نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱
Vol.10, No.3, Autumn 2022
۱ -۲۷
مقاله پژوهشی
DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9

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

علیرضا عتباتی[۱]، ایرج جزیرئیان[۲*]، محمدمهدی علیزاده الیزئی[۲]، امیرحسین پورمینا[۱]، احد ملک زاده[۳]

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

چکیده

طوفان‌های 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 با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های زمینی *GNSS* و استفاده از مشاهدات ماهواره‌های ماموریت *SWARM* جهت شناسایی رفتار قسمت بالایی یونسفر در بازه زمانی طوفان ژئومغناطیسی را دارد. برای این منظور از ایستگاه مشاهداتی *GNSS* واقع در کشور تانزانیا *OLO3 (-2.75 E, 35.87 N, 1483.00 H)* که در ناحیه آناملی استوایی قرار دارد، استفاده شده است. در کنار مشاهدات گیرنده زمینی *GNSS* از مشاهدات ماهواره‌های *SWARM* در محدوده ایستگاه مشاهداتی زمینی استفاده شده است. در این راستا از مشاهدات *VTEC* ، *S4* و *ROTI* برای شناسایی اغتشاشات یونسفری دربازه زمانی طوفان ژئومغناطیسی برای گیرنده زمینی و گیرنده *GNSS* ماهواره‌های *SWARM* استفاده شده است. در کنار این مشاهدات، مشاهدات گیرنده *Langmuir plasma probes* ماهواره‌های *SWARM* به منظور مشاهده چگالی الکترونی و نرخ تغییرات آن به کار گرفته شده است. بررسی مشاهدات انجام شده حاکی از این موضوع است که با افزایش اغتشاشات ژئومغناطیسی در روزهای ۷ و ۸ سپتامبر مقادیر پارامترهای یونسفری حاصل از گیرنده زمینی و داده‌های ماهواره‌های *SWARM* افزایش یافته که نشان دهنده تاثیر طوفان ژئومغناطیسی بر افزایش اغتشاشات یونسفری است. این پژوهش علاوه بر مشاهدات گیرنده زمینی از مشاهدات ماهواره‌های *SWARM* نیز برای شناسایی رفتار اغتشاشات یونسفری در زمان طوفان ژئومغناطیسی بهره می‌گیرد. این مقاله سعی در معرفی و استفاده از ظرفیت این دسته از ماهواره‌ها به عنوان مکمل و یا جایگزینی برای مشاهدات گیرنده‌های زمینی در مناطق صعب العبور و اقیانوس‌ها را دارد.

کلیدواژه‌ها : اغتشاشات یونسفری، طوفان ژئومغناطیسی، محتوای چگالی الکترونی، نرخ تغییرات *TEC*، درخشش یونسفری.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میرداماد – پلاک ۱۳۴۶ – دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی – دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک.
تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۰

Email: jazirian@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

۱- مقدمه

یکی از مهمترین پدیده‌های تاثیرگذار بر یونسفر اغتشاشات ژئومغناطیسی[۱] هستند. در زمان رخداد طوفان‌های ژئومغناطیسی[۲]، 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[۳] زمین در ناحیه مگنتوسفر[۴] از جو زمین است [۱]. در هنگام رویداد طوفان‌های ژئومغناطیسی، ساختار یونسفر دچار اغتشاش شده که دلیل آن فعالیت‌های شیمیایی حاصل از فرآیندهای دینامیکی و الکترودینامیکی 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[۵] *(PPEF)* میگردد. این میدان باعث ایجاد یک لایه از جنس میدان‌های الکتریکی شده که به سرعت از نواحی با عرض جغرافیایی 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[۶] سبب افزایش میزان سرعت حرکت لایه‌های یونسفری[۷] در جهت عمودی و به تبع آن سبب افزایش ارتفاع لایه F می‌شود. *PPEF* در هنگام غروب آفتاب به عنوان نیروی محرک اصلی شناخته می‌شود که سبب ایجاد اغتشاشات مقیاس بزرگ در زمان طوفان های ژئومغناطیسی می‌گردد [۴و ۵]. در این هنگام میزان گرادیان لایه‌های پایینی یونسفر افزایش یافته و به سبب آن میزان حباب‌های پلاسما یونسفری[۸] نیز افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل فرآیندی ناپایدار به نام ریلی تیلور[۹] رخ می‌دهد و منجر به ایجاد اغتشاشات در یونسفر می‌گردد [۶، ۷ و ۸]. این حباب‌های پلاسما با نیرویی به اندازه بردار $E\times B$ که در آن B نشانگر میدان مغناطیسی و E بیانگر 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 می‌گردد [۹].

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

---

[۱] *Geomagnetic Disturbances*
[۲] *Geomagnetic Storms*
[۳] *Interplanetary Magnetic Field*
[۴] *Magnetosphere*
[۵] *Prompt Penetration Electric Fields*
[6] *Equatorial Ionospheric Anomaly*
[7] *Vertical Drift Velocity*
[8] *Ionospheric Plasma Bubbles*
[۹] *Rayleigh-Taylor*
[۱۰] *Recovery Phase*
[۱۱] *Short-term*
[۱۲] *Long-term*
[۱۳] *Ionospheric Disturbance Dynamo*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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 پایین می‌کنند و حاصل آن ایجاد یک میدان الکتریکی بنام میدان الکتریکی دینامیکی اغتشاشی[۱] (*DDEF*) است که به تدریج در مناطق استوایی تاثیر می‌گذارد [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. بنا به زمان مشاهداتی، این پدیده 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 رفتار دقیقاً بر خلاف رفتار *PPEF* است [۱۵]. رفتار *DDEF* در طول روز در محدوده آناملی استوایی سبب کاهش ارتفاع در لایه F شده و معمولاً اثر خود را در کاهش میزان جوشش‌های پلاسما یونسفری نشان میدهد. رفتار این پدیده اما در طول شب متفاوت است و سبب افزایش میزان سرعت حرکت لایه یونسفری به تبع آن ایجاد اغتشاشات یونسفری می‌شود [۱۶].

اغتشاشات یونوسفری با ترکیبی از مجموعه‌ای از عوامل ایجاد می‌شود، که می‌توان 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 [۲۰ و ۲۱]. در زمان رخداد اغتشاشات ژئومغناطیسی همچون طوفان‌های ژئومغناطیسی سبب قوی‌تر شدن فرایند بازسازی[۲] بر فرآیند یونیزاسیون[۳] در یونسفر شده که نتیجه آن سبب تخلیه بار الکتریکی پلاسمای یونسفری[۴] 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 سیگنال‌های رادیویی گذرنده از این محیط میشود [۲۲]. پلاسمای ضعیف شده [۵] در ترکیب با پلاسمای متراکم موجود در یونسفر، سبب ایجاد یک گرادیان قوی در ساختار یونسفری شده که حاصل این فرآیند سبب رخداد اغتشاشات یونسفری همچون رخداد پدیده درخشش‌های یونسفری در مناطق با عرض جغرافیایی نزدیک به استوا می‌گردد [۲۳ و ۲۴]. اغتشاشات ایجاد شده در پلاسما با ایجاد درخشش‌های یونسفری سبب ایجاد اختلالاتی در دامنه و فاز سیگنال‌های رادیویی شده که میتواند سبب از دست رفتن ارتباط با گیرنده[۶] و نیز ایجاد خطا در تعیین موقعیت در مناطقی با عرض جغرافیایی پایین شود که به طور معمول در زمان پس از غروب آفتاب احتمال رویداد این پدیده بیشتر میشود [۲۵ و ۲۶]. درخشش‌های یونوسفری سبب ایجاد اغتشاشاتی روزانه می‌گردند که این تغییرات با زمان محلی، فصل، فعالیت خورشیدی و نیز فعالیت‌های ژئومغناطیسی مرتبط بوده بطوریکه اغتشاشات یونسفری سبب افزایش و ایجاد تغییراتی ناگهانی در شاخص‌هایی نظیر *Dst*[7]، *AE*[8] و $d(Dst)/dt$ (نرخ تغییرات پارامتر *Dst* است) شده که میتوانند پارامترهای مناسب جهت یافتن شدت تاثیر

[۱] *Disturbance dynamo electric field*

[۲] *Recombination*

[۳] *Ionization*

[۴] *Ionospheric Plasma Depletion*

[5] *Depleted Plasma*

[۶] *Loss of Lock*

[۷] *Disturbance storm time*

[۸] *Auroral Magnetic Index*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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

در کنار مشاهدات گیرنده‌های زمینی سیستم ماهواره ای ناوبری جهانی[۱] (*GNSS*) که مشاهدات آن نشان دهنده میزان تغییرات در پارامترهای یونسفری در مسیر میان ماهواره تا گیرنده است، استفاده از مشاهدات قسمت فوقانی یونسفر[۲] نیز از اهمیت بالایی برخوردار میباشد. از این رو میتوان گفت که انتشار پلاسما با دمایی بالاتر[۳] در امتداد میدان مغناطیسی میتواند نقش بسزایی در تغییرات چگالی الکترونی در محیط بالایی یونسفر داشته باشد [۲۹ و ۳۰]. حدود دو سوم مشاهدات *TEC* و اغتشاشات آن توسط گیرنده‌های زمینی در محدوده لایه *F2* یونسفر واقع در قسمت فوقانی یونسفر اتفاق می‌افتد که میتوان از این دسته مشاهدات در زمان اغتشاشات یونسفری همچون طوفان‌های ژئومغناطیسی بهره گرفت [۳۱، ۳۲ و ۳۳].

