نشریه پژوهش های نوین فیزیک، جلد ۱۱، شماره ۱، بهار تابستان ۱۴۰۵

تحلیل عددی و ارزیابی تطبیقی اثرات یون‌سپهر و بارش بر انتشار امواج ریزموج در باندهای Ku و Ka

مریم شیراوند[1]، محدثه سربازی [2]، جواد تقی‌زاده فیروزجایی[3]

[1] پژوهشگر پسادکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
[2] دانشجو، دانشکده فیزیک ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، تهران، ایران
[3] *هیئت علمی، دانشکده فیزیک ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۱
تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۸/۱۸

شاپای چاپی: ۲۵۸۸-٤۹۲۱
شاپای الکترونیکی: **۲۵۸۸-۴۹۳x**

* نویسنده مسئول:
Firouzjaee@kntu.ac.ir

Doi:
۱۰,۲۲۰۳٤/jmrph.۲۰۲٦,۱۳۷٤٤۳,۰

چکیده

انتشار سیگنال‌های ماهواره‌ای در باندهای فرکانسی بالا نظیر Ku و Ka به‌شدت تحت تأثیر پدیده‌های جوی در لایه‌های یون‌سپهر و وردسپهر قرار دارد. در این پژوهش، اثرات هم‌زمان یون‌سپهر (چرخش فارادی و تغییر فاز) و بارش (تضعیف سیگنال) بر لینک‌های مخابرات فضایی در دو منطقه جغرافیایی با ویژگی‌های اقلیمی و عرض جغرافیایی متفاوت (تهران و بندرعباس) مورد ارزیابی تطبیقی قرار گرفته است. بدین منظور از داده‌های مدل جهانی یون‌سپهر (IRI)، مدل میدان مغناطیسی (IGRF-۱۳) و داده‌های بازتحلیل جوی ERA۵ به همراه توصیه‌نامه‌های استاندارد اتحادیه بین‌المللی مخابرات (ITU-R) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در باند Ku، تغییر فاز و چرخش فارادی ناشی از یون‌سپهر سهم قابل توجهی در افت کیفیت سیگنال دارند؛ به‌طوری‌که میانگین سالانه تغییر فاز یون‌سپهری در بندرعباس به دلیل نزدیکی به ناهنجاری استوایی یون‌سپهر، بیش از دو برابر تهران ارزیابی شد. با صعود فرکانس به باند Ka، اثرات یون‌سپهری به شدت تضعیف می‌شوند، اما تضعیف ناشی از بارش در وردسپهر به حاکم مطلق افت توان تبدیل می‌گردد. نتایج این ارزیابی تطبیقی، ضرورت به‌کارگیری سیستم‌های تصحیح قطبش را در باند Ku برای مناطق جنوبی کشور اثبات کرده و در عین حال نشان می‌دهد که در باند Ka، طراحی حاشیه لینک باید عمدتاً بر پایه آمار شدت بارش‌های لحظه‌ای منطقه استوار باشد.

واژگان کلیدی: یون‌سپهر، وردسپهر، انتشار امواج ریزموج، دوران فارادی، باندهای Ku و Ka، تضعیف ناشی از بارش.

مقدمه

انتشار امواج الکترومغناطیسی در لینک‌های ماهواره‌به‌زمین به طور مستقیم تحت تأثیر شرایط فیزیکی لایه‌های مختلف جو زمین قرار دارد. یکی از مهم‌ترین این لایه‌ها، یون‌سپهر است که در ارتفاعات تقریبی ۶۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری قرار گرفته و به دلیل حضور الکترون‌ها و یون‌های آزاد، یک محیط پلاسمایی، ناهمسانگرد و پاشنده محسوب می‌شود. وجود این ذرات باردار موجب برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی با محیط شده و می‌تواند سبب تغییر در فاز، سرعت انتشار، زاویه قطبش و دامنه امواج رادیویی شود. این پدیده‌ها به‌ویژه برای سامانه‌هایی که به دقت زمانی و پایداری فاز وابسته‌اند، از جمله سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای، سنجش از دور راداری و ارتباطات ماهواره‌ای پهن باند، اهمیت بنیادین دارند [۱ و ۲].

یکی از پارامترهای کلیدی در توصیف رفتار یون‌سپهر، محتوای الکترونی کل(TEC[۱]) است که نشان‌دهنده تعداد کل الکترون‌های آزاد در امتداد ستون مسیر انتشار موج است. تغییرات زمانی و مکانی TEC در مقیاس‌های روزانه و فصلی، و هم‌چنین در پاسخ به فعالیت‌های چرخه‌های خورشیدی، سبب ایجاد تأخیر زمانی، نوسانات فاز و پدیده دوران فارادی در امواج با قطبش خطی می‌شود [۳]. از آنجا که بر اساس روابط پاشندگی پلاسما، اغلب اثرات یون‌سپهری با معکوس توان‌های فرکانس حامل ($1/f^2$ و $1/f$) متناسب هستند، شدت این اختلالات با جابه‌جایی فرکانس تغییرات چشمگیری می‌یابد [۴].

در سال‌های اخیر، همگام با افزایش تقاضا برای انتقال داده با نرخ‌های بالا و توسعه نسل جدید شبکه‌های ماهواره‌ای، گرایش به استفاده از باندهای فرکانسی بالاتر گسترش یافته است [۵]. در این میان، باند Ku (۱۲ تا ۱۸ گیگاهرتز، با فرکانس کاری مرجع ۱۴ گیگاهرتز) به دلیل پایداری مناسب و فناوری جاافتاده، کماکان کاربرد وسیعی در سامانه‌های ارتباطی و پخش ماهواره‌ای دارد [۶]. در مقابل، باند Ka (۲۶.۵ تا ۴۰ گیگاهرتز، با فرکانس کاری مرجع ۳۰ گیگاهرتز) به دلیل فراهم ساختن پهنای باند بسیار وسیع‌تر و ظرفیت ترافیکی بالاتر، به باندی کلیدی در نسل جدید سامانه‌های ماهواره‌ای با توان عملیاتی بالا مبدل شده است [۷ و ۸].

اگرچه صعود فرکانسی از باند Ku به Ka حساسیت سیگنال به اختلالات یون‌سپهری را به‌طور چشمگیری تقلیل می‌دهد، اما هم‌زمان پنجره انتشار را در معرض اختلالات شدید لایه وردسپهر، به‌ویژه تضعیف ناشی از جذب و پراکندگی امواج توسط قطرات بارش قرار می‌دهد [۹ و ۱۰]. در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ گیگاهرتز، ابعاد قطرات باران به طول‌موج سیگنال نزدیک شده و سبب افت توان محسوس در حاشیه لینک می‌گردد [۱۱].

علی‌رغم پژوهش‌های متعدد در زمینه کانال‌های ماهواره‌ای، در اغلب مطالعات گذشته اثرات یون‌سپهر (مانند دوران فارادی و تغییر فاز) و وردسپهر (مانند تضعیف ناشی از بارش) به‌صورت مجزا تحلیل شده‌اند [۱۲ و ۱۳]، در حالی که سیگنال ارسالی در یک لینک عملیاتی برهم‌کنش هم‌زمان هر دو محیط را تجربه می‌کند. علاوه بر این، ارزیابی این رفتار ترکیبی در کشور ایران که دارای گستردگی عرض جغرافیایی و تنوع اقلیمی چشمگیر است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مناطق جنوبی کشور به دلیل مجاورت با مدار رأس‌السرطان تحت تأثیر پدیده ناهنجاری استوایی یون‌سپهر با مقادیر بالاتر چگالی الکترونی هستند، در حالی که فلات مرکزی رفتاری مشابه عرض‌های میانی دارد؛ ضمن آنکه الگوهای بارش این دو ناحیه نیز کاملاً متمایز است.

در همین راستا، هدف از این پژوهش ارزیابی تطبیقی و تحلیل هم‌زمان اثرات یون‌سپهری و تضعیف ناشی از بارش در طول یک سال کامل (۲۰۲۲) برای دو پهنه اقلیمی متمایز کشور (تهران به‌عنوان نماینده اقلیم نیمه‌خشک در عرض‌های میانی، و بندرعباس به‌عنوان اقلیم ساحلی متأثر از ناهنجاری استوایی) در دو باند بسامدی Ku و Ka است. در این تحلیل، پارامترهای شاخص یون‌سپهر از جمله چگالی و دمای الکترون در ارتفاعات گوناگون با به‌کارگیری مدل مرجع بین‌المللی یون‌سپهر (IRI[۲]-۲۰۲۰) محاسبه شده و همراه با مشخصات میدان ژئومغناطیسی حاصل از مدل IGRF-۱۳[۳] لحاظ گردیده است [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. هم‌چنین جهت دستیابی به برآورد واقع‌بینانه از نرخ بارش سطحی ساعتی، از داده‌های پایگاه بازتحلیل معتبر ERA۵[۴] مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌برد جوی (ECMWF[۵])بهره گرفته شده که دقت آن برای الگوهای بارشی ایران در مطالعات متعددی مورد تأیید قرار گرفته است [۱۶]. در نهایت، نرخ تضعیف بارش بر پایه روابط و توصیه‌نامه استاندارد ITU-R P.۸۳۸[۶] محاسبه و پیاده‌سازی عددی در محیط پایتون انجام شده است تا بینش دقیق و کمّی از رفتار کانال انتشار جهت طراحی بهینه حاشیه لینک در اقلیم‌های مختلف کشور فراهم آید.

[۱] Total Electron Content
[۲] International Reference Ionosphere
[۳] *International Geomagnetic Reference Field* (۱۳th generation)
[۴] ECMWF Reanalysis Version ۵
[۵] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
[۶] International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector

۱- روش تحقیق

انتشار امواج الکترومغناطیسی در لینک‌های ماهواره‌به‌زمین تابع ویژگی‌های محیط انتشار در یون‌سپهر و لایه‌های پایین‌تر جو (به‌ویژه وردسپهر) است. در این مسیر، پدیده‌های یون‌سپهری می‌توانند باعث تأخیر گروهی/تغییر فاز و چرخش صفحه قطبش (دوران فارادی) شوند و پدیده‌های وردسپهری، به‌خصوص بارش، می‌توانند موجب تضعیف، پراکندگی و کاهش نسبت سیگنال به نویز گردند. در باندهای Ku و Ka، اگرچه اثرات یون‌سپهری نسبت به باندهای فرکانسی پایین‌تر معمولاً کوچک‌تر است، اما در شرایط خاص (مانند افزایش فعالیت خورشیدی، تغییرات TEC، یا مسیرهای با زاویه ارتفاع کم) می‌تواند در دقت فازی و قطبشی لینک اثرگذار باشد و همزمان، تضعیف باران در Ka به‌طور معناداری تشدید می‌شود؛ بنابراین بررسی همزمان این دو دسته اثر برای ارزیابی عملکرد لینک ضروری است [۱-۴، ۹-۱۲، ۱۵ و ۱۶].

