

کشف و مدل سازی اغتشاشات یونسفری متحرک متوسط مقیاس در منطقه ایران

علی حیدری^۱، یزدان عامریان^{۲*}، هانی محبوبی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
heydari_ali95@email.kntu.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
amerian@kntu.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
hanymahbuby@email.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۹، تاریخ تصویب مرداد ۱۳۹۹)

چکیده

تغییرات مکانی-زمانی یونسفر به دو دسته منظم و نامنظم تقسیم می شود. تغییرات منظم شامل تغییرات روزانه، تغییرات مرتبط با عرض جغرافیایی و تغییرات مرتبط با فعالیت خورشیدی می شود. اغتشاشات یونسفری متحرک (TID) یکی از تغییرات نامنظم یونسفر بوده که در سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ مقیاس طبقه بندی می شود. اغتشاشات یونسفری متحرک متوسط مقیاس (MSTID) که عامل اصلی وقوع آن، امواج ثقل اتمسفری (AGW) است، مانع اصلی درون یابی دقیق تصحیحات یونسفری در یک شبکه سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) محسوب می شود، بنابراین کشف و مدل سازی آن امری ضروری به نظر می رسد. هدف این مقاله، کشف و مدل سازی MSTID با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل در منطقه ایران است. همچنین مقادیر محتوای الکترون کلی (TEC) بازیابی شده از مشاهدات GPS نیز جهت تأیید نتایج مشاهدات فاز موج حامل، استفاده شده است. MSTID موج گونه هایی هستند که دارای پارامترهایی نظیر دامنه، سرعت، جهت، مدت زمان سیر و طول موج می باشند که استخراج آن ها هدف مدل سازی MSTID است. در حالت کلی، MSTID را می توان موجی مسطح و طولی در نظر گرفت، بنابراین برای محاسبه دامنه، سرعت و طول موج، پروفیلی از تغییرات L_4 در واحد TECU در یک عرض ثابت در نظر گرفته می شود. با بررسی میزان جابجایی ماکزیمم مقدار این پارامتر در یک بازه زمانی مشخص، سرعت امواج MSTID تعیین می گردد. جهت محاسبه طول موج نیز از آنالیز موجک استفاده شد. نتایج حاصل به این شرح است که MSTID در جهت جنوب غرب به شمال شرق با سرعت معادل ۱۰۰ متر بر ثانیه و طول موجی برابر ۲۳۲ کیلومتر حرکت می کنند. دامنه این اغتشاشات در حدود ۰/۰۲ در واحد TECU به دست آمد که در این صورت به طور میانگین باعث ایجاد خطای به اندازه ۴ میلی متر در مشاهدات فاز موج حامل می شود. مشاهدات فاز موج حامل با دقت یک صدم سیکل قابل اندازه گیری هستند که با ضرب کردن این مقدار در طول موج های سیگنال GPS دقت این مشاهدات به طور میانگین در حدود ۲ میلی متر خواهد بود. بنابراین خطایی که به سبب MSTID رخ می دهد در مقایسه با دقت مشاهدات فاز موج حامل قابل توجه بوده و باید در نظر گرفته شود.

واژگان کلیدی: اغتشاشات یونسفری متحرک متوسط مقیاس، سیستم تعیین موقعیت جهانی، محتوای الکترون کلی، فاز موج حامل

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۱ با هدف اولیه ناوبری و تعیین موقعیت توسعه یافته‌اند که از جمله این سامانه‌ها می‌توان به سیستم تعیین موقعیت جهانی^۲ اشاره کرد. لیکن در دو دهه اخیر GPS به ابزاری کارآمد در مطالعه خصوصیات فیزیکی جو زمین تبدیل شده است. امواج ارسالی از ماهواره‌های GPS در مسیر خود از ماهواره تا گیرنده تحت تأثیر عوامل مختلف جوی قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین این تأثیرات در لایه یونسفر صورت می‌پذیرد. یونسفر پس از لایه‌های تروپوسفر و استراتوسفر از ارتفاع حدود ۶۰ کیلومتری زمین آغاز و تا ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری ادامه می‌یابد. انتشار امواج الکترومغناطیس تحت تأثیر الکترون‌های آزاد موجود در این لایه قرار گرفته و باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری فاصله بین ماهواره و گیرنده می‌شوند [۱]. این لایه براساس میزان ماکزیمم چگالی الکترونی در هر ارتفاع، به چند لایه مختلف E، D و F تقسیم شده که لایه F خود به دو زیرلایه F1 و F2 تقسیم می‌گردد. کمیتی که با استفاده از آن می‌توان چگونگی فعالیت‌های یونسفری و نیز تغییرات زمانی-مکانی چگالی الکترونی در این لایه از جو را مورد مطالعه قرار داد، محتوای الکترون کلی^۳ است. TEC تعداد الکترون‌های آزاد موجود در مسیر ماهواره تا گیرنده در استوانه‌ای به سطح مقطع ۱ مترمربع را گویند. واحد اندازه‌گیری TEC، TECU است که معادل $10^{16} \text{elec}/m^2$ می‌باشد [۲].

تغییرات TEC به دو دسته منظم و نامنظم تقسیم می‌شود. تغییرات منظم شامل تغییرات روزانه، تغییرات مرتبط با عرض جغرافیایی و تغییرات مرتبط با فعالیت خورشیدی است. تغییرات نامنظم عمدتاً تأثیرات موج گونه‌ای هستند که به اغتشاشات یونسفری متحرک^۴ معروف هستند و در سه دسته اغتشاشات یونسفری متحرک کوچک مقیاس^۵، اغتشاشات یونسفری متحرک متوسط مقیاس^۶ و اغتشاشات یونسفری متحرک بزرگ مقیاس^۷ تقسیم‌بندی می‌شوند که ویژگی‌های MSTID و LSTID را در جدول

(۱) مشاهده می‌کنید. طول موج، سرعت و دوره تناوب SSTID نسبت به MSTID و LSTID کم‌تر می‌باشد، اما با توجه به این که تاکنون تحقیقی بر روی آن انجام نشده است، مقادیر دقیقی از پارامترهای آن در دسترس نیست [۱، ۳].

