



## Formation of artificial ionospheric mirror using electromagnetic radiation

H. Abedi<sup>1</sup> , S.M. Razavi<sup>2\*</sup>, M.Fartookzadeh<sup>3</sup> 

<sup>2\*</sup>Associate Professor, Malek e Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received:2022 /08/28, Revised: 2022/12/09, Accepted: 2022/12/25, Published: 2023/01/21)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.13.4>

### Abstract

*The ionosphere, a crucial component of Earth's atmosphere, plays a pivotal role in facilitating radio communication. However, its inherent characteristics, such as the reflection and refraction of radio waves, are subject to instability, exhibiting sudden changes influenced by temporal and geographical factors. These fluctuations pose challenges for radar and communication systems reliant on the natural ionosphere, diminishing their reliability. Consequently, numerous studies have focused on inducing controllable alterations in ionospheric properties, including electron density, plasma frequency, and electron temperature. One prevalent method involves heating specific ionospheric regions using electromagnetic waves, offering a means to manipulate its characteristics deliberately. By implementing such controlled modifications, the inherent instability of the natural ionosphere can be mitigated. This paper presents the creation of an artificial ionized region, achieving an electron density of  $108e/cm^3$ , through a heating array with an Effective Radiated Power (ERP) of 153 dBW, situated at an altitude of 65 km. This artificial ionized zone enables controlled reflection of radio waves within the frequency range of 3-90 MHz, catering to radar and communication systems' requirements. The primary focus of this article is the analysis and investigation of the ionospheric heating process utilizing high-power electromagnetic waves emitted by heating antennas. Specifically, employing an analytical approach, the article delineates the calculation of requisite characteristics for the heating antennas to generate artificial ionized areas at varying altitudes.*

**Keywords:** : Ionosphere, Artificial mirror, Over-the-horizon radar, Ionosphere heating, Ionization rate, Electrical breakdown, Ionosphere heater

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

Authors



\*Corresponding Author Email: [razavismj@mut.ac.ir](mailto:razavismj@mut.ac.ir)

## تشکیل ناحیه بازتاب‌کننده مصنوعی در یونسفر با استفاده از تشعشعات الکترومغناطیسی

حمید عابدی<sup>۱</sup>، سیدمحمدجواد رضوی<sup>۲\*</sup>، مهدی فرتوک‌زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار و ۳- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴، انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.13.4>



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

### چکیده

ناحیه یونسفر اطراف زمین یا بخش یونیزه جو، نقش مؤثری را در زمینه ارتباطات رادیویی ایفا نموده است. مشخصه‌های بازتاب و شکست امواج رادیویی توسط ناحیه یونسفر طبیعی، ناپایدار هستند و دارای تغییرات ناگهانی بر اساس زمان و مکان جغرافیایی می‌باشند. این تغییرات ناگهانی باعث کاهش سطح اطمینان موردنیاز برای سامانه‌های راداری و ارتباطی مبتنی بر یونسفر طبیعی می‌شود. مطالعات فراوانی در زمینه ایجاد تغییرات قابل کنترل، در مشخصه‌های ناحیه یونسفر مانند چگالی الکترون، فرکانس پلاسما و دمای الکترون صورت پذیرفته است. یک روش متداول، گرمایش ناحیه‌ای از یونسفر با استفاده از امواج الکترومغناطیسی است که امکان ایجاد تغییرات قابل کنترل در مشخصه‌های یونسفر را فراهم می‌کند. این تغییرات قابل کنترل، شرایط ناپایدار مذکور در مشخصه‌های یونسفر طبیعی را برطرف می‌نمایند. در این مقاله یک ناحیه یونیزه مصنوعی با چگالی الکترون  $10^4 \text{ e/cm}^3$  توسط یک آرایه گرم‌کننده با اندازه ERP برابر با  $153 \text{ dBW}$ ، در ارتفاع  $65 \text{ km}$  تشکیل می‌گردد که امکان بازتاب امواج رادیویی سامانه‌های راداری و ارتباطی در محدوده فرکانسی  $3-90 \text{ MHz}$  را به صورت قابل کنترل فراهم می‌کند. تحلیل و بررسی نحوه تحقق گرمایش یونسفر، از طریق امواج الکترومغناطیسی توان بالای ارسالی توسط آنتن‌های گرم‌کننده به طرف آن موضوع این مقاله است. به طور مشخص، با استفاده از یک روش تحلیلی، برای ایجاد ناحیه یونیزه مصنوعی در ارتفاع‌های مختلف، مشخصات موردنیاز آنتن‌های گرم‌کننده محاسبه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** یونسفر، بازتاب‌کننده مصنوعی، رادار فرااقل نگر، گرمایش یونسفر، نرخ یونیزاسیون، شکست الکتریکی، گرم‌کننده یونسفر

### ۱- مقدمه

F1، ارتفاع  $140-220 \text{ km}$  را پوشش می‌دهد که دارای ناپایداری‌های آشکاری، در زمان روز و شب است. ناحیه F1 به دلیل فرآیند سریع ترکیب مجدد<sup>۳</sup> الکترون و یون‌ها، بعد از غروب خورشید ناپدید می‌شود؛ بنابراین، حداکثر چگالی الکترون در ناحیه بالاتر از  $220 \text{ km}$  یا در زیر لایه F2 قرار می‌گیرد [۳-۲].

امواج رادیویی، از لایه‌های مختلف جو مانند تروپوسفر<sup>۴</sup>، استراتوسفر<sup>۵</sup> و یونسفر عبور می‌کنند. الکترون‌ها در لایه یونسفر، مهم‌ترین نقش را در تعیین ویژگی‌های یونسفر دارند؛ زیرا علاوه بر ایجاد سطح یونیزاسیون، می‌توانند بر روی ارتباطات مبتنی بر امواج رادیویی نیز تأثیرگذار باشند [۵-۴].

برخورد امواج فرابنفش خورشید به اتم‌های گاز موجود در جو، باعث تشکیل یک لایه یونیزه بانام یونسفر<sup>۲</sup> می‌شود [۱] ناحیه یونسفر بر اساس مشخصه‌های ارتفاع و چگالی الکترون به سه لایه با نام‌های D، F و E تقسیم می‌شود. لایه D، ارتفاع  $60-90 \text{ km}$  را با چگالی الکترون  $10^2-10^4 \text{ e/cm}^3$  تشکیل می‌دهد. لایه E، ارتفاع  $140-90 \text{ km}$  را با چگالی الکترون  $10^3-10^5 \text{ e/cm}^3$  پوشش می‌دهد. لایه F با چگالی الکترون  $10^5-10^6 \text{ e/cm}^3$  در طول شبانه‌روز به دو زیر لایه F1 و F2 تقسیم می‌گردد. زیر لایه

<sup>3</sup> Recombination

<sup>4</sup> Troposphere

<sup>5</sup> Stratosphere

razavismj@mut.ac.ir

\* رایانامه نویسنده مسئول:

<sup>2</sup> Ionosphere

یونسفر به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش‌های ۴ و ۵، روابط ریاضی برگرفته از مطالعات نظری و تجربی مقالات مختلف در زمینه شکست الکتریکی توسط امواج رادیویی ارائه شده است. در بخش‌های ۶ و ۷، نتایج محاسبات عددی با مقالات مربوطه مقایسه شده است.

