نشربه علمي مهندسي فناوري اطلاعات مكاني

سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱ Vol.10, No.3, Autumn 2022 ۱ –۲۷ مقاله پژوهشی DOR: <u>20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9</u>

# بررسی تاثیرات طوفان ژئومغناطیسی بر اغتشاشات یونسفری با بهرهگیری از تلفیق مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی و دادههای ماهوارهای SWARM

علیرضا عتباتی<sup>۱</sup>، ایرج جزیرئیان<sup>۳\*</sup>، محمدمهدی علیزاده الیزئی<sup>۲</sup>، امیرحسین پورمینا<sup>۱</sup>، احد ملک زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ۲- استادیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ۳- استادیار دانشکده ریاضی و آمار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

### چکیدہ

طوفان های ژئومغناطیسی از اصلی ترین عوامل ایجاد اغتشاشات یونسفری در ابعادی متفاوت هستند که بسته به شدت آنها میتوانند تاثیرات مخربی بر سیگنالهای رادیویی گذرنده از این محیط داشته باشند. طوفان ژئومغناطیسی رخداده در ۶ الی ۱۲ سپتامبر سال ۲۰۱۷ بزرگترین طوفان ژئومغناطیسی آن سال بوده که ناشی از فورانهای پی در پی در تاج خورشیدی است. این پژوهش سعی در شناسایی رفتار اغتشاشات یونسفری در هنگام طوفان ژئومغناطیسی آن سال بوده که ناشی از فورانهای پی در پی در تاج خورشیدی است. این پژوهش سعی در شناسایی رفتار اغتشاشات یونسفری در هنگام طوفان ژئومغناطیسی با استفاده از مشاهدات ایستگاههای زمینی GNSS و استفاده از مشاهدات ماهواریت واقع در کشور تازانیا (۱۲۹۵، ۱۳۵۰, ۱۹۵۰ مهای زمانی طوفان ژئومغناطیسی را دارد. برای این منظور از ایستگاه مشاهداتی SWAR واقع در کشور تازانیا (۱۲۹۵، ۱۳۵۰, ۱۶۵۰ که در ناحیه آنامولی استوایی قرار دارد، استفاده شده است. در کنار مشاهدات گیرنده زمینی GNSS از مشاهدات ماهواریت استگاههای زمان مینوستر را دارد. برای این منظور از ایستگاه مشاهداتی گیرده زمانی طوفان ژئومغناطیسی را دارد. برای این منظور از ایستگاه مشاهداتی گیرنده زمانی طوفان ژئومغناطیسی را دارد. برای این منظور از ایستگاه مشاهداتی گیرنده زمینی واقع در کشور تازانیا (۱۲۹۵، ۲۵۵۹ میری که مینام طیسی را دارد. برای گیزمنده زمینی و گیرنده مناهداتی در مشاهدات ماهوارههای SWARM در محاون ژئومغناطیسی برای گیرنده زمینی و گیرنده GNSS در محاور مشاهدات گیرنده ومنی و قراد مشاهدات ماهواره ای SWARM در مناهدات یونسفری دربازه زمانی طوفان ژئومغناطیسی برای گیرنده زمینی و گیرنده GNSS در محاول ژئومغناطیسی برای گیرنده زمینی و گیرده می والی ماستگاه مشاهدات پرده زمانی طوفان ژئومغناطیسی برای گیرنده زمینی و گیره ماست. در کنار مشاهدات ماهوارههای هماورههای هاده ماهواره ژمانی معزمانی ماه ورمای ژئومغناطیسی در داونه ماهوارهای معاور های می معرفی و نرخ تغییرات آن به کار گرفته شده است. بررسی مشاهدات انجام شده حاکی از این موفوه این که مافرارهای یونم که و ژئومغناطیسی در روزهای کوف ژئومغناطیسی در روزهای کوف علوه و نرخ تغییرات کی مرفوی است که با افزایش اغتشاشات ژژومغناطیسی در روزهای ژئومغناطیسی در روزهان ژئومغناطیسی در موزه می می در مان طوفان ژئومغناطیسی در موان می موی و ماههدات گیرنده ماهه ای معور و مان معم

كليدواژهها : اغتشاشات يونسفري، طوفان ژئومغناطيسي، محتواي چگالي الكتروني، نرخ تغييرات TEC، درخشش يونسفري.

<sup>&</sup>lt;sup>~</sup> نویسنده مکاتبه کننده: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میرداماد – پلاک ۱۳۴۶ – دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی – دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک. تلفن: ۲۱۸۸۸۷۷۰۷۰

سال دهم ● شماره سوم ● پاییز ۱۴۰۱

#### ۱– مقدمه

یکی از مهمترین پدیدههای تاثیر گذار بر یونسفر اغتشاشات ژئومغناطیسی<sup>۱</sup> هستند. در زمان رخداد طوفانهای ژئومغناطیسی<sup>۲</sup>، اغتشاشات ژئومغناطیسی به بالاترین میزان خود میرسند؛ به گونهای که سبب ایجاد تغییراتی نامنظم و شدید در ساختار یونسفر میشوند. طوفانهای ژئومغناطیسی حاصل از برخورد بادهای به نسبت قوی خورشیدی با میدان مغناطیسی بین سیارهای<sup>۳</sup> زمین در ناحیه مگنتوسفر<sup>4</sup> از جو زمین است [۱]. در هنگام رویداد طوفانهای ژئومغناطیسی، فعالیتهای شیمیایی حاصل از فرآیندهای دینامیکی و ساختار یونسفر در مراحل مختلف طوفان است. تاثیرات طوفانهای ژئومغناطیسی بر یونسفر زمین در دو مرحله اتفاق میافتد.

در فاز ابتدایی رخداد طوفان ژئومغناطیسی، این پدیده سبب ایجاد یک میدان الکتریکی در یونسفر به نام میدان الکتریکی سریع نفوذ کننده<sup>۵</sup> (PPEF) میگردد. این میدان باعث ایجاد یک لایه از جنس میدانهای الکتریکی شده که به سرعت از نواحی با عرض مجرافیایی بالا به سمت نواحی با عرضهای جغرافیایی متوسط و پایین گسترش میابد. نوع واکنش این میدان الکتریکی در مکان مورد مطالعه با توجه به زمان محلی مشاهدات میتواند متفاوت باشد به گونهای که حرکت میدان الکتریکی PPEF در طول روز به سمت شرق و در شب هنگام (بعد از ۲۱ عصر به وقت محلی) به سوی غرب است [۲ و ۳]. رفتار PPEF در طول روز در ناحیه

آنامولی یونسفری استوایی<sup>۶</sup> سبب افزایش میزان سـرعت حرکت لایههای یونسفری<sup>۷</sup> در جهت عمودی و به تبع آن سبب افزایش ارتفاع لایه F می شود. PPEF در هنگام غروب آفتاب به عنوان نیروی محرک اصلی شناخته می شود که سبب ایجاد اغتشاشات مقیاس بزرگ در زمان طوفان های ژئومغناطیسی می گردد [۴و ۵]. در این هنگام میزان گرادیان لایههای پایینی یونسفر افزایش یافته و به سبب آن میزان حبابهای پلاسما يونسفري^ نيز افزايش مييابد. ايـن افـزايش بـه دلیل فرآیندی ناپایدار به نام ریلی تیلور<sup>۹</sup> رخ میدهـد و منجر به ایجاد اغتشاشات در یونسفر می گردد [۶، ۷ و ۸]. این حبابهای پلاسما با نیرویی به اندازه بردار E که در آن B نشانگر میدان مغناطیسی و E imes Bبیانگر میدان الکتریکی است، سبب ایجاد یک دوقطبی الکترونی شده که حرکتی رو به بالا دارد [۴]. پس از اینکه این لایه به بیشترین ارتفاع خود رسید، در دو سوی شمالی و جنوبی استوا گسترش یافته و سبب ایجاد یک آنامولی یونسفری استوایی به اندازه ۱۵ درجه از استوا، در جهت جنوب و شمال مدار استوا می گردد [٩].

فاز دوم تغییرات حاصل از طوفانهای ژئومغناطیسی معروف به مرحله ترمیم<sup>۱۰</sup> است که میتواند از چند ساعت به صورت یک تغییر کوتاه مدت<sup>۱۱</sup> و یا در مدت چندین روز به صورت یک تغییر بلند مدت<sup>۱۲</sup> بر ساختار یونسفر تاثیر گذار باشد که دلیل ایجاد این اغتشاشات را میتوان اغتشاشات دینامیکی یونسفری<sup>۱۳</sup> دانست [۱۰ و

- <sup>6</sup> Equatorial Ionospheric Anomaly
- 7 Vertical Drift Velocity
- <sup>8</sup> Ionospheric Plasma Bubbles
- <sup>•</sup> Rayleigh-Taylor
- 1. Recovery Phase
- 11 Short-term
- <sup>17</sup> Long-term
- <sup>1</sup><sup>r</sup> Ionospheric Disturbance Dynamo

- <sup>1</sup> Geomagnetic Disturbances
- <sup>†</sup> Geomagnetic Storms
- " Interplanetary Magnetic Field
- \* Magnetosphere
- <sup>a</sup> Prompt Penetration Electric Fields

۱۱]. بعد از فاز اولیه طوفان ژئومغناطیسی ذرات با انرژی بالا در یونسفر از عرضهای جغرافیایی بالا شروع به حرکت به سمت مناطقی با عرض جغرافیایی متوسط و یاپین مے کنند و حاصل آن ایجاد یک میدان الكتريكي بنام ميدان الكتريكي ديناميكي اغتشاشي (DDEF) است که به تدریج در مناطق استوایی تاثیر می گذارد [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. بنا به زمان مشاهداتی، این یدیدہ میتواند رفتاری متفاوتی داشته باشد به گونهای که در طول روز حرکتی در جهت غرب و در شب هنگام به سمت شرق در حرکت است که این رفتـار دقیقـاً بـر خلاف رفتار PPEF است [1۵]. رفتار DDEF در طول روز در محدوده آنامولی استوایی سبب کاهش ارتفاع در لایه F شده و معمولاً اثر خود را در کاهش میزان جوششهای پلاسما یونسفری نشان میدهد. رفتار این یدیده اما در طول شب متفاوت است و سبب افزایش میزان سرعت حرکت لایه یونسفری به تبع آن ایجاد اغتشاشات يونسفري مي شود [۱۶].

اغتشاشات یونوسفری با ترکیبی از مجموعهای از عوامل ایجاد میشود، که می توان با استفاده از مشاهدات چگالی الکترونی و نرخ تغییرات آن و نیز پارامترهای معرف اغتشاشات یونسفری مانند پارامترهای درخشش یونسفری مشاهده نمود [۱۷ و ۱۸]. میزان اغتشاشات حاصل از طوفانهای ژئومغناطیسی بر میزان چگالی الکترونی در نیمکره شمالی در تابستانها و در نیمکره جنوبی در زمستانها بیشتر است [۱۹]. الگوی رخداد اغتشاشات بوجود آمده در چگالی الکترونی و نیز ایجاد پدیده درخششهای یونسفری در هنگام رویداد طوفانهای ژئومغناطیسی وابسته به دو پدیده ایجاد شده از طوفان در دو مرحله آن یعنی PPEF و DDEF است [۰۲ و ۲۱]. در زمان رخصداد اغتشاشات

<sup>\</sup> Disturbance dynamo electric field

بر رسی تاثیر ات طوفان ژئومغناطیسی بر اغتشاشات ... علیرضا عتباتی و همکار ان

قوي تر شدن فرايند بازسازي ۲ بر فرآيند يونيزاسيون ۳ در

یونسفر شدہ که نتیجه آن سبب تخلیے بار الکتریکے پلاسمای یونسفری<sup>۴</sup> میگردد که این رفتار در بزرگ مقیاس سبب ایجاد اغتشاشاتی و افزایش میزان محتوای الکترونی (TEC) و همچنین ایجاد پدیدههایی همچون پدیده درخششهای یونسفری میشود که سبب ایجاد اختلالاتی در سیگنال های رادیویی گذرنده از این محیط میشود [۲۲]. پلاسمای ضعیف شده <sup>۵</sup> در ترکیب با پلاسمای متراکم موجود در یونسفر، سبب ایجاد یک گرادیان قوی در ساختار یونسفری شده که حاصل این فرآيند سبب رخداد اغتشاشات يونسفرى همچون رخداد پدیده درخشههای یونسفری در مناطق با عرض جغرافیایی نزدیک به استوا می گردد [۲۳ و ۲۴]. اغتشاشات ایجاد شده در پلاسما با ایجاد درخششهای یونسفری سبب ایجاد اختلالاتے در دامنه و فاز سیگنالهای رادیویی شده که میتواند سبب از دست رفتن ارتباط با گیرنده و نیز ایجاد خطا در تعبین موقعیت در مناطقی با عرض جغرافیایی پایین شود که به طور معمول در زمان پس از غروب آفتاب احتمال رویــداد ایــن پدیــده بیشــتر میشــود [۲۵ و ۲۶]. درخششهای یونوسفری سبب ایجاد اغتشاشاتی روزانه مى گردند كه اين تغييرات با زمان محلى، فصل، فعاليت خورشیدی و نیز فعالیتهای ژئومغناطیسی مرتبط بوده بطوريكه اغتشاشات يونسفرى سبب افزايش و ايجاد تغییراتی ناگهانی در شاخصهای نظیر <sup>8</sup>AE ، <sup>7</sup>Dst و نرخ تغییرات یارامتر Dst است) شده که d(Dst)/dtمیتوانند پارامترهای مناسب جهت یافتن شدت تاثیر

<sup>†</sup> Ionospheric Plasma Depletion

- <sup>v</sup> Disturbance storm time
- <sup>^</sup> Auroral Magnetic Index

<sup>&</sup>lt;sup>r</sup> Recombination

<sup>&</sup>quot; Ionization

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Depleted Plasma

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Loss of Lock

سال دهم 🛛 شماره سوم 🖌 پاییز ۱۴۰۱

اغتشاش ژئومغناطیسی بر عرضهای جغرافیایی پایین باشند [۲۷ و ۲۸].

