

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

مشاهدات ماهواره‌ای حاکی از وجود ارتباط میان بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در یونوسفر و استراتوسفر با رخداد زمین‌لرزه است. این بی‌هنجاری‌ها شامل تغییر در مؤلفه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی، تغییر در چگالی الکترون‌ها، یون‌ها، ترکیبات یونی و دمای آنها در یونوسفر و نیز تغییرات دما در استراتوسفر است. در این مقاله به مطالعه و بررسی این پیش‌نشانگرهای فضاپایه و نیز محموله‌هایی که برای اندازه‌گیری این بی‌هنجاری‌ها به کار می‌روند پرداخته شد. نتایج تحلیل چند زمین‌لرزه‌ی اخیر ایران و جهان با داده‌های این محموله‌ها بررسی گردید. اهمیت محموله‌های مختلف در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه با در نظر گرفتن محیط فضایی کشور بررسی شد و مؤثرترین محموله‌ها برای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه در ایران پیشنهاد شدند. در گام بعد یک ماهواره‌ی بومی موجود در نظر گرفته شد و با توجه به بودجه‌ی جرم، توان و سیستم پایدارساز آن، محموله‌ی بیکن سه فرانسه به عنوان محموله‌ی نهایی آن پیشنهاد شد. این محموله، سه سیگنال هم‌فاز با فرکانس‌های مختلف را به سمت زمین ارسال می‌کند. پس از دریافت این سیگنال‌ها توسط یک زنجیره از گیرنده‌های زمینی و با پردازش اختلاف فاز آنها، پروفایل عمودی یا تصویر دو بعدی چگالی الکترون یونوسفر قابل استخراج خواهد بود. استفاده از ظرفیت بخش ذخیره و ارسال ماهواره برای انتقال داده‌ی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری زمینی جدید نیز پیشنهاد گردید.

واژگان کلیدی: ماهواره، پیش‌نشانگری، زمین‌لرزه، محموله، یونوسفر، استراتوسفر.

بررسی و تحلیل محموله‌های فضاپایه به منظور انجام مطالعات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه و پیشنهاد محموله‌ی مناسب برای یک ماهواره‌ی بومی

عصمت کیشانی فراهانی (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران، e.kishani@irost.ir

آذر انوری

مربی، پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

علیرضا محمودیان

استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱- مقدمه

از ارتفاع حدود ۱۰-۱۷ کیلومتری زمین شروع شده و تا ارتفاع ۵۰ کیلومتری از سطح زمین ادامه دارد. یونوسفر نیز بخشی از اتمسفر فوقانی زمین است که از ارتفاع حدود ۴۸ کیلومتری زمین شروع شده و تا ۹۶۵ کیلومتری سطح زمین ادامه دارد. این لایه حاوی تعداد قابل توجهی الکترون آزاد و یون است که در اثر برخورد پرتوهای پرانرژی خورشیدی مانند پرتو ایکس و ماوراءبنفش با اتم‌ها و مولکول‌های موجود در این لایه، به وجود آمده‌اند.

مدل جفت‌شدگی لیتوسفر، اتمسفر و یونوسفر (LAIC)^۱ که توسط پولینتس و همکاران ارائه شد و توسعه یافت مدلی است که به توصیف مجموعه وقایع رخ داده از زمین تا یونوسفر، قبل از

زمین‌لرزه، لرزش ناگهانی و قابل توجه سطح زمین است که در اثر جابه‌جایی سریع سنگ‌ها در امتداد گسل‌ها رخ می‌دهد. این جابه‌جایی ناشی از آزادسازی انرژی کشسان ذخیره شده در پوسته‌ی زمین است که به مرور زمان بر اثر حرکت صفحات تکتونیکی ایجاد می‌شود. مشاهدات مختلف حاکی از وجود ارتباط بین بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در استراتوسفر (Yang et al., 2019; Yang & Hayakawa, 2020; Moayeri- Surkov & Hayakawa, 2024) و یونوسفر (Manesh et al., 2024) (Fraser-Smith, 2014; Hayakawa, 2007; Hayakawa, 2010; et al., 1990; Kopytenko et al., 1993) همراه با رخداد زمین‌لرزه است. استراتوسفر دومین لایه از اتمسفر زمین است که

آنها نیز می‌توان به پیش‌نشانگری زمین‌لرزه پرداخت. تغییر چگالی پلاسما بر روی خواص (دامنه و فاز) امواج الکترومغناطیسی عبوری از این ناحیه اثر می‌گذارد که این تغییر خواص سیگنال در گیرنده قابل شناسایی است. لذا از طریق ارسال سیگنال و بررسی تغییرات ایجاد شده در سیگنال دریافتی نیز می‌توان پیش‌نشانگری زمین‌لرزه را انجام داد. از سوی دیگر، با افزایش دما و شارش گازهای لرزه‌ای به سمت لایه‌های فوقانی اتمسفر، تغییرات شیمیایی حرارتی مستقیمی در استراتوسفر رخ می‌دهد که شامل ناهنجاری‌های دمایی و تغییرات غلظت ازن است (Yang et al., 2019; Yang & Hayakawa, 2020; Pulinets et al., 2006). لذا اندازه‌گیری دمای استراتوسفر و غلظت گاز اوزون به عنوان روش کارآمد دیگری در پیش‌نشانگری فضاپایه‌ی زمین‌لرزه مطرح است. لازم به ذکر است که بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در لایه یونوسفر مرتبط با فعالیت‌های لرزه‌ای، پس از فرآیند جفت‌شدگی رخ می‌دهد و از نوع تغییرات ثانویه است. حال آنکه بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در دمای استراتوسفر در حین فرآیندهای فیزیکی شیمیایی جفت‌شدگی رخ می‌دهند و از این حیث حائز اهمیت هستند.

در این مقاله محموله‌های فضاپایه‌ی به کاررفته در ماهواره‌های زلزله‌شناسی و نیز محموله‌ی به کاررفته برای اندازه‌گیری بی‌هنجاری‌های دمایی استراتوسفر بررسی شده و نتایج تحلیل چند زمین‌لرزه در ایران و جهان با داده‌های این محموله‌ها بیان شده است. مؤثر بودن نقش هر یک از محموله‌های فضاپایه برای مطالعه پیش‌نشانگری زمین‌لرزه در ایران مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و برای یک ماهواره بومی، با در نظر گرفتن بودجه‌ی جرم، توان و سیستم کنترل وضعیت سکوی انتخابی، محموله‌های پیش‌نشانگری مناسب پیشنهاد شده است.

۲- مرور ادبیات فنی

ماهواره‌های مختلفی با مأموریت بررسی آشفتگی‌های الکترومغناطیسی یونوسفر به فضا پرتاب شده‌اند که از آن جمله می‌توان از COMPASS-1، QuakeSat، COMPASS-2،

Pulinets et al., 1994; Pulinets & (Boyarchuk, 2004; Pulinets & Ouzounov, 2011). طبق این مدل، قبل از وقوع زمین‌لرزه، تنش‌های ایجاد شده سبب حرکت سیالات در زیر سطح زمین شده و غلظت گاز رادون در نزدیکی گسل‌ها دستخوش تغییر می‌شود. این گاز موجب یونیزاسیون هوا و افزایش رسانایی آن می‌شود. یون‌های تشکیل شده هیدراته شده و رطوبت را جذب می‌کنند که سبب سنگینی و کاهش تحرک آنها شده و کاهش رسانایی را در پی دارد. مولکول‌های آبی که جذب یون‌ها شده بودند گرمای نهان خود را آزاد کرده و منجر به افزایش دمای هوا و کاهش رطوبت نسبی می‌شوند. با افزایش دما، انرژی حرارتی به سمت بالا شارش پیدا می‌کند، آب بیشتری تبخیر شده، یون‌های هیدراته افزایش یافته و به هسته‌های متراکم تبدیل می‌شوند. در نتیجه توازن الکتریکی بین سطح زمین و لایه یونوسفر دچار تغییر می‌شود. ذرات موجود در لایه‌ی یونوسفر به این تغییرات پتانسیل پاسخ داده و جابه‌جایی و بازآرایی ذرات الکترون سبب تشکیل نواحی ناهمگون چگالی پلاسما می‌گردد.

در سال‌های اخیر، با پیشرفت مطالعات و درک بهتر از فرآیندهای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه، مدل جفت‌شدگی لیتوسفر-اتموسفیر-یونوسفر-مگنتوسفر (LAIMC)^۲ مطرح شده است (Pulinets & Ouzounov, 2018). در این مدل، علاوه بر سه لایه اصلی مدل LAIC، نقش مگنتوسفر نیز در انتقال و تقویت سیگنال‌های زمین‌لرزه مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعامل بین یونوسفر و مگنتوسفر می‌تواند سبب تقویت یا تغییر ویژگی‌های آشفتگی‌های الکترومغناطیسی ناشی از فرایندهای پیش‌لرزه‌ای شود و در نتیجه، بررسی هم‌زمان این چهار لایه، دید جامع‌تری از سازوکارهای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه ارائه می‌دهد.

برای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه می‌توان به اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما از جمله چگالی و دمای یون‌ها، چگالی و دمای الکترون‌ها و ترکیبات یونی پلاسما پرداخت و تغییرات بی‌هنجار آنها را شناسایی کرد. همچنین تغییر چگالی پلاسما سبب تغییر میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی محیط شده و لذا با اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و رصد تغییرات

۲-۱- محموله‌ی میدان الکتریکی

این سنجنده در ماهواره Demeter و CSES برای اندازه‌گیری میدان الکتریکی برداری استفاده شده است. با توجه به اینکه سنجنده‌ی به کار رفته در ماهواره CSES، نسخه‌ی بهبود یافته‌ی سنجنده‌ی به کار رفته در ماهواره‌ی Demeter است مشخصات سنجنده‌ی CSES بیان می‌گردد. این سنجنده قابلیت آشکارسازی میدان الکتریکی (DC تا ۳/۵ مگاهرتز) را در چهار باند فرکانسی ULF^4 ، ELF^5 ، $VLFF^6$ و HF^7 دارد که به ترتیب محدوده‌های فرکانسی صفر تا ۱۶ هرتز، ۱۳ هرتز تا ۲ کیلوهرتز، ۱ تا ۵۰ کیلوهرتز و ۲۱ کیلوهرتز تا ۵۰ مگاهرتز را پوشش می‌دهند. این سنجنده متشکل از چهار حس‌گر یکسان کروی از جنس آلومینیوم و به قطر ۶ سانتی‌متر است که هر یک در انتهای یک بوم به طول ۴/۵ متر قرار دارند (شکل ۱). جعبه الکترونیکی سنجنده هم که شامل ماژول‌های آنالوگ و دیجیتال به منظور فیلتر و تقویت سیگنال، دیجیتال‌سازی سیگنال و پردازش آن است، در داخل ماهواره قرار گرفته است.

