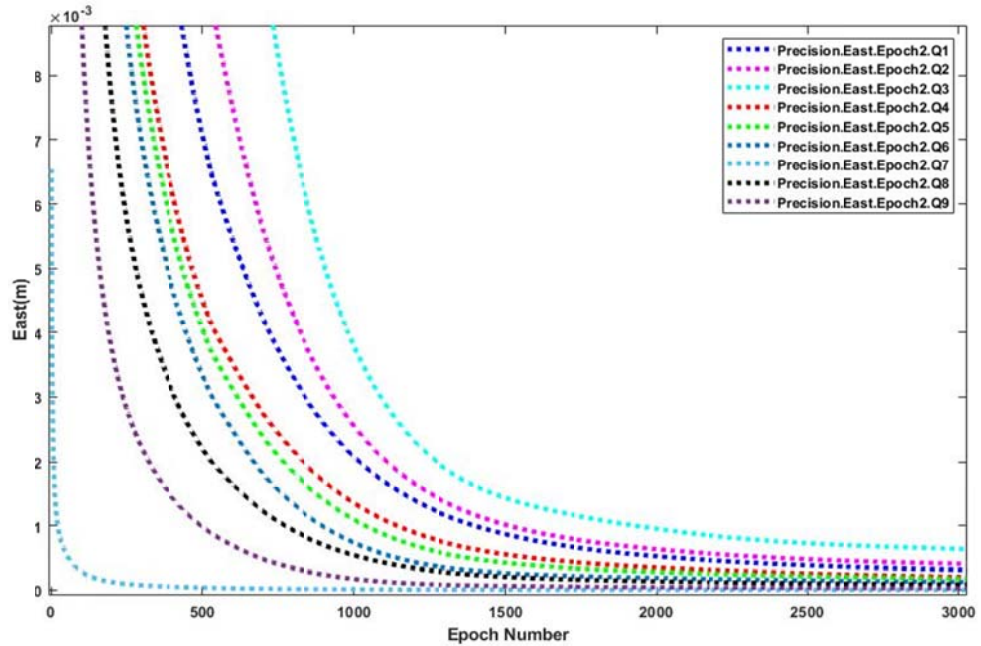
در جدول ۴، اختلاف بین مقدار جابه‌جایی شبیه‌سازی شده مؤلفه‌های افقی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی و مقادیر برآورد شده جابه‌جایی توسط ماتریس وزن‌های مختلف در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده مقدار جابه‌جایی در جهت مؤلفه شرقی-غربی بهترین عملکرد یا به عبارتی کمترین اختلاف در حالت وزندهی Q_2 مشاهده شده است. همین روند برای جابه‌جایی در جهت مؤلفه شمالی-جنوبی کمترین اختلاف را در حالت وزندهی



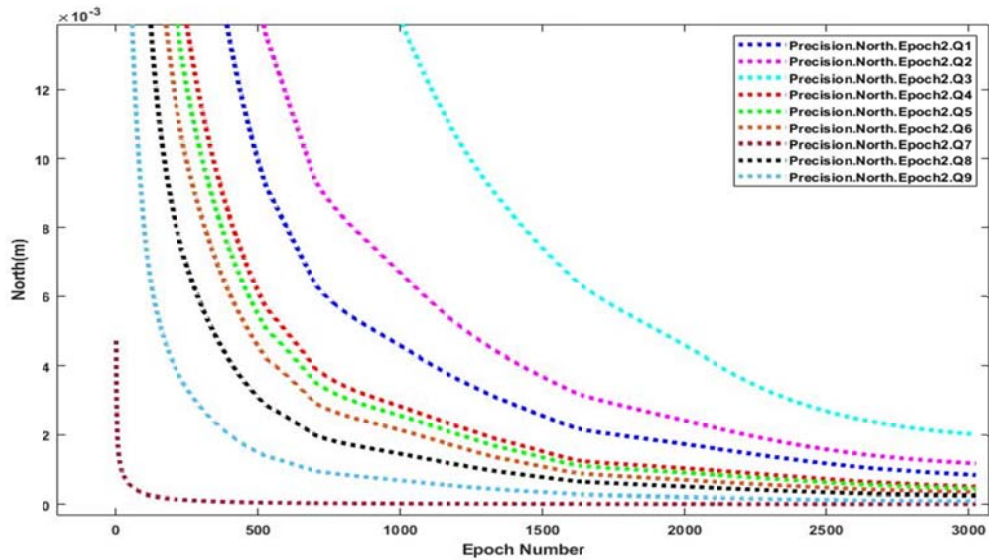
شکل ۳. دقت مختصات مؤلفه شرقی-غربی نقطه مورد نظر در اپک اول بر اساس تأثیر ۹ مدل تصادفی ارائه شده.



