

Radar Vol. 10, No. 2, Autumn & Winter 2022, Serial No. 27



ISSN: 2345-4024, E-ISSN: 2345-4032

## 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/cm3, 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



«راوار»





علمی - پژوهشی

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

## حميد عابدي 回، سيدمحمدجواد رضوي 🐾، مهدي فرتو کزاده 💷

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

6	•	که تحت شرایط و ضوابط مجوز (Creative Commons Attribution (CC BY توزیع شده است.	* این مقاله یک مقاله با دستر سی آز اد است
	BY	ى نويسندگان	<b>ناشر:</b> دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## چکیدہ

كليدواژهها: يونسفر، باز تابكننده مصنوعى، رادار فراافق نگر، گرمايش يونسفر، نرخ يونيزاسيون، شكست الكتريكى،گرمكننده يونسفر

#### ۱– مقدمه

برخورد امواج فرابنفش خورشید به اتمهای گاز موجود در جو، باعث تشکیل یکلایه یونیزه بانام یونسفر<sup>۲</sup> می شود [۱] ناحیه یونسفر بر اساس مشخصههای ارتفاع و چگالی الکترون به سهلایه با نامهای G، F و E تقسیم می شود. لایه G، ارتفاع ۹۰kه-۹۰ را با چگالی الکترون <sup>6</sup> ۹۰km می دهد. لایه E ارتفاع ۱۰۴۰km در ا با چگالی الکترون <sup>6</sup> e/cm<sup>3</sup> ۱۰<sup>-۲</sup>۰۰، در پوشش می دهد. لایه F با چگالی الکترون <sup>6</sup> ۱۰<sup>-۹</sup>۰۱، در طول شبانهروز به دو زیر لایه F1 و F2 تقسیم می گردد. زیر لایه

F1، ارتفاع ۲۲۰۰km 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 ۲۲۰km یا در زیر لایه F2 قرار می گیرد [۳-۲].

امواج رادیویی، از لایههای مختلف جو مانند تروپوسفر<sup>\*</sup>، استراتوسفر<sup>\*</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].

<sup>\*</sup> رايانامه نويسنده مسئول: razavismj@mut.ac.ir

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Recombination

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Troposphere

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Stratosphere

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 [۲-۶] بر اساس مباحث مذکور، بدیهی است که مشخصههای اصلی یونسفر، تحت تأثیر عوامل زمانی (چرخه لکه خورشیدی، فصلی و روزانه) و مکانهای جغرافیایی بهشدت ناپایدار میباشند. به طور مثال در شکل (۱) ناپایداری چگالی الکترون در زمانها و لایههای مختلف یونسفر ارائهشده است [۱-۱–۸].

۵٠



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 می شود.

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 [۱۲–۱۱].

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 اندازه گیری مشخصات مطلوب آنتنهای گرمایش یونسفر ارائهشده است. درواقع تمرکز اصلی این مقاله، تعیین مشخصههای موردنیاز برای ایجاد یک ناحیه بازتاب کننده مصنوعی از طریق گرمایش یونسفر است.

در بخـش ۲، کاربردهـای لایـه یونسـفر درزمینـه ارتباطـات رادیویی بیانشده است. در بخش ۳، ناحیه بازتابکننده مصنوعی

یونسفر به طور کامل موردبررسی قرار گرفته است. در بخشهای ۴ و ۵، روابط ریاضی بر گرفته از مطالعات نظری و تجربی مقالات مختلف درزمینه شکست الکتریکی توسط امواج رادیویی ارائه شده است. در بخشهای ۶ و ۷، نتایج محاسبات عددی با مقالات مربوطه مقایسه شده است.

## ۲- یونسفر درزمینه ارتباطات رادیویی

امواج رادیویی با عبور از لایههای یونسفر دارای بازتاب<sup>۲</sup> یا شکست<sup>۲</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 میکنند.

خاصیت بازتابی یا شکست لایههای یونسفر، در شرایط جوی و زمانی مختلف (سالانه، روزانه و ساعتی) تغییر می کند؛ 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>6</sup>، جذب<sup>6</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 مهم ترین 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 شامل کاربردهای دیگری مانند اختلال در ارتباطات ماهوارهای نحوه ایجاد اختلال در ارتباطات ماهوارهای [۱۶] نیز است. شکل (۲) استفاده از تضعیف، پراکندگی<sup>۱۰</sup> و جذب امواج رادیویی نشان میدهد [۱۴].