Vulcan و Demeter نام برد. از مهم‌ترین ماهواره‌های اخیر نیز ماهواره لرزه‌ای-الکترومغناطیسی چین (CSES-1)^۳ است که در سال ۲۰۱۸ به فضا پرتاب شد و پرتاب نمونه دوم آن (CSES-2) نیز برای سال ۲۰۲۵ برنامه‌ریزی شده است. این ماهواره، پروژه مشترک چین و ایتالیا است و هدف آن نظارت بر امواج الکترومغناطیسی و آشفته‌گی‌های پلاسما و ذرات اتمسفر، یونوسفر و مگنتوسفر و مطالعه همبستگی آن با وقوع رویدادهای زمین‌لرزه‌ای است. این ماهواره هشت محموله دارد که مشخصات آنها در جدول (۱) به‌طور خلاصه آمده است. برخی از این محموله‌ها (مغناطیس سنج سیم‌پیچ جستجوگر، آشکارساز میدان الکتریکی، کاوشگر تحلیل‌گر پلاسما و کاوشگر لنگمویر) در ماهواره Demeter نیز جزو محموله‌های ماهواره بوده‌اند و در این ماهواره دقت و وضوح اندازه‌گیری آنها افزایش یافته است. در ادامه‌ی این بخش، محموله‌های فضاپایه‌ی مختلف که به بررسی آشفته‌گی‌های یونوسفر و استراتوسفر ناشی از فعالیت‌های لرزه‌ای می‌پردازند معرفی شده است.

جدول (۱): محموله‌های ماهواره CSES (Shen et al., 2018b).

نام محموله	نام اختصاری	محتوای شناسایی	پارامتر فیزیکی اندازه‌گیری شده	فرکانس و دامنه
مغناطیس سنج با دقت بالا ^۸	HPM	میدان الکترومغناطیس	میدان مغناطیسی	DC~15 Hz
مغناطیس سنج سیم‌پیچ جستجوگر ^۹	SCM			10 Hz - 20 KHz
آشکارساز میدان الکتریکی ^{۱۰}	EFD			DC~3.5 MHz
کاوشگر تحلیل‌گر پلاسما ^{۱۱}	PAP	پلاسما	چگالی یون	$5 \times 10^2 - 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$
			دمای یون	500-10000 K
			مؤلفه‌ی یون	O^+, H^+, He^+
کاوشگر لنگمویر ^{۱۲}	LAP		چگالی الکترون	$5 \times 10^2 - 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$
			دمای الکترون	500-10000 K
بسته ذرات پرانرژی ^{۱۳} آشکارساز ذرات پرانرژی ^{۱۴}	HEPP/HEPD	ذرات پرانرژی	طیف انرژی الکترون	100 keV- 50MeV
			طیف انرژی پروتون	2-200 MeV
نهفتگی رادیویی سیستم ناوبری جهانی ماهواره ^{۱۵}	GNSS-RO	ساختار یونوسفر	چگالی اتمسفر	$^{16}\text{GPS}, ^{16}\text{BD}$
			چگالی الکترون	
بیکن سه فرکانسه ^{۱۸}	TBB		محتوای الکترون کل (TEC) ^{۱۹}	150, 450, 1066 KHz

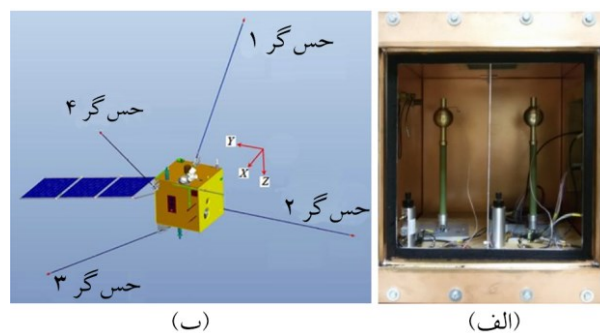
سیگنال دریافتی، دیجیتال سازی، پردازش داده و ذخیره آن را بر عهده دارد. جرم حس گرهای (سیم پیچ های) این سنجنده ۰/۷۴۵ کیلوگرم و جرم باکس الکترونیکی آن ۶/۹ کیلوگرم است. توان مصرفی سنجنده نیز کمتر از ۱۱/۵ وات است. حس گرهای سنجنده بر روی بومی به طول ۴/۵ متر نصب شده اند تا به اندازه کافی از اثرات الکترومغناطیسی اجزای ماهواره به دور باشند. حساسیت این سنجنده در محدوده $5 \times 10^{-5} \text{ nT} \sqrt{\text{Hz}}$ و نرخ نمونه برداری از آن بسته به محدوده فرکانسی برابر ۱۰۲۴ هرتز، ۱۰/۲۴ کیلوهرتز یا ۵۱/۲ کیلوهرتز است (Shen et al., 2018a; Wang et al., 2018; Cao et al., 2018).

۲-۳- محموله ی مغناطیس سنج با دقت بالا

این محموله متشکل از دو مغناطیس سنج شاریاب^{۲۰} نسبی با دقت محدود و پایداری بلند مدت و یک مغناطیس سنج اسکالر مطلق با دقت و پایداری بالا است. در مغناطیس سنج شاریاب، اندازه و فاز سیگنال تولید شده متناسب با اندازه و جهت میدان مغناطیسی مؤثر بر محور آن است. مغناطیس سنج اسکالر به کاررفته بر اساس طیف سنجی دو فوتونی اتم های آزاد قلیایی عمل می کند و برای کالیبراسیون داده برداری استفاده می شود. محدوده فرکانسی آن، از DC تا ۱۵ هرتز و دامنه آن در محدوده $65000 \pm$ نانو تسلا است. قدرت تفکیک آن ۰/۱۵ نانو تسلا، نویز آن بهتر از $50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ در ۱ هرتز، میزان خطی بودن آن ۰/۰۰۸ درصد و پایداری آن بهتر از ۰/۵ تسلا بر ساعت است. هر سه مغناطیس سنج بر روی یک بوم به طول ۴/۷ متر نصب شده اند. مغناطیس سنج اسکالر در انتهای بوم و به ترتیب در فاصله ۷۶/۷ و ۳۶/۷ سانتی متری شاریاب اول و دوم قرار دارد. جرم کل مغناطیس سنج اسکالر (شامل جعبه الکترونیک آن)، ۱/۶۷ کیلوگرم و توان مصرفی آن ۳/۴ وات است.

۲-۴- محموله ی کاوشگر لنگمویر

این سنجنده برای پایش در محل پارامترهای کلی پلاسما و نیز مطالعه جفت شدگی بین لیتوسفر و یونوسفر قبل، در حین و



شکل (۱): (الف) حس گر سنجنده و (ب) نحوه قرارگیری بوم های سنجنده ی میدان الکتریکی در ماهواره CSES (Huang et al., 2018).

به منظور اندازه گیری میدان الکتریکی در راستای خط واصل بین هر دو حس گر، اختلاف پتانسیل بین دو حس گر محاسبه شده و بر فاصله بین آنها تقسیم می شود. نرخ نمونه برداری از سیگنال در باند فرکانسی ULF برابر ۱۲۵ هرتز، در باند فرکانسی ELF برابر ۵ کیلوهرتز، در باند فرکانسی VLF برابر ۵۰ کیلوهرتز و در باند فرکانسی HF برابر ۱۰ مگاهرتز است (Huang et al., 2018). طول بوم ها به نحوی انتخاب شده تا حس گرها در خارج از محدوده ی پلاسما ی ماهواره قرار گیرند. حساسیت این سنجنده در باند ULF، ELF، VLF به ترتیب برابر با ۳۹۰، ۶۰ و $15 \text{ nV}/\text{m}\sqrt{\text{Hz}}$ است. در باند HF تا محدوده فرکانسی ۴۰ کیلوهرتز، دارای حساسیت $30 \text{ nV}/\text{m}\sqrt{\text{Hz}}$ و تا محدوده فرکانسی ۳/۵ مگاهرتز دارای حساسیت $900 \text{ nV}/\text{m}\sqrt{\text{Hz}}$ است.

۲-۲- محموله ی مغناطیس سنج سیم پیچ جستجوگر

سنجنده ی مغناطیس سنج سیم پیچ جستجوگر (SCM) یا مغناطیس سنج القایی، آشکارساز آشفتگی های میدان مغناطیسی در محدوده فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز و شامل باندهای ULF، ELF و VLF است. این سنجنده از سه سیم پیچ دوبه دو متعامد و یک جعبه الکترونیکی تشکیل شده است. تغییرات میدان مغناطیسی در اطراف هر سیم پیچ منجر به القای ولتاژ الکتریکی در دو سر سیم پیچ می شود که با اندازه گیری آن می توان تغییرات میدان مغناطیسی یونوسفر را دنبال کرد. جعبه الکترونیکی نیز داخل ماهواره قرار می گیرد و وظیفه تقویت

است. نرخ نمونه‌برداری آن نیز ۲۰ تا ۱۰۰ هرتز است.

۲-۷- محموله‌ی بیکن سه فرکانسه

محموله‌ی بیکن سه فرکانسه از یک فرستنده‌ی فضاپایه و آرایه‌ای از گیرنده‌های زمینی تشکیل شده است. فرستنده‌ی آن به ارسال سیگنال‌هایی با پایداری فرکانسی بالا و فاز همدوس در باندهای فرکانسی UHF، VHF و L (۱۵۰، ۴۰۰ و ۱۰۶۷ مگاهرتز) می‌پردازد (Chen et al., 2018). سیگنال‌های ارسالی در حین گذر از یونوسفر دچار چرخش فارادی و تأخیر گروه می‌شوند. در روی زمین زنجیره‌ای از گیرنده‌ها، سیگنال‌های ارسالی را دریافت کرده و با تحلیل تأخیر سیگنال‌های دریافتی می‌توانند پروفایل عمودی یا تصویر دو بعدی چگالی الکترون یونوسفر را استخراج نمایند.

