

ترکیب مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی و ماهواره سنتینل-۳ با استفاده از روش درون‌یابی کولوکیشن کمترین مربعات جهت تهیه مدل تأخیر تروپوسفری

محمدرضا پورسلیمانی^۱، یزدان عامریان^{۲*}، هانی محبوبی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
mrpoorsoleymani@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
amerian@kntu.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
hanymahbuby@email.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۴۰۰، تاریخ تصویب مهر ۱۴۰۰)

چکیده

هدف اصلی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی، تعیین موقعیت دقیق نقاط در تمام شرایط آب و هوایی است. از طرفی امواج ارسالی از ماهواره‌های این سیستم‌ها از لایه‌های مختلف جو نظیر تروپوسفر عبور کرده و این امر منجر به ایجاد انکسار در مسیر حرکت موج و در نهایت تأخیر در دریافت امواج مذکور می‌گردد. از این جهت مطالعه تروپوسفر و تأثیر آن بر سیگنال‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی از اهمیت خاصی برخوردار است. تأخیر تروپوسفری به دو بخش خشک و تر تقسیم‌بندی می‌شود که با توجه به وابستگی بخش تر به تغییرات بخار آب به عنوان چالش‌برانگیزترین بخش تأخیر تروپوسفری مورد توجه بیشتری واقع می‌شود. در این مقاله هدف، مدل‌سازی تأخیر تر تروپوسفری زینتی در محدوده شهر لس‌آنجلس واقع در کشور آمریکا با استفاده از ترکیب داده‌های سنجنده OLCI ماهواره سنتینل-۳ با قدرت تفکیک مکانی بالا و داده مربوط به ۹۷ ایستگاه GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا است. روش درون‌یابی کولوکیشن کمترین مربعات به منظور مدل‌سازی مکانی-زمانی تأخیر تر تروپوسفری به کار گرفته شده است. به منظور برآورد ترند در روش کولوکیشن کمترین مربعات، از ترکیب داده‌های دو منبع فوق استفاده شد و یک رویه چهار بعدی (زمانی-مکانی) به داده‌های تأخیر تر تروپوسفری زینتی حاصل از سنجنده OLCI و ایستگاه‌های GPS برازش داده شد. در بخش برآورد سیگنال مشاهدات، به جای در نظر گرفتن یک تابع کوواریانس مکانی-زمانی، بازه زمانی مدل‌سازی را به زیر بازه‌های کوچک‌تر تقسیم کرده و توابع کوواریانس مکانی در هر زیربازه برآورد شده است. نتایج روش مقاله و نتایج حاصل از مدل ساستامینن که از داده‌های تحلیل‌شده GFS بهره می‌برد، با مقادیر نقاط کنترل مورد مقایسه قرار گرفت که RMS تأخیر تر برآورد شده در نقاط کنترل با روش کولوکیشن کمترین مربعات ۱/۸۶ سانتی‌متر بود، این در حالی است که RMS مدل ساستامینن برابر ۱۵/۹۷ سانتی‌متر است.

واژگان کلیدی: تأخیر تر تروپوسفری زینتی، کولوکیشن کمترین مربعات، سیستم تعیین موقعیت جهانی، کوواریانس مکانی زمانی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

ارائه خدمات ناوبری در تمامی شرایط آب و هوایی به کاربران، همواره به عنوان یکی از مزایای بسیار برجسته سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۱ به حساب می‌آید. سیستم تعیین موقعیت جهانی^۲ به عنوان گسترده‌ترین و پرکاربردترین GNSS همواره مورد استفاده قرار گرفته است. امواج ارسالی از ماهواره‌های این سیستم از لایه‌های مختلف جو عبور کرده و این امر منجر به ایجاد انکسار در مسیر حرکت موج و در نهایت تأخیر در دریافت امواج مذکور می‌گردد. این تأخیر به برآوردی ناصحیح از موقعیت گیرنده منجر می‌شود. از این جهت مطالعه اتمسفر و تأثیرهای آن بر سیگنال‌های GPS از اهمیت خاصی برخوردار است. اتمسفر را معمولاً به دو بخش اصلی تروپوسفر و یونسفر تقسیم می‌کنند. علت این تقسیم‌بندی تأثیر متفاوت این لایه‌ها بر امواج رادیویی است. بخش خنثی اتمسفر شامل تروپوسفر، تروپوپاز و استراتوسفر است که پایین‌ترین بخش اتمسفر است و ۷۰ درصد از جرم کلی اتمسفر زمین تا ارتفاع ۵۰ کیلومتر را شامل می‌شود. اثر این بخش روی مسیر سیگنال به صورت تأخیر است که اصطلاحاً به‌عنوان انکسار تروپوسفری نامیده می‌شود. در تعیین موقعیت با GPS انحراف ایجادشده در سیگنال‌های ارسالی از ماهواره در اثر عبور از لایه تروپوسفری از منابع عمده خطا محسوب می‌شود [۱]. شناخت کامل محیط تروپوسفر عملاً کار مشکلی است، زیرا تروپوسفر محیطی است که مؤلفه‌های آن به‌طور دائم با زمان و مکان تغییر می‌کنند. تأثیر این لایه روی امواج الکترومغناطیس بستگی به فرکانس امواج ندارد، لذا روش‌هایی که برای حذف خطای یونسفری با استفاده از فرکانس‌های مختلف وجود دارد، نمی‌تواند برای حذف اثر تروپوسفر نیز استفاده شود، راه حل مورد استفاده برای محاسبه تأخیر تروپوسفری معرفی آن به عنوان مجهول در معادلات مشاهدات و برآورد آن همراه با سایر مجهولات مانند موقعیت نقاط است. تأخیر تروپوسفری به درجه حرارت، رطوبت و فشار بستگی دارد و برحسب ارتفاع ایستگاه و توپوگرافی منطقه تغییر می‌کند. تأخیر تروپوسفری را به دو مؤلفه خشک و تر تقسیم‌بندی می‌کنند که مؤلفه خشک تأخیر تروپوسفر در راستای Zenith^۳ متأثر از

دما و فشار و مؤلفه تر تأخیر تروپوسفری در راستای Zenith^۴ علاوه بر وابستگی به دما و فشار به میزان رطوبت در طول مسیر سیگنال ارسالی از ماهواره نیز وابسته است. ZHD تقریباً ۹۰ درصد تأخیر کل تروپوسفری در راستای Zenith^۵ را شامل می‌شود و با استفاده از مدل‌های تجربی نظیر ساستامینن^۶ و هاپفیلد^۷ قابل مدل‌سازی و برآورد است، اما ZWD به دلیل پویایی بالا تغییرات بخار آب از لحاظ مکانی و زمانی در محیط تروپوسفر به چالش‌برانگیزترین بخش برای محاسبه ZTD تبدیل شده است. بنابراین مدل‌سازی مکانی و زمانی ZWD با دقت مناسب به منظور استفاده در تعیین موقعیت دقیق مورد توجه قرار گرفته است [۲]. یکی از روش‌های مطلوب مورد استفاده برای مدل‌سازی مکانی-زمانی ZWD بهره‌مندی از روش‌های درون‌یابی^۸ با استفاده از داده‌هایی نامتجانس و ترکیب آن‌ها برای برآورد دقیق‌ترین مدل از ZWD است. بنابراین با استفاده از روش‌های درون‌یابی این امکان فراهم می‌شود تا در مناطقی از محیط که از نظر مکانی و زمانی فاقد داده با دقت لازم است، برآوردی قابل اعتماد از پارامتر مد نظر امکان‌پذیر باشد. روش درون‌یابی مورد استفاده در این مقاله، روش کولوکیشن کمترین مربعات^۹ است و با استفاده از این روش برآورد رویه ZWD با توجه به در نظر گرفتن تغییرات مکانی و زمانی آن مورد بررسی قرار گرفته است [۳].

پرکاربردترین و مؤثرترین روش درون‌یابی مورد استفاده در ترکیب مشاهدات مختلف به منظور مدل‌سازی اتمسفر و سایر کاربردها در رشته ژئودزی روش LSC است. پس از بررسی‌های انجام شده در جنبه‌های مختلف رشته ژئودزی و استفاده از روش‌های درون‌یابی گوناگون به طور ویژه روش LSC در مدل‌سازی یونسفر و برآورد پارامترهای ژئوفیزیکی، حال سیر تکاملی استفاده از روش درون‌یابی LSC در مدل‌سازی تروپوسفر و ترکیب داده‌های مختلف به‌منظور تهیه مناسب‌ترین مدل تروپوسفری با توجه به منابع داده مورد استفاده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. اولین بار در سال ۱۹۹۲ اکرت و همکاران توانستند نرم‌افزاری تحت عنوان کامدی^{۱۰} را برای برآورد تأخیر تروپوسفری با استفاده از

^۴ Zenith wet Delay: ZWD^۵ Zenith Total Delay: ZTD^۶ Sastamoinen^۷ Hopfield^۸ Interpolation^۹ Least Squares Collocation: LSC^{۱۰} COMEIDE^۱ Global Navigation Satellite Systems: GNSS^۲ Global Positioning System: GPS^۳ Zenith Hydrostatic Delay: ZHD

شده بود را جمع‌بندی کردند و از نتایج آن برای تحلیل و بررسی در منطقه آلپ در کشور سوئیس که دارای نقاط با اختلاف ارتفاع زیاد است، استفاده کرد. مدل ارائه شده قدرت تفکیک مکانی بالایی داشت و به همین خاطر برای استفاده در پردازش‌های داده‌های تداخل سنجی راداری دریاچه مصنوعی^۵ مورد پیشنهاد قرار گرفت، اما با توجه به ویژگی‌های مدل ارائه شده، طیف وسیعی از کاربردها را می‌تواند در بر بگیرد. در نهایت مدل ZTD و مدل شکست‌پذیری کل تروپوسفری^۶ را ارائه دادند تا از آن‌ها برای حذف اثرات اتمسفری از تصاویر INSAR در مناطق کوهستانی استفاده شود. مدل تروپوسفری ارائه‌شده از ترکیب داده‌های متفاوت نظیر مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا با قدرت تفکیک مکانی بالا و داده‌های ایستگاه‌های کم‌هزینه GNSS استفاده کرده‌اند [۹].

