

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

هانیه طباطبایی^{۱*}، مسعود مشهدی حسینی^۲

۱- دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه 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 یونسوند و پروب لانگمویرهای (*Langmuir Probes*) نصب شده بر روی ماهواره‌ها اشاره کرد. در حال حاضر در کشور ایران ایستگاه یونسوند 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: ۰۹۱۲۴۶۲۴۴۹

Email: h_tatabai@email.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

یونسفر اولین بار در سال ۱۹۰۱ زمانی که 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 [۳ و ۲].

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 [۵ و ۴]. 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 [۷ و ۵].

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 یونسوند 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}، یونسوندها 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^{۱۵} 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 الکتروود است که در داخل پلاسما قرار داده می‌شود. اگر ولتاژ متغیر متناوب به الکتروود اعمال شود، دما و چگالی الکترونی بر اساس منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ اعمال شده تعیین می‌شود [۱۱].

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

(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 یونسفر 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*) 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

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 پلاسما یونسفر را با *LP* ماهواره *CHAMP* مقایسه کردند که نشان داد مقادیر *LP* به‌طور 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 به‌طور 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

^۱Pedatella

^۲Challenging Minisatellite Payload

^۳Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate

^۴McNamara

^۵Lomidze

^۶Yan

^۸International Reference Ionosphere

^۸ZhangHeng-1

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 به ترتیب، مدارهای بالاگذر (صعودی) و پایین‌گذر (نزولی) نامیده می‌شوند. اگر مدار موردنظر، مدار خورشیدآهنگ باشد، مدارهای بالاگذر در سمت شب زمین قرار می‌گیرد، در حالی که مدار پایین‌گذر به سمت نور خورشید و روز است. داده ماهواره CSES در ۵ سطح موجود است که متداول‌ترین آنها داده 2 level 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 2 level برای انجام محاسبات استفاده شده است.

۲-۲- داده ماهواره Swarm

ماهواره Swarm در ۲۲ نوامبر ۲۰۱۳ توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) 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 حالی که ماهواره B در مدار قطبی بالاتری در ارتفاع حدودی ۵۱۱ کیلومتر و زاویه شیب ۸۷/۷۵ درجه در مدار خود حرکت می‌کند؛ 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

دهد [۱۵]. CSES ماهواره خورشیدآهنگ دایروی با زاویه میل ۹۷/۴ درجه 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 تقریباً 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 کلونین 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 پایین‌گذر^۲ (روز)

^۱European Space Agency

^۲<https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>

^۱ascending

^۲descending

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 در نظر گرفتن دو معیار مکانی و زمانی فوق، در این تحقیق از داده‌هایی که از عرض جغرافیایی تقریباً یکسان در زمان تقریباً 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

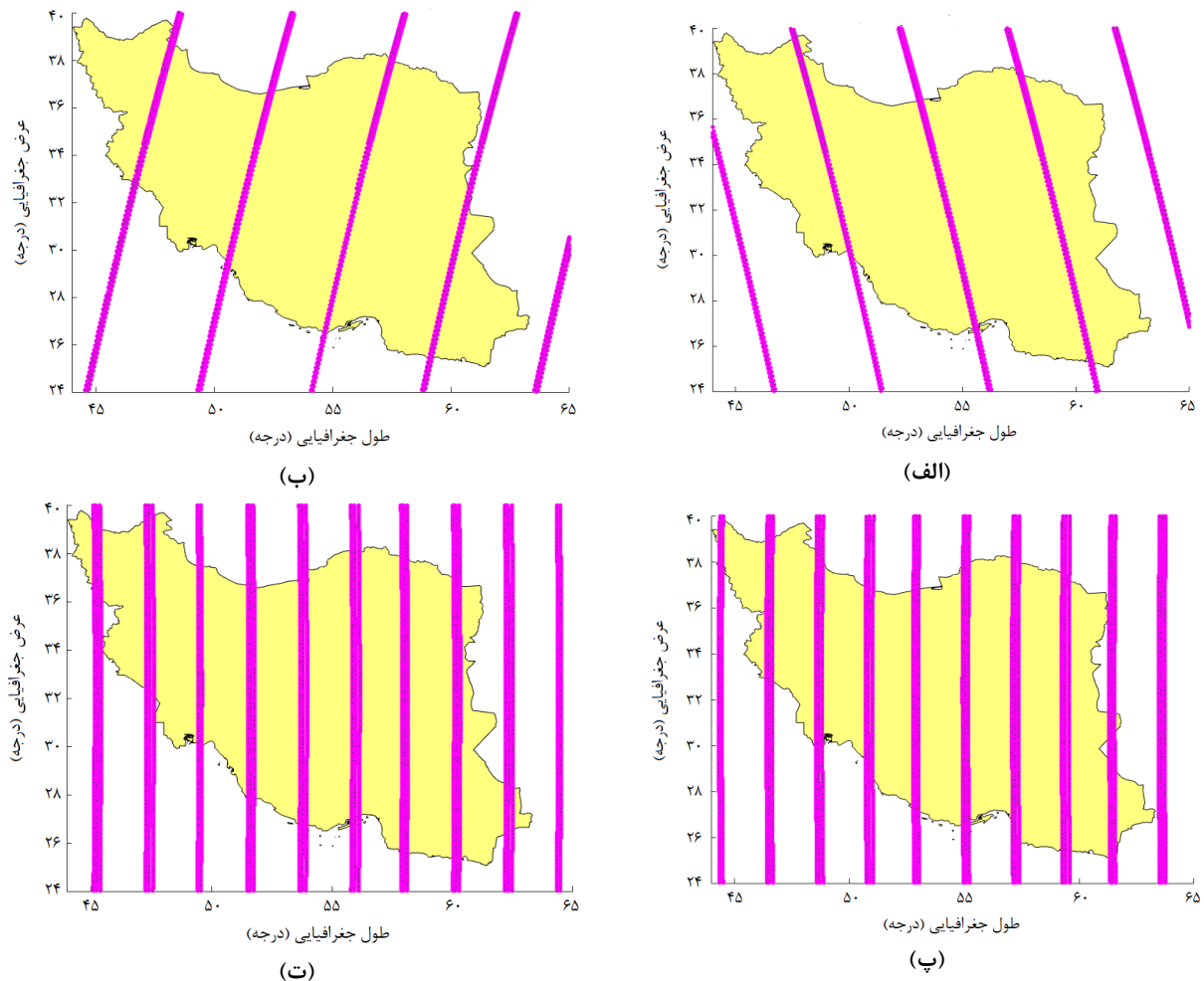
در این بخش، نتایج از دو دیدگاه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به مقایسه الگوهای توزیع جهانی دو داده انتخابی پرداخته شده است. سپس، مقایسه منطقه‌ای دو داده انجام شده است.