در کنار مشاهدات گیرندههای زمینی سیستم ماهواره ای ناوبری جهانی<sup>۱</sup> (GNSS) که مشاهدات آن نشان دهنده میزان تغییرات در پارامترهای یونسفری در مسیر میان ماهواره تا گیرنده است، استفاده از مشاهدات قسمت فوقانی یونسفر<sup>۲</sup> نیز از اهمیت بالایی برخوردار میباشد. از این رو میتوان گفت که انتشار پلاسما با دمایی بالاتر<sup>۳</sup> در امتداد میدان مغناطیسی میتواند نقش بسزایی در تغییرات چگالی الکترونی در محيط بالايي يونسفر داشته باشد [٢٩ و ٣٠]. حدود دو س\_وم مش\_اهدات TEC و اغتشاش\_ات آن توس\_ط گیرندههای زمینی در محدوده لایه F2 یونسفر واقع در قسمت فوقانى يونسفر اتفاق مىافتد كه ميتوان از اين دسته مشاهدات در زمان اغتشاشات یونسفری همچون طوفان های ژئومغناطیسی بهره گرفت [۳۱، ۳۲ و ۳۳]. در سالهای اخیر ماهوارههای کوتاه پرواز<sup>†</sup> به جهت مطالعات اتمسفری به فضا پرتاب شدهاند که میتوان از ماهواره های ماموریت SWARM نام برد. سه ماهواره ماموریت SWARM در بخـش فوقـانی یونسـفر در حـال گردش به دور زمین بوده که میتوانند به جهت مطالعات یونسفری مورد استفاده قرار گیرند.

از مشاهدات سنجندههای ماهوارههای SWARM میتوان در بررسی چگالی الکترونی و همچنیین تاثیرات اغتشاشات بر قسمت فوقانی یونسفر به صورت جهانی بهره گرفت در حالیکه مطالعه پارامترهای یونسفری با تکیه بر مشاهدات ایستگاههای زمینی GNSS سبب مشاهده تغییرات ارتفاعی یونسفر در محدوده ایستگاه مطاعاتی میشود. در این صورت استفاده از تلفیق

\* Low Earth Orbit (LEO)

مشاهدات زمینی با مشاهدات برداشت شده از ماهوارههای SWARM میتواند تاثیر بسزایی در افزایش شناخت ساختار یونسفر داشته باشد [۳۴].

لی و همکاران میزان تغییرات یونسفری را در روزهای ۷ الی ۱۲ ماه سپتامبر سال ۲۰۱۷ در هنگام رخداد یک طوفان ژئومغناطیسی به نسبت بزرگ بررسی کردند [۳۵]. در این تحقیق از مشاهدات TEC حاصل از دادههای ایستگاههای زمینی در محدوده آسیا و اقيانوسيه استفاده شده است مجموعه مشاهدات استفاده شـده در ایـن پـژوهش نشـان از افـزایش قابـل ملاحظه مقادیر چگالی الکترونی یونسفر در زمان رخداد طوفان ژئومغناطیسی دارد که بیانگر افزایش میزان اغتشاشات رویداده در این بازه زمانی است. در پژوهشی دیگر لی و همکاران به افزایش میزان جوششهای یلاسمای استوایی<sup>۵</sup> با استفاده از ایستگاههای مشاهداتی GNSS و مش\_اهدات VHF در مح\_\_دوده GNSS پرداخته است که نشان میدهد جوشش های پلاسمای یونسفری حرکتی به سمت غرب در طول مدت طوفان ژئومغناطیسی دارد که سبب ایجاد اغتشاشاتی در یونسفر میشود [۳۶]. آوا و همکاران در پژوهشی با بررسى اغتشاشات پلاسماى يونسفرى ايجاد شده هنگام طوفان در امتداد میدان مغناطیسی نشان دادند که بعد از نیمه شب نیز این اغتشاشات به طور قابل ملاحظهای تداوم داشته و به صورت اغتشاشات پلاسمای یونسفری تا عرضهای جغرافیایی متوسط<sup>6</sup> نیز گسترش پیدا میکنند [۳۷]. تحقیقات ذکر شده همه با استفاده از مشاهدات زمینی در هنگام رخداد طوفان ژئومغناطیسی ســال ۲۰۱۷ تمرکــز داشــتهانــد. در سـالهـای اخیـر یژوهشهای انجام شده علاوه بر استفاده از مشاهدات زمینی از مشاهدات ماهوارههای کوتاه پرواز نیز جهت شناسایی رفتار قسمت بالایی یونسفر بهره گرفتهاند. لیو

<sup>&</sup>lt;sup>\</sup> Global Navigation Satellite System

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup> Upper Ionosphere

<sup>&</sup>quot; Thermal Plasma

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Equatorial Plasma Bubbles

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Middle Latitudes

و همکاران در این تحقیق در دوره طوفان ژئومغناطیسی سپتامبر ۲۰۱۷ با استفاده از مشاهدات ایستگاههای شبکه 'CORS ایالات متحده امریکا و مشاهدات ماهواره SWARM-A استفاده شده که در این تحقیق با استفاده از پارامترهای ROTI و مشاهدات تفاضلی TEC حاصل از مشاهدات گیرنده زمینی و مشاهدات چگالی الکترونی Ne حاصل از ماهواره SWARM-A به بررسی اختلالات سیار یونسفری متوسط MSTID<sup>۲</sup> در محدوده آمریکای شـمالی هنگـام رخـداد طوفـان میپـردازد [۳۸]. در یژوهشی دیگر جیمو و همکاران با استفاده از TEC حاصل از مشاهدات چهار ماهواره -GRACE, SWARM A, TerraSAR-X, MetOp-A ونيز مشاهدات Ne ونيز مشاهدات RODI<sup>r</sup> حاصل از مشاهدات SWARM-A در زمان فاز ابتدایی طوفان ۸-۷ سیتامبر ۲۰۱۷ که بیشترین اغتشاشات در این بازه اتفاق افتاده، به بررسی شرایط یونسفر و اغتشاشات یونسفری بدون استفاده از

مشاهدات گیرنده های زمینی GNSS میپردازد [۳۹]. در این مقاله ابتدا با استفاده از مشاهدات ژئوفیزیکی به نحوه رفتار طوفان ژئومغناطیسی در بازه ۶ الی ۱۲ سپتامبر سال ۲۰۱۷ و معرفی پارامترهای یونسفری جهت تشخیص اختلالات ناشی از طوفان ژئومغناطیسی بر یونسفر خواهیم پرداخت. سپس با معرفی منطقه مورد مطالعه از پارامترهای یونسفری استخراج شده از داده های زمینی جهت شناسایی رفتار یونسفر در هر روز و ارتباط آن با تغییرات در پارامترهای ژئوفیزیکی پرداخته شده است.

در بخش پایانی از مشاهدات ماهواره SWARM به جهت شناسایی واکنش بخش بالایی یونسفر به اغتشاشات ناشی از طوفان ژئومغناطیسی و نیز ارتباط آن با مشاهدات گیرنده زمینی در بخش نتایج به تفصیل

توضيح داده شده است.

۲- روش تحقیق و دادههای مورد استفاده

طوف ان های ژئومغناطیسی سبب ایجاد اغتشاشات یونسفری شده که برای تشخیص این اغتشاشات و نوع رفتار آن ها میتوان از مشاهدات یونسفری همچون مشاهدات TEC و نرخ تغییرات آن، مشاهدات چگالی الکترونی و پارامترهای درخشش یونسفری استفاده نمود [۱۷ و ۱۸]. با استفاده از مشاهدات گیرندههای زمینی GNSS میتوان میزان <sup>†</sup>TEC را در مسیر گیرنده و ماهواره در نقطهای در ارتفاع مشخص روی لایه یونسفر به نام <sup>6</sup> IPP محاسبه نمود که به آن پارامتر STEC اطلاق میشود. با استفاده از پارامتر STEC و نرخ تغییرات آن میتوان برای شناسایی اغتشاشات یونسفری استفاده نمود [۴۰].

برای استخراج مقادیر STEC از مشاهدات GNSS یک ترکیب خطی تشکیل میشود که ترمهای هندسی مشاهدات را حذف می کند. این ترکیب اصطلاحا ترکیب خطی عاری از هندسه<sup>۷</sup>نامیده می شود.

برای تشکیل ترکیب خطی عاری از هندسه از مشاهدات هم زمان فازهای حامل *L1* و *L2* یا مشاهدات کد *I1* و *P2* استفاده می شود. بدین ترتیب علاوه بر ترم هندسـه تمام ترمهای مستقل از فرکانس مانند آفسـت سـاعت و تاخیر تروپسفری نیز حذف می شوند. این ترکیب منجـر به یک مشاهده جدید شده که شامل شکست یونسفری و تفاضل فرکانسی تاخیرات سخت افزاری<sup>۸</sup> است. ایـن ترکیب در رابطه (۱) آورده شده است [۴۰].

- <sup>9</sup> Slant Total Electron Content
- <sup>*Y*</sup> Geometry-free linear combination
- <sup>h</sup> Differential inter-frequency hardware delays

بررسـی تـاثیر ات طوفـان ژئومغناطیسـی بـر اغتشاشـات ... علیرضا عتباتی و همکار ان

<sup>&</sup>lt;sup>+</sup> Total Electron Content

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Ionospheric Pierce Point

<sup>&</sup>lt;sup>\</sup> Continuously Operating Reference Stations

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbances

<sup>&</sup>quot; Rate of Density Index

#### سال دهم شماره سوم پاییز ۱۴۰۱

رابطه(۱)  

$$\begin{bmatrix}
 L_4 = L_1 - L_2 \\
 P_4 = P_1 - P_2
 \end{bmatrix}$$
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 P_4 = P_1 - P_2
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 P_4 = P_1 - P_2
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 P_4 = P_1 - P_2
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 P_4 = P_1 - P_2
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 F \cdot I
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}
 F \cdot I \\
 \end{bmatrix}$ 
 $\begin{bmatrix}$ 

$$P_{1} = \rho + c(\Delta t_{i} - \Delta t^{k}) + \Delta \rho_{trop} + \Delta \rho_{iono^{1}} + c(b^{k} - b_{i})_{1} + \varepsilon_{1}$$

$$P_{2} = \rho + c(\Delta t_{i} - \Delta t^{k}) + \Delta \rho_{trop} + \Delta \rho_{iono^{2}} + c(b^{k} - b_{i})_{2} + \varepsilon_{2}$$
(7)

$$\begin{cases} L_{1} = \rho + c(\Delta t_{i} - \Delta t^{k}) + \Delta \rho_{trop} - \Delta \rho_{iono^{1}} + \lambda_{1}B_{1} + \varepsilon_{1} \\ L_{2} = \rho + c(\Delta t_{i} - \Delta t^{k}) + \Delta \rho_{trop} - \Delta \rho_{iono^{2}} + \lambda_{2}B_{2} + \varepsilon_{2} \end{cases}$$
(٣) رابطه (٣)

$$P_4 = +\xi_4 I + c(\Delta b^S - \Delta b_R) \tag{(4)}$$

$$L_4 = -\xi_4 I + B_4$$
 (۵) رابطـه (۵)

$$I = \xi_E STEC(\beta, s) \tag{(6)}$$

در رابطه(۶)،  $\beta$  عرض ژئومغناطیسی، ۶ طول در سیستم خورشید آهنگ و مقدار  $\xi_E$  با *TECU (*ابطه (۶) در روابط برابر است. بنابراین با جای گذاری رابطه (۶) در روابط (۴) و (۵) مقادیر *STEC* به ترتیب از مشاهدات کد و فاز قابل استخراج هستند. با استفاده از مشاهدات کد و فاز *VTEC (*استای خط دید<sup>۲</sup> ماهواره میتوان پارامتر *STEC در* محاسبه نمود که حاصل از ضرب مشاهدات *STEC در* تابع انتقال (*ع) M*میباشد و به صورت رابطه(۷) نمایش داده شده است [۴۳]: *VTEC = STEC / M*( $\varepsilon$ ) (*TEC = STEC / M*( $\varepsilon$ )

مقدار تابع انتقال را میتوان با استفاده از رابطه(۸) محاسبه نمود:

$$\xi_4 = 1 - f_1^2 / f_2^2 \approx -0.647$$
 در روابـــط مـــذكور،  $B_4$  فاكتورى مربوط به شكست يونسفرى بوده و مقدار  $B_4$  برابر با  $B_4 = \lambda_1 B(f_1) - \lambda_2 B(f_2)$  مى باشد.