شکل ۴. دقت مختصات مؤلفه شمالی-جنوبی نقطه مورد نظر در اپک اول بر اساس تأثیر ۹ مدل تصادفی ارائه شده.



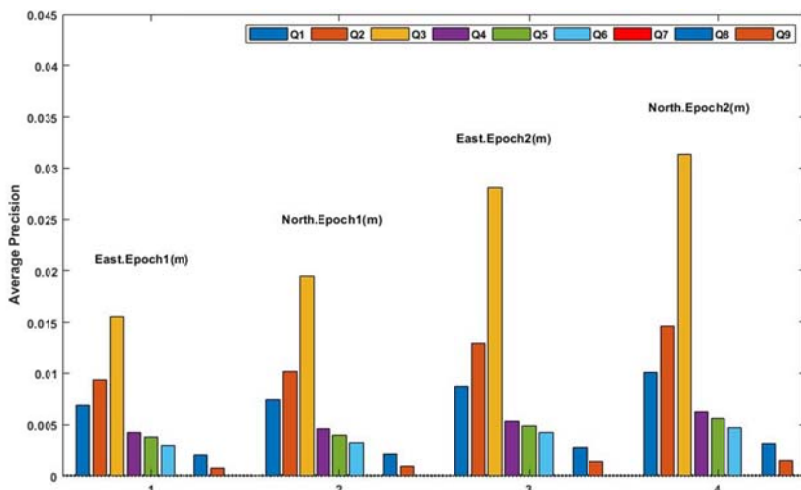
شکل ۵. دقت مختصات مؤلفه شرقی-غربی نقطه مورد نظر در اپک دوم بر اساس تأثیر ۹ مدل تصادفی ارائه شده.



شکل ۶. دقت مختصات مؤلفه شمالی-جنوبی نقطه مورد نظر در اپک دوم بر اساس تأثیر ۹ مدل تصادفی ارائه شده.

مثلتاتی بهبودیافته) بالاترین دقت را ارائه کرد. بعد از آن دو مدل تصادفی و ماتریس وزن‌های Q_8 و Q_9 (توابع نمایی) بالاترین دقت را نشان می‌دهد. در جدول ۵، مقدار بیشترین و کمترین و در شکل ۷، میانگین دقت برآوردشده برای مؤلفه‌های افقی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در حالت استفاده از ۹ مدل تصادفی ارائه شده است.

در شکل‌های ۳ تا ۶، می‌توان دید که در اپک اول و دوم در هنگام استفاده از ماتریس وزن‌های مختلف برای برآورد مختصات افقی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در نظر گرفتن مدل تصادفی به صورت توابع مثلتاتی بهبودیافته و توابع نمایی دقت بهتری را ارائه کند. به گونه‌ای که استفاده از مدل تصادفی برای وزندهی به صورت ماتریس وزن Q_7 (توابع



شکل ۷. مقدار میانگین دقت مختصات مؤلفه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نقطه موردنظر در دو اپک زمانی بر اساس تأثیر ۹ مدل تصادفی ارائه شده.

جدول ۵. مقدار بیشترین و کمترین دقت مختصات مؤلفه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نقطه موردنظر در دو اپک زمانی بر اساس تأثیر ۹ مدل تصادفی.