با توجه به لزوم در نظر گرفتن مقدار تأخیر تروپوسفری در کاربردهای مختلف و همچنین مدل‌سازی با استفاده از ترکیب داده‌ها از جنس مختلف با یکدیگر و برآورد مدل دقیق‌تر، در این مقاله برای اولین بار مدل‌سازی ZWD با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره سنتینل-۳^۷ و همچنین ایستگاه‌های متراکم GPS موجود در منطقه لس‌آنجلس آمریکا مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- ترکیب و درونیابی داده‌ها به روش LSC

برای ترکیب داده‌های GPS و سنجنده OLCI^۸ و در نهایت درونیابی و تهیه مدلی برای ZWD در منطقه، ابتدا می‌بایست خروجی دو نوع داده که از جنس متفاوت هستند را به ZWD تبدیل کنیم و سپس از آن‌ها به عنوان ورودی در روش LSC استفاده شود، به همین منظور مراحل زیر را طی خواهیم کرد.

۲-۱- استخراج ZWD از داده ایستگاه‌های GPS

به منظور برآورد ZWD از مشاهدات ایستگاه GPS، در اولین گام با استفاده از نرم‌افزار BERNESE که هدف آن پردازش داده‌های GNSS است، به برآورد ZTD می‌پردازیم. این نرم‌افزار قدرتمند قابلیت پردازش ZTD به

ترکیب داده‌های مختلف از قبیل داده‌های ایستگاه‌های GNSS، مشاهدات مربوط به رادیوسوند، داده‌های مدل پیش‌بینی عددی آب‌وهوا و سایر داده‌هایی که در آینده در دسترس قرار گرفت، پیاده‌سازی کنند [۴]. هیرتر در سال ۱۹۹۸ به بررسی کامل برآورد ZTD در حالت سه بعدی و چهار بعدی پرداخت، وی همچنین میزان تأثیرگذاری تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌ها و تغییرات آزیموت ماهواره مورد استفاده را مورد بررسی قرارداد [۵]. در ادامه ترولر و همکاران به بررسی امکان برآورد و درونیابی ZTD با استفاده از داده‌های هواشناسی و در نظر گرفتن تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها پرداختند. همچنین تأثیر تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌ها در برآورد ZTD مورد بررسی قرارداد و در نهایت نتایج حاصله را با ZTD محاسبه‌شده در ایستگاه‌های GPS، مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند و به عنوان نتیجه نهایی ارائه‌شده دقت برآورد ZTD را بین ۱ الی ۲ سانتیمتر با توجه به تغییرات فصلی برآورد کرده است [۶].

هاتر و مایر درونیابی چهار بعدی با روش LSC برای بازیابی پروفیل‌های شکست‌پذیری تر^۱، دمای نقطه شبنم^۲ و رطوبت نسبی^۳ برای سه سال متوالی انجام دادند و در ادامه پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه تروپوسفر برای کشور سوئیس، از ترکیب شکست‌پذیری و ZTD برای مدل‌سازی تروپوسفر استفاده کردند [۷]. کیان در سال، ۲۰۱۶ مدل‌سازی منطقه‌ای تروپوسفر را برای مناطقی با توپوگرافی^۴ متغیر انجام داد و از روش LSC به‌عنوان بهترین روش برای تخمین پارامترهای تروپوسفری (به طور خاص ZWD) استفاده کرد. علاوه بر روش LSC، چهار روش مدل درونیابی خطی، مدل ترکیب خطی، مدل خطی بر اساس فاصله و مدل تقسیم‌بندی شده مسطحاتی و ارتفاعی را مورد ارزیابی قرارداد. میزان تأثیرپذیری مقادیر ZWD از ارتفاع و میزان تأثیر وسعت منطقه بر مدل‌سازی ZWD و همچنین میزان خطای درونیابی مدل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نهایتاً به بررسی میزان اثربخشی مدل ایجادشده با توجه به پیکربندی شبکه (تعداد و طول خطوط مبنا و توزیع ایستگاه‌های مرجع) پرداخت [۸]. ویلگان و گیگر تمام مطالعات قبلی که در مناطق مختلف با روش LSC انجام

^۵ Interferometric Synthetic Aperture Radar: InSAR

^۶ Total Refractivity

^۷ Sentinel-3

^۸ Ocean and Land Color Instrument: OLCI

^۱ Wet Refractivity

^۲ Dew Point Temperature

^۳ Relative Humidity

^۴ Topography

روش تعیین موقعیت نقطه‌ای دقیق^۱ با بالاترین قدرت تفکیک زمانی ممکن یعنی ۱۵ دقیقه را داراست [۱۰]. PPP یک روش تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات غیر تفاضلی و دو فرکانس (کد و فاز) یک گیرنده تنها می‌باشد که اساس آن به کارگیری اطلاعات دقیق مداری و ساعت ماهواره‌ها (به عنوان مثال محصولات IGS^۲) است. PPP می‌تواند در هر نقطه روی کره زمین و در هر زمان بدون نیاز مستقیم به مشاهدات ایستگاه‌های مرجع، امکان رسیدن به موقعیت دقیق را فراهم سازد. با توجه به اینکه از مشاهدات فاز موج حامل استفاده می‌شود، در روش PPP می‌بایست علاوه بر موقعیت ایستگاه، آفست ساعت ایستگاه و مقدار ZTD در ایستگاه، ابهام فاز اولیه را برای تمامی ماهواره‌ها حل نماید. در PPP تمامی منابع خطا از قبیل اثرات اتمسفری، اثر نسبیت، جابه‌جایی ایستگاهی در اثر تغییر شکل زمین، تصحیحات مرکز فاز آنتن و غیره بایستی در نظر گرفته شوند، از این رو مدل‌سازی منابع خطا در این روش پیچیده است. معادلات مشاهدات کد و فاز روش PPP به صورت زیر قابل بیان است.

$$p_{r,IF}^s = L_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + e_{IF} \quad (۱)$$

$$\varphi_{r,IF}^s = L_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_{IF} A_{IF} + \varepsilon_{IF} \quad (۲)$$

در روابط فوق، $p_{r,IF}^s$ ترکیب خطی عاری از یونسفر کد، $\varphi_{r,IF}^s$ ترکیب خطی عاری از یونسفر فاز موج حامل، L_r^s فاصله هندسی بین موقعیت ماهواره در زمان ارسال سیگنال به گیرنده تا موقعیت گیرنده در زمان دریافت سیگنال از ماهواره، dt_r خطای ساعت گیرنده، dt^s خطای ساعت ماهواره، c سرعت نور در خلأ، T_r^s تأخیر مسیر سیگنال در اثر عبور از تروپوسفر، A_{IF} ابهام فاز ناصحیح فاز موج حامل ترکیب خطی عاری از یونسفر، λ_{IF} طول موج حامل فاز ترکیب عاری از یونسفر و e_{IF}, ε_{IF} نویز مشاهدات مربوطه را در بر می‌گیرند که شامل خطای چند مسیری شبه فاصله ترکیب عاری از یونسفر و ترکیبات فاز حامل است [۱۱].

گام بعدی برای دستیابی به مقدار ZWD در ایستگاه‌های GPS، برآورد مقدار ZHD و تفریق آن‌ها از

مقادیر ZTD برآورد شده توسط نرم‌افزار BERNESE است. برای این منظور می‌توان از مدل‌های پیش‌بینی جهانی نظیر ساستامین و هاپفیلد استفاده کرد. در این مقاله از مدل ساستامین برای برآورد ZHD در ایستگاه‌های مد نظر استفاده گردید. مدل ساستامین یکی از پرکاربردترین و مناسب‌ترین مدل‌های پیش‌بینی است. این مدل برگرفته از قانون گازها بوده و مدلی استاندارد است. ساستامین مؤلفه خشک تأخیر در راستای زینت (قائم ایستگاه) را با رابطه زیر بیان کرد. همان‌طور که در رابطه (۳) مشاهده می‌کنید، برای برآورد ZHD نیازمند اطلاع از تغییرات درجه حرارت و فشار در محل ایستگاه خواهیم بود، به همین منظور این مؤلفه‌ها را بایستی از منابع معتبر و با دقت نظیر مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا استخراج و استفاده کرد [۱۲].

$$ZHD = \frac{0.002277P_s}{(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00000028H_s)} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) H_s ارتفاع ایستگاه از سطح دریا برحسب کیلومتر، P_s فشار جو در ایستگاه برحسب میلی بار و φ عرض جغرافیایی ایستگاه است. حال با استفاده از رابطه (۴) مقادیر ZWD را برای ایستگاه‌های GPS برآورد می‌کنیم [۱۲].