۱-۱ ساختار یون‌سپهر و محتوای الکترونی کل

یون‌سپهر لایه‌ای یونیزه از جو زمین است که از حدود ۶۰ کیلومتری سطح زمین آغاز شده و تا حدود ۱۰۰۰ کیلومتری امتداد می‌یابد. این ناحیه عمدتاً بر اثر تابش‌های فرابنفش و پرانرژی خورشید یونیزه می‌شود و به سه لایه اصلی D، E و F تقسیم می‌گردد. در کاربردهای مخابرات ماهواره‌ای، ناحیه F به دلیل چگالی بالاتر الکترون‌ها و نقش پررنگ‌تر در تغییرات ضریب شکست پلاسما، اهمیت بیشتری دارد [۱-۴، ۹ و ۱۰].

یکی از مهم‌ترین پارامترها برای توصیف وضعیت یون‌سپهر، چگالی الکترونی است که با N_e و بر حسب m^{-3} بیان می‌شود. این کمیت تابع زمان، مکان جغرافیایی و شرایط فعالیت خورشیدی است [۱-۴ و ۹-۱۱].

برای توصیف اثر تجمعی یون‌سپهر بر انتشار موج، کمیت محتوای الکترونی کل به‌کار می‌رود که تعداد کل الکترون‌های آزاد موجود در یک ستون واحد در امتداد مسیر انتشار را نشان می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱-۳ و۹-۱۱]:

$$TEC = \int N_e\,(l)\,dl \quad (۱)$$

که در آن $N_e(l)$ چگالی الکترونی در طول مسیر انتشار و l طول مسیر است. TEC یکی از شاخص‌های کلیدی در تحلیل اثرات یون‌سپهری بر لینک‌های ماهواره‌ای است، زیرا بسیاری از کمیت‌ها از جمله تأخیر یون‌سپهری و دوران فارادی به آن وابسته‌اند [۱-۳ و۹-۱۱]. در عمل، TEC می‌تواند از داده‌های سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای چندفرکانسی[۷] استخراج شود و همچنین توسط مدل‌های مرجع مانند IRI-۲۰۲۰ برآورد گردد [۹-۱۱ و ۱۶].

۱-۲ ضریب شکست پلاسما و تغییر فاز یون‌سپهری

از منظر فیزیک پلاسما، یون‌سپهر محیطی پاشنده است که ضریب شکست آن به فرکانس موج الکترومغناطیسی و چگالی الکترونی محیط وابسته است. هنگامی که موج الکترومغناطیسی در چنین محیطی منتشر می‌شود، میدان الکتریکی موج موجب نوسان الکترون‌های آزاد شده و این نوسان‌ها بر ویژگی‌های انتشار موج اثر می‌گذارند. در ساده‌ترین مدل برای یک پلاسما بدون برخورد، ضریب شکست محیط از رابطه زیر به دست می‌آید[۱-۴]:

$$n^2 = 1 - \left(\frac{f_{pe}}{f}\right)^2 \quad (۲)$$

که در آن n ضریب شکست محیط، f فرکانس موج الکترومغناطیسی و f_{pe} فرکانس پلاسمایی الکترون‌ها در یون‌سپهر است. فرکانس پلاسمایی نیز از رابطه

$$f_{pe} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (۳)$$

به دست می‌آید که درآن e بار الکترون، m_e جرم الکترون و ϵ_0 گذردهی الکتریکی خلأ است [۱-۴].

در کاربردهای مخابرات ماهواره‌ای، به‌ویژه در باندهای فرکانسی Ku و Ka، معمولاً شرط $f \gg f_{pe}$ برقرار است. در این حالت می‌توان ضریب شکست را با تقریب مرتبه اول به صورت زیر نوشت:

$$n = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{f_{pe}}{f}\right)^2 \quad (۴)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که انحراف ضریب شکست از مقدار واحد متناسب با نسبت N_e/f^2 است. یعنی با

[۷] GNSS

افزایش فرکانس، اثر یون‌ســـپهری کاهش می‌یابد، اما صـــفر نمی‌شود و به وضعیت TEC و مسیر انتشار وابسته می‌ماند [۱-۴ و۹-۱۱].

یکی از پیامدهای مستقیم تغییر ضریب شکست، ایجاد تغییر فاز در موج عبوری است. اگر موجی مسیری به طول L را در محیطی با ضریب شکست n طی کند، تغییر فاز نسبت به حالت انتشار در خلأ به صورت زیر بیان می‌شود [۱-۳]:

$$\Delta\phi = \frac{۲\pi fL}{c}(n-۱) \qquad (۵)$$

و با در نظر گرفتن تغییرات چگالی الکترونی در طول مسیر انتشار و استفاده از تقریب ضریب شکست پلاسما، تغییر فاز تجمعی یون‌سپهری به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta\phi = -\frac{۴۰.۳\times۲\pi}{cf}\,\mathrm{TEC} \qquad (۶)$$

که در آن ضریب عددی متناسب با ثابت‌های فیزیکی محیط پلاسما است. این رابطه نشان می‌دهد که تغییر فاز با مقدار TEC رابطه مستقیم و با فرکانس موج رابطه معکوس دارد. از این رو در شرایط یون‌سپهری مشابه، مقدار تغییر فاز در باند Kuنسبت به باند Ka بزرگ‌تر خواهد بود [۱-۳ و۹-۱۱].

۱-۳ دوران فارادی در پلاسمای مغناطیده

یکی دیگر از اثرات مهم یون‌ســـپهر بر انتشـــار امواج الکترومغناطیسی، پدیده دوران فارادی است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که یک موج با قطبش خطی از محیط پلاســمایی تحت تأثیر میدان مغناطیســـی عبور کند [۱ و ۲]. در چنین شـــرایطی، میدان مغناطیســـی زمین موجب دوشـــکســـتی مغناطیسـی شـده و ضـریب شـکسـت برای دو مؤلفه قطبش دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد متفاوت می‌شود. اختلاف سرعت فاز این دو مؤلفه باعث چرخش صـــفحه قطبش موج در طول مسیر انتشار می‌گردد [۱۲]. زاویه دوران فارادی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Omega_F = \frac{۲.۳۶\times۱۰^{۴}}{f^{۲}}\int N_e B_{\parallel}\, dl \qquad (۷)$$

که در آن $B_{\parallel}$ مؤلفه میدان مغناطیسی زمین در راستای انتشار موج اســـت. همچنین برای ســـادگی در تحلیل‌های عددی مـــــی‌تـــــوان نـــــوشـــــت:

$$\Omega_F = K_F \cdot \mathrm{TEC} \cdot \frac{B_{\parallel}}{f^{۲}} \qquad (۸)$$

که در آن K_F ثابت فیزیکی وابسته به ثابت‌های بنیادی اســـت. این رابطه نشـــان می‌دهد که دوران فارادی به مقدار TEC، مؤلفه میدان مغناطیســـی زمین و عکس مجذور فرکانس وابســـته اســـت. بنابراین در فرکانس‌های پایین‌تر این اثر شـــدیدتر بوده و در باند Ku نســـبت به باندKa مقدار بزرگ‌تری خواهد داشـــت. این پدیده در ســـامانه‌های مخابراتی با قطبش خطی اهمیت دارد، زیرا چرخش صـفحه قطبش می‌تواند به عدم تطابق قطبشـی میان آنتن‌های فرسـتنده و گیرنده و در نتیجه افت توان دریافتی بینجامد [۱۳].

۱-۴ تضعیف ناشی از بارش در باندهای مایکروویو

علاوه بر اثرات یون‌ســپهری، انتشـار امواج در پیوندهای ماهواره‌ای تحت تأثیر پدیده‌های وردســـپهری نیز قرار دارد. در میـان این پـدیـده‌هـا، بـارش یکی از مهم‌ترین عوامل تضـعیف سـیگنال در فرکانس‌های ریزموج، به‌ویژه در فرکانس‌های بالاتر از حدود ۱۰ گیگاهرتز، به‌شـــمار می‌رود. هنگامی که موج ریزموج از ناحیه‌ای بارانی عبور می‌کنـد، قطرات آب با میـدان الکترومغنـاطیســـی موج برهم‌کنش داشـته و سـبب جذب و پراکندگی بخشـی از انرژی آن می‌شوند که در نهایت به کاهش توان سیگنال دریافتی می‌انجامد [۳ و ۴].

در مدل‌های تجربی اســـتاندارد انتشـــار امواج که در توصـــیـه‌نـامـه‌هـای بخش ارتبـاطـات رادیویی اتحـادیـه بین‌المللی مخابرات ارائه شـــده‌اند، تضـــعیف ویژه باران به‌صورت تابعی توانی از شدت بارش مدل می‌شود [۱۵]:

$$\gamma_R = a\,R^{b} \qquad (۹)$$

که در آن γ_R تضعیف ویژه باران بر حسب dB/km، R شـدت بارش بر حسـب mm/h و ضـرایب a و b ضـرایب رگرســـیونی وابســـته به فرکانس کاری، زاویه ارتفاع و قطبش موج هســـتند که مقادیر آن‌ها در توصـــیه‌نامه ITU-R P.۸۳۸-۳مدون شـــده اســـت [۱۵]. با ضـــرب تضـعیف ویژه در طول مؤثر مسـیر انتشـار درون ناحیه بارشی L_{eff} تضعیف تجمعی کل ناشی از بارش (A_{rain}) به‌صورت زیر برآورد می‌شود [۳ و ۱۵]:

$$A_{rain} \approx \gamma_R L_{eff} \qquad (۱۰)$$

وابستگی شدید ضرایب جذب و پراکندگی به طول‌موج سبب می‌شود که اثر تضعیف بارش در باندهای مختلف فرکانسی تفاوت چشمگیری داشته باشد. در باند Ku (فرکانس ۱۴ گیگاهرتز)، هرچند تضعیف باران رخ می‌دهد، اما در اغلب طراحی‌های سیستم با در نظر گرفتن حاشیه توان مناسب قابل جبران است. در مقابل، در باند Ka (فرکانس ۳۰ گیگاهرتز)، به دلیل نزدیک‌تر شدن ابعاد قطرات باران به طول‌موج سیگنال و تشدید پراکندگی، این تضعیف به‌طور چشمگیری جهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در رخدادهای بارشی شدید می‌تواند به افت شدید توان دریافتی یا قطعی موقت پیوند ماهواره‌ای منجر شود. از این‌رو، تضعیف بارش به عنوان یکی از چالش‌های بنیادین در طراحی پیوندهای ماهواره‌ای توان‌بالا در باندهای فرکانسی بالا شناخته می‌شود [۳ و ۷].