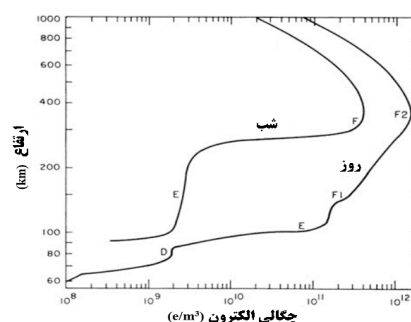
## ۲- یونسفر در زمینه ارتباطات رادیویی

امواج رادیویی با عبور از لایه‌های یونسفر دارای بازتاب<sup>۲</sup> یا شکست<sup>۳</sup> می‌شوند؛ بنابراین، ویژگی‌های بازتاب یا شکست توسط لایه‌های یونسفر، مسیر جدیدی را برای ارسال و دریافت امواج رادیویی فراتر از دید مستقیم<sup>۴</sup> [۱۳] بین فرستنده و گیرنده فراهم می‌کند.

خاصیت بازتابی یا شکست لایه‌های یونسفر، در شرایط جوی و زمانی مختلف (سالانه، روزانه و ساعتی) تغییر می‌کند؛ بنابراین، ارتباطات زمینی و فضایی مبتنی بر بازتاب یا شکست از طریق یونسفر، دارای سطح اطمینان مطلوبی نمی‌باشند؛ زیرا تغییرات شرایط جوی و زمانی باعث تضعیف<sup>۵</sup>، جذب<sup>۶</sup> و شکست موج و تغییر در ویژگی‌های انتشاری مانند فاز و دامنه امواج رادیویی می‌شود. ایجاد تغییرات قابل کنترل در مشخصات یونسفر، می‌تواند موجب بهبود عملکرد ارتباطات رادیویی شود [۱۴].

روش‌های پیشنهادی و تجربی برای ایجاد تغییرات در یونسفر، شامل تزریق بخارهای شیمیایی<sup>۷</sup> (آزادسازی برخی ترکیبات شیمیایی در یونسفر) و گرمایش<sup>۸</sup> از طریق تشعشعات الکترومغناطیسی است [۱۵] یکی از مهم‌ترین کاربردهای نظامی در زمینه تغییرات یونسفر، ایجاد یک ناحیه بازتاب‌کننده یونسفر مصنوعی<sup>۹</sup> در ارتفاع مطلوب است. علاوه بر این، گرمایش یونسفر شامل کاربردهای دیگری مانند اختلال در ارتباطات ماهواره‌ای دشمن و انسداد ارتباطات ماهواره‌ای [۱۶] نیز است. شکل (۲) نحوه ایجاد اختلال در ارتباطات راداری و ماهواره‌ای دشمن را با استفاده از تضعیف، پراکندگی<sup>۱۰</sup> و جذب امواج رادیویی نشان می‌دهد [۱۴].

مشخصه‌های مختلف لایه یونسفر مانند چگالی الکترون، فرکانس برخورد بین عناصر و فرکانس پلاسما<sup>۱</sup>، تأثیرپذیر از نحوه توزیع الکترون‌های آزاد موجود در یونسفر می‌باشند [۶-۷] بر اساس مباحث مذکور، بدیهی است که مشخصه‌های اصلی یونسفر، تحت تأثیر عوامل زمانی (چرخه لکه خورشیدی، فصلی و روزانه) و مکان‌های جغرافیایی به شدت ناپایدار می‌باشند. به طور مثال در شکل (۱) ناپایداری چگالی الکترون در زمان‌ها و لایه‌های مختلف یونسفر ارائه شده است [۸-۱۰].



شکل (۱). تغییرات چگالی الکترون بر اساس ارتفاع و زمان در لایه‌های مختلف یونسفر [۱]

بنابراین، ارتباطات زمینی و فضایی مبتنی بر بازتاب یا شکست از طریق یونسفر، دارای سطح اطمینان مطلوبی نمی‌باشند؛ زیرا تغییرات شرایط جوی و زمانی منجر به تغییر در ویژگی‌های انتشاری مانند فاز و دامنه امواج رادیویی می‌شود.

ایجاد تغییرات مصنوعی در یونسفر، یک روش مؤثر در زمینه حذف ناپایداری‌های مشخصه‌های اصلی یونسفر طبیعی است. ناحیه بازتاب‌کننده مصنوعی، یکی از کاربردهای مهم در زمینه ارتباطات رادیویی است که از طریق ایجاد تغییرات مصنوعی در یونسفر قابل تحقق است [۱۱-۱۲].

در این مقاله، ابتدا مباحث پایه در زمینه مشخصات یونسفر شرح داده شده، سپس با کمک روابط محاسباتی برگرفته از چندین مقاله ارجاع داده شده، یک روش نوین برای اندازه‌گیری مشخصات مطلوب آنتن‌های گرمایش یونسفر ارائه شده است. در واقع تمرکز اصلی این مقاله، تعیین مشخصه‌های مورد نیاز برای ایجاد یک ناحیه بازتاب‌کننده مصنوعی از طریق گرمایش یونسفر است.

در بخش ۲، کاربردهای لایه یونسفر در زمینه ارتباطات رادیویی بیان شده است. در بخش ۳، ناحیه بازتاب‌کننده مصنوعی

<sup>2</sup> Reflection

<sup>3</sup> Refraction

<sup>4</sup> Line-of-sight

<sup>5</sup> Attenuation

<sup>6</sup> Absorption

<sup>7</sup> Injection of chemical vapors

<sup>8</sup> Heating

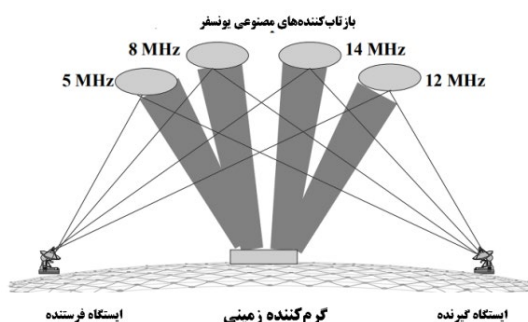
<sup>9</sup> Artificial ionospheric

<sup>10</sup> Scatter

<sup>1</sup> Plasma

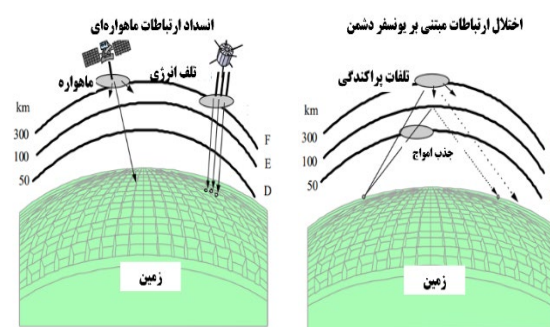
خواهد رسید که ذرات خنثی، بعد از برخورد با الکترون‌ها دارای انرژی بیش از پتانسیل یونیزه طبیعی می‌گردند؛ در نتیجه فرآیند تولید الکترون‌های آزاد ادامه می‌یابد. اگر نرخ تولید الکترون‌های آزاد از نرخ تلفات بیشتر شود، در نتیجه چگالی الکترون افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر یونیزاسیون مصنوعی تحقق می‌یابد [۱۷].

