

بررسی تحریک و انتشار امواج الکترومغناطیس باند فرکانسی بسیار پایین در ناحیه نزدیک به سطح زمین

علیرضا محمودیان^{۱*} و محمدجواد کلایی^۱

۱. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۲/۱۶، پذیرش نهایی: ۹۷/۱۰/۱۱)

چکیده

تحریک و انتشار امواج الکترومغناطیسی در باندهای فرکانسی بسیار پایین در جو زمین، کاربردهای بسیاری در زمینه‌های مختلف، از جمله فیزیک فضا، ارتباطات رادیویی و پیش‌نشانگری زلزله دارد. لذا این طیف فرکانسی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. با توجه به پیچیدگی‌های بسیار زیاد، مطالعه و بررسی تحریک این نوع امواج الکترومغناطیسی همواره مشکل بوده است. هدف از این پژوهش بررسی تحریک امواج رادیویی در طیف فرکانسی بی‌نهایت پایین (Ultra Low Frequency (300 Hz to 3 kHz)) ULF و (Extremely Low Frequency (3 to 30 Hz)) ELF در بازه فرکانسی ۳ هرتز تا ۳ کیلوهرتز، و طیف فرکانسی خیلی پایین (Very Low Frequency (3 to 30 kHz)) VLF در بازه فرکانسی ۳ تا ۳۰ کیلوهرتز در لایه E یون‌سپهر، در ارتفاع ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتری از سطح زمین می‌باشد. در این تحقیق از روش‌های عددی، برای تحریک جریان الکتریکی، و ایجاد آنتن مجازی در لایه پلاسما برای تولید امواج VLF استفاده شده است. همچنین تحریک لایه پلاسما و تغییر میزان ضرایب هدایت با استفاده از امواج الکترومغناطیسی باند فرکانسی بالا (High Frequency) HF مورد بحث قرار گرفته است. مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق شامل قوانین ماکسول و ضرایب رسانایی لایه یون‌سپهر می‌باشد که در نوع خود منحصر بفرد است. این مدل تغییرات لایه یون‌سپهر بر روی انتشار امواج ارسالی، و همچنین تحریک امواج ثانویه را از طریق ترکیب ضرایب هدایت با قوانین ماکسول شبیه‌سازی می‌کند، به طوری که زمان انجام محاسبات تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که آنتن‌های زمین پایه در باند فرکانسی ELF دارای بازدهی بسیار خوبی بوده و می‌توانند جایگزین مناسبی برای ایجاد این امواج توسط فرستنده‌های قوی باند HF که به گرم‌کننده لایه بالای جو معروف هستند، باشند. همچنین نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان نفوذ موج پالسی در لایه یون‌سپهر کمتر از ۱۰ کیلومتر در فرکانس ۱۰۰ هرتز بوده و امواج تحریکی دارای سرعت انتشار در حدود ۱۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه می‌باشند. میزان نفوذ امواج الکترومغناطیسی در جو زمین با افزایش فرکانس ارسالی به طیف فرکانسی خیلی پایین VLF به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انتشار امواج الکترومغناطیس، ناوبری رادیویی، ارتباط مخابراتی، آنتن فضایی مجازی.

۱. مقدمه

در باند فرکانسی بسیار پایین (VLF) و با نام امگا در دهه ۱۹۷۰ ایجاد شد. باند فرکانسی ده تا چهارده کیلوهرتز طبق توافق بین‌المللی به این پروژه اختصاص داده شد. یکی از ویژگی‌های بارز این سیستم قابلیت فعالیت در تمام شرایط آب و هوایی می‌باشد که باعث تمایز این سیستم از سایر سیستم‌ها می‌شد و شامل هشت ایستگاه فرستنده زمینی در سراسر جهان بود (ویلکس و همکاران، ۱۹۸۷). اولین سیستم ناوبری پیشنهادی، سیستم هایپرولیک بر اساس روش اختلاف فاز بود. این سیستم با مدولاسیون سینوسی با فرکانس حدود چهارده کیلوهرتز عمل می‌کرد و توسط آزمایشگاه ملی نیروی دریایی آمریکا و با نام

تحریک و انتشار امواج الکترومغناطیسی در باند فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۳۰ کیلوهرتز همواره مورد توجه محققین بوده است. از کاربردهای مهم این باند فرکانسی می‌توان به کاربردهای مخابراتی، ناوبری و همچنین حوزه‌های پیش‌نشانگری اشاره کرد. لذا این مقاله ضمن معرفی کاربردها و سیستم‌های فرستنده موجود در این بازه فرکانسی، با توجه به محدودیت‌های روش‌های متداول به بررسی یک روش نوین می‌پردازد. (الیسون و پاپاداپولوس، ۲۰۰۹)

ایجاد سیستم ناوبری رادیویی به دوران پس از جنگ جهانی دوم بازمی‌گردد. سیستم ناوبری رادیویی اولین بار

رادوکس ساخته شد. سیستم رادوکس در باند فرکانسی LF (Low Frequency (30 kHz-300 kHz)) و سیستم امگا با یکدیگر ترکیب شدند و این سیستم تحت عنوان رادوکس-امگا و در فرکانس ۱۰/۲ کیلوهرتز اولین بار مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به عدم موفقیت این طرح، نهایتاً تصمیم به استفاده از سیستم امگا گرفته شد.

در سیستم امگا موقعیت مکانی ایستگاه‌های زمینی طوری قرار گرفته‌اند که هر گیرنده زمینی در هر نقطه کره زمین حداقل سیگنال ارسالی از هشت فرستنده VLF را دریافت کند. هر فرستنده از تکنیک سیگنال پیوسته استفاده می‌کند. در یک بازه زمانی ده ثانیه همه ایستگاه‌های زمینی تمام فرکانس‌ها تخصیص داده شده را پوشش می‌دهند. سیگنال‌های ارسالی با دوره‌های تناوب ۰/۹۰، ۱، ۱/۱، و ۱/۲ ارسال می‌شوند. لازم به ذکر است در هر بازه زمانی هیچ دو فرستنده‌ای در یک فرکانس ثابت ارسال نخواهند داشت. هدف از این طراحی، تمایز بین سیگنال ارسالی از ایستگاه‌های زمینی توسط گیرنده و تعیین دقیق موقعیت می‌باشد. گیرنده اختلاف فاز بین سیگنال دریافتی را محاسبه می‌کند. تا زمانی که گیرنده در فاصله یکسان از دو گیرنده قرار دارد، اختلاف فاز سیگنال دریافتی یکسان خواهد بود. لذا با تغییر موقعیت مکانی و نزدیک شدن به یکی از فرستنده‌ها و از روی اختلاف فاز سیگنال دریافتی موقعیت گیرنده قابل تعیین خواهد بود. قابلیت تعیین موقعیت مکانی در بازه‌های مکانی ۸ مایلی با توجه ایجاد صفحات هم‌فاز امکان پذیر خواهد بود. با توجه به این که نسبت به اختلاف مکانی بین دو فرستنده، تعداد صفحات مکانی هم‌فاز با فاصله ۸ مایلی وجود خواهند داشت و تعیین دقیق موقعیت مکانی ملزم به داشتن اطلاعات بیشتر است. یکی از روش‌های کاهش این مشکل استفاده از فرکانس‌های مختلف توسط فرستنده‌ها می‌باشد، به طوری که فرکانس‌های ارسالی مضاربی از یکدیگر می‌باشد. با این روش ابتدا موقعیت مکانی گیرنده بین دو خط هم‌فاز در فرکانس بالاتر تعیین شده، سپس موقعیت گیرنده بین دو صفحه هم‌فاز با فاصله کمتر و با استفاده

