

## بررسی مزایای استفاده از نرخ بیت وفقی در لینک مخابراتی یک ماهواره LEO

مهدی حسینی<sup>۱</sup> و پژمان رضائی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه ساسکاچوان - ساسکاتون - کانادا

m.hosseini@usask.ca

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان - سمنان - ایران

prezaei@semnan.ac.ir

**چکیده:** این مقاله به بررسی مزایای حاصل از تغییر وفقی نرخ بیت در لینک مخابراتی یک ماهواره LEO می‌پردازد. در این بررسی فرض بر این است که یک محموله مخابراتی برای جمع‌آوری اطلاعات از ترمینال‌های زمینی بر روی ماهواره نصب گردیده است که بر اساس سناریوی ذخیره و ارسال (SAF) عمل می‌کند. این محموله دارای دو لینک مخابراتی برای دریافت اطلاعات از ترمینال‌های زمینی (حالت ذخیره) و سپس ارسال آنها به یک ایستگاه زمینی است (حالت ارسال). هدف از این تحقیق افزایش حجم اطلاعات ارسالی از ماهواره به ایستگاه زمینی در حالت ارسال خواهد بود. در این راستا، نرخ ارسال بیت‌ها در حالت ارسال به صورت وفقی تغییر داده خواهد شد و سپس با تحلیل دقیق بودجه در یک شرایط عملی، بهبود ناشی از این روش به دست می‌آید. نتایج حاصله برای یک ماهواره LEO نمونه نشان می‌دهند که با استفاده از نرخ بیت وفقی به جای نرخ بیت ثابت، می‌توان حجم مبادله روزانه اطلاعات را تا حدود ۱۰۰٪ افزایش داد.

**واژه‌های کلیدی:** آنتن مارپیچ چهارشاخه<sup>۱</sup>، بودجه لینک، سناریوی ذخیره و ارسال<sup>۲</sup>، ماهواره کم ارتفاع و نرخ بیت وفقی<sup>۳</sup>.

### ۱- مقدمه

که در یک ماهواره GEO، بسته به تغییرات شرایط آب و هوایی که عمدتاً به تلفات باران مربوط می‌شود، نرخ بیت ارسالی و حتی نوع مدولاسیون و کدینگ کانال به صورت وفقی تغییر داده می‌شوند [۱]. همچنین، در برخی ماهواره‌های GEO بسته به میزان محوشدگی در توان سیگنال دریافتی، نرخ بیت تا ۸ برابر از مقدار حداکثر خود کاهش داده می‌شود تا کیفیت سیگنال TV دریافت شده در حد قابل قبول باقی بماند [۲].

علاوه بر ماهواره‌های GEO، روش‌های وفقی در نمونه‌هایی از ماهواره‌های LEO نیز به کار رفته‌اند [۳-۶]. در مورد این ماهواره‌ها راهکار وفقی کردن عمدتاً به علت جبران تغییر تلفات توان در طول مسیر انتشار و نیز تغییر بهره آنتن ماهواره مطرح شده است [۷-۸]. هندسه خاص حاکم بر لینک بین این ماهواره‌ها و ایستگاه زمینی باعث می‌شود تا فاصله بین ماهواره و گیرنده و نیز بهره آنتن

استفاده از بودجه توان وفقی در لینک‌های مخابرات ماهواره‌ای، شیوه‌ای مؤثر در بهبود عملکرد و افزایش بازده این گونه لینک‌هاست. این شیوه در برخی از پروژه‌های عملی اعمال و ارزیابی شده است و در توانایی آن نسبت به روش‌های معمولی تردیدی وجود ندارد [۶-۱]. به علت دشواری پیاده‌سازی عملی این شیوه، در مقایسه با روش‌های معمولی، منابع و جزئیات کمتری در این زمینه منتشر شده است. برای مثال، در پروژه FLASH TV مشاهده می‌شود

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۱۰/۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۱۰/۱۶

نام نویسنده مسئول : پژمان رضائی

نشانی نویسنده مسئول : ایران - سمنان -

دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر -

گروه مخابرات

تخصیصی به ماهواره، شامل ۳ بخش اصلی زیر نشان داده شده است:

- پهنای باند لازم برای ارسال اطلاعات با توجه به مدولاسیون آن؛

- باند جابه‌جا شده بر اثر شیفت فرکانسی داپلر (مثبت و منفی به ترتیب برای دور و نزدیک شدن به ایستگاه)؛

- باند حائل تا باندهای تخصیص یافته مجاور جهت اجتناب از تداخل

ماهواره LEO معرفی شده در جدول (۱) به عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. ابعاد فیزیکی، مشخصات مدار چرخش و نیز وضعیت ایستگاه زمینی نسبت به این ماهواره نیز در جدول (۱) ارائه شده است. با وفقی کردن نرخ بیت در حالت ارسال، مزایای به دست آمده ارائه می‌شود.

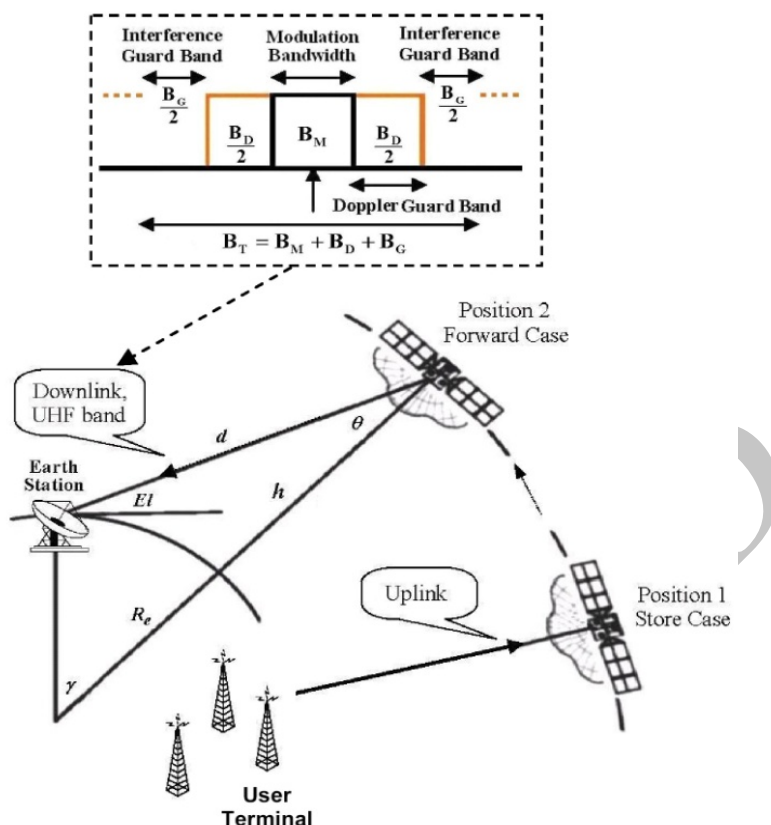
#### جدول (۱): مشخصات فیزیکی و مدار چرخش ماهواره LEO