۲-۸- محموله‌ی بسته ذرات پر انرژی و آشکارساز ذرات

پرانرژی

محموله‌ی بسته ذرات پر انرژی شامل یک آشکارساز ذرات پرانرژی، یک آشکارساز ذرات کم انرژی و یک آشکارساز اشعه ایکس خورشید است. آشکارساز ذرات پر انرژی، پروتون‌های با انرژی 10^{-2} تا 10^{-15} مگا الکترون ولت و الکترون‌های با انرژی 10^{-2} تا 10^{-15} مگا الکترون ولت را آشکار می‌سازد. آشکارساز ذرات کم انرژی، پروتون‌های با انرژی 10^{-2} تا 10^{-15} مگا الکترون ولت و الکترون‌های با انرژی 10^{-2} تا 10^{-15} مگا الکترون ولت را آشکار می‌سازد. آشکارساز اشعه ایکس نیز آشکارسازی را در محدوده 10^{-2} تا 10^{-15} کیلو الکترون ولت انجام می‌دهد. رزولوشن انرژی این آشکارسازها نیز به ترتیب ۱۰ درصد، ۱۰ درصد و ۳۰۰ الکترون ولت در 10^{-2} تا 10^{-15} کیلو الکترون ولت است. رزولوشن زاویه‌ای آنها نیز ۵ درجه است.

محموله آشکارساز ذرات پر انرژی برای اندازه‌گیری الکترون‌های با انرژی ۳-۱۰۰ مگا الکترون ولت و پروتون‌های با انرژی ۳۰-۳۰۰ مگا الکترون ولت در مدار استفاده می‌شود. این سنجنده برای اندازه‌گیری شار الکترون در کمربند درونی ون

بعد زمین‌لرزه استفاده می‌شود. این سنجنده متشکل از دو کاوشگر لنگمیر کروی با قطر ۵ و ۱ سانتی‌متر است که در انتهای دو بوم ۵۰ سانتی‌متری قرار گرفته‌اند. جرم این سنجنده $4/5$ کیلوگرم و توان مصرفی آن ۷ وات است. نرخ تله‌متری آن نیز ۸۰ کیلو بیت بر ثانیه است. همچنین چگالی الکترون در محدوده $10^2 \times 5$ منفی سانتی‌متر مکعب تا $10^7 \times 1$ و دمای الکترون را در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کلوین اندازه‌گیری می‌کند.

۲-۵- محموله‌ی تحلیل گر پلاسما

این سنجنده پارامترهای پلاسما از جمله چگالی یون ($10^2 \times 5$ تا $10^7 \times 1$ سانتی‌متر مربع)، دمای یون (۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کلوین)، سرعت رانش یون (۳- تا ۳ کیلومتر بر ثانیه)، ترکیب یونی (یون هیدروژن، یون هلیوم و یون اکسیژن) و نوسانات چگالی یون را اندازه‌گیری می‌کند تا فیزیک یونوسفر و نیز رابطه جفت‌شدگی یونوسفر و زمین‌لرزه را دریابد. این سنجنده از سه تحلیلگر یونی تشکیل شده است که عبارتند از رانش سنج یون، جذب سنج یون و تحلیلگر پتانسیل کاهنده. جرم این سنجنده ۷ کیلوگرم و توان آن ۷ وات است.

۲-۶- محموله‌ی نهفتگی رادیویی سیستم ناوبری

ماهواره‌ای جهانی

این محموله یک گیرنده به‌منظور دریافت سیگنال‌های ارسالی از سامانه ناوبری ماهواره‌ای جی‌پی‌اس (GPS) و سامانه ناوبری ماهواره‌ای بیدو (BD) است. این محموله سیگنال‌هایی را دریافت می‌کند که از ماهواره‌های در حال طلوع یا غروب نسبت به افق زمین ارسال می‌شوند و سیگنال آنها در اثر عبور از لایه‌های مختلف جو خمیده می‌شود که این خمش به ویژگی‌های یونوسفر مربوط می‌شود. لذا با این سنجنده می‌توان پروفایل عمودی چگالی الکترون را به دست آورد. این سنجنده قابلیت دریافت سیگنال از سامانه‌های ناوبری GPS L1/L2 و BD B1/B1 را داشته و دارای چهار کانال GPS و دو کانال BD

(Remsberg et al., 2008) و رزولوشن عمودی آن ۲ کیلومتر است.

۲-۱۰- محموله‌ی طیف‌سنج جرمی یون‌ها و ذرات خنثی
محموله طیف‌سنج جرمی یون‌ها و ذرات خنثی (INMS)^{۲۲} یک تحلیلگر الکترواستاتیک استوانه‌ای فشرده است که برای نمونه‌برداری از ذرات کم جرم یونیزه و خنثی در لایه یونوسفر و ترموسفر فوقانی طراحی شده است. این ابزار برای تفکیک و شناسایی اجزای اصلی جو (O_2 , O^+ , NO و N_2) طراحی شده و هدف آن مطالعه برهم‌کنش‌های یون-خنثی و پایش تغییرات ترکیبات جوی مرتبط با زمین‌لرزه است.

۳- بررسی و تحلیل محموله‌های فضاپایه‌ی پیش‌نشانگری زمین‌لرزه

بررسی‌ها نشان می‌دهد مشاهده بی‌هنجاری در باندهای مختلف فرکانسی ULF, ELF, VLF و HF گزارش شده است اما باند فرکانسی ULF یکی از جذاب‌ترین باندها برای بررسی سیگنال‌های لرزه‌ای-الکترومغناطیسی است، زیرا میرایی کمتری در لایه‌های لیتوسفر-اتموسفر-یونوسفر دارد. گرچه در مورد زمین‌لرزه‌های بسیار کم‌عمق و قوی (در صورتی که اندازه منطقه کانونی آماده‌سازی بزرگ‌تر از عمق هیپوسنترال باشد) سیگنال‌های با فرکانس بالاتر نیز می‌توانند روی زمین و فضای اطراف منتشر شوند. بررسی ۲۳۲۹ رویداد لرزه‌ای رخ داده با بزرگای حداقل ۵ و در فاصله‌ی زمانی سه‌ساله (از ابتدای ۲۰۱۹ تا انتهای ۲۰۲۱) با سنجنده‌ی میدان الکتریکی ماهواره CSES نشان داد که بین این زمین‌لرزه‌ها و بی‌هنجاری‌های ULF ارتباط وجود دارد. این بی‌هنجاری‌ها عمدتاً ۱۱ روز پیش از وقوع زمین‌لرزه تا ۲ روز پیش از وقوع آن و در فاصله‌ی کمتر از ۲۰۰ کیلومتری از مرکز زمین‌لرزه مشاهده شدند. همچنین مشاهده شد که با افزایش بزرگای پیش‌نشانگرها زودتر ظاهر شده و دامنه‌ی بی‌هنجاری‌ها وسیع‌تر گردید (Yang et al., 2023).

پژوهش انجام شده توسط معیری‌منش و همکاران

آلن طراحی شده است. الکترون‌هایی با انرژی‌های تا ده‌ها مگا الکترون ولت به‌طور پایدار در میدان ژئومغناطیسی به دام می‌افتند و دو کمر بند را تشکیل می‌دهند.

همچنین کمر بندهای الکترونی گذرای اضافی نیز ممکن است ایجاد شود. امواج الکترومغناطیسی با قطبش دایروی، با فرکانس (VLF/ULF)، به‌صورت اختلالات آلفون در امتداد خطوط میدان ژئومغناطیسی منتشر می‌شوند و با الکترون‌های به دام افتاده برهم‌کنش تشدید می‌دارند. جرم این سنجنده ۴۵ کیلوگرم و توان مصرفی آن ۴۳ وات و ابعاد آن نیز ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر است.

۲-۹- محموله‌ی مرتبط با اندازه‌گیری بی‌هنجاری دمایی استراتوسفر

ماهواره TIMED در سال ۲۰۰۱ با هدف ارائه درک بهتری از خواص انرژی و توزیع مجدد آن در مزوسفر و منطقه پایین ترموسفر و یونوسفر توسط آزمایشگاه فیزیک کاربردی دانشگاه جانز هاپکینز به فضا پرتاب شده و همچنان در مدار و در حال انجام مأموریت است.

یکی از محموله‌های این ماهواره (SABER)^{۲۱} یک رادیومتر ده کاناله است. این محموله پرتوفاک جو را با استفاده از رادیومتری انتشار باند پهن اندازه‌گیری می‌کند. هدف این محموله، اندازه‌گیری مادون‌قرمز منتشر شده در ارتفاع زیر ۱۲۰ کیلومتری جو زمین، به‌منظور استخراج توزیع عمودی دما و غلظت گونه‌های مهم انرژی (O_3 , H_2O , NO , NO_2 , CO , CO_2) و همچنین اتلاف انرژی تشعشی است. جرم این محموله ۶۱/۷ کیلوگرم، ابعاد آن $۷۷ \times ۱۰۳ \times ۶۰$ سانتی‌متر و توان مصرفی آن ۶۴ وات است. نرخ انتقال داده آن نیز ۴ کیلوبیت بر ثانیه است. این محموله متشکل از تلسکوپ و اپتیک مربوطه، مجموعه صفحه کانونی، مجموعه آینه اسکن، مجموعه بافل، مجموعه حرارتی و بخش الکترونیک است. این محموله تشعشع مادون‌قرمز دی‌اکسید کربن را برای بازیابی پروفایل دمایی از ارتفاع ۲۰ کیلومتری تا ۱۲۰ کیلومتری اندازه‌گیری می‌کند

مغناطیسی را فراهم می‌سازد که برای تحلیل آشفتگی‌های الکترومغناطیسی یونوسفر و بررسی پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه حائز اهمیت است. کالیبراسیون هم‌زمان سنجنده‌ی سیم‌پیچ جستجوگر با سنجنده‌ی آشکارساز میدان الکتریکی در باند ELF و VLF نیز امکان ثبت داده‌های پیوسته از هر شش مؤلفه‌ی موج الکترومغناطیسی و محاسبه پارامترهای انتشار موج (قطبش، بیضویت، زاویه نرمال موج، زاویه سمت‌الرأس، تختی موج) را امکان‌پذیر می‌سازد (Yang et al., 2022; Zhima et al., 2022). استفاده‌ی هم‌زمان از سنجنده‌ی میدان الکتریکی و سنجنده‌ی سیم‌پیچ جستجوگر شرایط مناسبی را برای اندازه‌گیری آشفتگی‌های الکترومغناطیسی فراهم می‌آورد.