از فرکانس پایین‌تر تعیین می‌شود. لازم به ذکر است تغییرات لایه یونسپهر و اثر آن بر انتشار امواج VLF با توجه به فصل، سال و زمان در روز به صورت دستی محاسبه شده و بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده اعمال می‌شود تا محل دقیق گیرنده محاسبه شود و خطای احتمالی حذف شود. با توجه به هزینه بسیار بالای ساخت و نگهداری این سیستم‌های فرستنده و همچنین با عملیاتی شدن سیستم ناوبری GPS (Global Positioning System) در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی، سیستم ناوبری امگا به طور کامل برچیده شد. با توجه به محدودیت‌های سیستم GPS در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی جهت راه‌اندازی مجدد سیستم ناوبری رادیویی باند VLF و با هزینه پایین آغاز شده است که هدف این تحقیق نیز می‌باشد.

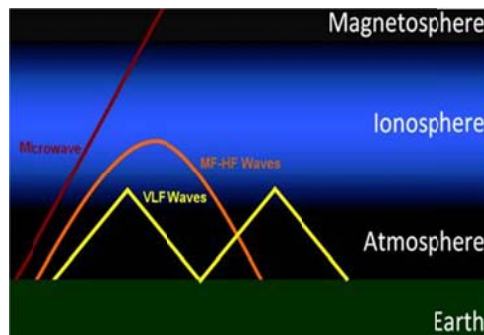
روش جدید تحریک امواج باند فرکانسی VLF/ELF در سال‌های اخیر با استفاده از فرستنده‌های زمینی بسیار قوی در باند فرکانسی بسیار بالا (HF) مورد مطالعه گسترده قرار گرفته‌اند. در این روش امواج الکترومغناطیس در باند فرکانسی بالا و با مدولاسیون پیچیده به لایه پلاسما در لایه E (۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتری از سطح زمین) ارسال شده و با تحریک الکتروجت، امواج ثانویه در باند فرکانسی بسیار پایین تحریک می‌شوند. دو الکتروجت غالب شامل جریان‌های الکتریکی در ناحیه نزدیک به سطح زمین وجود دارد: یکی در نواحی قطبی (شمال و جنوب زمین)، و دیگری در نواحی استوایی. این جریانات توسط الکترون‌های آزاد و در ارتفاع ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتری از سطح زمین شکل می‌گیرند. امواج ارسالی HF در ناحیه پلاسمایی، جریان‌های الکتریکی طبیعی در این ناحیه را مدوله کرده و این جریان‌های الکتریکی به صورت یک آنتن دوقطبی ثانویه عمل کرده و امواج الکترومغناطیس ELF و VLF را تولید می‌کنند. الکتروجت شامل جریان‌های الکتریکی در لایه E در یونسپهر جریان دارند.

یکی از کاربردهای امواج الکترومغناطیس در باند

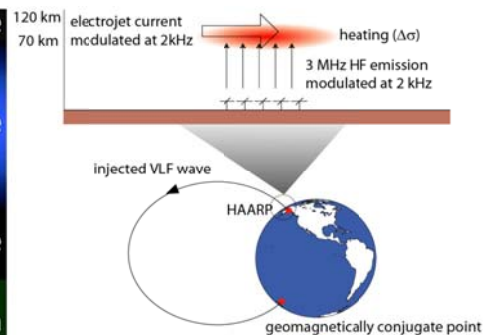
الکترومغناطیس باند HF را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در این روش امواج قوی الکترومغناطیسی در باند فرکانسی HF (ارسال شده توسط فرستنده

زمینی) باعث مدولاسیون جریان‌های طبیعی ناحیه الکترومغناطیسی می‌شود. این پیشرفت بزرگ از آن جهت قابل اهمیت می‌باشد، که تحریک و ایجاد این امواج الکترومغناطیسی در باند فرکانسی بسیار پایین نیازمند استفاده از یک آنتن چند کیلومتری است که عملاً غیر ممکن است. این امواج الکترومغناطیسی از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند، به طوری که می‌توان به ارتباط رادیویی با زیردریایی‌ها، تعیین وضعیت کمربند تشعشی زمین و آرام کردن آن اشاره کرد (کوهن و همکاران، ۲۰۱۲). فرستنده‌های زمینی قوی در باند HF به هارپ (High Frequency Active Auroral Research Program, HAARP)، آیسکت (European Incoherent Scatter facility, EISCAT)، سورا (Sura) در عرض‌های جغرافیایی بالا و اروسیبو (Arecibo) در عرض جغرافیایی میانی محدود می‌شود. متأسفانه هزینه بسیار بالای این روش باعث محدودیت استفاده از آن شده است. در این تحقیق امکان جایگزینی این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرکانس پایین و بسیار پایین، کاهش اثرات مخرب کمربند تابشی زمین می‌باشد. در کمربند تابشی زمین الکترون‌های با انرژی بسیار بالا بین دو قطب مغناطیسی شمالی و جنوبی زمین در ناحیه جو بالا (ارتفاع حدودی ۱۰۰۰ کیلومتر) در حال حرکت می‌باشند. افزایش بیش از حد انرژی الکترون‌های آزاد در این ناحیه در اثر شرایط جوی فعال (طوفان‌های خورشیدی) و یا تحرکات انسانی در نواحی قطبی باعث افزایش شدت انرژی این الکترون‌های آزاد می‌شود. مطالعات و آزمایشات نشان داده‌اند که این سطح از انرژی توسط الکترون‌های آزاد در کمربند تشعشی زمین می‌تواند به نابودی کامل تجهیزات ماهواره‌های عبوری از این ناحیه شود. تحقیقات اخیر نشان داده است که تحریک امواج پلاسما در طیف فرکانسی پایین می‌تواند در واکنش با کمربند تشعشی زمین منجر به رهاسازی الکترون‌های پر انرژی شود. لذا دانشمندان حوزه آزمایش‌های فضایی در سال‌های اخیر به روشی دست یافته‌اند که می‌تواند این جریان‌های الکتریکی طبیعی در لایه یونسپهر زیرین را با استفاده از سیگنال ارسالی HF توسط فرستنده قوی زمینی، مدوله کرده و یک آنتن طبیعی برای تحریک امواج الکترومغناطیسی باند ELF و VLF در جو زمین ایجاد کنند (کوهن ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، a, b, c). شکل ۱ میدان‌های الکتریکی طبیعی در لایه



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) نحوه تحریک امواج الکترومغناطیس باند فرکانسی ELF و VLF با استفاده از مدولاسیون جریان‌های الکتریکی طبیعی در لایه الکترومغناطیسی توسط فرستنده قوی زمینی باند HF و در عرض جغرافیایی بالا (ب) نحوه انتشار امواج الکترومغناطیسی باند فرکانسی خیلی پایین در موجبر هدایتی تشکیل شده بین لایه یونسپهر و جو زمین (کوهن و همکاران ۲۰۱۰، b, c). و c).

