

تحلیل و بررسی مسیر یک بالون هواشناسی در ارتفاعات بالا

مصطفی محمدیان، محمدحسن جوارشکیان

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد، mostafa15628@gmail.com

² استاد، دانشگاه فردوسی، مشهد، javarehshkian@um.ac.ir

چکیده

ها هزینه زیادی در بر دارد. بالون ها از جمله ابزارهایی هستند که از نظر اقتصادی بسیار به صرفه بوده و می توانند عملیات هوا شناسی مورد نیاز را انجام دهند. برای پرکردن بالون های هوا شناسی می توان از دو ماده هلیوم و هیدروژن استفاده کرد اما با وجود سبک تر بودن و ارزان تر بودن هیدروژن، برای ساخت بالون ها به ویژه از نوع سرنشین دار از ماده هلیوم استفاده می شود زیرا هلیوم کمتر اشتعال پذیر بوده و امکان انفجار و آسیب رساندن آن کمتر می باشد. بالون ها از جمله ابزارهایی هستند که از نظر اقتصادی بسیار به صرفه بوده و می توانند عملیات هواشناسی مورد نیاز را انجام دهند. استفاده از بالون ها به دهه های اخیر محدود نمی شود بلکه از تقریباً 300 سال پیش کار بر روی بالون ها آغاز شد. اولین بالون هوای گرم در سال 1743 توسط برادران مون گلفیه ساخته شد که 700 متر مکعب حجم داشت و توانست به ارتفاع 2000 متری از زمین برسد [1]. بر خلاف بالون ساخته شده توسط برادران مونگلفیه که بخش پایینی آن باز بود، مدلی که توسط چارلز ساخته شد از پایین بسته بود بنابراین با افزایش ارتفاع فشار داخلی بالون افزایش یافته و در نهایت باعث انفجار و ترکیدن بالون شد. [1]

بدست آوردن مسیر بالون و نقطه احتمالی ترکیدن و یا فرود آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا با توجه به اینکه بالون یک جسم بزرگ می باشد انفجار یا فرود آمدن آن در مناطق مسکونی و پرجمعیت ممکن است منجر به آسیب های مالی و جانی به انسان ها شود. هم چنین اکثر بالون های هوا شناسی با خود ابزاری برای پیش بینی و ارزیابی وضعیت هوا حمل می کنند که معمولاً هزینه بالایی داشته و در صورت فرود آمدن در نقاطی مانند دریا یا کوه احتمالاً از بین رفتن این وسایل وجود دارد. چنانچه مسیر بالون و نقطه احتمالی فرود مشخص باشد امکان ارزیابی این وسایل و اجتناب از خطر ترکیدن در مناطق مسکونی بیشتر می شود در نتیجه لازم است که پیش بینی مکان فرود بالون از قبل انجام شود.

در دهه های اخیر تلاش های زیادی برای مدل سازی دقیق مسیر بالون انجام شده است تا از مشکلاتی که در قبل ذکر شد اجتناب شود. شروع کار بر روی بالون ها و پیش بینی مسیر آنها را می توان از سال 1950 در دانشگاه مینه سوتا در نظر گرفت. تحقیقات اولیه در این دانشگاه به نتیجه مطلوبی نرسید و مطابق با نتایج آزمایشگاهی نبود.

در این تحقیق مسیر حرکت یک بالون هواشناسی از جنس لتکس طبیعی در جو توسط روش تحلیلی مدل سازی و با استفاده از روش رنگ کوتا مرتبه چهار معادلات دیفرانسیلی حاکم حل گردیده و مسیر حرکت بالون در موقعیت جغرافیایی ایران رد یابی گردیده است. این بالون توسط گاز هلیوم به میزان 10 درصد پر شده است و از نوع بالون های با وزن کم می باشد. برای بدست آوردن مسیر، معادلات ترمودینامیکی و دینامیکی حاکم بر بالون توسط یک کد عددی در نرم افزار فرترن حل شده است. طبق تحلیل انجام شده، بالون پس از رسیدن به ارتفاع 32 کیلومتری از سطح زمین به شعاع 4 متر رسید. از آنجا که حد پاره شدن بالون رسیدن به این شعاع در نظر گرفته شده بود بنابراین در این ارتفاع بالون می ترکد و مسیر بالون از ابتدا تا انتهای حرکت بر اساس مختصات جغرافیایی بدست آمده است. برای اعتبارسنجی از مقاله [1] که نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده است استفاده شده است. بالون از ورزشگاه تختی شهر اصفهان حرکت خود را شروع کرده و در بیابان های اطراف آزادراه خلیج فارس فرود می آید.