مفروض و وضعیت ایستگاه زمینی نسبت به آن

زاویه شیب مدار: $99.1^\circ$
نسبت بیضوی بودن مدار (e): 0.00163
ارتفاع ماهواره از سطح زمین: 910km (اوج) و 878km (حضیض)
نوع ماهواره و پریود آن: Sun-Synchronous و 102.9 minutes
ابعاد ماهواره: $48\text{cm} \times 48\text{cm} \times 48\text{cm}$ (صفحه زمین آنتن $48\text{cm} \times 48\text{cm}$ )
عرض جغرافیایی ایستگاه زمینی: $36^\circ$ (عرض جغرافیایی تهران)
حداقل زاویه فراز (El در شکل (۱)) مجاز در ایستگاه زمینی: $15^\circ$
میانگین زمان دید روزانه در ایستگاه: 26.59 min

ماهواره به سمت ایستگاه زمینی در طول زمان تغییر کند که این امر به تغییرات بودجه توان منجر می‌گردد. در چنین شرایطی، با استفاده از بودجه وفقی و البته، پذیرفتن اندکی پیچیدگی در مدیریت بودجه، می‌توان از این تغییرات در جهت بهبود عملکرد لینک مخابراتی جبران یا کنترل نمود. در ادامه، برای وفقی کردن بودجه توان، نرخ بیت که از پارامترهای مهم بودجه است، به صورت وفقی تغییر داده و میزان بهبود ناشی از آن در حجم تبادل اطلاعات نشان داده می‌شود.

قبل از ورود به بحث افزایش ظرفیت لینک مخابراتی ماهواره LEO، لازم است به عملکرد عمومی یک ماهواره LEO که مطابق سناریوی SAF عمل می‌کند، اشاره شود. در شکل (۱) هندسه و نحوه عملکرد ارتباطی یک ماهواره LEO تحت سناریوی SAF به تصویر کشیده شده است. با توجه به اینکه یک ماهواره LEO همواره در دید ایستگاه‌ها یا کاربران زمینی نیست، برقراری ارتباط دائم و همزمان بین ترمینال‌ها و ایستگاه زمینی ممکن نیست. یک راه حل ساده و مؤثر برای حل این مسئله، استفاده از سناریوی SAF است. بدین ترتیب، اطلاعات در زمان‌های مختلف از تعدادی ترمینال زمینی در مسیر رو به بالا جمع‌آوری و در حافظه‌ای روی ماهواره ذخیره می‌شود. سپس هنگام قرار گرفتن ماهواره در دید ایستگاه زمینی (در همان عبور یا گذرهای بعدی)، این اطلاعات در مسیر رو به پایین به ایستگاه مخابره و حافظه برای گذر بعد تخلیه می‌گردد. برای سادگی دو ارتباط غیرهمزمان در مسیرهای رو به بالا و رو به پایین در شکل (۱) با هم ادغام شده است. به طور معمول، محموله مخابراتی نصب شده روی ماهواره شامل گیرنده‌ای برای دریافت اطلاعات از ترمینالهای زمینی در حالت ذخیره، حافظه‌ای برای ذخیره این اطلاعات و نیز فرستنده‌ای برای ارسال اطلاعات به ایستگاه زمینی در حالت ارسال است. همچنین، در بالای شکل کل پهنای باند



شکل (۱): هندسه و نحوه عملکرد یک ماهواره LEO تحت سناریوی SAF و مجموع پهنای باند لازم در حالت Forward

با تقسیم طرفین رابطه (۳) بر حداکثر پهنای باند لینک  $(B_T)$  داریم:

$$\left[ \frac{C}{N} \right] = \left[ \frac{E_b}{N_0} \right] + [R_C] - [B_T] + SM \quad (4)$$

که  $SM$  حاشیه امنیتی است که برای تضمین داشتن سیگنال به نویز کافی در نظر گرفته شده است. از مقایسه روابط (۱) و (۴) رابطه اصلی تعیین کننده بودجه به دست خواهد آمد:

$$SM = [P_S] + [G_S] + \left[ \frac{G_{ES}}{T_{SYS}} \right] - \left[ \frac{E_b}{N_0} \right] - [R_C] - [k] - [FSL] \quad (5)$$

در روابط فوق،  $G_{ES}$  و  $G_S$  به ترتیب بهره آنتن های ماهواره و ایستگاه زمینی،  $P_S$  توان ارسالی از ماهواره،  $C$  توان دریافتی در ایستگاه زمینی در ورودی آنتن و فاصله  $d$

## ۲- تغییرات زمانی بودجه در یک لینک LEO

با لحاظ نویز در رابطه فریس، بودجه توان در یک لینک مخابراتی ماهواره ای را می توان با روابط زیر بیان نمود [۹]:

$$\left[ \frac{C}{N} \right] = [P_S] + [G_S] + \left[ \frac{G_{ES}}{T_{SYS}} \right] - [k] - [B_T] - [FSL] \quad (1)$$

که در آن تضعیف فضای آزاد<sup>۶</sup> (FSL) برحسب دسی بل بوده و برابر است با:

$$[FSL] = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

و نیز داریم [۳-۹]:

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right] = \left[ \frac{E_b}{N_0} \right] + [R_C] \quad (3)$$

FSK که در این طرح در نظر گرفته شده است، پهنای باند طیف سیگنال پس از اعمال مدولاسیون، به شرط در نظر گرفتن فاصله بین صفرهای<sup>۹</sup> دو طرف لوب اصلی<sup>۱۰</sup> طیف،  $1/72$  برابر نرخ بیت است [۱۰]. بنابراین، مقدار  $SE$  برابر ۱ تقسیم بر  $1/72$  خواهد بود. شایان ذکر است که در رابطه (۷) از اثر سرعت وضعی ایستگاه زمینی که از چرخش زمین به دور خود ناشی می‌شود، صرف نظر شده است. به عبارتی، مطابق شکل (۱) ایستگاه زمینی ثابت و ماهواره نسبت به آن متحرک در نظر گرفته شده است.

روابط (۱) و (۲) نشان می‌دهند که نسبت سیگنال به نویز در ایستگاه زمینی ثابت نبوده، تابعی از دو پارامتر متغیر با زمان است:

•  $G_s(\theta(t))$  که بهره آنتن نصب شده بر روی ماهواره است و دارای الگوی ثابتی است. با گذشت زمان و تغییر زاویه فراز<sup>۱۱</sup> (یا به طور معادل به زاویه  $\theta(t)$  در شکل (۱)) مقدار  $G_s(\theta(t))$  در راستای ایستگاه زمینی تغییر می‌کند.