سنجنده‌ی مغناطیس سنج دقیق به منظور بررسی تغییرات میدان مغناطیسی زمین در اثر طوفان‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه از اهمیت کمتری برخوردار است. دامنه تغییرات این سنجنده ناشی از فعالیت‌های لرزه‌ای کمتر از چند نانو تسلا و ناشی از طوفان‌های خورشیدی چند ده تا چند صد نانو تسلا است. به دلیل دامنه‌ی بسیار کوچک سیگنال‌ها و وجود نویز بالا، اهمیت و کارایی این سنجنده در پیش‌بینی زمین‌لرزه نسبت به پایش طوفان‌های خورشیدی کمتر است.

سنجنده کاوشگر لنگمویر که چگالی پلاسمای محلی را اندازه‌گیری می‌کند برای ماهواره‌های با ارتفاع بیش از ۵۰۰ کیلومتر، برای آشکارسازی بی‌هنجاری‌های ناشی از وقوع زمین‌لرزه از اهمیت کمتری برخوردار است. آشکارساز پلاσμα نیز جزو این دسته از سنجنده‌های فضایی می‌باشد. به منظور تفکیک تشعشعات ایجاد شده از سمت زمین و یا ریزش ذرات پرانرژی به یونوسفر در نواحی قطبی وجود کاوشگر لنگمویر در تحلیل نتایج نیاز است اما برای عرض جغرافیایی ایران چندان مورد نیاز نیست.

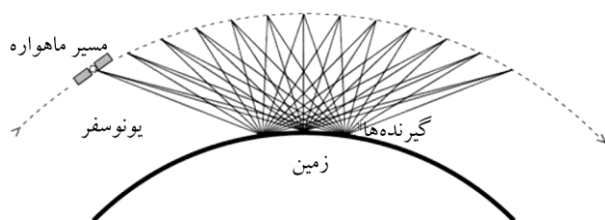
در رابطه با محموله‌ی آشکارساز ذرات پرانرژی، با توجه به محیط عملکردی ماهواره در فضا و وجود منابع مختلف شتابدهی ذرات از جمله طوفان‌های خورشیدی، شرایط

(Moayeri-Manesh et al., 2024) نیز مؤید مؤثر بودن سنجنده‌ی آشکارساز میدان الکتریکی در باند ULF در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه در ایران است. در این پژوهش سه زمین‌لرزه در ایران با داده‌های سنجنده‌ی میدان الکتریکی ماهواره CSES-1 مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و شاخص دو انحراف معیار (۲σ) برای تعیین بی‌هنجاری‌ها در حداقل دو مؤلفه میدان الکتریکی، لحاظ گردید. در زمین‌لرزه‌ی آذربایجان - ترکمن چای (با بزرگای ۵/۹ در عمق ۸/۶ کیلومتری زمین و در عرض جغرافیایی ۳۷/۷۱ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷/۵۲ درجه شرقی در ۱۶ آبان ۱۳۹۸)، تقویت سیگنال ULF در یک عبور ماهواره‌ای نزدیک به مرکز زمین‌لرزه، شش روز قبل از وقوع زمین‌لرزه مشاهده شد؛ اما برای مسیرهای ماهواره‌ای دورتر از مرکز زمین‌لرزه بی‌هنجاری مشاهده نشد. در زمین‌لرزه‌ی گیلان غرب نیز که با بزرگای ۵/۸ در عمق ۱۰/۹ کیلومتری و در عرض جغرافیایی ۳۴/۱۲ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵/۶۵ درجه شرقی در ۲۶ دی‌ماه ۱۳۹۷ رخ داد، افزایش واضح در سیگنال ULF در نزدیکی عرض جغرافیایی ژئومغناطیسی زمین‌لرزه مشاهده شد. با این حال در زمین‌لرزه‌ی تازه‌آباد که با بزرگای ۵/۱ در عمق ۸/۳ کیلومتری و در عرض جغرافیایی ۳۴/۹۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵/۷۳ درجه شرقی در ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ رخ داد هیچ انحرافی در انتشار ULF مشاهده نشد. نتایج این پژوهش مؤثر بودن سنجنده‌ی میدان الکتریکی در باند ULF را در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۵/۸ در ایران نشان می‌دهد. لذا در مجموع سنجنده‌ی میدان الکتریکی در باند ULF را می‌توان به عنوان سنجنده‌ای مؤثر در نظر گرفت.

در ماهواره‌ی CSES-1، سنجنده‌ی مغناطیس سنج سیم‌پیچ جستجوگر به ثبت سیگنال در باند ELF و VLF و بخشی از باند ULF می‌پردازد. این سنجنده، نرخ نمونه‌برداری بالاتری در باند ULF (هشت برابر) و ELF (دو برابر) نسبت به سنجنده‌ی آشکارساز میدان الکتریکی دارد. این تفاوت نرخ نمونه‌برداری، امکان ثبت دقیق‌تر و با وضوح زمانی بالاتر تغییرات میدان

سوسوزدن‌ها به‌ویژه زمانی که کاهش دامنه در امواج VHF ۳۰ دسی‌بل یا بیشتر باشد ابزاری بسیار مفید برای ارزیابی دقیق شرایط بحرانی یونوسفر است. لذا بیکن سه فرکانسه، محموله‌ای مؤثر در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه محسوب می‌شود.

ماهواره‌ی با محموله‌ی بیکن سه‌فرکانسه در طول مسیر خود، هم‌زمان سه سیگنال رادیویی با سه فرکانس مختلف (VHF, UHF, L) را به سمت زمین ارسال می‌کند. این سیگنال‌ها از لایه‌های مختلف یونوسفر عبور کرده و توسط آرایه‌ای از گیرنده‌های زمینی با چیدمان مشخص دریافت می‌شوند (شکل ۲). اختلاف تأخیر زمانی بین هر جفت سیگنال برای محاسبه TEC در امتداد مسیر مایل هر سیگنال (از ماهواره تا گیرنده) استفاده می‌شود. سپس با اعمال الگوریتم‌های توموگرافی به مقادیر TEC اندازه‌گیری شده از مسیرهای متقاطع متعدد، نقشه‌ی سه‌بعدی چگالی الکترون در یونوسفر بازسازی می‌شود. همچنین با محاسبه‌ی واریانس دامنه و فاز سیگنال‌های دریافتی، شاخص‌های سوسوزدن برای دامنه و فاز که نشان‌دهنده میزان آشفتگی یونوسفر است به دست می‌آید.



شکل (۲). نمودار مفهومی اندازه‌گیری توموگرافی یونوسفر. ماهواره در طی مسیر خود سه سیگنال با فرکانس‌های مختلف ارسال می‌کند. هر سیگنال مسیر متفاوتی را در یونوسفر طی کرده و به گیرنده‌های زمینی می‌رسد. با اندازه‌گیری تأخیر انتشار سیگنال‌های ارسال شده می‌توان به محاسبه محتوای الکترونی کل پرداخت.

لازم به ذکر است که با داشتن دو سیگنال (با دو فرکانس مختلف) هم می‌توان TEC و چگالی الکترون را استخراج کرد اما در مواردی که اختلاف فاز مضربی از 2π باشد به دلیل رخداد ابهام فاز، خطای بزرگی ایجاد می‌شود و به همین علت به‌جای بیکن دو فرکانسه از بیکن سه‌فرکانسه استفاده می‌شود. همچنین جفت سیگنال با کمترین فرکانس (VHF/UHF)،

ژئومغناطیسی فعال، تأثیرات میدان مغناطیسی زمین، ریزش ذرات پرانرژی شامل پروتون و الکترون و از سوی دیگر عدم امکان شتاب‌دهی ذرات با سرعت بالا توسط فرایندهای پیش‌لرزه‌ای، این محموله از اهمیت کمتری در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه برخوردار است. طیف‌سنج جرمی یونی و خنثی نیز برای تشخیص بی‌هنجاری ناشی از طوفان خورشیدی از بی‌هنجاری ناشی از زمین‌لرزه مؤثر است و به‌عنوان یک ابزار برای تصحیح خطا در ماهواره زلزله‌شناسی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

یونوسفر به‌عنوان یک محیط پراکنده عمل می‌کند و سیگنال‌های ارسالی از ماهواره به زمین و یا زمین به زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تأثیرات شامل نوسانات فاز و دامنه، جذب انرژی سیگنال، جابه‌جایی فرکانس، چرخش فارادی، تأخیر گروهی، پراکندگی و چند مسیری است که از هر یک از این پدیده‌ها می‌توان برای تعیین خواص یونوسفر استفاده کرد. بیکن‌های ماهواره‌ای اغلب از امواج VHF (۳۰ تا ۳۰۰ مگاهرتز) برای تعیین چگالی الکترون استفاده می‌کنند و از اندازه‌گیری چرخش فارادی و ثبت تأخیرهای فاز دیفرانسیل سیگنال‌ها برای این منظور استفاده می‌شود. هنگامی که امواج VHF از لایه F یونوسفر که پایدارترین و چگال‌ترین لایه است عبور می‌کنند دامنه‌شان به‌طور ناگهانی و شدید تغییر می‌کند. این نوسانات که به‌صورت کاهش و یا افزایش قدرت سیگنال و تغییرات سریع فاز ظاهر می‌شود سوسوزدن نامیده می‌شود. اندازه‌گیری سوسوزدن‌ها روشی کلیدی جهت شناسایی بی‌نظمی‌ها و ناهمگنی‌های کوچک‌مقیاس در چگالی الکترونی لایه F است. با توجه به اینکه لایه F، حدود ۸۰٪ محتوای الکترونی کل (TEC) را داراست و تغییرات TEC به‌عنوان یکی از پیش‌نشانگرهای یونوسفری زمین‌لرزه مطرح است لذا سوسوزدن‌های VHF ابزار تشخیصی ارزشمندی برای بررسی آشفتگی‌های یونوسفری محسوب می‌شود. در شرایط خاص مانند مناطق قطبی و استوایی و یا در زمان‌های ویژه مانند طوفان‌های ژئومغناطیسی اگر بی‌نظمی‌های لایه F بسیار شدید باشد امواج UHF نیز دچار اختلال (سوسوزدن دامنه و فاز) می‌شوند. اندازه‌گیری این

فرکانسی VHF، UHF و L که نسبت به سیگنال‌های دریافتی سنجنده‌ی نهفتگی رادیویی، فرکانس پایین‌تری دارند و بیشتر تحت تأثیر یونوسفر قرار دارند اندازه‌گیری دقیق‌تری از تغییرات TEC و ناپایداری یونوسفر را ارائه می‌دهد، لذا از این منظر محموله بیکن سه‌فرکانسه بر محموله نهفتگی رادیویی ارجحیت دارد.