مشکل اصلی سامانه‌های راداری فرافوق نگر (OTH) در بازتاب امواج رادیویی توسط ناحیه یونسفر، ناپایداری مشخصه‌های آن بر اساس تغییرات جوی و رویدادهای طبیعی مانند تشعشعات خورشیدی<sup>۵</sup> و طوفان‌های ژئومغناطیسی<sup>۶</sup> است. یک روش برطرف نمودن این مشکل، استفاده از ناحیه AIM برای بازتاب امواج رادیویی در یک یا چندین محدوده فرکانسی معین است. شکل (۴)، نمایی از ایجاد چندین ناحیه AIM را نشان می‌دهد که هر ناحیه برای بازتاب امواج رادیویی با فرکانس خاصی تولید شده است.



شکل (۴). ارتباطات نقطه-به-نقطه توسط ناحیه بازتاب‌کننده مصنوعی یونسفر [۱۱]

AIM می‌تواند در بهبود توانایی‌های رادار فرافوق نگر نیز مؤثر عمل کند. تغییرات زمانی چگالی الکترون در لایه یونسفر، موجب کاهش سطح اطمینان نظارت‌های هوایی سامانه‌های فرافوق نگر می‌شود [۱۸]. رادارهای مبتنی بر AIM، علاوه بر رفع محدودیت‌های زمانی و مکانی یونسفر، شامل مزایای دیگری مانند کنترل فرکانس، کاهش اثرات شفق قطبی<sup>۷</sup>، قابلیت عملکرد در فاصله کم و شناسایی یک هدف با سطح مقطع<sup>۸</sup> کوچک‌تر نیز می‌باشند [۱۷] در شکل (۵) نمایی از موارد مذکور ارائه شده است.

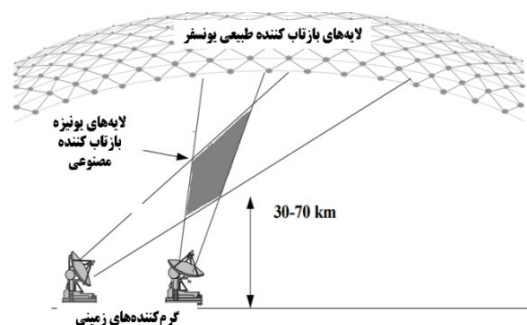


شکل (۲). اختلال در ارتباطات ماهواره‌ای و راداری دشمن [۱۱]

در بخش ۳، مباحث مربوط به ایجاد بازتاب‌کننده‌های مصنوعی در یونسفر، به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳- بازتاب‌کننده‌های مصنوعی در یونسفر (AIM)

مفهوم بازتاب‌کننده‌های مصنوعی یونسفر یا AIM<sup>۱</sup>، شامل استفاده از دستگاه‌های تولیدکننده امواج رادیویی با توان بسیار بالا و مبتنی بر زمین<sup>۲</sup> است که باعث ایجاد نواحی یونیزه (بازتاب‌کننده) در جو می‌شوند. این نواحی یونیزه، علاوه بر حذف ناپایداری‌های طبیعی یونسفر، می‌توانند از خواص بازتابی و شکست امواج الکترومغناطیس برای تحقق اهداف متنوع استفاده نمایند [۱۷] شکل (۳)، نمایی از ایجاد ناحیه یونیزه AIM، با استفاده از پرتوهای رادیویی متقاطع<sup>۳</sup> را ارائه می‌کند.



شکل (۳). ایجاد ناحیه AIM توسط رویکرد پرتو متقاطع [۱۱]

فرض اولیه AIM مبتنی بر این حقیقت است که الکترون‌های آزاد بر اثر یک میدان الکتریکی اعمالی، دارای شتاب می‌شوند. اگر اندازه میدان الکتریکی اعمالی مناسب باشد یا الکترون‌ها برای یک مدت‌زمان کافی دارای شتاب باشند، سرعت الکترون‌ها به سطحی

<sup>4</sup> Over the horizon

<sup>5</sup> Solar flares

<sup>6</sup> Geomagnetic Storm

<sup>7</sup> Aurora

<sup>8</sup> Cross section

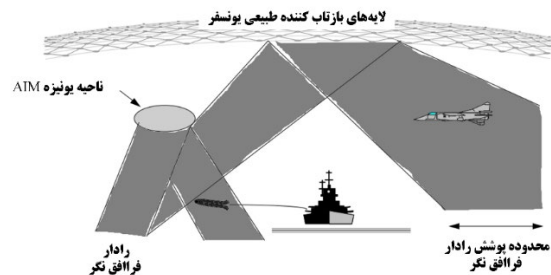
<sup>1</sup> Artificial ionospheric mirror

<sup>2</sup> Ground-based

<sup>3</sup> Crossed beam

### ۲-۳- ملاحظات ارتفاع تشکیل ناحیه AIM

در محاسبه ارتفاع تشکیل ناحیه AIM، موارد مختلفی مانند توان موردنیاز گرم‌کننده، طول عمر، پایداری، مشخصه‌های جذب و بازتاب امواج رادیویی توسط ناحیه یونیزاسیون را در نظر می‌گیرند. بر اساس مباحث مشروحه در این بخش، اثبات می‌شود که اکثر مطالعات در زمینه تشکیل ناحیه AIM و مباحث مرتبط با یونیزاسیون، در محدوده ارتفاع ۹۰-۵۰ km انجام شده است.



شکل (۵). نمایی از کاربردهای رادار مبتنی بر AIM [۱۱]

### ۲-۳-۱- طول عمر

بر اساس مباحث فیزیک پلاسما، میزان چگالی الکترون که در ارتفاع ۵۰ km ایجاد می‌شود بسیار کم‌تر از اندازه چگالی الکترون در حالت طبیعی است؛ بنابراین، احتمال تشکیل ناحیه یونیزاسیون در این محدوده، بسیار پایین است. علاوه بر این، فرکانس برخورد<sup>۷</sup> بین الکترون و ذرات خنثی در ارتفاعات کمتر، به دلیل فرآیندهای پیوستن<sup>۸</sup> الکترون، بسیار زیاد است که این امر باعث کوتاه‌شدن طول عمر الکترون می‌گردد.

یک رویکرد دیگر در تعیین طول عمر ناحیه AIM، مرتبط با کاربرد آن است. مفهوم طول عمر ناحیه AIM، مدت‌زمانی است که ناحیه یونیزه AIM در هنگام عدم تشعشع گرم‌کننده، به‌عنوان یک بازتاب‌کننده امواج رادیویی عمل کند؛ بنابراین، بر اساس کاربرد در برخی مواقع نیازی به افزایش طول عمر ناحیه AIM نیست. به‌عبارت‌دیگر، طول عمر معمول ناحیه یونیزه AIM، برای بازتاب امواج رادیویی در هنگام عدم تشعشع گرم‌کننده، کافی است. در مقاله [۲۰] طول عمر مفید الکترون جهت کاربردهای راداری در ارتفاع بالاتر از ۷۰ km، بیشتر از ۰/۵s تعیین شده است.