<sup>&</sup>lt;sup>r</sup> Line of Sight (LOS)

<sup>&</sup>lt;sup>\</sup> Differential Code Bias

$$M(\varepsilon) = \left[1 - \left(\frac{R.\cos(\varepsilon)}{R+h}\right)^2\right]^{-1/2}$$
 (٨) (٨) (٨)

که در رابطه (۸) پارامتر ۶ بیانگر زاویه ارتفاعی میان گیرنده و ماهواره، R مقدار شعاع زمین و h ارتفاع اندازه گیری شده در لایه یونسفری است که در این تحقیق مقدار پارامترها در ارتفاع ۴۶۰ کیلومتری در لایه یونسفر اندازه گیری شده است [۴۴]. با استفاده از پارامتر STEC و نرخ تغییرات آن میتوان برای شناسایی اغتشاشات یونسفری استفاده نمود [۴۰].

علاوه بر این میتوان با استفاده از مشاهدات STEC در راستای خط دید ماهواره مقدار اختلاف TEC را در راستای ماهواره و با دقت بالا فراهم آورد، این شاخص، TECU نرخ TEC یا ROT' نامیده می شود که واحد آن بر دقيقه است كه هر TECU برابر ۱۰<sup>۱۶</sup> الكترون بر مترمربع است. برای شناسایی اغتشاشات یونسفری در مقیاس هایی متفاوت شاخص های ROT و همچنین انحراف از معیار این شاخص به نام ROTI استفاده نمود [۴۵]. محاسبه پارامتر ROT که حاصل از اختلاف میزان در ایک k+1 ام با ایک K ام مشاهداتی بر STEC اختلاف زمانی میان ایکها بر حسب دقیقه است که در رابطه (۹) صورت زیر نمایش داده شده است:

 $ROT = \frac{STEC_{k+1} - STEC_k}{STEC_k}$ , ابطه(٩) پارامتر ROTI حاصل از انحراف از معیار مقادیر ROT مشاهداتی برای N ایک متوالی میباشد که بنا به نرخ برداشت مشاهدات ميتواند مقدار N متفاوت باشد. نحوه محاسبه پارامتر ROTI در رابطه (۱۰) آورده شده است: رابطه(۱۰)

$$ROTI = \sqrt{(E(ROT^2) - (E(ROT))^2)}$$
  
در کنار مشاهدات ROTI میتوان از مشاهدات پارامتر  
که نیز جهت شناسایی تاثیر اغتشاشات یونسفری بر  
سیگنال ارسالی استفاده کرد. از ۶4 به عنوان پارامتر  
درخشش یونسفری دامنه<sup>۲</sup> یاد میشود که از پارامتر

C/N0 حاصل از مشاهدات گیرنده GNSS حاصل شده و جهت شناسایی درخشش های یونسفری که نوعی از اغتشاشات يونسفري است، استفاده مي شود [۴۶]. یارامتر C/NO حاصل از فایل مشاهداتی از ماهواره به صورت یارامتر S1 و S2 در دو فرکانس L1 و L2 می باشد. برای محاسبه S4 ابتدا با استفاده از C/NO، میزان نرخ سیگنال به نویز (S/NO) با استفاده از رابطه(۱۱) محاسبه شده و سپس با استفاده از روش دیترند<sup>۳</sup> کردن که در رابطه (۱۲) ذکر شده مقادیر *S/NO* دیترند می شود [۴۷]. رابطه

$$S / N_0 = 10^{0.1(C/N_0)}$$
(1))

$$SI_{det rended}^{S/N_0} = \frac{(S/N_0)_k}{\sum_{i=1}^{60 \times f_s} (S/N_0)_{k-i}}$$
 (۱۲) ابطه

در رابطه (۱۲)،  $f_s$ نشان دهنده نرخ مشاهدات گیرنده GNSS مىباشد. حال با توجه به روابط بالا نحوه محاسبه 54 در رابطه (۱۳) آورده شده است: رابطه(۱۳)

$$S4 = \sqrt{\frac{\langle \left(SI_{det rended} S/N_0}\right)^2 \rangle - \langle SI_{det rended} S/N_0 \rangle^2}{\langle SI_{det rended} \rangle^2}}$$

با توجه به رابطه (۱۳) میتوان دریافت که پارامتر 54 بنا به نوع تعريف آن كه حاصل از انحراف معيار مقادير شدت سیگنال به نویز دیترند شده در یک بازه زمانی است، لذا واحدی برای نمایش آن وجود ندارد. 54 برای بازههای زمانی از چند ثانیه تا چند ساعت بنا به نوع نیاز کاربر استفاده می شود. در این تحقیق از مشاهدات ایستگاه زمینی GNSS با نرخ مشاهداتی یک ثانیهای استفاده شده است و مشاهدات S4 و ROTI با گام زمانی پنج دقیقهای محاسبه شده است.

### ۲-۱-۲ مشاهدات ماهوارههای SWARM

مأموریت SWARM از سه ماهواره یکسان تشکیل شده است که در ژوئن ۲۰۱۴ به فضا فرستاده شدند و در

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Rate of TEC

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Amplitude Ionospheric Scintillation

<sup>&</sup>quot; Detrend

سال دهم شماره سوم پاییز ۱۴۰۱

تغییرات چگالی الکترونی<sup>۳</sup> (ROD) در رابطه (۱۴) آورده شده است:

$$ROD(t) = \frac{Ne_{k+1} - Ne_{k}}{\Delta t}$$
(۱۴) رابطه

با توجه به نرخ مشاهداتی 2Hz مقدار  $\Delta t = 0.5s$  بوده که مناسب جهت شناسایی اغتشاشات در بازههای زمانی کوتاه است. با استفاده از مشاهدات نرخ تغییرات چگالی الکترونی (ROD) مقدار شاخص نرخ تغییرات چگالی الکترونی<sup>4</sup> (ROD) حاصل از انحراف معیار مشاهدات ROD در بازه زمانی خاص است. در این پژوهش بازه زمانی تعیین شده ده ثانیهای خواهد بود. مقادیر ROD را به صورت رابطه(۱۵) محاسبه می-کنیم:

رابطه(۱۵)

 $RODI = \sqrt{(E(ROD^2) - (E(ROD))^2)}$ با استفاده از مجموعه مشاهدات حاصل شده از دادههای ماهواره های ماموریت SWARM میتوان مقادیر اغتشاشات ایجاد شده در چگالی الکترونی را در مدت زمان رخداد پدیدههای ژئومغناطیسی همچون طوفانهای ژئومغناطیسی در عرض و طولهای جغرافیایی متفاوت و یا حتی به صورت جهانی مشاهده و محاسبه نمود.

### ۲-۲- طوفان ژئومغناطیسی

یک طوفان ژئومغناطیسی به نسبت بزرگ در محدوده ۲۰۱۰ سـپتامبر سـال ۲۰۱۷ بـه دلیـل یـک سـری فورانهای دنباله دار تاج خورشیدی<sup>۵</sup> اتفاق افتاده است. ویژگیهای این طوفان ژئومغناطیسی در شکل (۱) برای محدوده رخداد طوفان ژئومغناطیسی در روزهای ۱۲-۶ سپتامبر ۲۰۱۷ آمده است و از ایـن دادهها بـه جهـت توصـیف شـدت طوفان ژئومغناطیسـی ناشـی از فعالیتهای خورشیدی در زمان فوران تـاج خورشـیدی آپریل همان سال در مدار نهایی خود قرار گرفتند. ماهوارههای SWARM-A و SWARM-C در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین و در فاصله ۱ تا ۱٬۴ درجه طول جغرافیایی از یکدیگر قرار گرفتهاند و ماهواره سوم SWARM-B نیز در ارتفاع مدار ۵۱۰ کیلومتری از سطح زمین قرار گرفته است [۴۸ و ۴۹]. هـر سـه مـاهواره تحقیقاتی SWARM مجهز به دستگاهی به نام کاوشـگر پلاسمای لانگمیر ( بوده که توانایی اندازه گیری چگالی الكتروني و دماي يونسفر را به صورت كاليبره شده و ارزیابی شده در محل عبور ماهواره را دارا هستند [۵۰ و ۵۱]. علاوه بر این سه ماهواره ماموریت SWARM مجهز به گیرندههای GNSS دوفرکانسه بر روی خود بوده که قابلیت استفاده از مشاهدات نرخ بالا ارا برای کاربر فراهم می آورد که میتوان از این نوع داده ها به جهت مطالعه در مورد تغییرات یونسفر بهره گرفت. در این پ\_ژوهش از دادههـای مشـاهداتی چگـالی الکترونـی در محل عبور ماهواره با کمک دستگاه Langmuir plasma probes و نیےز دادہ های مشاهدات GNSS بےرای سے م\_اهواره ماموري\_ت SWARM اس\_تفاده ش\_ده اس\_ت. ماهوارههای SWARM A &C در لایـه F2 یونسـفر قـرار دارد که محیط اصلی ایجاد اغتشاشات یونسفری ناشی از امواج خور شیدی است.

Langmuir plasma با استفاده از مشاهدات دو گیرنده SWARM نصب شده بر هر کدام از سه ماهواره SWARM میتوان مقادیر چگالی الکترونی  $N_e$  را با نرخ 2Hz در مکان عبور ماهواره مشاهده نمود [۵۰]. مشاهدات نرخ تغییرات چگالی الکترونی در محدوده ایستگاه زمینی مشاهداتی را میتوان به جهت شناسایی اغتشاشات یونسفری استفاده نمود [۵۲, ۵۳]. نحوه محاسبه نرخ

<sup>&</sup>lt;sup>r</sup> Rate of Density

<sup>\*</sup> Rate of Density Index

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Coronal Mass Ejections

<sup>&</sup>lt;sup>\</sup> Langmuir plasma probes

<sup>&</sup>lt;sup>r</sup> High Rate

(CME) استفاده شده است. این داده ها برای این منظور از مجموعـهای از پارامترهای ژئومغناطیسـی همچـون نظیـر میـدان مغناطیسـی بـین سـیاره ای<sup>۱</sup> ، شـاخص ژئومغناطیسی بینالمللی<sup>۲</sup> ، الکتروجت قطبی<sup>۳</sup>، شاخص dSt و نرخ تغییرات پارامتر Jost ( Dst / ( dt ) ) برای توصیف شدت طوفان مغناطیسی استفاده شده است. با استفاده از این پارامترها میتوان دریافت کـه بیشترین ژئومغناطیسی در فاز اصلی طوفان در روزهای ۷ الی ۸ میـزان اغتشاشـات در هرکـدام از پـارامترهـای شپتامبر رخداده است. در روزهای ۱۰ و ۱۱ سـپتامبر نیز شـاهد رخـداد فاز تـرمیم<sup>۵</sup> طوفان ژئومغناطیسی هستیم که سبب ایجاد اغتشاشات با شدت بسیار کمتـر از فاز اصلی طوفان خواهیم بود.