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (۴)$$

۲-۲- استخراج ZWD از داده ماهواره سنتینل-۳

سنجنده OLCI تعبیه شده بر روی ماهواره Sentinel-3، قادر به اندازه‌گیری بخار آب تجمعی^۳ بر حسب کیلوگرم بر مترمربع است. اما برای ترکیب این داده با مقادیر ZWD به دست آمده از پردازش ایستگاه‌های GPS و استفاده از آن‌ها در روش LSC، اعمال تبدیلاتی به خروجی سنجنده OLCI لازم است تا بتوان IWV را به ZWD تبدیل کرد. اولین گام تبدیل IWV به بخار آب قابل بارش^۴ برحسب میلی‌متر است که با توجه به رابطه (۵) این ارتباط برقرار می‌شود [۱۳]:

$$IWV = \rho.PWV \quad (۵)$$

^۳ Integrated Water Vapor: IWV
^۴ Precipitable Water Vapor: PWV

^۱ Precise Point Positioning: PPP
^۲ International GNSS Service: IGS

۳-۲- تئوری روش کولوکیشن کمترین مربعات

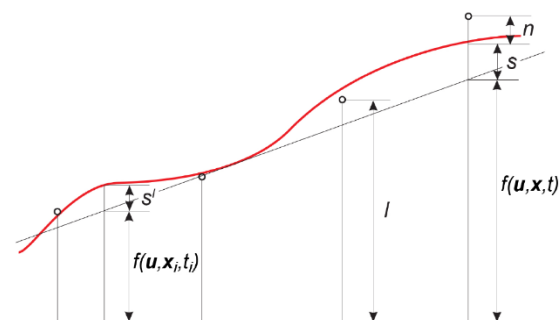
کولوکیشن کمترین مربعات یک روش پیش‌بینی بر مبنای تئوری‌های آماری است که با استفاده از این روش امکان پیش‌بینی اندازه یک کمیت در حوزه‌ی مکانی و زمانی داده‌ها به طور پیوسته امکان‌پذیر است. عوامل متعددی نظیر، دقت اندازه‌گیری داده، تراکم و توزیع مکانی و زمانی داده‌ها، مدل کوواریانس بکار گرفته‌شده و دقت برآورد پارامترهای آن در پیش‌بینی قابل اطمینان از کمیت مورد مطالعه با استفاده از LSC تأثیرگذار هستند [۳]. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های پیوسته در محیط مورد بررسی و لزوم استفاده از داده‌های پراکنده با تعداد محدود، کیفیت پیش‌بینی به شدت وابسته به مدل کوواریانس در نظر گرفته‌شده است، به همین خاطر تعیین مدل کوواریانس مناسب در LSC به عنوان مهم‌ترین بخش محسوب می‌شود. در ادامه تئوری LSC و راهکار اتخاذشده برای استفاده از این روش در درون‌یابی مکانی-زمانی ZWD در منطقه مورد مطالعه استفاده خواهد شد [۳].

۳-۲-۱- استفاده از LSC در درون‌یابی ZWD

رابطه بنیادین کولوکیشن کمترین مربعات که اصطلاحاً به آن مدل ترند^۲، سیگنال و نویز گفته می‌شود، به صورت زیر قابل بیان است و در شکل (۱) نشان داده شده است [۷].

$$I = f(u, r, t) + s + n \quad (9)$$

در رابطه فوق، I بیانگر بردار مشاهدات، $f(u, r, t)$ تابع ترند است که سیر کلی تغییرات داده در مکان و زمان را نشان می‌دهد، u بردار پارامترهای مجهول، $r(x, y, z)$ بردار مکان نقاط، t زمان، s بخش سیگنال و n به بخش نویز اشاره دارد.



شکل ۱- بخش‌های مختلف در یک سری مشاهدات LSC [۶]

که در این رابطه ρ چگالی آب مایع و برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. حال رابطه بین PWV و ZWD را به صورت زیر می‌توان نوشت [۱۳]:

$$PWV = \Pi(T_m).ZWD \quad (6)$$

در رابطه فوق Π ضریب تبدیل و کمیتی بدون واحد است. مقدار این ضریب تبدیل به مکان، عرض جغرافیایی، فصل و آب‌وهوا منطقه مورد مطالعه بستگی دارد و دامنه تغییرات آن بین ۰/۱۲ الی ۰/۱۸ متغیر است [۱۴]. این ضریب با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\Pi = [10^{-6}(k_3 / T_m + k_2')R_v\rho]^{-1} \quad (7)$$

در رابطه فوق R_v ثابت ویژه گاز برای بخار آب و برابر $461.5 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ است، k_3 و k_2' ثابت‌های انکسارپذیری اتمسفر و به ترتیب برابر با $10^{-8} \times 3.732 \text{ K}^2 \text{ mbar}^{-1}$ و $10^{-8} \times 2.2 \text{ kmbar}^{-1}$ است. مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مؤلفه در رابطه (۷) میانگین وزن دار دمای اتمسفر^۱ (T_m) برحسب کلوین است. T_m با روش‌های گوناگونی قابل محاسبه است که برحسب دقت مورد نیاز و داده‌های در دسترس می‌توان یکی از روش‌ها را انتخاب نمود. در این مقاله T_m بر اساس رابطه ارائه‌شده توسط بویس در سال ۱۹۹۲ که تابعی از دمای سطحی در منطقه است، مورد محاسبه قرار گرفته است. مزیت مهم این رابطه پیچیدگی کمتر و دقت مناسب‌تر نسبت به روش‌های دیگر است. رابطه ارائه شده به صورت زیر قابل بیان است [۱۵]:

$$T_m = 0.72T_s + 70.2 \quad (8)$$

در رابطه (۸)، T_s بیانگر دمای سطحی برحسب کلوین در نقاط مورد نظر است که از منابع معتبر نظیر داده‌های باز تحلیل‌شده ERA-5 قابل‌دستیابی است. در نهایت با برآورد Π و جایگذاری آن در رابطه (۶) می‌توان به برآوردی از ZWD در نقاط موردنظر در منطقه دست یافت. در مرحله بعد ZWD برآورد شده از دو منبع داده مذکور را با استفاده از الگوریتم و روش LSC با یکدیگر ترکیب کرده و از آن برای درون‌یابی در مناطق فاقد اطلاعات از مؤلفه ZWD استفاده خواهیم کرد.

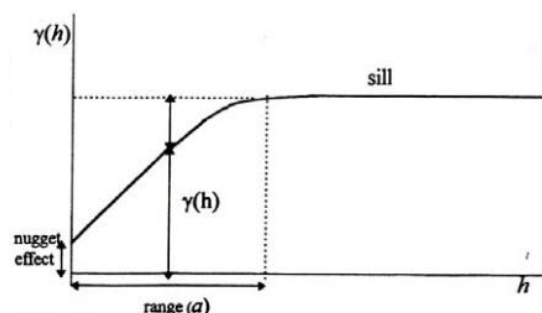
^۲ Trend

^۱ Weighted Mean Temperature

اصلی و قلب زمین آمار^۵ به شمار می‌آید که ساختار ارتباط مکانی بین نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تابع سمی‌واریوگرام به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (11)$$

به طوری که $\hat{\gamma}(h)$ مقدار واریوگرام برای تعداد N جفت نمونه است که با فاصله h از یکدیگر جدا شده‌اند، $z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه x_i و $z(x_i + h)$ مقدار مشاهده شده متغیری که به فاصله h از x_i قرار دارد. در واریوگرافی^۶ برای تشریح و مدل‌سازی رفتار واریوگرام از سه مؤلفه، دامنه تأثیر^۷، سقف یا حد آستانه^۸ و اثر قطعه‌ای^۹ استفاده می‌شود. در شکل (۲) این سه مؤلفه نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲- بخش‌های مختلف واریوگرام [۱۷]

در گام دوم هدف برآورد مقادیر کوواریانس تجربی در مراکز دسته با استفاده از مقادیر واریوگرام تجربی محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱۱) است، با محاسبه مقدار sill که برابر با واریانس کل داده‌های ZWD است و با استفاده از رابطه (۱۲) که بیانگر ارتباط بین مقادیر کوواریانس تجربی در مراکز دسته و مقادیر واریوگرام تجربی در آن نقاط است، این امکان فراهم می‌شود [۱۸].

$$\hat{\gamma}(h) = C(0) - C(h) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $C(0)$ بیانگر مقدار واریانس کل داده‌ها، $C(h)$ مقدار کوواریانس تجربی در فاصله h و $\gamma(h)$ مقدار واریوگرام در فاصله h است.