•  $d(t)$  نیز که در شکل (۱) تعریف شده است، به علت وابستگی به زاویه فراز با زمان تغییر خواهد کرد. با توجه به شکل (۱)، رابطه  $d(t)$  و زاویه فراز بدین ترتیب بیان می‌شود:

$$d(t) = \sqrt{(R_e + h)^2 - R_e^2 \cos^2 El(t)} - R_e \sin El(t) \quad (9)$$

بدیهی است که بر اثر تغییرات زمانی در دو پارامتر فوق، مقدار سیگنال به نویز با کاهش زاویه فراز کاهش می‌یابد. برای حل این مشکل می‌توان با کنترل و تغییر واقعی پارامترهایی نظیر نرخ بیت، تغییرات بیش از حد سیگنال به نویز دریافتی را جبران کرد، اما برای انجام این کار در یک وضعیت عملی، ابتدا لازم است بتوان زمان‌های عبور و مدت هر یک از این عبورها از روی ایستگاه زمینی را به دقت تعیین کرد. بر اساس مطالعات منعکس شده در مراجع [۱۲-۱۱]، عموماً متوسط زمان دسترسی روزانه به یک ماهواره کم ارتفاع از یک ساعت کمتر است. برآورد این پارامتر نیازمند مدل‌سازی دقیق هندسه و مکانیک حرکت ماهواره است. در این تحقیق، مدل‌سازی با بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB و ایجاد m-file ارائه شده در ضمیمه صورت گرفته است.

نیز مسیر سیگنال بین ماهواره و ایستگاه زمینی است. همچنین  $R_c$  نرخ بیت ارسالی،  $E_b$  انرژی موجود در هر بیت،  $k$  ثابت بولتزمن،  $T_{sys}$  دمای نویز معادل<sup>۷</sup> کل سیستم در ایستگاه زمینی و  $N_0 = kT_{sys}$  برابر توان نویز در پهنای باند یک هرتز است. مقدار نویز در کل پهنای باند  $B_T$  نیز با رابطه  $N = N_0 B_T$  بیان می‌شود. نکته قابل توجه تعریف دقیق  $B_T$ ، مطابق با شکل (۱)، است. همان طور که مشاهده می‌شود، با توجه به وجود جابه‌جایی فرکانسی داپلر، یک حاشیه امنیت مناسب ( $B_D/2$ ) در اطراف طیف اصلی سیگنال ( $B_M$ ) در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، پهنای باند کل مورد نیاز عبارت است از:

$$B_T = (B_M + B_D) + B_G = 1.25 \times (B_M + B_D) \quad (6)$$

که در آن ضریب  $1/25$  به  $25\%$  پهنای باند بیشتر ( $B_G$ ) منجر می‌گردد که علت در نظر گرفتن آن اطمینان از عدم تداخل فرکانسی است. یادآوری می‌شود که براکت در روابط (۱) تا (۵) بیانگر این است که مقادیر برحسب دسی‌بل هستند. همچنین  $B_D/2$  در رابطه (۶) بیانگر مقدار جابه‌جایی فرکانسی داپلر است که با توجه به هندسه شکل ۱ برابر است با:

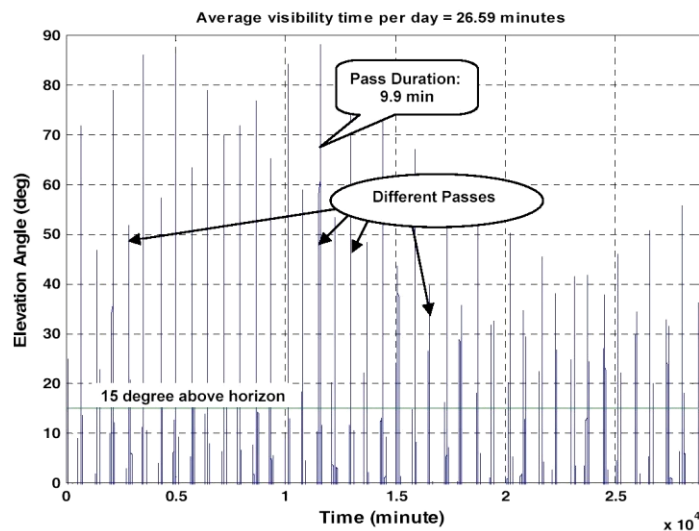
$$B_D/2 = f \left( \frac{v}{c} \right) \left( \frac{R_e}{R_e + h} \right) \cos El, \quad (7)$$

که در آن

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{R_e + h}}, \quad \mu = 3.99 \times 10^5 \text{ (km)}^3/\text{s}^2 \quad (8)$$

که در این رابطه  $R_e$  شعاع زمین برابر  $6378$  کیلومتر،  $c$  سرعت نور،  $f$  فرکانس کار و  $v$  سرعت حرکت ماهواره، مماس بر مدار چرخش است. برای مشخصات مندرج در جدول ۱، مقدار حداکثر انحراف داپلر عبارت است از:  $B_D/2 \approx \pm 8.36 \text{ kHz}$  که علامت آن به جهت حرکت ماهواره نسبت به ایستگاه زمینی بستگی دارد و لذا لازم است این مقدار در هر دو طرف باند اضافه گردد. همچنین  $B_M$  در رابطه (۶) از رابطه  $R_c = SE \times B_M$  به دست می‌آید که در آن بازده طیفی<sup>۸</sup> ( $SE$ ) پارامتری است که به نوع مدولاسیون به کار رفته بستگی دارد. برای مدولاسیون

برای مثال، زمان‌های دید ماهواره مفروض در مدت ۲۰ روز شده است. متوالی به وسیله این m-file محاسبه و در شکل (۲) ترسیم



شکل (۲): زمان‌های رویت ماهواره در ایستگاه زمینی در بازه ۲۰ روزه

غیروفتی که در آن نرخ بیت ارسالی از ماهواره ثابت است، رویه انتخاب و تنظیم نرخ بیت به این ترتیب است که در روابط (۱) و (۵)، مقدار بدترین حالت؛ یعنی حداکثر فاصله  $(d_{max} = d_{(E=15^\circ)})$  قرار داده می‌شود. با این کار، مقدار حداقل سیگنال به نویز و حداکثر نرخ بیت مجاز به دست می‌آید که البته در عمل این نرخ بیت باید به نزدیکترین مقدار استاندارد گرد شود. بدیهی است که در سایر حالت‌ها  $d$  کمتر از  $d_{max}$  است که این به معنای داشتن سیگنال به نویز بهتر و امکان افزایش نرخ بیت است، اما به علت ثابت فرض شدن نرخ بیت، امکان استفاده بهینه از این ظرفیت وجود نخواهد داشت. به منظور بهبود این وضعیت می‌توان به هنگام افزایش سیگنال به نویز، متناسب با مقدار افزایش، نرخ بیت را افزایش داد و یا به عبارتی نرخ بیت را وقتی کرد. در ادامه بهبود ناشی از به کارگیری این تکنیک در لینک مخابراتی ماهواره جدول (۱) بررسی و تحلیل می‌شود. با بازنویسی رابطه (۵) می‌توان  $R_c$  را برحسب بقیه متغیرها به دست آورد و سپس با انتگرال‌گیری از آن نسبت به زمان، به مجموع بیت‌های ارسالی  $(TFB)$  توسط لینک دست یافت:

مطابق شکل، تنها برای زوایای فراز بیش از ۱۵ درجه است که ماهواره به تبادل اطلاعات با ایستگاه می‌پردازد و در نتیجه، تنها این زمان‌ها به عنوان زمان دید تلقی می‌شوند. با تقسیم مجموع این زمان‌ها بر کل ۲۰ روزه، میانگین مشاهده روزانه ماهواره در ایستگاه زمینی به دست خواهد آمد که مقدار آن ۲۶/۵۹ دقیقه است. بررسی نتایج به دست آمده از این m-file و مقایسه آن با نتایج حاصل از نرم‌افزار تجاری STK (بسته نرم‌افزاری مدل‌سازی مدار حرکت ماهواره‌ها) صحت و دقت مدل‌سازی انجام شده در برنامه MATLAB را تایید می‌کند.

### ۳- وقتی کردن نرخ بیت در بودجه توان

با توجه به اینکه اکنون ما قادر به تخمین دقیق تغییرات زمانی زاویه فراز و در نتیجه زمان‌های رویت ماهواره هستیم و با توجه به ارتباط موجود بین فاصله  $d$  و زاویه فراز در رابطه ۹، قادر خواهیم بود تغییرات  $d$  را نیز برحسب زمان به دقت برآورد کنیم. به این ترتیب، می‌توان بودجه توان را که مطابق روابط (۱) و (۲) به  $d$  وابسته است، در هر لحظه از زمان مطالعه و تحلیل کرد. شایان ذکر است که در روش

ذکر این نکته حائز اهمیت است که رابطه (۱۰) یک رابطه عمومی است و در صورتی که در حالت خاص  $R_c$  ثابت باشد (وضعیت معمولی یا غیروقفی)، می توان آن را از انتگرال خارج کرده و جمله انتگرالی باقیمانده، مجموع زمان دید هندسی ماهواره در فاصله زمانی  $t_1 < t < t_2$  خواهد شد. بنابراین، در این حالت، با ضرب نرخ بیت در زمان دید متوسط روزانه، می توان میانگین روزانه اطلاعات مبادله شده را محاسبه نمود.

با استفاده از **m-file** ارائه شده در ضمیمه برای تخمین زمان های گذر و با داخل کردن روابط ۱ تا ۹ و نیز ۹ تا ۱۱ و اطلاعات جدول (۲) در این **m-file**، در مجموع می توان به یک **m-file** جدید دست یافت که برآورد دقیق حجم مبادله اطلاعات را در حالت وقفی ممکن سازد. شایان ذکر است که مطابق رابطه (۱۱)، مقدار  $TFB$  به  $G_s(\theta(t))$  بستگی دارد. بنابراین، با تغییر شکل الگوی تشعشعی آنتن ماهواره (بر اثر تغییر ابعاد یا نوع آنتن) مقدار انتگرال در رابطه (۱۱) تغییر خواهد کرد. برای مطالعه میزان تاثیر این مسأله، در ابتدا به جای استفاده از یک الگوی تشعشعی آنتن QHA ساخته شده، یک مدل ریاضی در نظر گرفته شده است [۱۳]:

$$G_s(\theta) = \begin{cases} G_0 \cos^n(\theta) & 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

جدول (۲): بودجه لینک بین ایستگاه زمینی و ماهواره در باند UHF

Frequency	401 MHz
Bit Rate	9.6 kbps
Maximum bandwidth available	100 kHz (401±0.05 MHz)
Satellite RF power	2.1 Watt
Satellite antenna gain ( $EI=15^\circ$ )	3.26dBi for optimum pattern in (11) with $n=1$ 2.34dBi for optimum QHA in Fig. 6
Losses other than the free space:	
- Pointing:	1 dB
- Polarization:	3 dB
- Atmosphere and ionosphere	2 dB
- Equipment	3 dB
Safety/Link Margin	3 dB
Figure of merit, $[G_{ES}/T_{ES}]$	-17 dB/K
Required $[E_b/N_0]$ at receiver	13.4 dB (FSK & $BER < 1e^{-5}$ )
Maximum slant range ( $d_{max}$ )	2243 km

$$TFB = \int_{t_1}^{t_2} R_c(t) dt \quad (10)$$

که  $t_1$  و  $t_2$  به ترتیب شروع و پایان زمانی هستند که در حین آن اطلاعات ارسالی برآورد شده است. با مرتب کردن روابط داریم:

$$TFB = \begin{cases} A \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_s G_s(\theta(t))}{d^2(t)} dt & 0 \leq |\theta| \leq 58^\circ \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

که متغیر  $A$  آن عبارت است از:

$$A = 10^{E/10} \quad (12)$$

و داریم:

$$E = \left[ \frac{G_{ES}}{T_{SYS}} \right] - \left[ \frac{E_b}{N_0} \right] - [k] - 20 \log \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) - SM \quad (13)$$

این رابطه نشان می دهد که در صورتی که ماهواره در دید ایستگاه باشد؛ یعنی داشته باشیم:  $0 \leq |\theta| \leq 58^\circ$  (یا به طور معادل داشته باشیم:  $EI \geq 15^\circ$ )، فرستنده روشن شده و در بقیه موارد خاموش خواهد بود. در مجموع، مطابق شکل (۲)، فرستنده روزانه ۳ یا ۴ بار، هر بار به مدت چند دقیقه، روشن شده و در بقیه زمانها خاموش خواهد بود.