در ادامه‌ی تحلیل محموله‌های پیش‌نشانگری فضاپایه‌ی زمین‌لرزه، اهمیت محموله‌ی اندازه‌گیری بی‌هنجاری دمایی استراتوسفر بررسی شد. بر اساس پژوهش معیری‌منش و همکاران (Moayeri-Manesh et al., 2024)، مکان‌یابی ناهنجاری‌های دما بر روی نقشه می‌تواند به درک منبع اصلی ناهنجاری‌های دمای استراتوسفر کمک کند. این روش می‌تواند برای تفکیک تغییرات دما ناشی از شرایط ژئومغناطیسی فعال همراه با تغییرات O3 از عرض‌های جغرافیایی بالاتر به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر به کار گرفته شود. در این پژوهش از داده‌های سنجنده‌ی SABER، به‌منظور بررسی و تحلیل زمین‌لرزه‌ی توهوکوی ژاپن و نیز شش زمین‌لرزه‌ی ایران استفاده شد. میانگین دمای استراتوسفر (Tmean) و حداکثر دمای استراتوسفر (Tmax) در مجاورت کانون زمین‌لرزه با امتداد ۱۰ درجه در جهت شمال-جنوب و شرق-غرب در اطراف مرکز استفاده گردید و بی‌هنجاری‌های بالاتر و زیر ۱/۵ برابر انحراف معیار در دوره یک ماهه مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه، مشاهده‌ی بی‌هنجاری در Tmean و Tmax یک هفته قبل از زمین‌لرزه بود. درحالی‌که پایش ناهنجاری‌های دمای استراتوسفر در تشخیص انحرافات مرتبط با فعالیت پیش‌لرزه‌ای امیدوارکننده است، منطقه و بزرگی زمین‌لرزه‌ها تأثیر اساسی دارند.

۴- مشخصات ماهواره بومی انتخابی

در این بخش، مشخصات ماهواره‌ی بومی که مأموریت مطالعه‌ی پیش‌نشانگری زمین‌لرزه برای آن تعریف شده معرفی می‌گردد تا در نهایت با توجه به بودجه‌ی جرم، توان، نحوه‌ی پایدارسازی و سیستم کنترل وضعیت آن، محموله‌های مناسب پیش‌نشانگری زمین‌لرزه برای آن پیشنهاد شود. این ماهواره از

بیشترین وضوح اندازه‌گیری TEC را ایجاد می‌کنند اما به‌شدت به نویز حساس هستند و لذا به‌منظور ایجاد مصالحه بین وضوح و پایداری از سه باند فرکانسی VHF، UHF و L استفاده می‌شود.

علاوه بر روش مبتنی بر امواج VHF/UHF، سیستم GPS هم برای مطالعه‌ی یونوسفر به کار رفته است. گیرنده‌های زمینی یا فضایی، سیگنال‌های GPS در دو باند L1 (۱/۵۷ گیگاهرتز) و L2 (۱/۲۵۲ گیگاهرتز) را دریافت کرده و از آنها برای محاسبه TEC و استخراج پارامترهای یونوسفر استفاده می‌کنند. مزیت استفاده از باند VHF/ UHF، برخلاف باندهای GPS، در ماهواره‌های LEO^۳ و GEO این است که سیگنال‌های با فرکانس پایین‌تر بیشتر تحت تأثیر یونوسفر قرار می‌گیرند و اندازه‌گیری دقیق‌تری از تغییرات TEC و ناپایداری یونوسفر ارائه می‌دهند. از سوی دیگر، اندازه‌گیری TEC با گیرنده‌های GPS زمینی علاوه بر یونوسفر حاوی TEC پلاسماسفر است که می‌تواند تا ۵۰ درصد TEC کل، به‌ویژه در شب را تشکیل دهد. درحالی‌که اندازه‌گیری انجام شده توسط محموله بیکن سه‌فرکانسه در ماهواره‌های LEO عمدتاً به یونوسفر محدود می‌شود و از تأثیر پلاسماسفر مصون است. انحراف سیگنال‌های رادیویی در باند UHF بی‌نظمی‌های یونوسفر را نشان می‌دهد (اثر فرنل) درحالی‌که این موضوع برای سیگنال‌های باند GPS کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

سنجنده نهفتگی رادیویی، محموله‌ای است که سیگنال‌های ارسالی از سوی ماهواره‌های ناوبری مانند GPS را دریافت کرده و با پردازش آنها، نقشه‌ها و پروفیل‌های سه‌بعدی از TEC و چگالی الکترون لایه‌های بالایی یونوسفر و پلاسماسفر را استخراج می‌کند. بر اساس پژوهش‌های اخیر، داده‌های این سنجنده تأثیر کمتری را از فعالیت‌های لرزه‌ای زمین می‌پذیرند. همچنین، برای آشکارسازی دقیق چگالی الکترونی لایه‌های پایین‌تر یونوسفر با استفاده از این روش، به جمع‌آوری داده‌های چندساله و در نظر گرفتن چرخه‌ی فعالیت خورشیدی نیاز است تا بتوان بی‌هنجاری‌های محلی را با اطمینان تشخیص داد. محموله‌ی بیکن سه‌فرکانسه با ارسال سیگنال‌هایی در باند

چندین زیرسیستم و یک بخش محموله تشکیل شده است که زیرسیستم‌های آن شامل توان، سازه، مخابرات، نرم‌افزار، کامپیوتر روی برد، کنترل حرارت، کنترل وضعیت و ساخت است. ماهواره‌ی انتخابی یک ماهواره‌ی کوچک به شکل مکعب مستطیل با ابعاد سازه‌ی ۶۵ در ۶۵ در ۷۰ سانتی‌متر است که چهار پانل خورشیدی بر روی دیواره‌های جانبی آن نصب می‌شوند و به همراه باتری‌ها توان متوسط ۵۲ وات و توان لحظه‌ای ۱۸۰ وات را برای ماهواره فراهم می‌سازند.

سازه‌ی اصلی ماهواره متشکل از سه صفحه‌ی آلومینیومی صلب افقی است که تجهیزات و محموله‌ها بر روی آن نصب می‌شوند. زیرسیستم کنترل وضعیت، مجهز به سخت‌افزار کنترل فعال (سیم‌پیچ‌های مغناطیسی) و سخت‌افزار کنترل غیرفعال (بوم گرادیان جاذبه) است. بوم گرادیان جاذبه در بخش فوقانی ماهواره نصب می‌شود. زیرسیستم توان نیز شامل سلول‌های خورشیدی، باتری‌ها و واحد توزیع و تنظیم توان است که توان ماهواره را تأمین می‌نماید. باتری‌ها، به صورت دو بسته بر روی صفحه‌ی میانی و در دو طرف بدنه‌ی بوم گرادیان قرار گرفته‌اند. جعبه‌ی الکترونیکی و ماژول‌های مخابراتی در بخش پایینی سازه قرار گرفته‌اند. در مدل این ماهواره، صفحه‌ی فوقانی سازه رو به سمت‌الرأس بوده و صفحه‌ی زیرین آن به‌سوی زمین یا سمت‌القدم می‌باشد. ماهواره در یک مدار دایروی با ارتفاع مداری ۱۰۰۰ کیلومتر و شیب مداری ۹۷ درجه قرار می‌گیرد. جرم ماهواره کمتر از ۱۱۰ کیلوگرم است. جرم محموله باید کمتر از ۶ کیلوگرم و توان مصرفی متوسط آن نیز باید کمتر از ۳۰ وات باشد.

۵- تعیین مؤثرترین روش‌های پیش‌نشانگری زمین‌لرزه در ایران

با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص و شرایط اقلیم فضایی ایران، مؤثرترین روش‌های پیشنهادی برای پایش پیش‌نشانگرهای فضاپایه‌ی زمین‌لرزه در ایران عبارتند از: ۱- اندازه‌گیری تغییرات دمای استراتوسفر به همراه پایش تغییرات چگالی ازن در لایه‌ی

استراتوسفر، ۲- پایش سیگنال‌های الکترومغناطیسی در باند ULF، ۳- توموگرافی یونوسفری با سیگنال‌های رادیویی شامل ارسال سیگنال‌های رادیویی از ماهواره به زمین در چند باند فرکانسی (VHF، UHF و باند L)، دریافت این سیگنال‌ها توسط آرایه‌ای از گیرنده‌های زمینی مستقر در مناطق نزدیک به گسل‌ها، و تعیین تغییرات چگالی الکترونی در لایه یونوسفر و یا آشکارسازی اعوجاج‌های ایجاد شده در سیگنال‌های عبوری از ناحیه‌ی مورد مطالعه و ۴- پایش سیگنال‌های VLF ارسالی از فرستنده‌های زمینی توسط ماهواره که شامل استفاده از فرستنده‌های زمینی در باند VLF، نصب گیرنده‌ی اختصاصی بر روی ماهواره برای دریافت سیگنال‌ها پس از عبور از لایه‌های یونوسفر و بررسی تغییرات در مشخصات آن‌ها است. این روش‌ها با بهره‌گیری از قابلیت‌های منحصربه‌فرد مشاهده‌ی فضاپایه به‌عنوان ابزارهایی سودمند در پایش پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه در کشور حائز اهمیت هستند.

با توجه به اینکه توضیحات کافی راجع به سه روش پیشنهادی اول در بخش‌های قبل آمده است، در این بخش به تشریح روش پیشنهادی چهارم پرداخته شده است. در این روش، سیگنال VLF در باند فرکانسی ۱۰ کیلوهرتز تا ۳۰ کیلوهرتز توسط فرستنده‌های زمینی ارسال شده و توسط گیرنده‌ی نصب شده روی ماهواره دریافت می‌شود. با توجه به وجود فرستنده‌های مخابراتی VLF در منطقه جغرافیایی اطراف ایران شامل کشورهایمانند ترکیه، روسیه، هندوستان و غیره این روش به‌عنوان یک روش ارزان و مطمئن برای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه محسوب می‌شود.