به منظور انجام محاسبات در LSC ابتدا شناسایی و حذف ترند از روی مشاهدات لازم است تا پس از برآورد سیگنال برای بازسازی دوباره مشاهدات به مقادیر محاسباتی اضافه شود. عدم مدل‌سازی درست ترند احتمال بروز خطا در محاسبات را بسیار افزایش خواهد داد. در صورت عدم وجود مدل فیزیکی از رفتار کمیت مورد مطالعه برای تعیین ترند، با استفاده از برازش کمترین مربعات رویه یا منحنی بر داده‌ها می‌توان تابعی را تحت عنوان ترند معرفی کرد. رابطه تعیین‌شده برای ترند بر اساس ماهیت و رفتار فیزیکی ZWD در منطقه به شکل زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$ZWD(x,y,z,t) = ZWD_0 + [a_{ZWD} + b_{ZWD}(x-x_0) + c_{ZWD}(y-y_0) + d_{ZWD}(t-t_0)] \cdot \exp\left(-\frac{z-z_0}{H_{ZWD}}\right) \quad (10)$$

در رابطه فوق، (x_0, y_0, z_0, t_0) بیانگر مختصات کارتزین و زمان نقطه مرجع که برابر با میانگین‌گیری از هر مؤلفه مختصاتی در تمام نقاط است و همچنین در خصوص زمان مرجع، زمان تصویربرداری ماهواره به عنوان این مؤلفه در نظر گرفته شده است. (x, y, z, t) مختصات کارتزین و زمان در نقاط مشاهداتی، ZWD_0 مقدار ZWD در نقطه مرجع و برابر با میانگین تمامی داده‌های ZWD و (a, b, c, d, H_{ZWD}) پارامترهای مجهول ترند هستند. به منظور برآورد پارامترهای مجهول ترند، از سرشکنی کمترین مربعات غیرخطی^۱ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ-مارکوات^۲ بهره گرفته شده است [۷].

۲-۳-۲ برآورد تابع کوواریانس و سیگنال

تابع کوواریانس به نوعی اصلی‌ترین نقش را در LSC ایفا می‌کند. ارتباط بین فضای مشاهدات و فضای درون‌یابی یا پیش‌بینی از طریق کوواریانس‌ها برقرار می‌شود که حاصل تابع کوواریانس منتخب است. به منظور برآورد تابع کوواریانس مناسب برای بیان ارتباط بین مشاهدات ZWD، مراحل به این شکل طی می‌شود. اولین گام رسم واریوگرام^۳ برای داده‌ها است. سمی‌واریوگرام^۴ یا به اختصار واریوگرام که نمودار واریانس بر مبنای فاصله بین نمونه‌ها است، رکن

^۵ Geostatistics

^۶ Variography

^۷ Range

^۸ Sill

^۹ Nugget Effect

^۱ Non-linear least square adjusment

^۲ Levenberg-Marquardt optimization algorithm

^۳ Variogram

^۴ Semi-variogram

در رابطه (۱۴)، C_{sl} ماتریس کراس کوواریانس بین بردار سیگنال مشاهدات و سیگنال نقاط پیش‌بینی، ZWD_{obs} مقدار ZWD در نقاط مشاهداتی و در اپک مورد مطالعه، ZWD_{trend} میزان برآورد ZWD در نقاط مشاهداتی و اپک مطالعاتی مشخص توسط تابع ترند و S بردار سیگنال تصادفی نقاط پیش‌بینی در اپک مطالعاتی است. بخش نویز^۶ در رابطه (۹) با توجه به عدم شناخت ماهیت این خطا قابل برآورد نمی‌باشد و از آن در محاسبات صرف نظر می‌شود. پس از برآورد بخش سیگنال در نقاط پیش‌بینی با اضافه کردن آن به مقادیر برآورد شده توسط مدل LSC در نقاط پیش‌بینی و در اپک‌های دلخواه قابل برآورد است و با این روش در مناطقی که فاقد اطلاعات ZWD هستند امکان درون‌یابی این پارامتر به صورت مکانی و زمانی فراهم است [۳].

$$ZWD_{model} = s + ZWD_{trend} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، S سیگنال برآورد شده در نقاط پیش‌بینی و در اپک مدنظر، ZWD_{trend} میزان برآورد ZWD در نقاط پیش‌بینی و اپک مطالعاتی مشخص توسط تابع ترند و ZWD_{model} برآورد نهایی مقدار ZWD در نقاط پیش‌بینی می‌باشند.

در نهایت به منظور ارزیابی روش مقاله، نتیجه روش مقاله و نتیجه مدل ZWD ساستامین با استفاده از مشاهداتی که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، مقایسه شده و RMS تفاضلات به عنوان معیار برای مقایسه استفاده می‌شود. [۱۲].

$$ZWD = 0.002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، e_s فشار بخار آب برحسب میلی بار، T_s دمای سطحی برحسب کلون است.

۳- نتایج عددی

در این بخش ابتدا به معرفی منطقه مورد مطالعه و سپس منابع داده مورد استفاده، پرداخته خواهد شد و در ادامه نتایج عددی حاصل از پردازش‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار خواهند گرفت.

^۶ Noise

در گام سوم برازش یک تابع مناسب به مقادیر کوواریانس تجربی مورد هدف قرار می‌گیرد. با توجه به رفتار کمیت مورد مطالعه و با استفاده از توابع کوواریانس رایج به طور مثال تابع نمایی^۱، گوسی^۲، کروی^۳ و لگاریتمی^۴، بهترین تابع انتخاب می‌شود. در این پژوهش با توجه به رفتار ZWD، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع از لحاظ برازش کمترین مربعات بر مقادیر کوواریانس تجربی بین مشاهدات مورد استفاده قرار گرفت و رابطه آن به شکل زیر بیان می‌شود [۱۹].

$$C(p_i, p_j) = ae^{\frac{-(d_{ij} - b)}{c}} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، $C(p_i, p_j)$ برابر با مقدار کوواریانس بین اندازه کمیت فیزیکی مورد نظر در دو نقطه‌ی p_i و p_j ، d_{ij} فاصله بین دو نقطه و (a, b, c) پارامترهای مجهول تابع نمایی می‌باشند که با استفاده از مقادیر کوواریانس تجربی محاسبه شده در هر مرکز دسته $(C(h))$ و جایگذاری آن‌ها در سمت چپ رابطه (۱۳) و همچنین برابر قرار دادن مقدار d_{ij} با h مربوط به هر مرکز دسته و استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات غیرخطی قابل برآورد هستند. پس از تعیین پارامترهای مجهول تابع کوواریانس نمایی، با استفاده از رابطه (۱۳) امکان محاسبه کوواریانس بین هر جفت نقطه‌ی دلخواه با فاصله مشخص در منطقه فراهم می‌شود.

تعیین بخش تصادفی یا همان سیگنال رابطه (۹)، با استفاده از تابع کوواریانس تجربی تعیین‌شده و برآورد ماتریس کراس کوواریانس^۵ بین مشاهدات و مجهولات در هر اپک مشاهداتی به صورت مجزا و صرفاً به صورت مکانی قابل انجام است. ماتریس کراس کوواریانس بیانگر میزان کوواریانس مکانی بر مبنای فاصله بین نقاط مشاهداتی و نقاط مجهول یا پیش‌بینی است. بردار سیگنال تصادفی در صورت هم وزن بودن مشاهدات با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳].

$$s = C_{sl} (ZWD_{obs} - ZWD_{trend}) \quad (14)$$

^۱ Exponential

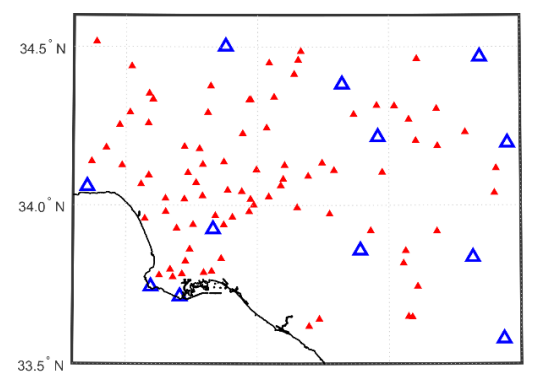
^۲ Gaussian

^۳ Spherical

^۴ Logarithmic

^۵ Cross covariance matrix

منطقه انتخابی در کشور آمریکا و به مرکزیت شهر لس‌آنجلس برای بررسی اهداف این مقاله مورد مطالعه قرار گرفت. دلیل انتخاب این منطقه از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی است، شرایط آب و هوایی بسیار متغیر با توجه به نزدیکی شهر لس‌آنجلس به نواحی ساحلی و همچنین غنی بودن این منطقه از منابع داده‌ی مختلف در دسترس، از مهم‌ترین دلایل این انتخاب به شمار می‌آیند. با توجه به هدف مقاله که ترکیب داده GPS و داده مربوط به ماهواره Sentinel-3 است، این منابع داده به همراه داده‌ای که برای ارزیابی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، شرح داده می‌شوند. اولین دسته از مشاهدات مورد استفاده، ایستگاه‌های GPS موجود در منطقه است. منطقه مطالعاتی علاوه بر سواحل، مناطق کوهستانی را هم در بر می‌گیرد، به همین خاطر استفاده از شبکه ایستگاه‌های GPS متراکم در منطقه ضروری است. به منظور مدل‌سازی ZWD و ارزیابی روش به کار گرفته‌شده از ۸۵ ایستگاه شبکه UNAVCO (unavco.org/data/gps-gnss) با تراکم مناسب همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌کنید، استفاده شده است و همچنین ۱۲ ایستگاه از این شبکه به عنوان ایستگاه کنترل در نظر گرفته‌شده است. اطلاعات مربوط به ایستگاه‌ها در روز ۱۱ ژوئن سال ۲۰۱۸ اخذ شده است، این تاریخ با توجه به زمان تصویربرداری ماهواره Sentinel-3 تعیین شده است.