میدان مغناطیسی بین سیاره ای (*IMF*) نقش مهمی در حفاظــت مگنتوسـفر زمـین در مقابـل بادهـای خورشیدی بازی می کند. میدان مغناطیسی بین سیاره ای یک بردار با یک جزء سه محوره است که دو مورد از آنها (*B* و *B*) به موازات اکلپتیک قرار گرفته است و در اثر امواج و سایر اختلالات بادهای خورشیدی ایجاد می-شـود و مولفـهای مناسـب بـه جهـت نشـان دادن فعالیتهای ژئومغناطیسی محسوب میشود [۱]. شکل(۱-الف) نشاندهنده مقادیر *B* – *IM* است که شمالی – جنوبی را نشان میدهد. با توجه به شکل (۱-الف) شـروع اغتشاشـات و افـزایش یکباره میـزان ۲۳:۰۰ *UT* موز ششـــم و *IMF –Bz* روز شمــران میزان تغییرات میدان مغناطیسی زمـین در راستای

معرف شروع غیرمنتظره طوفان<sup>9</sup> (SSC) است. همانگونه که در شکل (۱–الف) مشخص است اغتشاشات MF - Bz با اولین SSC آغاز می شود اما بیشترین میزان اغتشاشات SSC - IMF در TV ۲۰:۰۰ روز هفتم سپتامبر رخداده است که سبب نوسانات شدیدی هنگامی رخ داده است که MF - Bz در مرحله اصلی طوفان ژئومغناطیسی ناگهان به سمت جنوب میچرخد و مقدار آن ناگهان به حدود Trrr- کاهش میابد. این (مسلم رامتر را می MT در مرحله اصلی MT میزان از سایت MT

شاخص ژئومغناطیسی بینالمللی *Kp* را میتوان جهت اندازهگیری میزان فعالیتهای ژئومغناطیسی زمین به کار گرفت.  $K_p$  حاصل مشاهده مولفههای K در سه راستای  $D^{\mathfrak{q}}$   $\cdot H^{\lambda}$  و  $Z^{\mathfrak{l}}$  در بازههای زمانی سه ساعته میباشد. *Kp* میتواند پارامتر موثری به جهت شناسایی و ارزيابي روزهايي كه اغتشاشات ژئومغناطيسي بالايي دارند، استفاده کرد. به گونهای که مقادیر پایین تر از ۳ برای این پارامتر نشان دهنده وضعیت آرام از لحاظ ژئومغناطیسی است این در حالی است که افزایش این پارامتر سبب افزایش اغتشاشات یونسفری میشود مقادیر *Kp* را می توان از نشانی [۴۵]. دريافت http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp نمود. شکل(۱–ب) مقدار Kp دو افزایش ناگهانی در مقدار خود را در اولین و دومین SSC دارد. با اولین SSC مقدار <sub>Kp</sub> روندی صعودی در پیش میگیرد و با رخداد دومین SSC در ساعات پایانی روز هفتم مقدار Kp با جهشی صعودی به بیشترین میزان خود میرسد.

<sup>v</sup> Nano Tesla

- ^ مولفه افقی میدان ژئومغناطیسی زمین ۹ زاویه بین مولفه H و نصف النهار جغرافیایی ۱۰ مولفه قائم میدان ژئومغناطیسی زمین
- <sup>\</sup> Interplanetary magnetic field
- <sup>r</sup> International K<sub>p</sub> index
- <sup>r</sup> Auroral Electrojet
- <sup>+</sup> Disturbance storm time index
- <sup>a</sup> Recovery

بررسی تـاثیرات طوفـان ژئومغناطیسـی بـر اغتشاشـات ... علیرضا عتباتی و همکاران

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Sudden Storm Commencements

شاخص Dst یک شاخص فعالیت مغناطیسی است که از شبکهای از مشاهدات ژئومغناطیسی نزدیک به استوا در

راستای افقی حاصل می شود که شدت میزان الکتورجت استوایی بین المللی را اندازه می گیرد. مقدار Dst منفی

### سال دهم • شماره سوم • پاییز ۱۴۰۱





شکل ۱: (الف) مقادیر مشاهداتی Dst ، (ب) مقادیر مشاهداتی Kp ، (ج) مقادیر مشاهداتی Dst ، (د) نرخ تغییرات Dst و (ه) مقادیر مشاهداتی پارامترهای AE/AU/AL

با مشاهده شکل (۱–ج) مقدار Dst و مقادیر Dst و مقادیر Dst مشاهده شکل (۱–د)، شروع طوفان سبب ایجاد (Dst/dt روندی اغتشاشی در این پارامترها شده به گونهای که این مقادیر در ساعات ابتدایی روز هفتم سپتامبر و همراه با اولین SSC ابتدا روندی افزایشی و بلافاصله SSC روندی نزولی را در پیش میگیرد و با شروع دومین SSC به ناگهان دچار یک کاهش سریع شده و به Tsr

میرسد که سبب ایجاد یک تغییر ناگهانی در روند d(Dst)/dt نیز میگردد.

الکتروجت قطبی، یک جریان باریک و پر سرعت از انرژی الکتریکی است که در عرضهای جغرافیایی بالاتر از استوا و نزدیک به مناطق قطبی ظاهر میشود. به منظور ارائه یک شاخص اندازه گیری بین المللی از فعالیت مغناطیسی منطقه قطبی ایجاد شده توسط جریان های یونسفری سیال در مناطق قطبی است که

به آن شاخص الکتورجت قطبی AE گویند. محاسبه مقدار AE توسط میانگین میان بیشترین AU و کمترین AL مقادیر مشاهداتی تغییرات ژئومغناطیسی در راستای افقی از میان ایستگاههای مشاهداتی در محدوده نواحی قطبی در نیمکره شمالی بدست میآید [۳۸]. این مشاهدات را میتوان از نشانی http://omniweb.gsfc.nasa.gov

در شکل (۱-ه) مقدار AE در روز ششم در بالاترین میزان به ۵۰۰*n*T میرسد در حالیکه با آغاز طوفان این مقدار در روز هفتم سپتامبر روندی صعودی را همراه با اغتشاشاتی در پیش میگیرد و در ساعات پایانی روز هفتم سپتامبر و در اوج رخداد طوفان ژئومغناطیسی به بیشترین میزان خود در حدود ۲۴۰۰*n*T میرسد.

# ۳- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش از ایستگاه دائمی مشاهدات GNSS در محدوده آنامولی استوایی در کشور تانزانیا در قاره آفریقا به نام OLO3 (-2.75398 E, 35.87139 N, 1483.00 به نام (H با اختلاف ساعت (GMT + 03) با استفاده از گیرنده HTRIMBLE NETR9 و آنـتن TRM57971.00 اسـتفاده شده است. فایل مشاهدات ایستگاه زمینی با نرخ یک ثانیه از سهاز *UNAVCO* به نشهانی /https://www.unavco.org/data/gps-gnss قابـــــل برداشت میاشد. علاوه بر مشاهدات ایستگاههای زمینیی GNSS از مشاهدات سه ماهواره ماموریت SWARM به جهت شناسایی اغتشاشات ایجاد شده در یونسفر در زمان رخداد طوفان ژئومغناطیسی در ۸-۷ سیپتامبر سال ۲۰۱۷ استفاده شده است. مقادیر استخراج شده از داده های ایستگاه زمینی با زاویه برداشت ۲۰ درجه انجام گرفته است که سبب ایجاد ناحیهای دایرهای شکل در محدوده ایستگاه زمینی شده که محل قرار گیری مشاهدات IPP است. مقادیر مشاهداتی از دادههای ماهوارههای ماموریت SWARM در محدوده مشاهداتی IPP های برداشتی از ایستگاه زمینی است که با دایرهای زرد رنگ در شکل (۲) به نمایش گذاشته شده است. در این راستا از مشاهدات

گیرندههای GNSS نصب شده بر روی هر کدام از این سه ماهواره و همچنین مشاهدات چگالی الکترونی یونسفری حاصل از مشاهدات دستگاههای الکترون *Langmuir* در راستای مسیر حرکت ماهواره و در محدوده ایستگاه زمینی که در شکل (۲) با دایرهای زرد رنگ مشخص شده است، استفاده شده است. دادههای مربوط به ماموریت SWARM را میتوان از نشانی http://earth.eas.int/Swarm دریافت نمود. **۴ - نتایج** 

این پژوهش سعی در بررسی میزان اغتشاشات ایجاد شده در یونسفر در زمان فاز ابتدایی رخداد طوفان ژئومغناطیسی در بازه زمانی ۶ الی ۱۲ سپتامبر سال ۲۰۱۷ با استفاده از ترکیب مشاهدات گیرندههای زمینی نرخ بالا و مشاهدات ماهوارههای SWARM را دارد. علاوه ایستگاه ایستگاه مشاهداتی (OLO3) با نرخ برداشت ۱ ثانیه، به منظور مشاهده تاثیرات طوفان های ژئومغناطیسی بر قسمت بالایی یونسفر از مشاهدات دو ماهواره SWARM A & C استفاده شده است که با استفاده از گیرندههای GNSS نصب شده بـر روی آنهـا قايبليت استخراج پارامترهاي يونسفري را دارا بوده و همچنین با استفاده از مشاهدات گیرندهای Langmuir plasma probes قابليت مشاهده ميزان چگالی الکترونی و نیز نرخ تغییرات آن را محدوده حرکت ماهواره با نرخ مشاهداتی ۰٫۵ ثانیه را نیز دارا میباشند. که میتواند اطلاعات سودمندی از تاثیرات طوفان ژئومغناطیسی بر چگالی الکترونی یونسفر در محدوده عبور ماهواره از محدوده ایستگاه مشاهداتی در اختيار قرار دهد.

### سال دهم شماره سوم پاییز ۱۴۰۱



شکل ۲: ایستگاه OLO3 و محدوده مشاهداتی برای دادههای SWARM واقع در کشور تانزانیا

# ۴–۱– نتایج حاصل از مشاهدات ایســتگاه زمینــی 0L03

با توجه به دادههای ژئومغناطیسی ذکر شده در بخش ۲-۲ پر واضح است که فاز ابتدایی طوفان ژئومغناطیسی در ساعات پایانی روز ششم سپتامبر آغاز شده است و این فرآیندهای اغتشاشی در روز ۷ سپتامبر نیز ادامه پیدا میکند و ساعات پایانی روز هفتم و ابتدای روز هشتم این اغتشاشات به اوج خود میرسد و تا ساعات پایانی روز ۸ سپتامبر از میزان این اغتشاشات کم شده و شرایط کم کم به رویه قبلی خود بازمیگردد. شکل (۱) خود معرف شرایط ژئومغناطیسی این رویداد هستند. در بازه زمانی دو روزه ۷-۸ سپتامبر فاز ابتدایی طوفان ژئومغناطیسی روی میدهد. در فاز ابتدایی طوفان ژئومغناطیسی، یک میدان الکتریکی در یونسفر به نام ميدان الكتريكي سريع نفوذ كننده PPEF ايجاد میشود که به سرعت از نواحی با عرض جغرافیایی بالا به سمت نواحی با عرضهای جغرافیایی متوسط و پایین گسترش مییابد که بیشترین تاثیر را در ایجاد اغتشاشات در زمان طوفان ژئومغناطیسی را دارد. با توجـه بـه مقادیر ذکـر شـده در بخـش ۲-۲ فـاز دوم تغییرات حاصل از طوفان ژئومغناطیسی به نام مرحله ترمیم در روزهای ۱۱ و ۱۲ سپتامبر اتفاق میافتد که به دلیل ایجاد DDEF که یک میدان الکتریکی است و به نسبت PPEF که در فاز اولیه طوفان اتفاق میافت.د شدت کمتری دارد. با توجه به این موضوع که تغییرات

یونسفری در زمان فاز ابتدایی طوفان از شدت بیشتری بر يونسفر نسبت به فاز ثانويه برخوردار بوده است، اين پژوهش سعی در بررسی تاثیرات طوفان ژئومغناطیسی در روزهای ۶ الی ۹ سپتامبر را دارد. با توجه به مطالب ذکرشده در بخس ۲-۲ میدانیم که در ساعت UT Dst، IMF-Bz اغتشاشاتی در پارامترهای T۳:۴۳ اتفاق افتاده و نشان دهنده شروع اولين d(Dst)/dtSSC است و از آن میتوان به عنوان سرآغاز اغتشاشات ژئومغناطیسی یادکرد. در زمان رخـداد دومـین SSC در ۲۳:۰۰ UT روز هفتم سپتامبر میزان اغتشاشات به وضوح در تمام پارامترهای ژئومغناطیسی مشهود است که دلیلی بر شدیدتر بودن اغتشاشات ژئومغناطیسی نسب به SSC قبلی است و نشان از رخداد یک طوفان ژئومغناطیسی بزرگ است. در ساعات پایانی روز هشتم از میزان اغتشاشات کاسته میشود و شرایط به سمت عادی شدن پیش میرود. حال میزان تاثیرات این تغییرات را هرکـدام از پارامترهـای مشـاهداتی ارزیـابی میکنیم. به همین منظور مقدار مشاهدات VTEC با نرخ برداشت یک ثانیه در ایستگاه OLO3 برای روزهای ۶-۹ سپتامبر در شکل (۳) آورده شده است.

