نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۲
Vol.11, No.3, Autumn 2023
۱۹-۱
مقاله پژوهشی

ارزیابی مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm* و *CSES* به منظور استفاده در مطالعات یونسفری

هانیه طباطبایی[1*]، مسعود مشهدی حسینعلی[2]

۱- دانشجوی دکترای ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتیخواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

چکیده

مشاهدات مستقیم پارامترهای یونسفری اطلاعات دقیقی درباره یونسفر فراهم می‌کنند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مشاهدات یونوسوند و پروب لانگمویرهای (*Langmuir Probes*) نصب شده بر روی ماهواره‌ها اشاره کرد. در حال حاضر در کشور ایران ایستگاه یونوسوند فعال وجود ندارد، بنابراین مشاهدات پروب لانگمویرها می‌توانند کمک شایانی به مطالعات یونسفری کنند. این تحقیق به مقایسه و ارزیابی مشاهدات چگالی الکترونی پروب لانگمویر نصب شده روی سه ماهواره سوآرم (*Swarm*) متعلق به آژانس فضایی اروپا و ماهواره لرزه‌نگاری-الکترومغناطیسی چین (*CSES*) پرداخته است. توزیع جهانی مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm A* و *CSES* سازگاری خوبی بین مشاهدات دو ماهواره برای مدارهای بالاگذر (شب) و مدارهای پایین‌گذر (روز) نشان داد. ضرایب همبستگی بین مشاهدات این دو ماهواره در روز و شب به ترتیب ۰٫۹۲۶۸ و ۰٫۸۱۷۱ محاسبه گردید که نشان‌دهنده انطباق بالای آنها است. مقایسه رفتار مشاهدات چگالی الکترونی در محل تقاطع مدارات هم‌زمان، همین نتایج را تایید کرد. ضرایب همبستگی بین مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *A*، *B* و *C* ماموریت *Swarm* با ماهواره *CSES* برای روز به ترتیب ۰٫۹۱۹۹، ۰٫۹۱۳۸ و ۰٫۹۰۹۹ و برای شب به ترتیب مقادیر ۰٫۸۹۹۰، ۰٫۹۴۶۷ و ۰٫۸۱۸۱ محاسبه گردید که نشان می‌دهد مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌ها به‌ویژه ماهواره *Swarm B* با *CSES* همبسته‌اند که می‌تواند به دلیل ارتفاع نزدیک این دو ماهواره باشد. بررسی نسبت مقادیر چگالی الکترونی ماهواره *Swarm A* به *CSES* نشان داد که مقدار چگالی الکترونی ماهواره *Swarm A* اغلب حدود ۴ تا ۷ برابر *CSES* است. همچنین بررسی مقادیر چگالی الکترونی حاصل از مدل یونسفری مرجع جهانی (*IRI*) با مشاهدات ماهواره‌های *Swarm* و *CSES*، نشان داد که مقادیر چگالی الکترونی مدل *IRI2016* بین مقادیر دو ماهواره دیگر و نزدیک به مقادیر *CSES* هستند. همچنین با توجه به تخمین بیش از مقدار واقعی توسط مدل *IRI*، چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده توسط *CSES* در مقایسه با *Swarm* از صحت بالاتری برخوردار هستند.

کلیدواژه‌ها : مشاهدات مستقیم پارامترهای یونسفری، پروب لانگمویر، چگالی الکترونی.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران- خیابان ولیعصر- تقاطع میرداماد- روبروی ساختمان اسکان- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری.، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
تلفن: ۰۹۱۲۴۹۶۲۴۴۹

Email: h_tabatabai@email.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

۱- مقدمه

یونسفر اولین بار در سال ۱۹۰۱ زمانی‌که مارکنی[۱] سیگنال‌های رادیویی را با موفقیت بر فراز اقیانوس اطلس ارسال کرد، معرفی شد و لوژ[۲](۱۹۰۲) اولین نظریه فیزیکی یونسفر را ارائه کرد [۱]. اپلتون[۳] و بارنت[۴] و همچنین بریت[۵] و توو[۶](۱۹۲۵) با استفاده از روش‌های ژرفاسنجی امواج رادیویی، وجود یونسفر را در اتمسفر بالا تقریباً در سال ۱۹۲۴ تأیید کردند و همین، آغاز مطالعات یونسفری را رقم زد [۲و۳].

چگالی و دمای یونسفر دو پارامتر اصلی هستند که وضعیت یونسفر را مشخص می‌کنند و اغلب مشاهدات مرتبط با یونسفر به دنبال جستجوی این پارامترها هستند [۴و۵]. این پارامترها از سال ۱۹۶۰ توسط راکت‌ها، ماهواره‌ها و ابزارهای سنجش از دور زمینی اندازه‌گیری می‌شوند [۶]. به طور کلی، مشاهدات مربوط به یونسفر به دو دسته مشاهدات مستقیم[۷] یا درون جا[۸] و مشاهدات سنجش از دور یا غیرمستقیم[۹] تقسیم‌بندی می‌شوند [۵و۷].

مشاهدات مستقیم در مقایسه با مشاهدات غیرمستقیم، اندازه‌گیری‌های دقیق پارامترهای فیزیکی یونسفر را ارائه می‌دهند [۸]. اغتشاشات چگالی یونسفری در لایه بالای *F2* یونسفر متمرکز است و اندازه‌گیری‌های مستقیم توسط ماهواره‌های مدار پایین زمین (*LEO*)[۱۰] می‌تواند برای مطالعه توزیع بی‌نظمی‌های یونسفری، اقلیم‌شناسی و سایر خصوصیات یونسفر با وجود تراکم پایین ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرد [۹]. این داده‌ها می‌توانند همانند اندازه‌گیری‌های یونوسوند برای ارزیابی نتایج توموگرافی نیز مورد استفاده قرار بگیرند. امروزه ابزارهایی که برای اندازه‌گیری چگالی و دمای یونسفر مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل پروب لانگمویر[۱۱](در این تحقیق به اختصار *LP* نامیده می‌شود)، رادارهای پراکنده‌ساز همبسته (*ISR*)[۱۲]، یونوسوندها و گیرنده‌های *GNSS* هستند [۴]. هر کدام از این ابزارها از روش‌های خاص و متفاوتی برای اندازه‌گیری و پردازش داده‌های چگالی و دمای یونسفر استفاده می‌کنند. بنابراین، هر ابزار دارای نقاط قوت و محدودیت‌های خاص خود است [۴]. ماهواره‌های سوآرم[۱۳] و ماهواره لرزه‌نگاری-الکترومغناطیسی چین (*CSES*)[۱۴] مجهز به سنسور *LP* بوده و مشاهدات مستقیم از لایه یونسفر در اختیار کاربران قرار می‌دهند که منابع داده بسیار مهم و باارزشی را برای مطالعات یونسفر و توسعه و ارزیابی مدل‌های یونسفری فراهم می‌کنند [۹]. داده‌های چگالی الکترونی که توسط ماهواره *CSES* به‌دست می‌آید، مکمل مشاهدات ماهواره‌های *Swarm* بوده و مجموعه جامعی از اندازه‌گیری‌های مستقیم چگالی الکترونی را برای مطالعه یونسفر همراه با داده‌های دومین ماهواره *CSES* که در سال ۲۰۲۲ پرتاب می‌شود، ارائه خواهند کرد [۱۰].

بر روی ماهواره دو سنسور *LP* نصب می‌شود که به منظور جلوگیری از تداخلات با ماهواره بر روی میله‌ای قرار داده می‌شوند. *LP* در واقع یک الکترود است که در داخل پلاسما قرار داده می‌شود. اگر ولتاژ متغیر متناوب به الکترود اعمال شود، دما و چگالی الکترونی بر اساس منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ اعمال شده تعیین می‌شود [۱۱].

---

[۱] *Marconi*
[۲] *Lodge*
[۳] *Appleton*
[۴] *Barnett*
[۵] *Breit*
[۶] *Tuve*
[۷] *direct measurements*
[۸] *in-situ*
[۹] *indirect measurements*
[۱۰] *Low Earth Orbit*
[۱۱] *Langmuir Probe*
[۱۲] *Incoherent Scatter Radar*
[۱۳] *Swarm*
[۱۴] *China Seismo-Electromagnetic Satellite*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

داده‌های یونسفری دقیق در بهبود پیش‌بینی‌های آب و هوای فضا، ارتباطات، دقت سیستم‌های ناوبری و برای درک عمیق‌تر پدیده‌های یونسفری نقش مهمی دارند. در همین راستا، برخی محققین به مقایسه اندازه‌گیری‌های چگالی الکترونی *LP* و داده‌های سایر ابزارها و تکنیک‌ها پرداخته‌اند [۴، ۱۲ و ۱۳]. پداتلا[۱] و همکارانش (۲۰۱۵) مشاهدات *LP* ماهواره *CHAMP*[۲] را با اندازه‌گیری‌های آکولتیشن رادیویی *COSMIC*[۳] مقایسه کردند [۱۳]. اگرچه هدف آنها ارزیابی چگالی الکترونی حاصل از داده‌های آکولتیشن رادیویی *COSMIC* در بالای یونسفر بود ولی آنها دریافتند که هر دو داده با ضریب همبستگی ۰٫۹۰ دارای سازگاری بالایی هستند و مقادیر چگالی الکترونی *COSMIC* به‌طور متوسط ۱۴٫۹ درصد بزرگتر هستند. مک نامارا[۴] و همکارانش (۲۰۰۷) مقادیر فرکانس‌های پلاسمای یونوسوند را با *LP* ماهواره *CHAMP* مقایسه کردند که نشان داد مقادیر *LP* به طور سیستماتیک ۴٫۲ درصد کمتر است [۱۲]. لومیدزه[۵] و همکارانش (۲۰۱۷) داده *LP* ماهواره *Swarm* را با مشاهدات رادار پراکنده‌ساز همبسته و داده آکولتیشن رادیویی *COSMIC* مقایسه کردند. بر اساس نتایج آنها، *LP* ماهواره *Swarm* فرکانس پلاسما را به طور سیستماتیک حدود ۱۰ درصد کمتر نشان می‌دهد [۴].

وانگ و همکارانش (۲۰۱۹) چگالی الکترون *CSES* را با ماهواره‌های *Swarm* مقایسه کردند و نتایج آنها سازگاری بالایی بین دو مجموعه داده را نشان داد [۱۰]. بازه زمانی داده‌های *CSES* مورد استفاده در مطالعه آنها ۷ ماه را شامل می‌شود. یان[۶] و همکارانش (۲۰۲۰) از داده‌های بیشتری برای مقایسه چگالی الکترونی و دمای یونسفر حاصل از داده‌های *CSES* و *Swarm B* استفاده کردند [۱۴]. همچنین داده‌های یونسفری قابل اعتماد حاصل از رادار پراکنده‌ساز همبسته نیز در یان و همکاران استفاده شد. مطالعات آنها فقط به داده‌های مدارهایی که از میلستون هیل می‌گذرد، محدود می‌شود. با توجه به اینکه در کشور ایران دسترسی به مشاهدات مستقیم یونوسوند در حال حاضر وجود ندارد و ارزیابی نتایج مطالعات یونسفری با چالش‌هایی مواجه است، استفاده از داده‌های *LP* این ماهواره‌ها می‌تواند مشکل را برطرف کند. با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق داده‌های چگالی الکترونی مشاهده شده توسط *CSES* و ماهواره‌های *Swarm A, B, C* هم با پوشش جهانی و هم توسط مدارات هم‌زمان منطقه‌ای با هم مقایسه و تجزیه و تحلیل شده است. همچنین با توجه به اینکه پیش‌بینی‌های مدل‌های مرجع یونسفری (*IRI*[۷]) در مطالعات یونسفری به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm* و *CSES* با مقادیر پیش‌بینی مدل *IRI2016* نیز مقایسه و ارزیابی شده است.