شکل ۳- پراکندگی ایستگاه‌های GPS در سال ۲۰۱۸ (مثلث‌های قرمز رنگ نماد ایستگاه‌های مورد استفاده در مدل‌سازی و مثلث‌های آبی رنگ نماد ایستگاه‌های کنترل می‌باشند)

دسته دوم از داده‌های مورد استفاده در ترکیب به روش کولوکیشن کمترین مربعات، اطلاعات اخذ شده توسط سنجنده منفعل^۱ OLCI ماهواره Sentinel-3 در همان روز ۱۱ ژوئن

سال ۲۰۱۸ است. این اطلاعات شامل مقادیر I WV برحسب کیلوگرم بر مترمربع با قدرت تفکیک مکانی فوق‌العاده ۳۰۰ متر است. همچنین دوره زمانی اخذ داده ماهواره Sentinel-3 برابر با ۰/۹ روز است و سنجنده OLCI دارای ۲۱ باند طیفی با محدوده طیفی ۳۹۰ الی ۱۰۴۰ نانومتر است و همچنین از ۵ دوربین به منظور کاهش دادن اثرات تابش نور خورشید استفاده کرده است. هر تصویر این ماهواره منطقه‌ای از سطح زمین به ابعاد ۱۲۷۰ در ۱۲۷۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد. اطلاعات تکمیلی در مورد ماهواره Sentinel-3 و سنجنده OLCI در سایت (<https://sentinels.copernicus.eu>) به طور مفصل بیان شده است. بزرگ‌ترین عیب این سنجنده عدم کارایی در مناطق با پوشش ابر (به دلیل منفعل بودن سنجنده) است به طوری‌که در مناطق پوشیده شده از ابر داده‌ای در اختیار کاربر قرار نمی‌دهد. به همین خاطر تصویر انتخاب شده در کار تحقیقاتی ما دارای کمترین مقدار پوشش ابر (کمتر از ۴ درصد) است [۲۰].

دسته سوم داده‌ها به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل LSC مورد استفاده قرار خواهند گرفت. داده‌های تحلیل شده سیستم پیش‌بینی جهانی^۲ که توسط NOAA^۳ ارائه شده و به صورت رایگان در دسترس کاربران قرار گرفته است. این داده‌ها با قدرت تفکیک مکانی ۵۵ کیلومتر و با قدرت تفکیک زمانی ۶ ساعته و با پوشش جهانی قابل اخذ هستند.

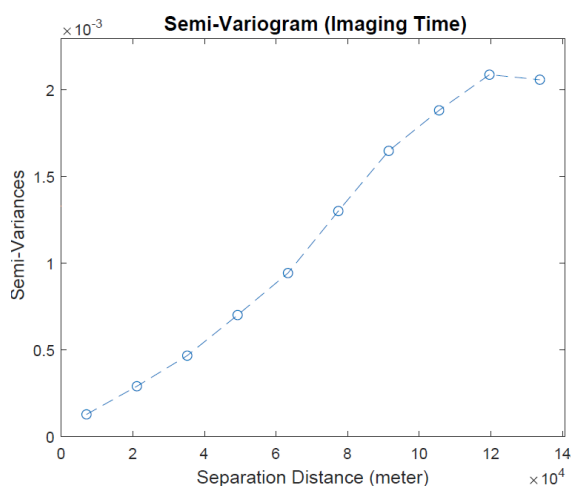
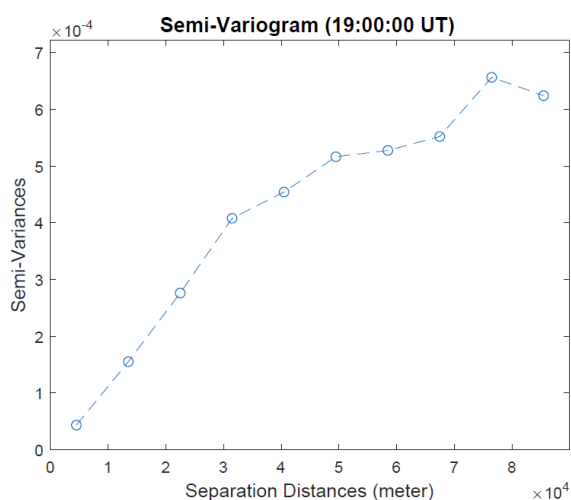
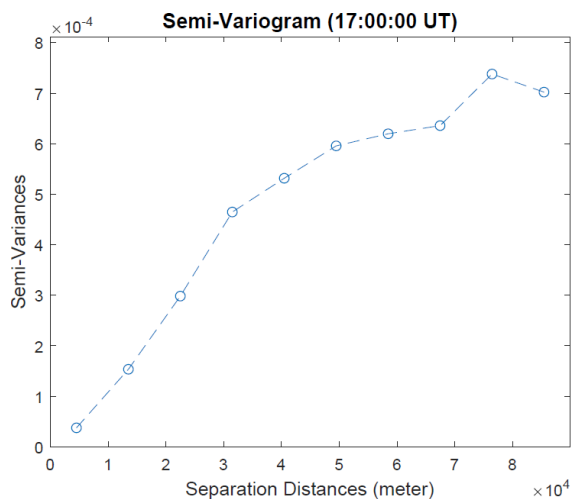
زمان تصویربرداری ماهواره Sentinel-3، ساعت ۱۷ و ۵۰ دقیقه روز ۱۱ ژوئن سال ۲۰۱۸ است و با توجه به برآورد ZWD با فواصل زمانی ۱۵ دقیقه در ایستگاه‌های GPS منطقه مورد مطالعه، این امکان فراهم شد تا پیش‌بینی مقادیر ZWD در زمان‌های دلخواه امکان‌پذیر باشد. به همین منظور پیش‌بینی در ساعات ۱۷، ۱۹ و زمان تصویربرداری انجام شد و نتایج در ایستگاه‌های کنترل مورد ارزیابی قرار گرفت. اولین قدم برآورد ترند مکانی-زمانی با ترکیب ZWD برآورد شده از مشاهدات سنجنده OLCI و ایستگاه‌های GPS در تمامی اپک‌ها در طول ۲۴ ساعت بود که در شکل (۴) مقادیر تابع ترند با توجه به رفتار کمیت ZWD نمایش داده شده است. میزان عدم برازش^۴ تابع ترند ۲/۳ سانتی‌متر و میانگین اختلافات

^۲ Global Forecast System: GFS

^۳ National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA

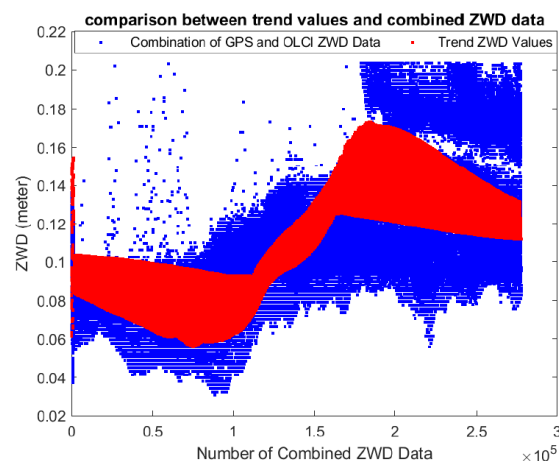
^۴ Misfit

^۱ Passive



شکل ۵- نمودار واریوگرام در سه اپک زمانی ۱۹، ۱۷ و زمان تصویر برداری

برابر با ۲ میلی متر می باشد. همچنین با استفاده از تابع ترند مقدار ZWD را در ایستگاه های کنترل و در اپک های مد نظر برآورد گردید و میزان جذر متوسط مربع^۱ اختلافات مقادیر برآورد شده توسط ترند و مقادیر ایستگاه های کنترل ۲،۵۵ سانتی متر به دست آمد.