۱-۵ ناحیه و بازه زمانی مطالعه

به‌منظور بررسی اثر شرایط محیطی بر انتشار امواج ریزموج ماهواره‌ای، ایستگاه‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که تفاوت‌های اقلیمی و موقعیت جغرافیایی را به تصویر بکشند. در این پژوهش، ارزیابی تطبیقی میان دو ناحیه با ویژگی‌های متمایز اقلیمی و عرض جغرافیایی در ایران انجام شده است: شهر تهران به‌عنوان نماینده ناحیه فلات مرکزی ایران با اقلیم نیمه‌خشک و کوهپایه‌ای انتخاب شده است که الگوهای فصلی بارش در آن می‌تواند بر میزان تضعیف باران در باندهای فرکانسی بالا اثرگذار باشد. در مقابل، ایستگاه بندرعباس در جنوب کشور و در کرانه خلیج فارس برگزیده شده است. این منطقه دارای اقلیم گرم و فوق‌العاده مرطوب ساحلی است و از نظر جغرافیایی در عرض پایین‌تری نسبت به تهران قرار دارد. تفاوت موقعیت جغرافیایی این دو نقطه، امکان سنجش وابستگی اثرات انتشار امواج به عرض جغرافیایی را فراهم می‌سازد [۱ و ۱۱]. علاوه بر این، قرارگیری بندرعباس در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر سبب نزدیکی بیشتر آن به لبه ناهنجاری یون‌سپهری استوایی می‌شود که پیامد مستقیم آن، بالاتر بودن محتوای الکترونی کل نسبت به عرض‌های بالاتر نظیر تهران است [۱ و ۲].

مختصات جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی نقاط مورد مطالعه در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۱: مختصات جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی نواحی مورد مطالعه

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ویژگی اقلیمی
تهران	۳۵/۷° شمالی	۵۱/۴° شرقی	اقلیم نیمه‌خشک، فلات مرکزی
بندرعباس	۲۷/۲° شمالی	۵۶/۳° شرقی	اقلیم گرم و مرطوب، نوار ساحلی جنوبی

از منظر زمانی، بازه بررسی شامل یک سال کامل میلادی (از ژانویه تا دسامبر ۲۰۲۲) است. انتخاب این گستره یک‌ساله، امکان ثبت کامل چرخه‌های فصلی جوی (پدیده‌های بارشی زمستانه و بهاره) و نوسانات فصلی یون‌سپهر را میسر می‌سازد. از سوی دیگر، سال ۲۰۲۲ در فاز صعودی چرخه خورشیدی[۸] ۲۵ واقع شده است که با افزایش تدریجی فعالیت‌های خورشیدی و در نتیجه بالارفتن چگالی الکترونی یون‌سپهر همراه بوده و بستر مناسبی برای بررسی رفتار سیگنال‌های رادیویی در شرایط فعالیت متوسط به بالای خورشیدی فراهم می‌آورد [۹ و ۱۱].

۱-۶ داده‌ها

در این پژوهش از تلفیق داده‌های جوی بازتحلیل و مدل‌های استاندارد یون‌سپهری برای برآورد و ارزیابی تطبیقی شرایط انتشار امواج رادیویی استفاده شده است.

داده‌های جوی از پایگاه بازتحلیل اقلیمی نسل پنجم مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا استخراج شده‌اند [۱۶]. داده‌های ERA° با تفکیک مکانی ° ۰/۲۵ × ۰/۲۵° (حدود ۳۱ کیلومتر) و گام زمانی یک ساعته برای سال ۲۰۲۲ استخراج شدند. از میان

[۸] فاز افزایشی چرخه خورشیدی به بخشی از چرخه تقریباً ۱۱ ساله فعالیت خورشید اطلاق می‌شود که طی آن میزان فعالیت خورشیدی، از جمله تعداد لکه‌های خورشیدی و شدت تابش‌های پرانرژی، به‌تدریج از حالت کمینه به سمت بیشینه افزایش می‌یابد. افزایش تابش فرابنفش خورشید در این دوره موجب افزایش یونش در لایه‌های یون‌سپهر و در نتیجه افزایش چگالی الکترونی و مقدار محتوای الکترونی کل می‌شود که می‌تواند بر انتشار امواج رادیویی در مسیرهای ماهواره‌ای اثرگذار باشد.

متغیرهای موجود در این مجموعه داده، شدت بارش سطحی به‌عنوان ورودی اصلی برای محاسبه تضعیف ناشی از بارش در پیوند ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که هدف محوری پژوهش حاضر، ارزیابی تطبیقی اثرات تضعیف جوی و تحلیل پایداری حاشیه پیوند در دو پهنه اقلیمی کاملاً متفاوت (خشک/کوهستانی در برابر گرم/مرطوب) است و نه واسنجی هواشناسی، یکپارچگی مکانی-زمانی و همگنی پیوسته داده‌های بازتحلیل شبکه‌بندی‌شده نسبت به داده‌های ایستگاهی نقطه‌ای که عموماً دچار گسستگی زمانی و خلأهای آماری هستند، برتری ساختاری بارزی ارائه می‌دهد.

شایان ذکر است که نرخ بارش استخراج‌شده از پایگاه داده ERA۵ بر مبنای تجمیع ساعتی است؛ از این‌رو داده‌های شبکه‌بندی‌شده به دلیل مقیاس مکانی و زمانی، ممکن است در تفکیک رخدادهای همرفتی شدید و رگبارهای محلی فوق‌کوتاه‌مدت، پیک‌های لحظه‌ای بارش را نسبت به بارانسنج‌های زمینی تا حدی هموار نمایند. از منظر طراحی و استانداردهای مخابراتی، توصیه‌نامه‌های ITU-R معمولاً نرخ بارش با درصد فراتروی ۰/۰۱ ٪ از زمان با گام زمانی یک‌دقیقه‌ای را ملاک اصلی قرار می‌دهند؛ بنابراین در این پژوهش، این مقادیر از طریق نگاشت آماری و روابط استاندارد تبدیل مقیاس زمانی به مقادیر معادل تبدیل شده و در مدل تضعیف وارد گشته‌اند تا اثر هموارسازی ساعتی داده‌های بازتحلیل در تخمین حاشیه پیوند کمینه گردد. با این حال، تضعیف‌های محاسبه‌شده در این پژوهش همچنان به‌عنوان کران پایین یا سناریوی محافظه‌کارانه مقایسه‌ای لحاظ می‌گردند. علاوه بر این، بهره‌گیری از داده‌های ERA۵ بر پایه نتایج اعتبارسنجی‌های جامع منطقه‌ای در سطح کشور صورت گرفته است؛ مطالعات متعددی در اقلیم‌های گوناگون ایران (از جمله ایزدی و همکاران [۱۷]، قاجارنیا و همکاران [۱۸] و کاویانی‌ملایری و همکاران [۱۹]) با مقایسه داده‌های ERA۵ با صدها ایستگاه سینوپتیک و بارانسنجی نشان داده‌اند که این پایگاه داده در برآورد الگوهای بارشی و وقوع روزهای بارانی (با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۵ در بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌ها) از پایایی و همخوانی آماری بالایی برخوردار است. بنابراین، داده‌های مذکور مبنایی یکنواخت، استاندارد و معتبر برای تحلیل مقایسه‌ای عملکرد سیستم‌های مخابراتی میان دو اقلیم یادشده فراهم می‌سازند.

به‌منظور برآورد پارامترهای یون‌سپهر، از مدل استاندارد بین‌المللی مرجع یون‌سپهر استفاده شده است [۹]. این مدل تجربی با بهره‌گیری از شاخص فعالیت خورشیدی $F_{10.7}$ و موقعیت مکانی-زمانی، توزیع عمودی چگالی الکترونی $N_e(h)$ و محتوای الکترونی کل را استخراج می‌کند. همچنین برای تخمین دوران فارادی، مؤلفه میانگین میدان مغناطیسی زمین در امتداد مسیر انتشار در گستره جغرافیایی ایران برابر با حدود ۴×۱۰^{-۵} تسلا در نظر گرفته شد [۱ و ۲].

به‌منظور جداسازی اثرات اقلیمی و یون‌سپهری دو ناحیه و پرهیز از تداخل متغیرهای هندسی مداری، زاویه ارتفاع ماهواره برای هر دو ایستگاه برابر با ۶۰ درجه در نظر گرفته شد تا مقایسه‌ای مستقل و در شرایط هندسی یکسان انجام پذیرد. مشخصات داده‌ها و پارامترهای ورودی مورد استفاده در محاسبات در جدول ۲ خلاصه شده است:

جدول ۲: پارامترها و مقادیر ورودی در محاسبات انتشار سیگنال

توضیح	واحد	مقدار	پارامتر
فرکانس کاری پیوند در باند Ku	Hz	۱۴.۰×۱۰^{۹}	f_{Ku}
فرکانس کاری پیوند در باند Ka	Hz	۳۰.۰×۱۰^{۹}	f_{Ka}
میانگین مؤلفه میدان مغناطیسی در راستای مسیر انتشار	T	۴×۱۰^{-۵}	$B_{\parallel}$
زاویه ارتفاع فرضی لینک (شرایط هندسی یکسان برای هر دو ایستگاه)	درجه	۶۰	زاویه ارتفاع ماهواره
حداکثر چگالی الکترونی لایه F در شرایط اوج روزانه	el/m³	۳.۰۰×۱۰^{۱۲}	$N_{e.max}$
ارتفاع بیشینه لایه F	km	۳۵۰	h_{max}
ضریب تضعیف ویژه باران در باند Ku بر اساس [۱۵]	—	۰.۰۰۲۲	a_{Ku}
توان رابطه تضعیف ویژه باران در باند Ku بر اساس	—	۰.۹	b_{Ku}

[۱۵]			
ضریب تضعیف ویژه باران در باند Ka بر اساس [۱۵]	—	۰٫۰۱۵	a_{Ka}
توان رابطه تضعیف ویژه باران در باند Ka بر اساس [۱۵]	—	۱٫۲۰	b_{Ka}

۱-۷ پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های جوی و یون‌سپهری پیش از اعمال در مدل محاسباتی، تحت پیش‌پردازش قرار گرفتند تا سازگاری زمانی و کیفیت آن‌ها تضمین شود. در مرحله نخست، داده‌ها از نظر وجود مقادیر نامعتبر یا گم‌شده بررسی شدند؛ در مواردی که با کمبود داده مواجه بودیم، از درون‌یابی خطی بین نمونه‌های معتبرِ مجاور استفاده شد. همچنین داده‌های بارش مورد بازبینی قرار گرفتند تا داده‌های پرت یا خطاهای احتمالی پالایش شوند.