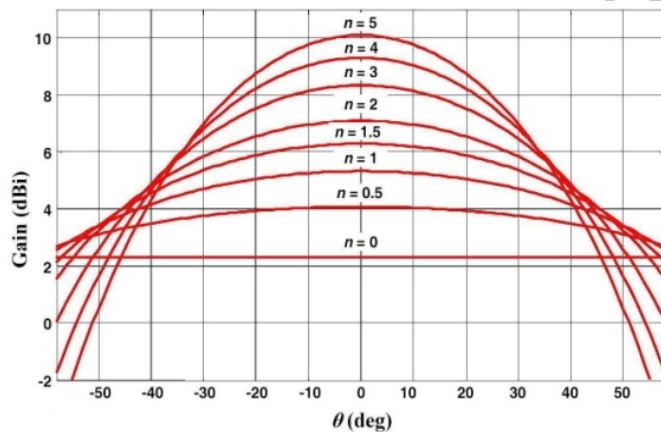
استفاده از این مدل ریاضی باعث تسریع در پردازش و تحلیل نرم افزاری اطلاعات می شود. در شکل (۳)، تغییرات  $G_S$  در رابطه (۱۴)، نسبت به  $\theta$  به ازای  $n$  های متفاوت ترسیم شده است. اکنون برای مطالعه تاثیر تغییر  $G_S(\theta(t))$ ، رابطه (۱۴) را در رابطه (۱۱) وارد می کنیم. سپس مقدار  $n$  را در بازه  $0 < n < 5$  تغییر داده و به ازای هر  $n$  m-file فوق را (که شامل روابط (۱۱) و (۱۴) است) در جهت محاسبه و مقایسه  $TFB$  اجرا می کنیم.

از نظر تئوری تابش الکترومغناطیس، الگوی تشعشی هر آنتنی باید در این رابطه صدق کند [۱۳]:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G_S(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 4\pi \quad (15)$$

و بنابراین، می توان مقدار  $G_0$  در رابطه (۱۴) را چنین محاسبه کرد:

$$G_0 = 2(n+1) \quad (16)$$



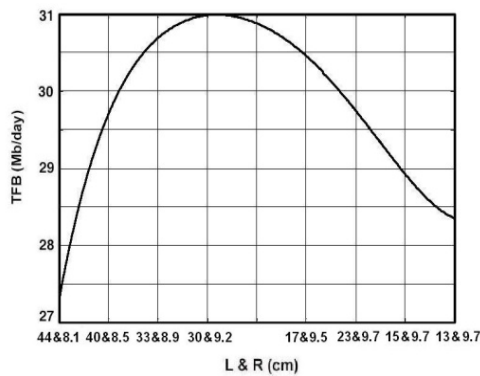
شکل (۳): تغییرات بهره آنتن ماهواره به ازای مقادیر مختلف  $n$ ، مطابق با مدل بهره رابطه ۱۴

است که مطابق شکل (۳) این الگوی بهره بهینه از نظر جهت دار بودن در حد متوسطی قرار دارد. در صورتی که الگوی بهره ریاضی رابطه (۱۴) با الگوی بهره آنتن QHA طراحی شده جایگزین شود، در حالی که اثر عدم تطبیق کامل امپدانس در ورودی آنتن نیز بر بهره اعمال گردد ( $VSWR < 2:1$ ) و سپس تحلیل ها تکرار شوند، شکل (۴) به شکل (۵) تبدیل می شود.

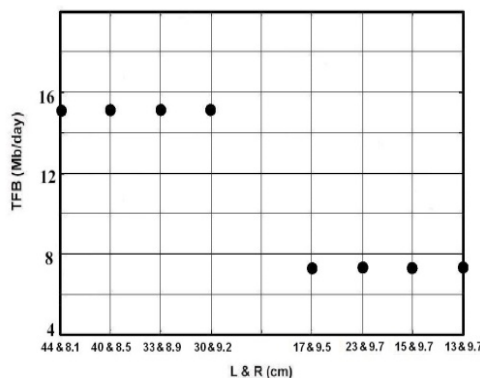
مشاهده می شود که توان  $n$  در محور افقی شکل (۴)، به L&R در شکل (۵) که معرف طول و شعاع آنتن QHA هستند، تبدیل شده است (L&R در شکل (۶) تعریف شده اند). در واقع، ایجاد تغییر در L&R، مشابه اثر تغییر  $n$  به تغییر شکل الگوی بهره منجر می شود. در مورد آنتن QHA ذکر این نکته لازم است که این آنتن به علت داشتن الگوی تشعشی زینی شکل<sup>۱۳</sup> و نیز برخی مزایای دیگر در

در شکل (۴) - الف منحنی تغییرات  $TFB$  نسبت به تغییرات  $n$  نشان داده شده است. نکته قابل توجه این است که به ازای مقدار  $TFB$  به حداکثر خود؛ یعنی  $35/46$  مگاییت رسیده است. نکته دیگری که از شکل (۴) - الف فهمیده می شود، این است که افزایش بیش از حد  $n$  باعث کاهش  $TFB$  می شود. علت این امر آن است که افزایش  $n$  باعث افت شدید بهره در زوایای  $\theta$  بالا شده و در نتیجه به محدود شدن بیش از حد نرخ بیت در زوایای فراز کم منجر می شود.

برای مقایسه بهتر، در شکل (۴) - ب، مقدار  $TFB$  در حالت غیروفقی نیز برحسب  $n$  ترسیم شده است. مشاهده می شود که به ازای  $n$  برابر با ۱،  $TFB$  در هر دو حالت وفقی و غیروفقی حداکثر است. در مجموع، می توان چنین نتیجه گرفت که الگوی بهره متناظر با  $n=1$  یک الگوی بهره بهینه برای ماهواره مفروض به حساب می آید. شایان ذکر



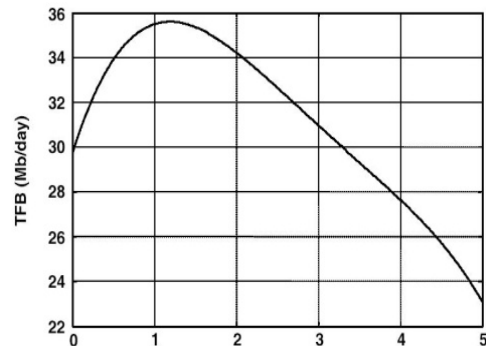
(الف)



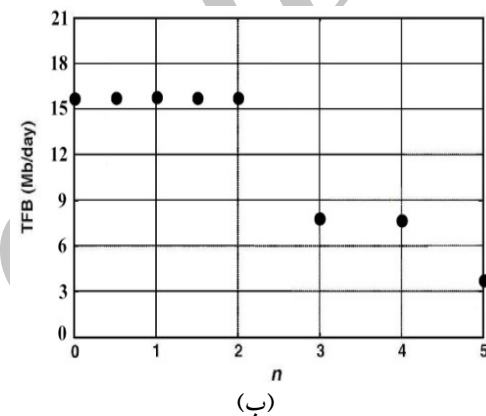
(ب)

شکل (۵): تغییرات TFB نسبت به تغییر شعاع و ارتفاع آنتن QHA نشان داده شده در شکل ۶، الف) نرخ بیت وقتی؛ ب) نرخ بیت ثابت

بسیاری از ماهواره‌های LEO استفاده می‌شود [۱۶-۱۴،۶-۵].