انتشار امواج الکترومغناطیس در این باند فرکانسی با تلفات بسیار کم همراه است و در مسافت چند هزار کیلومتری صورت می‌گیرد. این امواج از لایه‌ی پایین یونوسفر پایین در محدوده‌ی ۷۰ تا ۱۲۰ کیلومتری منعکس می‌شوند، لذا هرگونه بی‌هنجاری یونوسفری شامل فرآیندهای پیش‌لرزه‌ای می‌تواند بر خواص انتشاری این امواج شامل دامنه و فاز تأثیرگذار باشد. در این روش لازم است که رفتار سیگنال ابتدا در یک بازه‌ی زمانی بلند

سابقه‌ی فضای فضایی هستند که با کاهش ریسک خرابی، قابلیت اطمینان مأموریت را افزایش داده و احتمال استقرار موفقیت‌آمیز در مدار هدف و عملکرد پایدار پس از پرتاب را به‌طور معناداری بهبود می‌دهند.

یادآور می‌شود که پیشرفته‌ترین ماهواره‌ی زلزله‌شناسی فعلی جهان، ماهواره چینی CSSES-1 دارای مشخصات جرم ۷۳۰ کیلوگرم، توان متوسط ۹۰۰ وات، شکل مکعبی به ضلع ۱/۴ متر و سیستم کنترل وضعیت سه‌محوره با عملگر چرخ واکنشی است.

ماهواره Demeter هم که از نظر ابعاد، جرم و توان از این ماهواره کوچک‌تر بود مجهز به سیستم کنترل وضعیت سه‌محوره و عملگر چرخ واکنشی بود، درحالی که ماهواره بومی موجود از بوم‌گردیان جاذبه برای پایدارسازی استفاده می‌کند که اختلاف فاحشی در نوع عملگرهای کنترل وضعیت این دو وجود دارد.

انتخاب محموله، یک فرآیند چند رشته‌ای و رفت و بازگشتی است که در آن سازگاری فنی بین محموله و سایر زیرسیستم‌های ماهواره به‌دقت ارزیابی می‌شود. این فرآیند با تعریف الزامات مأموریت آغاز شده و بر اساس آن، محموله و پارامترهای کلیدی آن تعیین می‌گردد. سپس تحلیل هم‌خوانی بین این پارامترها و قابلیت‌های زیرسیستم‌ها انجام می‌شود. بسته به محل نصب محموله و چگونگی جهت‌گیری آن، مدار ماهواره و قابلیت‌های زیرسیستم سازه و ساخت، زیرسیستم توان، محل نصب پنل‌های خورشیدی را مشخص ساخته و با در نظر گرفتن نوع سلول‌های خورشیدی انتخابی و مدار ماهواره و از طریق محاسبه و شبیه‌سازی، کل توان قابل تحویل به ماهواره را مشخص می‌کند. این توان به نحو مناسب بین زیرسیستم‌های مختلف و بخش محموله تقسیم می‌شود. نکته‌ی حائز اهمیت اینکه سایه‌اندازی محموله روی پنل‌های خورشیدی موجب کاهش توان قابل تحویل زیرسیستم توان می‌گردد و باید از آن پرهیز شود و یا در محاسبات لحاظ گردد.

پرتابگر در نظر گرفته شده برای پرتاب ماهواره و بودجه‌ی

مدت به‌عنوان رفتار زمینه، جهت آشکارسازی بی‌هنجاری‌های پیش‌لرزه مورد بررسی قرار گیرد. برای دریافت سیگنال توسط ماهواره هم می‌توان از سنجنده‌ی مغناطیس‌سنج سیم‌پیچ جستجوگر در باند VLF استفاده کرد. این سنجنده، چگالی طیفی توان سیگنال‌های رادیویی VLF ای را که از فرستنده‌های زمینی ارسال می‌شود ثبت می‌کند.

به دلیل برهم‌کنش سیگنال‌های رادیویی VLF با ذرات یونوسفر، گسترش طیفی رخ می‌دهد، به این معنا که شدت طیفی توان نه تنها در یک باند فرکانسی، بلکه در باندهای فرکانسی نزدیک به آن نیز افزایش می‌یابد (Inan & Bell, 1985; Molchanov et al., 2006; Rozhnoi et al., 2008; Rozhnoi et al., 2012). گسترش طیفی عمدتاً به قدرت فرستنده و موقعیت نقطه‌ی دریافت وابسته است که قدرت فرستنده مهم‌ترین نقش را دارد (Molchanov et al., 2006). این روش در کنار گیرنده‌های زمین‌پایه‌ی باند VLF موجود در کشور روشی سودمند در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه است. جزئیات بیشتر از نحوه‌ی بررسی پیش‌نشانگرها با به کارگیری فرستنده‌های VLF زمینی در پژوهش‌های صورت گرفته توسط محمودیان و همکاران ارائه شده است (Mahmoudian et al., 2022a; Mahmoudian et al., 2022b).

۶- انتخاب محموله‌ی پیش‌نشانگری مناسب برای یک ماهواره بومی

هدف نهایی پژوهش حاضر، انتخاب محموله‌ی مناسب برای مطالعه‌ی پیش‌نشانگری زمین‌لرزه توسط یک ماهواره بومی موجود بوده است. ماهواره بومی موجود دارای مشخصات حداکثر جرم ۱۱۰ کیلوگرم، توان متوسط ۵۲ وات، ابعاد ۶۵×۶۵×۷۰ سانتی‌متر و بوم‌گردیان جاذبه برای پایدارسازی است. علت انتخاب این سکوی بومی برای مأموریت زلزله‌شناسی، عدم به کارگیری عملگرهای پیچیده‌ی کنترلی و کاهش هزینه‌های ساخت و پرتاب ماهواره بوده است. همچنین بسیاری از زیرسیستم‌ها یا مؤلفه‌های کلیدی این سکو دارای

اختلاف فاحش عملگرها، محدودیت‌های خاصی به محموله اعمال می‌شود. به عنوان مثال در صورتی که محموله نیاز به جهت گیری دقیق داشته باشد سیستم پایدارساز بوم گرادیان جاذبه به دلیل نوسان ممکن است قادر به فراهم آوردن شرایط لازم برای محموله نباشد. در نهایت پس از تعامل بخش محموله با زیرسیستم‌های مختلف و با رفت و برگشت‌های متعدد، امکان استفاده از محموله‌ی پیشنهادی مشخص می‌شود. بسته به میزان عدم تطابق، بازنگری در طراحی محموله صورت گرفته و یا نیاز است توسط محموله‌ی دیگری جایگزین شود. فرآیند فوق درباره‌ی محموله‌های مرتبط با هر یک از چهار روش پیشنهادی در بخش ۵ انجام شد که در ادامه به بیان نتایج آن پرداخته و دلایل رد یا انتخاب هر محموله بیان شده است.

به منظور اندازه گیری تغییرات دمای استراتوسفر و چگالی ازن به محموله‌ای مشابه SABER نیاز است. بررسی مشخصات این محموله (بخش ۲-۹) نشان می‌دهد که امکان استفاده از این محموله در سکوی بومی نیست زیرا این محموله از نظر ابعادی برای این سکو بزرگ است، توان مصرفی آن بیش از کل توان مصرفی ماهواره است، جرم آن چندین برابر جرم مجاز محموله است، ضمن اینکه از نظر تکنولوژی ساخت هم پیچیده است.

به منظور پایش تشعشعات ULF به سنجنده‌ی آشکارساز میدان الکتریکی و نیز سنجنده‌ی مغناطیس سنج سیم پیچ جستجوگر نیاز است. سنجنده‌ی آشکارساز میدان الکتریکی نیاز به چهار بوم بلند دارد. با توجه به اینکه در سکوی بومی، نقش پایدارسازی بر عهده بوم گرادیان جاذبه است، بررسی‌ها (محاسبه‌ی ممان اینرسی، بررسی جنس و مکانیسم باز شدن بوم‌ها، بررسی تکنولوژی ساخت، بررسی گشتاورهای وارده، نحوه‌ی استقرار در مدار و...) نشان داد که بوم‌های سنجنده‌ی میدان الکتریکی با عملگر بوم کنترل وضعیت ماهواره همخوانی نداشته و عملکرد آن را مختل می‌سازند؛ بنابراین امکان استفاده از این سنجنده در سکوی فعلی نیست. این سنجنده نیاز به سیستم کنترل وضعیت سه محوره‌ی فعال با محوریت چرخ‌های عکس‌العملی دارد. لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از بوم

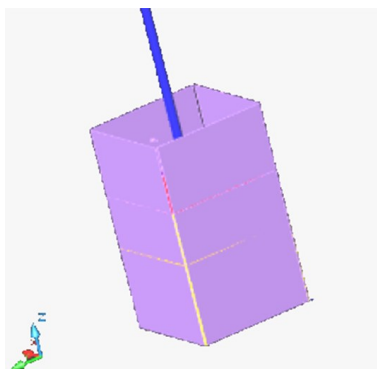
مالی اختصاص داده شده برای پرتاب، در جرم ماهواره و به تبع آن حداکثر جرم محموله به طور مستقیم محدودیت اعمال می‌کند. ضمن اینکه حاشیه‌ی ۱۰ تا ۱۵ درصدی هم در تحلیل جرمی باید در نظر گرفته شود. زیرسیستم کنترل حرارت بسته به نوع محموله، اجزاء و محل نصب آنها و نیز سایر زیرسیستم‌های ماهواره، باید تحلیل حرارتی را در چرخه‌های روز و شب مداری انجام داده و اثرات تشعشی را مدل‌سازی کند تا در نهایت با روش‌های فعال و غیرفعال بتواند دمای همه‌ی اجزای ماهواره از جمله محموله را در کلیه‌ی مراحل مأموریت در محدوده‌ی مجاز نگه دارد. بسته به محل نصب محموله و محدوده‌ی دمایی مورد نیاز آن برای کارکرد صحیح، راه‌حل‌های زیرسیستم حرارت برای کنترل دما ممکن است متفاوت باشد.