داده‌های بارش استخراج‌شده از پایگاه ERA۵، به واحد استاندارد میلی‌متر بر ساعت تبدیل شدند تا با ضرایب رابطه ITU-R P.۸۳۸ برای محاسبه تضعیف باران سازگار گردند. در گام بعد، تمامی متغیرها در یک چارچوب زمانی مشترک همگام‌سازی شده و با تفکیک زمانی ساعتی برای کل سال ۲۰۲۲ سازمان‌دهی شدند [۱۵ و ۱۶].

مختصات جغرافیایی تهران و بندرعباس به قالب درجه اعشاری تنظیم شد تا به عنوان ورودی مدل‌های عددی به‌کار رود. همچنین برای محاسبه مسیر انتشار سیگنال میان ماهواره و ایستگاه زمینی، هندسه مسیر با در نظر گرفتن زاویه ارتفاع و زاویه سمت لحاظ گردید و زاویه سمت‌الرأس برای تبدیل محتوای الکترونی کل قائم[۹] به مایل[۱۰] محاسبه شد.

۱-۸ مدل محاسبه اثرات یون‌سپهری

برای برآورد اثرات یون‌سپهر بر سیگنال ماهواره‌ای، از مقادیر محتوای الکترونی کل استخراج‌شده از مدل IRI استفاده شد [۹]. با توجه به اینکه سیگنال ماهواره‌ای در مسیری مایل نسبت به افق ایستگاه زمینی منتشر می‌شود محتوای الکترونی کل قائم با استفاده از رابطه هندسی زیر به محتوای الکترونی کل در مسیر انتشار مایل تبدیل گردید:

$$STEC = \frac{VTEC}{Cos(\theta_z)} \qquad (۱۱)$$

که در آن VTEC از انتگرال‌گیری چگالی الکترونی در امتداد ارتفاع تعریف می‌شود:

$$VTEC = \int_{h_1}^{h_2} N_e(h)dh \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق h_1 و h_2 به‌ترتیب ارتفاع مرز پایینی و بالایی یون‌سپهر، همچنین و θ_z زاویه سمت‌الرأس (زنیت) مسیر انتشار سیگنال است. پس از تعیین STEC در امتداد مسیر انتشار، مقادیر تغییر فاز یون‌سپهری و زاویه دوران فارادی به‌ترتیب با جایگذاری STEC در روابط (۶) و (۸) محاسبه شدند [۳ و ۴]. در این محاسبات، وابستگی معکوس این اثرات به فرکانس سیگنال لحاظ گردید و محاسبات برای فرکانس‌های کاری باندهای Ku (۱۴ GHz) و Ka (۳۰ GHz) انجام شد تا ارزیابی و مقایسه کمی اثرات یون‌سپهر در این دو باند فرکانسی فراهم شود.

۱-۹ محاسبه تضعیف ناشی از بارش

به‌منظور برآورد تضعیف سیگنال ناشی از بارش، از مدل‌های استاندارد ارائه‌شده در توصیه‌نامه‌های ITU-R استفاده شد که روابط محاسباتی آن در بخش ۱-۴ تشریح گردید. در این راستا، نرخ بارش استخراج‌شده از مجموعه داده بازتحلیل ERA۵ [۱۶]، برای دو ایستگاه زمینی تهران و بندرعباس به‌عنوان ورودی اصلی مدل در نظر گرفته شد.

ضرایب تجربی رابطه توان (a و b) متناظر با توصیه‌نامه ITU-R P.۸۳۸ [۱۵]، برای فرکانس‌های کاری باندهای Ku (۱۴ گیگاهرتز) و Ka (۳۰ گیگاهرتز) به‌کار گرفته شدند. در محاسبه تضعیف کل در مسیر انتشار، پارامترهای هندسی و فیزیکی لینک شامل فرکانس

[۹] VTEC

[۱۰] STEC

کاری، طول مسیر مؤثر بارش و زاویه ارتفاع فرضی (۶۰ درجه) لحاظ گردیدند.

محاسبات تضعیف بر اساس داده‌های ساعتی سال ۲۰۲۲ انجام گرفت و با هدف بررسی تغییرات زمانی و فصلی، میانگین‌گیری‌های متناظر انجام شد تا روند تغییرات زمانی تضعیف بارش استخراج گردد. نتایج حاصل از این فرایند، امکان تحلیل و مقایسه تطبیقی اثرات وردسپهری (بارش) را بر انتشار امواج ماهواره‌ای در دو اقلیم متفاوت تهران و بندرعباس فراهم می‌سازد.

۱-۱۰ چارچوب محاسبات عددی

کدهای محاسباتی این پژوهش در محیط برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شدند. برای انجام محاسبات ماتریسی و برداری از کتابخانه NumPy [۲۱] و الگوریتم‌های عددی SciPy [۲۲] استفاده شد. سازمان‌دهی، همگام‌سازی و تحلیل داده‌های سری زمانی با بهره‌گیری از Pandas صورت گرفت و به‌منظور رسم دقیق نمودارهای علمی از Matplotlib [۲۳] استفاده گردید. همچنین داده‌های بازتحلیل ERA۵ [۱۶] که در قالب استاندارد netCDF ذخیره شده بودند، با استفاده از بسته‌های تخصصی xarray [۲۴] و netCDF٤ فراخوانی و پردازش شدند.

در فرایند محاسباتی، متغیرهای یون‌سپهری (برگرفته از مدل IRI [۹]) و وردسپهری (برگرفته از ERA۵ [۱۶]) برای طول سال ۲۰۲۲ با تفکیک زمانی ساعتی استخراج گردیدند. در هر گام زمانی، نخست مقدار محتوای الکترونی کل در مسیر مایل انتشار بر اساس زاویه سمت‌الرأس و روابط ارائه‌شده در بخش ۳.۴ برآورد شد؛ سپس مقادیر تغییر فاز و دوران فارادی برای فرکانس‌های کاری باندهای Ku و Ka محاسبه شد. به‌طور هم‌زمان، با به‌کارگیری نرخ بارش استخراج‌شده از داده‌های ساعتی ERA۵ و روابط توصیه‌نامه ITU-R P.۸۳۸ [۱۵]، تضعیف ناشی از بارش تعیین گردید. خروجی‌های این محاسبات به‌صورت سری‌های زمانی یکنواخت برای هر دو ایستگاه ثبت شد و در بخش یافته‌ها مورد بررسی و تحلیل تطبیقی قرار گرفت.

۱-۱۱ فرضیات و محدودیت‌های مدل

در این پژوهش، به‌منظور انجام محاسبات عددی و تحلیل پیوسته سری‌های زمانی، پروفایل عمودی چگالی الکترونی یون‌سپهر بر پایه پارامترهای اوج استخراج‌شده از مدل IRI و با بهره‌گیری از تقریب لایه چپمن/گاوسی پیرامون ارتفاع اوج لایه F_2 محاسبه شد [۹]. علاوه بر این، جهت محاسبه اثرات برهم‌کنش امواج با محیط یون‌سپهری، مؤلفه طولی میدان مغناطیسی زمین (B_L) در راستای مسیر انتشار امواج، با در نظر گرفتن مقدار متوسط منطقه‌ای برای قلمرو جغرافیایی ایران تعیین گردید.

همچنین هندسه مسیر انتشار با زاویه ارتفاع ثابت (۶۰ درجه) برای هر دو ایستگاه لحاظ شد تا محاسبات در شرایط هندسی یکسان انجام پذیرد .در تحلیل اثرات وردسپهری نیز، تضعیف ناشی از بارش به‌عنوان عامل اصلی تضعیف در باندهای فرکانسی Ku و Ka در نظر گرفته شد و سایر اثرات ثانویه جوی نظیر جذب ناشی از گازهای جوی، بخار آب و ابر، بررسی نشده‌اند.

در نهایت، داده‌های نرخ بارش بر مبنای پایگاه شبکه‌بندی‌شده ERA۵ [۱۶]، جهت ایجاد بستر یکنواخت و حفظ همسانی مقایسه در مقیاس کلان برای دو اقلیم تهران و بندرعباس به کار گرفته شد. با توجه به اینکه اعتبار این داده‌ها در مطالعات پیشینِ اقلیمی در مناطق مختلف ایران [۲۰-۱۷] برای تبیین الگوهای بارش مورد تأیید قرار گرفته است، از این مجموعه داده‌ها برای تحلیل سری‌های زمانی استفاده شد. با توجه به تمرکز این پژوهش بر تحلیل‌های کلان‌مقیاس، اعتبارسنجی نقطه‌ای با داده‌های ایستگاهی به‌عنوان گامی برای پژوهش‌های تکمیلی و بررسی‌های جزئی‌تر در آینده مد نظر قرار دارد.

۲- یافته‌ها

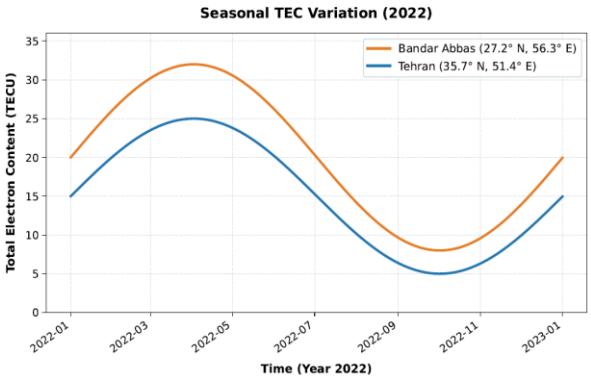
در این بخش، یافته‌های حاصل از محاسبات عددی و تحلیل اثرات یون‌سپهری و وردسپهری بر انتشار سیگنال‌های ماهواره‌ای در باندهای فرکانسی Ku و Ka ارائه و ارزیابی شده است. محاسبات برای دو ایستگاه زمینی تهران و بندرعباس، به‌عنوان نمایندگان دو اقلیم

متفاوت جغرافیایی، در بازه زمانی یک‌ساله از ژانویه تا دسامبر ۲۰۲۲ با تفکیک زمانی ساعتی انجام پذیرفت.