### ۲-۳-۲- تلفات جذب ناحیه یونیزه AIM

به‌منظور تعیین تلفات جذب در بازتاب امواج رادیویی توسط ناحیه AIM، ضریب بازتاب<sup>۹</sup> محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج محاسبات عددی در مقاله [۲۱] ضریب بازتاب در ارتفاعات پایین‌تر کاهش می‌یابد. از طریق مقایسه ضرایب بازتاب امواج رادیویی برای ۳ ارتفاع تشکیل ناحیه یونیزه AIM (ارتفاع ۶۱ km، ۷۲/۵ km و ۸۰ km) اثبات می‌شود که کوچک‌ترین ضریب بازتاب، به ترتیب برای ارتفاع ۶۱ km، ۷۲/۵ km و ۸۰ km است.

به‌طور خلاصه ناحیه AIM، باید در ارتفاع ۶۵-۸۰ km تشکیل شود تا برای کاربردهای راداری و سامانه‌های ارتباطی به‌طور مؤثر عمل کند.

### ۳-۱- مشخصه‌های عملکرد ناحیه AIM

ناحیه AIM توسط تشعشعات الکترومغناطیسی پرتوان در لایه D یونسفر (ارتفاع ۶۰-۹۰ km) ایجاد می‌گردد. سطح یونیزاسیون در ناحیه AIM تا اندازه  $10^8-10^9 \text{ e/cm}^3$  افزایش می‌یابد. در این حالت یک ناحیه یونیزاسیون مصنوعی، برای بازتاب امواج رادیویی در محدوده فرکانسی ۵-۹۰ MHz تشکیل می‌شود. به‌طور کلی مشخصات عملکردی ناحیه AIM شامل موارد ذیل است [۱۹]:

- (۱) بر اساس اندازه ارتفاع تشکیل ناحیه AIM، محدوده ردیابی و شناسایی اهداف در فاصله ۱۲۰۰-۲۰۰ km بر روی سطح زمین است.
  - (۲) ناحیه پوشش  $360^\circ$  در صفحه افقی<sup>۱</sup>
  - (۳) زاویه بین پرتو و سطح زمین<sup>۲</sup> کم‌تر از  $10^\circ$  برای ارتفاع ۶۵-۸۰ km
  - (۴) کنترل قطبش مناسب
  - (۵) عملکرد در محدوده فرکانس بالا<sup>۳</sup> و خیلی بالا<sup>۴</sup> (تا فرکانس ۹۰ MHz)
  - (۶) کاهش وابستگی به پدیده شفق قطبی در بخش‌های نظارتی
  - (۷) ارائه عملیات پایدار در زمان افزایش فعالیت لکه‌های خورشیدی<sup>۵</sup> و سایر تخریب‌های یونسفری
  - (۸) مدت‌زمان معمول تشکیل AIM حدود ۵۰-۱۰ ms و مدت‌زمان خنک‌سازی آن کم‌تر از ۱ ms/۰
- رادارهای AIM به‌صورت چند ایستگاهی<sup>۶</sup> هستند. در واقع این نوع رادارها می‌توانند از چندین فرستنده و گیرنده برای افزایش ناحیه پوشش و شناسایی اهداف در چند جهت مختلف استفاده کنند.

<sup>۱</sup> Azimuth

<sup>۲</sup> Grazing angle

<sup>۳</sup> High Frequency

<sup>۴</sup> Very High Frequency

<sup>۵</sup> Sun spot

<sup>۶</sup> Multi Static

<sup>۷</sup> Collision frequency

<sup>۸</sup> Attachment

<sup>۹</sup> Reflection Coefficient

الکترون در طول پالس به طور تصاعدی افزایش می‌یابد. مقدار اولیه چگالی الکترون‌ها، بر اساس پراکندگی الکترون‌های اولیه موجود در جو یا الکترون‌های ایجادشده توسط یک منبع رادیویی در محیط آزمایشگاه تعیین می‌شود. رابطه (۳) نرخ رشد چگالی الکترون را بیان می‌کند.

$$\frac{dN_e}{dt} = (v_i - v_a - v_d)N_e \quad (3)$$

$v_i$ ،  $v_a$  و  $v_d$  به ترتیب نرخ‌های یونیزاسیون، پیوستن و پخش‌شدگی<sup>۳</sup> هستند که نرخ رشد چگالی الکترون را کنترل می‌کنند. به‌منظور ساده‌سازی روابط، اندازه سه نرخ مذکور را در هنگام شکست الکتريکی، ثابت در نظر می‌گیرند، بنابراین، رابطه (۳) به‌صورت (۴) بیان می‌شود.

$$N_e(t_f) = N_e(t_0)e^{v\tau} \quad (4)$$

در رابطه (۴) اندازه  $v_i - v_a - v_d$ ،  $N_e(t_0)$  چگالی الکترون ابتدای پالس ( $t = t_0$ ) و  $\tau$  مدت‌زمان پالس رادیویی ( $t_f - t_0$ ) است. رابطه (۴) را می‌توان به‌صورت (۵) یا (۶) نیز بیان نمود.

$$v_{net} = v_i - v_a = \frac{1}{\tau} \ln \left\{ \frac{N_e(t_f)}{N_e(t_0)} \right\} + v_d \quad (5)$$

$$\frac{v_{net}}{P} = \frac{1}{P\tau} \ln \left\{ \frac{N_e(t_f)}{N_e(t_0)} \right\} + \frac{v_d}{P} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، اندازه فشار گاز جو است. با جایگذاری رابطه (۱) یا (۲) در (۶) و ناچیز در نظر گرفتن نرخ پراکندگی، می‌توان میدان الکتريکی و طول پالس را به صورتی تغییر داد که شکست الکتريکی ایجاد شود و سپس  $V_{net}/P$  را اندازه‌گیری نمود.

#### ۵-۱- نظریه اندازه‌گیری نرخ یونیزاسیون

باتوجه به عدم شناخت کامل نحوه توزیع سرعت الکترون، باید از داده‌های تجربی برگرفته از ضریب یونیزاسیون  $\alpha$  با واحد اندازه‌گیری  $\text{cm}^{-1}$  و سرعت انحراف<sup>۴</sup> الکترون ( $v_d$ ) استفاده نمود. با استفاده از  $\alpha$ ،  $v_d$  و رابطه (۷)، می‌توان نرخ یونیزاسیون را محاسبه نمود.

$$v_{net} = \alpha V_d \quad (7)$$

ضریب یونیزاسیون  $\alpha$ ، برای طیف گسترده‌ای از  $E/P$  ( $\text{Volt/cm.Torr}$ ) توسط پژوهشگران اندازه‌گیری شده که در آن  $E$  میدان الکتريکی و  $P$  فشار گاز است. روابط (۸) و (۹)، بیشترین تطبیق را با داده‌های ضریب یونیزاسیون دارند به صورتی که محدوده  $E/P$  بین ۵۴ تا ۱۰۰۰ است.