شکل (۳) مقادیر مشاهداتی VTEC را برای هر PRN در ستون (الف) و متوسط مشاهدات VTEC را درستون (ب) به نمایش گذاشته است. با توجه به شکل (۳) میتوان دریافت که مقادیر مشاهداتی VTEC یک ترند روزانه را دارند. در روز ششم سپتامبر اولین SSC بررسـی تـاثیر ات طوفـان ژئومغناطیسـی بـر اغتشاشـات ... علیرضا عتباتی و همکار ان

> درساعت UT ۲۳:۰۰ رخ میدهد که با توجه شکلهای (۳-الف-۱) و (۳-الف-۲) و مقادیر جدول(۱) میتوان دریافت که مقادیر مشاهداتی VTEC در ساعات پایانی روز ششم و ساعات آغازین روز هفتم روندی رو به رشد

داشته است به گونهای که مقدار میانگین روزانه مقادیر مشاهداتی VTEC در روز هفتم نسبت به روز قبل با ۲۲۰۷ TECU افزایش رو به رو شده و به مقدار ۲۲/۴۸ میرسد.



شکل۳: مقادیر مشاهداتی VTEC برای هر PRN (ستون الف) و مقادیر متوسط مشاهدات VTEC (ستون ب) در بازه زمانی روزهای ۹-۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷ برای ایستگاه OLO3

با توجه مقادیر مشاهدات ژئومغناطیسی که در بخش ۲-۲ آورده شده که در بالا به آن پرداخته شد، دومین SSC شدتی به نسبت بیشتر نسبت به اولین SSC داشته است. با رخداد دومین SSC در ساعات پایانی روز هفتم شاهد افزایش مقادیر VTEC مشاهداتی نسبت به روند معمول روزانه در این چهار روز هستیم. با توجه به

شکلهای (۳-الف-۲)، (۳-ب-۲)، (۳-الف-۳) و (۳-ب-۳) در میتوان دریافت که در روز هشتم سپتامبر که روز اوج طوفان ژئومغناطیسی است، مقادیر مشاهداتی VTEC نسبت به دو روز گذشته و نیز روز بعد از آن افزایش چشمگیری را تجربه میکند به گونهای که متوسط مقدار VTEC در روز هشتم با ۲/۹۶ TECU

سال دهم شماره سوم پاییز ۱۴۰۱

افزایش به میزان ۲۵٬۴۴ TECU میرسد. این افزایش در ساعات پایانی روز هفتم ایجاد شده و در ساعات پایانی روز و نزدیک به غروب آفتاب این مقدار به بیشترین میزان خود میرسد که دلیل این افزایش مقادیر مشاهداتی را میتوان رخداد پدیده PPEF بوده که در مناطق استوایی در زمانهای نزدیک به غروب آفتاب (به وقت محلى) اتفاق مىافتد، دانست. با توجه به شکلهای (۳-الف-۳)، (۳-ب-۳)، (۳-الف-۴) و (۳-ب-۴) در ساعات بعد از غروب افتاب در روز هشتم از شدت روند افزایش در مقادیر VTEC کاسته شده و شرایط به سمت عادی شدن پیش میرود و یونسفر روند ترمیم را آغاز میکند به گونهای که در روز نهم سپتامبر میزان متوسط مقادیر مشاهداتی VTEC کمترین میزان خود در این چهار روز میرسـد. عـلاوه بـر مشـاهدات VTEC میتوان تاثیرات اغتشاشات ژئومغناطیسی را بر فعالیتهای یونسفری با استفاده از پارامترهای نشانگر اغتشاشات یونسفری همچون پارامترهای S4 و ROTI در بازه زمانی ۹–۶ سـپتامبر در ایسـتگاه مشـاهداتی OLO3 بررسی نمود.

در شکل (۴) مقادیر مشاهداتی 54 برای روزهای ۹-۶ سپتامبر برای هر PRN (ستون الف) و به طور متوسط (ستون ب) آورده شده است. با توجه به شکلهای (۴-الف-١)، (٢-ب-١)، (٢- الف -٢) و (٣-ب-٢) با رخداد اولین SSC در ساعات پایانی روز ششم همانند مقادیر VTEC مقداير S4 و ROTI نيز افزايش مي يابند. در خصوص پارامتر S4 که از آن به عنوان پارامتر درخشش یونسفری دامنه یاد میشود میتوان گفت که مقادیری که از ۰٫۲ بالاتر باشند معرف رخداد پدیده درخشش یونسفری و نشانگر ایجاد اغتشاشات در لایه یونسفر هستند [۵۵]. مقادیر مشاهداتی S4 بعد از رخداد اولین SSC در ساعات پایانی روز ششم روندی افزایش پیدا میکند و به گونهای که مقدار متوسط S4 از ۱۸، به ۰٬۱۹ رسیده که ۰٬۱۱ افزایش یافته است که نشان از تاثیر تغییرات ژئومغناطیسی است. این روند افزایشی تا روز هفتم نیز ادامه پیدا میکند و مقدار درصد رخداد

درخشش یونسفری در روز هفتم از ۳۹٬۴۲٪ به ۴۷٬۸۱٪ افزایش پیدا میکند که نشان از این دارد که در روز هفتم حدود نیمی از روز با اغتشاش همراه بوده که سبب ایجاد درخشش یونسفری شده است.

در هنگام رخداد دومین SSC در ساعات پایانی روز هفتم مقدار S4 به ۰٬۶۴ در ساعت ۲۱:۴۵ رسیده که مطابق با ساعت ۴۵:۰۰ در وقت محلی است که نشان از رخداد پدیده درخشش یونسفری شدید است که دلیل وقوع آن بنا به زمان رخداد آن به دلیل فعالیتهای طوفان ژئومغناطیسی بوده است. در روز هشتم نیز میزان درصد رخداد درخشش یونسفری افزایش یافته و به ۵۶٫۱۶٪ درصد میرسد که نشان میدهد در اکثر اوقات در این روز شاهد درخشش یونسفری بودهایم. با توجه به شکل (۴–ب-۳) میتوان دریافت که بیشترین میزان مقادیر درخشش یونسفری در هنگام عصر و در نزدیکی غروب آفتاب به وقت محلی رخداده است به گونهای کـه در سـاعت ۱۴:۲۵ (معـادل ۱۷:۲۵ بـه وقت محلی) مقدار متوسط S4 به ۰٬۳۷ رسیده که بیشترین میزان مقدار متوسط S4 ثبت شده در بازه زمانی چهار روزه است که ناشی از رخداد پدیده PPEF که در نواحی با عرض جغرافیایی پایین در هنگام غروب آفتاب رخ میدهد. این رفتار را میتوان در مقادیر متوسط S4 در شکل (۴–ب-۲) نیز مشاهده نمود به حالتی که در ساعات ۲۳:۵۵ و ۲۳:۳۰ پس از رخداد دومین SSC مقدار متوسط S4 به ترتیب به SSC و ۰٬۲۱ میرسد. این افزایش در مقادیر S4 را می توان در روز هشتم سپتامبر به وضوح رویت نمود به گونهای که متوسط مقدار S4 در این روز به ۲۱ رسیده که نشان از این دارد که در اکثر زمانهای این روز مقدار S4 بیشتر از ۰٫۲ بوده است که نشان از این امر دارد که در این روز در اکثر زمانها درخشش یونسفری اتفاق افتاده است به گونهای که در بیشترین مقدار 54 به ۰٬۷۷ در این روز میرسد. در ساعات پایانی روز و با کاهش میـزان فعالیــتهـای ژئومغتاطیسـی مقــدار 54 در روز نهــم سپتامبر کاهش یافته و به ۱۸٬۰ میرسد.



شکل ۴: مقادیر مشاهداتی *S4* برای هر *PRN* (ستون الف) و مقادیر متوسط برای مشاهدات *S4* (ستون ب) در بازه زمانی روزهای ۶-۹ سپتامبر سال ۲۰۱۷ برای ایستگاه *OLO3* 

در شکل (۵) مقادیر مشاهداتی ROTI برای روزهای ۹-۶ سپتامبر برای هر PRN (ستون الف) و به طور متوسط (ستون ب) آورده شده است. در خصوص مشاهدات ROTI میتوان گفت همانگونه که از تصاویر شکل(۴) پیداست، پر واضح است که رفتار این پارامتر همانند پیداست، پر واضح است که رفتار این پارامتر همانند SSC رفتار S4 و VTEV بوده و با توجه به رخدادهای SSC دچار افزایش میشود. با توجه به شکلهای (۵–ب-۱) و (۵–ب-۲) متوسط مقادیر ROTI در روز هفتتم

۰٬۹۷ بـ ۰٬۸۵ افـزایش یافتـه و از ۸۵٬۱۰ بـه ۰٬۹۷ رسیده است. با توجه به شکل (۵-ب-۲) میتوان دریافت که در زمان رخداد دومین SSC در زمان ۲۳:۰۰ در روز ششم مقدار ROTI برابر با ۲۸٬۷ بـوده و سـپس رونـدی افزایش را درپیش میگیـرد بـه گونـهای کـه در سـاعت افزایش را درپیش میگیـرد به گونـهای کـه در ساعت روند افـزایش در ابتـدای روز هشـتم نیـز همـین رونـد صـعودی را ادامـه داده و بـه ۱٬۷۳ در سـاعت ۱:۱۰

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

### سال دهم شماره سوم پاییز ۱۴۰۱

شد، میزان متوسط مشاهدات ROTI نیز دچار یک جهشی ناگهانی شده و به مقدار ۱٬۱۹ رسیده است. با آغاز روز ۹ ساپتامبر و با کاهش فعالیاتهای ژئومغناطیسی مقادیر مشاهدات ROTI نیز روندی کاهشی در پیش گرفته و رفتاری مشابه با VTEC و S4 پیدا کرده و به مقدار ۰٬۸۲ کاهش پیدا میکند که نشان از این دارد که شادت اغتشاشات کم شاده است. میرسد. با استفاده از شکل (۵-ب-۳) و جدول (۱) میتوان دریافت که این روند افزایشی در روز هشتم بیشتر شده و متوسط مقادیر مشاهدات ROTI به ۱٬۱۱ افزایش میابد که بیشترین میزان در بازه زمانی چهار روزه میباشد. با استفاده از شکل (۵-ب-۳) میتوان دریافت که در ساعت ۱۴:۲۵ که یک درخشش یونسفری به نسبت بزرگ اتفاق افتاده است که بالا ذکر



شکل ۵: مقادیر مشاهداتی ROTI برای هر PRN (ستون الف) و مقادیر متوسط برای مشاهدات ROTI (ستون ب) در بازه زمانی روزهای ۹-۹ سپتامبر سال ۲۰۱۷ برای ایستگاه OLO3

علیرضا عتباتی و همکار ان

تاريخ	متوسط VTEC	متوسط <i>54</i>	متوسط ROTI	درصد رخداد Scintillation (S4>0.2)
۶ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۱٫۴۱	• ، ۱۸	۵۸٬ •	٣٩,٪.۴٢
۷ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۲٬۴۸	۰ <sub>/</sub> ۱۹	٠٫٩٧	۴۷٫٪۸۱
۸ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۵٫۴۴	• / ۲ ۱	١,١١	۵۵٫٪.۱۶
۹ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۱٬۱۸	٠,١٨	۰٫۸۲	۴۰,/۳۵

جدول۱: مقادیر مشاهداتی متوسط برای پارامترهای VTEC و S4 و ROTI و پارامتر درصد رخداد درخشش یونسفری برای روزهای ۹-۹ سیتامبر سال ۲۰۱۷