جدول ۱- انواع TID و مشخصات هریک [۳]

انواع اغتشاشات یونسفری متحرک	طول موج (کیلومتر)	سرعت (متر بر ثانیه)	دوره تناوب (دقیقه)	دلیل انتشار
بزرگ مقیاس	بیش از ۱۰۰	۳۰۰-۱۰۰	۱۸۰-۶۰	طوفان مغناطیسی
متوسط مقیاس	۳۰۰-۱۰۰	۲۰۰-۵۰	۶۰-۱۲	امواج ثقل اتمسفری

امواج ثقل اتمسفری^۸ یکی از دلایل اصلی وقوع MSTID است. AGW به صورت قائم و افقی در یونسفر منتشر می‌شوند. دلایل انتشار AGW عبارتند از: آتشفشان‌ها، زلزله‌ها، جریان هوای روی کوه‌ها و دیگر اغتشاشات یونسفری مانند شفق قطبی^۹. شفق قطبی در اثر برخورد ذرات باردار باد خورشیدی و یونیزه شدن مولکول‌های موجود در یونسفر در مناطق نزدیک قطب به وجود می‌آید [۴].

با توجه به مطالعات پیشین، این امواج با توجه به دامنه آن‌ها می‌توانند خطای قابل توجهی (۷ میلی‌متر در اندازه‌گیری فاز موج حامل L_1) در مشاهدات GPS را سبب شوند [۵]. TID را می‌توان با استفاده از مشاهدات TEC و فاز موج حامل کشف و مورد بررسی قرار داد که به چند نمونه از کارهای انجام گرفته در این زمینه اشاره می‌کنیم.

از سال ۱۹۵۰ اغتشاشات متحرک تحت عنوان TID در پلاسمای یونسفری مطالعه شده است [۳]. هانسانکر و همکاران در سال ۱۹۸۲ اولین کسانی بودند که TID را در دو گروه متوسط مقیاس و بزرگ مقیاس با استفاده از مدل‌های جهانی AGW/TID، دسته‌بندی کردند. آن‌ها دریافتند که MSTID دارای سرعتی در بازه ۱۰۰ الی ۲۵۰ متر بر ثانیه، طول موجی معادل چند صد کیلومتر و دوره تناوب ۱۵ تا ۶۰ دقیقه می‌باشد و LSTID سرعت ۴۰۰ تا

^۱ Global Navigation Satellite System: GNSS

^۲ Global Positioning System: GPS

^۳ Total Electron Content: TEC

^۴ Traveling Ionospheric Disturbances: TID

^۵ Small-scale Travelling Ionospheric Disturbances: SSTID

^۶ Medium-scale Travelling Ionospheric Disturbances: MSTID

^۷ Large-scale Travelling Ionospheric Disturbances: LSTID

^۸ Atmospheric Gravity Wave: AGW

^۹ Aurora

با رسم پروفیل منتخب در دو زمان متفاوت و مشاهده میزان جابجایی آن، سرعت و جهت را به دست آوردند. برای استخراج طول موج نیز از تبدیل فوریه بهره گرفتند [۵]. اتسوکا و همکاران در سال ۲۰۱۳ به مانند روش سوگاو از مشاهدات TEC برای کشف MSTID روزانه در اروپا استفاده کردند و نتایج مشابه سوگاو به دست آوردند [۱۳]. واتلت و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی منشأ اغتشاشات یونسفری مانند MSTID با استفاده از مشاهدات GPS که شامل TEC و تغییرات آن است، پرداختند. آنها دریافتند که اغتشاشات یونسفری روزانه معمولاً در زمستان و اغتشاشات یونسفری شبانه در تابستان به وقوع می پیوندد. همچنین آن ها بر روی منشأ AGW نیز تحقیق کردند و دریافتند که یکی از مهم ترین عوامل ایجاد آن فعالیت خورشیدی است [۱۴].

با توجه به لزوم در نظر گرفتن TID در مدل سازی یونسفر و تأثیر آن بر بسیاری از فعالیت ها نظیر تعیین موقعیت، در این تحقیق برای اولین بار به کشف و مدل سازی MSTID در منطقه ایران با استفاده از مشاهدات ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز موج حامل و TEC حاصل از مشاهدات ۲۳ ایستگاه شبکه دائم GPS ایران پرداخته می شود.

۲- روش کشف و مدل سازی MSTID

ابتدا به معرفی دو مشاهده ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز موج حامل و TEC و سپس روش کشف و مدل سازی MSTID می پردازیم.

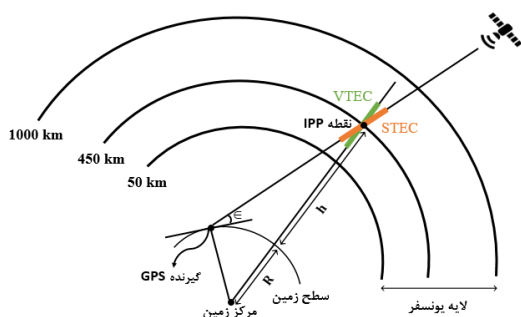
مشاهدات پایه در GPS، شبه فاصله کد، فاز موج حامل و نیز اندازه گیری های داپلر هستند. مشاهده فاز موج حامل، معیاری از فاز سیگنال دریافتی از ماهواره نسبت به فاز حامل تولید شده در گیرنده در لحظه دریافت سیگنال است. رابطه (۱) و رابطه (۲) که به ترتیب ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد و ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز موج حامل هستند را مشاهده یونسفری گویند که بر حسب متر محاسبه می شوند. در این تحقیق از رابطه (۲) به دلیل دقت بیشتر مشاهدات فاز برای کشف MSTID استفاده شده است [۱].

$$P_{4,\mu}^m = P_{2,\mu}^m - P_{1,\mu}^m = d_{ion2,\mu}^m - d_{ion1,\mu}^m + c(\varepsilon_{2,\mu}^m - \varepsilon_{1,\mu}^m) \quad (1)$$