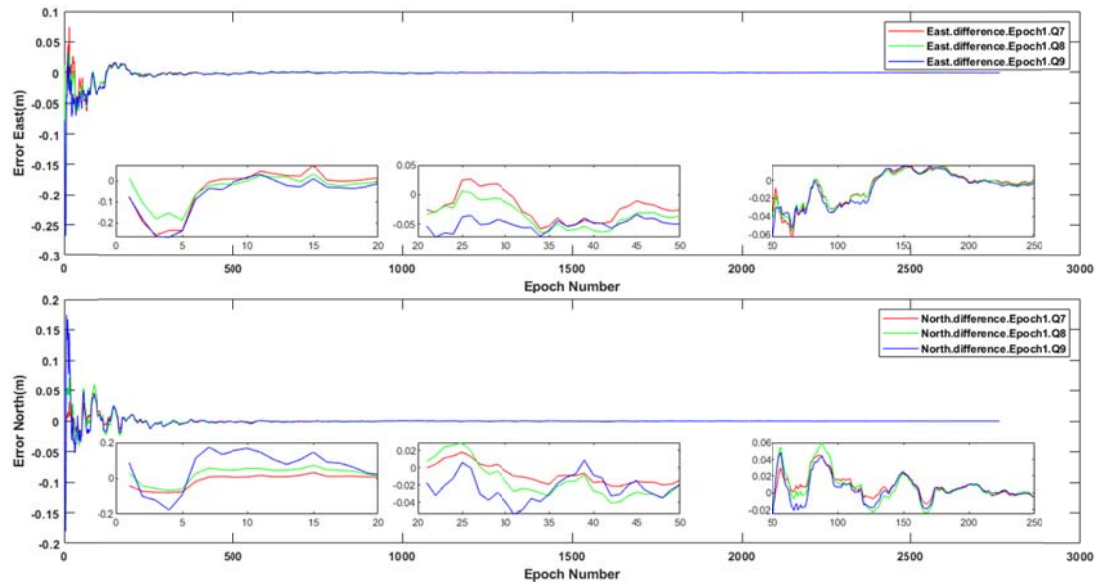
اپک دوم		اپک اول		ماتریس وزن	
		مؤلفه شرقی- غربی	مؤلفه شمالی- جنوبی		
۰/۹۰۷۷	۱/۲۵۰۹	۰/۶۷۱۷	۰/۹۹۴۱	ماکزیمم (متر)	Q ₁
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴	مینیمم (متر)	
۱/۳۳۰۸	۱/۸۵۴۱	۰/۹۱۲۲	۱/۴۳۱۱	ماکزیمم (متر)	Q ₂
۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	مینیمم (متر)	
۲/۸۳۶۲	۴/۲۷۵۹	۱/۶۱۳۰	۲/۲۹۸۸	ماکزیمم (متر)	Q ₃
۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۹	مینیمم (متر)	
۰/۵۸۰۵	۰/۷۹۶۸	۰/۴۴۵۹	۰/۵۷۲۵	ماکزیمم (متر)	Q ₄
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	مینیمم (متر)	
۰/۵۲۵۴	۰/۷۴۴۷	۰/۴۰۵۰	۰/۵۲۴۰	ماکزیمم (متر)	Q ₅
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	مینیمم (متر)	
۰/۴۸۱۰	۰/۶۵۴۲	۰/۳۳۱۶	۰/۴۱۶۲	ماکزیمم (متر)	Q ₆
۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	مینیمم (متر)	
۰/۰۰۴۷۱۱	۰/۰۰۶۵۴۲	۰/۰۰۳۴۱۴	۰/۰۰۵۴۳۷	ماکزیمم (متر)	Q ₇
۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۲	مینیمم (متر)	
۰/۳۰۷۸۴۳	۰/۴۲۱۲۹۳	۰/۲۱۱۴۱۲	۰/۲۹۴۵۴۴	ماکزیمم (متر)	Q ₈
۰/۰۰۰۲۴۵	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۱۷۸	۰/۰۰۰۱۱	مینیمم (متر)	
۰/۱۵۲۵۱۹	۰/۲۱۲۷۳۴	۰/۰۸۷۱۳۸	۰/۱۰۶۱۸۶	ماکزیمم (متر)	Q ₉
۰/۰۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۰۳۰	۰/۰۰۰۰۷۱	۰/۰۰۰۰۴۶	مینیمم (متر)	

همچنین مدل تصادفی حالت Q₈ و Q₉ که نمایانگر توابع نمایی می‌باشد را ارائه کرده است. به گونه‌ای که در این سه حالت به ترتیب میانگین مقدار خطا در کل بازه زمانی برداشت مشاهدات برای نقطه مورد نظر در دو اپک زمانی