<sup>8</sup> Heating

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Reflection

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Refraction

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Line-of-sight

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Attenuation

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Absorption

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Injection of chemical vapors

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Artificial ionospheric

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Scatter

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Plasma



شکل (۲). اختلال در ارتباطات ماهوارهای و راداری دشمن [۱۱] در بخش ۳، مباحث مربوط به ایجاد بازتاب کنندههای مصنوعی در یونسفر، به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۳- بازتاب کننده های مصنوعی در یونسفر (AIM)

مفهوم بازتاب کننده های مصنوعی یونسفر یا <sup>۲</sup> AIM، شامل استفاده از دستگاه های تولید کننده امواج رادیویی با توان بسیار بالا و مبتنی بر زمین<sup>۲</sup> است که باعث ایجاد نواحی یونیزه (بازتاب کننده) در جو می شوند. این نواحی یونیزه، علاوه بر حذف ناپایداری های طبیعی یونسفر، می توانند 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>۲</sup> را ارائه می کند.



شکل (۳). ایجاد ناحیه AIM توسط رویکرد پرتو متقاطع [۱۱] فرض اولیه AIM مبتنی بر این حقیقت است که الکترونهای آزاد براثر 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

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

مشکل اصلی سامانههای راداری فراافق نگر (<sup>\*</sup>OTH) در بازتاب امواج رادیویی توسط ناحیه یونسفر، ناپایداری مشخصههای آن بر اساس تغییرات جوی و رویدادهای طبیعی مانند تشعشعات خورشیدی<sup>4</sup> و طوفانهای ژئومغناطیسی<sup>\*</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 تولیدشده است.



ل (۱). ارتباعات نفطه به نفطه توسط ناخیه بارناب طلبان منطوعی یونسفر [۱۱]

AIM می تواند در بهبود توانایی های رادار فراافق نگر نیز مؤثر عمل کند. تغییرات زمانی چگالی الکترون در لایه یونسفر، موجب کاهش سطح اطمینان نظارت های هوایی سامانه های فراافق نگر می شود [۱۸] رادارهای مبتنی بر AIM، علاوه بر رفع محدودیت های 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> کوچک تر نیز میباشند[ ۱۷] در شکل (۵) نمایی از موارد مذکور ارائه شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Artificial ionospheric mirror

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ground-based

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Crossed beam

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Over the horizon

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Solar flares

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Geomagnetic Storm

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Aurora

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Cross section



#### AIM مشخصههای عملکرد ناحیه

ناحیه AIM توسط تشعشعات الکترومغناطیسی پرتوان در لایه D یونسفر (ارتفاع ۹۰km (۶۰-۹۰) ایجاد می گردد. سطح یونیزاسیون در ناحیه MIM تا اندازه ۱۰۰<sup>۷</sup>e/cm<sup>3</sup> (۱۰<sup>-۸</sup> افزایش مییابد. در این حالت یک ناحیه یونیزاسیون مصنوعی، برای بازتاب امواج رادیویی در محدوده فرکانسی AIM ۲۵-۵ تشکیل میشود. به طور 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 ۱۲۰۰km-۲۰۰ بر روی سطح زمین است.
  - ۲) ناحیه پوشش ۳۶۰<sup>°</sup> در صفحه افقی<sup>۱</sup>
- ۳) زاویه بین پرتو و سطح زمین<sup>۲</sup> کم<sup></sup>تر از <sup>۱</sup>۰۰ برای ارتفاع ۶۵–۸۰km
  - ۴) کنترل قطبش مناسب
- ۵) عملکرد در محدوده فرکانس بالا<sup>۳</sup> و خیلی بالا<sup>†</sup> (تا فرکانس ۹۰MHz)
- ۶) کاهش وابستگی به پدیده شفق قطبی در بخشهای نظارتی
- ۲) ارائه عملیات پایدار در زمان افزایش فعالیت لکههای خورشیدی<sup>6</sup> و سایر تخریبهای یونسفری
- ۸) مدتزمان معمول تشکیل AIM حدود ۵۰ms و
   مدتزمان خنکسازی آن کمتر از ۰/۱ms

رادارهای AIM بهصورت چند ایستگاهی<sup><sup>2</sup> هستند. درواقع این نوع رادارها میتوانند از چندین فرستنده و گیرنده برای افزایش ناحیه پوشش و شناسایی اهداف در چند جهت مختلف استفاده کنند.</sup>

#### AIM -۲-۳ ملاحظات ارتفاع تشكيل ناحيه

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 می گیرند. بر اساس مباحث مشروحه در این بخش، اثبات می شود که اکثر مطالعات در زمینه تشکیل ناحیه AIM و مباحث مرتبط با یونیزاسیون، در محدوده ارتفاع ۹۰km انجام شده است.