در سال‌های اخیر ماهواره‌های کوتاه پرواز[۴] به جهت مطالعات اتمسفری به فضا پرتاب شده‌اند که میتوان از ماهواره‌های ماموریت *SWARM* نام برد. سه ماهواره ماموریت *SWARM* در بخش فوقانی یونسفر در حال 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 همچنین 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 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 اقیانوسیه استفاده شده است مجموعه مشاهدات استفاده شده در این پژوهش نشان از افزایش قابل 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 پلاسمای استوایی[۵] با استفاده از ایستگاه‌های مشاهداتی *GNSS* و مشاهدات *VHF* در محدوده *120E/60W* پرداخته است که نشان میدهد جوشش‌های 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 بررسی اغتشاشات پلاسمای یونسفری ایجاد 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[۶] نیز گسترش پیدا میکنند [۳۷]. تحقیقات ذکر شده همه با استفاده از مشاهدات زمینی در هنگام رخداد طوفان ژئومغناطیسی سال ۲۰۱۷ تمرکز داشته‌اند. در سال‌های اخیر پژوهش‌های انجام شده علاوه بر استفاده از مشاهدات زمینی از مشاهدات ماهواره‌های کوتاه پرواز نیز جهت شناسایی رفتار قسمت بالایی یونسفر بهره گرفته‌اند. لیو

[۱] *Global Navigation Satellite System*

[۲] *Upper Ionosphere*

[۳] *Thermal Plasma*

[۴] *Low Earth Orbit (LEO)*

[۵] *Equatorial Plasma Bubbles*

[۶] *Middle Latitudes*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

و همکاران در این تحقیق در دوره طوفان ژئومغناطیسی سپتامبر ۲۰۱۷ با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های شبکه *CORS*[۱] 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*[۲] در محدوده آمریکای شمالی هنگام رخداد طوفان میپردازد [۳۸]. در پژوهشی دیگر جیمو و همکاران با استفاده از *TEC* حاصل از مشاهدات چهار ماهواره *GRACE, SWARM-A, TerraSAR-X, MetOp-A* و نیز مشاهدات *Ne* و *RODI*[۳] حاصل از مشاهدات *SWARM-A* در زمان فاز ابتدایی طوفان ۸-۷ سپتامبر ۲۰۱۷ که بیشترین اغتشاشات در این بازه اتفاق افتاده، به بررسی شرایط یونسفر و اغتشاشات یونسفری بدون استفاده از مشاهدات گیرنده‌های 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 داده‌های 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 توضیح داده شده است.

۲- روش تحقیق و داده‌های مورد استفاده

طوفان‌های ژئومغناطیسی سبب ایجاد اغتشاشات یونسفری شده که برای تشخیص این اغتشاشات و نوع رفتار آن‌ها 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 *TEC*[۴] را در مسیر گیرنده و ماهواره در نقطه‌ای در ارتفاع مشخص روی لایه یونسفر به نام *IPP*[۵] محاسبه نمود که به آن پارامتر *STEC*[۶] 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[۷] نامیده می شود.

برای تشکیل ترکیب خطی عاری از هندسه از مشاهدات هم زمان فازهای حامل *L1* و *L2* یا مشاهدات کد *P1* و *P2* استفاده می شود. بدین ترتیب علاوه بر ترم هندسه تمام ترمهای مستقل از فرکانس مانند آفست ساعت و تاخیر تروپسفری نیز حذف می‌شوند. این ترکیب منجر به یک مشاهده جدید شده که شامل شکست یونسفری و تفاضل فرکانسی تاخیرات سخت افزاری[۸] است. این ترکیب در رابطه (۱) آورده شده است [۴۰].

---

[۱] *Continuously Operating Reference Stations*

[۲] *Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbances*

[۳] *Rate of Density Index*

[۴] *Total Electron Content*

[۵] *Ionospheric Pierce Point*

[۶] *Slant Total Electron Content*

[۷] *Geometry-free linear combination*

[۸] *Differential inter-frequency hardware delays*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

رابطه(۱)
$$\begin{cases} L_4 = L_1 - L_2 \\ P_4 = P_1 - P_2 \end{cases}$$

با اعمال رابطه(۱) بر مجموعه روابط (۲) و (۳)، ترکیبات خطی عاری از هندسه برای مشاهدات کد و فاز به ترتیب به شکل روابط (۴) و (۵) در می‌آیند [۴۰]:

رابطه (۲)
$$\begin{cases} P_1 = \rho + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{trop} + \Delta\rho_{iono^1} + c(b^k - b_i)_1 + \varepsilon_1 \\ P_2 = \rho + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{trop} + \Delta\rho_{iono^2} + c(b^k - b_i)_2 + \varepsilon_2 \end{cases}$$

رابطه (۳)
$$\begin{cases} L_1 = \rho + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{trop} - \Delta\rho_{iono^1} + \lambda_1 B_1 + \varepsilon_1 \\ L_2 = \rho + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{trop} - \Delta\rho_{iono^2} + \lambda_2 B_2 + \varepsilon_2 \end{cases}$$

رابطه (۴)
$$P_4 = +\xi_4 I + c(\Delta b^S - \Delta b_R)$$

رابطه (۵)
$$L_4 = -\xi_4 I + B_4$$

در روابط مذکور، $\xi_4 = 1 - f_1^2 / f_2^2 \approx -0.647$ فاکتوری مربوط به شکست یونسفری بوده و مقدار B_4 برابر با $B_4 = \lambda_1 B(f_1) - \lambda_2 B(f_2)$ می‌باشد.

Δb^S خطای سخت افزاری گیرنده و پارامتر Δb_R خطای سخت‌افزاری ماهواره است که آن را تحت عنوان اریب تفاضلی کد[۱] می‌شناسیم. مقدار اریب تفاضلی کد برای ماهواره ها مشخص بوده و به جهت محاسبه مقدار اریب تفاضلی کد برای هر گیرنده از تغییرات هندسی بین ماهواره و گیرنده که الگوریتم آن توسط چانگ کی هونگ و همکارانش ارائه داده شده استفاده شده است [۴۱]. نعمتی‌پور و همکاران از این روش برای محاسبه مقدار اریب تفاضلی کد برای گیرنده‌های ایران استفاده کرده‌اند [۴۲]. برای محاسبه *DCB* گیرنده با استفاده از روش ذکر شده از سرشکنی رابطه (۶) برای مشاهدات حاصل از دو ایستگاه *OLO3* (ایستگاه مشاهداتی) و ایستگاهی در فاصله ۵٫۶۹ کیلومتری از ایستگاه اصلی بنام *OLO7*(-*2.79694, 35.91232, 1441.70398*) استفاده شده است. از طرفی شکست یونسفری I در روابط (۴) و (۵) می‌توان به صورت رابطه(۶) به چگالی الکترونی نوشت [۴۳]:

رابطه(۶)
$$I = \xi_E STEC(\beta, s)$$

در رابطه(۶)، β عرض ژئومغناطیسی، s طول در سیستم خورشید آهنگ و مقدار ξ_E با $0.162\ m/TECU$ 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 *STEC* در راستای خط دید[۲] ماهواره میتوان پارامتر *VTEC* محاسبه نمود که حاصل از ضرب مشاهدات *STEC* در تابع انتقال $M(\varepsilon)$ می‌باشد و به صورت رابطه(۷) نمایش داده شده است [۴۳]:

رابطه(۷)
$$VTEC = STEC / M(\varepsilon)$$

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

[۱] *Differential Code Bias*

[۲] *Line of Sight (LOS)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

رابطه(۸) $$M(\varepsilon)=[1-(\frac{R.\cos(\varepsilon)}{R+h})^2]^{-1/2}$$

که در رابطه (۸) پارامتر ε بیانگر زاویه ارتفاعی میان گیرنده و ماهواره، R مقدار شعاع زمین و h ارتفاع اندازه‌گیری شده در لایه یونسفری است که در این تحقیق مقدار پارامترها در ارتفاع ۴۶۰ کیلومتری در لایه یونسفر اندازه‌گیری 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، نرخ *TEC* یا *ROT*[1] نامیده می شود که واحد آن *TECU* بر دقیقه است که هر *TECU* برابر 10^{16} الکترون بر مترمربع است. برای شناسایی اغتشاشات یونسفری در مقیاس‌هایی متفاوت شاخص‌های *ROT* و همچنین انحراف از معیار این شاخص به نام *ROTI* استفاده نمود [۴۵]. محاسبه پارامتر *ROT* که حاصل از اختلاف میزان *STEC* در اپک *k+1* ام با اپک *K* ام مشاهداتی بر اختلاف زمانی میان اپک‌ها بر حسب دقیقه است که در رابطه (۹) صورت زیر نمایش داده شده است:

رابطه(۹) $$ROT=\frac{STEC_{k+1}-STEC_k}{\Delta t}$$

پارامتر *ROTI* حاصل از انحراف از معیار مقادیر *ROT* مشاهداتی برای *N* اپک متوالی میباشد که بنا به نرخ برداشت مشاهدات میتواند 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 *S4* نیز جهت شناسایی تاثیر اغتشاشات یونسفری بر سیگنال ارسالی استفاده کرد. از *S4* به عنوان پارامتر درخشش یونسفری دامنه[2] یاد می‌شود که از پارامتر *C/N0* حاصل از مشاهدات گیرنده *GNSS* حاصل شده و جهت شناسایی درخشش‌های یونسفری که نوعی از اغتشاشات یونسفری است، استفاده می‌شود [۴۶]. پارامتر *C/N0* حاصل از فایل مشاهداتی از ماهواره به صورت پارامتر *S1* و *S2* در دو فرکانس *L1* و *L2* می‌باشد. برای محاسبه *S4* ابتدا با استفاده از *C/N0*، میزان نرخ سیگنال به نویز *(S/N0)* با استفاده از رابطه(۱۱) محاسبه شده و سپس با استفاده از روش دیترند[3] کردن که در رابطه (۱۲) ذکر شده مقادیر *S/N0* دیترند می‌شود [۴۷].