در این راستا، ابتدا تغییرات زمانی محتوای الکترونی کل و اثرات مستقیم ناشی از آن شامل تغییر فاز و زاویه دوران فارادی بررسی و مقایسه گردیده‌اند؛ سپس، تضعیف ناشی از بارش بر مبنای داده‌های بازتحلیل ساعتی و توصیه‌نامه‌های استاندارد تحلیل شده است. در نهایت، سهم نسبی و تقابل این دو پدیده جوی در تضعیف و تخریب کیفیت لینک‌های ماهواره‌ای در باندهای مذکور مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲-۱ تغییرات فصلی محتوای الکترونی کل

محتوای الکترونی کل یون‌سپهر یکی از کلیدی‌ترین کمیت‌های فیزیکی در تحلیل اثرات یون‌سپهر بر انتشار امواج رادیویی به شمار می‌رود؛ چراکه خطاهای انتشار، از جمله تغییر فاز و زاویه دوران فارادی، مستقیماً به این پارامتر وابسته‌اند [۳]. در شکل ۱، میانگین تغییرات ماهانه TEC برای دو ایستگاه تهران و بندرعباس در طول سال ۲۰۲۲ میلادی ارائه شده است.



شکل ۱: تغییرات ماهانه محتوای الکترونی کل در ایستگاه‌های تهران (منحنی آبی) و بندرعباس (منحنی نارنجی) طی سال ۲۰۲۲.

نتایج نشان‌دهنده یک الگوی نوسانی فصلی مشخص است که مستقیماً تحت تأثیر تغییرات فصلی زاویه تابش خورشید و شدت یونش لایه‌های بالایی جو قرار دارد. مطابق با شکل ۱، بیشینه مقادیر TEC در ماه‌های ابتدایی سال و در حوالی اعتدال بهاری رخ داده است؛ رفتاری که با افزایش زاویه ارتفاع خورشید، شدت تابش پرتوهای فرابنفش خورشیدی و در نتیجه افزایش آهنگ تولید الکترون همخوانی دارد. با گذشت زمان به سمت ماه‌های میانی و نیمه دوم سال، روندی کاهشی در مقادیر TEC مشاهده می‌شود و کمینه مقادیر آن در ماه‌های پایانی سال (فصل زمستان) به ثبت می‌رسد.

مقایسه تطبیقی دو ایستگاه نشان می‌دهد که مقادیر TECدر ایستگاه بندرعباس در تمامی ماه‌های سال به‌طور پیوسته بیشتر از ایستگاه تهران است. این اختلاف فیزیکی ناشی از عرض جغرافیایی پایین‌تر بندرعباس و نزدیکی آن به قله‌های ناهنجاری یونش استوایی است؛ پدیده‌ای که در اثر انتقال رو به بالای پلاسما در خط استوا و فرونشست آن در عرض‌های نزدیک به ۱۵± درجه تا ۲۰ ± درجه مغناطیسی ایجاد شده و چگالی الکترونی را در مقایسه با عرض‌های میانی (نظیر تهران) به‌طور معناداری افزایش می‌دهد [۱۱]. بر این اساس، سیگنال‌های ماهواره‌ای گذرنده از فراز بندرعباس همواره در معرض اثرات یون‌سپهری شدیدتری نسبت به تهران قرار دارند.

۲-۲ تغییر فاز یون‌سپهری در باندهای Ku و Ka

تغییر فاز سیگنال $\Delta\phi$، یکی از مؤلفه‌های کلیدی اثرگذار بر پایداری فاز، کیفیت مدولاسیون‌های مرتبه‌بالا و همزمان‌سازی در پیوندهای مخابرات ماهواره‌ای و شبکه‌های غیرزمینی نسل جدید است [۶-۳]. همانطور که در زیربخش ۲.۲ دیدیم، تغییر فاز تجمعی یون‌سپهری با محتوای الکترونی کل مسیر انتشار رابطه مستقیم و با فرکانس کاری سیگنال رابطه معکوس دارد [۱، ۲ و ۹]. از این‌رو، در شرایط هندسی و مسیر انتشار یکسان، با افزایش فرکانس کاری از باند Ku به باند Ka، اثر محیط یون‌سپهر بر فاز سیگنال به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۷ و ۸]. در این بخش، نتایج محاسبات عددی برای دو ایستگاه تهران و بندرعباس در طول سال ۲۰۲۲ بر پایه مقادیر ورودی جدول ۲ (شامل فرکانس‌های ۱۴ و ۳۰ گیگاهرتز و زاویه ارتفاع ۶۰ درجه) با بهره‌گیری از مدل مرجع بین‌المللی یون‌سپهر (IRI)و ابزارهای محاسباتی [۹، ۲۱ و ۲۲] مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بر اساس تحلیل‌های عددی، روند تغییرات ماهانه فاز یون‌سپهری در باند Ku از الگوی فصلی مشخصی تبعیت می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، نوسانات تغییر فاز در هر دو ایستگاه با تغییرات فصلی TEC همبستگی مستقیم دارد [۱۰ و ۱۱]. در ماه‌های اعتدالین (به‌ویژه اعتدال بهاری که به دلیل افزایش زاویه تابش خورشیدی و بیشینه شدن نرخ یونیزاسیون، چگالی الکترونی به اوج خود می‌رسد)، تغییر فاز به بیشترین مقدار سالانه بالغ می‌شود. سپس، با ورود به ماه‌های پایانی سال و کاهش فعالیت‌های خورشیدی فصلی، این شاخص روندی کاهشی را طی کرده و به کمینه مقادیر خود می‌رسد [۱۱].

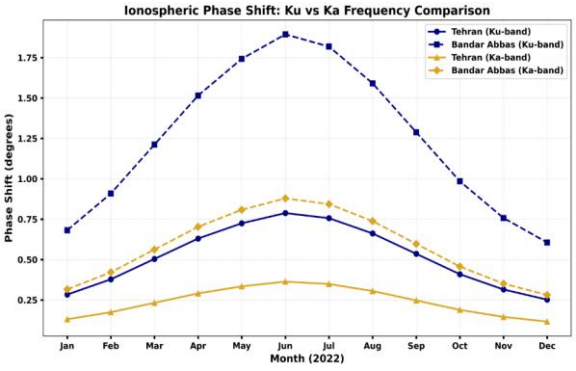
مقایسه میان دو ایستگاه نشان‌دهنده وجود یک اختلاف معنادار و پایدار در تمام طول سال است؛ به‌طوری‌که مقدار تغییر فاز در ایستگاه بندرعباس همواره بالاتر از ایستگاه تهران به‌دست آمده است. این پدیده مستقیماً به موقعیت جغرافیایی پایین‌تر بندرعباس، ساختار میدان ژئومغناطیسی منطقه و نزدیکی بیشتر به ناهنجاری استوایی یون‌سپهر مربوط می‌شود که به مقادیر بالاتر TEC استخراج‌شده از مدل می‌انجامد [۹ و ۱۴]. بر اساس محاسبات و تحلیل مؤلفه نوسانات فازی، میانگین سالانه تغییر فاز در باند Ku (فرکانس ۱۴ گیگاهرتز) برای ایستگاه تهران برابر ۰/۵۲ درجه و برای ایستگاه بندرعباس معادل ۱/۲۵ درجه ارزیابی می‌شود؛ امری که نشان‌دهنده اثرپذیری فازی بیش از ۲/۴ برابری پیوند ماهواره‌ای در ایستگاه بندرعباس نسبت به تهران در این باند فرکانسی به‌دلیل TEC بالاتر است [۱۱].

با گذار به فرکانس کاری بلند Ka، دامنه تغییر فاز ناشی از پلاسما افت محسوسی را نشان می‌دهد. از آنجا که تغییر فاز با معکوس فرکانس متناسب است، نسبت نظری کاهش فاز هنگام گذر از بلند Ku به بلند Ka معادل نسبت فرکانس‌ها یعنی:

$$\frac{f_{Ka}}{f_{Ku}} = \frac{۳۰}{۱۴} \approx ۲.۱۴ \qquad (۱۳)$$

خواهد بود [۱ و ۳]. بر همین اساس و با استناد به رابطه عکس با فرکانس، میانگین سالانه تغییر فاز در باند Ka برای ایستگاه تهران به ۰/۲۴ درجه و برای ایستگاه بندرعباس به ۰/۵۸ درجه تقلیل می‌یابد (کاهش تقریباً ۲/۱۴ برابری مطابق با نسبت فرکانسی رابطه (۱۳)). این یافته‌ها تأیید می‌کنند که باند Ka به سبب برخورداری از فرکانس بالاتر، مصونیت و پایداری فازی به‌مراتب بهتری در برابر اغتشاشات یون‌سپهری ارائه می‌دهد [۷و ۸]. با این وجود، اختلاف نسبی میان دو ایستگاه در باند Ka نیز کماکان به قوت خود باقی است؛ بدین معنا که ملاحظات مربوط به جبران‌سازی فاز و نوسانات یون‌سپهری در طراحی پیوندهای عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر حتی در باندهای بالاتر نیز نباید نادیده گرفته شود [۱۳-۱۱].

در نهایت باید یادآور شد که این نتایج بر پایه شبیه‌سازی عددی مدل‌های استاندارد بین‌المللی استخراج شده‌اند [۹ و ۱۰]؛ از این‌رو، جهت توسعه کاربردهای عملیاتی، تطبیق دقیق‌تر با شرایط جوی محلی و اعتبارسنجی رفتارهای گذرا در زمان آشفتگی‌های فضا-هوا، پایش‌های تجربی هم‌زمان بر روی لینک‌های ماهواره‌ای توصیه می‌گردد [۱۰ و ۱۱].