## ۳-۲-۱- طول عمر

بر اساس مباحث فیزیک پلاسما، میزان چگالی الکترون که در ارتفاع ۵۰km 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 می گردد.

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 بازتاب کننده امواج رادیویی عمل کند؛ بنابراین، بر اساس کاربرد در برخی مواقع نیازی به افزایش طول عمر ناحیه MIA 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 ۲۰k۳، بیشتر از ۲۵/۵ تعیینشده است.

#### AIM المات جذب ناحيه يونيزه

به منظور تعیین تلفات جذب در بازتاب امواج رادیویی توسط ناحیه AIM، ضریب بازتاب<sup>۹</sup> محاسبه می شود. بر اساس نتایج محاسبات عددی در مقاله [۲۱]ضریب بازتاب در ارتفاعات پایین تر کاهش می یابد. از طریق مقایسه ضرایب بازتاب امواج رادیویی برای ۳ ارتفاع تشکیل ناحیه یونیزه AIM (ارتفاع ۸۰km برای ۳ راتفاع ۲۲/۵km می شود که کوچک ترین ضریب بازتاب، به ترتیب برای ارتفاع ۶۱km ،۶۱km است.

بـه طـور خلاصـه ناحیـه AIM، بایـد در ارتفـاع ۶۵-۸۰km تشکیل شود تا برای کاربردهای راداری و سامانههای ارتباطی بـه طور مؤثر عمل کند.

Azimuth

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Grazing angle

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> High Frequency

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Very High Frequency

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Sun spot <sup>6</sup> Multi Stat

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Multi Static

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Collision frequency

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Attachment

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Reflection Cefficient

#### AIM المحيد تشكيل AIM

ناحیه یونیزه اولیه تشکیل شده توسط پرتوهای گرم کننده، ممکن است دارای اندازه مطلوب نباشند؛ زیرا بهره آنها مقدار بزرگی است. بهمنظور گسترش ناحیه یونیزاسیون AIM از روشهای متنوع اسکن الکترونیکی به صورت عمودی و افقی استفاده می شود که اطلاعات کامل تر در مقاله [۶] ارائه شده است.

#### ۴- شكست الكتريكي

مطالعات نظری و تجربی گستردهای در زمینه شکست الکتریکی توسط امواج رادیویی صورت پذیرفته است؛ اما در تشکیل ناحیه یونیزه AIM، باید یک شکست الکتریکی بهصورت قابل کنترل 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 می شود. روابط مورداستفاده، بر گرفته از مقاله [۲۲] است.

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

ازنظر کیفی، شکست الکتریکی زمانی ایجاد می شود که میدان الکتریکی ریزموج، باعث تشعشع نور مرئی شود. ازنظر کمی، دو تعریف ارائه شده است. بر اساس تعریف اول، زمانی شکست الکتریکی ایجاد می شود که نسبت چگالی الکترون نهایی به اولیه برابر با ۱۰<sup>۸</sup> باشد.

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

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

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

f در رابطه (۲)، فرکانس موج گرمکننده است. انـدازه چگـالی الکترون اولیه در رابطه (۲) برابر با ۱ در نظر گرفتهشده است.

۵- نرخ يونيزاسيون

در آزمایشهای شکست ریزموج در فضای آزاد، چگالی

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.

$$\frac{dN_e}{dt} = (v_i - v_a - v_d)N_e \tag{7}$$

۷ ، ۷ و ۷ 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 الکتریکی، ثابت در نظر میگیرند، بنابراین، رابطه (۳) بهصورت (۴) بیان میشود.

$$N_e(t_f) = N_e(t_0)e^{\nu\tau} \tag{(f)}$$

در رابطه (۴) اندازه  $N_e(t_0)$ ،  $v_i$ - $v_a$ - $v_d$  چگالی الکترون در (۴) ابتدای پالس (t = t\_0) و T مدتزمان پالس رادیویی (t - t<sub>0</sub>) است. رابطه (۴) را میتوان بهصورت (۵) یا (۶) نیز بیان نمود.