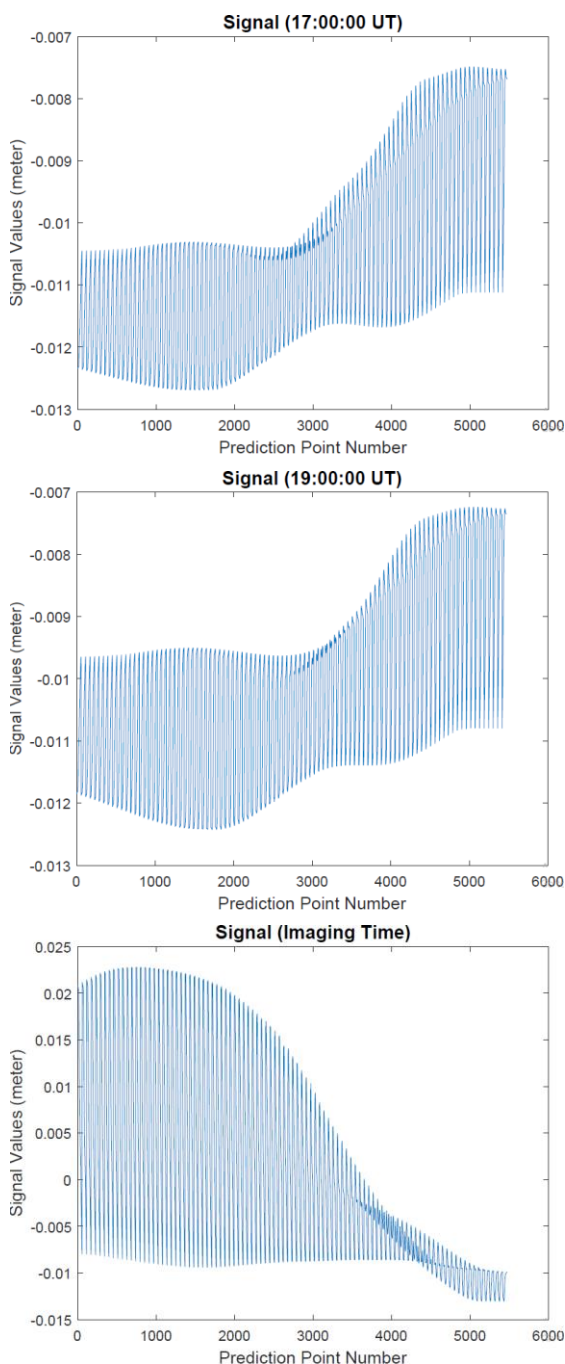
شکل ۴- مقایسه مقادیر ZWD برآورد شده توسط ترند و داده های ترکیب شده ZWD

مشاهدات سنجنده OLCI شامل ۲۷۶۳۳۰ داده ZWD هستند و این حجم از داده روند پردازش را مختل می کند، لذا با تغییر نرخ نمونه برداری و کم کردن حجم مشاهدات، پردازش ها قابل انجام خواهد بود. با استفاده از روش نزدیک ترین همسایه^۲ به طور بهینه حجم مشاهدات برای محاسبه واریوگرام، برآورد تابع کراس کوواریانس و همچنین محاسبات LSC کاهش یافت. به منظور برآورد واریوگرام ۱۹۳۶۷ داده به کار گرفته شد و با استفاده از رابطه (۱۱) مقادیر واریوگرام در مراکز دسته برای هر اپک مشاهداتی دلخواه قابل برآورد است. شکل (۵) به ترتیب واریوگرام های برآورد شده در ساعات ۱۷، ۱۹ و زمان تصویربرداری را نشان می دهد. پس از محاسبه واریوگرام و با استفاده از رابطه (۱۲) مقادیر کوواریانس تجربی در مراکز دسته محاسبه می شوند و تابع نمایی مناسب به آن ها برازش داده شده که شکل (۶) نمایانگر این موضوع است. مقادیر RMS توابع نمایی برازش داده شده به مقادیر در کوواریانس تجربی در ساعات ۱۷، ۱۹ و زمان تصویربرداری به طور تقریبی ۰/۱ میلی متر است که گویای برازش مناسب توابع می باشد.

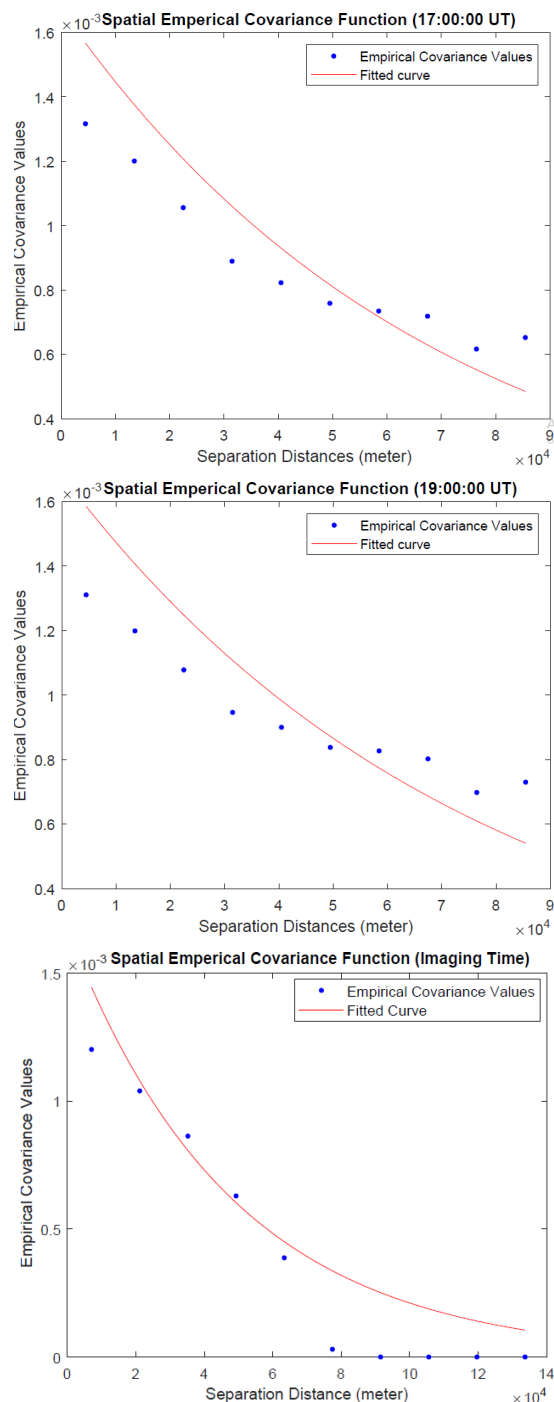
^۱ Root Mean Square

^۲ Nearest Neighbor

ترند در نقاط مشاهداتی و در نهایت استفاده از رابطه (۱۴) مقادیر سیگنال در نقاط پیش‌بینی قابل برآورد است. شکل (۷) مقادیر سیگنال برآورده شده در سه اپک زمانی را نشان می‌دهد. در انتها با برآورد مقادیر ZWD توسط ترند در نقاط پیش‌بینی و استفاده از رابطه (۱۵) می‌توان مقادیر نهایی ZWD در نقاط پیش‌بینی را به دست آورد. نتایج این پردازش‌ها برای سه اپک ساعت ۱۹،۱۷ و زمان تصویر برداری (ساعت ۱۷:۵۰:۰۰ UT) به ترتیب در شکل (۸) نمایش داده شده است.

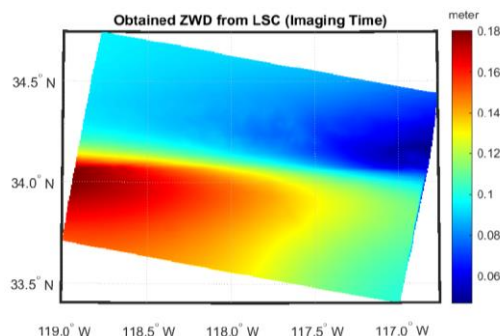


شکل ۷- سیگنال برآورده شده به ترتیب از بالا به پایین در ساعات ۱۹،۱۷ و زمان تصویربرداری



شکل ۶- مقادیر کوواریانس تجربی و توابع نمایی برازش داده شده آن ها در سه اپک زمانی ۱۹،۱۷ و زمان تصویر برداری

پس از تعیین ترند و توابع کوواریانس تجربی، برآورد سیگنال در نقاط پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این هدف ابتدا بر روی یک گرید منظم در منطقه ۵۴۷۲ نقطه پیش‌بینی در منطقه مطالعاتی با توزیع مناسب و با فاصله حدودی ۲،۶ کیلومتر از یکدیگر انتخاب گردید. با محاسبه ماتریس کراس کوواریانس بین مشاهدات ایستگاه‌های GPS و یا سنجنده OLCI با نقاط پیش‌بینی در اپک مد نظر و برآورد ZWD توسط