۲- معرفی داده‌های استفاده شده

در این بخش، ماهواره‌های *Swarm* و *CSES* به همراه فایل‌های مشاهداتی آنها معرفی شده است.

۲-۱- داده ماهواره *CSES*

ماهواره لرزه‌ای-الکترومغناطیسی *CSES*، که *ZH-1*[۸] نیز نامیده می‌شود، با موفقیت در ۲ فوریه ۲۰۱۸ پرتاب شد. *CSES* اولین ماهواره چینی است که می‌تواند داده‌های جهانی در حوزه میدان الکترومغناطیسی، پلاسما و ذرات انرژی را برای پایش و مطالعه پدیده‌های فیزیکی در یونسفر به منظور شناسایی نوسانات الکترومغناطیسی یونسفر هنگام وقوع زمین‌لرزه‌ها ارائه

[۱] *Pedatella*
[۲] *Challenging Minisatellite Payload*
[۳] *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate*
[۴] *McNamara*
[۵] *Lomidze*
[۶] *Yan*
[۷] *International Reference Ionosphere*
[۸] *ZhangHeng-1*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

دهد [۱۵]. *CSES* ماهواره خورشیدآهنگ دایروی با زاویه میل ۹۷٫۴درجه و ارتفاع حدود ۵۰۷ کیلومتر است و نقاط گرهی نزولی و صعودی آن به ترتیب در ساعات ۱۴:۰۰ و ۰۲:۰۰ به وقت محلی اتفاق می‌افتد. پریود یک مدار دایروی کامل حدود ۹۴٫۶ دقیقه است، بنابراین در یک روز حدود ۱۵ دور کامل را طی می‌کند. گذر ماهواره *CSES* هر ۵ روز یک‌بار تکرار می‌شود، به عبارت دیگر، ماهواره بعد از ۵ روز مدارهای خود را تکرار می‌کند و هر گذر ماهواره شامل ۷۵ مدار با توزیع مکانی یکنواخت است. میانگین فاصله بین دو گذر ماهواره حدود ۴٫۸ درجه یا تقریبا ۵۰۰ کیلومتر در منطقه استوایی است. داده *CSES* عرض‌های جغرافیایی ۶۵- تا ۶۵ را پوشش می‌دهد [۱۰]. *CSES* به هشت ابزار علمی مجهز است که اطلاعات پیوسته‌ای از پلاسمای یونسفر، میدان مغناطیسی و امواج الکترومغناطیسی و ذرات انرژی فراهم می‌کند. یکی از این ابزارها *LP* است که دما و چگالی الکترونی یونسفر را به ترتیب در محدوده 5×10^{8} تا 1×10^{13} بر حسب m^{-3} و ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ بر حسب کلوین اندازه‌گیری می‌کند [۴]. ماهواره *Swarm* مجهز به دو سنسور *LP* است که سنسور اول سنسور اصلی است و سنسور دوم به عنوان سنسور پشتیبان است. این سنسورها به دو روش اقدام به اندازه‌گیری داده می‌کنند. روش اول بنام *survey* که دمای الکترون و چگالی الکترونی را با رزولوشن زمانی ۳ ثانیه و رزولوشن مکانی ۲۳٫۴ کیلومتر تعیین می‌کند و روش دوم بنام *burst* که این پارامترهای اصلی را با رزولوشن زمانی ۱٫۵ ثانیه و رزولوشن مکانی ۱۱٫۷ کیلومتر اندازه‌گیری می‌کند [۱۴]. این داده‌ها با فرمت *HDF5* ذخیره و به کاربران ارائه می‌گردد. هر فایل شامل داده نیم مدار است و به عبارت دیگر دو فایل برای هر مدار وجود دارد که نشان دهنده مشاهدات بالاگذر[۱](شب) و پایین گذر[۲](روز) است. بنابراین حدود ۳۰ فایل برای مشاهدات هر روز به دست خواهد آمد [۱۰]. لازم به یادآوری است که در مدارهای نزدیک به قطبی، ماهواره در یک سمت مدار به سوی قطب شمال و در نیمه دوم مدار خود به سوی قطب جنوب حرکت می‌کند که این مدارات به‌ترتیب، مدارهای بالاگذر (صعودی) و پایین‌گذر (نزولی) نامیده می‌شوند. اگر مدار موردنظر، مدار خورشیدآهنگ باشد، مدارهای بالاگذر در سمت شب زمین قرار می‌گیرد، در حالی‌که مدار پایین‌گذر به سمت نور خورشید و روز است. داده ماهواره *CSES* در ۵ سطح موجود است که متداول‌ترین آنها داده *level 2* است که شامل مقادیر فیزیکی کالیبره شده با اطلاعات مداری ماهواره پس از انتقال سیستم مختصات و معکوس‌سازی داده‌های *level 1* در صورت نیاز است (*www.leos.ac.cn*). در این تحقیق نیز از داده *level 2* برای انجام محاسبات استفاده شده است.

۲-۲- داده ماهواره *Swarm*

ماهواره *Swarm* در ۲۲ نوامبر ۲۰۱۳ توسط آژانس فضایی اروپا (*ESA*)[۳] پرتاب شد. این مأموریت شامل سه ماهواره مشابه با نام‌های *Alpha (A)*، *Bravo (B)* و *Charlie (C)* بوده و هدف آن، مطالعه میدان مغناطیسی زمین و برهم‌کنش آن با سیستم زمین عنوان گردید [۱۶]. دو ماهواره *A* و *C* در مدارات قطبی با فاصله ۱٫۴ درجه در طول جغرافیایی و ارتفاع تقریبی ۴۷۰ کیلومتر و زاویه شیب ۸۷٫۳۵ درجه در حال حرکتند، در حالی‌که ماهواره *B* در مدار قطبی بالاتری در ارتفاع حدودی ۵۱۱ کیلومتر و زاویه شیب ۸۷٫۷۵ درجه در مدار خود حرکت می‌کند.[۴] هدف اصلی *Swarm* بررسی میدان ژئومغناطیسی زمین با دقت بسیار بالا، توسعه زمانی آن و میدان الکتریکی اتمسفر است، اما به دلیل آرایش خاص مدارات و تجهیز با

[۱] *ascending*

[۲] *descending*

[۳] *European Space Agency*

[۴] *https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

ابزارهای دقیق به یک مرجع کلیدی برای مطالعات علمی در زمینه مغناطیس سنجی/ یونسفر تبدیل شده است. ابزار مرتبط با میدان الکتریکی (*EFI*) که شامل دو *LP* است، علاوه بر داده مربوط به میدان ژئومغناطیسی، داده‌های چگالی الکترونی و دمای الکترونی را با رزولوشن زمانی ۲ هرتز اندازه‌گیری می‌کند [۱۷، ۱۸ و ۱۹]. این داده‌ها جزو مشاهدات مستقیم و با دقت بالا محسوب می‌شوند که می‌توانند همانند اندازه‌گیری‌های یونوسوند برای ارزیابی نتایج توموگرافی نیز مورد استفاده قرار بگیرند. داده ماهواره‌های *Swarm* از ۲ دسامبر ۲۰۱۳ موجود است. این داده‌ها در فرمت *CDF* ذخیره شده و از طریق وبسایت *https://swarm-diss.eo.esa.int* در اختیار کاربران قرار داده شده است. این داده‌ها در دو سطح *Level 1b* و *Level 2* در دسترس کاربران قرار می‌گیرد. سطح *Level 1b* شامل داده‌های تصحیح شده هر سه ماهواره است و سطح *Level 2* شامل داده‌های حاصل از تلفیق اندازه‌گیری‌های سه ماهواره و بهبود در کیفیت داده است. از آنجایی‌که داده‌های سطح *Level 1b* به دلیل داشتن سری زمانی مشاهدات کالیبره شده و تصحیح شده اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیاری از محققان از این داده برای بررسی یونسفر و پدیده‌های آن استفاده کرده‌اند [۹، ۲۰، ۲۱]. بر همین اساس در این مقاله نیز داده‌های *Level 1b* از منظومه ماهواره‌های *Swarm* مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- روش تحقیق

ماهواره‌های *Swarm* همزمان با ماهواره *CSES* در ارتفاع مشابه در حال حرکت هستند. ارتفاع مشابه و همچنین پارامترهای مشاهداتی مشابه این دو ماهواره، امکان مقایسه داده‌های آنها را میسر می‌کند. لازم به ذکر است از آنجایی‌که توزیع چگالی الکترونی یونسفر به ویژه در لایه *F2* در طول مدارات پایین‌گذر (روز) و بالاگذر(شب) متفاوت است، تمام محاسبات برای روز و شب به طور جداگانه انجام گرفته است. شکل (۱) مدارات ماهواره‌های *Swarm A* و *CSES* در طول شب و روز برای تمام روزهای ماه آگوست ۲۰۱۸ که از کشور ایران می‌گذرند، نمایش می‌دهد. اگرچه ماهواره‌های *Swarm* و *CSES* به طور همزمان در مدار خود حرکت می‌کنند، محدوده عرض جغرافیایی و زمان آنها با هم متفاوت است. بنابراین برای مقایسه چگالی الکترونی دو ماهواره، باید دو معیار در نظر گرفته شود: الف) معیار مکانی و ب) معیار زمانی. برای معیار مکانی، داده‌هایی که عرض جغرافیایی آنها بین ۶۵- درجه تا ۶۵+ درجه است و از عرض‌های جغرافیایی مشابه هم عبور می‌کنند، انتخاب می‌شود. برای معیار زمانی نیز از داده‌های ماهواره‌های *Swarm* که با فاصله زمانی یک ساعت قبل و یک ساعت بعد از داده ماهواره *CSES* عبور می‌کنند، استفاده گردیده است. این معیار توسط کاکینامی و همکارانش (۲۰۱۳) برای ارزیابی داده‌های ماهواره *Swarm* با ماهواره *DEMETER*[۱] پیشنهاد گردید [۶]. با درنظرگرفتن دو معیار مکانی و زمانی فوق، در این تحقیق از داده‌هایی که از عرض جغرافیایی تقریبا یکسان در زمان تقریبا یکسان عبور می‌کنند، استفاده گردیده است.

برای مقایسه داده‌های چگالی الکترونی حاصل از ماهواره‌های *Swarm* و *CSES*، دو رویکرد مختلف انتخاب شده است: ۱). مقایسه الگوهای توزیع جهانی چگالی الکترونی دو داده انتخابی و ۲). مقایسه داده‌های منطقه‌ای هم‌زمان و هم مکان که این حالت در محل تقاطع مدارات اتفاق می‌افتد؛ به عبارت دیگر داده‌های مشاهده شده توسط دو ماهواره در مدارهای متقاطع با زمان مشابه انتخاب گردید.