بسته به مودهای کاری محموله، حجم داده‌ی تولیدی توسط محموله و نرخ انتقال داده‌ی مورد نیاز آن، زیرسیستم مخابرات ماهواره باید بستر لازم برای انتقال داده‌ی محموله به ایستگاه‌های زمینی را مهیا سازد. در صورت عدم هم‌خوانی بین قابلیت‌های بخش مخابرات و نیازمندی محموله، ممکن است تصمیم گرفته شود که بخشی از پردازش داده در ماهواره انجام شود تا حجم داده‌ی ارسالی به زمین کاهش یابد. این تصمیم از سوی دیگر نیازمند بررسی سخت‌افزار، توان پردازشی و توان مصرفی مورد نیاز و نیز تعیین استراتژی پردازش (متمرکز یا پراکنده) است که در تعامل بین بخش محموله، زیرسیستم مخابرات، زیرسیستم نرم‌افزار و کامپیوتر روی برد باید مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. حجم محموله، جرم محموله، محل نصب و اجزای مورد نیاز آن (به عنوان مثال بوم) باید توسط زیرسیستم سازه، کنترل وضعیت و ساخت مورد بررسی قرار گیرد. به ویژه در مورد بوم، محاسبه‌ی ممان اینرسی، بررسی انواع گشتاورهای وارده در کلیه‌ی فازهای پرتاب تا استقرار در مدار، مکانیسم باز شدن بوم، جنس بوم، تکنولوژی ساخت آن و اثرات آن در کارکرد صحیح محموله (از نظر نویز) باید مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. بسته به سیستم کنترل وضعیت ماهواره که از نوع سه محوره با عملگر چرخ واکنشی و یا از نوع بوم گرادیان جاذبه باشد، با توجه به

۴۰۰/۰۳۲ و ۱۰۶۶/۷۵۲ مگاهرتز. نیاز است این سه فرکانس پایداری بالا (10^{-12}) و همدوسی فاز خوبی داشته باشند و دقت فاز نسبی بیکن‌ها کمتر از ۱ درجه باشد. برای ایجاد این سه فرکانس می‌توان از یک اسیلاتور کریستالی پایدار شده با فرکانس ۱۶/۶۶۸ مگاهرتز استفاده کرد. مجموعه‌ی دیگری از فرکانس‌ها (۱۴۹/۹۸۸، ۳۹۹/۹۶۸ و ۱۰۶۶/۵۸۱۳۳ مگاهرتز) را می‌توان به زیرسیستم مخابرات ماهواره اختصاص داد تا در تله‌متری، تله‌کامند و انتقال داده، مورد استفاده قرار دهد. آنتن فرستنده‌ی پیشنهادی هم دوقطبیده متقاطع با بازتابنده، با قطبش دایروی راست‌گرد و با توان ۱۸ وات است. بوم آنتن در جهت سمت القدم از ماهواره قرار می‌گیرد.

برای بازسازی سه‌بعدی چگالی الکترون یونوسفر به حداقل چهار گیرنده‌ی زمینی نیاز است که به‌صورت بهینه در یک آرایه‌ی مثلثی یا شبکه‌ی شطرنجی چیده شده باشند. هر چه تعداد گیرنده‌ها بیشتر و توزیع آنها بهینه باشد تراکم مسیرهای اندازه‌گیری TEC بیشتر و خطای بازسازی کمتر می‌شود. هر چه تنوع زوایای ورودی سیگنال‌ها (هم در سمت و هم در ارتفاع) بیشتر باشد وضوح عمودی توموگرافی افزایش خواهد یافت.

با توجه به ارتفاع مداری ماهواره (۱۰۰۰ کیلومتر) و مساحت ایران به ۳۰ تا ۳۵ گیرنده‌ی زمینی با فاصله‌ی ۱۵۰ تا ۱۷۰ کیلومتر برای پوشش کل ایران نیاز است. البته در صورت استفاده از حداقل ۲۵ گیرنده می‌توان به دقت حدود ۸۵ درصد در بازسازی توموگرافی رسید. شکل (۳) نمای بیرونی از مدل ماهواره مورد نظر با بوم باز شده و شکل (۴) نیز اجزای اصلی ماهواره را نشان می‌دهد.



شکل (۳): مدل ماهواره مکعب مستطیلی با بوم باز شده.

گرادیان جاذبه برای پایداری‌سازی، حرکت ماهواره با نوسان با زاویه $\pm 10^\circ$ همراه است. همین امر استفاده از محموله‌هایی که نیاز به جهت‌گیری دقیق دارند را با چالش روبرو می‌سازد.

سنجنده‌ی مغناطیس‌سنج سیم‌پیچ جستجوگر نیز نیاز به یک بوم بلند دارد. تنها روش به کارگیری آن در سکوی موجود این است که به‌عنوان جرم نوک بوم به نحوی با بوم گرادیان جاذبه تلفیق شود و از این بوم هم برای پایداری‌سازی ماهواره و هم به‌عنوان بوم نگهدارنده‌ی سنجنده استفاده شود. امکان این یکپارچه‌سازی تنها برای بوم‌های کامپوزیتی غیررسانا وجود دارد، حال آنکه بوم گرادیان جاذبه‌ی سکوی موجود از جنس مس-برلیوم است که رسانایی بالایی دارد و با ایجاد نویز، در کارکرد صحیح سنجنده‌ی مغناطیس‌سنج که حساسیت بالایی دارد اختلال ایجاد می‌کند (سنجنده‌ی مغناطیسی باید به اندازه کافی از مواد رسانا دور باشد)، لذا به کارگیری عملی این سنجنده در سکوی فعلی امکان‌پذیر نیست.

روش مؤثر دیگر در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه، توموگرافی یونوسفر با ارسال سیگنال با باندهای فرکانسی مختلف از ماهواره و دریافت آن توسط ایستگاه‌های زمینی است که برای این منظور از محموله‌ی بیکن سه‌فرکانسه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه زیرسیستم مخابرات سکوی بومی دارای زیرساخت فرستنده/گیرنده در باند VHF و UHF است (که از آن به‌منظور تله‌متری، تله‌کامند و ارسال داده به ایستگاه‌های زمینی استفاده می‌کند) پیشنهاد می‌شود که از آن برای ارسال سیگنال‌های VHF و UHF بیکن نیز استفاده شود. با این اقدام در تعداد آنتن‌ها و مصرف توان نیز صرفه‌جویی می‌گردد.

لازم به ذکر است که سیگنال‌های بیکن صرفاً حامل هستند و داده‌ای روی آنها انتقال داده نمی‌شود و لذا نیاز به مدلاسیون ندارند. صرفاً توان فرستنده باید به اندازه‌ای باشد که دامنه سیگنال دریافتی در گیرنده‌های زمینی مختلف قابل قبول باشد تا بتوان فاز و دامنه‌ی این بیکن‌ها را پس از دریافت پردازش نمود و توموگرافی چگالی الکترون را بازسازی کرد.

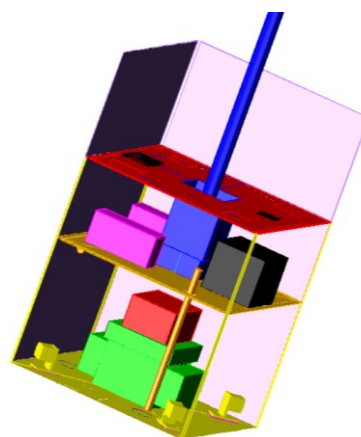
سه فرکانس پیشنهادی برای بیکن عبارتند از ۱۵۰/۰۱۲،

ماهواره‌ی بومی برای انتقال داده‌های ایستگاه‌های لرزه‌نگاری زمینی جدیدالتأسیس به ایستگاه مرکزی استفاده شود. کلیات و ملاحظات طراحی محموله‌ی پیشنهادی نیز بیان گردید. در نهایت لازم به ذکر است که با توجه به پیچیده بودن پدیده‌ی زمین‌لرزه و چند پارامتری بودن آن، پیش‌نشانگری صرفاً با یک محموله کافی نیست بلکه نیاز به محموله‌های مختلف برای جمع‌آوری داده است و با هم‌افزایی داده‌های جمع‌آوری‌شده‌ی فضاپایه و داده‌های ایستگاه‌های زمینی است که قابلیت پیش‌بینی صحیح افزایش می‌یابد.

References

مراجع

- Cao, J., Shen, X., Zhang, T., Zeren, Z., Huang, J., Li, Z., ... & Li, L. (2018). The electromagnetic wave experiment for CSES mission: Search coil magnetometer. *Science China Technological Sciences*, 61(5), 653-658.
- Chen, L., Wang, Y., Zhao, S., Wang, Q., Huang, J., Zhang, Z., ... & Cao, J. (2018). Preliminary observation results of the Coherent Beacon System onboard the China Seismo-Electromagnetic Satellite-1. *Earth and Planetary Physics*, 2(6), 505-514.
- Fraser-Smith, A. C., Bernardi, A., McGill, P. R., Ladd, M. E., Helliwell, R. A., & Villard, O. G., Jr. (1990). Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophysical Research Letters*, 17(9), 1465-1468.
- Hayakawa, M. (2007). Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. *Sensors*, 7(7), 1108-1122.
- Hayakawa, M. (2010). Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(2), 115-155.
- Huang, J., Lei, J., Li, S., Zeren, Z., Li, C., Zhu, X., & Yu, W. (2018). The Electric Field Detector (EFD) onboard the ZH-1 satellite and first observational results. *Earth and Planetary Physics*, 2(6), 469-478.
- Inan, U. S., & Bell, T. F. (1985). Spectral broadening of VLF transmitter signals observed on DE 1: A quasi-electrostatic phenomenon? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 90, 1771-1775.



شکل (۴): مدل اجزای داخلی ماهواره شامل محموله فرستنده بیکن (جعبه قرمز رنگ)، ماژول‌های مخابراتی و جعبه الکترونیکی در طبقه تحناتی ماهواره و بوم گرا دیان جاذبه و باتری‌ها در طبقه فوقانی ماهواره.

قابلیت دیگر سکوی بومی، توانایی ذخیره و ارسال داده در باند UHF است. در پی بررسی‌های صورت گرفته، ایستگاه‌های زمین‌پایه‌ی لرزه‌نگاری موجود از دو روش لینک مخابراتی و GPRS^{۲۴} برای ارسال داده‌ی سنجنده‌های زمینی به ایستگاه مرکزی استان‌ها استفاده می‌کنند که روش ارسال GPRS با مشکل قطعی ارتباط همراه است. لذا پیشنهاد دیگر، استفاده از این ظرفیت سکوی بومی جهت انتقال داده‌های جمع‌آوری شده‌ی ایستگاه‌های زمینی لرزه‌نگاری جدیدالتأسیس (که در مناطق صعب‌العبور قرار دارند و امکانات مخابراتی زمینی برای انتقال داده‌های آنها نیست) به ایستگاه مرکزی است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مهم‌ترین محموله‌های فضاپایه برای مطالعات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و مؤثرترین روش‌های پیش‌نشانگری زمین‌لرزه در ایران پیشنهاد شد. برای یک ماهواره بومی موجود با توجه به بودجه‌ی جرم، توان و سیستم کنترل وضعیت آن، محموله‌ی بیکن سه‌فرکانسه به‌عنوان یک محموله‌ی مناسب پیشنهاد گردید. تطبیق و سازگار نمودن محموله‌های مختلف پیش‌نشانگری با سکوی موجود چالش‌های متعددی داشت که در مقاله حاضر به آن پرداخته شد. همچنین پیشنهاد شد از قابلیت ذخیره و ارسال داده‌ی سکوی

Earthquake Forecasting: Learning from Nature. Amsterdam: Elsevier.