رابطه(۱۱) $$S/N_0=10^{0.1(C/N_0)}$$

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

در رابطه (۱۲)، f_s نشان‌دهنده نرخ مشاهدات گیرنده *GNSS* می‌باشد. حال با توجه به روابط بالا نحوه محاسبه *S4* در رابطه (۱۳) آورده شده است:

رابطه(۱۳) $$S4=\sqrt{\frac{\langle(SI_{\det rended}^{S/N_0})^2\rangle-\langle SI_{\det rended}^{S/N_0}\rangle^2}{\langle SI_{\det rended}^{S/N_0}\rangle^2}}$$

با توجه به رابطه (۱۳) میتوان دریافت که پارامتر *S4* بنا به نوع تعریف آن که حاصل از انحراف معیار مقادیر شدت سیگنال به نویز دیترند شده در یک بازه زمانی است، لذا واحدی برای نمایش آن وجود ندارد. *S4* برای بازه‌های زمانی از چند ثانیه تا چند ساعت بنا به نوع نیاز کاربر استفاده می‌شود. 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- مشاهدات ماهواره‌های *SWARM*

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

[1] *Rate of TEC*

[2] *Amplitude Ionospheric Scintillation*

[3] *Detrend*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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]. هر سه ماهواره تحقیقاتی *SWARM* مجهز به دستگاهی به نام کاوشگر پلاسمای لانگمیر[۱] بوده که توانایی اندازه‌گیری چگالی الکترونی و دمای یونسفر را به صورت کالیبره 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[۲] را برای کاربر فراهم می‌آورد که میتوان از این نوع داده‌ها به جهت مطالعه در مورد تغییرات یونسفر بهره گرفت. در این پژوهش از داده‌های مشاهداتی چگالی الکترونی در محل عبور ماهواره با کمک دستگاه *Langmuir plasma probes* و نیز داده‌های مشاهدات *GNSS* برای سه ماهواره ماموریت *SWARM* استفاده شده است. ماهواره‌های *SWARM A &C* در لایه *F2* یونسفر قرار دارد که محیط اصلی ایجاد اغتشاشات یونسفری ناشی از امواج خورشیدی است.

با استفاده از مشاهدات دو گیرنده *Langmuir plasma probes* 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 تغییرات چگالی الکترونی[۳] (*ROD*) در رابطه (۱۴) آورده شده است:

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

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[۴] (*RODI*) حاصل از انحراف معیار مشاهدات *ROD* در بازه زمانی خاص است. در این پژوهش بازه زمانی تعیین شده ده ثانیه‌ای خواهد بود. مقادیر *RODI* را به صورت رابطه(۱۵) محاسبه می‌کنیم:

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 ۱۲-۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷ به دلیل یک سری فوران‌های دنباله دار تاج خورشیدی[۵] 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 این داده‌ها به جهت توصیف شدت طوفان ژئومغناطیسی ناشی از فعالیت‌های خورشیدی در زمان فوران تاج خورشیدی

[۱] *Langmuir plasma probes*
[۲] *High Rate*
[۳] *Rate of Density*
[۴] *Rate of Density Index*
[۵] *Coronal Mass Ejections*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

(*CME*) استفاده شده است. این داده‌ها برای این منظور از مجموعه‌ای از پارامترهای ژئومغناطیسی همچون نظیر میدان مغناطیسی بین سیاره ای[۱] ، شاخص ژئومغناطیسی بین‌المللی[۲] ، الکتروجت قطبی[۳]، شاخص Dst[4] و نرخ تغییرات پارامتر Dst $(d(Dst)/dt)$ برای توصیف شدت طوفان مغناطیسی استفاده شده است. با استفاده از این پارامترها میتوان دریافت که بیشترین میزان اغتشاشات در هرکدام از پارامترهای ژئومغناطیسی در فاز اصلی طوفان در روزهای ۷ الی ۸ سپتامبر رخداده است. در روزهای ۱۰ و ۱۱ سپتامبر نیز شاهد رخداد فاز ترمیم[۵] طوفان ژئومغناطیسی هستیم که سبب ایجاد اغتشاشات با شدت بسیار کمتر از فاز اصلی طوفان خواهیم بود.

میدان مغناطیسی بین سیاره ای (*IMF*) نقش مهمی درحفاظت مگنتوسفر زمین در مقابل بادهای خورشیدی بازی می‌کند. میدان مغناطیسی بین سیاره ای یک بردار با یک جزء سه محوره است که دو مورد از آنها (Bx و By) به موازات اکلپتیک قرار دارند. مؤلفه سوم ، مقدار Bz عمود بر اکلپتیک قرار گرفته است و در اثر امواج و سایر اختلالات بادهای خورشیدی ایجاد می-شود و مولفه‌ای مناسب به جهت نشان دادن فعالیت‌های ژئومغناطیسی محسوب می‌شود [۱]. شکل(۱-الف) نشان‌دهنده مقادیر $IMF-Bz$ است که میزان تغییرات میدان مغناطیسی زمین در راستای شمالی – جنوبی را نشان میدهد. با توجه به شکل (۱-الف) شروع اغتشاشات و افزایش یکباره میزان $IMF-Bz$ در UT ۲۳:۴۳ روز ششم و UT ۲۳:۰۰ روز هفتم سپتامبر اتفاق افتاده است که این تغییرات معرف شروع غیرمنتظره طوفان[۶] (*SSC*) است. همانگونه که در شکل (۱-الف) مشخص است اغتشاشات $IMF-Bz$ با اولین *SSC* آغاز می‌شود اما بیشترین میزان اغتشاشات $IMF-Bz$ در UT ۲۳:۰۰ روز هفتم سپتامبر رخداده است که سبب نوسانات شدیدی هنگامی رخ داده است که $IMF-Bz$ در مرحله اصلی طوفان ژئومغناطیسی ناگهان به سمت جنوب میچرخد و مقدار آن ناگهان به حدود $-۳۰nT$[۷] کاهش میابد. این پارامتر را می‌توان از سایت *OMNI* *http://omniweb.gsfc.nasa.gov* دریافت نمود.

شاخص ژئومغناطیسی بین‌المللی Kp را می‌توان جهت اندازه‌گیری میزان فعالیت‌های ژئومغناطیسی زمین به کار گرفت. Kp حاصل مشاهده مولفه‌های K در سه راستای H[۸]، D[۹] و Z[۱۰] در بازه‌های زمانی سه ساعته می‌باشد. Kp میتواند پارامتر موثری به جهت شناسایی و ارزیابی روزهایی که اغتشاشات ژئومغناطیسی بالایی 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 [۵۴]. مقادیر Kp را می‌توان از نشانی *http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp* دریافت نمود. شکل(۱-ب) مقدار Kp دو افزایش ناگهانی در مقدار خود را در اولین و دومین *SSC* دارد. با اولین *SSC* مقدار Kp 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.