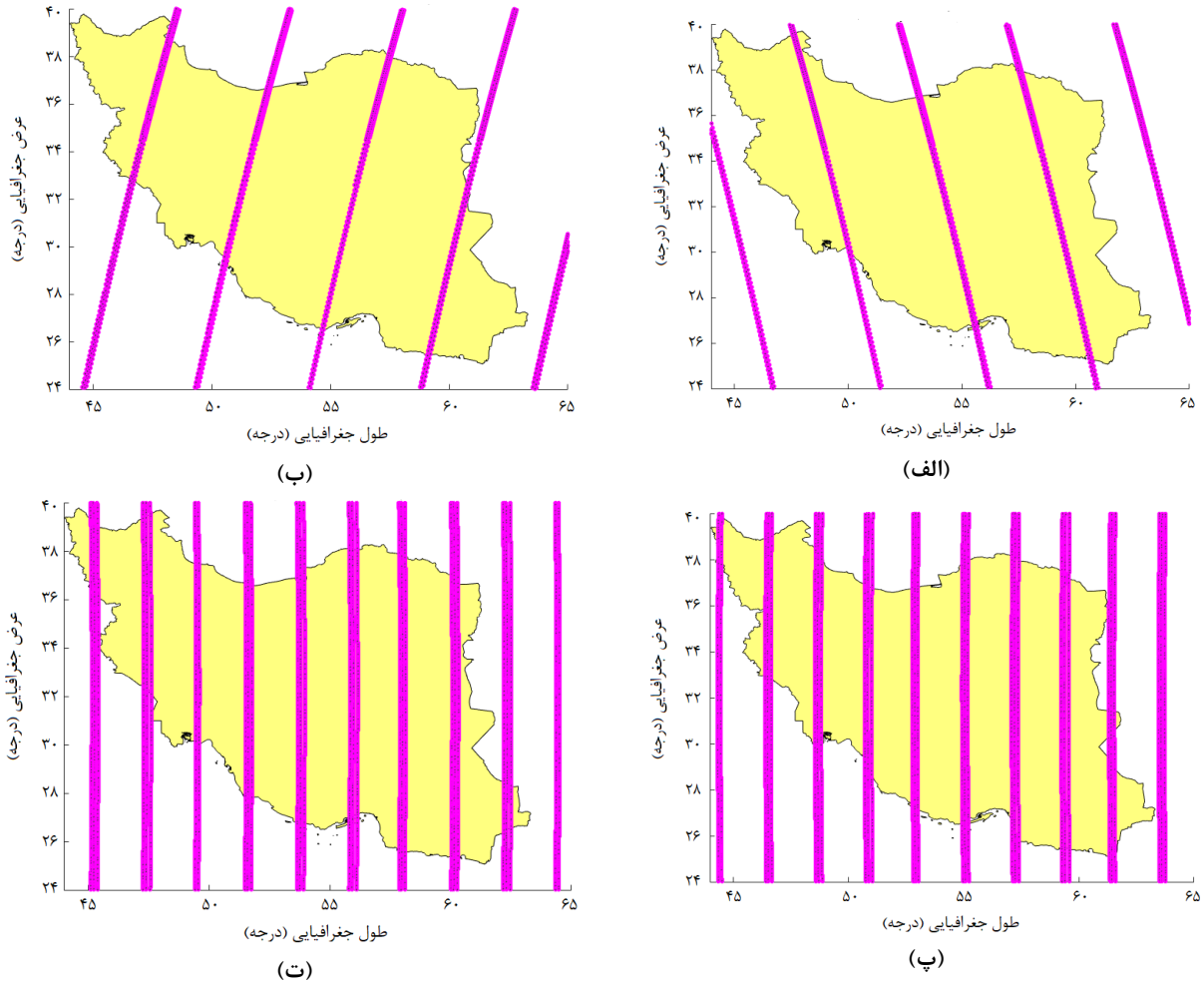
۴- نتایج عددی

در این بخش، نتایج از دو دیدگاه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به مقایسه الگوهای توزیع جهانی دو داده انتخابی پرداخته شده است. سپس، مقایسه منطقه‌ای دو داده انجام شده است.

[۱] *Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]



شکل ۱: مدارهای *Swarm A* و *CSES* که در ماه آگوست ۲۰۱۸ از ایران می‌گذرند، شکل‌های (الف) و (پ): مدارهای بالاگذر (شب) و شکل‌های (ب) و (ت): مدارهای پایین گذر (روز) را نشان می‌دهند.

۴-۱- توزیع جهانی چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm* و *CSES*

ماه آگوست سال ۲۰۱۸ با توجه به اینکه معیارهای زمانی و مکانی مطرح شده در بخش (۳) را دارا می‌باشد، برای مقایسه الگوهای توزیع جهانی چگالی الکترونی به دست آمده از مشاهدات *LP* ماهواره‌های *Swarm* و *CSES* انتخاب گردید. همچنین تمام آنالیزهای انجام شده در شرایط ژئومغناطیسی آرام انجام شده است و روزهایی که یونسفر در وضعیت ژئومغناطیسی آشفته و فعال قرار دارد، از محاسبات حذف گردیده است.

به منظور به‌دست آوردن توزیع جهانی چگالی الکترونی دو ماهواره *Swarm A* و *CSES*، گام‌های زیر انجام شده است:

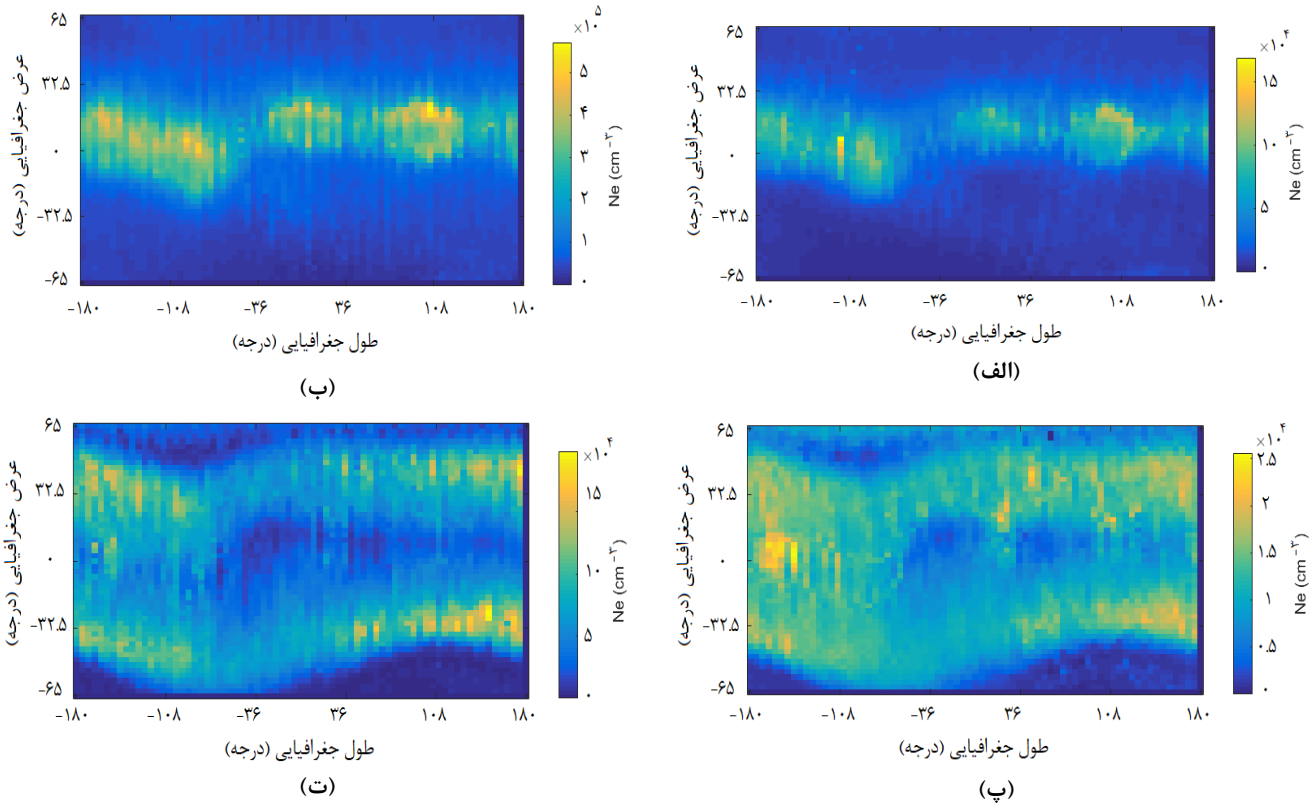
الف) مشاهداتی که عرض جغرافیایی آنها بین ۶۵- تا ۶۵+ درجه و طول جغرافیایی آنها بین ۱۸۰- تا ۱۸۰+ درجه هستند، انتخاب گردید. شبکه‌ای ایجاد گردید که رزولوشن مسطحاتی آن، عرض جغرافیایی ۲/۵ درجه و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

طول جغرافیایی ۵ درجه هستند.

ب) مشاهدات دو ماهواره در دو بخش شب و روز تفکیک گردید و داده‌هایی که در هر سلول شبکه قرار می‌گیرند، مشخص گردید. برای هر سلول، مشاهداتی که در طی ماه آگوست از آن عبور کرده‌اند، تشکیل یک مجموعه را می‌دهند که داده میانه این مجموعه به عنوان مقدار نهایی آن سلول در نظر گرفته شد. علت عدم استفاده از مقدار میانگین داده‌های هر سلول، کاهش اثرات داده‌های اشتباه بر روی نتایج می‌باشد.

پ) این فرایند برای هر یک از ماهواره‌های *Swarm A* و *CSES* برای شب و روز به طور جداگانه محاسبه و ترسیم گردید. شکل (۲) نتایج به دست آمده را نمایش می‌دهد.



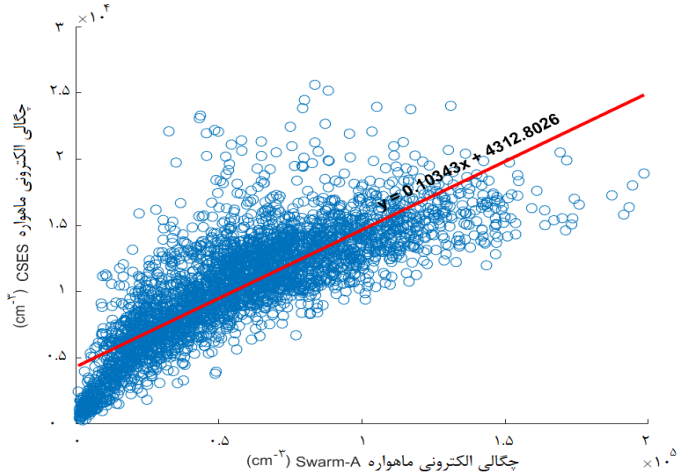
شکل ۲: توزیع جهانی چگالی الکترونی برای مدارهای *Swarm A* و *CSES* در ماه آگوست ۲۰۱۸، شکل‌های الف و ب: مدارهای پایین گذر (روز) و شکل‌های پ و ت: مدارهای بالاگذر (شب) را به ترتیب برای ماهواره‌های *CSES* و *Swam A* نشان می‌دهند.