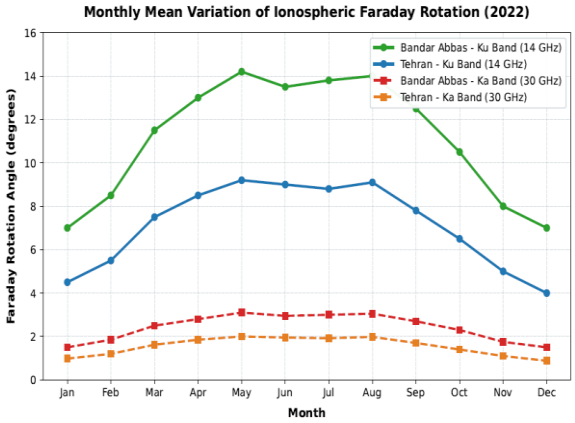


شکل ۲: مقایسه تغییرات ماهانه تغییر فاز یون‌سپهری در باندهای Ku و Ka برای ایستگاه‌های تهران و بندرعباس در طول سال ۲۰۲۲ (برحسب درجه).

۲-۳ دوران فارادی در باندهای Ku و Ka

یکی دیگر از اثرات مهم عبور امواج رادیویی ریزموج از یون‌سپهر، پدیده دوران فارادی است. این پدیده بر اثر برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی با محیط پلاسمایی مغناطیده یون‌سپهر در حضور میدان مغناطیسی زمین رخ می‌دهد و موجب چرخش زاویه صفحه قطبش موج می‌شود [۱ و ۲]. در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های چگالی الکترونی مستخرج از مدل IRI-۲۰۲۰ [۹] و مقدار ثابت میانگین منطقه‌ای مؤلفه میدان مغناطیسی در راستای مسیر انتشار، برابر با ۴×۱۰^{-۵}

تسلا، میانگین ماهانه زاویه دوران فارادی برای دو ایستگاه تهران و بندرعباس در باندهای Ku و Ka در طول سال ۲۰۲۲ شبیه‌سازی شده است که منحنی‌های آن در شکل ۳ ارائه شده است.



کل ۳: میانگین ماهانه زاویه دوران فارادی در بلندهای Ku و Ka برای ایستگاه‌های تهران و بندرعباس در طول سال ۲۰۲۲ (برحسب درجه).

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که مقدار دوران فارادی همبستگی مستقیمی با تغییرات محتوای الکترونی کل و مؤلفه میدان مغناطیسی زمین در راستای مسیر انتشار وابسته است [۲ و ۱۴]. همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است، در ماه‌های گرم سال (مه تا اوت) به دلیل افزایش تابش خورشیدی و اوج‌گیری چگالی یونیزاسیون در یون‌سپهر، زاویه دوران فارادی در هر دو ایستگاه به مقادیر بیشینه خود می‌رسد [۱۱]. با توجه به اینکه در این مطالعه مقدار میانگین منطقه‌ای مؤلفه میدان مغناطیسی در راستای مسیر انتشار برای هر دو ایستگاه ثابت در نظر گرفته شده است، اختلاف مشاهده‌شده در دوران فارادی تهران و بندرعباس در چارچوب این شبیه‌سازی عمدتاً به تفاوت محتوای الکترونی کل نسبت داده می‌شود. مقدار بیشتر دوران فارادی در بندرعباس نیز با عرض جغرافیایی پایین‌تر این ایستگاه و نزدیکی بیشتر آن به ناحیه ناهنجاری استوایی یون‌سپهر مرتبط است [۱ و ۱۲].

از نظر وابستگی فرکانسی، زاویه دوران فارادی با عکس مجذور فرکانس کاری متناسب است [۲ و ۱۲]:

$$\frac{\Omega_{F.Ku}}{\Omega_{F.Ka}} = \left(\frac{f_{Ka}}{f_{Ku}}\right)^{۲} = \left(\frac{۳۰\ \text{GHz}}{۱۴\ \text{GHz}}\right)^{۲} \approx ٤.٦ \quad (١٤)$$

بر این اساس، شدت دوران فارادی در باند Ku تقریباً ۴/۶ برابر شدیدتر از باند Ka است. بر پایه داده‌های شبیه‌سازی، میانگین سالانه زاویه دوران فارادی در باند Ku برای ایستگاه تهران برابر با ۰/۳۵ درجه (با دامنه نوسان ماهانه ۰/۱۸ تا ۰/۵۴ درجه) و برای ایستگاه بندرعباس برابر با ۰/۹۵ درجه (با دامنه نوسان ماهانه ۰/۴۷ تا ۱/۴۲ درجه) به دست آمده است.

با افزایش فرکانس به باند Ka، در تطابق کامل با رابطه تئوری (۱۴)، میانگین سالانه زاویه دوران فارادی به ۰/۰۸ درجه برای تهران و ۰/۲۱ درجه برای بندرعباس تقلیل می‌یابد.

از دیدگاه طراحی پیوندهای ماهواره‌ای نوین [۶]، این نتایج بیانگر دو نکته کلیدی است:

۱) در سامانه‌های باند Ku با قطبش خطی (به‌ویژه در مناطق جنوبی کشور مانند بندرعباس که چرخش قطبش در ماه‌های تابستان به بیش از ۱ درجه می‌رسد)، عدم اصلاح این اثر می‌تواند به کاهش ایزولاسیون قطبش متعامد و افزایش تداخل کانال‌های هم‌فرکانس منجر شود [۱۲ و ۱۳].

۲) در مقابل، در شرایط فرض‌شده این مطالعه برای باند Ka، زاویه دوران فارادی حتی در بیشینه مقادیر فصلی به کمتر از ۰/۳ درجه محدود می‌شود؛ بنابراین در این باند، اثر چرخش قطبش یون‌سپهری نسبتاً کوچک بوده و در مقایسه با نویز حرارتی و خطاهای مکانیکی تراز آنتن، در حد قابل چشم‌پوشی ارزیابی می‌شود [۶ و ۱۳].

۲-۴ تضعیف ناشی از بارش در باندهای Ku و Ka

علاوه بر پدیده‌های یون‌سپهری، فرآیندهای لایه وردسپهر نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در افت توان و تضعیف سیگنال‌های ماهواره‌ای ایفا می‌کنند. در میان این عوامل، تضعیف ناشی از بارش به‌ویژه در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ گیگاهرتز، به دلیل برهم‌کنش قطرات باران با میدان الکترومغناطیسی موج از طریق سازوکارهای جذب و پراکندگی تشدید می‌شود [۳ و

۴]. در این پژوهش، نرخ تضعیف بارش بر پایه داده‌های ساعتی استخراج‌شده از پایگاه بازتحلیل اقلیمی ERA۵ [۱۶] و مطابق با روابط تجربی استاندارد توصیه‌نامه ITU-R P.۸۳۸-۳ [۱۵] و پارامترهای جدول ۲ محاسبه شده است. روند تغییرات میانگین ماهانه تضعیف ناشی از بارش برای دو ایستگاه تهران و بندرعباس در طول سال ۲۰۲۲ در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که مقدار تضعیف به‌طور مستقیم تابع چرخه‌های فصلی بارش در هر دو ناحیه است. در ماه‌های خشک و کم‌بارش سال (به‌ویژه در فصل تابستان برای تهران و ماه‌های میانی سال برای بندرعباس)، مقدار تضعیف در هر دو باند فرکانسی در حداقل ممکن قرار دارد. در مقابل، در فصول سرد و مرطوب (زمستان و اوایل بهار) با افزایش رخدادهای بارندگی، میزان تضعیف سیگنال افزایش محسوسی می‌یابد.

رفتار تضعیف در دو بلند فرکانسی دارای تفاوتی بنیادین است؛ به‌گونه‌ای که حساسیت باند Ka (۳۰ گیگاهرتز) نسبت به بارش بسیار شدیدتر از بلند Ku (۱۴ گیگاهرتز) ظاهر می‌شود. علت فیزیکی این پدیده آن است که در باند Ka، طول‌موج سیگنال (حدود ۱ سانتی‌متر) به اندازه ابعاد فیزیکی قطرات باران نزدیک‌تر شده و پراکندگی تشدیدی (پراکندگی می) در کنار جذب دی‌الکتریک، نرخ تضعیف ویژه را بر اساس رابطه (۹) به‌صورت غیرخطی جهش می‌دهد [۳ و ۱۵].

بر اساس تحلیل آماری داده‌های شبیه‌سازی در سال ۲۰۲۲، میانگین تضعیف ماهانه ناشی از بارش در بلند Ku برای ایستگاه تهران برابر با ۰/۸۵ دسی‌بل و برای ایستگاه بندرعباس برابر با ۱/۱۵ دسی‌بل محاسبه شده است که مقادیر نسبتاً کوچکی به شمار می‌روند و به‌سادگی با تنظیم توان ارسالی قابل جبران هستند. اما با صعود فرکانسی به باند Ka، این میانگین تضعیف با رشدی بیش از ۴ برابر، به‌ترتیب به ۳/۶۰ دسی‌بل در تهران و ۴/۹۰ دسی‌بل در بندرعباس می‌رسد. مقایسه دو اقلیم نشان می‌دهد که ایستگاه بندرعباس به سبب ویژگی‌های اقلیم ساحلی، رطوبت نسبی بالا و وقوع رگبارهای همرفتی شدید فصلی، میانگین تضعیف بالاتری را نسبت به اقلیم نیمه‌خشک تهران ثبت می‌کند.

شایان ذکر است که مقادیر ارائه‌شده در شکل ۴ بیانگر میانگین‌های ماهانه هستند؛ در حالی که در رخدادهای لحظه‌ای و رگبارهای شدید، تضعیف لحظه‌ای در باند Ka می‌تواند به ده‌ها دسی‌بل برسد و به قطعی موقت لینک بینجامد [۷]. از دیدگاه روش‌شناختی، اگرچه داده‌های شبکه‌بندی‌شده ERA۵ به دلیل تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه ممکن است در برآورد شدت رگبارهای نقطه‌ای و فوق‌کوتاه‌مدت در مقایسه با ایستگاه‌های باران‌سنجی دارای مقداری هموارسازی (کم‌برآوردی در پیک‌ها) باشند، اما همان‌گونه که در مطالعات جامع پیشین در ایران نشان داده شده است [۲۰-۱۷]، این پایگاه داده در بازتولید الگوهای کلان اقلیمی و برآورد پیوسته زمانی در سراسر کشور از همبستگی و پایایی بالایی برخوردار است.