#### ۳-۳- گسترش ناحیه تشکیل AIM

ناحیه یونیزه اولیه تشکیل شده توسط پرتوهای گرم‌کننده، ممکن است دارای اندازه مطلوب نباشند؛ زیرا بهره آن‌ها مقدار بزرگی است. به‌منظور گسترش ناحیه یونیزاسیون AIM از روش‌های متنوع اسکن الکترونیکی به‌صورت عمودی و افقی استفاده می‌شود که اطلاعات کامل‌تر در مقاله [۶] ارائه شده است.

#### ۴- شکست الکتريکی

مطالعات نظری و تجربی گسترده‌ای در زمینه شکست الکتريکی توسط امواج رادیویی صورت پذیرفته است؛ اما در تشکیل ناحیه یونیزه AIM، باید یک شکست الکتريکی به‌صورت قابل‌کنترل ایجاد شود تا باعث تولید یک چگالی الکترون خاص در یک ناحیه از جو شود. در این بخش یک‌روند محاسباتی برای الزامات تشکیل ناحیه AIM در ارتفاع مطلوب پرداخته می‌شود. روابط مورد استفاده، برگرفته از مقاله [۲۲] است.

اولین آزمایش شکست الکتريکی ریزموج در فضای آزاد و سایر گازها، در سال ۱۹۴۸ صورت پذیرفت. این آزمایش، نقطه‌ی شروع آزمایش‌های شکست الکتريکی توسط امواج پیوسته<sup>۱</sup> [۲۳] و ریزموج پالسی شد. در بیشتر این نوع آزمایش‌ها، میدان الکتريکی یا توان موردنیاز شکست ریزموج، به‌صورت تابعی از فشار گاز اندازه‌گیری می‌شود.

از نظر کیفی، شکست الکتريکی زمانی ایجاد می‌شود که میدان الکتريکی ریزموج، باعث تشعشع نور مرئی شود. از نظر کمی، دو تعریف ارائه شده است. بر اساس تعریف اول، زمانی شکست الکتريکی ایجاد می‌شود که نسبت چگالی الکترون نهایی به اولیه برابر با  $10^8$  باشد.

$$\frac{N_e(t_f)}{N_e(t_0)} = 10^8 \quad (1)$$

در تعریف دوم، زمانی شکست الکتريکی ایجاد می‌شود که چگالی الکترون برابر با چگالی بحرانی<sup>۲</sup> شود یا به‌عبارت‌دیگر فرکانس پلاسما برابر با فرکانس موج گرم‌کننده شود.

$$N_e(t_f) = 1.2 \times 10^{-8} f^2 \quad (2)$$

$f$  در رابطه (۲)، فرکانس موج گرم‌کننده است. اندازه چگالی الکترون اولیه در رابطه (۲) برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

#### ۵- نرخ یونیزاسیون

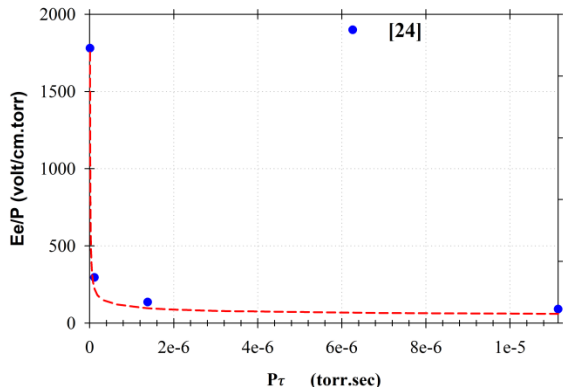
در آزمایش‌های شکست ریزموج در فضای آزاد، چگالی

<sup>3</sup> Diffusion

<sup>4</sup> Drift

<sup>1</sup> Continuous wave (CW)

<sup>2</sup> Critical density



شکل (۷). محاسبه  $E_e/P$  بر اساس تغییرات  $P\tau$

روابط (۱۲) و (۱۳)، اندازه نرخ یونیزاسیون را بر اساس داده‌های میدان الکتریکی جریان مستقیم<sup>۱</sup> محاسبه می‌کنند؛ اما از این روابط می‌توان برای اندازه‌گیری شکست الکتریکی ریزموج در فضای آزاد نیز استفاده نمود؛ بنابراین، میدان مؤثر یا  $E_e$  باید جایگزین میدان الکتریکی جریان مستقیم در روابط (۱۲) و (۱۳) شود. ارتباط بین میدان الکتریکی مؤثر  $E_e$  و میدان  $E_{rms}$  در رابطه (۱۴) بیان شده است.

$$E_e = E_{rms} \left( \frac{v_m^2}{v_m^2 + \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$v_m$  در رابطه (۱۴)، فرکانس برخورد برای انتقال نیروی جنبشی توسط الکترون‌ها به مولکول‌های موجود در جو است و  $\omega$  اندازه فرکانس موج گرم‌کننده است.

اندازه فرکانس برخورد الکترون با ذرات خنثی ( $v_m$ ) در ناحیه D یونسفر، به صورت ثابت و  $P \times 10^{-9}$  است.

### ۶- الزامات تشکیل ناحیه یونیزه AIM

ناحیه یونیزه AIM توسط تشعشعات الکترومغناطیسی با توان بالا ایجاد می‌شود. در این بخش یک روند محاسبات عددی مربوط به الزامات تشکیل ناحیه AIM مانند اندازه  $ERP^2$ ، فرکانس گرم‌کننده، ارتفاع تشکیل ناحیه یونیزاسیون و ... ارائه می‌گردد.

#### ۶-۱- نرخ یونیزاسیون

بر اساس مقاله [۲۲] جهت تشکیل یک ناحیه یونیزه AIM با توانایی بازتاب امواج رادیویی HF، باید نسبت چگالی الکترون نهایی به اولیه حدود  $10^8 \text{ e/cm}^3$  باشد. بر اساس رابطه (۶)، با تغییر فشار جو و طول پالس، می‌توان نرخ یونیزاسیون ( $V_{net}$ ) را محاسبه نمود. در شکل (۸)، نتایج محاسبات عددی برای طول پالس  $1-5 \mu\text{s}$  و فشار جو  $0.1-0.5 \text{ Torr}$  ارائه شده است.

$$\frac{\alpha}{P} = 8.34 e^{(-273.8 \frac{P}{E})} \quad 120 \geq \frac{E}{P} \geq 54 \quad (8)$$

$$\frac{\alpha}{P} = 16 e^{(-359 \frac{P}{E})} \quad 1000 \geq \frac{E}{P} \geq 120 \quad (9)$$

سرعت انحراف الکترون در فضای آزاد، برای  $E/P$  تا ۳۰۰۰، در مقاله [۲۲] اندازه‌گیری شده است. بر اساس نتایج اندازه‌گیری، می‌توان از روابط (۱۰) و (۱۱) برای محاسبه سرعت انحراف الکترون استفاده نمود.

$$V_d = 6 \times 10^6 + 2.3 \times 10^5 \frac{E}{P} \quad 54 \leq \frac{E}{P} \leq 120 \quad (10)$$

$$V_d = 3.38 \times 10^6 \left( \frac{E}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 120 \leq \frac{E}{P} \leq 3000 \quad (11)$$

با جای‌گذاری مقادیر روابط (۸) تا (۱۱) در رابطه (۷)، نرخ یونیزاسیون در فضای آزاد برای محدوده  $E/P$  بین ۵۴ تا ۳۰۰۰ به صورت (۱۲) و (۱۳) بیان می‌شود.