---

[۱] *Interplanetary magnetic field*

[۲] *International K_P index*

[۳] *Auroral Electrojet*

[۴] *Disturbance storm time index*

[۵] *Recovery*

[۶] *Sudden Storm Commencements*

[۷] *Nano Tesla*

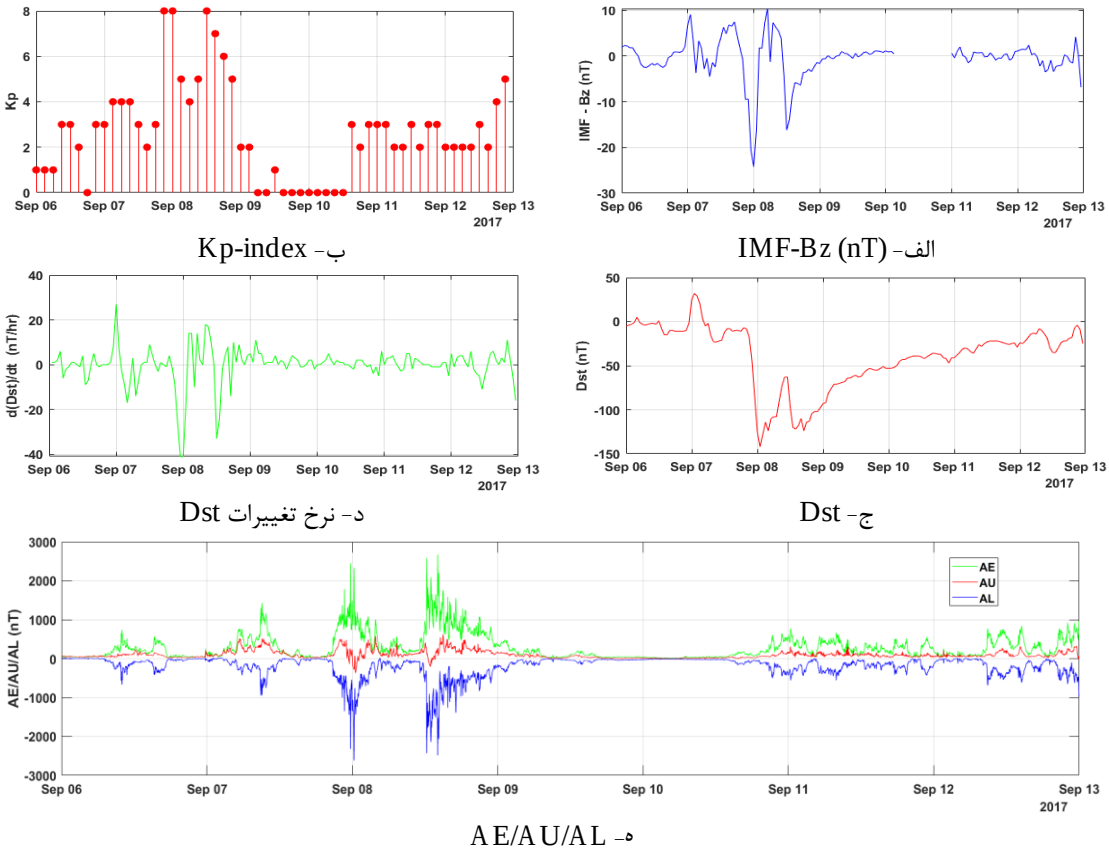
[۸] مولفه افقی میدان ژئومغناطیسی زمین

[۹] زاویه بین مولفه H و نصف النهار جغرافیایی

[۱۰] مولفه قائم میدان ژئومغناطیسی زمین

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

شاخص *Dst* یک شاخص فعالیت مغناطیسی است که از شبکه‌ای از مشاهدات ژئومغناطیسی نزدیک به استوا در راستای افقی حاصل می‌شود که شدت میزان الکتورجت استوایی بین المللی را اندازه می‌گیرد. مقدار *Dst* منفی به معنای تضعیف میدان مغناطیسی زمین است. این اتفاق در زمان رخداد طوفان‌های ژئومغناطیسی اتفاق می افتد. مقادیر *Dst* از سایت دانشگاه کیوتو به نشانی *http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/* قابل برداشت است.



شکل ۱: (الف) مقادیر مشاهداتی *IMF-Bz (nT)* ، (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 $d(Dst)/dt$ در شکل (۱-د)، شروع طوفان سبب ایجاد 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 روندی نزولی را در پیش میگیرد و با شروع دومین *SSC* به ناگهان دچار یک کاهش سریع شده و به $-۱۴۶nT$ 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 اندازه‌گیری بین‌المللی از فعالیت مغناطیسی منطقه قطبی ایجاد شده توسط جریان‌های یونسفری سیال در مناطق قطبی است که

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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* دریافت نمود.

در شکل (۱-ه) مقدار *AE* در روز ششم در بالاترین میزان به $۵۰۰nT$ 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 $۲۴۰۰nT$ میرسد.

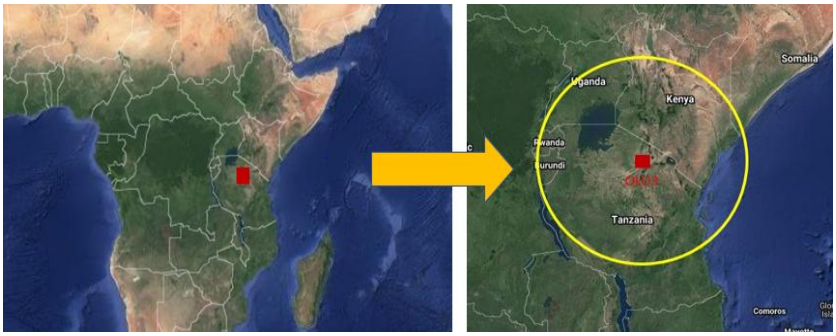
۳- منطقه مورد مطالعه

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 H)* با اختلاف ساعت *(GMT + 03)* با استفاده از گیرنده *TRIMBLE NETR9* و آنتن *TRM57971.00* استفاده شده است. فایل مشاهدات ایستگاه زمینی با نرخ یک ثانیه از سایت *UNAVCO* به نشانی *https://www.unavco.org/data/gps-gnss/* قابل برداشت می‌باشد. علاوه بر مشاهدات ایستگاه‌های زمینی *GNSS* از مشاهدات سه ماهواره ماموریت *SWARM* به جهت شناسایی اغتشاشات ایجاد شده در یونسفر در زمان رخداد طوفان ژئومغناطیسی در ۸-۷ سپتامبر سال ۲۰۱۷ استفاده شده است. مقادیر استخراج شده از داده‌های ایستگاه زمینی با زاویه برداشت ۲۰ درجه انجام گرفته است که سبب ایجاد ناحیه‌ای دایره‌ای شکل در محدوده ایستگاه زمینی شده که محل قرارگیری 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 هرکدام از این سه ماهواره و همچنین مشاهدات چگالی الکترونی یونسفری حاصل از مشاهدات دستگاه‌های *Langmuir plasma probes* 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 طوفان‌های ژئومغناطیسی بر قسمت بالایی یونسفر از مشاهدات دو ماهواره *SWARM A & C* استفاده شده است که با استفاده از گیرنده‌های *GNSS* نصب شده بر روی آن‌ها قابلیت استخراج پارامترهای یونسفری را دارا بوده و همچنین با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های *Langmuir plasma probes* قابلیت مشاهده میزان 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 اختیار قرار دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]



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

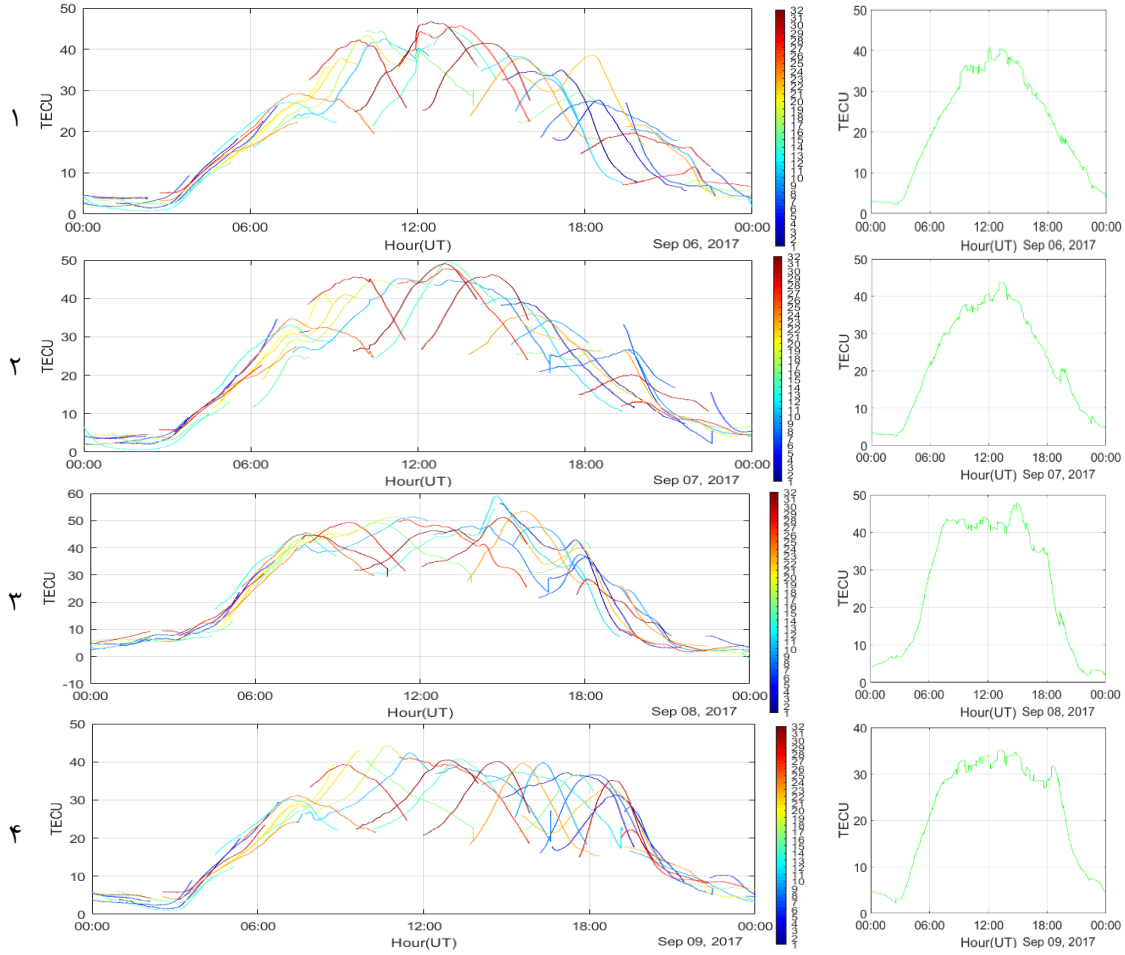
۴-۱- نتایج حاصل از مشاهدات ایستگاه زمینی *OLO3*