همانگونه که شکل(۲) نشان می‌دهد، توزیع جهانی چگالی الکترونی برای دو ماهواره *Swarm A* و *CSES* هم برای روز و هم برای شب دارای رفتار کاملا مشابهی است. مقادیر ماکزیمم چگالی الکترونی برای روز در امتداد استوای ژئومغناطیسی برای هر دو ماهواره مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر ماکزیمم چگالی الکترونی در شب در عرض جغرافیایی مغناطیسی حدود ±۴۰ درجه مشاهده می‌شود که با آنومالی‌های چگالی الکترونی یونسفر در شب که توسط برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته است، همخوانی دارد [۲۲و۲۳]. تغییرات چگالی الکترونی در امتداد طول جغرافیایی برای منطقه‌ای که ماکزیمم چگالی الکترونی اتفاق میافتد، برای هر دو ماهواره مشابه هم هستند. علاوه بر الگوهای توزیع بسیار مشابه توزیع جهانی چگالی

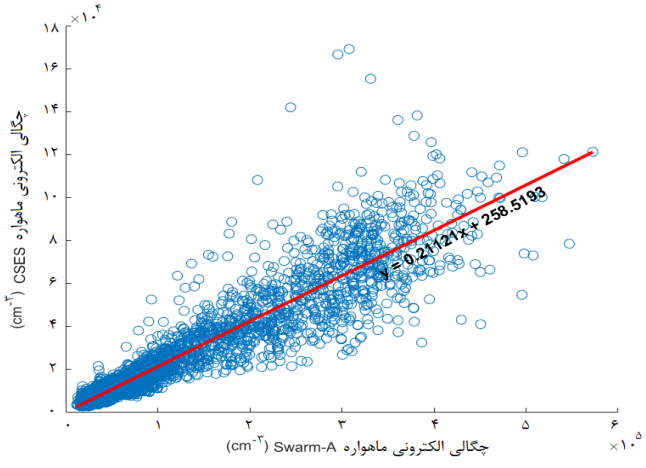
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

الکترونی دو ماهواره، یک ویژگی دیگر کـه از شـکل (۲) می‌توان نتیجه گرفت، تغییرات سـازگار در طـول زمـان بین دو مجموعه داده اسـت. بـا ایـن حـال، اخـتلاف در مقادیر چگالی الکترونی برای دو داده نشان می‌دهد کـه مقادیر چگالی الکترونی برای ماهواره *Swarm A*، بسـیار بزرگتر از *CSES* است.

به منظور ارزیابی دقیـق‌تـر داده‌هـای چگـالی الکترونـی مـاهواره‌هـای *Swarm A* و *CSES*، ضـریب همبسـتگی برای داده‌های شکل (۲) محاسبه گردید. مقـدار ضـریب همبستگی دو داده برای شب و روز به‌ترتیب ۰٫۸۱۷۱ و ۰٫۹۲۶۸ به دست آمد که نشـان مـی‌دهـد داده‌هـای دو ماهواره به‌شدت همبسته‌اند. نمودار پراگنـدگی بـین دو دسـته مشـاهدات مطـابق شـکل (۳) ترسـیم گردیـد و معادله بهترین خط قابل برازش به مشاهدات برای شـب و روز محاسبه گردید که در شکل (۳) بـر روی خطـوط برازش داده شده نوشته شده است.



(الف)



(ب)

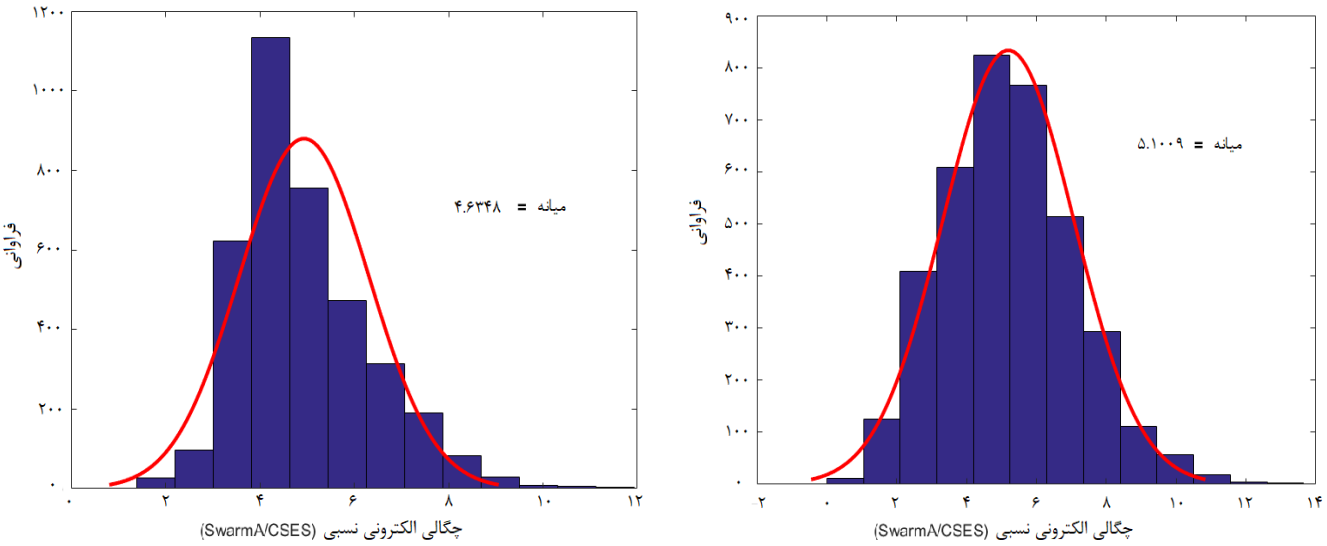
شکل ۳: نمودار پراکندگی چگالی الکترونی برای مدارهای *Swarm A* و *CSES* در ماه آگوست ۲۰۱۸، (الف): مدارهای بالاگذر (شب) و (ب): مدارهای پایین گذر (روز) را نشان می‌دهند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

به منظور ارزیابی کمی و دقیق‌تر مقادیر چگالی الکترونی حاصل از دو ماهواره فوق، نسبت چگالی الکترونی ماهواره *Swarm A* به *CSES* برای هر سلول شبکه شکل (۲) محاسبه گردید. هیستوگرام این نسبت‌ها در شکل (۴)، برای شب و روز برای ماهواره‌های *Swarm A* و *CSES* نمایش داده شده است.

شکل (۴) نشان می‌دهد که در اغلب موارد هم برای مدارهای بالاگذر و هم پایین گذر، چگالی الکترونی ماهواره *Swarm A* حدود ۴-۷ برابر از *CSES* بیشتر است.



(الف) *(ب)*

شکل ۴: هیستوگرام نسبت چگالی الکترونی ماهواره *Swarm A* به *CSES*، (الف): مدارهای بالاگذر (شب) و (ب): مدارهای پایین گذر (روز)

۴-۲- مقایسه داده‌های همزمان *Swarm* و *CSES*

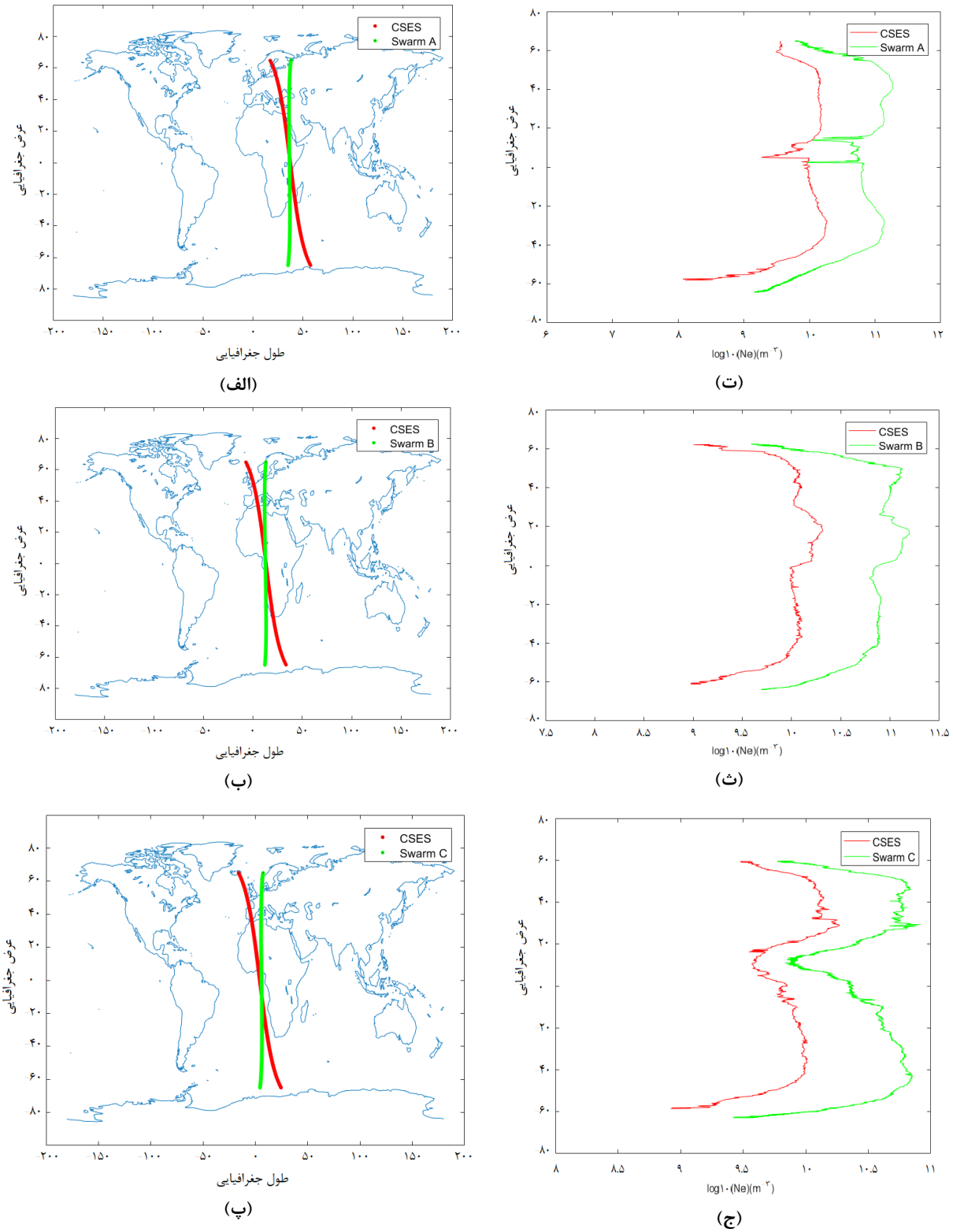
به منظور مقایسه داده‌های همزمان ماهواره‌های *Swarm* و *CSES*، مداراتی از دو ماهواره که دو معیار مکانی و زمانی را دارا هستند، انتخاب گردید. روزهای انتخاب شده برای این مقایسه در جدول (۱) بیان گردیده است. ماهواره‌های *Swarm A, B ,C* با *CSES* در روزهایی‌که طبق جدول (۱) معرفی شده‌اند، دارای مدارات بسیار نزدیک و تقریبا هم‌زمان هستند. شکل‌های (۵) و (۶) این مدارات را به همراه پروفیل‌های تغییرات چگالی الکترونی آنها در امتداد عرض‌های جغرافیایی به ترتیب برای مدارات بالاگذر (شب) و پایین گذر (روز) نشان می‌دهند.