# ۲-۴- نتایج حاصـل از مشـاهدات مـاهوارههـای SWARM

در ایـن پـژوهش عـلاوه بـر مشـاهدات GNSS ایسـتگاه زمینی OLO3 از مشاهدات ماهوارههای ماموریت SWARM نیےز جہےت شناسایی تے اثیرات طوفان ژئومغناطیسی در روزهای ۹-۶ سپتامبر بر پارامترهای یونسفری استفاده شده است. برای این منظور از دادههای مشاهدات ماهوارههای SWARM A & C که در بخش بالایی یونسفر در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین حرکت میکنند در محدوده ایستگاه مشاهداتی زمینیی OLO3 و در محدوده IPP های مشاهداتی این ایستگاه استفاده شده است. با توجه به ارتفاع پرواز بالاتر ماهواره SWARM B نسبت به دو ماهواره دیگر این ماموریت، در این پژوهش از دادههای ماهوار ههای SWARM A & C استفاده شده است. با توجه به محدوده تعیین شده در ایستگاه مشاهدات زمینی، دوره زمانی و مسیر حرکت ماهوارههای در راستای عرض جغرافیایی، در SWARM A & C روزهای ۶ و ۹ سـپتامبر شـاهد دو اپـک مشـاهداتی در حدود سه دقیقهای برای هر کدام از ماهوارهها و در روزهای ۷ و ۸ سیتامبر شاهد یک ایک مشاهداتی خـواهيم بـود كـه جهـت بررسـي تـاثيرات طوفـان ژئومغناطیسی بر مقادیر مشاهداتی در هرکدام از این ماهوارهها استفاده شده است. مقادير مشاهداتي پارامترهای یونسفری برای ماهوارههای SWARM نسبت به پارامترهای یونسفری مشاهداتی توسط ایستگاه زمینی مقادیری کمتر بوده که ناشی اختلاف ارتفاع در

برداشت مشاهدات و همچنین محیط متفاوت عبور سیگنال میباشد به گونهای که سیگنالهای ناوبری از تمام محیط اتمسفر میان گیرنده تا ماهواره GNSS میگذرند درحالیکه برای ماهوارههای SWARM که در بخش بالایی اتمسفر قرار دارند، مقادیر مشاهداتی پارامترهای یونسفری متفاوت بوده و میتوان با استفاده پارامترهای یونسفری متفاوت بوده و میتوان با استفاده تاثیرات اغتشاشات ژئومغناطیسی را بر بخش بالایی تاثیرات اغتشاشات ژئومغناطیسی را بر مشاهدات یونسفر بررسی نمود. برای شناسایی تاثیر اغتشاشات ژئومغناطیسی بر بخش بالایی یونسفر از مشاهدات مقادیر متوسط VTEC و IOD استفاده شده است که مقادیر این مشاهدات در شکلهای (۶) الی (۸) آورده شده است.

مقادیر مشاهداتی VTEC متوسط حاصل از مشاهدات ماهوارههای GNSS با گیرنده ماهوارههای SWARM با زاویه برداشت بیشتر از ۳۰ درجه در شکل (۶) آورده شده است. همانگونه که از شکلهای (۶-الف) و (۶-ج) پیداست میتوان دریافت که مقادیر مشاهداتی متوسط پیداست میتوان دریافت که مقادیر مشاهداتی متوسط *VTEC* در روز ۶ سپتامبر در بازه زمانی قبل از ظهر حدفاصل ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ برای ماهوارههای قبل از ظهر *C* عبرداشت شده است که با مقایسه با متوسط مقادیر مشاهدات *VTEC* حاصل از ایستگاه زمیندی در شکلهای (۳-الف-۱) و (۳-ب-۱) میتوان دریافت که این مشاهدات در این بازه زمانی روندی صعودی را *تجربه کردند که* ناشی از افزایش روزانه مقادیر چگالی *VTEC* الکترونی است. مقدار متوسط مقادیر مشاهداتی *VTEC* برای ماهواره *A-MRM* به ترتیب برابر با ۱۱٬۰۴ و

سال دهم شماره سوم پاییز ۱۴۰۱

برای ماهواره SWARM-C برابر با ۱۰٬۳۵ میباشد. در شکلهای (۶–ب) و (۶–د) مقادیر مشاهداتی برای زمان بعد از ظهر در حدفاصل زمانهای ۱۹:۵۱ تا ۱۹:۵۴ برای دو ماهواره SWARM آورده شده است که میانگین مشاهداتی برای ماهواره A برابر با ۱۱٬۲۲ TECU و برای ماهواره C برابر با ۹٬۸۹ میباشد. در این بازه زمانی اما روند مشاهدات روندی نزولی بوده که مانند روند مشاهدات VTEC حاصل از گیرندههای زمینی میباشد. در روز هفتم مشاهدات تنها متعلق به ماهواره SWARM-A است که در بازه زمانی قبل از ظهر حدفاصل ۷:۳۱ تا ۷:۳۴ برداشت شده است. با مشاهده شکل (۶-ث) میتوان دریافت همچون مشاهدات روز گذشته این ماهواره، روند این مشاهدات نیز شبیه به روند مشاهدات VTEC حاصل از مشاهدات گیرنده زمینی است با این تفاوت که میتوان دریافت که متوسط میزان مشاهدات VTEC در این روز نسبت به روز قبل ۲٬۵۶ افزایش داشته و به مقدار ۱۳٬۷۸ رسیده است. این افزایش مقادیر مشاهداتی VTEC را در مشاهدات حاصل از گیرنده زمینی نیز میتوان دریافت. شکل (۱) که در بخش ۲-۲ آورده شده است، میتوان دریافت که در این بازه زمانی پارامترهای ژئوفیزیکی دچار یک اغتشاش ناگهانی شده است که ناشی از رخداد اولین SSC بوده است. در روز ۸ سپتامبر میزان اغتشاشات ژئومغناطیسی به بیشترین میزان خود در این چهار روز میرسد و همانگونه که انتظار میرفت مقدار مشاهدات VTEC متوسط نيز افزايش ميابد.

با توجه به شکل (۶-و) میتوان دریافت که در این روز تنها مشاهدات ماهدات ماهواره C در محدوده ایستگاه مشاهداتی در هنگام بعد از ظهر و برای زمانهای ۲۰:۰۸ تا ۲۰:۱۱ موجود است. مقدار VTEC متوسط در این روز به ۱۳/۹۶ TECU رسیده است که نسبت به دو روز گذشته روندی افزایشی داشته است.

این روند شبیه به روند مقادیر مشاهداتی VTEC حاصل از مشاهدات گیرنده زمینی در شکل (۳-۴) میباشـد. در

این روز بیشترین مقدار مشاهده VTEC در این بازه چهار روزه نیز به ثبت رسیده است که در زمان ۲۰:۰۸ به ۱۶/۷۴ TECU رسیده است که میتوان این افزایش را ناشی از رخداد طوفان ژئومغناطیسی و به تبع آن افزایش اغتشاشات یونسفری قلمداد نمود. در روز ۹ سپتامبر مانند روز ششم دارای دو ایک مشاهداتی برای هرکدام از ماهوارههای SWARM هستیم.

شکلهای (۷-و) و (۶-و) برای مشاهدات ماهوارههای MARM A & C SWARM A & C همین بازه زمانی در روزهای ششم و هفتم، مقادیر این مشاهدات کاهش یافته است. مشاهداتی VTEC برای ماهواره A برابر با ۷٫۷۳ و برای ماهواره C برابر با ۹٫۴۳ میباشد که گواهی بر کاهش میزان اغتشاشات یونسفری این روز نسبت به روزهای گذشته در بازه زمانی صبح میباشد. برای بازه زمانی عصر نیز میتوان این روند کاهشی را نسبت به روزهای ششم و هشتم مشاهده نمود به گونهای که مقادیر مشاهداتی SWARM برای نمود به گونهای که مقادیر مشاهداتی SWARM برابر با نمود به گونهای که مقادیر مشاهداتی SWARM برای میباشد. این روند کاهشی برای روز نهم سپتامبر میتوان در مشاهدات VTEC حاصل از گیرنده زمینی نیز در شکل(۴) مشاهده نمود.

مقادیر مشاهداتی ROTI متوسط حاصل از مشاهدات ماهوارههای C & A SWARM حاصل از مشاهدات ماهوارههای GNSS با گیرنده ماهوارههای SWARM در شکل (۷) آورده شده است. شکلهای (۷–الف) و (۷–و) مقادیر مشاهداتی در بازه زمانی قبل از ظهر برای دو مقادیر مشاهداتی در بازه زمانی قبل از ظهر برای دو ماهواره C & A ARM دارای یک روندی صعودی است که شبیه به روند مشاهدات VTEC در شکل(۶) میباشد که نشان از افزایش روند مقادیر مشاهداتی TEC در بازه زمانی قبل از ظهر را میدهد. در این بازه زمانی مقادیر متوسط ROTI برای ماهواره A برابر با



شکل ۶ : مقادیر مشاهداتی VTEC متوسط برای محدوده ایستگاه زمینی OLO3 برای روزهای ۹–۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷ در راستای حرکت ماهوارههای SWARM-A & C

نيز صدق كرده و مقدار متوسط ROTI به ROTI در شکلهای (۷–ب) و (۷–د) نیز که در بازه زمانی بعد از ظهر حدفاصل ۱۹:۵۲ تا ۱۹:۵۵مقادیر مشاهداتی ۰٬۰۷۲ برای ماهواره C رسیده و در بیشترین مقدار خود به ۰٫۱۸۲ TECU/s میرسد که نسبت به مقادیر ROTI در ابتدا یک روند صعودی و سپس روندی نزولی دارد که این ترند برای مشاهدات در این بازه زمانی برای مشاهداتی در روزهای ششم و نهم در همین بازه زمانی یک افزایش را تجربه کرده است. در روز نهم نیز همانند تمام روزها تكرار میشود. در روز هفتم مقدار مشاهدات رفتاری که برای مقادیر VTEC مشاهده شد، مقدار ROTI نسبت به همین بازه زمانی در روز قبل افزایش ROTI با روندی کاهشی در بازه قبل از ظهر و نیز در چشم گیری را تجربه میکند و متوسط مقادیر بازه زمانی بعد از ظهر روبرو میشود که همانند روندی مشاهداتی در این روز به ۰٬۰۶۱ میرسد برای ماهواره است که برای VTEC مشاهده شده است. SWARM-A میرسد. این روند افزایش برای روز هشتم

[ DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9 ]

Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-09

[ DOI: 10.52547/jgit.10.3.1 ]

19





شکل۷: مقادیر مشاهداتی ROTI متوسط برای محدوده ایستگاه زمینی OLO3 برای روزهای ۹–۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷ در راستای حرکت ماهوارههای SWARM-A & C

ROTI است که شبیه به روند تغییرات در مقادیر ROTI با استفاده از مشاهدات گیرنده زمینی میباشد. بعلاوه در این شکلها میتوان متوسط مقادیر مشاهداتی ROTI نسبت به روزهای ششم و هفتم در همین بازه زمانی کمتر بوده که مانند رفتار مشاهدات VTEC در همین بازه زمانی است. شکلهای (۲-ح) و (۲-ی) نیز برای بازه زمانی بعد از ظهر برای دو ماهواره A و 2 بوده که بازه زمانی بعد از ظهر برای دو ماهواره A و 2 بوده که نزولی را دریافت که به مانند مشاهدات انجام شده در روزهای ششم و هشتم بوده با این تفاوت که متوسط مقادیر مشاهداتی برای هرکدام از نمودارهای شکل (۸) به تفضیل در جدولهای (۲) و (۳) آمده است. با توجه به شکلهای(۷-ز) و (۷-ط) که در بازه زمانی قبل از ظهر مشاهده شده است میتوان دید که این مشاهدات رفتاری مانند روز ششم ندارند. علت این رفتار متفاوت را میتوان با مقایسه این شکلها با شکل (۵-ب-۴) میتوان دریافت که در ساعت ۲۰۴۵ دومین مقدار مقادیر مشاهداتی ROTI در این روز اتفاق میافتد و سپس مقادیر مشاهداتی ROTI تا ساعت ۲۰۵۰ روندی کاهشی با شتاب بالایی را دارند و سپس از شتاب کاهش مقادیر با شتاب بالایی را دارند و سپس از شتاب کاهش مقادیر میتوان دید که مقادیر مشاهداتی ROTI در ابتدا با روندی اکیدا نزولی مواجه بوده و از زمان ۲۵۰۰ این روند نزولی متوقف شده و جای خود را به روندی تناوبی میدهد که نشان از کاهش میزان شدت کاهش مقادیر



شکل ۸: مقادیر مشاهداتی RODI توسط گیرنده Langmuir plasma probes برای محدوده ایستگاه زمینی OLO3 برای روزهای ۹-۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷ در راستای حرکت ماهوارههای C & SWARM-A ر