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 میدان الکتریکی سریع نفوذ کننده *PPEF* ایجاد 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 توجه به مقادیر ذکر شده در بخش ۲-۲ فاز 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 می‌افتد شدت کمتری دارد. با توجه به این موضوع که تغییرات یونسفری در زمان فاز ابتدایی طوفان از شدت بیشتری بر یونسفر نسبت به فاز ثانویه برخوردار بوده است، این پژوهش سعی در بررسی تاثیرات طوفان ژئومغناطیسی در روزهای ۶ الی ۹ سپتامبر را دارد. با توجه به مطالب ذکرشده در بخش ۲-۲ میدانیم که در ساعت *UT* ۲۳:۴۳ اغتشاشاتی در پارامترهای $IMF-Bz$ ، Dst و $d(Dst)/dt$ اتفاق افتاده و نشان دهنده شروع اولین *SSC* است و از آن میتوان به عنوان سرآغاز اغتشاشات ژئومغناطیسی یادکرد. در زمان رخداد دومین *SSC* در *UT* ۲۳:۰۰ 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 هرکدام از پارامترهای مشاهداتی ارزیابی 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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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 *TECU* ۱٫۰۷ افزایش رو به رو شده و به مقدار *TECU* 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 *TECU* ۲٫۹۶

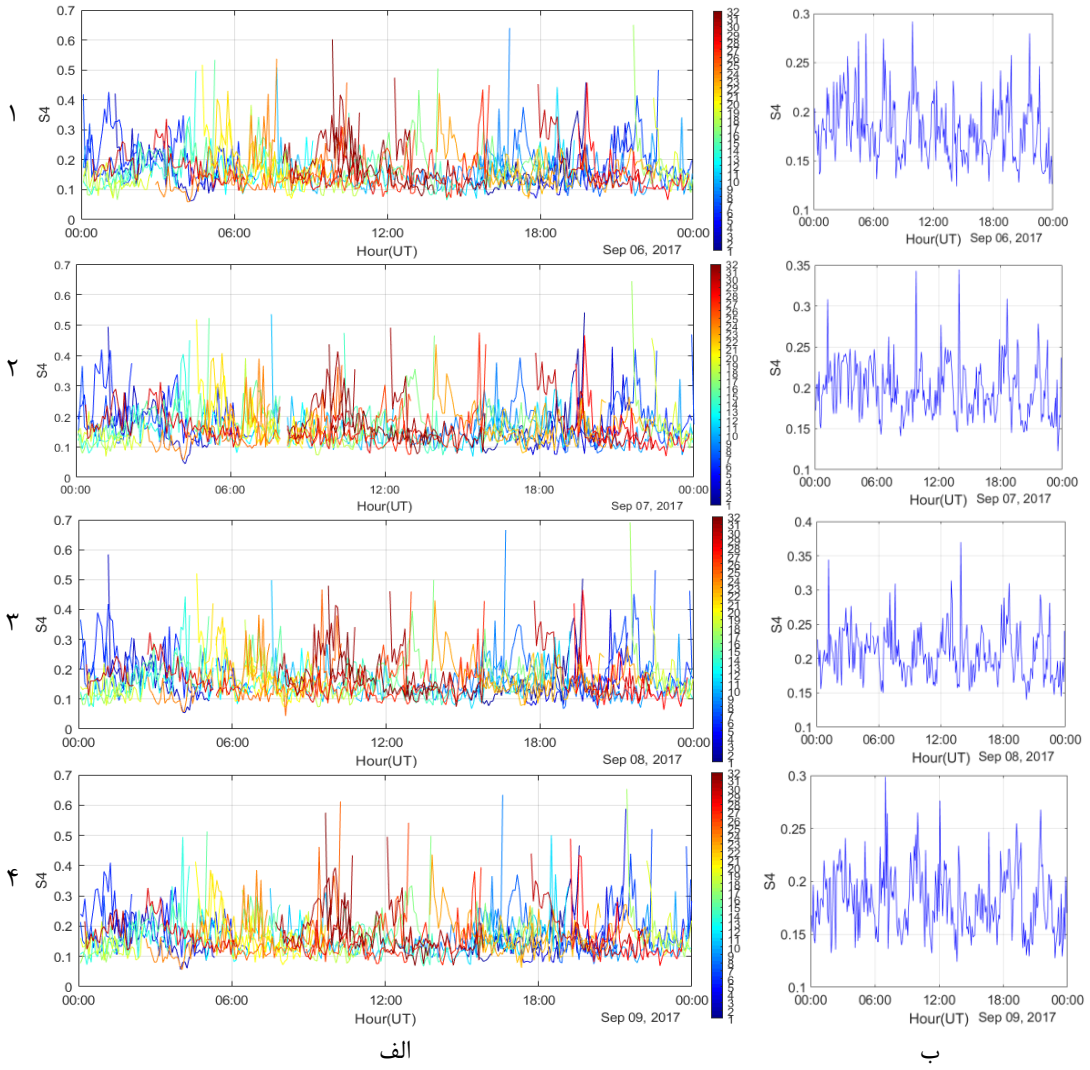
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

افزایش به میزان *TECU* ۲۵٫۴۴ 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 محلی) اتفاق میافتد، 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 میرسد. علاوه بر مشاهدات *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 سپتامبر در ایستگاه مشاهداتی *OLO3* بررسی نمود.

در شکل (۴) مقادیر مشاهداتی *S4* 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-۱)، (۴-ب-۱)، (۴- الف -۲) و (۴-ب-۲) با رخداد اولین *SSC* در ساعات پایانی روز ششم همانند مقادیر *VTEC* مقدایر *S4* و *ROTI* نیز افزایش می‌یابند. 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 ۰٫۱۸ به ۰٫۱۹ رسیده که ۰٫۱ 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 ۰۰:۴۵ 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 که در ساعت *UT* ۱۴:۲۵ (معادل ۱۷:۲۵ به 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 ۰٫۲۴ و ۰٫۲۱ میرسد. این افزایش در مقادیر *S4* را می‌توان در روز هشتم سپتامبر به وضوح رویت نمود به گونه‌ای که متوسط مقدار *S4* در این روز به ۰٫۲۱ 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 *S4* به ۰٫۷۷ در این روز میرسد. در ساعات پایانی روز و با کاهش میزان فعالیت‌های ژئومغناطیسی مقدار *S4* در روز نهم سپتامبر کاهش یافته و به ۰٫۱۸ میرسد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