واژه های کلیدی

مسیر بالون، شعاع ترکیدن، هواشناسی

1- مقدمه

در این تحقیق به بررسی و تحلیل مسیر یک بالون هوا شناسی در جو پرداخته می شود. این بالون از جنس لتکس طبیعی¹ و از نوع بالون های با جرم کم می باشد. مسیر بالون با حل معادلات دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر آن از مبدا تا مقصد (زمانی که بالون می ترکد) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

پرواز در آسمان، قرن ها مورد علاقه بشر بوده و در طول تاریخ همواره سعی در ساخت وسایل و دستگاه هایی برای صعود به آسمان و ماندن در آن کرده است. امروزه برای هدف حمل و نقل معمولاً از هواپیماها در اتمسفر زمین و برای ارتفاعات بالاتر از فضاپیماها استفاده می شود اما در کاربردهایی از جمله هواشناسی و تعیین وضعیت ابرها از آنجا که نیاز به دانستن اطلاعات در نقاط مختلف و زمان های مختلف و ارتفاعات مختلف می باشد استفاده از ابزارهایی مثل هواپیماها و جت

¹ natural rubber

در سال 1966 گرمس اولین مدل کامپیوتری را برای پیش بینی مسیر بالون ارائه کرد که به دلیل کمبود اطلاعات با نتایج آزمایشگاهی اختلاف قابل ملاحظه ای پیدا کرد. از سال 1974 به بعد کارهای علمی تر و دقیق تری در زمینه پیش بینی مسیر بالون ها و توسعه برنامه های کامپیوتری انجام گرفت که در زیر بخشی از این کارها آورده شده است:

در سال 1974 کریت و کریدر [2] اولین تحقیق علمی صحیح و با نتایجی مشابه با نتایج آزمایشگاهی را ارائه کردند و توانستند یک برنامه کامپیوتری بسیار خوب توسعه دهند. کار آنها را می توان به عنوان نقطه شروع و مبدا تحقیقات در نظر گرفت. آنها در مدل خود اثرات گرمایی شامل تشعشع مستقیم و بازتابی خورشید، تشعشع فرسوخ اتمسفر و زمین، انتشار تشعشع و انتقال حرارت جابجایی را در نظر گرفتند. آنها هم چنین اثرات دیگری شامل باز و بسته شدن شیر تخلیه، انداختن کیسه ماسه، گرم شدن و سرد شدن آدیباتیک، خروج گاز و طلوع و غروب خورشید را نیز مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به خواص تشعشعی هلیوم آنها این گاز را کاملا شفاف نسبت به انواع تشعشع در نظر گرفتند. نتایج آنها مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی پرواز بالون ها به ویژه در سیکل شبانه نشان داد.

در سال 2005 راجر فیلی [3] در کار خود به توسعه یک نرم افزار پرداخت که توانایی شبیه سازی مسیر بالون و هم چنین دما و حجم آن را به صورت سه بعدی دارد. این نرم افزار هم چنین قابلیت شبیه سازی مسیر بالون در سیاره هایی غیر از زمین را نیز دارا می باشد. او در این کار تمامی شرایط محیطی شامل تشعشع های مختلف و اثر ابرها و انتقال حرارت جابجایی و هم چنین اشکال مختلف بالون نظیر دوکی شکل و کدویی شکل و کروی را در نظر گرفته است. به دلیل کامل بودن کار وی و مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی، این مقاله و نرم افزار به عنوان مرجع برای کارهای بعدی در نظر گرفته شد.

در سال 2007، پالامبو [1] در کار خود به بررسی گرمایی و دینامیکی بالون ها در ارتفاعات مختلف پرداخت و از این طریق نرم افزار ایچب آرا که کار آن شبیه سازی مسیر بالون می باشد توسعه داد. وی در کار خود اثرات گرمایی شامل تشعشع مستقیم، آلبدو، بازتاب گرمایی از زمین و ابرها و پوسته بالون، اثرات فرسوخ ناشی از ابرها و زمین و انتقال حرارت جابجایی بین پوسته خارجی بالون و محیط و هم چنین انتقال حرارت جابجایی بین گاز داخل بالون و پوسته بالون را در نظر گرفت و دمای پوسته بالون و گاز هلیوم داخل بالون را به صوت جداگانه محاسبه کرد. نتایج وی در محاسبه سرعت بالون اختلاف ناچیزی در حدود 0.5 متر بر ثانیه و در محاسبه مسیر، انحرافی حدود 1 در صد در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. وی دلیل عمده این اختلاف را ثابت و زیاد در نظر گرفتن ضریب پسا و خطاهایی در شرایط اولیه صعود بالون بین حل مساله به صورت تئوری و شرایط آزمایشگاهی دانست.