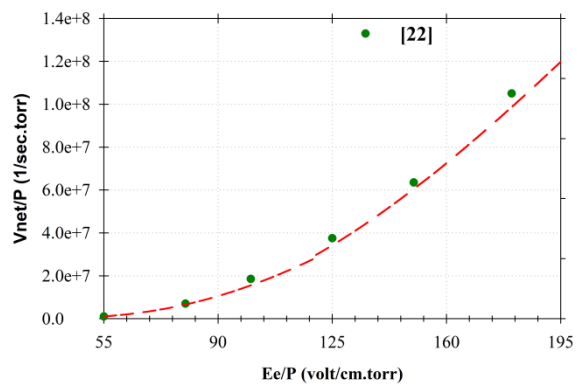
$$\frac{v_{net}}{P} = \left( 5 + 0.19 \left( \frac{E}{P} \right) \right) \times 10^7 e^{(-273.8 \frac{P}{E})} \quad (12)$$

$$54 \leq \frac{E}{P} \leq 120$$

$$\frac{v_{net}}{P} = \left( 54.08 \times 10^6 \left( \frac{E}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \times e^{(-359 \frac{P}{E})} \quad (13)$$

$$120 \leq \frac{E}{P} \leq 3000$$

در مقاله [۲۲] اندازه  $V_{net}/P$  بر اساس  $E/P$  (محدوده ۵۵ تا ۲۰۰) اندازه‌گیری شده است. نتایج محاسبات عددی روابط (۱۲) و (۱۳) و نتایج مقاله [۲۲] در شکل (۶) مقایسه شده است.



شکل (۶). محاسبه  $V_{net}/P$  بر اساس تغییرات  $E_e/P$

اگر در رابطه (۶)، اندازه  $\ln \left\{ \frac{N_e(t_f)}{N_e(t_0)} \right\}$  به صورت ثابت و برابر با  $18/4$  در نظر گرفته شود، با استفاده از روابط (۶)، (۱۲) و (۱۳) می‌توان اندازه  $E/P$  را بر اساس  $P\tau$  محاسبه نمود. در شکل (۷) مقادیر  $E/P$  بر تغییرات  $P\tau$  ترسیم شده است و با نتایج اندازه‌گیری شده در مقاله [۲۴] مقایسه شده است.

<sup>1</sup> Direct Current (DC)

<sup>2</sup> Effective radiated power

فرکانس پلاسما را بر اساس چگالی الکترون محاسبه نمود.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e \times e^2}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times m_e}} \quad (17)$$

$n_e$  نشان دهنده چگالی الکترون،  $e$  بار الکترون و  $m_e$  اندازه جرم الکترون را تعیین می‌کند؛ بنابراین، محدوده فرکانس پلاسما بر اساس رابطه (۱۷)، بین ۲MHz تا ۱۰MHz قرار دارد. حداکثر تعامل بین امواج رادیویی و لایه‌های یونسفر، زمانی صورت می‌پذیرد که فرکانس امواج رادیویی، اختلاف اندکی با فرکانس پلاسما لایه‌های یونسفر داشته باشند؛ بنابراین، فرکانس عملیاتی آنتن گرم‌کننده، باید نزدیک به فرکانس پلاسما لایه D یونسفر باشد (۲-۱۰MHz).

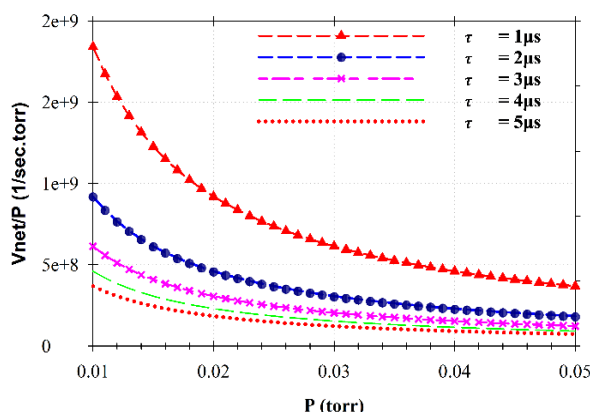
### ۶-۵- محدوده فرکانس قابل بازتاب

اگر فرکانس امواج ارتباطی رادیویی بیشتر از فرکانس پلاسما ناحیه یونسفر مصنوعی باشد، از آن ناحیه عبور می‌کنند و در نتیجه ارتباط از طریق ناحیه یونسفر مصنوعی با شکست مواجه می‌شود. حد بالا فرکانس موج قابل بازتاب از طریق ناحیه یونسفر مصنوعی، بر اساس اندازه چگالی الکترون تعیین می‌شود. به طور مثال، اگر چگالی الکترون در ارتفاع ۶۵km برابر با  $10^8 \text{ e/cm}^3$  باشد، بنابراین بر اساس رابطه (۱۷)، حداکثر فرکانس قابل بازتاب توسط ناحیه یونسفر ۹۰MHz است. حد پایین فرکانس موج قابل بازتاب توسط ناحیه یونسفر مصنوعی، بر اساس فرکانس پلاسما طبیعی یا اولیه محاسبه می‌شود که در ارتفاع ۶۵km تقریباً ۳MHz است. به‌طور کلی، محدوده فرکانسی قابل بازتاب توسط ناحیه یونسفر مصنوعی ۳-۹۰MHz است.

### ۶-۷- نتایج محاسبات عددی

بر اساس مباحث مشروحه در بخش ۶، نمایی اجمالی از روند محاسبات در شکل (۹) ارائه شده است. ابتدا باید نسبت چگالی الکترون نهایی به اولیه موردنیاز ایجاد شکست الکتریکی در نظر گرفته شود که در این مقاله  $10^8$  فرض شده است. سپس بر اساس اندازه طول پالس ( $\tau$ ) و فشار جو ( $P$ )، نرخ یونیزاسیون ( $V_{net}$ ) مربوطه محاسبه شود. میدان الکتریکی اولیه ( $E_{rms}$ ) بر اساس مقادیر نرخ یونیزاسیون، فشار جو، فرکانس برخورد الکترون با ذرات خنثی ( $V_m$ ) و فرکانس موج گرم‌کننده ( $\omega$ ) محاسبه می‌گردد. در نهایت اندازه چگالی توان ( $S$ ) و ERP موردنیاز، بر اساس میدان الکتریکی اولیه تعیین می‌شوند.

در شکل (۱۰) نتایج محاسبات عددی بر اساس فرکانس موج گرم‌کننده و ارتفاع‌های مختلف ارائه شده است. نسبت چگالی الکترون نهایی به اولیه  $10^8$  و طول پالس  $1 \mu\text{s}$  در نظر گرفته شده



شکل (۸). محاسبه نرخ یونیزاسیون ( $V_{net}$ ) بر اساس تغییرات طول پالس و فشار جو

### ۶-۲- میدان الکتریکی مؤثر

اگر فشار جو ( $P$ ) در ارتفاع ۶۵km به صورت  $0.1 \text{ Torr}$  و طول پالس نیز  $1 \mu\text{s}$  در نظر گرفته شده باشد، اندازه نرخ یونیزاسیون ( $\frac{V_{net}}{P}$ ) حدود  $1.1 \times 10^9 \frac{1}{\text{Torr} \cdot \text{sec}}$  است. میدان الکتریکی مؤثر ( $E_e$ )، بر اساس روابط (۱۲) و (۱۳) برابر با  $17/\Delta V/\text{cm}$  است.