۱۰۰۰ متر بر ثانیه، طول موج بزرگتر از ۱۰۰۰ کیلومتر و دوره تناوب ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه را دارا هستند [۶]. سایتو و همکاران در سال ۱۹۹۸ نقشه های دو بعدی اغتشاشات TEC ناشی از MSTID را در ژاپن با استفاده از سیستم GPS که شامل ۱۰۰۰ گیرنده بود، نشان دادند [۷]. آفرایموویچ و همکاران در سال ۲۰۰۰ به کشف و بررسی LSTID با استفاده از مشاهدات حاصل از GPS در طی طوفانی که در تاریخ ۲۵ سپتامبر سال ۱۹۹۸ به وقوع پیوست، پرداختند و دریافتند که این نوع از اغتشاشات با سرعت ۳۰۰ متر بر ثانیه منتشر می شوند. روش مورد استفاده در این تحقیق برگرفته از روش آماری بود که در سال ۱۹۶۸ انجام شد که توسط یک تداخل سنج فضایی رادیویی با طول پایه ای کوتاه به انجام رسید [۸]. در سال ۲۰۰۷، سوگاو و همکاران به کشف MSTID در آمریکای شمالی با استفاده از مشاهدات TEC پرداختند. به این منظور آنها بعد از محاسبه VTEC در یک روز خاص، میانگین یک ساعته مقادیر را از VTEC های به دست آمده کم کردند و با تعریف حد آستانه ۰/۲ در واحد TECU در صورت بیشتر بودن اختلافات از این مقدار، به TID رسیدند [۹]. در سال ۲۰۰۸، هوزیمی و همکاران به بررسی و کشف TID با استفاده از مشاهدات TEC پرداختند. آنها پس از محاسبه TEC در تمامی اپک ها، ΔTEC را با کم کردن مقدار TEC هر اپک از مقدار TEC اپک قبلی به دست آورده و با تقسیم بر فاصله زمانی (۳۰ ثانیه) تغییرات آن را بررسی کردند. با تعریف حد آستانه برابر با ۰/۰۸ در واحد TECU برای تغییرات TEC، در صورت تجاوز این تغییرات از حد آستانه تعریف شده نتیجه گرفتند که TID رخ داده است [۱۰]. کوتاک و همکاران، در سال ۲۰۰۷ و اتسوکا و همکاران در سال ۲۰۱۱ این روش را بر روی داده های TEC به دست آمده از گیرنده های GPS در کالیفرنیا جنوبی و ژاپن اعمال کردند و ویژگی های آماری MSTID را به دست آوردند [۱۱، ۱۲]. دنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲، با استفاده از شبکه GPS آلمان به کشف و بررسی MSTID پرداختند. آن ها برای این منظور از مشاهدات فاز موج حامل استفاده کردند و تغییرات اپک به اپک L_4 را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آنها پروفیل هایی را در عرض های ثابت رسم کردند و پروفیلی که نسبت به بقیه دارای طول بیشتری بود را برای استخراج پارامترهای MSTID انتخاب کردند.

$$M(e_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos e_m(n)}{R+h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، n اپک اندازه گیری، m اندیس ماهواره، e زاویه ارتفاعی ماهواره، R شعاع متوسط زمین و برابر ۶۳۷۱ کیلومتر، h ارتفاع مدل تک لایه یونسفر از سطح زمین و برابر با ۴۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. بنابراین با معلوم بودن زاویه ارتفاعی ماهواره که با توجه به شکل (۱) از هندسه ماهواره و گیرنده محاسبه می شود، مقدار تابع نگاشت قابل محاسبه است.



شکل ۱- هندسه مشاهده یونسفری [۱۶]

به منظور کشف MSTID، باید تغییرات اپک به اپک مشاهده مستقل از هندسه فاز مورد بررسی قرار گیرد. البته بایستی به این نکته توجه نمود که در رابطه (۲)، واحد را به TECU تبدیل کنیم (هر TECU، معادل ۱۰/۵ سانتی متر در محاسبه L_4 است). از روابط مذکور نمی توان به طور مستقیم استفاده کرد و بایستی جهش فاز را در آن ها کشف و حذف نمود. تغییرات اپک به اپک مشاهدات ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز موج حامل با استفاده از رابطه (۶) به دست آمده و تغییرات بیش از ۰/۱ در واحد TECU به عنوان MSTID در نظر گرفته می شود [۱۷].

$$dL_4 = L_4(t + \Delta t) - L_4(t) \quad (6)$$

در حالت کلی، MSTID را می توان موجی مسطح و طولی در نظر گرفت. بنابراین برای محاسبه پارامترهای MSTID که شامل سرعت، جهت، طول موج و دامنه می شود، باید ابتدا پروفیلی از این اغتشاشات را در عرض جغرافیایی ثابتی داشته باشیم [۵، ۱۷]. به گونه ای که اولاً پروفیل مذکور پوشش مناسبی را در پهنای منطقه ارائه داده و ثانیاً در عرض جغرافیایی ثابت منتخب تغییرات مشاهده مستقل از هندسه فاز دارای یک جهش یا پیک برجسته باشد. سپس پروفیل را در دو زمان متفاوت ترسیم

$$L_{4,u}^m = \lambda_1 \phi_{1,u}^m - \lambda_2 \phi_{2,u}^m = \lambda_1 \phi_{ion1,u}^m - \lambda_2 \phi_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_1^m - \varepsilon_2^m) + c(\varepsilon_{1,u} - \varepsilon_{2,u}) + (\lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m) \quad (2)$$

در روابط فوق، P_1 و P_2 شبه فاصله اندازه گیری شده با استفاده از مشاهدات کد P ، ϕ_1 و ϕ_2 فاز موج حامل دو موج حامل L_1 و L_2 ، زیرنویس u اندیس گیرنده و بالانویس m اندیس ماهواره، c سرعت نور، d_{ion} و d_{trout} به ترتیب اثرات یونسفری و تروپوسفری، ε_u^m به ترتیب اریب وابسته به فرکانس ماهواره و گیرنده به دلیل تأخیر سخت افزاری ماهواره و گیرنده، λ_1 و λ_2 طول موج دو موج حامل L_1 و L_2 و N_1 و N_2 ابهام فاز دو موج حامل L_1 و L_2 است.