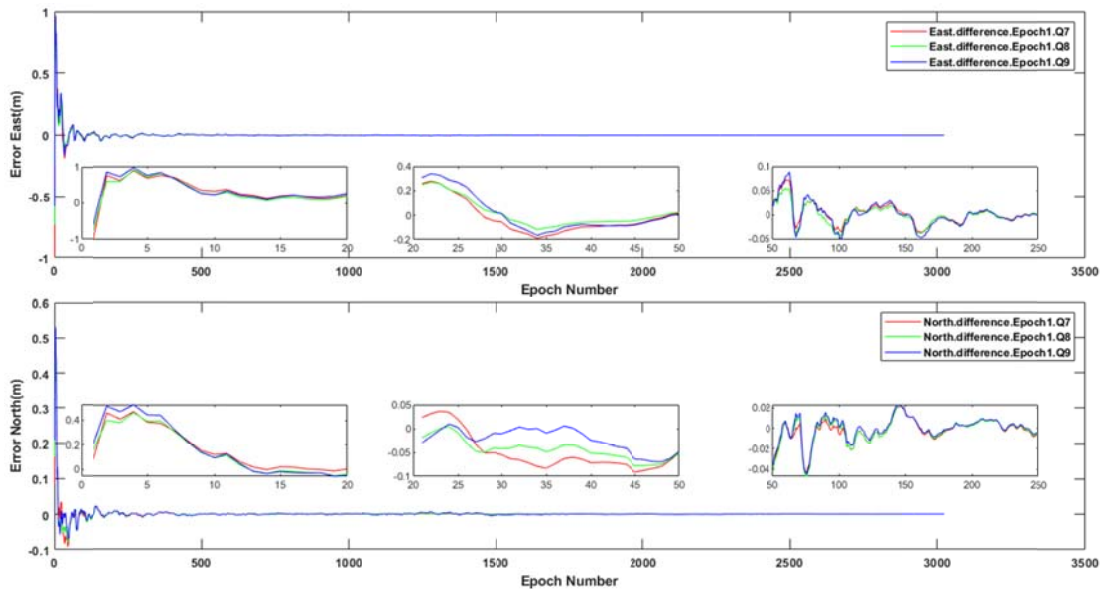
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵ و شکل ۷، هر دو مؤلفه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی برای نقطه مورد نظر در دو اپک زمانی کمترین مقدار خطا توسط مدل تصادفی حالت Q₇ که نشان دهنده توابع مثلثاتی بهبود یافته بوده و

ایک متوالی در نظر گرفته شده است. که بر اساس شکل- های ارائه شده اختلاف در اکثر موارد با افزایش تعداد ایک‌ها به کمترین مقدار رسیده است، که نشان دهنده دقت مؤلفه‌های برآورد شده می‌باشد. با توجه به ماتریس وزن‌های مختلف مورد استفاده، نحوه همگرا شدن مؤلفه‌های افقی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

برای مؤلفه شرقی-غربی بین ۰/۰۳ تا ۲/۸ میلی‌متر و برای مؤلفه شمالی-جنوبی بین ۰/۰۴ تا ۳/۱ میلی‌متر می‌باشد. بررسی همگرایی مختصات با در نظر گرفتن سه مدل تصادفی (Q_7, Q_8, Q_9) انجام گرفته است. نتایج مربوط به همگرایی دو مؤلفه مختصاتی در شکل‌های ۸ و ۹، ارائه شده است. نتایج به این صورت می‌باشد که برای هر مؤلفه مختصاتی، اختلاف مقدار برآورد شده در دو



شکل ۸. نحوه همگرایی مؤلفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نقطه مورد نظر در ایک اول با در نظر گرفتن سه مدل تصادفی (Q_7, Q_8, Q_9) .



شکل ۹. نحوه همگرایی مؤلفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نقطه مورد نظر در ایک دوم در نظر گرفتن سه مدل تصادفی (Q_7, Q_8, Q_9) .