در سال 2014 لیو و همکاران [4] در کار خود عملکرد دینامیکی و گرمایی یک بالن علمی را تا ارتفاع 30 کیلومتر در نرم افزارهای متلب و فلوئنت به صورت عددی و هم چنین به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس مشاهدات آنها، بالن در اثر حرکت های عرضی و طولی باد مقدار کمی در حدود 1 متر در مسیر خود برای بالا رفتن دچار انحراف می شود که این انحراف با توجه به ارتفاع هدف بسیار بالا (30 کیلومتر) قابل چشم پوشی می باشد و در صورت لزوم برای از بین بردن این اثر می توان سرعت بالن را در ارتفاعات مختلف تغییر داد تا مشکل برطرف شود. دمای بالن نیز در ارتفاعات مختلف دچار تغییرات می شود که از 230 کلون تا 280 کلون متغیر است.

در سال 2017 یانگ سئون لی و وان جونگ بی [5] در کار خود نامعینی های مختلفی که بر مسیر حرکت بالن اثر می گذارد را بر طبق یک کد عددی و با روش مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله نامعینی ها به چهار دسته نامعینی عملکردی (مقدار گاز هلیوم تزریق شده قبل از پرواز بالن)، نامعینی در پیش بینی مدل (ضریب درگ)، نامعینی محیطی (پروفیل حرکت باد) و نامعینی ساختاری (حجم بالن) تقسیم کرده اند. بر طبق نتایج بدست آمده، مقدار گاز هلیوم تزریق شده بیشترین تاثیر را در تغییر مسیر حرکت بالن و نامعینی ساختاری که حجم بالن می باشد کمترین اثر را بر تغییر حرکت بالن داشتند. مقدار گاز هلیوم تزریق شده قابل کنترل بوده و اثرات ناشی از حرکت باد غیرقابل کنترل ارزیابی شد.

در سال 2018 فریتز و ولدو [6] در کار خود عملکرد گرمایی و نیروهای وارد بر یک بالن علمی شامل هلیوم در ارتفاعات بالا (20 کیلومتر و بالاتر) را در حالت شناور و در یک ارتفاع ثابت به روش عددی و در نرم افزار فلوئنت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که از بین سه پارامتر زاویه خورشید، ضریب تابش و ضریب انتشار زمین مهم ترین اثر مربوط به زاویه خورشید می باشد که هر چه بیشتر باشد گرادیان دما و نیروی برآی وارد بر بالن بیشتر می شود. هم چنین کمترین اثر را ضریب انتشار زمین دارد. مدل های استفاده شده در این کار، بالن های فشار صفر و کروی بودند. نتایج هم چنین نشان داد که چنانچه زاویه خورشید کمتر از 25 درجه باشد بالن دچار کاهش ارتفاع و چنانچه بیشتر از 25 درجه باشد بالن با افزایش ارتفاع در صورت ثابت بودن دو پارامتر دیگر همراه خواهد شد.

در سال 2018 گارسیا [7] در کار خود به بررسی مسیر یه بالون هوا شناسی با شکل کروی و با در نظر گرفتن اختلاف فشار داخلی و خارجی بالون پرداخت. وی سه مدل فشاری مونی ریویلین، جنت-جنت و بدون اختلاف فشار را در نظر گرفت. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن اختلاف فشار داخل و خارج بالون باعث ایجاد اختلاف در ارتفاع نهایی بالون می باشد به این صورت که در روش مونی ریویلین بالون به ارتفاع 45 کیلومتری، در روش جنت به ارتفاع 40 کیلومتری و در صورت در نظر نگرفتن اختلاف فشار ارتفاع بالون به 34 کیلومتری از سطح زمین می رسد. این ارتفاع با توجه به شعاع ترکیدن بالون که