پارامتر دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، TEC می باشد که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \times (P_{4,u}^m(n) + c(DCB^m + DCB_U)) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $A = 40.3 \frac{m^3}{s^2}$ ، f_1 و f_2 به ترتیب فرکانس های اصلی GPS هستند که مقادیر آن ها ۱۵۷۵،۴۲ و ۱۲۲۷،۶ مگاهرتز می باشد، $P_{4,u}^m(n)$ ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد و DCB^m و DCB_u نیز اریب تفاضلی کد ماهواره و گیرنده است که آریکان و همکاران در سال ۲۰۰۸ با روشی جدید و مستقل از مدل سازی یونسفر و بر مبنای استفاده از نقشه های یونسفری جهانی^۱ به محاسبه DCB گیرنده پرداختند که قلی پور و همکاران نیز با همین روش مقادیر DCB را برای ایستگاه های IPGN به دست آوردند [۱۵، ۱۶]. در رابطه بالا STEC، مقدار محتوای الکترون کلی در راستای خط دید ماهواره و گیرنده است. برای به دست آوردن مقدار محتوای الکترون کلی در راستای قائم در نقطه نفوذ یونسفری^۲ از رابطه (۴) استفاده می شود:

$$VTEC_u^m(n) = \frac{STEC_u^m(n)}{M(e_m(n))} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، تابع نگاشت به صورت زیر تعریف می شود:

^۱ Global Ionospheric Map: GIM

^۲ Ionospheric Pierce Point: IPP

در رابطه $dA(t, r)$ (۹) تغییرات STEC در بازه زمانی dt پس از جابجایی به اندازه dr را نشان می‌دهد. بنابراین با در اختیار داشتن سایر پارامترهای رابطه (۹)، می‌توان دامنه MSTID را به دست آورد. ω را می‌توان با در اختیار داشتن فرکانس از رابطه (۱۰) محاسبه کرد. در این رابطه، f فرکانس می‌باشد که با استفاده از رابطه (۱۱) با در اختیار داشتن مقادیر سرعت و طول موج به دست می‌آید [۱۵].

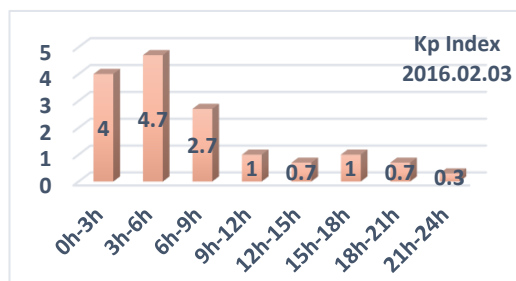
$$\omega = 2\pi f \quad (10)$$

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، V سرعت حرکت MSTID است. دوره تناوب MSTID نیز با معکوس کردن فرکانس آن حاصل می‌شود.

۳- نتایج عددی

از آنجایی که فعالیت خورشیدی بر وقوع TID تأثیر بالایی داشته و در روزهای با فعالیت ناآرام خورشیدی به وقوع می‌پیوندد، در این مقاله، روز ۳ فوریه سال ۲۰۱۶ که در بازه زمانی ۶ تا ۳ ساعت جهانی روزی ناآرام از نظر فعالیت خورشیدی ($K_p = 4.7$) می‌باشد، انتخاب شد. شکل (۲) تغییرات شاخص K_p را در بازه‌های زمانی ۳ ساعته نشان می‌دهد. در این محاسبات از مشاهدات ۲۳ ایستگاه IPGN جهت کشف و مدل‌سازی MSTID استفاده شده است. شکل (۳) موقعیت این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- چگونگی تغییرات شاخص فعالیت خورشیدی در روز ۳ فوریه سال ۲۰۱۶ برگرفته از سایت (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov>)

نتایج مدل‌سازی با استفاده از دو مشاهده فاز موج حامل و TEC به صورت جداگانه آورده می‌شود. در این

کرده و میزان جابجایی آن‌ها محاسبه می‌شود. در نهایت با تقسیم کردن میزان جابجایی بر مدت زمان، سرعت اغتشاشات به دست می‌آید. همچنین با دقت بر روی جهت جابجایی پروفیل می‌توان فهمید که MSTID در چه جهتی در حال حرکت است. به منظور محاسبه طول موج، از رابطه (۷) استفاده می‌کنیم:

$$K = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، K ، عدد موج^۱ (فرکانس مکانی) است که واحد آن یک بر کیلومتر می‌باشد، یعنی با معکوس کردن عدد موج به طول موج می‌رسیم. برای محاسبه عدد موج از تبدیل موجک پیوسته^۲ مورلت^۳ استفاده می‌شود که نسبت به تبدیل فوریه دارای مزایایی است. در تبدیل فوریه زمان کوتاه از پنجره زمانی از پیش تعیین شده‌ای استفاده می‌شود که این امر باعث تفکیک پذیری زمان-فرکانس ثابت می‌شود. به دلیل طبیعت ناپایایی سیگنال‌ها که در آن‌ها فرکانس با زمان تغییر می‌کند، به یک پنجره متغیر با زمان نیاز است. این مشکل با معرفی CWT برطرف شد. فرکانس مرکزی موجک مورلت متناسب با عکس مقیاس است. پس با محاسبه مقیاس با استفاده از CWT و معکوس کردن آن به عدد موج می‌رسیم. سپس با استفاده از آنالیز توان^۴ پروفیل، با معکوس کردن عدد موجی که بیشترین مقدار توان را دارا می‌باشد، به طول موج می‌رسیم [۱۸، ۱۹]. به منظور محاسبه دامنه MSTID، از رابطه (۸) که به رابطه موج معروف است، استفاده می‌شود.

$$A(t, r) = A_0 \sin(\omega t - kr) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، $A(t, r)$ مقدار STEC مربوط به یک موج MSTID در موقعیت r و زمان t است. A_0 دامنه موج MSTID، ω فرکانس زاویه‌ای MSTID و k عدد موج می‌باشند. برای محاسبه تغییرات STEC ناشی از MSTID باید از رابطه (۸) مشتق گرفت:

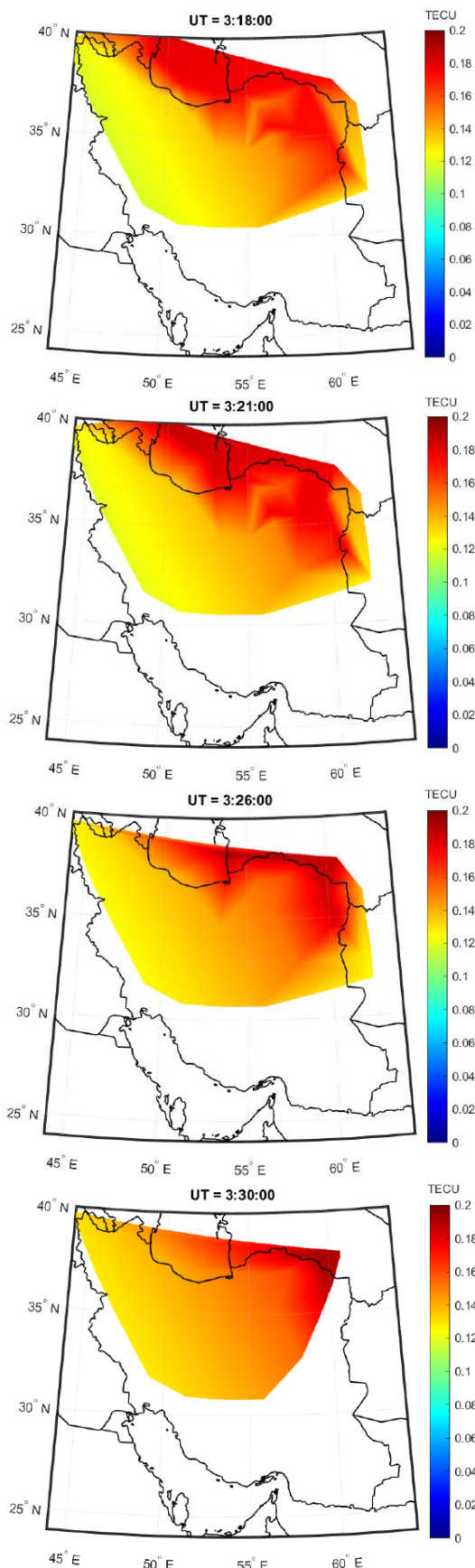
$$\begin{aligned} dA(t, r) &= \frac{\partial A}{\partial t} dt + \frac{\partial A}{\partial r} dr \\ &= A_0 [\omega \cos(\omega t - kr) dt - k \cos(\omega t - kr) dr] \\ &= A_0 (\omega dt - k dr) \cdot \cos(\omega t - kr) \end{aligned} \quad (9)$$

^۱ Wavenumber

^۲ Continuous Wavelet Transform: CWT

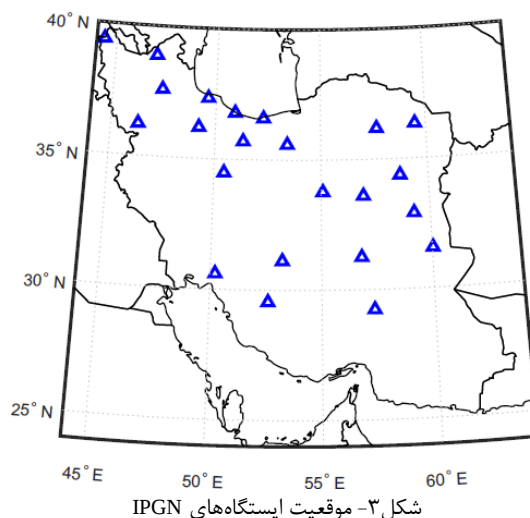
^۳ Morlet

^۴ Power Spectrum



شکل ۴- نمایش نقشه dL_4 در منطقه ایران در ۴ اپک زمانی از روز ۳ فوریه سال ۲۰۱۶

محاسبات، از مشاهدات با زاویه ارتفاعی بالای ۶۰ درجه به دلیل اجتناب از خطای چندمسیری و دقت بیشتر مشاهدات فاز استفاده شده است.

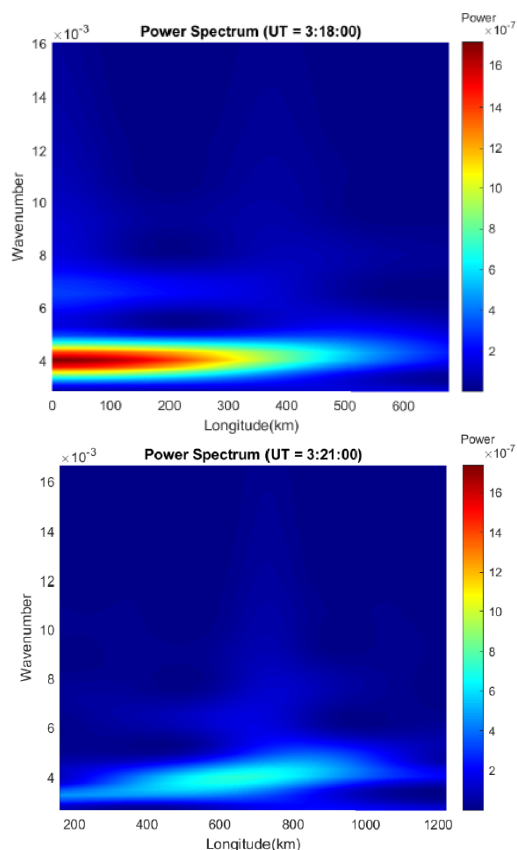


شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های IPGN

۳-۱- نتایج مدل سازی MSTID با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل

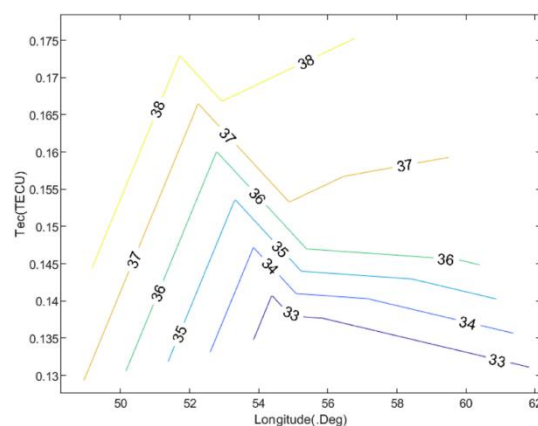
شکل (۴)، نقشه dL_4 در واحد TECU در بازه زمانی ۳:۱۸:۰۰ الی ۳:۳۰:۰۰ را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است این اغتشاشات در جهت شمال شرق در حرکت هستند. برای محاسبه سرعت MSTID پروفیل‌هایی از dL_4 در واحد TECU در عرض‌های مختلف ترسیم شده و با توجه به پوشش مناسب پروفیل در پهنای منطقه و نیز برجسته بودن پیک آن، به محاسبه پارامترها می‌پردازیم. همانطور که در شکل (۵) مشخص است، پروفیل مربوط به عرض جغرافیایی ۳۷ درجه دارای پوشش بهتری است. بنابراین این پروفیل جهت مطالعه ارجحیت دارد.

با رسم دو پروفیل مربوط به عرض جغرافیایی ۳۷ درجه در ساعات ۳:۱۸:۰۰ و ۳:۲۱:۰۰ به محاسبه پارامترهای MSTID پرداخته می‌شود. با توجه به شکل (۶) میزان جابجایی dL_4 در مدت زمان ۳ دقیقه، ۰/۱۵ درجه می‌باشد که با تبدیل به متر و تقسیم بر مدت زمان، سرعت معادل ۱۰۰ متر بر ثانیه خواهد بود. هم‌چنین با توجه به این‌که پروفیل مشکی دارای طول جغرافیایی بیشتری است، می‌توان نتیجه گرفت که حرکت اغتشاشات در جهت شمال شرق است که این صحت شکل (۴) را تأیید می‌کند.

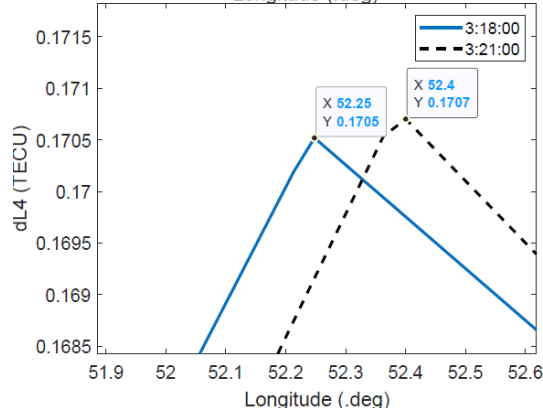
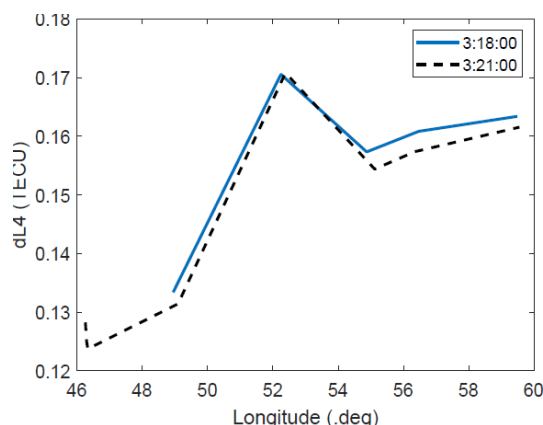


شکل ۷- آنالیز موجک دو پروفیل موجود در شکل ۶ و بررسی طیف قدرت در اعداد موج به دست آمده

با توجه به شکل (۷)، ماکزیمم قدرت در هر دو اپک در عدد موج 0.0432 اتفاق می افتد که با معکوس کردن آن به طول موج معادل 232 کیلومتر می رسیم. به منظور محاسبه دامنه MSTID نیز مطابق رابطه (۹) عمل می کنیم که در این تحقیق دامنه این اغتشاشات برابر 0.15 در واحد TECU می باشد. به عبارت دیگر MSTID باعث ایجاد 3 میلی متر خطا در اندازه گیری L_1 می شود. از آن جایی که مشاهدات فاز موج حامل با دقت یک صدم سیکل اندازه گیری می شوند، با ضرب کردن این مقدار در طول موج سیگنال های مشاهدات GPS دقتی در حدود 2 میلی متر را دارا هستند. بنابراین خطایی که به سبب رخ می دهد، قابل توجه بوده و باید در نظر گرفته شود [۲۰]. دوره تناوب MSTID نیز مطابق آنچه در بخش قبل گفته شد با معکوس کردن مقدار فرکانس معادل 38 دقیقه به دست می آید. بنابراین نتایج حاصل از مشاهدات فاز موج حامل به صورت جدول (۲) است:



شکل ۵- پروفیل های مربوط به عرض های جغرافیایی متفاوت



شکل ۶- نمایش پروفیل های dL_4 مربوط به عرض جغرافیایی ۳۷ درجه در بازه زمانی ۳ دقیقه (۰۳:۱۸:۰۰ الی ۰۳:۲۱:۰۰)

با استفاده از CWT عدد موج استخراج و سپس با معکوس کردن آن، طول موج محاسبه گردید. شکل (۷)، طیف قدرت مربوط به دو پروفیل نشان داده شده در شکل (۶) می باشد. در این اشکال، واحد طول های جغرافیایی نسبت به مبدأ پروفیل ها به کیلومتر تبدیل شده است.