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

$$\frac{v_{net}}{P} = \frac{1}{P\tau} ln \left\{ \frac{N_e(t_f)}{N_e(t_0)} \right\} + \frac{v_d}{P}$$
(7)

P در رابطه (۶)، اندازه فشار گاز جو است. با جایگذاری رابطه (۱) یا (۲) در (۶) و ناچیز در نظر گرفتن نرخ پراکندگی، می وان میدان الکتریکی و طول پالس را به صورتی تغییر داد که شکست الکتریکی ایجاد شود و سپس Vnet/P را اندازه گیری نمود.

## ۵-۱- نظریه اندازه گیری نرخ یونیزاسیون

باتوجهبه عدم شناخت کامل نحوه توزیع سرعت الکترون، باید از دادههای تجربی برگرفته از ضریب یونیزاسیون ( $\alpha$  با واحد اندازه گیری <sup>1-</sup>cm) و سرعت انحراف<sup>†</sup> الکترون ( $v_d$ ) استفاده نمود. با استفاده از  $\alpha$ ،  $v_d$  و رابطه (Y)، میتوان نرخ یونیزاسیون را محاسبه نمود.

$$v_{net} = \alpha V_d \tag{Y}$$

E/P ضریب یونیزاسیون α، برای طیف گستردهای از E/P ضریب یونیزاسیون α، برای طیف گستردهای از Ξ میدان (Volt/cm.Torr) توسط پژوهشگران اندازه گیری شده که در آن عمیدان الکتریکی و P فشار گاز است. روابط (۸) و (۹)، بیشترین تطبیق را با دادههای ضریب یونیزاسیون دارند به صورتی که محدوده E/P بین ۹۴ تا ۱۰۰۰ است.

<sup>4</sup> Drift

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Continuous wave (CW)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Critical density

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Diffusion



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 اندازه گیری شکست الکتریکی ریزموج در فضای آزاد نیز استفاده نمود؛ بنابراین، میدان مؤثر یا E<sub>e</sub> باید جایگزین میدان الکتریکی جریان مستقیم در روابط (۱۲) و (۱۳) شود. ارتباط بین میدان الکتریکی مؤثر E<sub>e</sub> و میدان E<sub>rms</sub> در رابطه (۱۴) بیان شده است.

$$E_e = E_{rms} \left( \frac{v_m^2}{v_m^2 + \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

۷m در رابطه (۱۴)، فرکانس برخورد برای انتقال نیروی جنبشی توسط الکترونها به مولکولهای موجود در جو است و ۵ اندازه فرکانس موج گرمکننده است.

اندازه فرکانس برخورد الکترون با ذرات خنثی (v<sub>m</sub>) در ناحیه D یونسفر، بهصورت ثابت و ۲<sup>۹</sup> ۲۰ × ۵/۳ است.

## ۶- الزامات تشكيل ناحيه يونيزه AIM

ناحیه یونیزه AIM توسط تشعشعات الکترومغناطیسی با توان بالا ایجاد میشود. در این بخش یکروند محاسبات عددی مربوط به الزامات تشکیل ناحیه AIM مانند اندازه ERP<sup>7</sup>، فرکانس گرمکننده، ارتفاع تشکیل ناحیه یونیزاسیون و ... ارائه می گردد.

#### 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 <sup>6</sup> e/cm<sup>3</sup> باشد. بر اساس رابطه (۶)، با تغییر فشار جو و طول پالس، میتوان نرخ یونیزاسیون (V<sub>net</sub>)را محاسبه نمود. در شکل (۸)، نتایج محاسبات عددی برای طول پالس 4μs-۵ و فشار جو ۲۰/۰۰۵۰۲۰۲ ارائهشده است.

$$\frac{a}{P} = 16e^{(-359E)} \quad 1000 \ge \frac{b}{P} \ge 120 \tag{9}$$

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

$$V_d = 6 \times 10^6 + 2.3 \times 10^5 \frac{E}{P} \quad 54 \le \frac{E}{P} \le 120 \tag{(1.1)}$$

$$V_d = 3.38 \times 10^6 (\frac{E}{p})^{\frac{1}{2}} \quad 120 \le \frac{E}{p} \le 3000 \tag{11}$$