مشاهدات RODI حاصل از مقادیر چگالی الکترونی (Ne) اندازه گیری شده توسط دستگاه Iangmuir مشاهدات وجه تمایز میان مشاهدات یونسفری حاصل مشاهدات وجه تمایز میان مشاهدات یونسفری حاصل SWARM و دادههای ماهواره العیرات از گیرنده زمینی GNSS و دادههای ماهواره تغییرات است. با استفاده از مشاهدات RODI میتوان تغییرات چگالی الکترونی را در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری در راستای حرکت ماهواره اندازه گیری نمود. با توجه به شکل (۸) و مقایسه روند مشاهداتی پارامتر RODI با مشاهدات مقایسه دو مشاهداتی پارامتر RODI میتوان دو مشاهدات

برای هرکدام از بازههای مشاهداتی در این چهار روز دارای ترندی مشابه هستند. بعلاوه با نگاه کلی به مشاهدات RODI شکل (۸) میتوان دریافت که مقدار RODI مشاهداتی برای روزهای ۷ و ۸ سپتامبر برای بازه زمانی برداشتی در محدوده ایستگاه اندازه گیری زمینی به نسبت روزهای قبل و بعد از این دو روز افزایشی را تجربه کرده است. در روز (۶) سپتامبر متوسط مقدار RODI به ترتیب در بازههای زمانی قبل از ظهر و بعد از ظهر برای ماهواره A برابر با ۱۹۶/۸۷ و از ظهر و بود از ماهواره C در همین بازههای زمانی

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

### سال دهم • شماره سوم • پاییز ۱۴۰۱

برابر با ۱۹۴٬۰۳ و ۲۷۲٬۱۹ بوده است. در روز ۷ سپتامبر مقدار RODI در بازه زمانی قبل از ظهر به نسبت همین بازه زمانی در روز گذشته افزایش یافته و متوسط آن برای این روز به ۳۴۳٬۹۹ و در بیشترین مقدار به ۱۳۹۵٬۴۲ برای مشاهدات ماهواره A رسیده است. با ادامه یافتن روند افزایشی در روز هشتم نیز متوسط مقدار RODI برای بازه زمانی بعد از ظهر به متوسط مقدار آن ۱۴۸۹٬۴۹ رسیده است

که ناشی از اثرات اغتشاشات ژئومغناطیسی رویداده در این روز است که به نسبت همین بازه زمانی در روز ۹ ششم و نهم دارای روندی افزایش است. در روز ۹ سپتامبر مقدار RODI نسبت به روز ۷ و ۸ سپتامبر کاهش یافته و در بازههای زمانی قبل از ظهر و بعد از ظهر به ترتیب برای ماهواره A برابر با ۱۱۱/۸۳ و برابر با ۲۴۱/۴۲ و ۲۴۱/۴۲ است.

جدول ۲: مقادیر مشاهداتی ماهواره SWARM-A در محدوده ایستگاه زمینی OLO3 برای روزهای ۹–۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷

SWARM-A	متوسط VTEC	بیشترین VTEC	متوسط ROTI	بیشترین ROTI	متوسط RODI	بیشترین RODI
۶ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	۱ ۱٫۰ ۱	۱۲,۵۵	•,• ۴۳	۰,۰۷۵	۱ <i>۹۶</i> ٬۸۷	۸۷۸,۲۵
۶ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	11/22	11/41	۳۷ .	۰, • ۹ •	2651.0	۱ ۱ ۸۵,۹۵
۷ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	١٣٫٧٨	۱۵٬۸۱	۰٬۰۶۱	۰,۱۱۶	۳۴۳٬۹۹	1890,88
۸ سپتامبر ۲۰۱۷						
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	٨,٧٣	٩٫٨٩	•,• 78	•,• *•	۱۱۱٫۸۳	۶۵۲,۶۹
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	٩٫۴١	۱۲٫۳۳	•,•۶۲	•,114	۳۱۴٬۸۲	1789,87

جدول ۳: مقادیر مشاهداتی ماهواره SWARM-C در محدوده ایستگاه زمینی OLO3 برای روزهای ۹–۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷

SWARM-C	متوسط VTEC	بیشترین VTEC	متوسط ROTI	بیشترین ROTI	متوسط RODI	بیشترین RODI
۶ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	۵۳٬ ۱۰	137,58	•,• ۴٣	۰,۰۷۵	194/08	940,14
۶ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	۹٫۸۹	۱۱,۵۵	۰,۰۳۹	۰,۰ <i>۸۶</i>	۲۷۲٬۱۹	1119/7
۷ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)						
۸ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	۱۳/۹۶	18,74	•,•V۲	۰,۱۸۲	849,99	1489,40
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	٩٫۴٣	۱۰,۴۷	۰,۰۲۷	•,•۶•	114/18	۵۶۰٬۴۰
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	٩,۶۴	11,88	۰٬۰۵۳	۰,۰۹۵	741,47	1.89,47

# ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پژوهش میزان تاثیرات طوفان ژئومغناطیسی سال ۲۰۱۷ حد فاصل روزهای ۱۲-۶ سیتامبر در محدوده ایستگاه مشاهداتی , E, 2.75398 E) OLO3 محدوده ایستگاه مشاهدات برداشتی نرخ بالا در محدوده نزدیک به استوا اندازه گیری شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از مشاهدات

ژئومغناطیسی در بازه زمانی اولیه اشر طوفان ژئومغناطیسی در هر یک از روزها را بررسی کرده و سپس با استناد به این مشاهدات، بازه زمانی ۹-۶ سپتامبر را به عنوان فاز ابتدایی طوفان و زمان رخداد شدیدترین اختلالات یونسفری ناشی از اغشتشاشات ژئومغناطیسی شناسایی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از مشاهدات گیرنده زمینی ایستگاه

OLO3 پارامترهای یونسفری همچون VTEC در بازه برداشتی یک ثانیهای و مشاهدات ROTI و S4 برای بازه برداشتی پنج دقیقهای مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی این مقادیر برای بازه زمانی ۹-۶ سیتامبر نشان از افزایش میرزان تمامی پارامترهای یونسفری در روزهای ۷ و ۸ سپتامبر که اوج طوفان ژئومغناطیسی است، دارد. این افزایش مقادیر ابتدا با رخداد اولین SSC در ۲۳:۴۳ روز ششم شروع شده و سپس با رویداد دومین SSC در ۲۳:۰۰ در روز هفتم سبب میشود که در روز هشتم به مقادیر مشاهداتی به بیشـترین مقـادیر خود میرسد که ناشی از اثر اغتشاشات ژئومغناطیسی بر سیگنال ارسالی GNSS است. در کنار مشاهدات زمینی برای مشاهده تاثیرات اغتشاشات ژئومغناطیسی در بازه زمانی طوفان بر بخش بالایی یونسفر از دادههای ماهوار های ماموریت SWARM استفاده شده است. ماهوارههای SWARM با استفاده از دریافت سیگنالهای GNSS قابلیت مشاهده پارامترهای یونسفری برای محیط بالایی یونسفر را دارا هستند بعلاوه میتوان از مشاهدات گیرنده Langmuir plasma probes که در یایین ماهواره نصب شده است جهت دریافت اطلاعات مراجع

- [4] S. Basu, Basu, Su, Rich, FJ, Groves, KM, MacKenzie, E, Coker, C, Sahai, Y, Fagundes, PR, Becker-Guedes, F, "Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 112, no. A8, 2007.
- [5] Y. Liu, Fu, Lianjie, Wang, Jinling, Zhang, Chunxi, "Studying ionosphere responses to a geomagnetic storm in June 2015 with multi-constellation observations," Remote Sensing, vol. 10, no. 5, p. 666, 2018.
- [6] D. V. Ratnam, Sivavaraprasad, Gampala, Lee, Jiyun, "Automatic ionospheric scintillation detector for global navigation satellite system receivers," IET Radar,

بر رسـی تـاثیر ات طوفـان ژئومغناطیسـی بـر اغتشاشـات ... علیرضا عتباتی و همکار ان

فيزيكي محيط بالايي يونسفر همچون چگالي الكتروني اندازه گیری شده و میزان تغییرات آن استفاده نمود. با استفاده از مشاهدات ماهواره SWARM برای بازه اندازه گیری میتوان دید که همانند مشاهدات گیرنده زمینی مقدار پارامترهای یونسفری حاصل از گیرنده GNSS ماهواره، در بازه زمانی ۷ و ۸ سپتامبر به نسبت ۶ و ۹ سـپتامبر افزایشـی چشـمگیر را بـرای تمـامی پارامترهای اندازه گیری تجربه کرده است که نشان از تاثیر اغتشاشات ژئومغناطیسی ناشی از طوفان بر بخـش بالایی یونسفر دارد. پارامترهای یونسفری مشاهداتی ماهوارههای SWARM به نسبت گیرنده زمینی کمتر بوده که ناشی از اختلاف ارتفاع میان گیرنده زمینی و ماهوارههای SWARM میباشد اما میتوان با مقایسه مقادیر مشاهداتی مـاهواره SWARM در بـازه زمـانی یـا مکانی متفاوت اغتشاشات رویداده در یونسفر را بررسی نمود و میتوان از این دسته مشاهدات در مکانهایی همچون اقيانوسها و مناطق صعب العبور به جهت شناسایی رفتار یونسفر و مدلسازی آن بهره گرفت که می تواند مکمل مناسب برای مشاهدات سری زمانی توسط گیرندههای زمانی باشد.

- [1] D. Baker, "Solar wind-magnetosphere drivers of space weather," Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 58, no. 14, pp. 1509-1526, 1996.
- [2] T. Kikuchi, Lühr, H, Schlegel, K ,Tachihara, H, Shinohara, M, Kitamura, "Penetration of auroral electric fields to the equator during a substorm," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 105, no. A10, pp. 23251-23261, 2000.
- [3] W. Wang, Lei, Jiuhou, Burns, Alan G, Solomon, Stanley C, Wiltberger, Michael, Xu, Jiyao, Zhang, Yongliang, Paxton, Larrym, Coster, Anthea, "Ionospheric response to the initial phase of geomagnetic storms: Common features," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 115, no. A7, 2010.

سال دهم ● شماره سوم ● پاییز ۱۴۰۱

Sonar & Navigation, vol. 9, no. 6, pp. 702-711, 2015.

- [7] G. Sivavaraprasad, Padmaja, R Sree, Ratnam, D Venkata, "Mitigation of ionospheric scintillation effects on GNSS signals using variational mode decomposition," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 14, no. 3, pp. 389-393, 2017.
- [8] G. Sivavaraprasad, Ratnam, D Venkata, Otsuka, Yuichi, "Multicomponent Analysis of Ionospheric Scintillation Effects Using the Synchrosqueezing Technique for Monitoring and Mitigating their Impact on GNSS Signals," The Journal of Navigation, vol. 72, no. 3, pp. 669-684, 2019.
- [9] M. Abdu, "Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 63, no. 9, pp. 869-884, 2001.
- [10]X. Yue, Wang, Wenbin, Lei, Jiuhou, Burns, Alan, Zhang, Yongliang, Wan, Weixing, Liu, Libo, Hu, Lianhuan, Zhao, Biqiang, Schreiner, William S, "Long-lasting negative ionospheric storm effects in low and middle latitudes during the recovery phase of the 17 March 2013 geomagnetic storm," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 121, no. 9, pp. 9234-9249, 2016.
- [11]J. Zhong, Wang, Wenbin, Yue ,Xinan, Burns, Alan G, Dou, Xiankang, Lei, Jiuhou, "Long-duration depletion in the topside ionospheric total electron content during the recovery phase of the March 2015 strong storm," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 121, no. 5, pp. 4, 2016.
- [12]M. Blanc, Richmond, AD, "The ionospheric disturbance dynamo," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 85, no. A4, pp. 1669-1686, 1980.
- [13]B. G. Fejer, Jensen, John W, Su, Shin-Yi, "Seasonal and longitudinal dependence of

equatorial disturbance vertical plasma drifts," Geophysical Research Letters, vol. 35, no. 20, 2008.