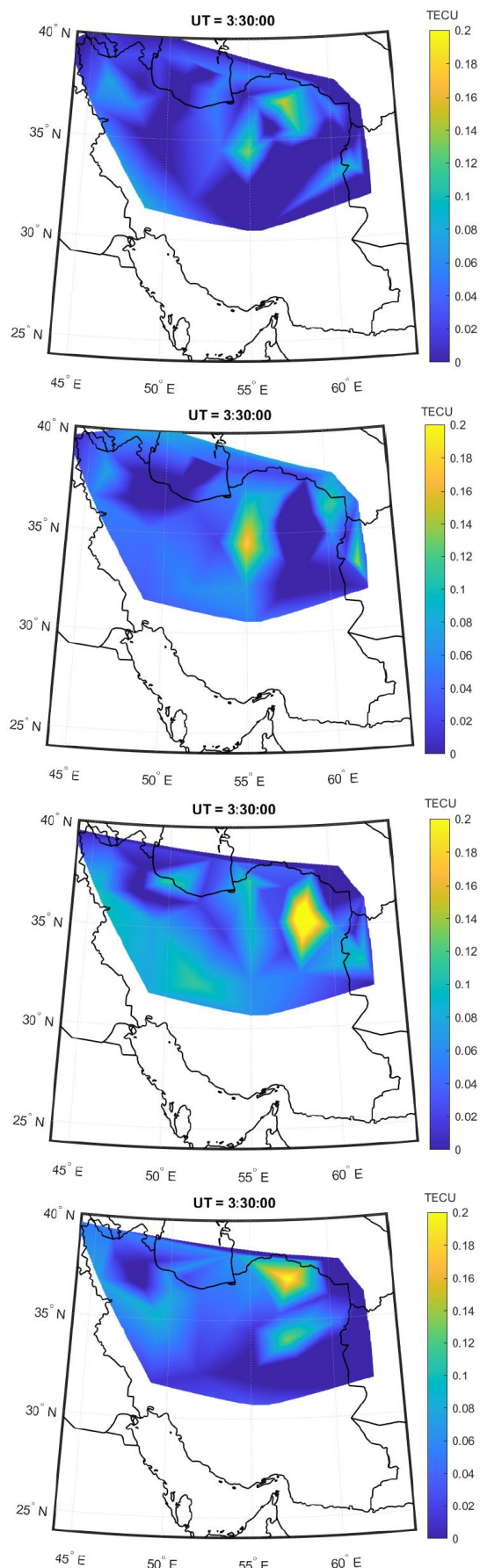
جدول ۲- مقادیر پارامترهای محاسبه شده MSTID با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل

مقادیر پارامترها	پارامترهای MSTID
۱۰۰	سرعت (m/s)
۲۳۲	طول موج (km)
۰/۰۱۵	دامنه (TECU)
۳۸	پریود (دقیقه)

۲-۳- نتایج مدل سازی MSTID با استفاده از مشاهدات TEC جهت مقایسه با نتایج مشاهدات فاز موج حامل

همچنین مقادیر TEC بازایی شده از مشاهدات GPS نیز جهت تأیید نتایج مشاهدات فاز موج حامل در تعیین پارامترهای TID مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۸)، نقشه dSTEC در بازه زمانی (۰۳:۱۸:۰۰ الی ۰۳:۳۰:۰۰) را نشان می دهد که در اینجا نیز مشخص است که به سمت شمال شرق در حرکت هستند. برای به دست آوردن سرعت نیز مانند قبل عمل کرده و در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و بازه زمانی (۰۳:۱۸:۰۰ الی ۰۳:۳۰:۰۰)، سرعت محاسبه می شود. در شکل (۸)، پروفیل ها و میزان جابجایی در مدت زمان ۳ دقیقه مشخص است. همان طور که در شکل (۹) مشخص است میزان جابجایی پروفیل ها ۰/۱۵ درجه می باشد که بنابراین سرعت برابر ۱۰۰ متر بر ثانیه به دست می آید.

نتایج مربوط به محاسبه طول موج نیز در شکل (۱۰) آورده شده است که مانند مشاهدات فاز موج حامل، در این جا هم از آنالیز موجک و بررسی ماکزیمم قدرت در اعداد موج استفاده می شود. در شکل (۱۰)، مشخص است که بیشینه مقدار توان در عدد موج ۰/۰۴۶۷ رخ می دهد که با معکوس کردن عدد موج، به طول موج ۲۱۶ کیلومتر می رسیم. با استفاده از رابطه (۹) نیز دامنه MSTID محاسبه می شود که معادل ۰/۰۲۱ در واحد TECU می باشد. یعنی تقریباً ۴ میلی متر خطا در اندازه گیری L_1 را باعث می شود. دوره تناوب MSTID با استفاده از این مشاهدات نیز ۳۶ دقیقه می باشد. جدول ۳، پارامترهای MSTID را نشان می دهد که با استفاده از مقادیر STEC محاسبه شده اند.



شکل ۸- نمایش نقشه dSTEC در منطقه ایران در ۴ اپک زمانی از روز ۳ فوریه سال ۲۰۱۶

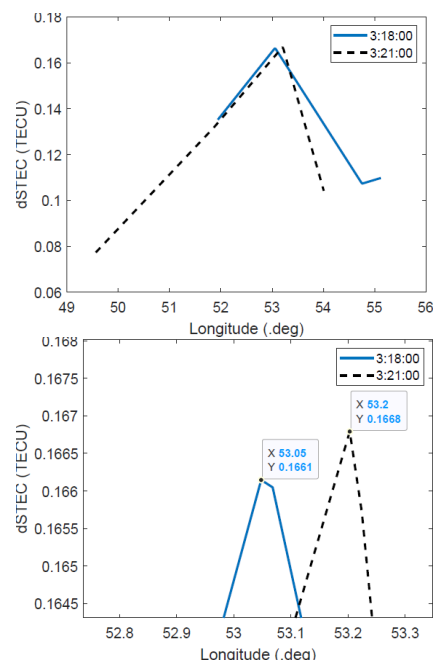
جدول ۳- مقادیر پارامترهای محاسبه شده MSTID با استفاده از