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

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

$$54 \le \frac{E}{P} \le 120$$
(17)

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

$$120 \le \frac{E}{P} \le 3000$$
(17)

در مقاله [۲۲] اندازه  $V_{net}/P$  بر اساس E/P (محدوده ۵۵ تا

۲۰۰) اندازه گیری شده است. نتایج محاسبات عددی روابط (۱۲) و (۱۳) و نتایج مقاله [۲۲] در شکل (۶) مقایسه شده است.



اگر در رابطه (۶)، اندازه  $\ln\{\frac{N_e(t_f)}{N_e(t_0)}$  به صورت ثابت و برابر با ۱۸/۴ در نظر گرفته شود، با استفاده از روابط (۶)، (۱۲) و (۱۳) می توان اندازه E/P را بر اساس P۲ محاسبه نمود. در شکل (۷) مقادیر E/P بر تغییرات P۲ ترسیم شده است و با نتایج اندازه گیری شده در مقاله [۲۴] مقایسه شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Direct Current (DC)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Effective radiated power



شکل (۸). محاسبه نرخ یونیزاسیون (V<sub>net</sub>) بر اساس تغییرات طول پالس و فشار جو

## ۶-۲- ميدان الكتريكي مؤثر

اگر فشار جو (P)در ارتفاع ۶۵km بهصورت ۱۲orr و طول پالس نیز ۱µs در نظر گرفته شده باشد، اندازه نرخ یونیزاسیون پالس نیز  $\frac{1}{P}$  در نظر  $\frac{1}{Torr} \frac{1}{sec}$  موثر ( $\frac{V_{net}}{P}$ ) حدود  $\frac{1}{Torr} \frac{1}{sec}$  ۱/۸۴ است. میدان الکتریکی مؤثر ( $e_{e}$ )، بر اساس روابط (۲۱) و (۱۳) برابر با ۱۷/۵۷/cm است.

اگر فرکانس برخورد بین الکترون و ذرات خنثی برابر ۵/۳×۲۰<sup>۷</sup> و فرکانس موج گرمکننده ۱۰MHz در نظر گرفته شود، ۳۸ V/cm (E<sub>0</sub>)، اندازه میدان الکتریکی اولیه (۱۴)، اندازه بر اساس رابطه (۱۵)، اندازه چگالی توان (S) در فضای آزاد، برابر با ۳۸/۳ kW/m<sup>2</sup> است.

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

#### 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 ۳۸/۳kW/m<sup>2</sup> و ارتفاع هدف ۶۵km در نظر گرفته شود، بر اساس رابطه (۱۶) اندازه ERP برابر با ۱۵۳dBW است.

$$S = PG\left(\frac{|A|^2}{4\pi}\right) = PG\left(\frac{1}{4\pi R^2}\right) = ERP\left(\frac{1}{4\pi R^2}\right)$$
(19)

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

## ۶-۴. فرکانس موج گرمکننده

۶۰–۹۰km اندازه چگالی الکترون یونسفر در محدوده ارتفاع ۲۰–۹۰km اندازه چگالی الکترون یونسفر در محدوده ارتفاع ۲۰ $^{
m v}$  e/cm<sup>3</sup> بین ۱۰ $^{
m v}$  e/cm<sup>3</sup> است. بر اساس مقاله بین [10]می توان با استفاده از رابطه  $f_p \approx 8980 \sqrt{n_e}$  یا (۱۷)،

فركانس پلاسما را بر اساس چگالی الكترون محاسبه نمود.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e \times e^2}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times m_e}} \tag{1V}$$

n<sub>e</sub> نشاندهنده چگالی الکترون، e بار الکترون و mi.دازه جرم الکترون را تعیین می کند؛ بنابراین، محدوده فرکانس پلاسما بر اساس رابطه (۱۷)، بین ۲MHz تا ۱۰MHz قرار دارد. حداکثر تعامل بین امواج رادیویی و لایههای یونسفر، زمانی صورت می پذیرد که فرکانس امواج رادیویی، اختلاف اندکی با فرکانس پلاسما لایههای یونسفر داشته باشند؛ بنابراین، فرکانس عملیاتی آنتن گرم کننده، باید نزدیک به فرکانس پلاسما لایه D یونسفر باشد (۲-۱۰MHz).