نتایج شکل‌های (۵) و (۶)، نشان می‌دهد که رفتار چگالی الکترون در امتداد عرض‌های جغرافیایی تقریباً یکسان است. علاوه بر این، حتی برخی از تغییرات کوچک برای این دو داده مشابه هم هستند و ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های همزمان در عرض‌های جغرافیایی تقریباً یکسان مشاهده می‌گردد.

جدول ۱: روزهای انتخاب شده برای بررسی مدارهای همزمان ماهواره‌های *Swarm A, B, C* با ماهواره *CSES*

	Swarm A	***Swarm B***	***Swarm C***
CSES	۲۰۱۸/۰۸/۳۱	۲۰۱۹/۰۸/۲۷	۲۰۱۸/۰۸/۲۰

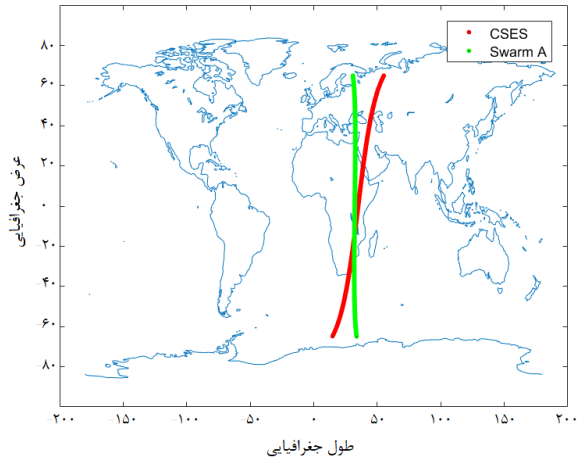
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]



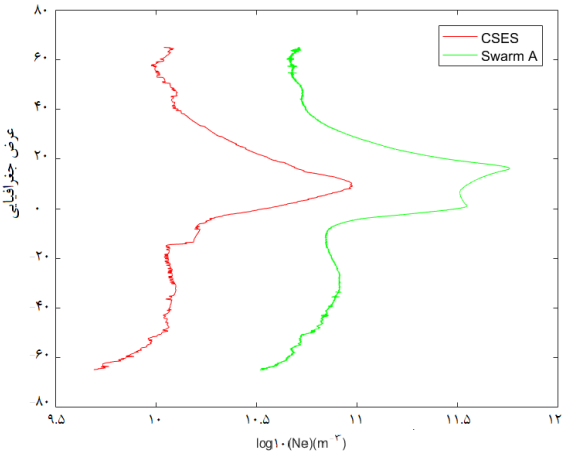
شکل ۵: تغییرات چگالی الکترونی مشاهدات *Swarm A, B, C* و *CSES* برای مدارهای بالاگذر، شکل‌های (الف)، (ب) و (پ): مسیر ماهواره‌ها و شکل‌های (ت)، (ث) و (ج): تغییرات چگالی الکترونی را در امتداد عرض جغرافیایی نشان می‌دهند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

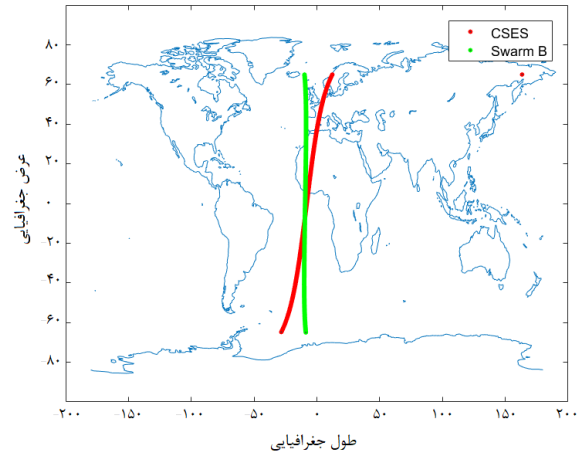
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]



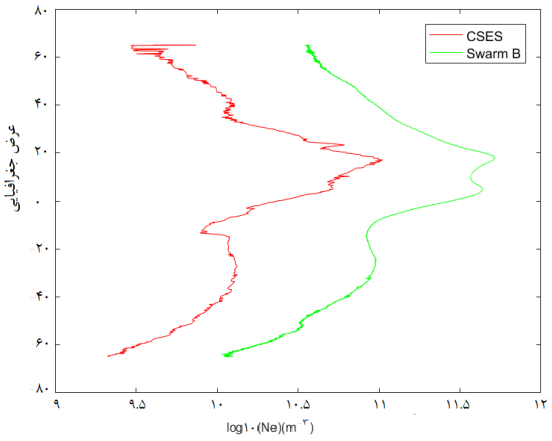
(الف)



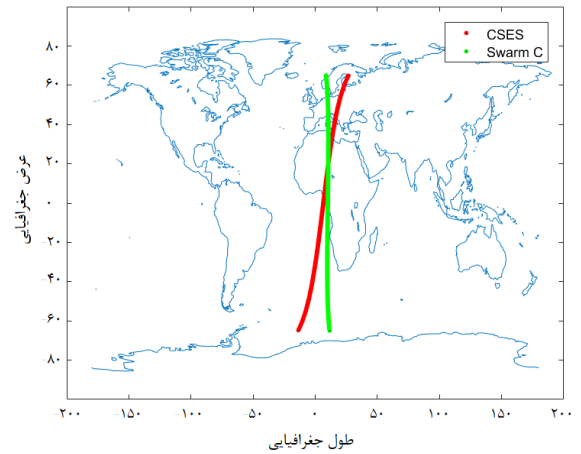
(ت)



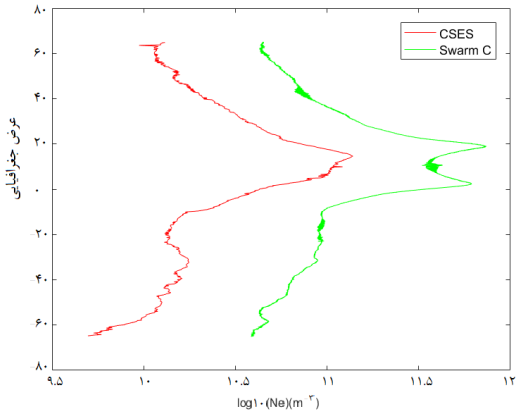
(ب)



(ث)



(پ)



(ج)

شکل ۶: تغییرات چگالی الکترونی مشاهدات *Swarm A, B, C* و *CSES* برای مدارهای پایین‌گذر (روز)، شکل‌های (الف)، (ب) و (پ): مسیر ماهواره‌ها و شکل‌های (ت)، (ث) و (ج): تغییرات چگالی الکترونی را در امتداد عرض جغرافیایی نشان می‌دهند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر رفتار چگالی الکترونی، شبکه‌ای با رزولوشن مسطحاتی ۲٫۵ درجه عرض جغرافیایی و ۵ درجه طول جغرافیایی (شبکه‌ای که برای بررسی توزیع جهانی چگالی الکترونی در نظر گرفته شد) تشکیل شد. مجموعه داده‌های هر یک از سلول‌های شبکه برای شکل‌های (۵) و (۶) به عنوان دنباله ایجاد گردیدند.

مقدار میانه هر مجموعه به عنوان مقدار نهایی هر سلول انتخاب شد و برای دو بردار نهایی که نشان دهنده مقادیر چگالی الکترونی برای جفت ماهواره‌ها هستند، ضرایب همبستگی به منظور بررسی میزان سازگاری توزیع چگالی الکترونی حاصل از ماهواره‌های *CSES* و *Swarm* محاسبه گردید. مقادیر به دست آمده در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: ضرایب همبستگی بین چگالی الکترونی ماهواره *CSES* با ماهواره‌های *Swarm*

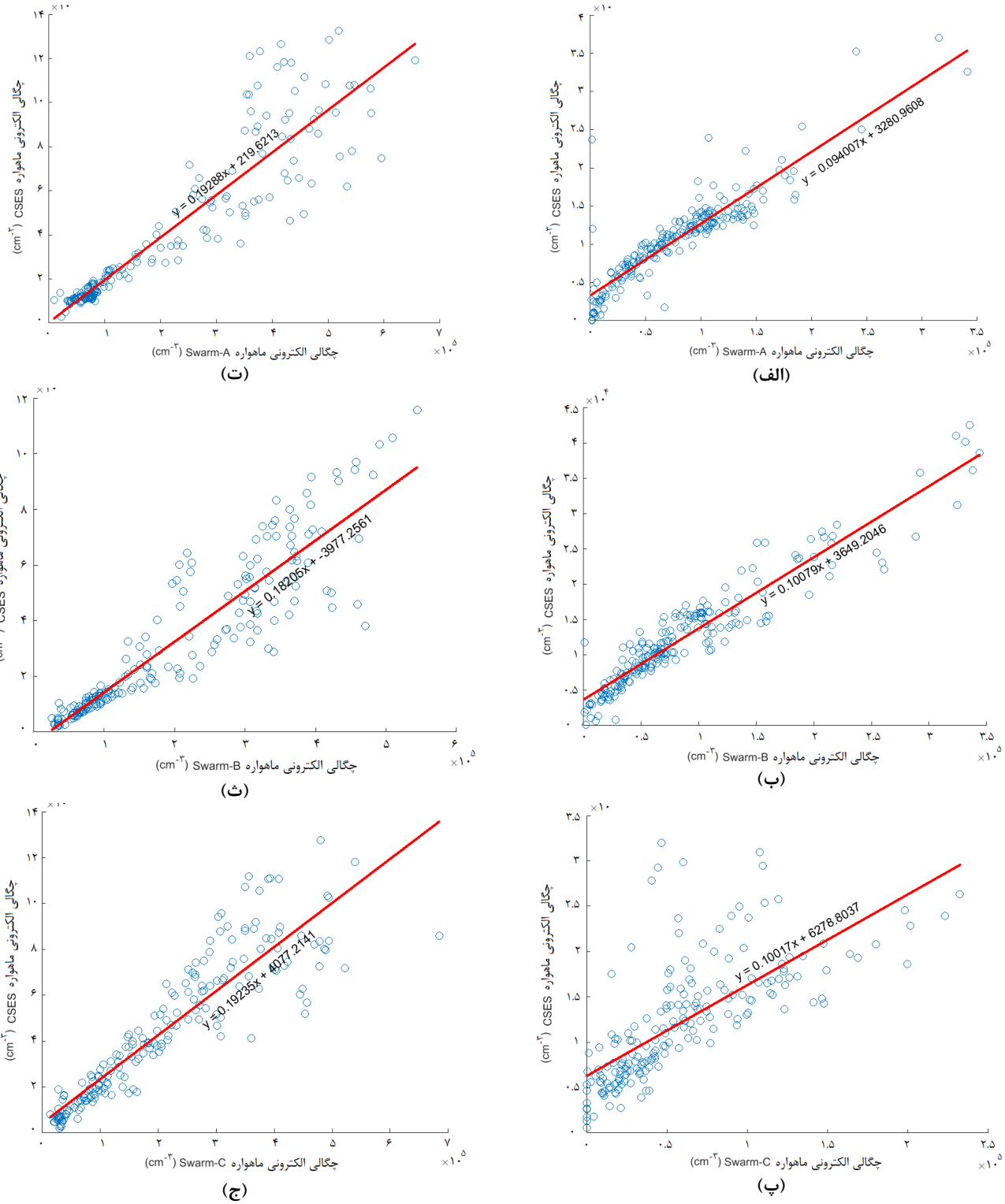
	Swarm A / CSES	***Swarm B / CSES***	***Swarm C /CSES***
مدارهای بالاگذر (شب)	۰٫۸۹۹۰	۰٫۹۴۶۷	۰٫۸۱۸۱
مدارهای پایین گذر (روز)	۰٫۹۱۹۹	۰٫۹۱۳۸	۰٫۹۰۹۹