مقادیر TEC

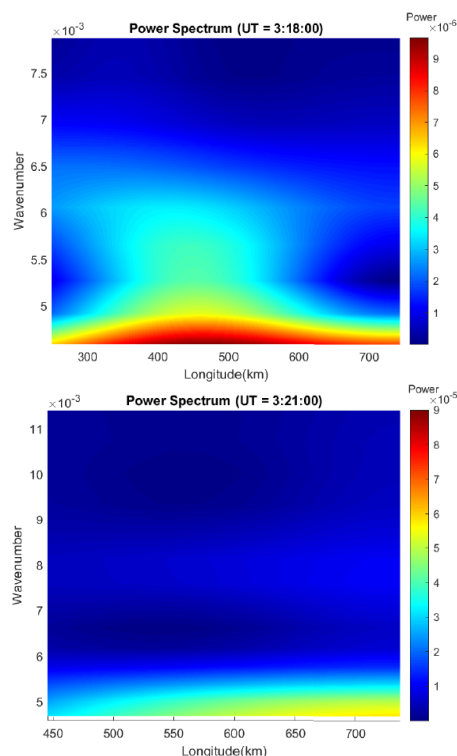
مقادیر پارامترها	پارامترهای MSTID
۱۰۰	سرعت (m/s)
۲۱۶	طول موج (km)
۰٫۰۲۱	دامنه (TECU)
۳۶	پریود (دقیقه)

۴- نتیجه گیری

تغییرات موجود در لایه یونسفر در دو نوع منظم و نامنظم تقسیم بندی می شود. از مهم ترین تغییرات نامنظم، TID است. هدف این مقاله کشف و مدل سازی MSTID با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل و TEC و مقایسه نتایج حاصل از این مشاهدات است. برای کشف MSTID تغییرات اپک به اپک مشاهدات L_4 مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای مدل سازی ابتدا پروفیل دارای پوشش بهتر انتخاب شد و پارامترهای MSTID مورد مطالعه قرار گرفت. در هر دو مشاهده نتایج تقریباً یکسانی به دست آمد. به این صورت که MSTID در منطقه ایران در جهت جنوب غرب-شمال شرق با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه با دوره تناوب ۳۶ دقیقه و طول موج ۲۰۰ کیلومتری حرکت می کند. دامنه این اغتشاشات در حدود ۰٫۰۲ در واحد TECU محاسبه شد که به این صورت باعث ایجاد خطایی معادل ۴ میلی متر در اندازه گیری پارامتر L_1 می شود.



شکل ۹- نمایش پروفیل های dSTEC مربوط به عرض جغرافیایی ۳۷ درجه در بازه زمانی ۳ دقیقه (۳:۱۸:۰۰ الی ۳:۲۱:۰۰)



شکل ۱۰- آنالیز موجک دو پروفیل موجود در شکل ۹ و بررسی طیف قدرت در اعداد موج به دست آمده

مراجع

- [1] Amerian, Y. Regional modeling of the ionospheric electron density using wavelet analysis and GPS observations, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, PhD Thesis, KN Toosi University of Technology, 2013
- [2] Seeber, G. Satellite geodesy: foundations, methods, and applications (Walter de gruyter, 2008. 2008)
- [3] Jonah, O.F. A study of daytime MSTIDS over equatorial and low latitude regions during tropospheric convection: observations and simulations, Doctoral thesis of the Graduate Course in Space Geophysics., 2017

- [4] Memarzadeh, Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications (NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, 2009. 2009)
- [5] Deng, Z., Schön, S., Zhang, H., Bender, M., and Wickert, J. Medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTID) modeling using a dense German GPS network, *Advances in Space Research*, 2013, 51, (6), pp. 1001-1007
- [6] Hunsucker, R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review, *Reviews of Geophysics*, 1982, 20, (2), pp. 293-315
- [7] Saito, A., Fukao, S., and Miyazaki, S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophysical research letters*, 1998, 25, (16), pp. 3079-3082
- [8] Afraimovich, E., Kosogorov, E., Leonovich, L., Palamartchouk, K., Perevalova, N., and Pirog, O. Determining parameters of large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin using GPS-arrays, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, 62, (7), pp. 553-565
- [9] Tsugawa, T., Otsuka, Y., Coster, A.J., and Saito, A. New characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense wide-coverage TEC maps over North America, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34, pp. 22-101
- [10] Jusoh, M.H., Bakar, F.N.A., Sulaiman, A.A., Baba, N.H., and Khan, Z.I. Determination of traveling ionospheric disturbances of geomagnetic storm by using dual frequency GPS data, in Editor (Ed.)^(Eds.): *Book Determination of traveling ionospheric disturbances of geomagnetic storm by using dual frequency GPS data* (IEEE, 2008, edn.), pp. 361-366
- [11] Kotake, N., Otsuka, Y., Ogawa, T., Tsugawa, T., and Saito, A. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California, *Earth, planets and space*, 2007, 59, (2), pp. 95-102
- [12] Otsuka, Y., Kotake, N., Shiokawa, K., Ogawa, T., Tsugawa, T., and Saito, A. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with a GPS receiver network in Japan: *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere* (Springer, 2011), pp. 291-299
- [13] Otsuka, Y., Suzuki, K., Nakagawa, S., Nishioka, M., Shiokawa, K., and Tsugawa, a. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe, *Annales Geophysicae* (09927689), 2013, 31, (2)
- [14] Wautelet, G., and Warnant, R. Origin of high-frequency TEC disturbances observed by GPS over the European mid-latitude region, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, 133, pp. 67-78
- [15] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., and Arikan, O. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC, *Radio Science*, 2008, 43, (4)
- [16] Golipour, N., and Amerian, Y. Iranian Permanent GPS Network Receivers Differential Code Biases Estimation Using Global Ionospheric Maps, *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 8, (4), pp. 177-186
- [17] Memarzadeh, Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. PhD thesis, Delft University of Technology, 2009. 208 p, 2009
- [18] Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., and Glard, D. Wave propagation and sampling theory—Part I: Complex signal and scattering in multilayered media, *Geophysics*, 1982, 47, (2), pp. 203-221
- [19] Hlawatsch, F., and Boudreaux-Bartels, G.F. Linear and quadratic time-frequency signal representations, *IEEE signal processing magazine*, 1992, 9, (2), pp. 21-67
- [20] Leick, A., Rapoport, L., and Tatarnikov, D. GPS satellite surveying (John Wiley & Sons, 2015. 2015)