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 یونسوند 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 آنجایی که 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 آنجایی که 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

^۱Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions



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

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

۴-۱- توزیع جهانی چگالی الکترونی ماهواره‌های

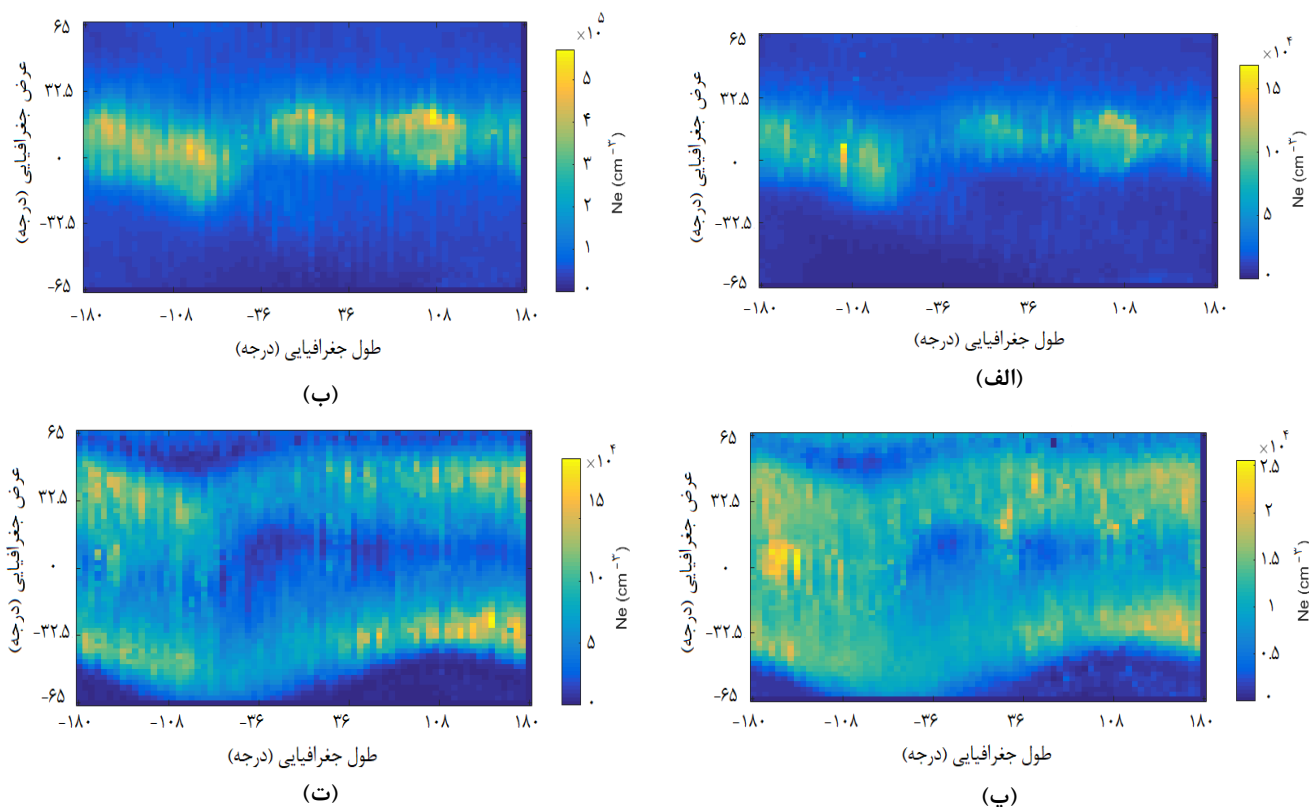
Swarm و *CSES*

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

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.

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



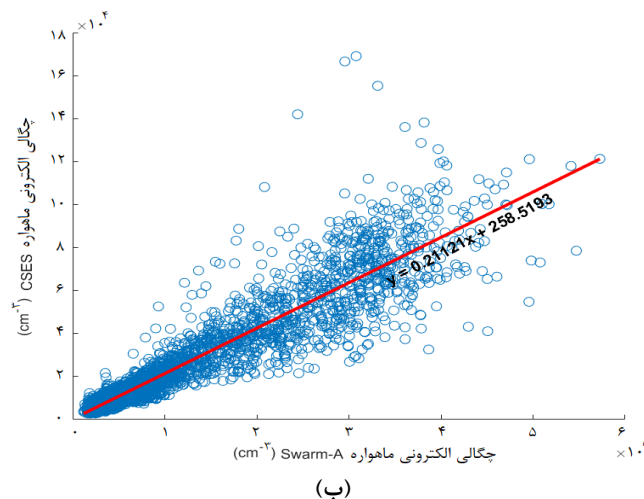
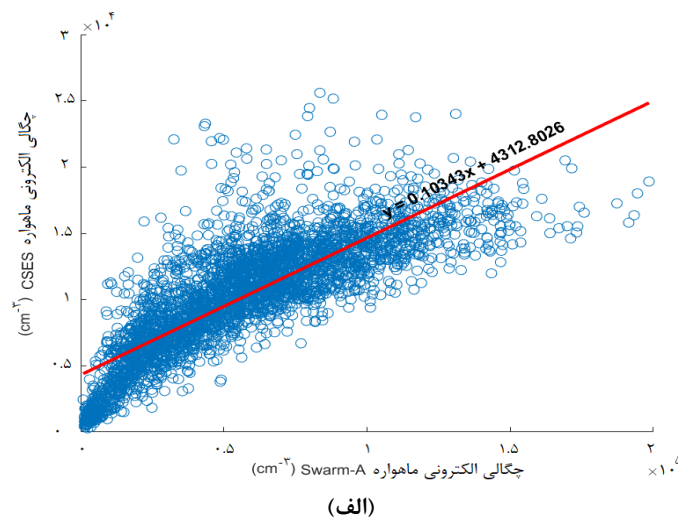
شکل ۲: توزیع جهانی چگالی الکترونی برای مدارهای *Swarm A* و *CSES* در ماه آگوست ۲۰۱۸، شکل‌های الف و ب: مدارهای پایین گذر (روز) و شکل‌های پ و ت: مدارهای بالاگذر (شب) را به ترتیب برای ماهواره‌های *CSES* و *Swarm A* نشان می‌دهند.