عددی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مقدار هدایت هال در ارتفاع ۹۰ تا ۱۲۰ کیلومتر غالب بوده و در ارتفاعات بالاتر از ۱۲۰ کیلومتر ضریب هدایت پدسون دارای مقدار بیشینه می‌باشد. محیط شبیه‌سازی فاصله ای به طول ۶۰۰۰ کیلومتر را در راستای افق پوشش می‌دهد. میدان مغناطیسی ناشی از یک آنتن دو قطبی افقی بر روی سطح زمین و در ناحیه E از جو زمین به صورت زیر می‌باشد.

$$B_{0,ant}(x, y, z, t) = B_{0,ant}(t) \frac{z\hat{a}_x - x\hat{a}_z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (1)$$

دو سیگنال پالس کوتاه و سیگنال پیوسته سینوسی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. سیگنال پالسی به صورت زیر تعریف شده که در آن زمان‌های t_1 و t_2 به ترتیب زمان آغاز و پایان سیگنال ارسالی می‌باشند.

$$B_{ant} = B_{0,ant} e^{-(t-t_1)/2Dt} \quad t < t_1$$

$$B_{ant} = B_{0,ant} \quad t_1 < t < t_2 \quad (2)$$

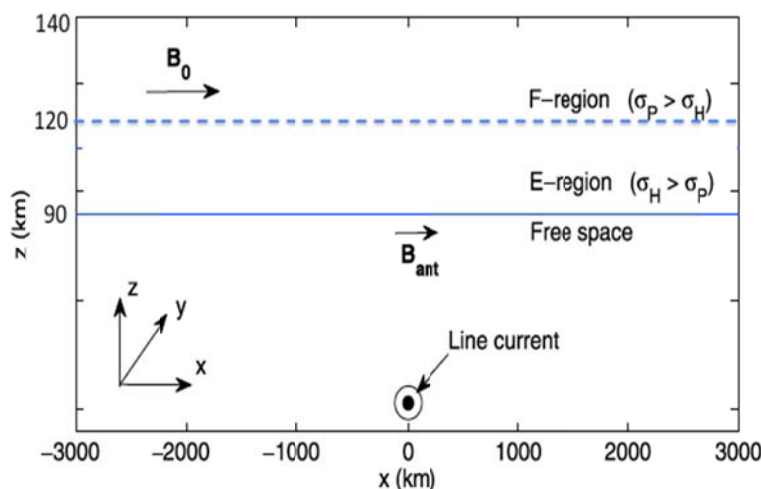
$$B_{ant} = B_{0,ant} e^{-(t-t_2)/2Dt} \quad t > t_2$$

پارامتر Dt مدت‌زمان افزایش و یا کاهش سیگنال را مشخص کرده و در شبیه‌سازی‌ها در حدود ۱۰ میلی‌ثانیه تا ۰/۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

با توجه به هزینه نسبتاً بالا و دسترسی محدود در این روش، در این تحقیق روش جایگزین جهت تحریک این نوع امواج در عرض‌های جغرافیایی پایین و نزدیک به خط استوا مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش با استفاده از یک آنتن دو قطبی زمینی افقی و یا عمودی و جریان الکتریکی در حدود ۶۰۰ آمپر، امواج تحریکی اولیه به لایه یونسپهر فرستاده می‌شوند. با توجه به فرکانس پایین این امواج و میزان هدایت موازی بالا (Parallel Conductivity) در لایه E یونسپهر، این امواج به لایه‌های بالای یونسپهر نفوذ کرده و باعث ایجاد یک جریان ثانویه شده در ارتفاع ۹۰ تا ۱۲۰ کیلومتری می‌شوند. این امواج ثانویه به صورت یک آنتن مجازی در لایه یونسپهر عمل کرده و باعث ایجاد و انتشار امواج الکترومغناطیسی در باند فرکانسی بسیار پایین و بی‌نهایت پایین می‌شوند. لازم به ذکر است هر چه میزان نفوذ امواج الکترومغناطیسی ارسالی از زمین در لایه یونسپهر بیشتر باشد، آنتن مجازی ایجاد شده قوی‌تر خواهد بود. در قسمت بعد، مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق، جهت بررسی تحریک و انتشار امواج الکترومغناطیسی در باند فرکانسی ۱۰۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. تشریح روش شبیه‌سازی

شکل ۲ نمای دو بعدی از ساختار محیط شبیه‌سازی



شکل ۲. محیط شبیه‌سازی عددی در دو بعد شامل آنتن زمین پایه و لایه یونسپهر در جو زمین متشکل از ناحیه E و F.

است، به دست می آید (الیسون و پاداپولوس ۲۰۰۹؛ مستر و او مان، ۱۹۸۳).

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times [\bar{\rho} \cdot (\nabla \times B)] \quad (7)$$

مقادیر مقاومت (Resistivity) در رابطه فوق، بر حسب ضرایب هدایت به صورت زیر قابل تعریف می باشند.

$$\rho_{\parallel} = 1/\sigma_{\parallel}, \quad \rho_P = \frac{\sigma_P}{(\sigma_P^2 + \sigma_H^2)}, \quad \rho_H = \frac{\sigma_H}{(\sigma_P^2 + \sigma_H^2)} \quad (8)$$

برای ساده سازی روابط از تغییرات مقادیر ضرایب مقاومت در راستای افق صرف نظر شده است. با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای فوق در راستای Z، تغییرات زمانی سه مؤلفه میدان مغناطیسی در راستای X، Y و Z به صورت زیر قابل نوشتن خواهند بود.

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu_0} \left[\rho_H \left(\frac{\partial^2 B_x}{\partial y \partial x} - \frac{\partial^2 B_x}{\partial y \partial z} \right) + \rho_P \left(\frac{\partial^2 B_y}{\partial y \partial x} - \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_P \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial z} \right)] - \frac{\partial}{\partial z} [\rho_H \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial z} \right)] \right] \\ \frac{\partial B_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_0} \left[\rho_H \left(\frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial z} \right) + \rho_P \left(\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial y} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_{\parallel} \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_{\parallel} \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \right] \\ \frac{\partial B_z}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu_0} \left[\rho_H \left(\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial y} \right) - \rho_P \left(\frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial z} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\rho_{\parallel} \frac{\partial^2 B_y}{\partial y \partial z} \right) - \left(\rho_{\parallel} \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

جداسازی روابط فوق برای حل عددی در راستای Z با استفاده از روش جداسازی محدود در حوزه زمان و مکان صورت خواهد گرفت. به طور مثال مشتق مرتبه دوم در راستای Z با استفاده از این روش و جداسازی مرکزی مرتبه دوم به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\frac{\partial^2 B_z(x, y, i\Delta z)}{\partial z^2} = \frac{B_z(x, y, (i+1)\Delta z) - 2B_z(x, y, i\Delta z) + B_z(x, y, (i-1)\Delta z)}{(\Delta z)^2} \quad (10)$$