ضرایب همبستگی بالای بین دو مجموعه داده نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره *CSES* با هر سه ماهواره *Swarm*، به شدت همبسته‌اند. اگرچه داده‌های این دو ماهواره دامنه عرض جغرافیایی وسیعی را شامل می‌شوند و از لحاظ مقدار به‌طور چشمگیری متفاوت هستند و در مدت زمان نسبتاً کوتاهی مشاهده شده‌اند، اما جزئیات بسیار مشابهی دارند و ضرایب همبستگی بالای ۰٫۸۰ سازگاری بالا و تغییرات نسبی دقیق بین دو ماهواره در طول مسیر را اثبات می‌کند. این موضوع به ویژه برای ماهواره *Swarm B* بسیار مشهودتر است که می‌تواند به دلیل اختلاف ارتفاعی پایین آن با ماهواره *CSES* در مقایسه با ماهواره‌های *Swarm A* و *Swarm C* باشد. همچنین نمودارهای پراکندگی برای سلول‌های شبکه فوق‌الذکر مربوط به شکل‌های (۵) و (۶) نیز ترسیم گردید. سپس معادلات خطی مربوط به هر کدام از داده‌های ماهواره‌های *CSES* با *Swarm A, B, C* برای مدارات بالاگذر (شکل(۵)) و مدارات پایین‌گذر (شکل(۶)) به دست آمد.

نتایج به دست آمده در شکل(۷) قابل مشاهده هستند. شکل (۷-الف) نمودار پراکندگی داده‌های ماهواره *Swarm-A* با ماهواره *CSES* را در روز ۳۱ آگوست ۲۰۱۸ برای مدارات بالاگذر نشان می‌دهد و رابطه خطی $y=0.094x+3280.96$ برای آن محاسبه گردیده است. مقایسه شکل‌های (۳-الف) و (۷-الف) یکدیگر را تایید می‌کنند. شکل (۳-الف) نمودار پراکندگی داده‌های ماهواره *Swarm A* با ماهواره *CSES* را در ماه اگوست ۲۰۱۸ برای مدارات بالاگذر ترسیم کرده و رابطه خطی $y=0.1034x+4312.80$ برای آنها به دست آمده است که با رابطه خطی شکل (۷-الف) مطابقت دارد. همچنین نتایج مشابهی برای شکل‌های (۷-ت) و (۳-ب) صدق می‌کند که برای مدارات پایین‌گذر به دست آمده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]



شکل ۷: نمودار پراکندگی چگالی الکترونی مشاهدات *Swarm A* و *CSES* ، شکل‌های (الف)، (ب) و (پ): مدارهای بالاگذر مربوط به شکل (۵) و شکل‌های (ت)، (ث) و (ج): مدارهای پایین‌گذر مربوط به شکل (۶) را نشان می‌دهند.

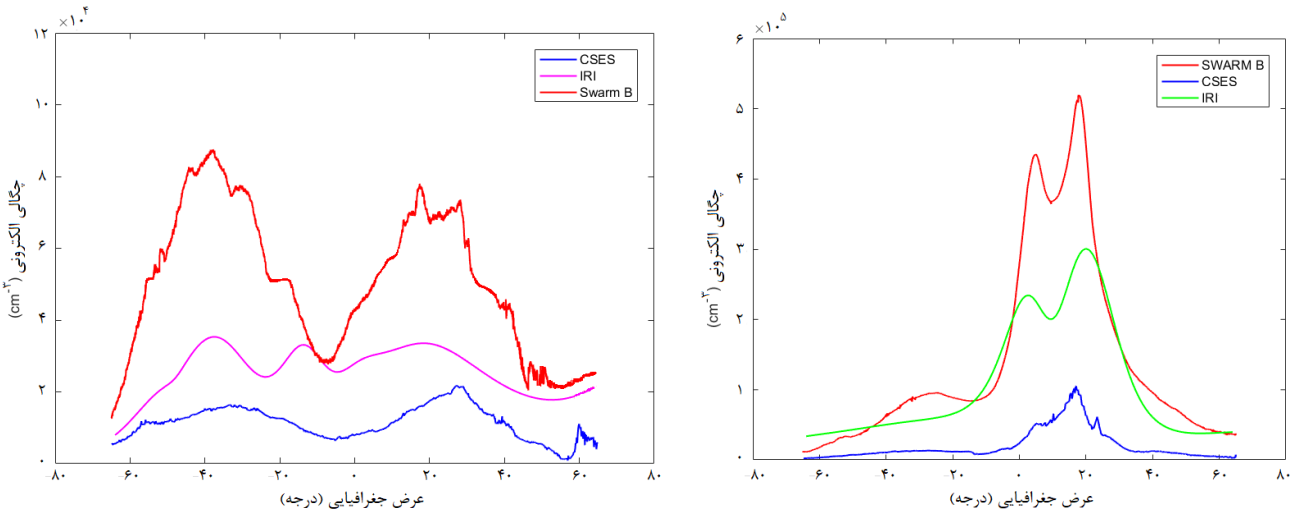
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

۳-۴- مقایسه داده‌های *Swarm* و *CSES* با داده-های *IRI*

با توجه به اینکه *IRI* یک مدل مرجع بین المللی برای پیش‌بینی پارامترهای یونوسفر است و در بسیاری از مطالعات و تحقیقات یونسفری دارای نقش بسیار مهمی است. در این بخش، مشاهدات *LP* ماهواره‌های *CSES* و *Swarm* با *IRI* مقایسه گردیده است. بر همین اساس، چندین روز از ماه‌های مختلف انتخاب گردیده و مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه ارتفاع ماهواره *Swarm B* نزدیک به ماهواره *CSES* می‌باشد، بنابراین نتایج این دو ماهواره با *IRI* در یک شکل مقایسه گردیده است. اما از آنجایی‌که ماهواره‌های *Swarm A* و *Swarm C* در ارتفاع متفاوتی نسبت به *CSES* در مدار حرکت می‌کنند، نتایج آنها به طور جداگانه با *IRI* مقایسه گردیده است. شکل (۸) نتایج به دست آمده برای ماهواره‌های *Swarm B* و *CSES* و مدل *IRI2016* را برای مدارات پایین‌گذر (روز) و بالاگذر (شب) نشان می‌دهد. برای این منظور، مدارات همزمان ماهواره‌های *Swarm B* و *CSES* برای روز ۲۷ آگوست سال ۲۰۱۸ تعیین گردید و سپس، مقادیر چگالی الکترونی یونسفر با استفاده از مدل *IRI2016* در زمان و موقعیت جغرافیاییِ مدارات همزمانِ *Swarm B* و *CSES*، به دست آمد.

چگالی الکترونی یونسفر محاسبه شده توسط *LP* نصب شده بر روی ماهواره *Swarm A* با *IRI* و همچنین *CSES* با *IRI* نیز مقایسه گردید که در شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج این مقایسه به ترتیب برای مدارات پایین-گذر و بالاگذر نشان داده شده است.

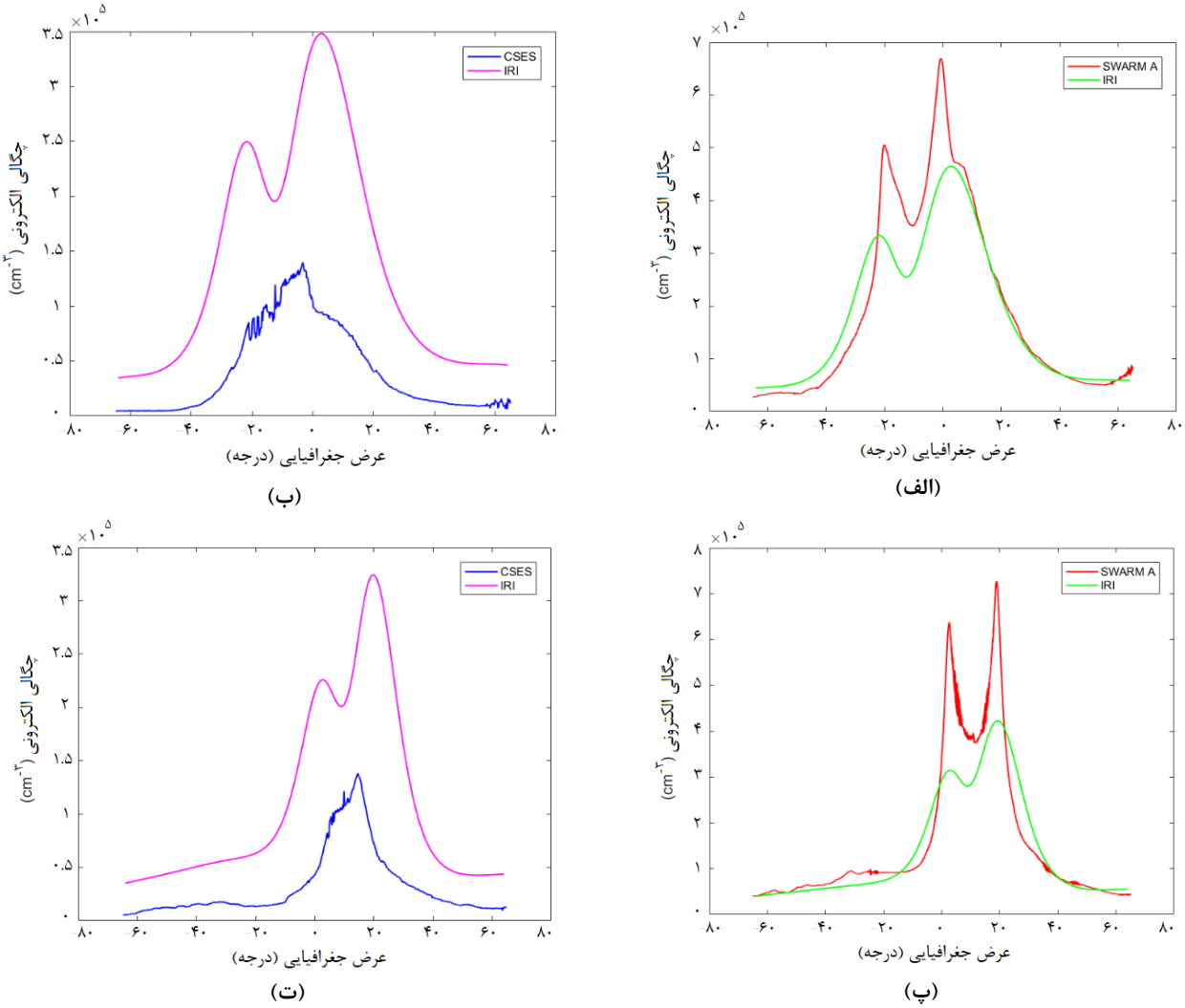


(الف) (ب)