با در نظر گرفتن مقدار همگرایی ۵ سانتی متر برای مؤلفه‌های افقی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نقطه مورد نظر در اپک اول با توجه به سه مدل مورد استفاده، این شرط همگرایی بعد از ۵ دقیقه و ۵۰ ثانیه در حالت استفاده از مدل تصادفی Q_7 ، Q_8 و Q_9 برای مؤلفه شرقی-غربی و بعد از ۸ دقیقه و ۵ ثانیه در حالت استفاده از مدل تصادفی Q_7 ، Q_8 و Q_9 برای مؤلفه شمالی-جنوبی قابل دست‌یابی می‌باشد. در نظر گرفتن میزان آستانه برای همگرایی در روش تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات GNSS به صورت مرسوم در چند حالت در نظر گرفته می‌شود. که در اکثر تحقیقات حد همگرایی ۳۰ سانتی متر، حد همگرایی یک دسی متر و در نهایت حد همگرایی ۵ سانتی متر در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق پایین‌ترین حالت که همان حد همگرایی ۵ سانتی متر (اختلاف مختصات ۵ سانتی متر بین دو اپک متوالی و حفظ همین روند تا انتهای پردازش) به عنوان معیار همگرایی پردازش در نظر گرفته شده است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت استفاده از مدل تصادفی دقیق در برآورد مختصات نقاط به کمک روش تعیین موقعیت مطلق دقیق با استفاده از مشاهدات GNSS، در این تحقیق به بررسی نقش مدل تصادفی وابسته به زاویه ارتفاعی پرداخته شده است. به این منظور چهار نمونه مدل تصادفی وابسته به ارتفاع مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا این چهار نمونه مدل تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت بهترین مدل انتخاب شد. دو راه کار مناسب برای انتخاب بهترین مدل در نظر گرفته شد. به این صورت که راه کار اول برای بررسی بهترین مدل استفاده از دقت مؤلفه‌های برآورد شده توسط روش تعیین موقعیت مطلق دقیق می‌باشد. در راه کار دوم نیز سرعت همگرایی هر کدام از این مدل‌ها با هم مقایسه شد. در نهایت با در نظر گرفتن این دو حالت بهترین مدل مورد استفاده در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق ارائه شد. در ادامه به بررسی یکی از کاربردهای

استفاده از مشاهدات تعیین موقعیت ماهواره‌ای تحت عنوان تشخیص جابه‌جایی پرداخته شده است. تشخیص میزان جابه‌جایی تحت تأثیر مدل تصادفی مورد استفاده در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق می‌باشد. به همین دلیل در حالت‌های مختلف تشخیص میزان جابه‌جایی با در نظر گرفتن تأثیر مدل تصادفی ارائه شده است. این مدل‌های تصادفی شامل استفاده از توابع مثلثاتی $\sin E$ ، توابع مثلثاتی $\cos E$ ، توابع مثلثاتی بهبود یافته و در نهایت توابع نمایی به عنوان رابطه مورد نظر برای نشان دادن وابستگی ماتریس وزن و یا همان مدل تصادفی به زاویه ارتفاعی می‌باشد. برای انجام این کار و بررسی نقش مدل تصادفی در برآورد موقعیت دقیق، از یک نقطه در دو اپک زمانی استفاده شده است. به گونه‌ای که در اپک دوم جابه‌جایی شبیه‌سازی شده ۲۵ میلی متر برای مؤلفه شرقی-غربی و جابه‌جایی ۱۵ میلی متر برای مؤلفه شمالی-جنوبی به کمک دستگاهی که دارای دقت زیر میلی متر می‌باشد اعمال شده است. در ابتدا از این چهار نمونه مدل تصادفی (که شامل ۹ نمونه ماتریس وزن مختلف بوده‌اند) برای به دست آوردن موقعیت نقطه در دو اپک زمانی استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده نزدیک‌ترین مقدار برآورد شده نسبت به مقدار شبیه‌سازی شده توسط چهار مدل Q_2, Q_5, Q_7, Q_8 که به ترتیب از نوع توابع مثلثاتی $\sin E$ ، $\cos E$ ، توابع مثلثاتی بهبود یافته و توابع نمایی می‌باشند به دست آمد. در میان این چهار مدل نزدیک‌ترین مقدار برآورد شده به مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل تصادفی Q_8 که از نوع توابع نمایی می‌باشد، حاصل شد. در قسمت بعدی تحقیق برای نقطه مورد نظر به کمک ۹ مدل تصادفی در نظر گرفته شده برای روش تعیین موقعیت مطلق دقیق اقدام به برآورد مختصات نقاط و همچنین دقت مختصات مؤلفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نقطه مورد نظر در اپک اول شد. بر اساس این نتایج بالاترین دقت برای این مؤلفه‌ها در زمان استفاده از مدل تصادفی Q_7, Q_9, Q_8 ارائه شد. مقدار میانگین خطا در این سه حالت برای مؤلفه شرقی-