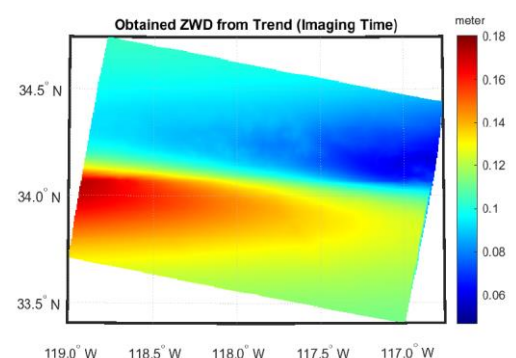
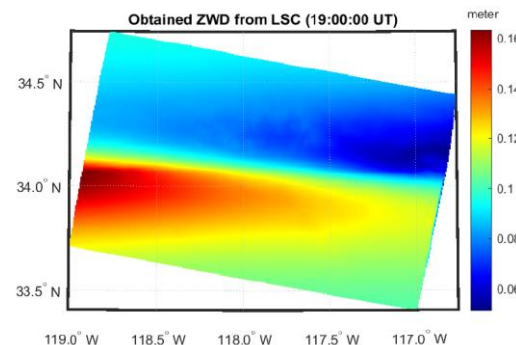
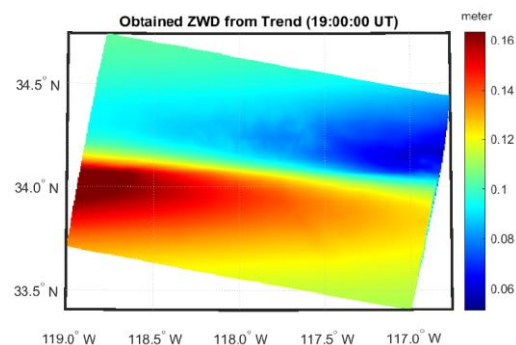
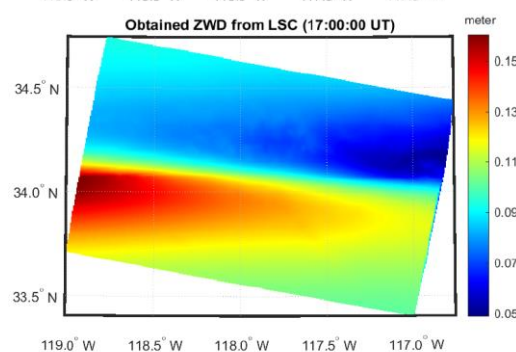
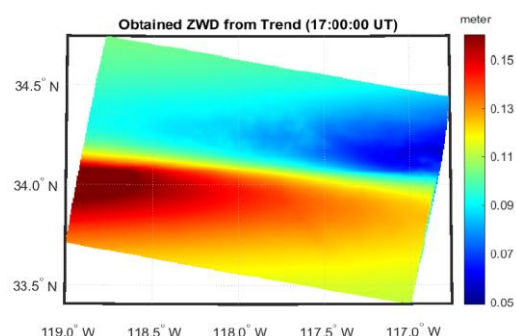
شکل ۸- ZWD برآورد شده توسط ترند و مدل LSC به ترتیب از بالا به پایین در سه اپک زمانی ۱۹، ۱۷ و زمان تصویر برداری

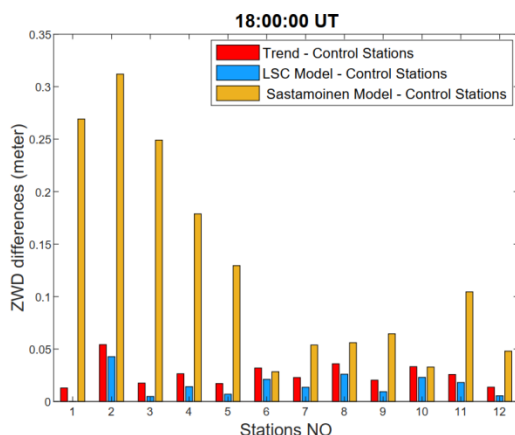
همانطور که در شکل (۸) قابل ملاحظه است، پس از برآورد سیگنال و اضافه کردن آن به بخش ترند در ساعات مختلف میزان تغییرات ZWD در منطقه با جزئیات بیشتری قابل مشاهده است. این تغییرات در بخش جنوب غربی منطقه مطالعاتی که متشکل از نواحی ساحلی می باشد، به طور کامل مشهود است. همچنین با توجه به اینکه در مناطق کوهستانی مقادیر ZWD به دلیل کاهش میزان بخار آب کمتر خواهد بود، این ویژگی در مدل سازی با استفاده از LSC به طور کامل نمایان شده است و در شمال شرق منطقه که شامل مناطق با ارتفاع بالا است، مقادیر ZWD کمتر از مناطق ساحلی می باشد.

با توجه به مدل تخمین زده شده توسط LSC حال به ارزیابی آن در نقاط کنترل می پردازیم. همان طور که در شکل (۱) ملاحظه گردید ایستگاه های کنترل با توزیع مناسب در منطقه قرار گرفته اند و سعی بر این بوده است در مناطقی که ایستگاه های GPS با تراکم کمتر وجود دارد و همچنین مناطق چالش برانگیز نظیر سواحل و مناطق کوهستانی این ایستگاه ها انتخاب شوند. در شکل (۹) نتایج حاصل از تحلیل و بررسی مقادیر برآورد شده توسط مدل LSC و ایستگاه های کنترل در ساعات ۱۷ و ۱۹ مورد مقایسه قرار گرفته اند.

با توجه به شکل (۹) بهبود نتایج حاصل پس از اضافه کردن سیگنال به ترند در نقاط کنترل قابل مشاهده است. در جدول (۱) نتایج پیش بینی ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

همان طور که از جدول (۱) قابل ملاحظه است، RMS مقادیر پیش بینی شده ZWD توسط مدل LSC در ساعات ۱۷ و ۱۹ به ترتیب به میزان ۶۵ و ۶۷ میلی متر نسبت به برآورد ترند زمانی-مکانی بهبود پیدا کرده است.





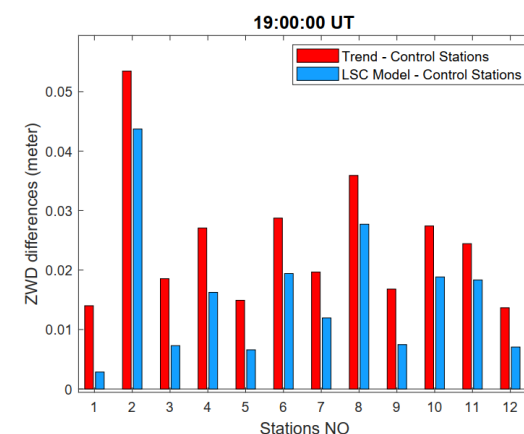
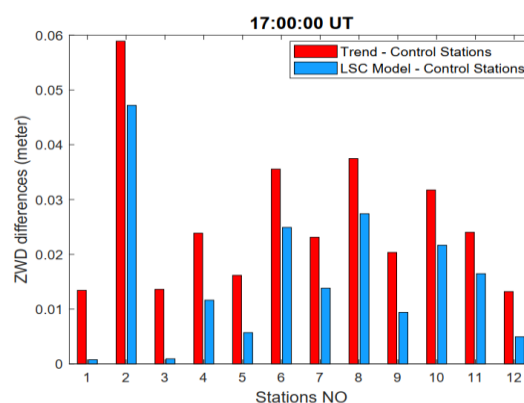
شکل ۱۰- اختلافات ZWD برآورد شده از ترند، مدل LSC و مدل ساستامینن نسبت به مقادیر ایستگاه‌های کنترل در ساعت ۱۸:۰۰:۰۰

جدول ۲- مقایسه مقادیر RMS ترند، مدل LSC و مدل ساستامینن در برآورد ZWD به همراه میانگین اختلافات ترند، مدل LSC و مدل ساستامینن نسبت به ایستگاه‌های کنترل

۱۸	زمان (ساعت)
۱۵٫۹۷	RMS مدل ساستامینن (سانتی‌متر)
۲٫۵۵	RMS ترند (سانتی‌متر)
۱٫۸۶	RMS مدل LSC (سانتی‌متر)
۱۲٫۷۲	میانگین اختلافات مدل ساستامینن و ایستگاه‌های کنترل (سانتی‌متر)
۲٫۶	میانگین اختلافات ترند و ایستگاه‌های کنترل (سانتی‌متر)
۱٫۵۴	میانگین اختلافات بین مدل LSC و ایستگاه‌های کنترل (سانتی‌متر)

همان‌طور که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است، مدل ZWD ساستامینن اختلافات بیشتری با مقادیر ایستگاه‌های کنترل GPS دارد. همچنین در سه نقطه ابتدایی این اختلاف به مراتب از سایر نقاط بیشتر است و دلیل آن این است که این نقاط در خطوط ساحلی واقع شده‌اند و در این مناطق تغییرات بخار آب بسیار شدید بوده و این ضعف داده‌های GFS و مدل ZWD ساستامینن در برآورد ZWD در این مناطق را نشان می‌دهد. این در حالی است که میزان اختلافات ZWD مدل LSC در این نقاط به مراتب کمتر از مدل ساستامینن می‌باشد. جدول ۲ تحلیل و بررسی نتایج را نشان می‌دهد.