شکل ۸: مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm A*، *CSES* و مدل‌های *IRI*، روز ۲۷ آگوست ۲۰۱۸، (الف): مربوط به مدار پایین گذر و (ب) مربوط به مدار پایین گذر می‌باشند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

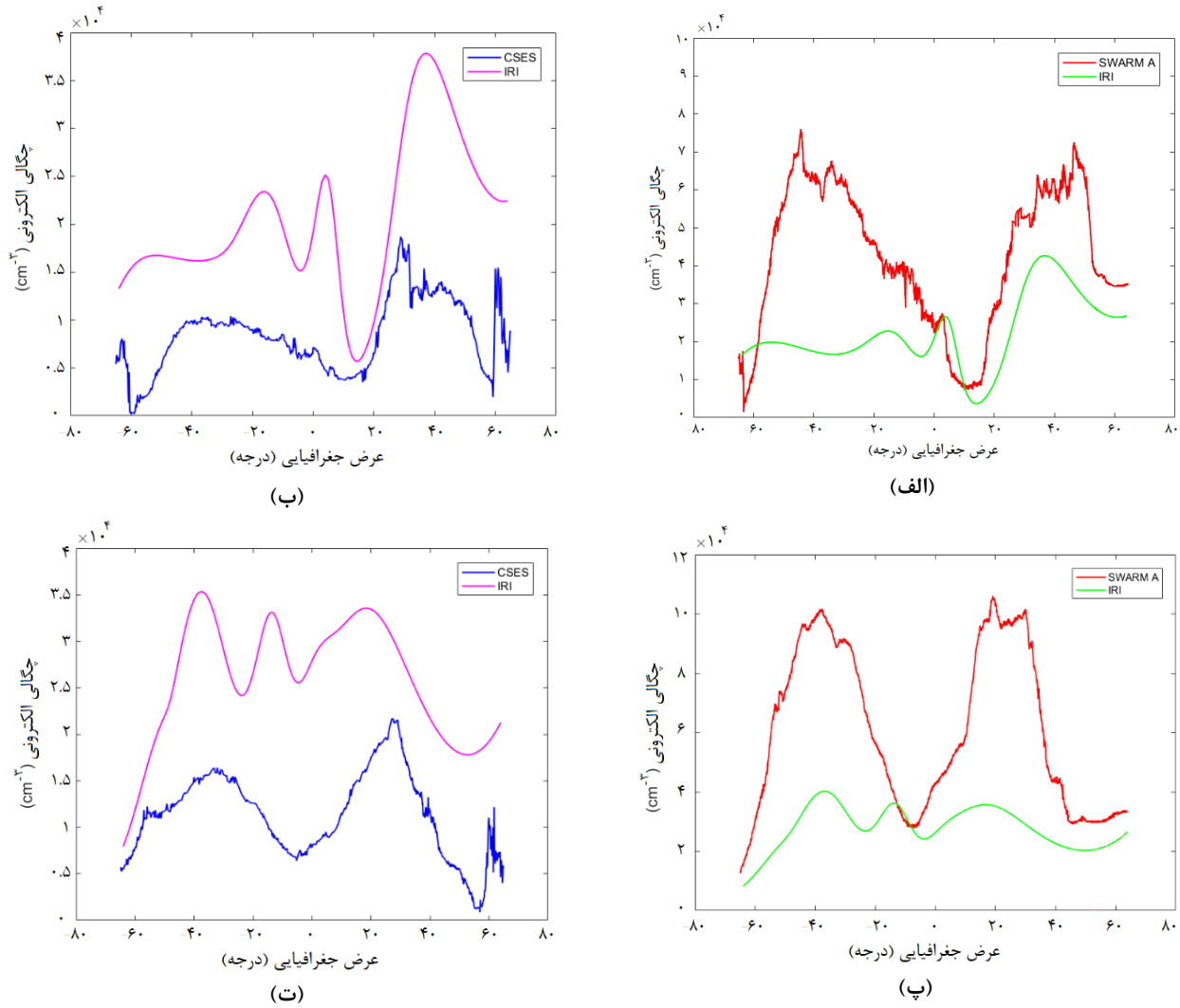


شکل ۹: مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm A*، *CSES* و مدل‌های *IRI*. شکل‌های بالا مربوط به مدار پایین‌گذر روز ۳۱ آگوست ۲۰۱۸ و شکل‌های پایین مربوط به مدار پایین‌گذر روز ۲۰ آگوست ۲۰۱۸ می‌باشند.

از شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان به طور واضح این نتیجه را گرفت که چگالی الکترونی یونسفر در مدارات پایین‌گذر (روز) در اطراف ناحیه استوایی یک پیک را نشان می‌دهد که شکل (۲) نیز آن را تأیید می‌کند. همچنین، چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده توسط *LP* نصب شده بر روی ماهواره‌های *Swarm* بزرگتر از *IRI* می‌باشد و مقادیر حاصل از مدل *IRI* بزرگتر از ماهواره *CSES* هستند. به عبارت دیگر، مقادیر حاصل از *IRI* مابین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های *CSES* و *Swarm* هستند. پدیده تخمین بیش از حد مدل *IRI* نه تنها توسط ما بلکه توسط سایر محققان نیز شناسایی شده است. به عنوان نمونه، کاکینامی[1] و همکارانش به این نتیجه رسیدند که مقادیر چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده توسط ماهواره *DEMETER* حدود ۷۰٪ کمتر از مقادیر مدل *IRI* در طول روز هستند [۶].

[1] *Kakinami*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]



شکل ۱۰: مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm A*، *CSES* و مدل‌های *IRI*. شکل‌های بالا مربوط به مدار بالاگذر روز ۳۱ آگوست ۲۰۱۸ و شکل‌های پایین مربوط به مدار بالاگذر روز ۲۰ آگوست ۲۰۱۸ می‌باشند.

همچنین لیو[1] و همکارانش (۲۰۲۱) با مقایسه داده *CSES* و مدل *IRI* به این نتیجه رسیدند که مدل *IRI* اغلب موارد، مقادیر چگالی الکترونی یونسفر را ۱-۲ برابر و بیش از ۲ برابر مقادیر *CSES* به ترتیب در شب و روز نشان می‌دهد[۲۴]. همچنین لاهر[2] و همکارانش (۲۰۱۰) با مقایسه داده *IRI* با داده ماهواره‌های *CHAMP* و *GRACE* نشان دادند که مقادیر *IRI* برای سال ۲۰۰۸ تا ۵۰ درصد و سال ۲۰۰۹ بیش از ۶۰ درصد بزرگتر از مقادیر ماهواره‌های *CHAMP* و *GRACE* بوده و پیش‌بینی‌های بیش از حد بالا عمدتاً در عرض‌های جغرافیایی پایین در ساعات روز رخ می‌دهند[۲۵]. بنابراین می‌توان گفت اگرچه احتمال دارد داده *CSES* مقادیر چگالی الکترونی را دست پایین اندازه‌گیری کند ولی در مقایسه با چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های *Swarm* از صحت بالایی برخوردارند.

[1] *Liu*
[2] *Lühr*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

در مورد داده ماهواره *Swarm A* و ماهواره *CSES* که در این تحقیق هم به صورت جهانی و هم به صورت مدارات محلی مورد بررسی قرار گرفت، بایاس سیستماتیک ۴- ۷ برابر بین این دو مجموعه داده مشاهده گردید. بخشی از این اختلاف ناشی از اختلاف ارتفاع بین مدارات دو ماهواره فوق می‌باشد. از طرف دیگر، سنسور *LP* ماهواره‌های *Swarm* بر روی بدنه ماهواره توسط میله‌ای به طول ۸ سانتی‌متر متصل شده است [۲۶]؛ در حالی‌که طول میله اتصال سنسور *LP* ماهواره *CSES* حدود ۵۰ سانتی‌متر است. به دلیل فاصله نزدیک به سطح ماهواره، سنسور *LP* در ماهواره-های *Swarm* ممکن است به راحتی با ماهواره تداخل پیدا کند و فواصل مختلف سنسورها از بدنه ماهواره‌ها می‌تواند باعث ایجاد تفاوت‌هایی در مقادیر شود.

دیه‌گو و همکارانش (۲۰۱۹) ویژگی‌های سخت‌افزاری *LP* نصب شده بر روی ماهواره *Swarm* از قبیل ابعاد آن و موقعیت آن نسبت به ماهواره را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این ویژگی‌ها منجر به ایجاد بایاس‌هایی در مقادیر چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده توسط آن می‌شود که قابل چشم‌پوشی نیست. آنها دو تصحیح برای ارزیابی و کاهش این اثرات پیشنهاد دادند و سپس مقادیر چگالی الکترونی تصحیح شده را با چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده توسط *LP* نصب شده بر روی ماهواره *CSES* مقایسه کردند. چگالی الکترون تصحیح شده *Swarm* مطابقت قابل توجهی را با اندازه-گیری‌های *CSES* برای مدارهای شب و روز نشان می-دهد [۲۷]. بنابراین، هم طراحی سخت افزاری *LP* ماهواره‌ها و هم استراتژی پردازش داده‌ها می‌توانند منجر به ایجاد بایاس‌های سیستماتیک در مقادیر چگالی الکترونی مشاهده شده توسط ماهواره‌های *CSES* و *Swarm* شوند. با این وجود، با توجه به ضرایب همبستگی بالای بین دو داده که نشان‌دهنده تغییرات نسبی دقیق این دو داده می‌باشد، این داده‌ها برای مطالعات یونسفری که از تغییرات نسبی داده استفاده می‌کنند، قابل استفاده هستند و به منظور استفاده در سایر مطالعات یونسفری نیاز به اعمال تصحیحات و کالیبراسیون این داده‌ها و مقایسه با اندازه‌گیری‌های مختلف احساس می‌شود.