(الف)



(ب)

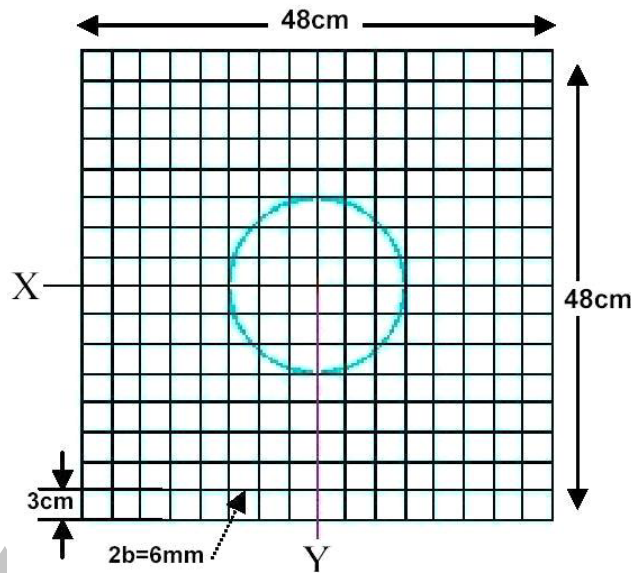
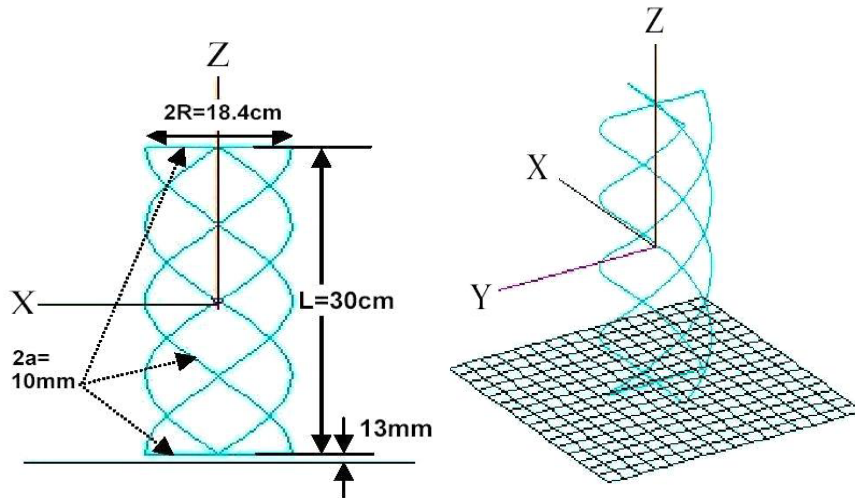
شکل (۴): تغییرات TFB نسبت به  $n$ ، (با فرض مدل ریاضی ۱۴ برای الگوی بهره آنتن ماهواره)، الف) نرخ بیت وقتی؛ ب) نرخ بیت ثابت

شایان ذکر است که در همه موارد فوق، به منظور داشتن شرایط واقعی، آنتن بر روی صفحه زمین محدودی با ابعاد ۴۸ در ۴۸ سانتیمتر (اندازه وجهی از ماهواره که آنتن بر آن نصب می‌شود) مدل‌سازی و تحلیل شده است. با توجه به ساختار سیمی آنتن، عمل مدل‌سازی و تحلیل در نسخه ۱/۱ نرم افزار NEC-Pro انجام گرفته است.

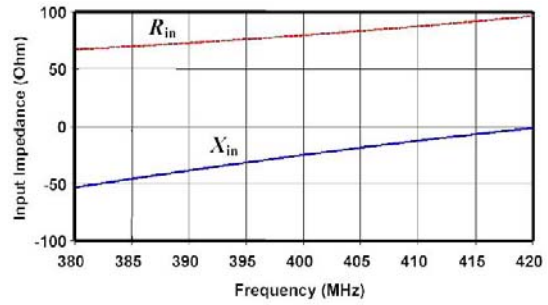
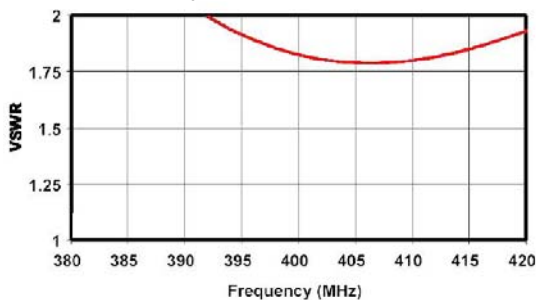
در شکل (۶) وضعیت این آنتن از سه نما به همراه ابعاد فیزیکی بهینه آن ترسیم شده است. در شکل (۷) نیز امپدانس ورودی و نسبت موج ساکن<sup>۱۴</sup> این آنتن حول فرکانس ۴۰۱ مگاهرتز مشاهده می‌شود.

شکل (۵)- الف نشان می‌دهد که مشابه شکل (۴)- الف، در حالت نرخ بیت وقتی مقداری برای L&R وجود دارد (به ترتیب ۹/۲ و ۳۰ سانتیمتر) که TFB را حداکثر می‌کند. در شکل (۴)- ب نیز مشاهده می‌شود که همین مقدار L&R در حالت غیروقتی نیز حداکثر مقدار TFB را در پی دارد. بنابراین، در نظر گرفتن این مقدار برای L&R به همراه بقیه ابعاد آنتن که ثابت در نظر گرفته شده‌اند (مطابق شکل (۶))، به داشتن الگوی بهره بهینه برای ماهواره منجر خواهد شد.



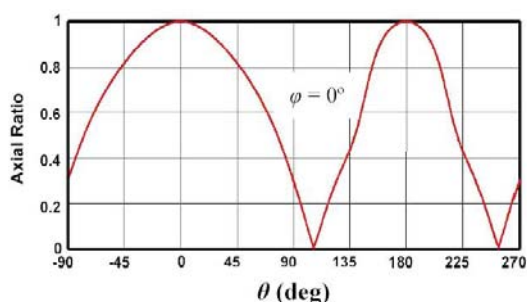
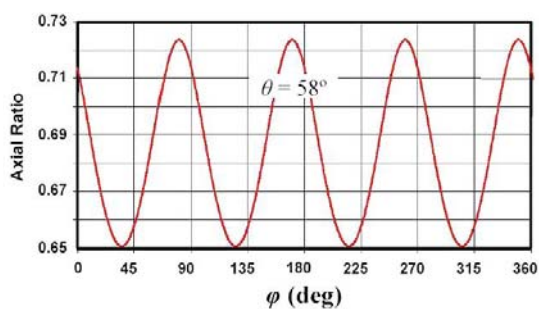


شکل (۶): نمای سه بعدی و ابعاد آنتن QHA در نظر گرفته شده برای فرستنده ماهواره



شکل (۷): پاسخ فرکانسی امپدانس ورودی و VSWR آنتن ماهواره

از  $100\text{kHz}$  پهنای باند در دسترس، مورد استفاده مفید قرار گرفته است. به عبارتی، با پذیرش پیچیدگی ناشی از سوئیچ نرخ بیت در حین ارتباط، حجم ارسال اطلاعات دو برابر شده است.