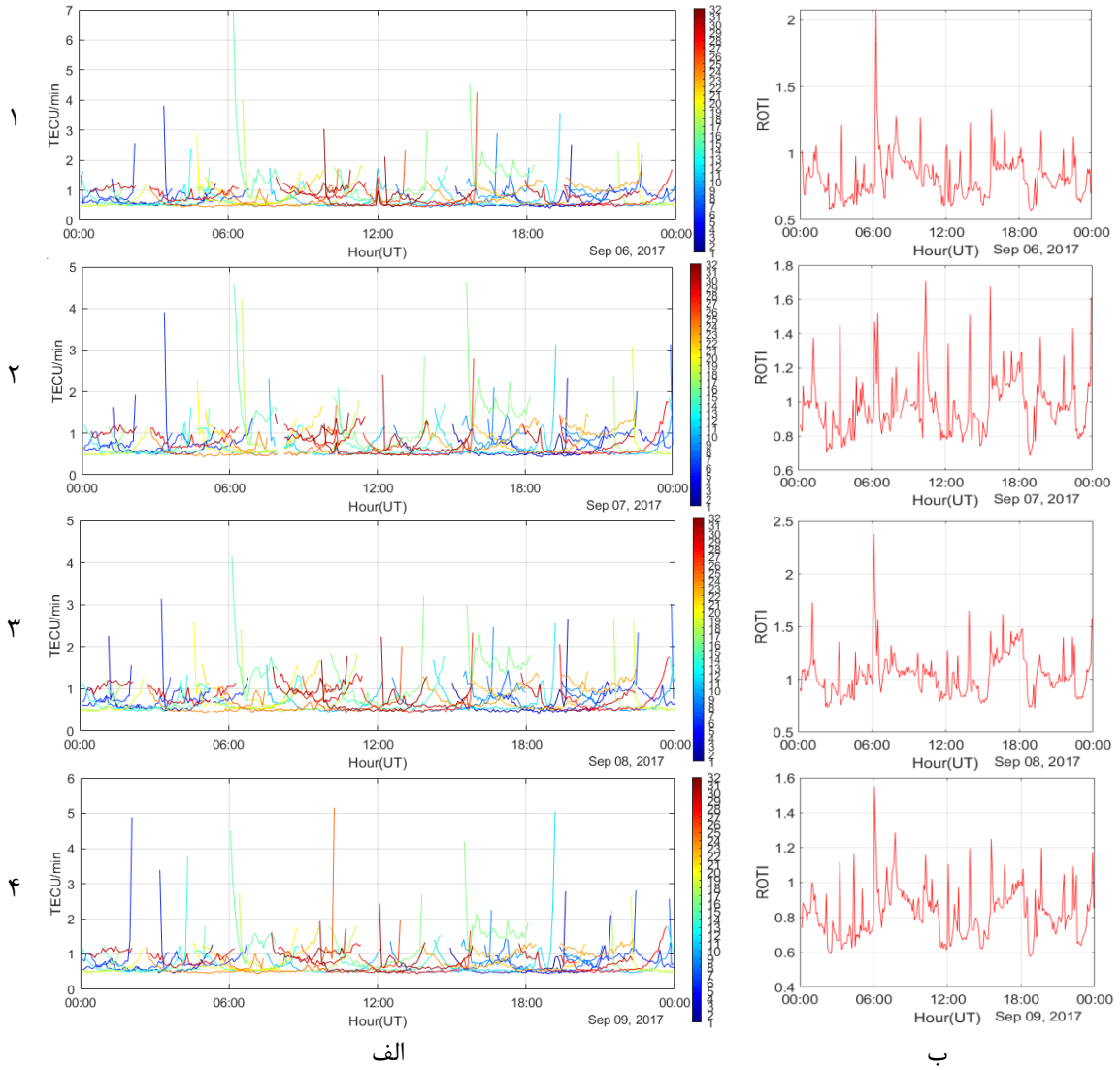


شکل ۴: مقادیر مشاهداتی *S4* برای هر *PRN* (ستون الف) و مقادیر متوسط برای مشاهدات *S4* (ستون ب) در بازه زمانی روزهای ۶-۹ سپتامبر سال ۲۰۱۷ برای ایستگاه *OLO3*

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 رفتار *S4* و *VTEC* 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 هفتم *TECU/min* ۰/۱۲ افزایش یافته و از ۰/۸۵ به 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 ۰/۷۸ بوده و سپس روندی افزایش را درپیش میگیرد به گونه‌ای که در ساعت ۲۳:۴۰ به ۱/۱۱ و در زمان ۲۳:۵۵ به ۱/۶۱ میرسد این روند افزایش در ابتدای روز هشتم نیز همین روند صعودی را ادامه داده و به ۱/۷۳ در ساعت ۰۱:۱۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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 شد، میزان متوسط مشاهدات *ROTI* نیز دچار یک جهشی ناگهانی شده و به مقدار ۱٫۱۹ رسیده است. با آغاز روز ۹ سپتامبر و با کاهش فعالیتهای 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 شدت اغتشاشات کم شده است.



شکل ۵: مقادیر مشاهداتی *ROTI* برای هر *PRN* (ستون الف) و مقادیر متوسط برای مشاهدات *ROTI* (ستون ب) در بازه زمانی روزهای ۹-۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷ برای ایستگاه *OLO3*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

جدول۱: مقادیر مشاهداتی متوسط برای پارامترهای *VTEC* و *S4* و *ROTI* و پارامتر درصد رخداد درخشش یونسفری برای روزهای ۹-۶ سپتامبر سال ۲۰۱۷

تاریخ	متوسط *VTEC*	متوسط *S4*	متوسط *ROTI*	درصد رخداد *Scintillation (S4>0.2)*
۶ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۱٫۴۱	۰٫۱۸	۰٫۸۵	۳۹٪.۴۲
۷ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۲٫۴۸	۰٫۱۹	۰٫۹۷	۴۷٪.۸۱
۸ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۵٫۴۴	۰٫۲۱	۱٫۱۱	۵۵٪.۱۶
۹ سپتامبر ۲۰۱۷	۲۱٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۸۲	۴۰٪.۳۵

۴-۲- نتایج حاصل از مشاهدات ماهواره‌های *SWARM*

در این پژوهش علاوه بر مشاهدات *GNSS* ایستگاه زمینی *OLO3* از مشاهدات ماهواره‌های ماموریت *SWARM* نیز جهت شناسایی تاثیرات 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 زمینی *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 ماهواره‌های *SWARM A & C* استفاده شده است. با توجه به محدوده تعیین شده در ایستگاه مشاهدات زمینی، دوره زمانی و مسیر حرکت ماهواره‌های *SWARM A & C* در راستای عرض جغرافیایی، در روزهای ۶ و ۹ سپتامبر شاهد دو اپک مشاهداتی در حدود سه دقیقه‌ای برای هر کدام از ماهواره‌ها و در روزهای ۷ و ۸ سپتامبر شاهد یک اپک مشاهداتی خواهیم بود که جهت بررسی تاثیرات طوفان ژئومغناطیسی بر مقادیر مشاهداتی در هرکدام از این ماهواره‌ها استفاده شده است. مقادیر مشاهداتی 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 از تغییرات این پارامترها در روزهای متفاوت روند تاثیرات اغتشاشات ژئومغناطیسی را بر بخش بالایی یونسفر بررسی نمود. برای شناسایی تاثیر اغتشاشات ژئومغناطیسی بر بخش بالایی یونسفر از مشاهدات مقادیر متوسط *VTEC*، *ROTI* و *RODI* 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 *VTEC* در روز ۶ سپتامبر در بازه زمانی قبل از ظهر حدفاصل ۸:۱۰ تا ۸:۱۳ برای ماهواره‌های *SWARM A & C* برداشت شده است که با مقایسه با متوسط مقادیر مشاهدات *VTEC* حاصل از ایستگاه زمینی 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 الکترونی است. مقدار متوسط مقادیر مشاهداتی *VTEC* برای ماهواره *SWARM-A* به ترتیب برابر با ۱۱٫۰۴ و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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 *TECU* ۱۱٫۲۲ 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 نیز افزایش میابد.

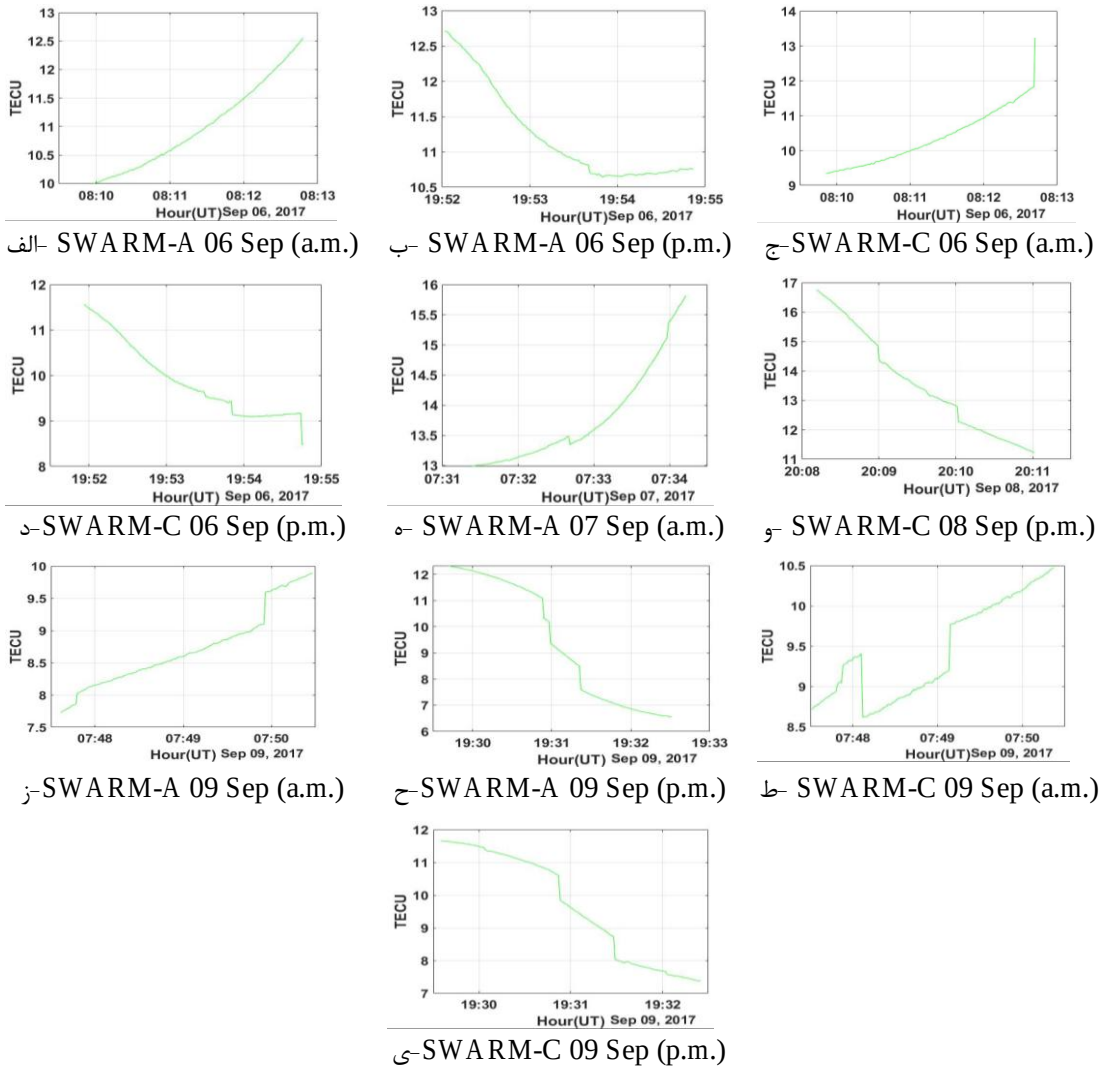
با توجه به شکل (۶-و) میتوان دریافت که در این روز تنها مشاهدات ماهواره *C* در محدوده ایستگاه مشاهداتی در هنگام بعد از ظهر و برای زمانهای ۲۰:۰۸ تا ۲۰:۱۱ موجود است. مقدار *VTEC* متوسط در این روز به *TECU* ۱۳٫۹۶ رسیده است که نسبت به دو روز گذشته روندی افزایشی داشته است.