± 40 درجه مشاهده می‌شود که با آنومالی‌های چگالی الکترونی یونسفر در شب که توسط برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته است، همخوانی دارد [۲۲ و ۲۳]. 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

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 کاملاً 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

برای داده‌های شکل (۲) محاسبه گردید. مقدار ضریب همبستگی دو داده برای شب و روز به ترتیب ۰/۸۱۷۱ و ۰/۹۲۶۸ به دست آمد که نشان می‌دهد داده‌های دو ماهواره به شدت همبسته‌اند. نمودار پراکندگی بین دو دسته مشاهدات مطابق شکل (۳) ترسیم گردید و معادله بهترین خط قابل برازش به مشاهدات برای شب و روز محاسبه گردید که در شکل (۳) بر روی خطوط برازش داده شده نوشته شده است.

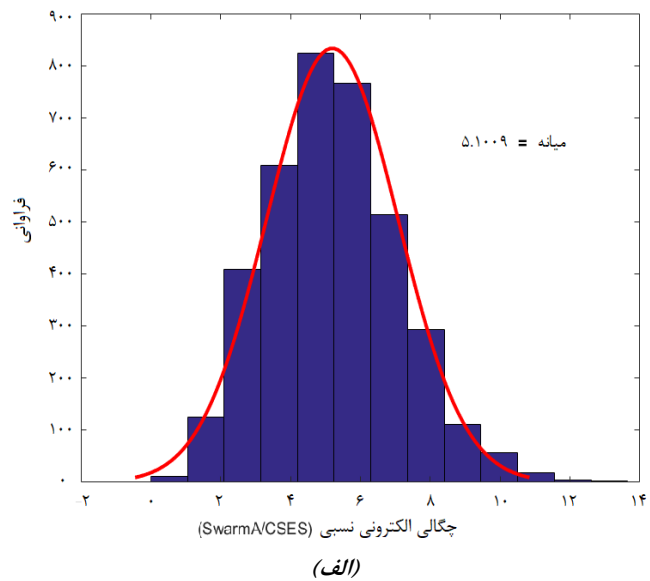
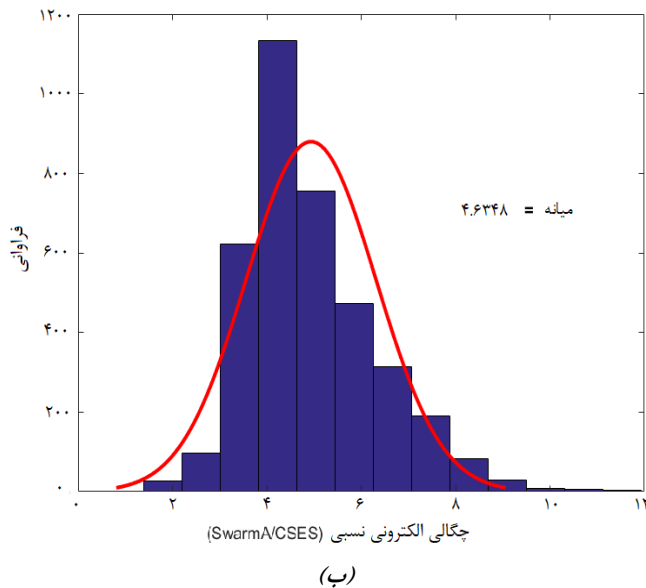
الکترونی دو ماهواره، یک ویژگی دیگر که از شکل (۲) می‌توان نتیجه گرفت، تغییرات سازگار در طول زمان بین دو مجموعه داده است. با این حال، اختلاف در مقادیر چگالی الکترونی برای دو داده نشان می‌دهد که مقادیر چگالی الکترونی برای ماهواره Swarm A بسیار بزرگتر از CSES است. به منظور ارزیابی دقیق‌تر داده‌های چگالی الکترونی ماهواره‌های Swarm A و CSES، ضریب همبستگی



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

های 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.

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 نسبت-ها در شکل (۴)، برای شب و روز برای ماهواره-



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

الکترونی آنها در امتداد عرض‌های جغرافیایی به ترتیب برای مدارات بالاگذر (شب) و پایین گذر (روز) نشان می‌دهند.

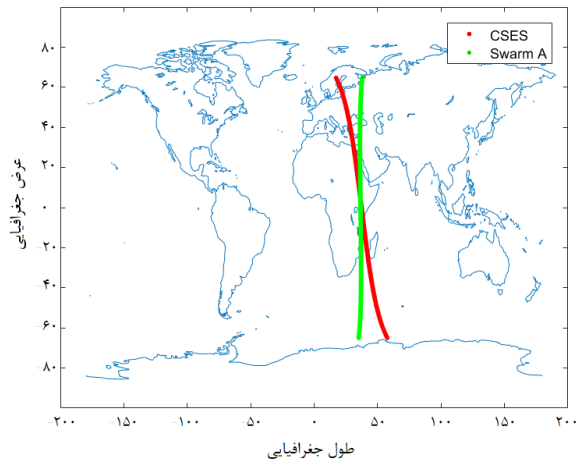
نتایج شکل‌های (۵) و (۶)، نشان می‌دهد که رفتار چگالی الکترون در امتداد عرض‌های جغرافیایی تقریباً یکسان است. علاوه بر این، حتی برخی از تغییرات کوچک برای این دو داده مشابه هم هستند و ماکزیمم-ها و مینیمم‌های همزمان در عرض‌های جغرافیایی تقریباً یکسان مشاهده می‌گردد.