Remsberg, E. E., Marshall, B. T., Garcia-Comas, M., Krueger, D., Lingenfelter, G. S., Martin-Torres, F. J., Mlynczak, M. G., Russell, J. M., Smith, A. K., & Zhao, Y. (2008). Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D17), D17101.

Rozhnoi, A., Solovieva, M., Molchanov, O., Akentieva, O., Berthelier, J. J., Parrot, M., & Hayakawa, M. (2008). Statistical correlation of spectral broadening in VLF transmitter signal and low-frequency ionospheric turbulence from observation on DEMETER satellite. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(6), 1105-1111.

Rozhnoi, A., Solovieva, M., Parrot, M., Hayakawa, M., Biagi, P. F., & Schwingenschuh, K. (2012). Ionospheric turbulence from ground-based and satellite VLF/LF transmitter signal observations for the Simushir earthquake (November 15, 2006). *Annals of Geophysics*, 55(1), 83-91.

Shen, X. H., Zong, Q.-G., & Zhang, X. M. (2018a). Introduction to special section on the China Seismo-Electromagnetic Satellite and initial results. *Earth and Planetary Physics*, 2(6), 439-443.

Shen, X. H. (2018b). The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission. *Science China Technological Sciences*, 61, 634-642.

Surkov, V. V., & Hayakawa, M. (2014). *Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*. Tokyo: Springer.

Wang, Q., Cao, J. B., Fu, H. S., Dunlop, M., Zhou, G. C., & Wang, Z. Q. (2018). China Seismo-Electromagnetic Satellite search coil magnetometer data and initial results. *Earth and Planetary Physics*, 2(6), 462-468.

Yang, B.-Y., Li, Z., Huang, J.-P., Yang, X.-M., Yin, H.-C., Li, Z.-Y., Lu, H.-X., Li, W.-J., Shen, X.-H., & Zeren, Z. (2023). EMD based statistical analysis of nighttime pre-earthquake ULF electric field disturbances observed by CSES. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, Article 1077592.

Yang, S.-S., Asano, T., & Hayakawa, M. (2019).

Kopytenko, Y. A., Matiashvili, T. G., Voronov, P. M., Kopytenko, E. A., Molchanov, O. A., & Hayakawa, M. (1993). Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 77(1-2), 85-95.

Mahmoudian, A., Safari, M., & Rezapour, M. (2022a). Earthquake prediction assessment using VLF radio signal sounding and space-based ULF emission observation. *Acta Geophysica*, 70, 1269-1284.

Mahmoudian, A., Fallahrad M., & Montahaei M. (2022b). Study of VLF radio sounding for the Ionospheric remote sensing. *Iranian Journal of Geophysics*, 15, 139-152.

Moayeri-Manesh, F. Mahmoudian, A., & Rahimi, H. (2024). Detection of the Pre-seismic anomalies in stratospheric temperature and radio emission using space-based observations. *Advances in Space Research*, 73(10), 5114-5133.

Molchanov, O., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Akentieva, O., Berthelier, J. J., Parrot, M., & Hayakawa, M. (2006). Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(5), 745-753.

Pulinets, S. A., Legen'ka, A. D., & Alekseev, V. A. (1994). Pre-earthquake ionospheric effects and their possible mechanisms. In H. Kikuchi (Ed.), *Dusty and dirty plasmas, noise, and chaos in space and in the laboratory*, 545-557, Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1829-7_46

Pulinets, S. A., & Boyarchuk, K. A. (2004). *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin, Springer, 315 p.

Pulinets, S., Ouzounov, D., Karelin, A., Boyarchuk, K., & Pokhmelnikh, L. (2006). The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(4-9), 143-153.

Pulinets, S., & Ouzounov, D. (2011). Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (LAIC) model-A unified concept for earthquake precursor validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 371-382.

Pulinets, S., & Ouzounov, D. (2018). *The Possibility of*

High-Energy Particle Package (HEPP)	۱۳- بسته ذرات پرنرژی
High-Energy Particle Detector (HEPD)	۱۴- آشکارساز ذرات پرنرژی
GNSS Occultation Receiver (GNSS-RO)	۱۵- نهفتگی رادیویی سیستم ناوبری جهانی ماهواره
BeiDou Navigation Satellite System (BD)	۱۶- سامانه ناوبری ماهواره‌ای بیدو
Global Positioning System (GPS)	۱۷- سامانه ناوبری ماهواره‌ای جی‌پی‌اس
Tri-Band Beacon (TBB)	۱۸- بیکن سه فرکانسه
Total Electron Content (TEC)	۱۹- محتوای الکترون کل
Flux Gate	۲۰- مغناطیس سنج شاریاب
Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER)	۲۱- رادیومتری گسیل پهن‌باند برای مطالعه جو
Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS)	۲۲- طیف سنج جرمی یون‌ها و ذرات خنثی
Low Earth Orbit (LEO)	۲۳- مدار پایین زمین
General Packet Radio Service (GPRS)	۲۴- سرویس بسته‌های رادیویی عمومی

Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(2), 1410-1425.

Yang, S.-S., & Hayakawa, M. (2020). Gravity wave activity in the stratosphere before the 2011 Tohoku earthquake as the mechanism of lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling. *Entropy*, 22(1), 110.

Yang, D., Zhima, Z., Wang, Q., Huang, J., Wang, X., Zhang, Z., Zhao, S., Guo, F., Cheng, W., Lu, H., ... & Cao, J. (2022). Stability validation on the VLF waveform data of the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Earth and Planetary Physics*, 6(5), 455-464.

Zhima, Z., Zhou, B., Zhao, S., Wang, Q., Huang, J., Zeng, L., Lei, J., Chen, Y., Li, C., Yang, D., ... & Cao, J. (2022). Cross-calibration on the electromagnetic field detection payloads of the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Science China Technological Sciences*, 65(6), 1415-1426.

واژه‌نامه

Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC)	۱- جفت‌شدگی لیتوسفر، اتمسفر و یونسفر
Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere Coupling (LAIMC)	۲- جفت‌شدگی لیتوسفر، اتمسفر، یونسفر، مگنتوسفر
China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES)	۳- ماهواره‌ی لرزه‌ای-الکترومغناطیسی چین
Ultra-Low Frequency (ULF)	۴- فرکانس فوق‌العاده پایین
Extremely Low Frequency (ELF)	۵- فرکانس بسیار پایین
Very Low Frequency (VLF)	۶- فرکانس خیلی پایین
High Frequency (HF)	۷- فرکانس بالا
High Precision Magnetometer (HPM)	۸- مغناطیس سنج با دقت بالا
Search Coil Magnetometer (SCM)	۹- مغناطیس سنج سیم‌پیچ جستجوگر
Electric Field Detector (EFD)	۱۰- آشکارساز میدان الکتریکی
Plasma Analyzer Package (PAP)	۱۱- کاوشگر تحلیلگر پلاسما
Langmuir Probe (LAP)	۱۲- کاوشگر لانگمویر

Investigation of Space-Based Payloads for studying Earthquake Precursors and Payload Suggestion for a Domestic Satellite

Esmat Kishani Farahani^{1*}, Azar Anvari² and Alireza Mahmoudian³

1. Assistant Professor, Institute of Electrical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: e.kishani@irost.ir
2. Lecturer, Institute of Mechanical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Satellite observations indicate a correlation between anomalies observed in the ionosphere and stratosphere and the occurrence of earthquakes. These anomalies include changes in electric and magnetic field components, variations in electron density, ions, ionic compositions, and their temperatures in the ionosphere, as well as changes in stratospheric temperature. This article investigates these space-based precursors and the payloads used to measure these anomalies. For each payload, its components, operation method, mass, power budget, and installation considerations are described. Additionally, analysis results of several earthquakes in Iran and recent global earthquakes using data from these payloads have been examined.

The study of these payloads shows that the electric field detector instrument in the ULF range is one of the best for earthquake precursor detection. A double standard deviation index was considered for identifying anomalies in several earthquakes in Iran, and ULF signal amplification was observed during satellite passage over the earthquake epicenters for earthquakes larger than 5.8. Several earthquakes in Iran were also analyzed using data from the TIMED satellite's 10-channel radiometer payload, with a 1.5 standard deviation index considered for identifying anomalies. Examination of average and maximum temperatures over a one-month period showed that anomalies were observable one week before the earthquake occurrence, and for strong earthquakes above magnitude 7, a clear anomaly effect in this parameter was observed 14 to 16 days before the earthquake.

Finally, after various assessments, the electric field detector payload in the ULF range, the search coil magnetometer, the tri-band beacon, and the 10-channel radiometer payload measuring stratospheric temperature were introduced as suitable payloads for earthquake precursor detection in Iran. A native platform was considered, and its subsystems were introduced. Given the mass budget, power, and stabilization and attitude control system of this native satellite, the tri-band beacon was proposed as the final payload for this platform, and its specifications were stated. It is worth noting that the electric field detector payload requires four booms longer than four meters, making it impossible to use on a platform using a gravity gradient boom for stabilization. The search coil magnetometer also requires one boom. In the native platform, due to the gravity gradient boom, using the search coil magnetometer was not possible unless used as a boom tip mass, which is feasible in composite booms but not applicable to this platform. The 10-channel radiometer also required high power and mass, which was not possible given the native platform requirements. Therefore, the tri-band beacon was ultimately specified as the satellite's final payload. This payload transmits three in-phase signals in VHF, UHF, and L-band. These signals undergo Faraday rotation and group delay while passing through the ionosphere. On Earth, these signals are received by a chain of receivers, their phase differences are processed, and based on that, a vertical profile or two-dimensional image of ionospheric electron density can be extracted. The use of the satellite's store and forward capacity for transferring data from new ground-based seismological stations was also proposed.

Keywords: Satellite, Precursor Detection, Earthquake, Payload, Ionosphere, Electromagnetic Disturbances, Stratosphere.