## 8-4- محدوده فركانس قابل بازتاب

اگر فرکانس امواج ارتباطی رادیویی بیشتر از فرکانس پلاسما ناحیه یونسفر مصنوعی باشد، از آن ناحیه عبور میکنند و درنتیجه ارتباط از طریق ناحیه یونسفر مصنوعی با شکست مواجه می شود. حد بالا فرکانس موج قابل بازتاب از طریق ناحیه یونسفر مصنوعی، بر اساس اندازه چگالی الکترون تعیین می شود. به طور مثال، اگر چگالی الکترون در ارتفاع ۶۵km برابر با ۲۰<sup>6</sup>e/cm<sup>3</sup> باشد، بنابراین بر اساس رابطه (۱۷)، حداکثر فرکانس قابل بازتاب توسط ناحیه یونیزه ۹۰MHz است. حد پایین فرکانس موج قابل بازتاب توسط ناحیه یونسفر مصنوعی، بر اساس فرکانس پلاسما طبیعی یا اولیه محاسبه می شود که در ارتفاع ۶۵km تقریباً ۲MHz است. به طورکلی، محدوده فرکانسی قابل بازتاب توسط ناحیه یونسفر مصنوعی ۳–۳۰است.

## ۷- نتایج محاسبات عددی

بر اساس مباحث مشروحه در بخش ۶٬ نمایی اجمالی از روند محاسبات در شکل (۹) ارائهشده است. ابتدا باید نسبت چگالی الکترون نهایی به اولیه موردنیاز ایجاد شکست الکتریکی در نظر گرفته شود که در این مقاله  $^{1}$  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 (W) و فرکانس موج گرمکننده (0) محاسبه می گردد. درنهایت اندازه چگالی توان (S) و ERP موردنیاز، بر اساس میدان الکتریکی اولیه تعیین می شوند.

در شکل (۱۰) نتایج محاسبات عددی بر اساس فرکانس موج گرمکننده و ارتفاعهای مختلف ارائهشده است. نسبت چگالی الکترون نهایی به اولیه <sup>۱</sup>۰۴ و طول پالس ۱µs در نظر گرفتهشده

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 گرفتهشده است.



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



شکل (۱۰). اندازه ERP موردنیاز آنتن گرم کننده

در مقاله [۲۶] از روش دیگری محاسباتی برای تخمین اندازه ۶۵km موردنیاز، جهت تشکیل ناحیه یونیزه در ارتفاع ERP استفادهشده است. در این مقاله اندازه <u>(Ne(to</u> برابر با ۱۰<sup>°</sup>e/cm<sup>3</sup> در نظر گرفتهشده است. در شکل (۱۱)، مقایسه اجمالی بین نتایج مقاله [۲۶] و روش محاسبات عددی ارائهشده است.



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 قابل کنترلی در مشخصههای یونسفر ایجاد نمود. مهمترین کاربرد ایجاد تغییرات در یونسفر، تشکیل ناحیه بازتاب کننده 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 فراافق یا بهبود عملکرد سامانههای راداری استفاده نماید. بهمنظور تشکیل ناحیه AIM در ارتفاع ۶۵km (ناحیه D یونسفر) باید سطح یونیزاسیون تا اندازه ۱۰<sup>6</sup>/e/cm<sup>3</sup>

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 می شوند. یکی از مشخصههای مهم در طراحی آنتنهای گرمکننده، اندازه ERP است. یک روند 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 ۱۵۳طBW تعیین شد. صحتسنجی روش اندازه گیری ERP، از طریق مقایسه نتایج محاسبات با مقاله [77]

### 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

[2] A. V. Gurevich, "Nonlinear effects in the ionosphere," Physics-Uspekhi, vol. 50, no. 11, pp. 1091–1121, Nov. 2007. https://doi.org/10.1070/PU2007v050n11ABEH006212 No. AD-A-234289/7/XAB; APTI-5005, ARCO Power Technologies, Inc., Washington, DC (United States), 1990.

[20] R. E. LeLevier, "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.; MohseniArmaki, 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 EISCAT," 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.; Kazeminia, 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, Andreĭ 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,