۴-۲- مقایسه داده‌های همزمان Swarm و CSES

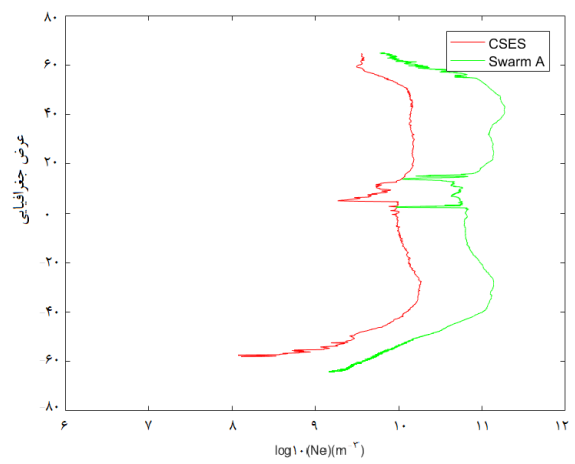
به منظور مقایسه داده‌های همزمان ماهواره‌های Swarm و CSES، مداراتی از دو ماهواره که دو معیار مکانی و زمانی را دارا هستند، انتخاب گردید. روزهای انتخاب شده برای این مقایسه در جدول (۱) بیان گردیده است. ماهواره‌های Swarm A, B, C با CSES در روزهایی که طبق جدول (۱) معرفی شده‌اند، دارای مدارات بسیار نزدیک و تقریباً همزمان هستند. شکل‌های (۵) و (۶) این مدارات را به همراه پروفیل‌های تغییرات چگالی

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

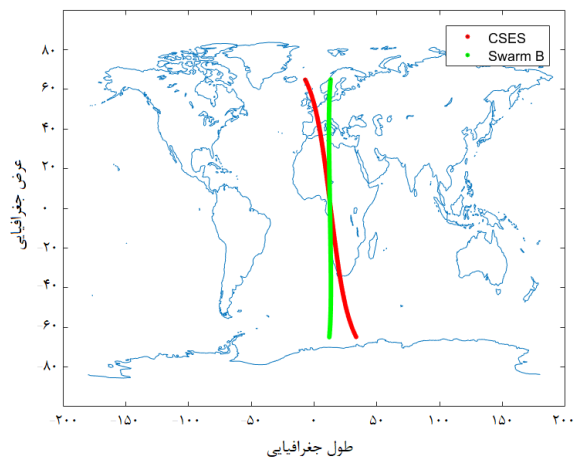
| | Swarm A | Swarm B | Swarm C |
|------|------------|------------|------------|
| CSES | ۲۰۱۸/۰۸/۳۱ | ۲۰۱۹/۰۸/۲۷ | ۲۰۱۸/۰۸/۲۰ |



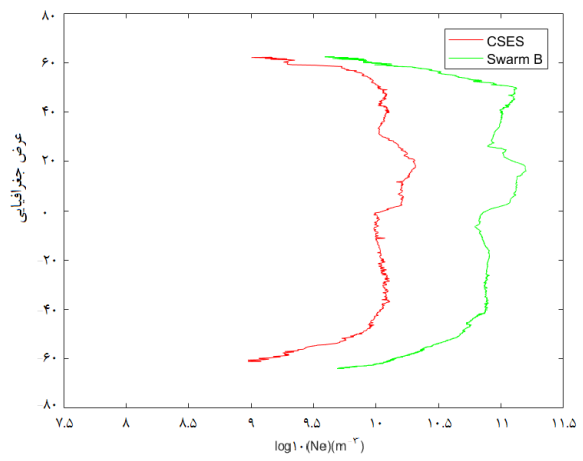
(الف)



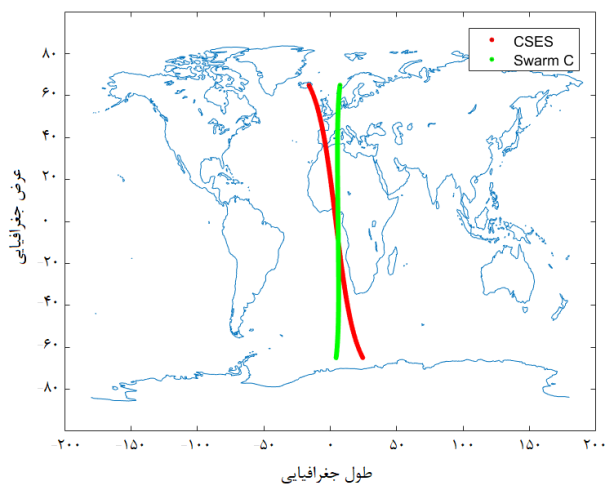
(ت)



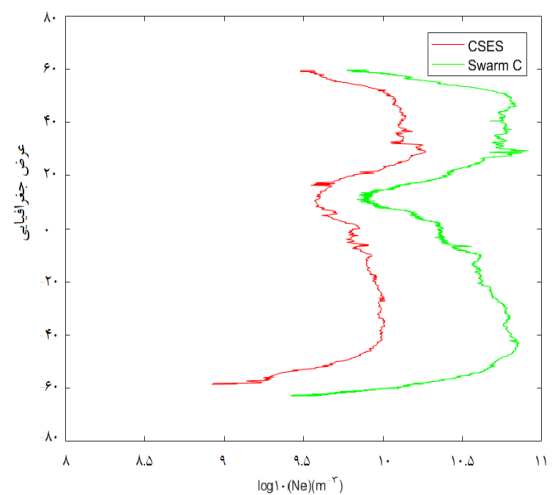
(ب)



(ث)

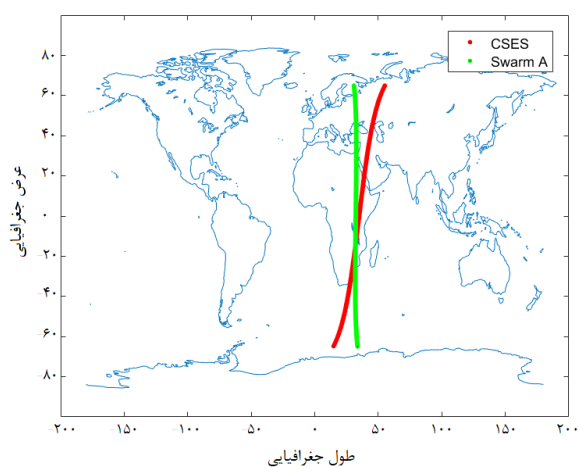


(پ)

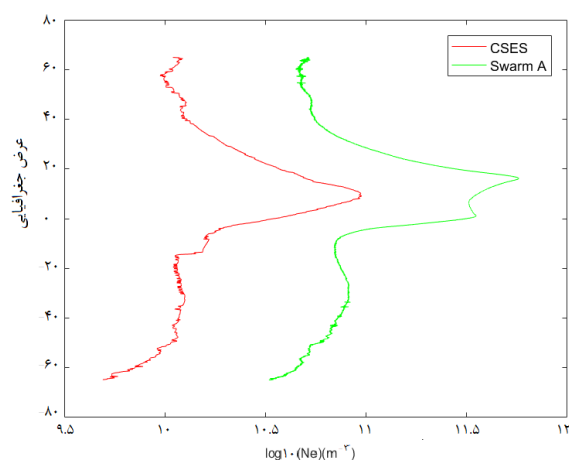


(ج)