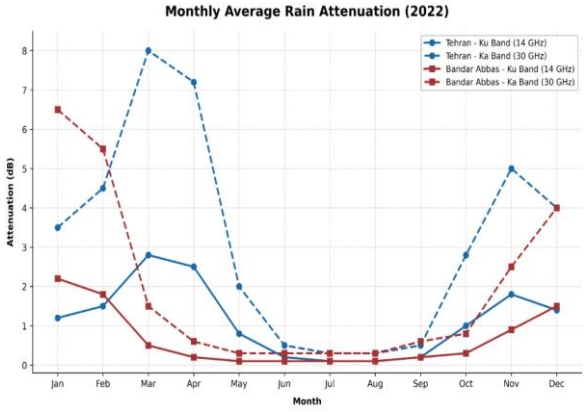
در نتیجه، در طراحی سامانه‌های ماهواره‌ای با توان عملیاتی بالا در باند Ka، تضعیف ناشی از بارش به اصلی‌ترین عامل محدودکننده عملکرد لینک مبدل می‌گردد و تخصیص حاشیه محوشدگی مناسب، استفاده از کنترل توان ارسالی تطبیقی و تکنیک‌های کدگذاری و مدولاسیون تطبیقی برای تضمین دسترسی‌پذیری لینک امری ضروری خواهد بود [۳ و ۷].

۳-نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش، ارزیابی تطبیقی و جامع اثرات یون‌سپهری (تغییر فاز و دوران فارادی) و پدیده‌های وردسپهری (تضعیف ناشی از بارش) بر کارایی پیوندهای مخابرات ماهواره‌ای در باندهای فرکانسی Ku و Ka برای دو ایستگاه با ویژگی‌های ژئومغناطیسی و اقلیمی متفاوت (تهران و بندرعباس) در طول سال ۲۰۲۲ انجام پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که موقعیت ژئومغناطیسی، عرض جغرافیایی و مشخصه‌های اقلیمی، نقشی تعیین‌کننده در الگوی حاکم بر افت و اعوجاج سیگنال داشتند.

تحلیل مشخصه‌های انتشار امواج در ایستگاه‌های تهران و بندرعباس (شکل ۵)، نشان‌دهنده همبستگی عمیق میان مشخصات الکترودینامیکی یون‌سپهر، متغیرهای اقلیمی وردسپهر و فرکانس کاری لینک است. لازم به ذکر است که در تحلیل تطبیقی ارائه‌شده در شکل ۵، کمیت‌های مورد ارزیابی به دلیل تفاوت ماهیت فیزیکی با دو واحد مجزا سنجیده شدند؛ اثرات یون‌سپهری (تغییر

فاز و دوران فارادی) برحسب درجه و تضعیف وردسپهری ناشی از بارش برحسب دسی‌بل بیان گردیدند و مقایسه حاضر با هدف تحلیل روندهای حاکم بر طراحی لینک انجام شده است.



شکل ۴: میانگین ماهانه تضعیف ناشی از بارش در باندهای Ku و Ka برای ایستگاه‌های تهران و بندرعباس در طول سال ۲۰۲۲ میلادی (برحسب دسی‌بل).

تفاوت در عرض جغرافیایی این دو ایستگاه، نقش تعیین‌کننده‌ای در تفاوت چگالی الکترونی و به تبع آن شدت اختلالات یون‌سپهری ایفا می‌کند. مجاورت جغرافیایی ایستگاه بندرعباس با ناهنجاری استوایی یون‌سپهر و اثر فواره‌ای پلاسما، موجب افزایش معنادار محتوای الکترونی کل در مقایسه با تهران شد؛ امری که به تشدید اثرات یون‌سپهری در جنوب کشور انجامید و مستقیماً دامنه انحراف فاز یون‌سپهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر اساس یافته‌های عددی پژوهش، میانگین سالانه تغییر فاز در باند Ku (فرکانس ۱۴ گیگاهرتز) برای ایستگاه تهران برابر با ۰/۵۲ درجه و برای بندرعباس با افزایشی بیش از ۲/۴ برابر، معادل ۱/۲۵ درجه ارزیابی شده است. با افزایش فرکانس و صعود به باند Ka (فرکانس ۳۰ گیگاهرتز)، به دلیل وابستگی معکوس تغییر فاز با فرکانس، این مقادیر متناسب با نسبت فرکانسی تقریباً ۲/۱۴ برابر کاهش یافته و به‌ترتیب به ۰/۲۴ درجه و ۰/۵۸ درجه می‌رسند که نشان می‌دهد در فرکانس‌های بالای ۳۰ گیگاهرتز، اعوجاج فاز یون‌سپهری اثر بسیار محدودتری بر عملکرد پیوند خواهد داشت.

علاوه بر تغییر فاز، پدیده دوران فارادی نیز که ناشی از خاصیت ناهمسانگرد فاز پلاسما در حضور میدان مغناطیسی زمین است، رفتار فرکانسی مشابهی نشان می‌دهد. با توجه به رابطه فیزیکی دوران فارادی و وابستگی معکوس آن با مجذور فرکانس، نسبت نظری کاهش این اثر از باند Ku به Ka در حدود ۴/۶ برابر است. نتایج عددی به‌دست‌آمده این نسبت نظری را به‌خوبی تأیید می‌کنند؛ به‌طوری‌که میانگین سالانه دوران فارادی در باند Ku از ۰/۳۵ درجه در تهران به ۰/۹۵ درجه در بندرعباس (به‌دلیل ترکیب TEC بالاتر و مؤلفه طولی قوی‌تر میدان مغناطیسی) می‌رسد، در حالی که در باند Ka این مقادیر به‌ترتیب به مقادیر ناچیز ۰/۰۸ درجه و ۰/۲۱ درجه تقلیل می‌یابند. در چارچوب فرضیات و شرایط عملیاتی این مطالعه، کوچک بودن زاویه دوران فارادی در باند Ka (حتی در بیشینه‌های فصلی) نشان می‌دهد که چرخش قطبش یون‌سپهری در این باند بسیار محدود بوده و معمولاً نیازی به به‌کارگیری سامانه‌های پیچیده و برخط تصحیح فعال قطبش تحمیل نمی‌کند؛ با این حال، در باند Ku و به‌ویژه در عرض‌های جنوبی مانند بندرعباس، این پدیده جهت حفظ ایزولاسیون قطبش متعامد در لینک‌های با استفاده مجدد از فرکانس شایان توجه است.

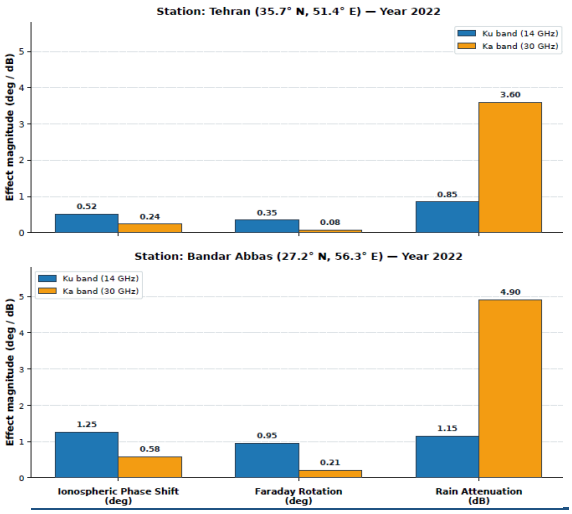
در مقابل، ارزیابی تضعیف وردسپهری ناشی از باران، رفتاری کاملاً متضاد با پدیده‌های یون‌سپهری را آشکار می‌سازد. در فرکانس‌های بالای باند Ka، طول موج سیگنال به ابعاد قطرات باران نزدیک شده و پدیده پراکندگی می به مکانیزم غالب تضعیف تبدیل می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر مبنای نرخ‌های بارش استخراج‌شده از داده‌های ساعتی بازتحلیل ERA۵ در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهند که میانگین سالانه تضعیف باران در باند Ku برای تهران و بندرعباس به‌ترتیب برابر با ۰/۸۵ دسی‌بل و ۱/۱۵ دسی‌بل است. با این حال، با انتقال به باند Ka، این افت سیگنال با جهشی چشمگیر به مقادیر میانگین سالانه ۳/۶۰ دسی‌بل در تهران و ۴/۹۰ دسی‌بل در بندرعباس می‌رسد. بدیهی است که این ارقام بیانگر میانگین‌های تجمعی سالانه هستند و در رخدادهای بارش لحظه‌ای و رگبارهای شدید فصلی، مقدار تضعیف لحظه‌ای می‌تواند از این آستانه‌ها فراتر رود. تفاوت میان دو ایستگاه ریشه در اقلیم ساحلی و مرطوب بندرعباس در مقایسه با اقلیم نیمه‌خشک تهران دارد. این نتایج اثبات می‌کنند که در باند Ka، تضعیف وردسپهری عامل اصلی محدودکننده دسترس‌پذیری لینک است و پایداری شبکه ماهواره‌ای مستلزم پیش‌بینی حاشیه تضعیف باران و به‌کارگیری تکنیک‌های تطبیقی نظیر

کنترل توان ارسالی و مدولاسیون و کدگذاری تطبیقی خواهد بود.

در تحلیل نتایج تضعیف ناشی از بارش، توجه به ماهیت داده‌های بازتحلیل ERA۵ اهمیت دوچندانی دارد. از آنجا که مقایسه مستقیم داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌های سینوپتیک محلی نیازمند داده‌های بلادرنگ با تفکیک زیرساعتی (دقیقه‌ای) است که عموماً در دسترس پژوهش‌های کلان نیست، داده‌های شبکه‌بندی‌شده ۰/۲۵ درجه اگرچه ساختار پیوسته و مقایسه‌پذیری بی‌نظیری در سطح کشور فراهم می‌کنند، اما تمایل به کم‌برآوردی در قله‌های لحظه‌ای بارش دارند. بنابراین، تضعیف‌های بارش استخراج‌شده در باندهای Ku و Ka، شاخصی از میانگین اثر تجمعی اقلیمی هستند. بر اساس مطالعات اعتبارسنجی منطقه‌ای در ایران، عدم قطعیت احتمالی ناشی از این هموارسازی برای مناطق معتدل و کوهستانی (تهران) در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد و در رگبارهای همرفتی ساحلی (بندرعباس) تا حدود ۲۵ درصد برآورد می‌شود. با وجود این تلورانس، نتیجه محوری این بررسی، یعنی تفاوت فاحش نیاز به حاشیه توان پیوند و الزامات شدیدتر تکنیک‌های تطبیقی در بندرعباس نسبت به تهران به‌عنوان یک نتیجه مهندسی معتبر و پایدار باقی می‌ماند.