به کمک سه مدل تصادفی مورد تأیید با بالاترین دقت و در نظر گرفتن مقدار همگرایی ۵ سانتی‌متر برای مؤلفه‌های افقی شرقی-غربی و شمالی-جنوبی، این شرط همگرایی بعد از ۵ دقیقه و ۵۰ ثانیه برای مؤلفه شرقی-غربی و بعد از ۸ دقیقه و ۵ ثانیه برای مؤلفه شمالی-جنوبی قابل دستیابی می‌باشد.

مراجع

- Abdel-salam, M. A. T., 2005, Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations. PhD Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada.
- Afifi, A. and El-Rabbany, A., 2013, Stochastic modeling of Galileo E1 and E5a signals. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 3(6), pp.188-192.
- Afifi, A., El-Rabbany, A., 2015, An innovative dual frequency PPP model for combined GPS/Galileo observations. *Journal of Applied Geodesy*, 9(1), 27-34.
- Amiri-Simkooei, A., 2007, Least-squares variance component estimation: theory and GPS applications. Delft University of Technology: Delft, The Netherlands.
- Amiri-Simkooei, A.R., Teunissen, P.J.G. and Tiberius, C.C.J.M., 2009, Application of least-squares variance component estimation to GPS observables. *Journal of Surveying Engineering*, 135(4), pp.149-160.
- Amiri-Simkooei, A.R., 2013, Application of least squares variance component estimation to errors-in-variables models. *Journal of geodesy*, 87(10-12), pp.935-944.
- Amiri-Simkooei, A.R., Zangeneh-Nejad, F. and Asgari, J., 2013, Least-squares variance component estimation applied to GPS geometry-based observation model. *Journal of Surveying Engineering*, 139(4), pp.176-187.
- Amiri-Simkooei, A.R., Jazaeri, S., Zangeneh-Nejad, F. and Asgari, J., 2016, Role of stochastic model on GPS integer ambiguity resolution success rate. *GPS solutions*, 20(1), pp.51-61.
- Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P. and Schuh, H., 2006, Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Bona, P., 2000, Precision, cross correlation, and time correlation of GPS phase and code observations. *GPS solutions*, 4(2), pp.3-13.
- Cai, C., Gao, Y., 2013, Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS solutions*, 17(2), 223-236.
- Euler, H. J., and Goad, C. 1991, On optimal filtering of GPS dual frequency observations without using orbit information *Bulletin Géodésique*, 65, 130-143.
- Chen, J., Zhang, Y., Wang, J., Yang, S., Dong, D., Wang, J. and Wu, B., 2015, A simplified and unified model of multi-GNSS precise point positioning. *Advances in Space Research*, 55(1), 125-134.
- Daneshmand, S., Broumandan, A., Sokhandan, N. and Lachapelle, G., 2013, GNSS multipath mitigation with a moving antenna array. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 49(1), pp.693-698.
- Defraigne, P., Baire, Q., 2011, Combining GPS and GLONASS for time and frequency transfer. *Advances in Space Research*, 47(2), 265-275.
- Dow, J.M., Neilan, R.E. and Rizos, C., 2009, The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems. *Journal of geodesy*, 83(3-4), pp.191-198.
- El-Rabbany, A.E., 1996, The effect of physical correlations on the ambiguity resolution and accuracy estimation in GPS differential positioning.
- Elsobeiey, M. and El-Rabbany, A., 2010, On stochastic modeling of the modernized global positioning system (GPS) L2C signal. *Measurement science and technology*, 21(5), p.055105.
- Euler, H.J. and Goad, C.C., 1991, On optimal filtering of GPS dual frequency observations without using orbit information. *Bulletin géodésique*, 65(2), pp.130-143.
- Geng, J., Teferle, F. N., Meng, X. and Dodson, A. H., 2011, Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. *Advances in space research*, 47(10), 1664-1673.
- Gerdan, G.P., 1995, A comparison of four methods of weighting double difference pseudorange measurements. *Australian surveyor*, 40(4), pp.60-66.
- Han, S., 1997, Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time