لازم به ذکر است مشتق سایر مؤلفه های میدان مغناطیسی با همین روش قابل محاسبه است. با توجه به متناوب در نظر گرفتن ساختار محاسباتی در راستای X و Y، محاسبات در این دو راستا با روش تبدیل فوریه صورت

میدان مغناطیسی ناشی از آنتن دو قطبی لایه پایینی محیط مورد نظر در شبیه سازی عددی با استفاده از رابطه فوق به دست می آید. در مدل اولیه همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است میدان مغناطیسی زمین ثابت و در راستای افقی در نظر گرفته شده است. میدان الکتریکی در یونسپهر با چگالی جریان های الکتریکی از طریق رابطه اهم به یکدیگر مرتبط می شوند که به صورت زیر نوشته می شود.

$$\begin{bmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_P & -\sigma_H \\ 0 & \sigma_H & \sigma_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

در این رابطه، ماتریس دوم از سمت راست شامل مقادیر هدایت موازی، پدرسون و هال می باشد. ضرایب هدایت موازی، پدرسون، و هال به ترتیب از روابط زیر به دست می آیند.

$$\begin{aligned} \sigma_{\parallel} &= \varepsilon_0 \frac{\omega_{pe}^2}{v_{en}} \\ \sigma_P &= \varepsilon_0 \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_{ce}} \left[\frac{v_{en} \Omega_{ce}}{\Omega_{ce}^2 + v_{en}^2} + \frac{v_{in} \Omega_{ci}}{\Omega_{ci}^2 + v_{in}^2} \right] \\ \sigma_H &= \varepsilon_0 \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_{ce}} \left[\frac{\Omega_{ce}}{\Omega_{ce}^2 + v_{en}^2} + \frac{\Omega_{ci}}{\Omega_{ci}^2 + v_{in}^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

با توجه به این که پارامترهای فرکانس چرخش الکترون ها حول میدان مغناطیسی، فرکانس برخورد با ذرات خنثی و فرکانس رزونانس پلاسما تابعی از ارتفاع می باشند، ضرایب هدایت با ارتفاع نیز تغییر می کنند.

طبق قانون آمپر با استفاده از چگالی جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی القایی به صورت زیر قابل تعریف می باشد.

$$\nabla \times B = \mu_0 j \quad (5)$$

تغییرات زمانی میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی القایی نیز بر اساس قانون فارادی به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (6)$$

با استفاده از سه رابطه فوق و جایگزینی میدان الکتریکی، رابطه مستقل زیر که نشان دهنده تغییرات میدان مغناطیسی

بدین ترتیب شرایط مرزی بر روی هر یک از طول موج‌ها (عدد موج (Wavenumber)) برای میدان مغناطیسی در راستای Z به صورت زیر اعمال می‌شود.

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} - |k_x| B_z = \frac{\partial B_{z,ant}}{\partial z} - |k_x| B_{z,ant} \quad (11)$$

مؤلفه میدان مغناطیسی در راستای Y برای اعمال شرایط مرزی بر روی مرز، صفر در نظر گرفته شده است. روش حل و جداسازی رابطه فوق به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{B_{z,2} - B_{z,1}}{\Delta z} - |k_x| B_{z,1} = \frac{\partial B_{z,ant}}{\partial z} - |k_x| B_{z,ant} \quad (12)$$

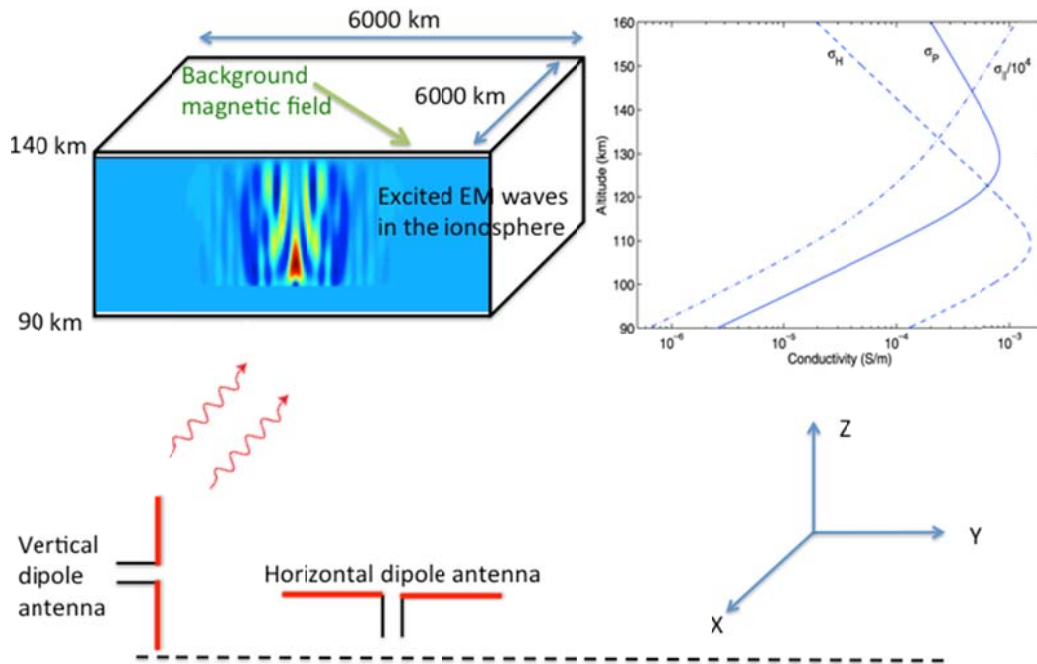
لازم به ذکر است که میدان تشعشعی آنتن فرستنده در فضای آزاد به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$B_{free\ space} = (B - B_{ant})_{z=z_0} e^{-|k_x|(z-z_0)} + B_{ant} \quad (13)$$