برآیند این تحلیل‌های مقایسه‌ای گویای یک تغییر الگوی اساسی در طراحی پیوندهای ماهواره‌ای با تغییر باند فرکانسی است؛ گذار از باند Ku به باند Ka در پهنه جغرافیایی ایران، منبع اصلی اختلالات سیگنال را از پدیده‌های پلاسمایی یون‌سپهر (تغییر فاز و دوران فارادی در لایه‌های بالایی جو) به سمت پدیده‌های آب و هواشناختی وردسپهر (تضعیف بارش در لایه‌های پایینی جو) جابه‌جا می‌کند. این تغییر ماهیت عامل غالب اختلال، لزوم اتخاذ رویکردهای طراحی بومی و تفکیک‌شده بر اساس مشخصه‌های جغرافیایی و اقلیمی هر ایستگاه را در طرح‌های مهندسی هوافضا و مخابرات فضایی کشور دوچندان می‌سازد.

در مجموع، یافته‌های این ارزیابی تطبیقی اثبات می‌کند که گذار فرکانسی از باند Ku به باند Ka در پهنه سرزمینی ایران، مستلزم یک تغییر الگوی بنیادین در مهندسی پیوند ماهواره‌ای است؛ بدین‌معنا که کانون توجه در طراحی سیستم، از مهار اختلالات پلاسمایی لایه‌های بالایی جو (پایداری فاز و تطابق قطبش در یون‌سپهر) جابه‌جا می‌گردد. به‌عنوان افق آتی این پژوهش، توسعه و ارزیابی روش‌های تطبیقی هوشمند نظیر کنترل توان ارسالی و مدولاسیون و کدگذاری تطبیقی، همراه



شکل ۵. مقایسه خلاصه‌شده اثرات فازی و قطبشی یون‌سپهری (برحسب درجه) در کنار تضعیف ناشی از بارش در وردسپهر (برحسب دسی‌بل) در باندهای Ku و Ka برای ایستگاه‌های تهران و بندرعباس (مبتنی بر میانگین سالانه داده‌های شبیه‌سازی سال ۲۰۲۲).

با اعتبارسنجی مقادیر بازتحلیل با داده‌های بلادرنگ باران‌سنجی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، جهت طراحی بهینه پیوندهای ماهواره‌ای توان‌بالا در اقلیم‌های گوناگون کشور پیشنهاد می‌شود.

منابع

[۱] M. C. Kelley, The Earth’s Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, ۲nd ed. Academic Press, ۲۰۰۹.

[۲] K. Davies, Ionospheric Radio. Peter Peregrinus Ltd., ۱۹۹۰.

[۳] T. Pratt, C. W. Bostian, and J. E. Allnutt, Satellite Communications, ۳rd ed. John Wiley & Sons, ۲۰۲۰.

[٤] R. L. Freeman, Radio System Design for Telecommunications, ۳rd ed. John Wiley & Sons, ۲۰۰۷.

[٥] G. Araniti, J. Cosmas, A. Iera, A. Molinaro, and A. Orsino, “٥G and beyond non-terrestrial networks: Advances, challenges, and future directions,” IEEE Communications Magazine, vol. ٦٠, no. ٤, pp. ٤٨–٥٤, ٢٠٢٢.

[٦] O. Kodheli et al., “Satellite communications in the new space era: A survey,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. ٢٣, no. ١, pp. ٧٠–١٠٩, ٢٠٢١.

[۷] X. Shen et al., “High throughput satellite systems and beyond: Architecture, key technologies, and challenges,” IEEE Wireless Communications, vol. ۲۹, no. ٦, pp. ۱۳۸–۱٤٥, ۲۰۲۲.

[۸] I. Del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, “A technical comparison of three low Earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband,” Acta Astronautica, vol. ۱٥۹, pp. ۱۲۳–۱۳٥, ۲۰۱۹.

[۹] D. Bilitza et al., “The International Reference Ionosphere model: A review and description of an open-access model of the ionosphere,” Reviews of Geophysics, vol. ٦۰, no. ٤, Art. no. e۲۰۲۲RG۰۰۰۷۹۲, ۲۰۲۲.

[۱۰] A. Krankowski et al., “Validation and performance of global ionospheric maps and reference models during quiet and disturbed conditions,” GPS Solutions, vol. ۲۷, no. ۲, Art. no. ۷۸, ۲۰۲۳.

[۱۱] Z. Zhang, B. Zhang, and X. Yuan, “Characteristics of ionospheric phase scintillation and TEC variations at middle and low latitudes,” Space Weather, vol. ۲۱, no. ٥, Art. no. e۲۰۲۲SW۰۰۳۳۸۹, ۲۰۲۳.

[۱۲] M. M. Hoque and N. Jakowski, “Faraday rotation effects on linearly polarized microwave signals transmitted through the ionosphere,” Radio Science, vol. ٥٦, no. ۸, Art. no. e۲۰۲۱RS۰۰۷۲۹٤, ۲۰۲۱.

[۱۳] S. J. Rogers and P. A. Bernhardt, “Assessment of ionospheric polarization rotation and Faraday correction algorithms for spaceborne synthetic aperture radars,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. ٦۱, pp. ۱–۱۲, ۲۰۲۳.

[۱٤] P. Alken et al., “International Geomagnetic Reference Field: The thirteenth generation,” Earth, Planets and Space, vol. ۷۳, Art. no. ٤۹, ۲۰۲۱.

[۱٥] ITU-R, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” Recommendation ITU-R P.۸۳۸-۳, Geneva, Switzerland, ۲۰۰٥.

[۱٦] H. Hersbach et al., “The ERA٥ global reanalysis,” Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. ۱٤٦, no. ۷۳۰, pp. ۱۹۹۹–۲۰٤۹, ۲۰۲۰.

[۱۷] A. Izadi, N. Davtalab, and B. Jamali, “Evaluation of ERA٥ precipitation product over different precipitation regimes in Iran,” Water, vol. ۱۳, no. ۱٤, Art. no. ۱۹٥۷, ۲۰۲۱.

[۱۸] D. Ghajarnia, B. Saghafian, and T. Raziei, “Comprehensive assessment of ECMWF reanalysis precipitation products over Iran against a high-density rain-gauge network,” Earth and Space Science, vol. ۹, no. ٥, Art. no. e۲۰۲۱EA۰۰۲۰٤۷, ۲۰۲۲.

[۱۹] M. Kavyani Malayeri, B. Saghafian, and T. Raziei, “Assessment of ERA٥ and ERA-Interim precipitation products across homogeneous precipitation regions of Iran,” Arabian Journal of Geosciences, vol. ۱٤, no. ۱۸, pp. ۱–۱٥, ۲۰۲۱.

[۲۰] H. Fallah, N. Sodoudi, and C. Schneider, “Evaluating high-resolution ERA٥ reanalysis precipitation over complex terrain of Iran,” Theoretical and Applied Climatology, vol. ۱٤۷, pp. ۸٤۱–۸٥٥, ۲۰۲۲.

[۲۱] C. R. Harris et al., “Array programming with NumPy,” Nature, vol. ٥۸٥, no. ۷۸۲٥, pp. ۳٥۷–۳٦۲, ۲۰۲۰.

[۲۲] P. Virtanen et al., “SciPy ۱,۰: Fundamental algorithms for scientific computing in Python,” Nature Methods, vol. ۱۷, no. ۳, pp. ۲٦۱–۲۷۲, ۲۰۲۰.

[۲۳] J. D. Hunter, “Matplotlib: A ۲D graphics environment,” Computing in Science & Engineering, vol. ۹, no. ۳, pp. ۹۰–۹٥, ۲۰۰۷.

[۲٤] S. Hoyer and J. D. Hamman, “xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python,” Journal of Open Research Software, vol. ٥, no. ۱, Art. no. ۱۰, ۲۰۱۷.

JMRPh. (11)(1): 76-91, Spring & Summer 2026

Numerical Analysis and Comparative Evaluation of Ionospheric and Precipitation Effects on Microwave Wave Propagation in Ku and Ka Bands

Maryam Shiravand[1], Mohaddeseh Sarbazi [2], Javad T. Firouzjaee[3]*

[1] Postdoctoral Researcher, Department of Atomic Molecular-Astrophysics, Faculty of Physics, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[2] B.Sc. Student, Department of Atomic Molecular-Astrophysics, Faculty of Physics, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[3] *Associate Professor, Department of Atomic Molecular-Astrophysics, Faculty of Physics, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Article details

Received: ۲۰۲٦/۰۷/۰٤
Accepted: ۲۰۲٦/۱۱/۰۲
Published: ۲۰۲٦/۱۱/۰۹

ISSN: ۲٥۸۸-٤۸۲۱
eSSN: ۲٥۸۸-٤۹۳x

Correspondence email: firouzjaee@kntu.ac.ir

Doi: ۱۰,۲۲۰۳٤/jmrph.۲۰۲٦,۱۳۷٤٤۳.۰

Abstract

Satellite signal propagation in high-frequency bands such as Ku and Ka is heavily influenced by atmospheric phenomena in the ionosphere and troposphere. In this study, the simultaneous effects of the ionosphere (Faraday rotation and phase shift) and precipitation (signal attenuation) on space communication links are comparatively evaluated across two geographical regions with distinct climatic and latitudinal characteristics (Tehran and Bandar Abbas). To this end, data from the International Reference Ionosphere (IRI) model, the International Geomagnetic Reference Field (IGRF-۱۳) model, and ERA٥ atmospheric reanalysis data, along with International Telecommunication Union (ITU-R) standard recommendations, were utilized. The results indicate that in the Ku band, ionospheric phase shift and Faraday rotation contribute significantly to signal degradation; specifically, the annual mean ionospheric phase shift in Bandar Abbas was evaluated to be more than twice that of Tehran due to its proximity to the ionospheric equatorial anomaly. As the frequency ascends to the Ka band, ionospheric effects are sharply attenuated, whereas tropospheric rain attenuation becomes the dominant governing factor of power loss. The findings of this comparative evaluation prove the necessity of employing polarization correction systems in the Ku band for the southern regions of the country, while demonstrating that in the Ka band, link margin design must primarily rely on the local instantaneous precipitation intensity statistics.

Keywords: Ionosphere, Troposphere, Microwave Wave Propagation, Faraday Rotation, Ku and Ka Bands, Rain Attenuation.