اگر فرکانس برخورد بین الکترون و ذرات خنثی برابر با  $5/3 \times 10^7$  و فرکانس موج گرم‌کننده  $10 \text{ MHz}$  در نظر گرفته شود، بر اساس رابطه (۱۴)، اندازه میدان الکتریکی اولیه ( $E_0$ )  $38 \text{ V/cm}$  است. باتوجه به رابطه (۱۵)، اندازه چگالی توان ( $S$ ) در فضای آزاد، برابر با  $38/3 \text{ kW/m}^2$  است.

$$S = \frac{E_0^2 \times 10^4}{377} \quad (15)$$

### ۶-۳- توان تابشی اثربخش (ERP)

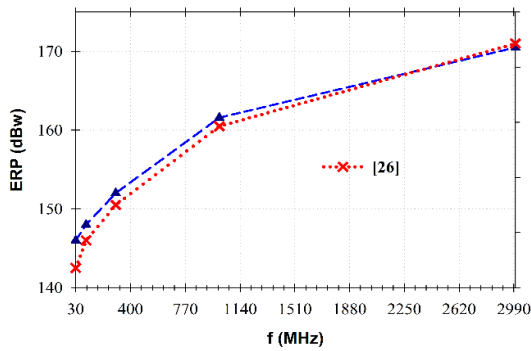
بر اساس رابطه (۱۶)، می‌توان اندازه توان تابشی اثربخش (ERP) موردنیاز ایجاد ناحیه AIM را در ارتفاع معین محاسبه نمود. اگر اندازه چگالی توان ( $S$ ) برابر  $38/3 \text{ kW/m}^2$  و ارتفاع هدف  $65 \text{ km}$  در نظر گرفته شود، بر اساس رابطه (۱۶) اندازه ERP برابر با  $153 \text{ dBW}$  است.

$$S = PG \left( \frac{|A|^2}{4\pi} \right) = PG \left( \frac{1}{4\pi R^2} \right) = ERP \left( \frac{1}{4\pi R^2} \right) \quad (16)$$

$S$  در رابطه (۱۶) نشان دهنده چگالی توان در ارتفاع مطلوب،  $P$  اندازه توان فرستنده،  $G$  بهره فرستنده و  $R$  اندازه ارتفاع موردنظر است.

### ۶-۴- فرکانس موج گرم‌کننده

اندازه چگالی الکترون یونسفر در محدوده ارتفاع  $60-90 \text{ km}$  بین  $10^7 \text{ e/cm}^3$  تا  $3 \times 10^6 \text{ e/cm}^3$  است. بر اساس مقاله [۲۵] می‌توان با استفاده از رابطه  $f_p \approx 8980 \sqrt{n_e}$  یا (۱۷)،



شکل (۱۱). مقایسه نتایج مقاله [۲۶] و روش محاسبات عددی

### ۸- نتیجه‌گیری

با استفاده از گرمایش یونسفر از طریق امواج رادیویی HF با توان بالا، می‌توان تغییرات قابل‌کنترلی در مشخصه‌های یونسفر ایجاد نمود. مهم‌ترین کاربرد ایجاد تغییرات در یونسفر، تشکیل ناحیه بازتاب‌کننده مصنوعی در یونسفر است.

ناحیه AIM یا بازتاب‌کننده مصنوعی، یک روش نوین در ارتباطات رادیویی است که ناپایداری‌های ارتباطی مربوط به یونسفر را حذف می‌نماید. ناحیه AIM با کنترل مستقیم شرایط انتشار، می‌تواند از خواص بازتابی و شکست امواج رادیویی، برای تحقق اهداف متنوع مانند ایجاد ارتباطات فرافوق یا بهبود عملکرد سامانه‌های راداری استفاده نماید. به‌منظور تشکیل ناحیه AIM در ارتفاع ۶۵km (ناحیه D یونسفر) باید سطح یونیزاسیون تا اندازه  $10^8 \text{ e/cm}^3$  افزایش یابد.

ایجاد میدان‌های الکتریکی بسیار بزرگ، یکی از چالش‌های مهم در زمینه تشکیل ناحیه یونیزه AIM است. میدان‌های الکتریکی بزرگ، توسط آنتن‌های گرم‌کننده با توان بالا تأمین می‌شوند. یکی از مشخصه‌های مهم در طراحی آنتن‌های گرم‌کننده، اندازه ERP است. یک‌روند محاسباتی برای تعیین الزامات تشکیل ناحیه یونیزه AIM مانند اندازه ERP، فرکانس موج گرم‌کننده و ... در این مقاله ارائه گردید. بر اساس نتایج محاسبات، اندازه ERP موردنیاز برای تشکیل ناحیه یونیزه در ارتفاع ۶۵km برابر با ۱۵۳dBW تعیین شد. صحت‌سنجی روش اندازه‌گیری ERP، از طریق مقایسه نتایج محاسبات با مقاله [۲۶] صورت پذیرفت و تطابق مناسبی نشان داده شد.

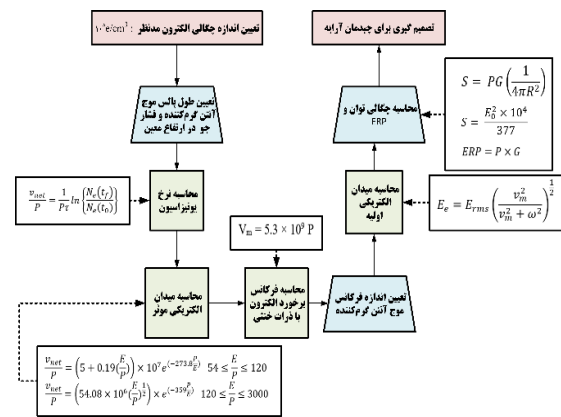
### ۹. مراجع

[1] A. R. Thompson, J. M. Moran, and G. W. Swenson, "Propagation Effects: Ionized Media," *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, pp. 725–766, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44431-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44431-4_14)

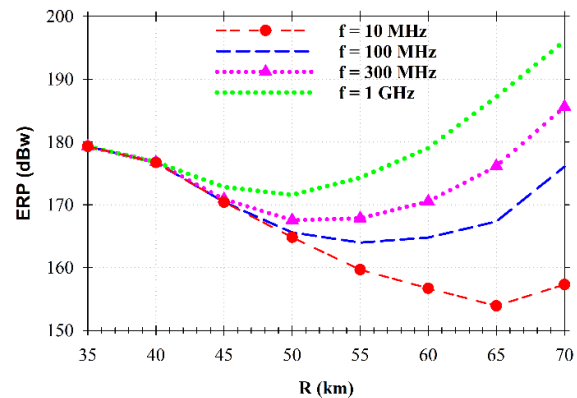
[2] A. V. Gurevich, "Nonlinear effects in the ionosphere," *Physics-Usppekhi*, vol. 50, no. 11, pp. 1091–1121, Nov. 2007. <https://doi.org/10.1070/PU2007v050n11ABEH006212>

است. بر اساس شکل (۱۰)، اندازه ERP موردنیاز برای ایجاد ناحیه یونیزه، ارتباط مستقیم با فرکانس آنتن گرم‌کننده دارد.