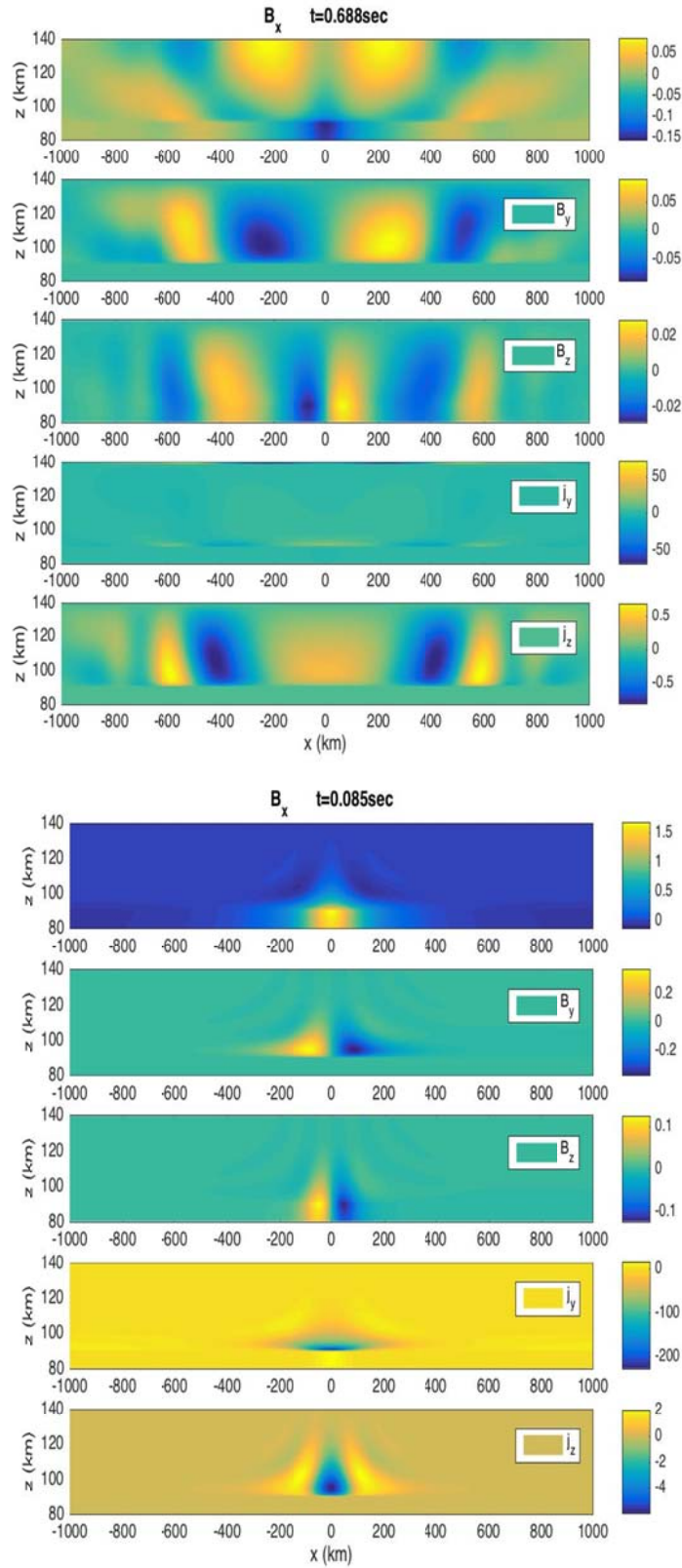
در رابطه فوق z_0 ، ۹۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. شکل ۴ محیط شبیه‌سازی عددی را در سه بعد، تغییرات ضرایب هدایت سه‌گانه با ارتفاع، و منبع تشعشع زمینی شامل آنتن دو قطبی افقی و عمودی را نشان می‌دهد.

خواهند گرفت. در این روش مؤلفه میدان مذکور ابتدا توسط تبدیل فوریه به آن حوزه منتقل شده، سپس مشتق‌گیری در حوزه فوریه انجام می‌شود و سرانجام با استفاده از فوریه معکوس مؤلفه میدان به حوزه مکان بازگردانده می‌شود.

شرایط مرزی بین محیط فضای آزاد (ارتفاع کمتر از ۹۰ کیلومتر) و محیط پلاسما با اعمال شرایط مرزی بر میدان مغناطیسی صورت می‌گیرد. لذا شرایط مرزی با فرض پیوسته بودن مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی Bz و همچنین مشتق آن نسبت به راستای Z بر روی مرز و مؤلفه‌های افقی میدان الکتریکی Ex و Ey می‌باشد. در مدل محاسباتی با توجه به متناوب بودن ساختار در راستای X، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی برای محاسبه شرایط مرزی ابتدا در راستای X با استفاده تبدیل فوریه به آن حوزه تبدیل شده، شرط مرزی مورد نظر اعمال و سپس با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به حوزه اولیه بازگردانده می‌شوند. با استفاده از روش جداسازی اجزای فوریه در راستای X، به صورت جمع اجزا متناسب با ترم $\exp(x k_x i)$ عدد موج مورد نظر در راستای X می‌باشد) قابل نوشتن هستند.



شکل ۳. محیط شبیه‌سازی عددی در سه بعد، تغییرات ضرایب هدایت سه‌گانه با ارتفاع، و منبع تشعشع زمینی شامل آنتن دو قطبی افقی و عمودی.



شکل ۴. امواج تحریکی ثانویه در لایه یونسپهر و در ارتفاع ۹۰ تا ۱۲۰ کیلومتر. سه مؤلفه میدان مغناطیسی B در راستای x ، y ، و z در این شکل نشان داده شده است. جریان‌های الکتریکی تحریکی توسط موج پالسی ارسالی از سطح زمین.

۳. نتایج و بحث

با توجه به آزمایش‌های فضایی که اخیراً با استفاده از امواج قوی الکترومغناطیس در باند فرکانسی بالا برای ایجاد امواج الکترومغناطیس در باند فرکانسی ELF و VLF، صورت گرفته است، در شبیه‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق اثر دو موج ارسالی پالسی و پیوسته بر روی تحریک امواج ثانویه مورد بررسی قرار گرفته است. موج پالسی مورد استفاده در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$I = 450 e^{-\frac{(t-0.05)^2}{2D_t^2}} \quad t < 0.05 \text{ sec}$$