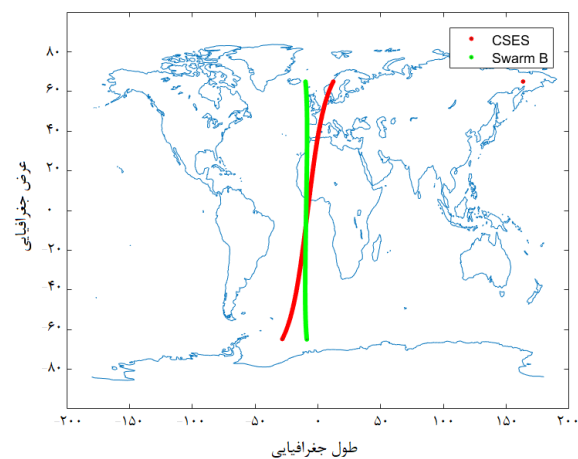
شکل ۵: تغییرات چگالی الکترونی مشاهدات *CSES* و *Swarm A, B, C* برای مدارهای بالاگذر، شکل‌های (الف)، (ب) و (پ): مسیر ماهواره‌ها و شکل‌های (ت)، (ث) و (ج): تغییرات چگالی الکترونی را در امتداد عرض جغرافیایی نشان می‌دهند.



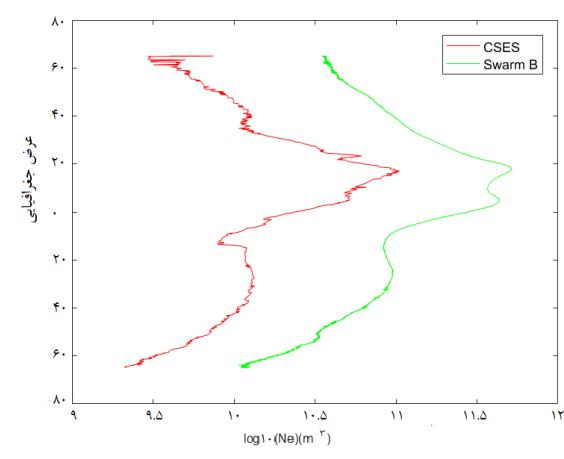
(الف)



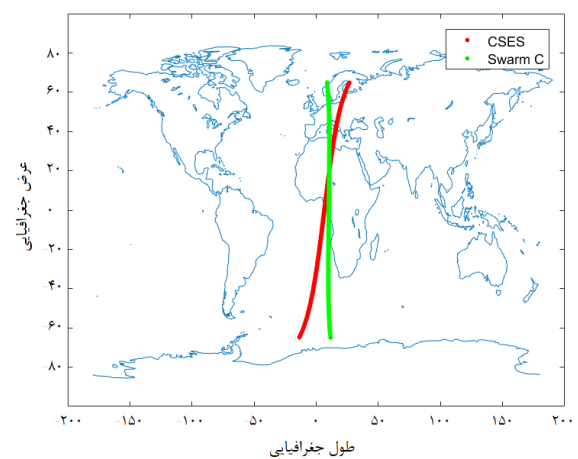
(ت)



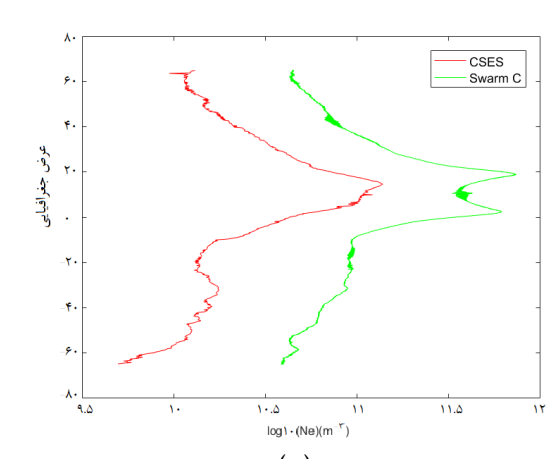
(ب)



(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.

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.

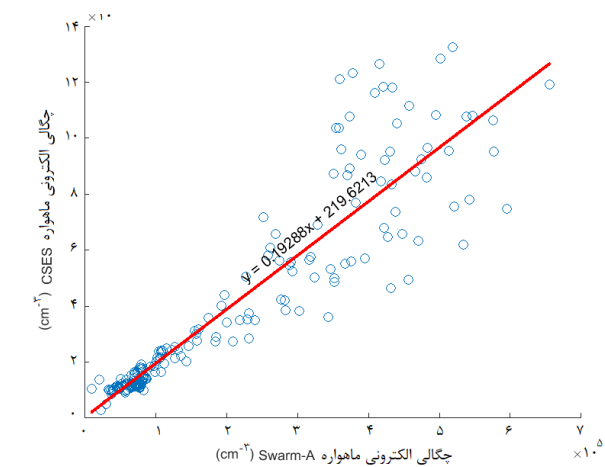
برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر رفتار چگالی الکترونی، شبکه‌ای با رزولوشن مسطحاتی ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی و ۵ درجه طول جغرافیایی (شبکه‌ای که برای بررسی توزیع جهانی چگالی الکترونی در نظر گرفته شد) تشکیل شد. مجموعه داده‌های هر یک از سلول‌های شبکه برای شکل‌های (۵) و (۶) به عنوان دنباله ایجاد گردیدند.

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

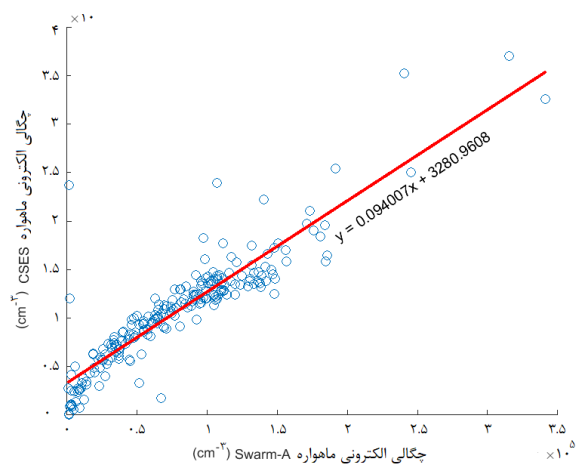
| | Swarm A / CSES | Swarm B / CSES | Swarm C / CSES |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| مدارهای بالاگذر (شب) | ۰/۸۹۹۰ | ۰/۹۴۶۷ | ۰/۸۱۸۱ |
| مدارهای پایین‌گذر (روز) | ۰/۹۱۹۹ | ۰/۹۱۳۸ | ۰/۹۰۹۹ |

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 آگوست 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-ب) و (۳-ب) صدق می‌کند که برای مدارات پایین‌گذر به دست آمده است.