بر اساس شکل (۱۰)، اندازه ERP موردنیاز برای ایجاد یک ناحیه AIM در ارتفاع ۶۵km حدود ۱۵۳dBW است. به‌منظور بازدهی بیشتر در گرمایش یونسفر، فرکانس آنتن گرم‌کننده باید نزدیک به فرکانس پلاسما محیط باشد (بخش ۶-۴)؛ بنابراین، فرکانس موردنیاز برای آنتن گرم‌کننده در این مقاله، ۱۰MHz در نظر گرفته شده است.



شکل (۹). روند محاسبه ERP موردنیاز تشکیل ناحیه AIM



شکل (۱۰). اندازه ERP موردنیاز آنتن گرم‌کننده

در مقاله [۲۶] از روش دیگری محاسباتی برای تخمین اندازه ERP موردنیاز، جهت تشکیل ناحیه یونیزه در ارتفاع ۶۵km استفاده شده است. در این مقاله اندازه  $\frac{N_e(t_f)}{N_e(t_0)}$  برابر با  $1/6 \times 10^7 \text{ e/cm}^3$  در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱)، مقایسه اجزای بین نتایج مقاله [۲۶] و روش محاسبات عددی ارائه شده است.

- No. AD-A-234289/7/XAB; APTI-5005, ARCO Power Technologies, Inc., Washington, DC (United States), 1990.
- [20] R. E. LeVier, "Determination of the D-layer dissociative recombination coefficient from a high-altitude nuclear explosion," *Journal of Geophysical Research*, vol. 69, no. 3, pp. 481-485, 1964. <https://doi.org/10.1029/JZ069i003p00481>
- [21] Budden, Kenneth George, "Radio waves in the ionosphere," *Radio Waves in the Ionosphere*, 2009. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009rwi.book.....B>
- [22] Short, R., et al, "Physics studies in artificial ionosphere mirror related phenomena," Tech RepL GL-TR-90--0038, Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Ma, 1990. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990arco.reptQ....S>
- [23] Asgari, M.; Mohseni Armaki, S.H.; Fallah, M. "Radiation Pattern Analysis of Frequency Diverse Array Based on Square Frequency Modulated Continuous Wave"; *Radar*. 2015, 1, 25-34. (in Persian)
- [24] A. W. Ali, "Nanosecond air breakdown parameters for electron and microwave beam propagation," *Laser and Particle Beams*, vol. 6, no. 1, pp. 105-117, 1988. <https://doi.org/10.1017/S0263034600003840>
- [25] Dehghan, M.; Razavi, R.; Ramezani, M. "Radar Cross Section Reduction of a Flat Square Plate Using Plasma Coating Caused By Alpha Particles"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2018, 2, 123-129. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1398.10.2.1.5>
- [26] ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT NEUILLY-SUR-SEINE (FRANCE), "Conference Proceedings on Ionospheric Modification and Its Potential to Enhance or Degrade the Performance of Military Systems Held in Bergen, Norway on 28-31 May 1990 (La Modification de l'ionosphere et son Potentiel d'Amelioration ou de Degradation des Performances des Systemes Militaires)," ,1990.
- [3] A. V. Gurevich, "Nonlinear Phenomena in the Ionosphere," Springer Science & Business Media. 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87649-3>
- [4] K. Davies, "Ionospheric Radio. Institution of Engineering and Technology," 1990. <https://doi.org/10.1049/PBEW031E>
- [5] S. Priyadarshi, "A Review of Ionospheric Scintillation Models," *Surveys in Geophysics*, vol. 36, no. 2, pp. 295-324, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9319-1>
- [6] G. Zhe, "Effective Mechanism and the Source Region of the Stimulated ELF/VLF Waves by High Power HF Radio Waves," Master's Thesis, Lancaster Univ., 2021. <https://doi.org/10.17635/lancaster/thesis/1160>
- [7] J. Chen et al., "ELF/VLF Wave Radiation Experiment by Modulated Ionospheric Heating Based on Multi-Source Observations at ELSCAT," *Atmosphere*, vol. 13, no. 2, p. 228, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13020228>
- [8] K. Ghanbari, M. Khakian Ghomi, M. Mohammadi, M. Marbouti, and L. M. Tan, "Modeling the variations of reflection coefficient of Earth's lower ionosphere using very low frequency radio wave data by artificial neural network," *Advances in Space Research*, vol. 58, no. 3, pp. 326-338, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.04.027>
- [9] V. G. Mizonova and P. A. Bespalov, "The Influence of Small Variations of Plasma Density on Conditions of Propagation of Electromagnetic Waves of the Whistle Range through the Morning Ionosphere," *Cosmic Research*, vol. 61, no. 2, pp. 91-101, 2023. <https://doi.org/10.1134/s0010952522700113>
- [10] Bayat, M.; Madani, M.H.; Razavi, S.M.J. "A Combined Improved Algorithm to Estimating The delay of Sky waves In Loran c Receiver"; *Journal Of Electronical & Cyber Defence*. 2015, 4, 55-63. (in Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1393.2.4.20.4>
- [11] T. J. House, J. B. Near, S. Jr., C. William B., H. Ronald J., and David M., "Weather as a Force Multiplier: Owning the Weather in 2025," *Defense Technical Information Center*, 1996. <https://doi.org/10.21236/ada333462>
- [12] I. A. Ryakhovskii, B. G. Gavrilov, Yu. V. Poklad, S. Z. Bekker, and V. M. Ermak, "The State and Dynamics of the Ionosphere from Synchronous Records of ULF/VLF and HF/VHF Radio Signals at Geophysical Observatory 'Mikhnevo,'" *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 57, no. 5, pp. 718-730, 2021. <https://doi.org/10.1134/S1069351321050177>
- [13] Khalilpoor, J.; Ranjbar, J.; Kazemina, M. "Wireless Target Localization Using Median Weighted Least Square Error Metric in the Presence of Non-Line of Sight Signals"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2019, 2, 125-133. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1399.8.2.12.4>
- [14] Duncan, Lewis M., and Robert L. Showen, "Review of Soviet Ionospheric Modification Research," In AGARD, 1990. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990imip.agar....D Df>
- [15] Banks, Peter M, "Overview of Ionospheric Modification from Space Platforms," No. AD-P-006512/8/XAB, Stanford Univ., CA (United States), Space, Telecommunications and Radioscience Lab., 1990. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990imip.agarS....B>
- [16] Maehlum, B. N., and J. Troim, "Vehicle Charging in Low Density Plasmas," In AGARD ,1990. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990imip.agarS....M>
- [17] Kossey, Paul A., et al, "Artificial Ionospheric Mirrors (AIM). A: Concept and issues," In AGARD ,1990. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990imip.agarS....K>
- [18] Kolosov, Andrei Aleksandrovich, "Over-the-horizon radar," Artech House, 1987.
- [19] Short, R., et al, "System concept and analysis of an Artificial Ionospheric Mirror (AIM) radar," Rept. for 31 Aug 89-31 Aug 90,