این روند شبیه به روند مقادیر مشاهداتی *VTEC* حاصل از مشاهدات گیرنده زمینی در شکل (۳-۴) میباشد. در این روز بیشترین مقدار مشاهده *VTEC* در این بازه چهار روزه نیز به ثبت رسیده است که در زمان ۲۰:۰۸ به *TECU* ۱۶٫۷۴ 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 اپک مشاهداتی برای هرکدام از ماهواره‌های *SWARM* هستیم.

شکل‌های (۷-و) و (۶-و) برای مشاهدات ماهواره‌های *SWARM A & C* در بازه زمانی صبح بوده که به نسبت همین بازه زمانی در روزهای ششم و هفتم، مقادیر این مشاهدات کاهش یافته است. مشاهداتی *VTEC* برای ماهواره *A* برابر با ۸٫۷۳ 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 *VTEC* برای *SWARM-A* برابر با ۹٫۴۰ و برای *SWARM-C* برابر با ۹٫۶۴ میباشد. این روند کاهشی برای روز نهم سپتامبر را میتوان در مشاهدات *VTEC* حاصل از گیرنده زمینی نیز در شکل(۴) مشاهده نمود.

مقادیر مشاهداتی *ROTI* متوسط حاصل از مشاهدات ماهواره‌های *SWARM A & C* 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 ماهواره *SWARM A & C* 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 ۰٫۰۳۷ و برای ماهواره *C* برابر با ۰٫۰۳۹ میباشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

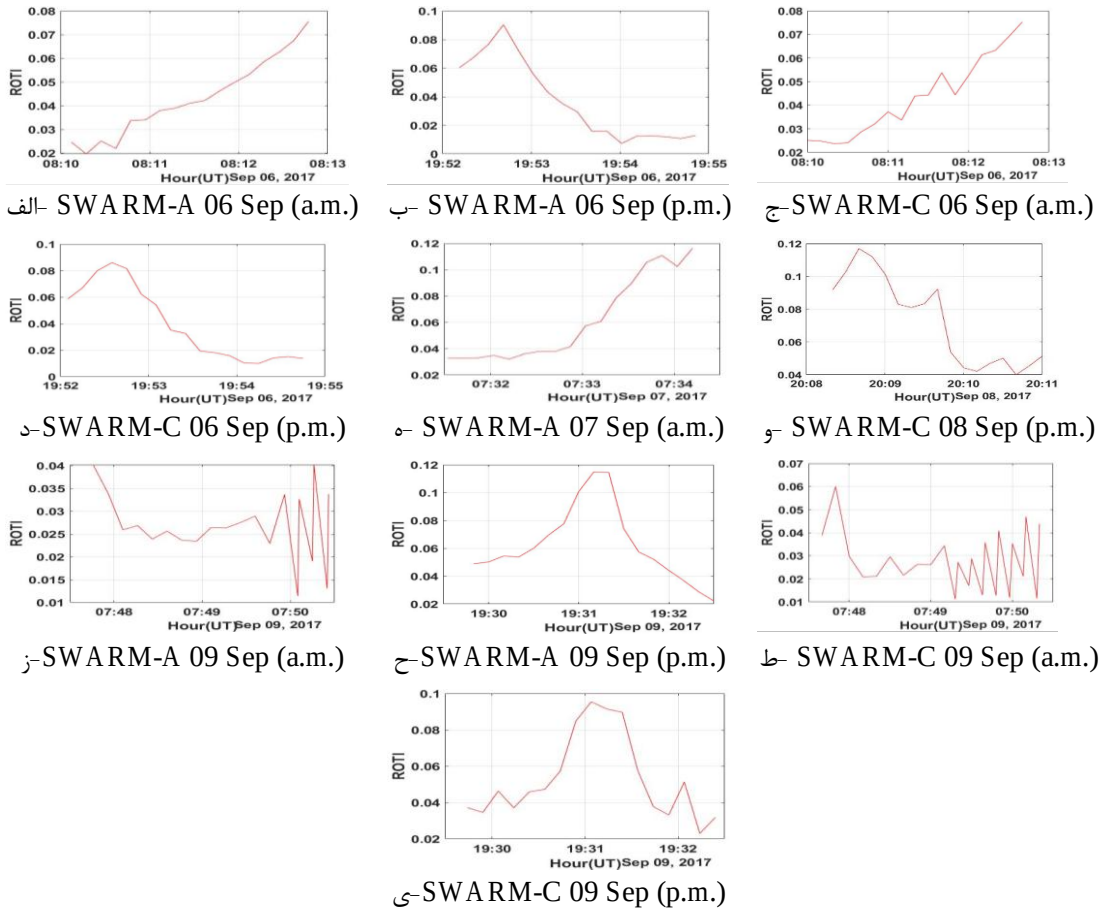


الف- SWARM-A 06 Sep (a.m.)
ب- SWARM-A 06 Sep (p.m.)
ج- SWARM-C 06 Sep (a.m.)
د- SWARM-C 06 Sep (p.m.)
ه- SWARM-A 07 Sep (a.m.)
و- SWARM-C 08 Sep (p.m.)
ز- SWARM-A 09 Sep (a.m.)
ح- SWARM-A 09 Sep (p.m.)
ط- SWARM-C 09 Sep (a.m.)
ی- SWARM-C 09 Sep (p.m.)

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*

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

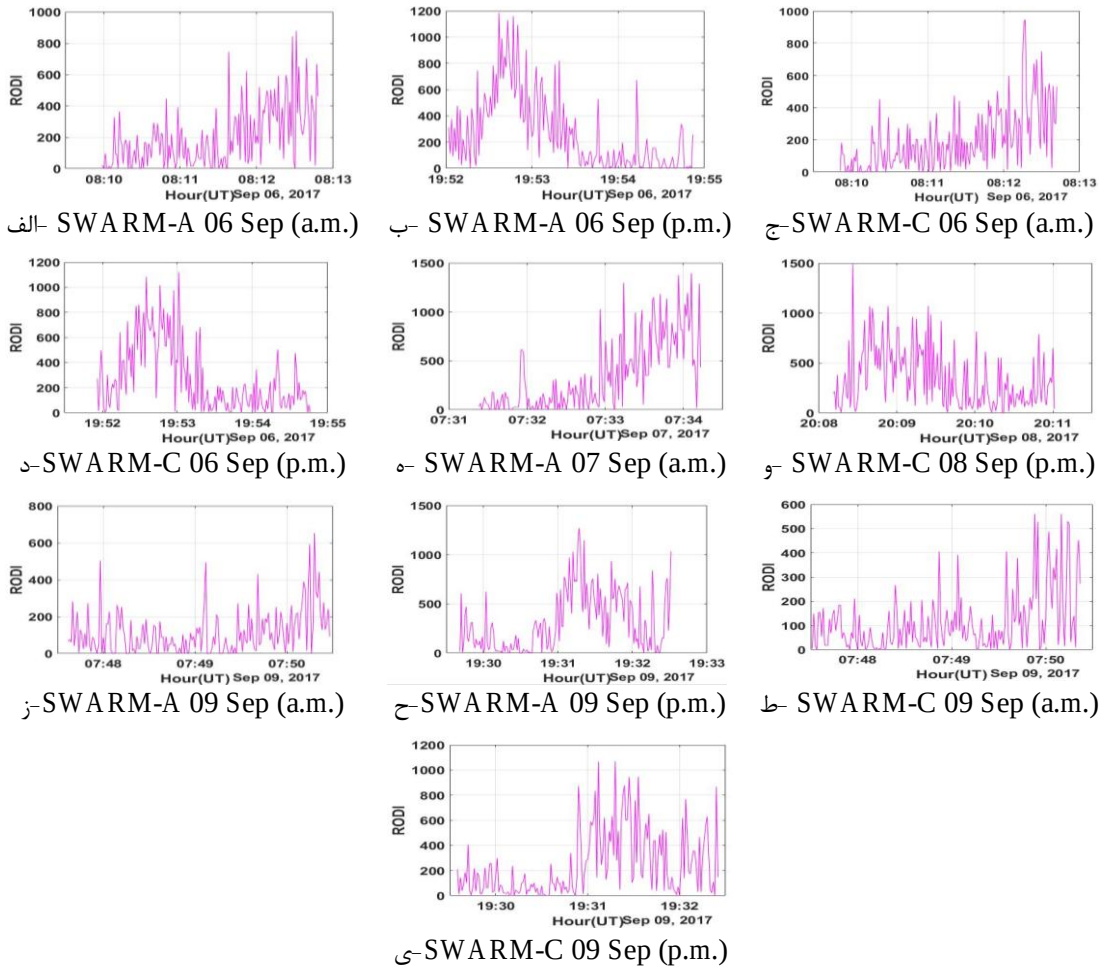


الف- SWARM-A 06 Sep (a.m.)
ب- SWARM-A 06 Sep (p.m.)
ج-SWARM-C 06 Sep (a.m.)
د-SWARM-C 06 Sep (p.m.)
ه- SWARM-A 07 Sep (a.m.)
و- SWARM-C 08 Sep (p.m.)
ز-SWARM-A 09 Sep (a.m.)
ح-SWARM-A 09 Sep (p.m.)
ط- SWARM-C 09 Sep (a.m.)
ی-SWARM-C 09 Sep (p.m.)