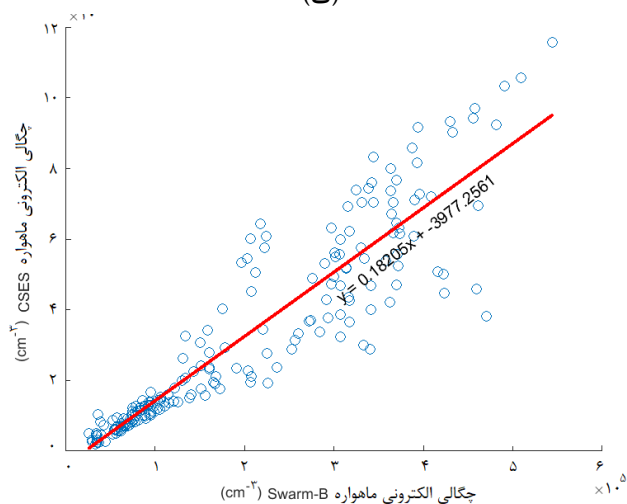
ضرایب همبستگی بالای بین دو مجموعه داده نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره CSES با هر سه ماهواره Swarm، به شدت همبسته‌اند. اگرچه داده‌های این دو ماهواره دامنه عرض جغرافیایی وسیعی را شامل می‌شوند و از لحاظ مقدار به‌طور چشمگیری متفاوت هستند و در مدت زمان نسبتاً کوتاهی مشاهده شده‌اند، اما جزئیات بسیار مشابهی 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.



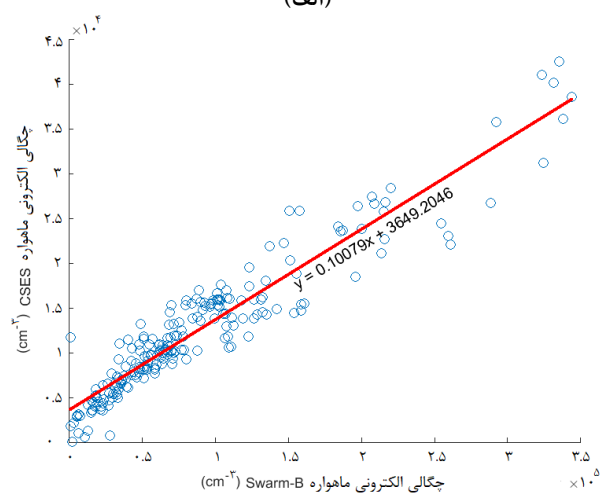
(ت)



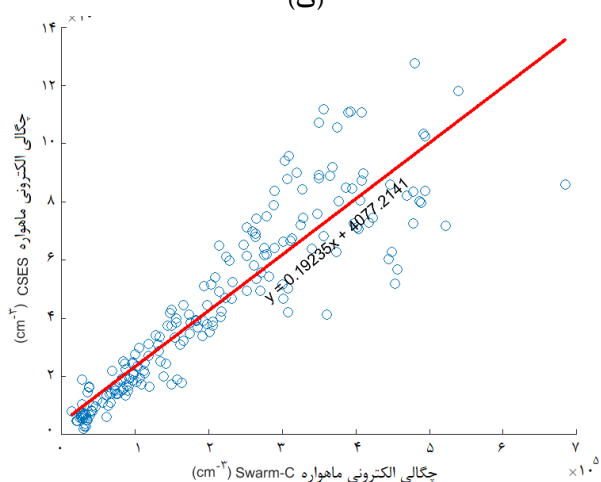
(الف)



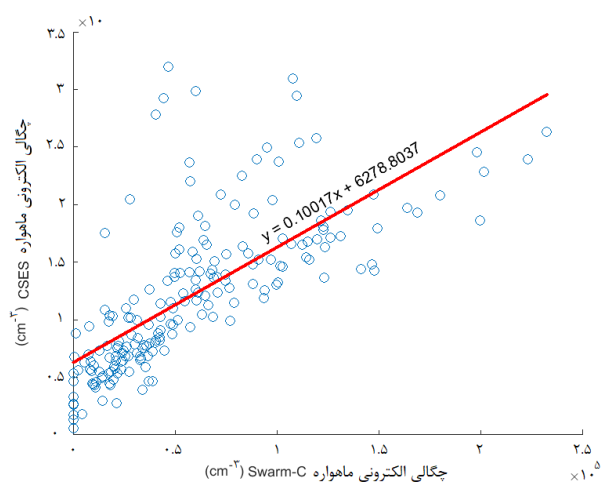
(ث)



(ب)



(ج)



(پ)