$$I = 450 \quad 0.05 < t < 0.15 \text{ sec} \quad (14)$$

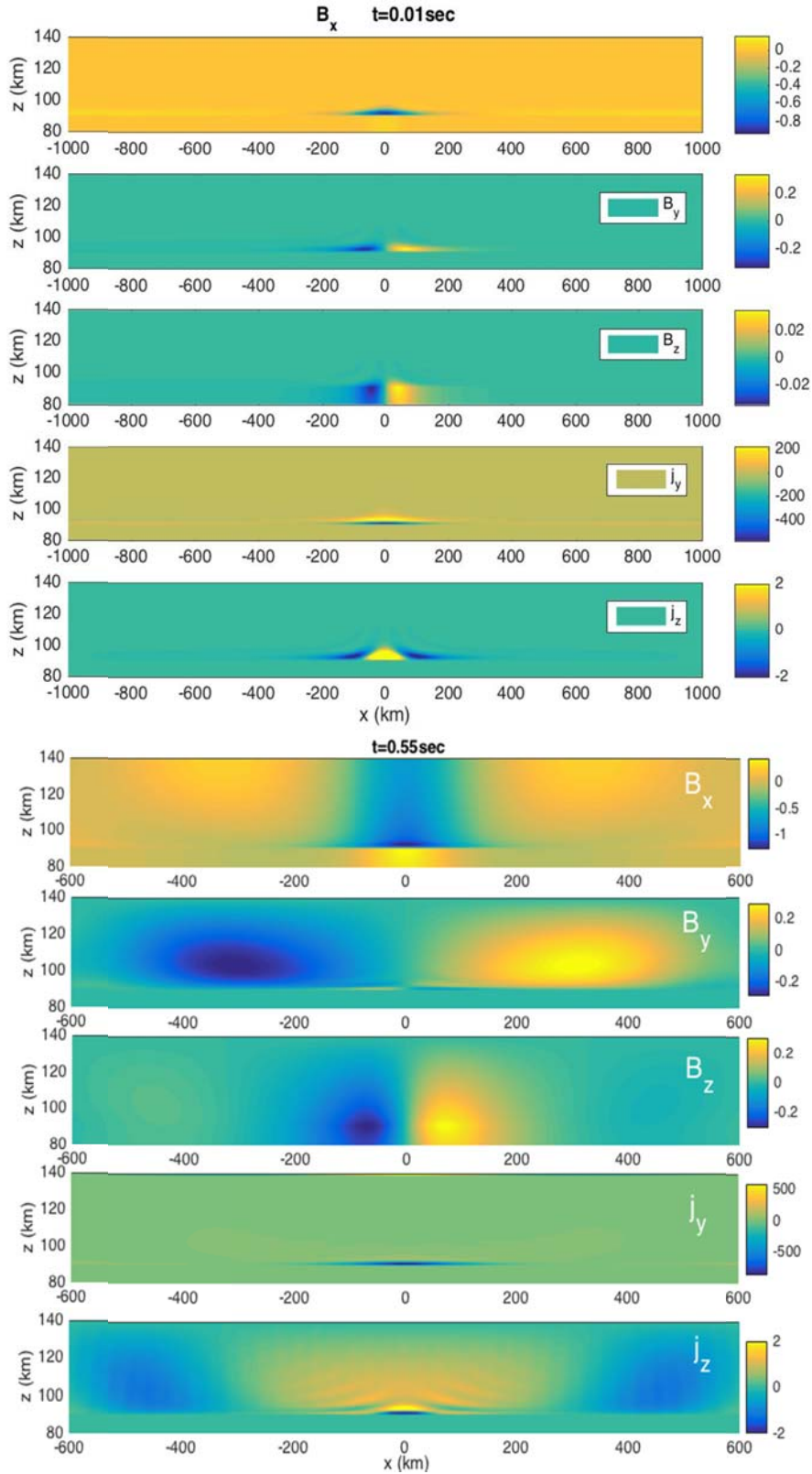
$$I = 450 e^{-\frac{(t-0.15)^2}{2D_t^2}} \quad t > 0.15 \text{ sec}$$

همان‌طور که در روابط فوق نشان داده شده است، سیگنال پالس ارسالی دارای مدت‌زمان ۰/۱۵۰ ثانیه بوده و در مدت‌زمان ۰/۰۵ ثانیه به مقدار حداکثر ۴۵۰ آمپر می‌رسد. پالس مورد استفاده ساده و بدون هرگونه مدولاسیون می‌باشد. شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی با استفاده از سیگنال پالس را در دو زمان ۰/۰۸۵ و ۰/۶۸۸ از شروع شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. سه مؤلفه میدان مغناطیسی B در راستای x، y، و z در این شکل نشان داده شده است. محیط شبیه‌سازی در راستای افق نسبت به عرض جغرافیایی میانی تا ۳۰۰۰ کیلومتر در راستای شمال و جنوب را پوشش داده و در راستای قائم از سطح زمین تا ارتفاع ۱۴۰ کیلومتر گسترش می‌یابد. محیط شبیه‌سازی در راستای افق جهت انجام محاسبات عددی به ۱۰۰۰ نقطه و در راستای قائم ۱۰۰ نقطه در فاصله ۹۰ تا ۱۴۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. لذا میزان دقت در راستای افق ۶ کیلومتر و در راستای عمود ۰/۵ کیلومتر می‌باشد. برای ساده‌سازی محاسبات از حل معادلات بخش ۲ جهت تعیین دامنه میدان و بررسی تغییرات در ناحیه خلاء و در ارتفاع کمتر

از ۹۰ کیلومتری خودداری شده است.

مؤلفه جریان الکتریکی در راستای افقی y و در بازه زمانی ۴۰ میلی‌ثانیه به حداکثر مقدار خود ۳۰۰ میلی‌آمپر می‌رسد. از مهم‌ترین نتایج این شبیه‌سازی می‌توان به عمق نفوذ جریان‌های تحریکی در راستای قائم اشاره کرد. در این حالت جریان تحریکی در راستای قائم z در بازه مکانی ۹۰ تا ۱۳۵ کیلومتری شکل می‌گیرد. این جریان تحریکی قائم با دامنه حداکثری ۲ میلی‌آمپر در نقش یک آنتن فضا پایه با طول ۴۵ کیلومتری عمل می‌کند و قابلیت تحریک امواج الکترومغناطیس متناسب با فرکانس سیگنال ارسالی را دارد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، امواج تحریکی دارای طول موج ۲۵۰ کیلومتر بوده و در بازه زمانی تقریبی حدود ۰/۷ ثانیه در فاصله مکانی ۱۰۰۰ کیلومتری منتشر می‌شوند. لازم‌به‌ذکر که دامنه امواج هلیکانی تحریکی پس از انتشار در حدود ۸۰۰ کیلومتری با ضریب ۲ کاهش می‌یابد. لذا این روش و سیگنال پالسی در تحریک ELF در لایه یون‌سپهر کاملاً موفقیت‌آمیز است.

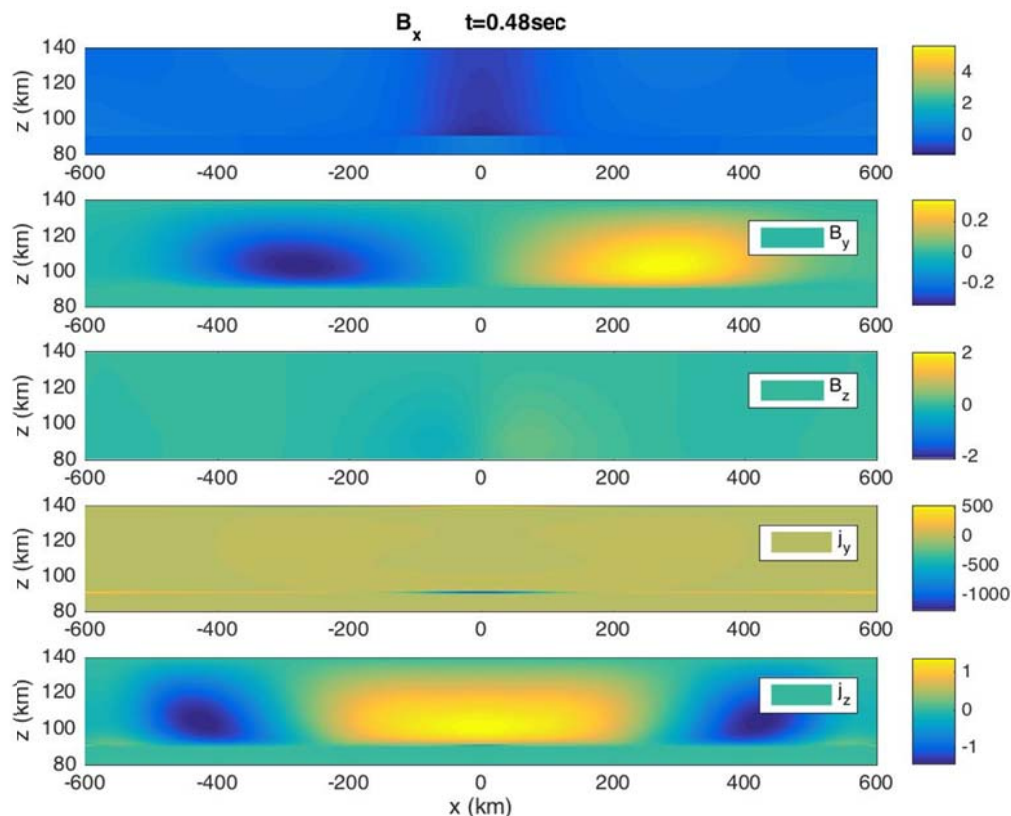
همان‌طور که ذکر شد، بررسی امکان و بازدهی تحریک امواج الکترومغناطیس باند VLF در لایه یون‌سپهر یکی از اهداف این تحقیق می‌باشد. بدین منظور شبیه‌سازی با استفاده از موج متناوب پیوسته و سینوسی و با فرکانس ۱۰۰ هرتز و ۱ کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ امواج الکترومغناطیس تحریکی در لایه یون‌سپهر زیرین توسط آنتن دو قطبی زمینی موج پیوسته با فرکانس ۱۰۰ هرتز در دو زمان ۰/۰۱ و ۰/۵۵ ثانیه از شروع شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. میزان نفوذ موج ارسالی در این حالت به کمتر از ۱۰ کیلومتر کاهش می‌یابد. در نتیجه موج تحریکی ثانویه در مقایسه با سیگنال پالسی ضعیف‌تر خواهد بود. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که سرعت انتشار موج در دو حالت قابل مقایسه می‌باشد.