شکل (۸): نسبت محوری پلاریزاسیون دایروی تشعشی آنتن QHA

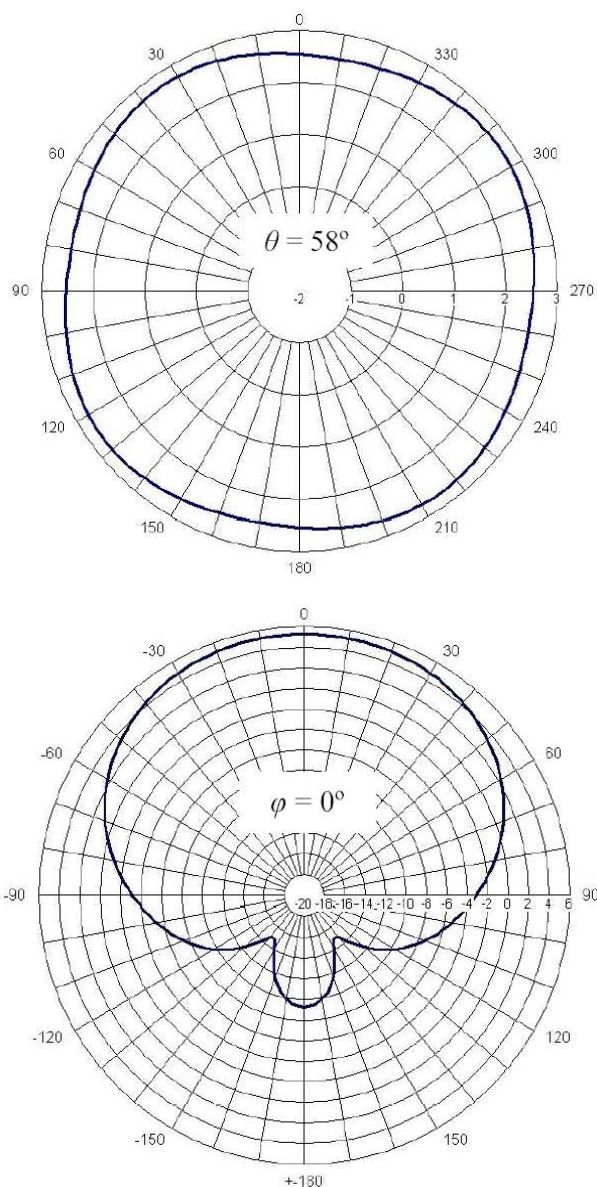
در نهایت نیز در شکل‌های (۸) و (۹) نیز به ترتیب نسبت محوری پلاریزاسیون به عنوان کیفیت پلاریزاسیون دایره‌ای و الگوی تغییرات بهره در دو صفحه  $\theta$  ثابت و  $\varphi$  ثابت در فرکانس مرکزی  $401$  مگاهرتز ارائه شده است.

جدول (۳) نشان می‌دهد که چنانچه از الگوی بهره QHA بهینه (به ترتیب طول  $9/2$  و ارتفاع  $30$  سانتیمتر) استفاده شود، مقدار  $TFB$  در حالت نرخ بیت و فقی نسبت به حالت غیرو فقی بیش از  $100\%$  افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب هزینه ارتباط نیز به همین نسبت کاهش می‌یابد. نکته مهم آن است که این افزایش قابل توجه در حالی به دست می‌آید که زمان دید ماهواره در ایستگاه زمینی تغییری نکرده است و در واقع، این بهبود تنها بر اثر استفاده بهینه از این زمان (و فقی عمل کردن) رخ داده است.

همچنین در جدول (۳) مشاهده می‌شود که در حالت و فقی نرخ بیت به جای ثابت بودن روی  $9/6\text{kbps}$ ، بین سه مقدار  $9/6\text{kbps}$ ،  $19/2\text{kbps}$  و  $38/4\text{kbps}$  بسته به مقدار سیگنال به نویز، سوئیچ شده است. همچنین، مشاهده می‌شود که در حالت و فقی دقت شده است که از یک طرف در بدترین حالت پهنای باند از اندازه تخصیص داده شده  $100$  کیلوهرتز (حول  $401$  مگاهرتز) تجاوز نکند و از طرف دیگر از حداکثر پهنای باند موجود نیز استفاده شود (از  $99/7\text{kHz}$  از  $100\text{kHz}$  موجود استفاده شده است). این در حالی است که در وضعیت غیرو فقی تنها حدود  $41/5\text{kHz}$

جدول (۳): نتایج حاصل از تحلیل ظرفیت انتقال و وضعیت لینک در دو حالت نرخ بیت و فقی و نرخ بیت ثابت

Bandwidth Available (kHz)		Bandwidth Needed (kHz)	$TFB$ (Mb/day)	Bit Rate (kbps)
غیرو فقی	100	41.5	15.32	9.6
و فقی		99.7 100	30.91 (QHA: L=30 & R=9.2) 35.46 (Model: $\eta=1$ )	9.6 19.2 38.4



شکل (۹): بهره آنتن QHA در صفحات  $\theta$  ثابت و  $\varphi$  ثابت در فرکانس مرکزی ۴۰۱ مگاهرتز بر حسب dB

#### ۴- نتیجه گیری

در حالت ارسال رو به پایین (ایستگاه زمینی) متمرکز شده است. نتایج حاصل در حالت ارسال از یک ماهواره LEO نمونه نشان می دهند که با تغییر وقتی نرخ بیت (سوئیچ کردن بین سه نرخ بیت ۹/۶، ۱۹/۲ و ۳۸/۴ کیلوبیت بر ثانیه)، به جای استفاده از نرخ بیت ثابت (۹/۶kbps) و استفاده از آنتنی با الگوی تشعشعی بهینه برای ماهواره، می توان حجم مبادله روزانه اطلاعات را به میزانی در حدود ۱۰٪ افزایش داد. این بهبود چشمگیر در حالی حاصل

در این مقاله مزایای حاصل از وقتی نمودن نرخ بیت در لینک مخابراتی بین یک ماهواره LEO و ایستگاه زمینی متناظر مطالعه و بررسی شده است. هنگام مطالعات، فرض بر این است که یک محموله مخابراتی با هدف جمع آوری اطلاعات از ترینال های زمینی بر روی ماهواره نصب گردیده است که بر اساس سناریوی ذخیره و ارسال (SAF) عمل می کند. کلیه مطالعات بر افزایش حجم مبادله اطلاعات

حکاک ابراز می‌دارند. از کمک‌های همکاران سازمان فضایی ایران، به طور خاص دکتر شروین امیری، مهندس فردین میرزاپور و مهندس نوشین ابوترابیان نیز تقدیر می‌شود. همچنین، از اصلاحات ارزشمند داوران مجله قدردانی می‌شود.