- [14]A. Richmond, Peymirat, C, Roble, RG, "Long-lasting disturbances in the equatorial ionospheric electric field simulated with a coupled magnetosphereionosphere-thermosphere model," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 108, no. A3, 2003.
- [15]B. Nava, Rodríguez-Zuluaga, J, Alazo-Cuartas, K, Kashcheyev, A, Migoya-Orué, Y, Radicella, SM, Amory-Mazaudier, Christine, Fleury, R, "Middle-and lowlatitude ionosphere response to 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 121, no. 4, pp. 3421-3438, 2016.
- [16]B. Kakad, Surve,G, Tiwari,P, Yadav, Virendra, Bhattacharyya,A, "Disturbance dynamo effects over low-latitude F region: A study by network of VHF spaced receivers," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 122, no. 5, pp. 5670-5686, 2017.
- [17]E. R. de Paula, de Oliveira, Cesar BA, Caton, Ronald G, Negreti, Patricia M, Batista ,Inez S, Martinon, André RF, Neto, Acácio C, Abdu, Mangalathayil A, Monico, João FG, Sousasantos, Jonas, "Ionospheric irregularity behavior during the September 6–10, 2017 magnetic storm over Brazilian equatorial–low latitudes," Earth, Planets and Space ,vol. 71, no. 1, p. 42, 2019.
- [18]S. Jin, Jin, Rui, Kutoglu, H, "Positive and negative ionospheric responses to the March 2015 geomagnetic storm from BDS observations," Journal of Geodesy, vol. 91, no. 6, pp. 613-626, 2017.
- [19]Z. Biqiang, Weixing, Wan ,Libo, Liu, Tian, Mao, "Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions: results from global ionosphere maps," 2007.
- [20]B. G. Fejer, Scherliess, Ludger, "Empirical models of storm time equatorial zonal

بررسـی تـاثیر ات طوفـان ژئومغناطیسـی بـر اغتشاشـات ...

علیرضا عتباتی و همکار ان

electric fields," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 102, no. A11, pp. 24047-24056, 1997.

- [21]L. Scherliess, Fejer, Bela G, "Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. ,102no. A11, pp. 24037-24046, 1997.
- [22] D. Wen, Yuan, Yunbin, Ou, Jikun, Zhang, Kefei, "Ionospheric response to the geomagnetic storm on August 21, 2003 over China using GNSS-based tomographic technique," IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 48, no. 8, pp. 3212-3217, 2010.
- [23]G. De lima, Stephany, S, Paula, ER, Batista, IS, Abdu, MA, "Prediction of the level of ionospheric scintillation at equatorial latitudes in Brazil using a neural network," Space Weather, 2015
- [24]A. R. Atabati and M. M. Alizadeh, "Combining Neural Network with Genetic Algorithm for prediction of S4 Parameter using GPS measurement," (in eng), Journal of Geospatial Information Technology, Research vol. 7, no. 3, pp. 57-77, 2019.
- [25] V. Demyanov, Yasyukevich, Yu V, Ishin, AB, Astafyeva, EI, "Ionospheric super-bubble effects on the GPS positioning relative to the orientation of signal path and geomagnetic field direction," GPS solutions, 2012
- [26] R. W. Meggs, Mitchell, Cathryn N, Honary, Farideh, "GPS scintillation over the European Arctic during the November 2004 storms," Gps Solutions, vol. 12, no. 4, pp. 281-287, 2008.
- [27] G. Li, Ning, Baiqi, Zhao, Biqiang, Liu, Libo, Liu ,JY, Yumoto, K, "Effects of geomagnetic storm on GPS ionospheric scintillations at Sanya," Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, vol. 70, no. 7, pp. 1034-1045, 2008.
- [28] C. Martinis, Mendillo,MJ., Aarons,J., "Toward a synthesis of equatorial spread F onset and suppression during geomagnetic

storms," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 110, no. A7, 2005.

- [29]M. Förster, Jakowski, N, "The nighttime winter anomaly (NWA) effect in the American sector as a consequence of interhemispheric ionospheric coupling," pure and applied geophysics, vol. 127, no. 2-3, pp. 447-471, 1988.
- [30]G. W. Prolss, Bird,M. K., Physics of the Earth's space environment: an introduction. Springer, 2004.
- [31] E. Astafyeva, Zakharenkova, Irina, Förster, Matthias, "Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 120, no. 10, pp. 9023-9037, 2015.
- [32] M. Mendillo, "Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content," Reviews of Geophysics, vol. 44, no. 4, 2006.
- [33] E. Yizengaw, Moldwin, MB, Komjathy, A, Mannucci, AJ, "Unusual topside ionospheric density response to the November 2003 superstorm," Journal of Geophysical Research :Space Physics, vol. 111, no. A2, 2006.
- [34] C. Xiong, Stolle, Claudia, Lühr, Hermann, "The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities," Space Weather, vol. 14, no. 8, pp. 563-577, 2016.
- [35] J. Lei, Huang, Fuqing, Chen, Xuetao, Zhong, Jiahao, Ren, Dexin, Wang, Wenbin, Yue, Xinan, Luan, Xiaoli, Jia, Mingjiao, Dou, Xiankang, "Was magnetic storm the only driver of the long-duration enhancements of daytime total electron content in the Asian-Australian sector between 7 and 12 September 2017?," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 123, no. 4, pp. 3217-3232, 2018.
- [36]G. Li, Ning, Baiqi, Wang, Chi, Abdu, MA, Otsuka, Yuichi, Yamamoto, M, Wu, Jian,

### سال دهم ● شماره سوم ● پاییز ۱۴۰۱

Chen, Jinsong, "Storm-enhanced development of postsunset equatorial plasma bubbles around the meridian 120° E/60° W on 7–8 September 2017," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 123, no. 9, pp. 7985-7998, 2018.

- [37]E. Aa, Huang, Wengeng, Liu, Siqing, Ridley, Aaron, Zou, Shasha, Shi, Liqin, Chen, Yanhong, Shen, Hua, Yuan, Tianjiao, Li, Jianyong, "Midlatitude plasma bubbles over China and adjacent areas during a magnetic storm on 8 September 2017," Space Weather, vol. 16, no. 3, pp. 321-331, 2018.
- [38]Y. Liu, Li, Zheng, Fu, Lianjie, Wang, Jinling, Zhang, Chunxi, "Studying the ionospheric responses induced by a geomagnetic storm in September 2017 with multiple observations in America," GPS Solutions, vol. 24, no. 1, p. 3, 2020.
- [39]O. Jimoh, Lei, Jiuhou, Zhong, Jiahao, Owolabi, Charles, Luan ,Xiaoli, Dou, Xiankang, "Topside Ionospheric Conditions During the 7–8 September 2017 Geomagnetic Storm," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 124, no. 11, pp. 9381-9404, 2019.
- [40]X. Pi, Mannucci, A. J., Lindqwister, U. J., Ho, C. M., "Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network," Geophysical Research Letters, vol. 24, no. 18, pp. 2283-2286, 1997.
- [41] C.-K. Hong, D. A. Grejner-Brzezinska, and J. H. Kwon, "Efficient GPS receiver DCB estimation for ionosphere modeling using satellite-receiver geometry changes," Earth, Planets and Space, vol. 60, no. 11, pp. e25-e28, 2008.
- [42] P. Nematipour, M. Raoofian Naeeni, and Y. "Iranian Amerian, Permanent GPS Network Receivers Differential Code Biases Determination using Single Difference **Observation** Geometry Changes," (in eng), Journal of Geospatial

Information Technology, Research vol. 6, no. 1, pp. 45-56, 2018.

- [43] F. Arikan, Erol, CB, Arikan, O, "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 108, no. A12, 2003.
- [44] F. Arikan, Erol, CB, Arikan, O, "Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period," Radio Science, vol. 39, no. 6, pp. 1-10, 2004.
- [45]I. Cherniak, Zakharenkova, Irina, Krankowski, Andrzej, "Approaches for modeling ionosphere irregularities based on the TEC rate index," Earth, Planets and Space, vol. 66, no. 1, p. 165, 2014.
- [46] A. Van Dierendonck, Klobuchar, John, Hua, Quyen, "Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers," in proceedings of ION GPS, 1993.
- [47] J. Juan, Aragon-Angel, A, Sanz, J, González-Casado, Guillermo, Rovira-Garcia, Adrià, "A method for scintillation characterization using geodetic receivers operating at 1 Hz," Journal of Geodesy, vol. 91, no. 11, pp. 1383-1397, 2017.
- [48]I. Cherniak, Zakharenkova, Irina, "Highlatitude ionospheric irregularities: differences between ground-and spacebased GPS measurements during the 2015 St. Patrick's Day storm," Earth, Planets and Space, vol. 68, no. 1, pp. 1-13, 2016.
- [49]E. Friis-Christensen, Lühr, Hermann, Knudsen ,D, Haagmans, R, "Swarm-an Earth observation mission investigating geospace," Advances in Space Research, vol. 41, no. 1, pp. 210-216, 2008.
- [50]D. Knudsen, Burchill, JK, Buchert, SC, Eriksson, AI, Gill, Reine, Wahlund, J-E, Åhlén, Lennart, Smith, M, Moffat, B, "Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments," Journal of Geophysical

بررسـی تـاثیرات طوفـان ژئومغناطیسـی بـر اغتشاشـات ...

علیرضا عتباتی و همکار ان

Research: Space Physics, vol. 122, no. 2, pp. 2655-2673, 2017.

- [51]L. Lomidze, Knudsen, David J, Burchill, Johnathan, Kouznetsov, Alexei, Buchert, Stephan C, "Calibration and validation of Swarm plasma densities and electron temperatures using ground-based radars and satellite radio occultation measurements," Radio Science, vol. 53, no. 1, pp. 15-36, 2018.
- [52] Y. Jin, Spicher, Andres, Xiong ,Chao, Clausen, Lasse BN, Kervalishvili, Guram, Stolle, Claudia, Miloch, Wojciech J, "Ionospheric plasma irregularities characterized by the Swarm satellites: Statistics at high latitudes," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 124, no. 2, pp. 1262-1282, 2019.
- [53] J. Olwendo, Cilliers, PJ, Ming, Ou, "Comparison of Ground-Based Ionospheric Scintillation Observations With In Situ Electron Density Variations as Measured by the Swarm Satellites," Radio Science, 2019.
- [54]B. Zolesi, Cander, Ljiljana R, "The General Structure of the Ionosphere," in Ionospheric Prediction and Forecasting: Springer, 2014.
- [55]S. Taabu, D'ujanga, FM, Ssenyonga, T, "Prediction of ionospheric scintillation using neural network over East African region during ascending phase of sunspot cycle 24," Advances in Space Research, vol. 57, no. 7, pp. 1570-1584, 2016.



Journal of Geospatial Information Technology Vol.10, No.3, Autumn 2022

**Research Paper** 

# Investigation of the effects of geomagnetic storms on ionospheric irregularities using the combination of ground-based GNSS and SWARM satellites data

Alireza Atabati<sup>1</sup>, Iraj Jazireeyan<sup>2\*</sup>, Mohammad Mahdi Alizadeh Elizeie<sup>2</sup>, Amirhossein Pourmina<sup>1</sup>, Ahad Malekzadeh<sup>3</sup>

1- PhD candidate of Geodesy in Department of Geomatics, K.N. Toosi University of Technology

2- Assistant professor in Department of Geomatics, K.N. Toosi University of Technology

3- Assistant professor in Department of mathematics, K.N. Toosi University of Technology

#### Abstract

Geomagnetic storms are one of the main causes of ionospheric perturbations in different sizes, which depending on their intensity, they can disturb the radio signals passing through this medium. On September 6-12, 2017, the sudden storm commencement (SSC) was the most massive geomagnetic storm of the year due to the X9 solar flare caused by a coronal mass ejection (CME). IMF-Bz and Dst values increased when the first SSC occurred at 23:43 on September 6. The second SSC has a more vigorous intensity at 23:00 on September 7 that caused a dramatic increas the other geophysical parameters such as Kp and AE. During the second SSC, Kp index reached 8, and AE reached 2500 nT. In this research, the ionospheric irregularities over OLO3 station (-2.75E,35.87N,1483.00H) located at Arusha in Tanzania were analyzed using ground-based GNSS data and in situ measurements SWARM satellites. This procedure was applied to VTEC, signal to noise ratio (S4), and Rate of TEC Index (ROTI) values obtained from ground-based GNSS (GB-GNSS) and SWARM A & C in order to identify ionospheric perturbations during the geomagnetic storm. Furthermore, Langmuir plasma probes of SWARM satellites were implemented to recognize the rate of electron density (RODI). The results show that GB-GNSS and Swarm satellite geophysical ionospheric parameters increased during September 6-12, that indicate the effect of the geomagnetic storm on the increase of ionospheric perturbations. This work shows the potential of using space-based in situ measurement to detect ionospheric irregularities caused by the geomagnetic storm for areas such as oceans and deserts, where ionospheric observations are hardly possible.

*Key words:* Ionospheric Irregularity, Geomagnetic Storm, Total Electron Content (TEC), Rate of Tec (ROTI), Ionospheric Scintillation, SWARM.

Correspondence Address : No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Tel : +98 21 88877070-1. Email: jazirian@kntu.ac.ir