شکل ۵. امواج الکترومغناطیس تحریکی در لایه یونسفر زیرین توسط آنتن دایبل زمینی موج پیوسته با فرکانس ۱۰۰ هرتز در دو زمان ۰/۱ و ۰/۵۵ ثانیه از شروع شبیه‌سازی.

تحقیقات نشان داده‌اند، ارسال امواج الکترومغناطیسی در باند فرکانسی بالا HF باعث افزایش دمای الکترون‌های آزاد و همچنین تغییر میزان هدایت در این ناحیه می‌شود (بورستو و استاب، ۱۹۹۷؛ لیستکی و همکاران، ۱۹۹۶). تغییرات فرکانس برخورد با ذرات خنثی نیز باعث تغییر ضرایب هدایت در بازه‌های زمانی کوتاه می‌شود. تغییرات ضرایب هدایت پدرسون و هال را پس از ۱۰۰ ثانیه گرم کردن لایه یونسپهر با استفاده از امواج باند HF قابل ملاحظه بوده که می‌تواند منجر به افزایش نفوذ امواج باند VLF در جو زمین و تحریک امواج ثانویه شود. لذا این روش ترکیبی برای ایجاد امواج الکترومغناطیسی توسط آنتن فضا پایه و با فرکانس ۱ تا ۳۰ کیلوهرتز مناسب می‌باشد.

شکل ۶ امواج الکترومغناطیس تحریکی در لایه یونسپهر زیرین توسط آنتن دو قطبی زمینی موج پیوسته با فرکانس ۱ کیلوهرتز در زمان ۰/۴۸ ثانیه از شروع شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج نشان داده شده در این شکل مشخص است، میزان نفوذ در لایه یونسپهر در این حالت به شدت کاهش یافته است و به کمتر از ۳ کیلومتر می‌رسد. حداکثر دامنه جریان الکتریکی تحریکی در راستای قائم z نیز در این حالت به ۱ نانوآمپر می‌رسد که در مقایسه با نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۴ و ۵ بسیار ضعیف می‌باشد. لذا بازدهی روش مذکور در ایجاد سیگنال الکترومغناطیسی در طیف فرکانسی خیلی پایین و محدوده بالاتر از ۱ کیلوهرتز بسیار کاهش می‌یابد.



شکل ۶. امواج الکترومغناطیس تحریکی در لایه یونسپهر زیرین توسط آنتن دایبل زمینی موج پیوسته با فرکانس ۱ کیلوهرتز در زمان ۰/۴۸ ثانیه از شروع شبیه‌سازی.

۴. خلاصه و نتیجه‌گیری

نحوه تحریک و انتشار امواج الکترومغناطیس در لایه یونسپهر زیرین و در باند فرکانسی ۳ هرتز تا ۳ کیلوهرتز (ELF) و باند فرکانسی ۳ تا ۳۰ کیلوهرتز (VLF) در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. روش تحریک امواج الکترومغناطیس توسط آنتن دو قطبی زمین پایه و در عرض جغرافیایی استوایی به‌عنوان یک روش‌جایگزین و ارزان برای سایر روش‌های رایج در این مطالعه در نظر گرفته شده است. در این روش، امواج ارسالی از زمین ضمن نفوذ به لایه یونسپهر و تأثیر بر الکترون‌های آزاد موجود در این لایه، جریان‌های الکتریکی ثانویه ایجاد کرده که با توجه به‌میزان هدایت بالای این ناحیه، این جریان‌ها می‌توانند در ارتفاع ۹۰ تا ۱۲۰ کیلومتری از سطح زمین گسترش پیدا کنند. این جریان‌های الکتریکی در نقش یک آنتن ثانویه عمل می‌کنند که قابلیت ایجاد امواج الکترومغناطیس در باند فرکانسی مورد نظر را دارند.

نتایج اولیه این تحقیق نشان می‌دهد که آنتن‌های زمین پایه در باند فرکانسی ELF دارای بازدهی بسیار خوبی بوده و می‌توانند جایگزین مناسبی برای ایجاد امواج توسط فرستنده‌های قوی باند HF (Ionospheric Heating) که به گرم‌کننده لایه بالای جو معروف هستند، باشند. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد، میزان نفوذ موج پالسی در لایه یونسپهر در حدود ۱۰ کیلومتر در فرکانس ارسالی ۱۰ هرتز بوده و امواج تحریکی دارای سرعت انتشار در حدود ۱۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه می‌باشند. مقایسه این نتایج با نتایج تحقیقات گذشته توسط الیسون و پاپاداپولوس (۲۰۰۹) در فرکانس ۱۰ هرتز نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس ارسالی میزان نفوذ امواج به‌میزان بسیار بالایی کاهش می‌یابد. لذا کاهش محدوده ارتفاع جریان‌های تحریکی در لایه یونسپهر بازدهی این روش را جهت ایجاد آنتن مجازی در جو زمین و برای تحریک امواج الکترومغناطیس در طیف فرکانسی پایین