- GPS kinematic positioning. *Journal of Geodesy*, 71(6), pp.351-361.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E., 2007, GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media.
- Jin, X.X. and de Jong, C.D., 1996, Relationship between satellite elevation and precision of GPS code observations. *The Journal of Navigation*, 49(2), pp.253-265.
- Jonkman, N., 1988, Integer GPS-Ambiguity Estimation without the Receiver-Satellite Geometry; Delft University of Technology: Delft, The Netherlands.
- Karaim, M., Elsheikh, M., Noureldin, A. and Rustamov, R.B., 2018, GNSS error sources. In *Multifunctional Operation and Application of GPS*, 69-85, Intech.
- Koch, K.R., 1999, Parameter estimation and hypothesis testing in linear models. Springer Science & Business Media.
- Kouba, J., 2009, A guide to using International GNSS Service (IGS) products.
- Kouba, J. and Héroux, P., 2001, Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS solutions*, 5(2), pp.12-28.
- Kunysz, W., 2000, September. High performance GPS pinwheel antenna. In *Proceedings of the 2000 international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GPS 2000)* (pp. 19-22).
- Leandro, R. F. and M. C. Santos., 2007, Stochastic models for GPS positioning: An empirical approach. *GPS World* 18(2), 50-56
- Leick, A., Rapoport, L. and Tatarikov, D., 2015, GPS satellite surveying. John Wiley & Sons.
- Li, B., Lou, L. and Shen, Y., 2015, GNSS elevation-dependent stochastic modeling and its impacts on the statistic testing. *Journal of Surveying Engineering*, 142(2), p.04015012.
- Li, B., Shen, Y. and Xu, P., 2008, Assessment of stochastic models for GPS measurements with different types of receivers. *Chinese Science Bulletin*, 53(20), pp.3219-3225.
- Li, B., Shen, Y. and Lou, L., 2010, Efficient estimation of variance and covariance components: a case study for GPS stochastic model evaluation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), pp.203-210.
- Li, P. and Zhang, X., 2014, Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning. *GPS solutions*, 18(3), pp.461-471.
- Li, B., 2016, Stochastic modeling of triple-frequency BeiDou signals: estimation, assessment and impact analysis. *Journal of Geodesy*, 90(7), 593-610.
- Li, B., Zhang, L. and Verhagen, S., 2017, Impacts of BeiDou stochastic model on reliability: overall test, w-test and minimal detectable bias. *GPS solutions*, 21(3), pp.1095-1112.
- Petit, G. and Luzum, B., 2010, IERS conventions (2010) (No. IERS-TN-36). BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES SEVRES (FRANCE).
- Qian, K., Wang, J. and Hu, B., 2016, A posteriori estimation of stochastic model for multi-sensor integrated inertial kinematic positioning and navigation on basis of variance component estimation. *The Journal of Global Positioning Systems*, 14(1), p.5.
- Rizos, C., 1997, Principles and practice of GPS surveying. University of New South Wales.
- Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. and Grinter, T., 2012, Precise point positioning: is the era of differential GNSS positioning drawing to an end?
- Satirapod, C. and Luansang, M., 2008, Comparing stochastic models used in GPS precise point positioning technique. *Survey Review*, 40(308), pp.188-194.
- Schön, S. and Brunner, F.K., 2008, A proposal for modelling physical correlations of GPS phase observations. *Journal of Geodesy*, 82(10), 601-612.
- Seepersad, G. and Bisnath, S., 2014, Challenges in Assessing PPP Performance. *Journal of Applied Geodesy*, 8(3), 205-222.
- Teunissen, P.J.G., 2006, Testing theory: an introduction, 2nd edn. Delft University Press, Delft.
- Teunissen, P.J.G., 2007, Influence of ambiguity precision on the success rate of GNSS integer ambiguity bootstrapping. *Journal of Geodesy*, 81(5), pp.351-358.
- Tiberius, C.C.J.M. and Kenselaar, F., 2000, Estimation of the stochastic model for GPS code and phase observables. *Survey Review*, 35(277), 441-454.
- Tiberius, C. and Kenselaar, F., 2003, Variance component estimation and precise GPS positioning: case study. *Journal of surveying engineering*, 129(1), pp.11-18.
- Wang, J., Stewart, M.P. and Tsakiri, M., 1998, Stochastic modeling for static GPS baseline data processing. *Journal of Surveying Engineering*, 124(4), 171-181.
- Wang, J., Satirapod, C. and Rizos, C., 2002, Stochastic assessment of GPS carrier phase measurements for precise static relative positioning. *Journal of Geodesy*, 76(2), pp.95-104.
- Witchayangkoon, B., 2000, Elements of GPS precise point positioning. In *Spatial Information Science and Engineering*, University of Maine.
- Wu, J.T., Wu, S.C., Hajj, G.A., Bertiger, W.I. and Lichten, S.M., 1992, August. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. In