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

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 ۷:۴۵ دومین مقدار بزرگ برای *ROTI* در این روز اتفاق می‌افتد و سپس مقادیر مشاهداتی *ROTI* تا ساعت ۷:۵۰ روندی کاهشی با شتاب بالایی را دارند و سپس از شتاب کاهش مقادیر *ROTI* کاسته میشود. در شکل‌های (۷-ز) و (۷-ط) نیز میتوان دید که مقادیر مشاهداتی *ROTI* در ابتدا با روندی اکیدا نزولی مواجه بوده و از زمان ۷:۵۰ این روند نزولی متوقف شده و جای خود را به روندی تناوبی میدهد که نشان از کاهش میزان شدت کاهش مقادیر *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 (۷-ح) و (۷-ی) نیز برای بازه زمانی بعد از ظهر برای دو ماهواره *A* و *C* بوده که در این مشاهدات نیز میتوان یک روند صعودی و سپس نزولی را دریافت که به مانند مشاهدات انجام شده در روزهای ششم و هشتم بوده با این تفاوت که متوسط مقادیر مشاهداتی *ROTI* با کاهش مواجه شده است. مقادیر مشاهداتی برای هرکدام از نمودارهای شکل (۸) به تفضیل در جدول‌های (۲) و (۳) آمده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]



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 *SWARM-A & C*

مشاهدات *RODI* حاصل از مقادیر چگالی الکترونی (*Ne*) اندازه‌گیری شده توسط دستگاه *Langmuir plasma probes* در شکل (۸) آورده شده است. این مشاهدات وجه تمایز میان مشاهدات یونسفری حاصل از گیرنده زمینی *GNSS* و داده‌های ماهواره *SWARM* است. با استفاده از مشاهدات *RODI* میتوان تغییرات چگالی الکترونی را در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری در راستای حرکت ماهواره اندازه‌گیری نمود. با توجه به شکل (۸) و مقایسه روند مشاهداتی پارامتر *RODI* با مشاهدات *ROTI* در شکل (۷) میتوان دریافت که این دو مشاهده 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 اندازه‌گیری 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 ۲۶۷٫۰۱ و برای ماهواره *C* در همین بازه‌های زمانی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

برابـر بـا ۱۹۴٫۰۳ و ۲۷۲٫۱۹ بـوده اسـت. در روز ۷ سپتامبر مقدار *RODI* در بـازه زمـانی قبـل از ظهـر بـه نسبت همین بازه زمانی در روز گذشته افزایش یافتـه و متوسط آن بـرای ایـن روز بـه ۳۴۳٫۹۹ و در بیشـترین مقدار به ۱۳۹۵٫۴۲ برای مشـاهدات مـاهواره *A* رسـیده است. با ادامه یافتن رونـد افزایشـی در روز هشـتم نیـز متوسط مقدار *RODI* برای بازه زمـانی بعـد از ظهـر بـه ۳۴۹٫۹۹ و بیشترین مقدار آن ۱۴۸۹٫۴۷ رسـیده اسـت که ناشی از اثرات اغتشاشات ژئومغناطیسی رویـداده در این روز است که بـه نسـبت همـین بـازه زمـانی در روز ششـم و نهـم دارای رونـدی افـزایش اسـت. در روز ۹ سپتامبر مقـدار *RODI* نسـبت بـه روز ۷ و ۸ سـپتامبر کاهش یافته و در بازه‌های زمانی قبـل از ظهـر و بعـد از ظهـر بـه ترتیـب بـرای مـاهواره *A* برابـر بـا ۱۱۱٫۸۳ و ۳۱۴٫۸۲ و برای ماهواره *C* در همـین بـازه‌هـای زمـانی برابر با ۱۱۴٫۸۳ 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)	۱۱٫۰۱	۱۲٫۵۵	۰٫۰۴۳	۰٫۰۷۵	۱۹۶٫۸۷	۸۷۸٫۲۵
۶ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	۱۱٫۲۲	۱۱٫۷۱	۰٫۰۳۷	۰٫۰۹۰	۲۶۷٫۰۱	۱۱۸۵٫۹۵
۷ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	۱۳٫۷۸	۱۵٫۸۱	۰٫۰۶۱	۰٫۱۱۶	۳۴۳٫۹۹	۱۳۹۵٫۴۲
۸ سپتامبر ۲۰۱۷	-----	-----	-----	-----	-----	-----
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	۸٫۷۳	۹٫۸۹	۰٫۰۲۶	۰٫۰۴۰	۱۱۱٫۸۳	۶۵۲٫۶۹
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	۹٫۴۱	۱۲٫۳۳	۰٫۰۶۲	۰٫۱۱۴	۳۱۴٫۸۲	۱۲۶۹٫۶۷

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)	۱۰٫۳۵	۱۳٫۲۳	۰٫۰۴۳	۰٫۰۷۵	۱۹۴٫۰۳	۹۴۵٫۱۴
۶ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	۹٫۸۹	۱۱٫۵۵	۰٫۰۳۹	۰٫۰۸۶	۲۷۲٫۱۹	۱۱۱۹/۲
۷ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	-----	-----	-----	-----	-----	-----
۸ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	۱۳٫۹۶	۱۶٫۷۴	۰٫۰۷۲	۰٫۱۸۲	۳۴۹٫۹۹	۱۴۸۹٫۴۷
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (قبل از ظهر)	۹٫۴۳	۱۰٫۴۷	۰٫۰۲۷	۰٫۰۶۰	۱۱۴٫۱۸	۵۶۰٫۴۰
۹ سپتامبر ۲۰۱۷ (بعد از ظهر)	۹٫۶۴	۱۱٫۶۶	۰٫۰۵۳	۰٫۰۹۵	۲۴۱٫۴۲	۱۰۶۹٫۴۲

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش میـزان تـاثیرات طوفـان ژئومغناطیسـی سـال ۲۰۱۷ حـد فاصـل روزهـای ۱۲-۶ سـپتامبر در محـدوده ایسـتگاه مشـاهداتی *OLO3 (-2.75398 E, 35.87139 N, 1483.00 H)* با مشاهدات برداشـتی نـرخ بالا در محدوده نزدیک به استوا اندازه‌گیری شده اسـت. بـرای ایـن منظـور ابتـدا بـا اسـتفاده از مشـاهدات ژئومغناطیسـی در بـازه زمـانی اولیـه اثـر طوفـان ژئومغناطیسی در هر یـک از روزهـا را بررسـی کـرده و سپس با اسـتناد بـه ایـن مشـاهدات، بـازه زمـانی ۹-۶ سپتامبر را به عنوان فاز ابتدایی طوفان و زمـان رخـداد شدیدترین اخـتلالات یونسـفری ناشـی از اغشتشاشـات ژئومغناطیسی شناسایی شده و مورد بررسی قرار گرفتـه است. با استفاده از مشـاهدات گیرنـده زمینـی ایسـتگاه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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 سپتامبر نشان از افزایش میزان 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 بیشترین مقادیر 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 ماهواره‌های 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 پایین ماهواره نصب شده است جهت دریافت اطلاعات فیزیکی محیط بالایی یونسفر همچون چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده و میزان تغییرات آن استفاده نمود. با استفاده از مشاهدات ماهواره *SWARM* برای بازه اندازه‌گیری 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 سپتامبر افزایشی چشمگیر را برای تمامی پارامترهای اندازه‌گیری تجربه کرده است که نشان از تاثیر اغتشاشات ژئومغناطیسی ناشی از طوفان بر بخش 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 ماهواره *SWARM* در بازه زمانی یا مکانی متفاوت اغتشاشات رویداده در یونسفر را بررسی نمود و میتوان از این دسته مشاهدات در مکان‌هایی همچون اقیانوس‌ها و مناطق صعب العبور به جهت شناسایی رفتار یونسفر و مدلسازی آن بهره گرفت که می‌تواند مکمل مناسب برای مشاهدات سری زمانی توسط گیرنده‌های زمانی باشد.

مراجع

[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.

[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,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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 magnetosphere-ionosphere-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 low-latitude 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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, "High-latitude ionospheric irregularities: differences between ground-and space-based 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

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. Amerian, "Iranian Permanent GPS Network Receivers Differential Code Biases Determination using Single Difference Observation Geometry Changes," (in eng), Journal of Geospatial

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

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 [1], Iraj Jazireeyan [2*], Mohammad Mahdi Alizadeh Elizeie [2], Amirhossein Pourmina [1], Ahad Malekzadeh [3]

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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.1.9]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.1]