۵- نتیجه گیری

مشاهدات مستقیم یونسفری اطلاعات دقیقی درباره یونسفر فراهم می‌کنند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مشاهدات یونوسوند و اندازه‌گیری‌های پروب لانگمویرهای نصب شده بر روی ماهواره‌ها اشاره کرد. با توجه به اینکه در کشور ایران دسترسی به داده‌های یونوسوند وجود ندارد، ارزیابی نتایج مطالعات یونسفری یکی از چالش‌های این حوزه محسوب می‌شود. بنابراین استفاده از داده‌های پروب لانگمویرها می‌تواند کمک بسیار شایانی به این حوزه کند. در این مقاله، مقایسه و ارزیابی مشاهدات چگالی الکترونی مشاهده شده توسط *LP*های ماهواره‌های *Swarm* و *CSES* انجام گرفته است. برای این مقایسه، توزیع جهانی مشاهدات ماهیانه دو ماهواره *Swarm A* و *CSES* باهم مقایسه و ارزیابی گردید. مقدار ضرایب همبستگی دو داده برای شب و روز به‌ترتیب ۰٫۸۱۷۱ و ۰٫۹۲۶۸ به دست آمد که نشان دهنده سازگاری و همبستگی بالا بین مشاهدات دو ماهواره است. مشاهدات چگالی الکترونی در مقیاس محلی در محل تقاطع مدارات همزمان برای هر سه ماهواره *Swarm* با *CSES* مقایسه گردید. ضرایب همبستگی بالای ۰٫۸ در مدارات پایین گذر و بالاگذر نشان می‌دهد که مشاهدات هر سه ماهواره *Swarm* با *CSES* دارای رفتار مشابه و سازگار با یکدیگر هستند. مشاهدات ماهواره *Swarm B* با *CSES* به دلیل یکسان بودن ارتفاعشان دارای ضرایب همبستگی بالاتری هستند. با وجود ضرایب همبستگی بالای بین دو داده، نتایج نشان می‌دهد که در اغلب موارد هم برای مدارهای بالاگذر و هم پایین گذر، چگالی الکترونی ماهواره *Swarm A* حدود ۴-۷ برابر از *CSES* بیشتر است. سپس، داده‌های دو ماهواره *Swarm A* و *CSES* با داده مدل *IRI2016* مقایسه گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، مقادیر *IRI* بزرگتر از *CSES* و کوچکتر از

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

Swarm A هستند. طبق نتایج ما و تحقیقات قبلی، مدل *IRI* مقادیر چگالی الکترونی یونسفر را خوش بینانه و بزرگتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت اگرچه احتمال دارد داده *CSES* مقادیر چگالی الکترونی را دست پایین اندازه‌گیری کند ولی در مقایسه با چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های *Swarm* از صحت بالایی برخوردارند. مقادیر بزرگتر *Swarm A* بخشی ناشی از اختلاف ارتفاع آن با ماهواره *CSES* می‌باشد ولی بخش غالب آن ناشی از طراحی سخت افزاری *LP* ماهواره‌ها و استراتژی پردازش داده‌ها است. با توجه به ضرایب همبستگی بالای بین دو داده که نشان‌دهنده تغییرات نسبی دقیق این دو داده می‌باشد، این داده‌ها برای کاربردهای مطالعات یونسفری که از تغییرات نسبی داده استفاده می‌کنند، قابل استفاده هستند ولی به منظور استفاده در سایر مطالعات یونسفری، اعمال تصحیحات و کالیبراسیون این داده‌ها و مقایسه با مشاهدات دیگر پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[1] O. M. Lodge, "Marconi's results in day and night wireless telegraphy", Nature, Vol. 66, pp. 222, https://doi.org/10.1038/066199c0, 1902.

[2] E. V. Appleton, and M. A. F. Barnett, "Local reflection of wireless waves from the upper atmosphere", Nature, Vol. 115, pp. 333–334, https://doi.org/10.1038/115333a0, 1925.

[3] G. Breit, and M. A. Tuve, "A radio method of estimating the height of the conducting layer", Nature, Vol. 116, pp. 357, https://doi.org/10.1038/116357a0, 1925.

[4] L. Lomidze, D. J. Knudsen, J. Burchill, A. Kouznetsov, and S. C. Buchert, "Calibration and validation of Swarm plasma densities and electron temperatures using ground-based radars and satellite radio occultation measurements", Radio Science, Vol. 53, pp. 15–36, https://doi.org/10.1002/2017RS006415, 2017.

[5] R. W. Schunk, and A. F. Nagy, "Ionospheres: Physics, plasma physics, and chemistry", pp. 517–547, Cambridge University Press, 2009.

[6] Y. Kakinami, M. Kamogawa, T. Onishi, K. Mochizuki, J. P. Lebreton, S. Watanabe, "Validation of electron density and temperature observed by DEMETER", Advances in Space Research, Vol. 52, pp. 1267–1273, http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.003, 2013.

[7] N. L. Xiong, C. C.Tang, and X. J. Li, "Introduction to the ionosphere physics", pp. 354–433, Wuhan University Press, 1999 (Chinese).

[8] R. F. Pfaff, "In situ or direct measurements in the ionosphere and thermosphere", presented at CEDAR meeting, Santa Fe, New Mexico, 2009.

[9] I. Zakharenkova, E. Astafyeva, I. Cherniak, "GPS and in situ Swarm observations of the topside equatorial plasma irregularities", Earth Planets Space, Vol. 68, no. 120, doi:10.1186/s40623-016-0490-5, 2016.

[10] X. Wang, W. Cheng, D. Yang, and D. Liu, "Preliminary validation of in situ electron density measurements onboard CSES using observations from swarm satellites", Advances in Space Research, Vol. 64, pp. 982–994, https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.025, 2019.

[11] H. Mott-Smith, I. Langmuir, "The theory of collectors in gaseous discharges", Physical Review, Vol. 28, pp. 727-763, doi: 10.1103/physrev.28.727, 1926.

[12] L. McNamara, D. L. Cooke, C. E. Valladares, and B. W. Reinisch, "Comparison of CHAMP and Digisonde plasma frequencies at Jicamarca, Peru", Radio Science, Vol. 42 (2), RS2005. http://dx.doi.org/10.1029/2006RS003491, 2007.

[13] N. M. Pedatella, X. Yue, and W. S. Schreiner, "Comparison between GPS radio occultation electron densities and in-situ satellite observations", Radio Science, Vol. 50, pp. 518–525, https://doi.org/10.1002/2015RS005677,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

2015.

[14] R. Yan, Z. Zeren, C. Xiong, X. Shen, J. Huang, Y. Guan, et al., "Comparison of electron density and temperature from the CSES satellite with other space-borne and ground-based observations", Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol. 125, e2019JA027747, https://doi.org/10.1029/2019JA027747, 2020.

[15] X. Shen, X. Zhang, S. Yuan, L. Wang, J. Cao, J. Huang, et al., "The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission". Science China Technological Sciences, Vol. 61, pp. 634–642, https://doi.org/10.1007/s11431-018-9242-0, 2018.

[16] N. Olsen, E. Friis-Christensen, R. Floberghagen, et al., "The Swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and Swarm data products", Earth Planets Space, Vol. 65, pp. 1189–1200, https://doi.org/10.5047/eps.2013.07.001, 2013.

[17] D. J. Knudsen, J. K. Burchill, S. C. Buchert, A. I. Eriksson, R. Gill, J. E. Wahlund, B. Moffat, "Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments", Geophysical Research: Space Physics, Vol. 122, pp. 2655-2673, https://doi.org/10.1002/2016ja022571, 2017.

[18] C. Xiong, C. Stolle, H. Lu¨ hr, "The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities", Space Weather, Vol. 14 (8), pp. 563–577, https://doi.org/10.1002/2016sw001439, 2016a.

[19] C. Xiong, C. Stolle, H. Lu¨ hr, J. Park, B. G. Fejer, G. N. Kervalishvili, "Scale analysis of equatorial plasma irregularities derived from Swarm constellation", Earth Planets Space, Vol. 68 (1), 121, https://doi.org/10.1186/s40623-016-0502-5, 2016b.

[20] J. Park, M. Noja, C. Stolle, H. Lu¨ hr, "The Ionospheric Bubble Index deduced from magnetic field and plasma observations onboard Swarm". Earth Planets Space, Vol. 65, pp. 1333–1344, https://doi.org/10.5047/eps.2013.08.005, 2013.

[21] L. V. Goodwin, C. Buchert, et al., "Swarm in situ observations of F region polar cap patches created by cusp precipitation", Geophysical Research Letters, Vol. 42 (4), pp. 996–1003, https://doi.org/10.1002/2014gl062610, 2015.

[22] J. Zhong, J. Lei, X. Yue, X. Luan, and X. Dou, "Middle-latitudinal band structure observed in the nighttime ionosphere", Geophysical Research: Space Physics, Vol. 124, pp. 5857–5873, https://doi.org/10.1029/2018JA026059, 2019.

[23] C. Xiong, H. Lu¨ hr, L. Sun, W. Luo, J. Park, Y. Hong, "Long-lasting latitudinal four-peak structure in the nighttime ionosphere observed by the Swarm constellation", Geophysical Research: Space Physics, Vol. 124, pp. 9335–9347, https://doi.org/10.1029/2019JA027096, 2019.

[24] J. Liu, Y. Guan, X. Zhang, and X. Shen, "The Data Comparison of Electron Density between CSES and DEMETER Satellite, Swarm Constellation and IRI Model", Earth Space Science, Vol. 8, e2020EA001475, doi:10.1029/2020EA001475, 2021.

[25] H. Lühr, and C. Xiong, "IRI-2007 model overestimates electron density during the 23/24 solar minimum", Geophysical Research Letters, Vol. 37, L23101, https://doi.org/10.1029/2010GL045430, 2010.

[26] D. J. Knudsen, J. K. Burchill, S. C. Buchert, A. I. Eriksson, R. Gill, et al., "Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments", Geophysical Research: Space Physics, Vol. 122, pp. 2655–2673, https://doi.org/10.1002/2016ja022571, 2017.

[27] P. Diego, I. Coco, I. Bertello, M. Candidi, and P. Ubertini, "Ionospheric plasma density measurements by swarm Langmuir probes: Limitations and possible corrections", Annales Geophysicae, Vol. 2019, pp. 1–15, https://doi.org/10.5194/angeo-2019-136, 2019.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.11, No.3, Autumn 2023

Research Paper

Evaluation of Electron Density Measurements of Swarm and CSES Satellites for Using in Ionospheric Studies

Hanie Tabatabaei [1]*, Mashhadi Hossainali M [2]

1- PhD Candidate of Geodesy in Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology
2- Associate Professor in Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology

Abstract

Direct measurements of ionospheric parameters provide accurate information about ionosphere, the most important of which are ionosonde measurements and the Langmuir Probes (LP) observations mounted on satellites. There is currently no active ionosonde station in Iran, so the observations of the Langmuir probes can greatly be helpful for ionospheric studies. This study compares and evaluates the electron density measured by Langmuir Probes mounted on the three Swarm satellites owned by the European Space Agency and the measurements of the China Seismic Electromagnetic Satellite (CSES). The global distribution of electron density derived from Swarm A and CSES satellites show good consistency for both ascending (nighttime) and descending (daytime) orbits. The Correlation coefficients of the electron density between these two satellites at descending and ascending orbits were calculated 0.9268 and 0.8171, respectively, which indicate high consistency. The evaluation of the electron density behavior at the intersection of simultaneous orbits confirmed these results. The correlation coefficients between the electronic density of Swarm A, B and C with CSES are calculated as 0.9199, 0.9138 and 0.9099 for daytime and 0.8990, 0.9467 and 0.8181 for nighttime, respectively. These results reveal that the electron density of these satellites, especially the Swarm B with CSES, are quite correlated which could be due to the close altitudes of these two satellites. The electron density ratios show that Swarm A values are often about 4 to 7 times more than the CSES values. Besides, the comparison of the electron density values obtained from the International Reference Ionosphere model (IRI2016), Swarm and CSES satellites show that the electron density values of the IRI2016 model are between the values of the other two satellites and close to CSES. Moreover, due to the overestimation of the actual values by the IRI model, the electron density values of CSES are more accurate than those of Swarm.

Key words: *Direct measurements of Ionospheric Parameters, Langmuir Probe, Electron Density.*

Correspondence Address *: Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel *: +98 21 88877071*
Email*: h_tabatabai@email.kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.1]