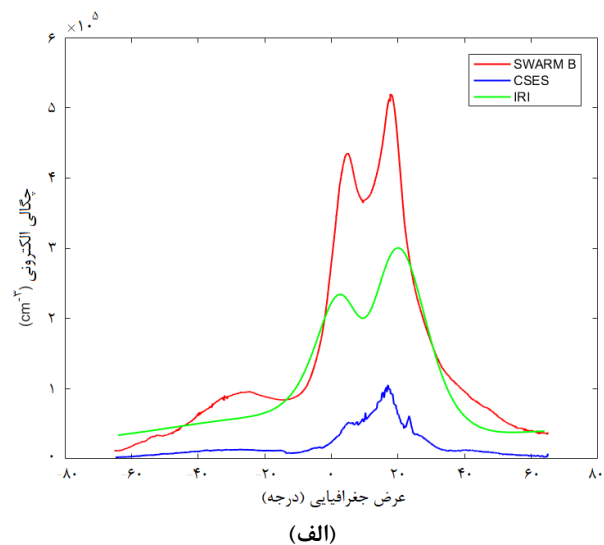
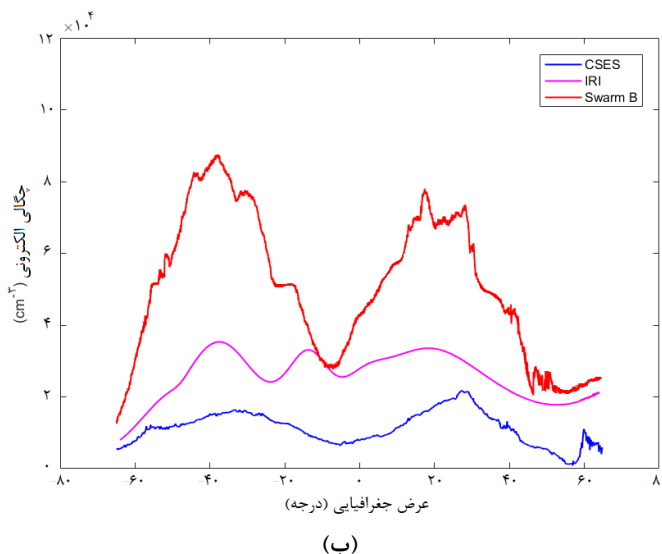
شکل ۷: نمودار پراکندگی چگالی الکترونی مشاهدات *Swarm A* و *CSES*، شکل های (الف)، (ب) و (پ): مدارهای بالاگذر مربوط به شکل (۵) و شکل های (ت)، (ث) و (ج): مدارهای پایین گذر مربوط به شکل (۶) را نشان می دهند.

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

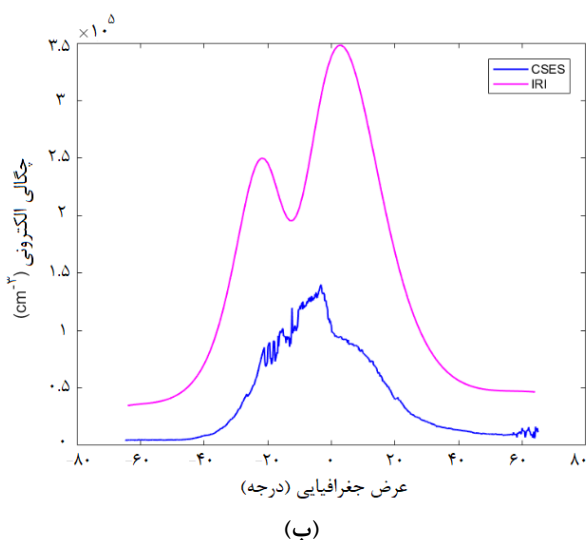
با توجه به اینکه *IRI* یک مدل مرجع بین‌المللی برای پیش‌بینی پارامترهای یونسفر است و در بسیاری از مطالعات و تحقیقات یونسفری دارای نقش بسیار مهمی است. در این بخش، مشاهدات *LP* ماهواره‌های *CSES* و *Swarm* با *IRI* مقایسه گردیده است. بر همین اساس، چندین روز از ماه‌های مختلف انتخاب گردیده و مورد بررسی قرار 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 آنجایی که 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 جغرافیایی مدارات همزمان *Swarm B* و *CSES*، به دست آمد.

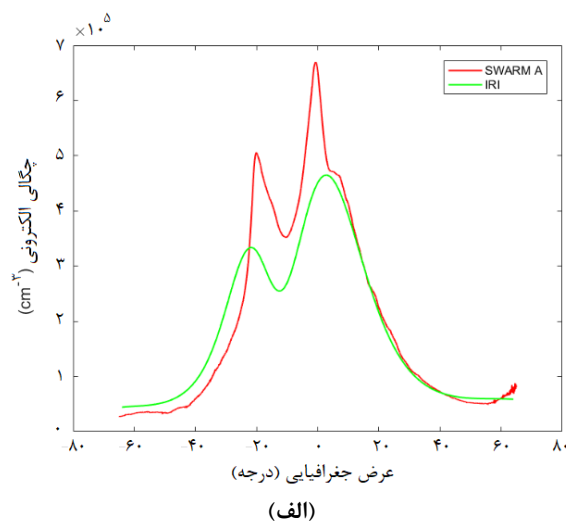
چگالی الکترونی یونسفر محاسبه شده توسط *LP* نصب شده بر روی ماهواره *Swarm A* با *IRI* و همچنین *CSES* با *IRI* نیز مقایسه گردید که در شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج این مقایسه به ترتیب برای مدارات پایین-گذر و بالاگذر نشان داده شده است.



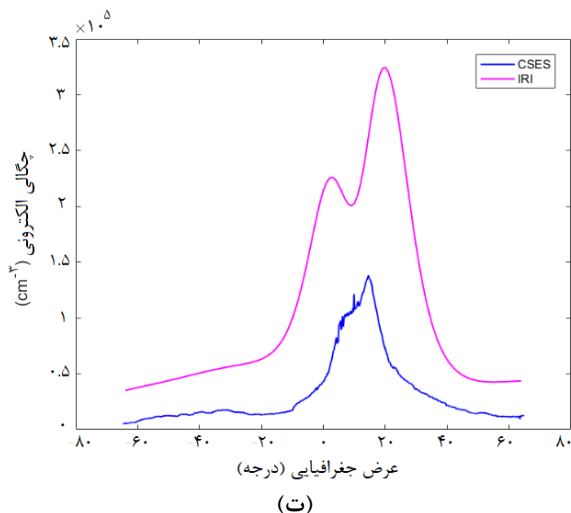
شکل ۸: مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *Swarm A*، *CSES* و مدل‌های *IRI* روز ۲۷ آگوست ۲۰۱۸، (الف): مربوط به مدار پایین‌گذر و (ب) مربوط به مدار پایین‌گذر می‌باشند.