مورد استفاده در کاربردهای مختلف از جمله پیش‌نشانگری زلزله کاهش می‌دهد. با توجه به کاربرد باند فرکانسی VLF در ناوبری رادیویی، بازدهی تحریک این امواج با استفاده از آنتن دو قطبی زمینی و در عرض جغرافیای استوایی مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور شبیه‌سازی عددی برای دو سیگنال متناوب با فرکانس‌های ۱۰۰ هرتز و ۱ کیلوهرتز انجام شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی موج ارسالی متناوب و با فرکانس ۱۰۰ هرتز به‌طور تقریبی کمتر از ۱۰ کیلومتر در ناحیه یونسپهر نفوذ کرده و قابلیت تحریک امواج هلیکانی در باند ELF را دارد. مقایسه امواج تحریکی در باند فرکانسی ELF و با استفاده از سیگنال پالسی و سیگنال متناوب نشان می‌دهد که امواج هلیکان تحریکی توسط سیگنال پالسی دارای بازدهی بیشتر می‌باشند. افزایش فرکانس سیگنال متناوب به ۱ کیلوهرتز عمق نفوذ را به ۲ تا ۳ کیلومتر کاهش می‌دهد و جریان‌های الکتریکی ثانویه در محدوده ارتفاع کمتری تحریک می‌شوند. امواج تحریک شده الکترومغناطیس در باند فرکانسی متناسب با فرکانس و مدولاسیون سیگنال تحریکی ارسال شده از زمین می‌باشند. در نتیجه امواج تحریکی با افزایش فرکانس تضعیف شده و در باند فرکانسی VLF تغییر ضرایب هدایت به‌صورت موقت می‌تواند بازدهی این روش را افزایش دهد. لازم به ذکر است سیستم‌های پیشرفته باند فرکانس بالا و با قابلیت جابه‌جایی در دانشگاه مریلند آمریکا در حال ایجاد می‌باشند (پاپاداپولوس، ۲۰۱۵). لذا استفاده از این روش به‌منظور ایجاد سیگنال VLF در لایه یونسپهر و برای کاربردهای ناوبری رادیویی نیازمند استفاده از تکنیک‌های دیگر از جمله گرم کردن ابتدایی لایه پلاسما توسط امواج قوی الکترومغناطیس در باند فرکانسی HF و یا استفاده از آنتن دوقطبی زمینی قائم است که در مطالعات آینده مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

مراجع

- Borisov, N. and Stubbe, P., 1997, Excitation of longitudinal (field-aligned) currents by modulated HF heating of the ionosphere, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59, 1973–1989.
- Cohen, M. B., Inan, U. S. and Gołkowski, M., 2008, Geometric modulation: A more effective method of steerable ELF/VLF wave generation with continuous HF heating of the lower ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12101, doi:10.1029/2008GL034061.
- Cohen, M. B., Inan, U. S., Gołkowski, M. and Lehtinen, N. G., 2010a, On the generation of ELF/VLF waves for long-distance propagation via steerable HF heating of the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 115, A07322, doi:10.1029/2009JA015170.
- Cohen, M. B., Inan, U. S., Gołkowski, M. and McCarrick, M. J., 2010b, ELF/VLF wave generation via ionospheric HF heating: Experimental comparison of amplitude modulation, beam painting, and geometric modulation, *J. Geophys. Res.*, 115, A02302, doi:10.1029/2009JA014410.
- Cohen, M. B., Inan, U. S. and Paschal, E. P., 2010c, Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 48(1), 3–17, doi:10.1109/TGRS.2009.2028334.
- Eliasson, B. and Papadopoulos, K., 2009, Penetration of ELF currents and electromagnetic fields into the Earth's equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A10301, doi:10.1029/2009JA014213.
- Lyatsky, W., Belova, E. G. and Pashin, A. B., 1996, Artificial magnetic pulsation generation by powerful ground-based transmitter, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 407–414.
- Master, M. J. and Uman, A. M., 1983, Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole, *Am. J. Phys.*, 51(2), 118–126.
- Papadopoulos, K., 2015, Ionospheric modifications using mobile, high power HF transmitters based on TPM technology, paper presented at 2015 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 24–28 May, Antalya, Turkey.
- Wilkes, O., Nils P. G. and Ingvar, B., 1987. *Loran-C and Omega: a study of the military importance of radio navigation aids.* Oslo; Oxford; New York: Norwegian University Press/Oxford University Press. ISBN 82-00-07703-9.

New Approach of Low-Frequency Electromagnetic Wave Generation in the Near-Earth Environment

Mahmoudian, A.^{1*} and Kalaei, M. J.¹

1. Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 6 May 2018, Accepted: 1 Jan 2019)

Summary

This work presents the study on the electromagnetic wave penetration into the ionosphere in the frequency range of 10 Hz to 3 kHz and 3 kHz to 30 kHz, corresponding to the Extremely Low Frequency (ELF) and Very Low Frequency (VLF) for telecommunication applications and earthquake prediction. The ELF-VLF waves can also be generated through natural phenomena such as lightning as well as pre-seismic activities. The ELF generation before major earthquakes has been reported in several studies. Therefore, having a complete model capable of simulating the ELF waves generation and propagation in the disturbed ionospheric conditions, associated with pre-earthquake activities can be used to save human lives by predicting the exact location of a major earthquake. This study aims at developing a computational model in order to investigate the ELF –VLF wave generation and propagation in the lower ionosphere that can be used as a precursor for seismic events.

Another application of this frequency band is in the radio navigation. The VLF navigation system known as OMEGA was very popular and used for many applications such as navigation of ships, airplanes and also in the land. The system was in use until the late 1990s when it was replaced by Global Positioning Systems (GPS) due to high accuracy and low cost. Very recently, there has been an effort to renew the VLF navigation systems at a low cost. This will require a new approach for VLF wave generation in the ionosphere at a lower cost in comparison with regular transmitters. The efficiency of VLF wave generation in the lower ionosphere using a ground-based dipole antenna in the equatorial region is examined in this study.

In this study, we have shown that transmitted signal from the ground into the ionosphere can generate a current in the lower ionosphere, which may expand up to a few kilometers depending on the ionospheric conductivities and the frequency or modulation of the transmitted signal from the ground. This study investigates the generation of secondary currents and the artificial antenna in the ionosphere in order to develop a new technique for generating these signals for navigation applications. The approach for improving the efficiency of this technique including pre-modulation of the ionosphere using high-power high frequency (HF) signal for modifying the conductivities in the ionosphere is discussed.

The main idea here is to investigate the efficiency of Whistler wave generation in the E region in different ionospheric conditions. Specifically, the effect of pulse and continuous probing of the lower ionosphere with ELF-VLF signals and the generation of secondary waves and currents due to high conductivities are investigated. We have also proposed the application of this model to study the generation and propagation of ELF-VLF signal associated with the earthquake in the disturbed ionospheric conditions. This includes the variation of background ionospheric plasma and its effect on the penetration of the signal in the ionosphere and length scale of the excited currents. This study may be critical to determine the exact location of a major earthquake using the pre-seismic activities such as generation and propagation of ELF waves. The variation of background ionospheric parameters such as electron density and ionospheric disturbances due to pre-earthquake conditions on the excitation and penetration of ELF-VLF waves into the E-region will be investigated in future studies.

Keywords: Radiowave propagation, ELF-VLF wave generation, ionosphere, radio navigation, earthquake prediction.

* Corresponding author:

a.mahmoudian@ut.ac.ir