- Astrodynamic 1991, 1647-1660.
- Xu, G. and Xu, Y., 2016, GPS: theory, algorithms and applications. Springer.
- Yang, L., Li, B., Li, H., Rizos, C. and Shen, Y., 2017, The influence of improper stochastic modeling of Beidou pseudoranges on system reliability. *Advances in Space Research*, 60(12), 2680-2690.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. and Webb, F. H., 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of geophysical research: solid earth*, 102(B3), 5005-5017.

Evaluation of statistical models of precise point positioning based on satellites elevation angles

Farzaneh, S.^{1*}, Safari, A. R.² and Parvazi, K.³

1. Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Ph.D. Student Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 15 Oct 2019, Accepted: 9 June 2020)

Summary

Due to the importance of using an accurate stochastic model in estimation of the coordinates of points using the GNSS observation method, this study investigates the role of the elevation angle-dependent stochastic model. The least-squares estimation method is usually used in processing GNSS observations. This method requires the use of two essential models, one is functional model and the other is stochastic model. The functional model illustrates the relationship between observations and unknown parameters. The stochastic model presents the covariance matrix and the statistical properties (expectation) and dispersion of errors in observation, which expresses the accuracy and the correlation between the types of observations. A precise and detailed stochastic model for observations, expresses the receiver's internal noise, residual errors, and the correlation between the variables. Moreover, by choosing a suitable stochastic model, we can provide the necessary preconditions for solving the reliable phase ambiguity and precise positioning. In this study, we investigate and compare 9 stochastic models based on the satellite elevation angle. These 9 models are expressed as equations of four families of trigonometric functions $\sin E$, $\cos E$, improved trigonometric functions, and exponential functions. To do this, we use observations of a single point in two time epoch where simulated displacement was applied to it very precisely by the device. First, by using precise point positioning method, the horizontal coordinates of the point in two epochs were estimated by using 9 stochastic models. According to the accomplished comparison, we present the closest estimated value to the simulated real value of the stochastic models Q_2, Q_5, Q_7, Q_8 which are trigonometric functions $\sin E, \cos E$, improved trigonometric functions and exponential functions respectively. Among these four models, The results of exponential function Q_8 is closest to the simulated real value. Online services are then used to process point-of-view observations, according to which the two OPUS and AUSPOS services are most closest to the simulated real observations. Then the estimation of the accuracy of the horizontal components is examined by means of 9 presented stochastic models. According to the presented results, the highest accuracy and least error are related to the use of stochastic model Q_7 (improved trigonometric functions). Then, two stochastic models and matrix weights Q_9 and Q_8 (exponential functions) showed the highest accuracy. Using these three models with the highest accuracy, the average accuracy obtained for the East component is between 0.03 mm and 2.8 mm and for the North component is between 0.04 mm and 3.1 mm. In the next section, due to the accuracy obtained for the horizontal coordinate components in all epochs (sampling interval of 5 s) using these three stochastic models, fewer epochs are required to reach the level of accuracy of Dosimeter, Centimeter and Millimeter. In such a way that, for desired point, 277 epochs for the East component and 405 epochs for the North component are required to reach the millimeter precision level. Finally, considering the 5cm convergence condition for the horizontal components East and North, due to the three models used, this convergence condition is achievable after 5 minutes and 50 seconds for the East component and after 8 minutes and 5 seconds for the component North.

Keywords: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Precise Point Positioning, PPP accuracy, Convergence period, Stochastic model.

* Corresponding author:

saeed.farzaneh@gmail.com