می‌گردد که با وفقی شدن نرخ بیت پهنای باند لینک مخابراتی هنوز از حداکثر مقدار تخصیص داده شده تجاوز نمی‌کند.

### سیاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان مقاله نهایت تشکر و قدردانی خود را از راهنمایی‌های ارزشمند شادروان پرفسور محمد

### ضمیمه

```

Pass Prediction M-File
Me=5.976e24;
inclination=99.1;%(deg).
H=894000;%(meter)----(Note: [910+878]=2=894km)
Re=6378000;%(meter)
R0=Re+H;
latitude=36;%(deg); 25-40 for stations all around Iran.
day=20;%(deg) the average visibility time (over one day)
%is calculated after this number of days.
d1=15;%(deg) minimum elevation angle
d=d1*pi/180;
c=sin(d);
t2=[.0001:1:1440*day];%1440=24*60 (solar day in minute)
t=[t2*60];%24*60*60(one solar day in second)
teta=(90-latitude)*pi/180;
tetai=(inclination-90)*pi/180;
phi0=0*pi/180;
phit=[phi0+t*2*pi/24/3600];
alfas=-[t*sqrt(Me*6.67e-11/R0^3)];
var1=[(R0*(sin(teta)*cos(alfas).*cos(phit)+sin(tetai)*sin(teta)...
*sin(alfas).*sin(phit)+cos(tetai)*cos(teta)*sin(alfas))-Re];
var2=[sqrt(R0^2+Re^2-2*Re*R0*(sin(teta)*cos(phit).*...
cos(alfas)+sin(teta)*sin(tetai)*sin(phit).*sin(alfas)+cos(teta)
*cos(tetai)*sin(alfas)))]];
var=var1./var2; %sine of the elevation angle
x=[c*t./t];
m=0;
for h=1:1440*day*10;
    if var(h)>c ;
        m=m+1;
    end;
end;
TT=.1*m/day %satellite visibility time per day (in minute)
figure
plot(t2,180*asin(var)/pi,t2,180*asin(x)/pi);
axis([0 1440*day 0 90]);
grid on;
TT1=num2str(TT);
title(['Average view time per day = ' TT1 ' minutes']);
xlabel('Time (Minute)');
ylabel('Elevation Angle(deg)');
a=num2str(d1);
a=[a 'degee above horizon'];
text(900,17,a);
End of M-File

```

## مراجع

- [12] Rezaei, P., Abotorabian, N., Hakkak, M., "Optimum designing of amateur satellite for maximum availability," 8th International Conference on Advanced Communication Technology, Vol. 2, pp. 1188-1191, Feb. 2006.
- [13] Balanis, C. A., Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Ed., John Wiley & Sons, USA, 2005.
- [14] Dooren, G. V. and Cahill, R., "Design, Analysis and Optimisation of Quadrifilar Helix Antennas on the European Metop Spacecraft", 10<sup>th</sup> IEE International Conference on Antenna and Propagation, Apr. 1997.
- [15] Hosseini, M., Hakkak, M., and Rezaei, P., "Design of a Dual-Band Quadrifilar Helix Antenna", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 4, pp. 39-42, 2005.
- [16] Hosseini, M., Rezaei, P., and Hakkak, M., "Design and Implementation of A Dual-Band Quadrifilar Helix Antenna", IEEE Int. Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, pp. 493-495, Sept. 2004.
- [1] Morello, A., "FLASH-TV: A Flexible Bit-Rate Transmission System for Digital HDTV Outside Broadcasting by Satellite", IEEE Global Telecomm. Conference, Vol. 3, pp. 1622-1627, 1993.
- [2] Ferro, E., "A satellite network for good weather conditions and for high rain attenuation", SBT/IEEE Int. Telecomm. Symposium (ITS'90), pp. 393-398, 1990.
- [3] Lee, C. H., "Variable data rate modem for low earth orbiting satellite (leos) communication", IEEE Military Communications Conference, 1995.
- [4] Cowley, W. G., "Performance Comparisons for Adaptive LEO Satellite Links", Int. J. Satellite Commun. and Networking, Vol. 24, pp. 229-239, 2006.
- [5] Hosseini, M., Hakkak, M., and Rezaei, P., "An Investigation on the Effect of Satellite Antenna Pattern on the Efficiency of Adaptive Bit Rate Scheme used in a LEO Satellite Link", Loughborough Antenna and Propagation Conference (LAPC06), pp. 453-456, April 2006.
- [6] Hosseini, M., Hakkak, M., and Rezaei, P., "Adaptive Bit Rate Scheme for a LEO Satellite Link," 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, Isfahan University of Technology, pp. 200-203, May 2010.
- [7] Rezaei, P., Hakkak, M., "Design of Quadrifilar Helical Antenna for Use on Small Satellites," IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Vol. 3, pp. 2895-2898, June 2004.
- [8] Rezaei, P., Aliakbarian, H., Hojjat, N., Hakkak, M., "Optimum Beam Forming of LEO Satellite Antenna with Genetic Algorithm," 10th International Symposium on Antenna Technology & Applied Electromagnetics & URSI, pp. 141-144, July 2004.
- [9] Roddy, D., Satellite Communications, 3rd Ed., New York: Mc-Graw Hill, 2001.
- [10] Pattan, B., Satellite-Based Cellular Communications, New York: Mc-Graw Hill, 1998.
- [۱۱] پژمان رضائی و محمد حکاک، بررسی و تحلیل پارامترهای مداری ماهواره LEO به منظور افزایش حجم ارتباطات با دستیابی به مدار بهینه، مجله علمی-پژوهشی فنی و مهندسی مدرس، سال ۹، ش ۳۸، صص ۱۲۷-۱۳۷، زمستان ۱۳۸۸.

## زیرنویس ها

- 
- 1- Quadrifilar Helix Antenna (QHA)
  - 2- Store and Forward (SAF)
  - 3- Adaptive Bit Rate (ABR)
  - 4- Inclination Angle
  - 5- Eccentricity
  - 6- Free Space Loss (FSL)
  - 7- Equivalent Noise Temperature
  - 8- Spectral Efficiency (SE)
  - 9- Null
  - 10- Main Lobe
  - 11- Elevation Angle
  - 12- Total Forwarded Bits (TFB)
  - 13- Saddle Pattern
  - 14- Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)