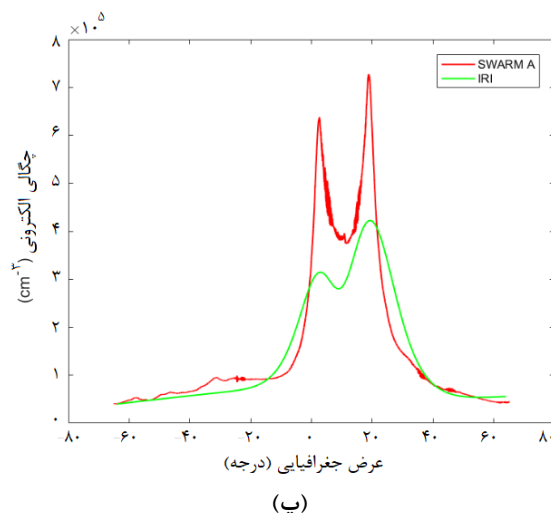
(ب)



(الف)



(ت)



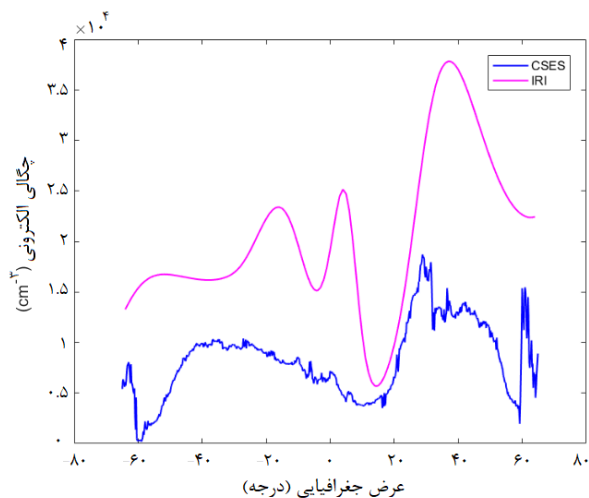
(پ)

شکل ۹: مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره های *CSES*, *Swarm A* و مدل های *IRI* شکل های بالا مربوط به مدار پایین گذر روز ۳۱ آگوست ۲۰۱۸ و شکل های پایین مربوط به مدار پایین گذر روز ۲۰ آگوست ۲۰۱۸ می باشند.

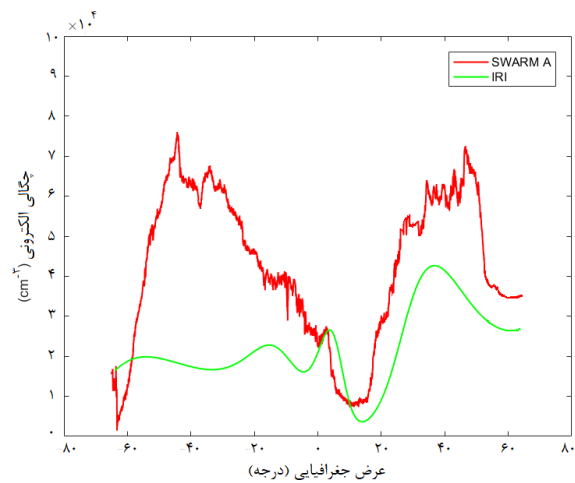
CSES و *Swarm* هستند. پدیده تخمین بیش از حد مدل *IRI* نه تنها توسط ما بلکه توسط سایر محققان نیز شناسایی شده است. به عنوان نمونه، کاکینامی^۱ همکاریانش به این نتیجه رسیدند که مقادیر چگالی الکترونی اندازه گیری شده توسط ماهواره *DEMETER* حدود ۷۰٪ کمتر از مقادیر مدل *IRI* در طول روز هستند [۶].

^۱Kakinami

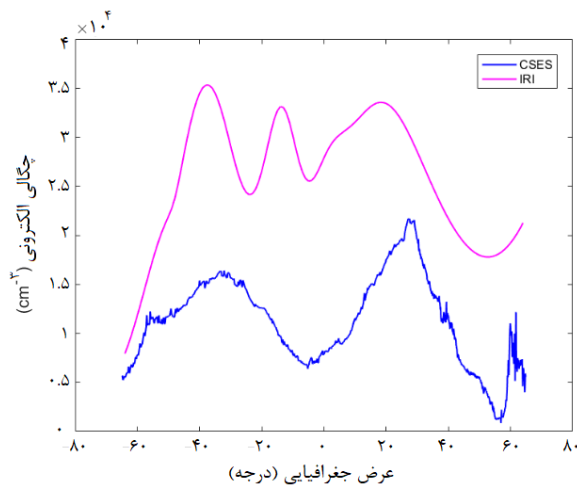
از شکل های (۹) و (۱۰) می توان به طور واضح این نتیجه را گرفت که چگالی الکترونی یونسفر در مدارات پایین گذر (روز) در اطراف ناحیه استوایی یک پیک را نشان می دهد که شکل (۲) نیز آن را تأیید می کند. همچنین، چگالی الکترونی اندازه گیری شده توسط *LP* نصب شده بر روی ماهواره های *Swarm* بزرگتر از *IRI* می باشد و مقادیر حاصل از مدل *IRI* بزرگتر از ماهواره *CSES* هستند. به عبارت دیگر، مقادیر حاصل از *IRI* مابین مقادیر اندازه گیری شده توسط ماهواره های



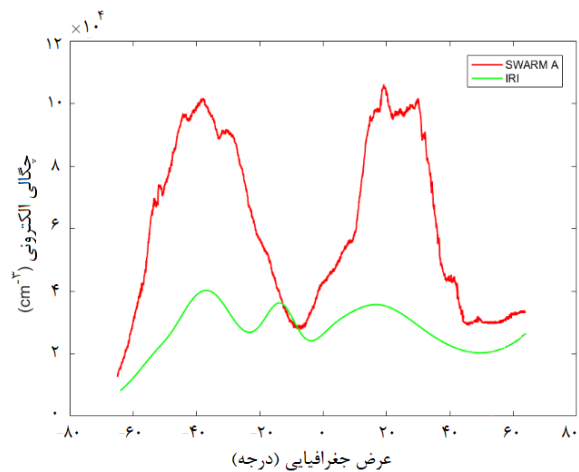
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۰: مشاهدات چگالی الکترونی ماهواره‌های *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^۱ 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^۲ 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.

^۱Liu
^۲Lühr

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 به ترتیب 0.8171 و 0.9268 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 0.8 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 $4-7$ 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

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 $4-7$ 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 8 سانتی‌متر متصل شده است [۲۶]؛ در حالی که طول میله اتصال سنسور *LP* ماهواره *CSES* حدود 50 سانتی‌متر است. به دلیل فاصله نزدیک به سطح ماهواره، سنسور *LP* در ماهواره‌های *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 اندازه‌گیری‌های *CSES* برای مدارهای شب و روز نشان می‌دهد [۲۷]. بنابراین، هم طراحی سخت‌افزاری *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

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.

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

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>,

- 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](https://doi.org/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.



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.