همچنین در بررسی نهایی با کنار گذاشتن ایستگاه‌های ساحلی (سه ایستگاه ابتدایی)، مقادیر RMS مدل ساستامینن ۹٫۰۷ سانتی‌متر و میانگین اختلافات مدل ساستامینن و ایستگاه‌های کنترل به ۷٫۷۴ سانتی‌متر کاهش



شکل ۹- اختلافات ZWD برآورد شده از ترند و مدل LSC نسبت به مقادیر ایستگاه‌های کنترل در دو اپک زمانی پیش‌بینی شده

جدول ۱- مقایسه مقادیر RMS مدل LSC و ترند در برآورد ZWD به همراه میانگین اختلافات ترند و مدل LSC با ایستگاه‌های کنترل

۱۹	۱۷	زمان (ساعت)
۲٫۵۵	۲٫۵۵	RMS ترند (سانتی‌متر)
۱٫۸۸	۱٫۹	RMS مدل LSC (سانتی‌متر)
۲٫۴۶	۲٫۶	میانگین اختلافات بین ترند و ایستگاه‌های کنترل (سانتی‌متر)
۱٫۵۶	۱٫۵۴	میانگین اختلافات بین مدل LSC و ایستگاه‌های کنترل (سانتی‌متر)

در نهایت به منظور بررسی دقت کار انجام‌گرفته و مدل LSC ارائه‌شده، مقادیر ZWD برآورد شده توسط این مدل با مقادیر محاسبه‌شده توسط مدل ZWD ساستامینن که از داده‌های تحلیل‌شده GFS استفاده کرده است، با مقادیر نقاط کنترل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت و مقادیر آن در شکل (۱۰) نشان داده‌شده است. با توجه به اینکه اطلاعات GFS تنها در ساعت ۱۸ روز تصویربرداری در اختیار کاربران قرار گرفته بود، بنابراین از این زمان برای ارزیابی نتایج استفاده شد.

یافت که نشان‌دهنده عدم کارایی مدل ZWD ساستامین در مناطق ساحلی و مناطق با بخار آب شدید است. بنابراین استفاده از مدل LSC ارائه‌شده با توجه به دقت آن به برآوردی دقیق از مقدار ZWD در همه مناطق به خصوص نواحی چالش‌برانگیز نظیر سواحل منجر خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به پویایی بالای مؤلفه ZWD و تأثیر مستقیم آن در تعیین موقعیت، در این مقاله مدل‌سازی دقیق‌تر این پارامتر فقط در یک بازه مکانی و زمانی محدود با حجم داده مشخص، مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین در راستای این هدف و برای اولین بار از ترکیب داده‌های ایستگاه‌های متراکم GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا (۱۵ دقیقه) و داده‌های سنجنده OLCI با قدرت تفکیک مکانی فوق‌العاده (۳۰۰ متر) و با به‌کارگیری روش درون‌یابی LSC برای مدل‌سازی زمانی-مکانی ZWD در محدوده شهر لس‌آنجلس واقع در کشور آمریکا استفاده شد. اولین قدم در روش LSC برآورد ترند بود که در این مطالعه از درون‌یابی مکانی-زمانی برای این مقصود استفاده شد. یعنی در برآورد ضرایب تغییرات ZWD از داده‌های سنجنده OLCI به همراه داده‌های ایستگاه GPS استفاده شد و یک رویه چهار بعدی به داده‌ها برازش داده شد. در قدم بعد محاسبه سیگنال مورد توجه قرار گرفت. تفاوت اصلی و نوآوری این مطالعه نسبت به سایر مطالعات انجام‌شده در این حوزه این است که به جای در نظر گرفتن یک تابع کوواریانس مکانی-زمانی، بازه زمانی مسئله به زیر بازه‌های کوچک‌تر تقسیم شد و توابع کوواریانس مکانی برآورد و برای محاسبه سیگنال مورد

استفاده قرار گرفته‌اند. نقاط پیش‌بینی مورد استفاده در مدل LSC به‌طور متوسط با یکدیگر $2/6$ کیلومتر فاصله دارند و این در حالی است که داده‌های باز تحلیل‌شده ERA-5 در بهترین حالت با قدرت تفکیک مکانی ۳۱ کیلومتر قابلیت ارائه داده‌های هواشناسی را دارند. در این تحقیق مدل‌سازی را با قدرت تفکیک مکانی بالاتر انجام شد و مقدار ZWD پیش‌بینی‌شده در بازه زمانی دلخواه در سطح منطقه منتشر گردید. همچنین داده‌های باز تحلیل‌شده ERA-5 بعد از ۳ ماه در اختیار کاربران قرار می‌گیرند و داده‌های آنی آن با دقت پایین‌تر و با پرداخت هزینه در اختیار کاربران قرار خواهد گرفت. این در حالی است که با این روش امکان استخراج محلی ZWD با سیستم‌های پرفرمت در زمانی کمتر از یک روز امکان‌پذیر می‌باشد و می‌تواند به صورت رایگان در اختیار کاربران قرار بگیرد. از طرف دیگر در مقایسه این نتایج با مدل ZWD ساستامین که از داده‌های تحلیل‌شده GFS بهره می‌برد، می‌توان این نتیجه دریافت کرد که مدل LSC برآورد شده بسیار دقیق‌تر از مدل ساستامین در تمامی مناطق اعم از نواحی کوهستانی، ساحلی و سطوح با تغییرات ارتفاعی کم می‌باشد. این نتیجه‌گیری بر طبق مقایسه انجام‌شده در ساعت ۱۸ روز ۱۱ ژوئن سال ۲۰۱۸ که مقدار RMS مدل LSC برابر با $1/86$ سانتی متر و RMS مدل ساستامین برابر با $15/97$ سانتی متر به دست آمد، بیان‌شده است. بنابراین با ترکیب داده‌های سنجنده OLCI و ایستگاه‌های GPS و استفاده از روش LSC درون‌یابی و پیش‌بینی مکانی-زمانی پارامتر ZWD با دقت مطلوب امکان‌پذیر می‌گردد.

مراجع

- [1] Zhang, J., Investigations into the estimation of residual tropospheric delays in a GPS network 1999: University of Calgary.
- [2] Mendes, V., Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. UNB geodesy and geomatics engineering technical report (199), 1999. 10.
- [3] Moritz, H., Advanced Physical Geodesy Herbert Wichmann Verlag. Karlsruhe, Germany, 1980. 500.
- [4] Eckert, V., M. Cocard, and A. Geiger, COMEDIE: (Collocation of meteorological data for interpretation and estimation of tropospheric path delays) Teil III: Software, 1992, Tech. Rep. 195, Grauer Bericht, ETH Zürich.
- [5] Hirter, H.A., Mehrdimensionale Interpolation von meteorologischen Feldern zur Berechnung der Brechungsbedingungen in der Geodäsie. 1998.
- [6] Troller, M.R., GPS based determination of the integrated and spatially distributed water vapor in the troposphere, 2004, ETH Zurich.

- [7] Hurter, F. and O. Maier, Tropospheric profiles of wet refractivity and humidity from the combination of remote sensing data sets and measurements on the ground. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013. 6(11): p. 3083-3098.
- [8] Qian, C., Tropospheric correction modeling in SAPOS reference network under large height difference condition, 2016, Thesis, University of Munich, 60p.
- [9] Wilgan, K. and A. Geiger, High-resolution models of tropospheric delays and refractivity based on GNSS and numerical weather prediction data for alpine regions in Switzerland. *Journal of Geodesy*, 2019. 93(6): p. 819-835.
- [10] Dach, R., et al., Bernese GNSS software version 5.2. 2015.
- [11] Teunissen, P. and O. Montenbruck, Springer handbook of global navigation satellite systems 2017: Springer.
- [12] Saastamoinen, J., Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique* (1946-1975), 1973. 10 : (1) p. 13-34.
- [13] Bevis, M., et al., GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of applied meteorology*, 1994. 33(3): p. 379-386.
- [14] Jade, S., et al., Estimates of precipitable water vapour from GPS data over the Indian subcontinent. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 2005. 67(6): p. 623-635.
- [15] Bevis, M., et al., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992. 97(D14): p. 15787-15801.
- [16] Matheron, G., Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie de fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Vol. 4597. 1965: Masson et CIE.
- [17] Zahedi, G., Relation between ground vegetation and soil characteristics in a mixed hardwood stand. (PhD Thesis), University of Gent, 1998.
- [18] Lin, G.-F. and L.-H. Chen, A spatial interpolation method based on radial basis function networks incorporating a semivariogram model. *Journal of Hydrology*, 2004. 288(3-4): p. 288-298.
- [19] Darbeheshti, N., Modification of the least-squares collocation method for non-stationary gravity field modelling, 2009, Curtin University.
- [20] Mertikas, S., et al., Validation of Sentinel-3 OLCI Integrated Water Vapor Products Using Regional GNSS Measurements in Crete, Greece. *Remote Sensing*, 2020. 12(16): p. 2606.