برای ارتفاع های کمتر از 11000 متر ($Z < 11000m$):

$$T_{air} = 288.15 - \alpha * Z \quad (2)$$

$$P_{air} = P_0 * \left[1 - \frac{Z}{44330}\right]^{5.26} \quad (3)$$

برای ارتفاع های بین 11000 و 20000 متر داریم ($11000 \leq Z \leq 20000$):

$$T_{air} = 216.65 \quad (4)$$

$$P_{air} = 22605 * P_0 * \exp\left[\frac{11000 - Z}{6340}\right] \quad (5)$$

برای ارتفاع های بین 20000 و 33000 داریم ($20000 \leq Z \leq 33000$):

$$T_{air} = 216.65 + 0.0012(Z - 20000) \quad (6)$$

$$P_{air} = 2447 * \left[\frac{141.89 + 0.003Z}{216.65}\right]^{-11.388} \quad (7)$$

در هر سه حالت بالا چگالی هوا از رابطه زیر که مربوط به گاز ایده آل می باشد محاسبه می شود.

$$\rho_{air} = \frac{P_{air}}{R_{air} * T_{air}} \quad (8)$$

1- مدل سازی گرمایی

به منظور شبیه سازی دقیق تر مسیر بالون در ارتفاعات مختلف، ضروری است که بارهای حرارتی مختلف وارد بر بالون در طول جو ارزیابی و محاسبه شود زیرا دمای گاز هلیوم داخل بالون که در واقع شعاع و حجم بالون را در ارتفاعات مختلف به دست می دهد از این طریق محاسبه می شود. در محاسبه گرما، پوسته بالون از اهمیت زیادی برخوردار است که در اینجا به دلیل نبود اطلاعات کافی در مورد خصوصیات نوری لتکس طبیعی (ماده مورد استفاده در این شبیه سازی) ما از خصوصیات تشعشی و نوری ماده پلی اتیلن به عنوان خصوصیات فرضی استفاده می کنیم. همه معادلات این بخش از مرجع های [1] و [3] گرفته شده است.

علاوه بر این برای ساده سازی و صریح کردن معادلات فرض هایی در نظر گرفته شده است که به صورت زیر می باشند:

الف- تشعشع خورشید: خورشید به صورت یک جسم سیاه در دمای 5550 کلوین در نظر گرفته می شود.

ب- زمین به عنوان یک جسم خاکستری با دمای سطح T_{ground} و خاصیت انتشار ϵ_{ground} در نظر گرفته شده است. علاوه بر این ما انرژی گرمایی منتشر شده از سطح زمین را تشعشع گرمایی فروسرخ می نامیم. در حقیقت اگر زمین تشعشع الکترومغناطیس در همه طول موج ها منتشر کند دمای میانگین زمین و اتمسفر آن کمتر از 300 کلوین خواهد بود. بنابراین به عنوان یک نتیجه از قانون پلانک و

توسط سازنده تعیین شده محاسبه گردیده است. در نهایت با در نظر گرفتن مدل بدون اختلاف فشار بالون مورد بررسی محقق پس از گذشت زمان 84 دقیقه به ارتفاع 34 کیلومتری رسید. هم چنین سرعت نهایی بالون نیز 16 متر بر ثانیه شد.

هدف از این تحقیق استخراج معادلات تحلیلی حاکم بر بالون و حل این معادلات توسط روش عددی از لحظه حرکت از سطح زمین تا ارتفاع ترکیدن بالون در موقعیت جغرافیایی ایران می باشد. در کارهای قبلی اکثراً بالون های بزرگ و از جنس پلی اتیلن مورد استفاده قرار گرفته اند و هدف آنها نیز رسیدن یک بالون تا ارتفاع مشخص و سپس شناور شدن آن برای مدت معین می باشد. اما در این تحقیق یک بالون کوچک از جنس لتکس طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است که ارتفاع هدف آن از طریق سازنده و بر اساس افزایش شعاع تعیین می شود. هم چنین موقعیت جغرافیایی که بالون از آنجا به پرواز در می آید نیز شهر اصفهان می باشد در حالی که بقیه کارها هر کدام مربوط به نواحی خارج از ایران می باشند.

2- روش تحقیق و معادلات حاکم

در این تحقیق از معادلات دینامیکی و انتقال حرارت حاکم بر بالون برای بدست آوردن مسیر بالون شده است. این معادلات در نرم افزار فترن و به صورت عددی با روش رانج کوتاه مرتبه 4 حل شده اند. ابتدا معادلات انتقال حرارت حل می شوند و پس از بدست آمدن دمای گاز هلیوم داخل بالون با کمک معادله حالت گازهای ایده آل حجم بالون و سپس نیروهای وارد بر بالون محاسبه می شود. برای نوشتن معادلات انتقال حرارت نیاز است محیطی که بالون در آن شناور است شناخته شود. سازمان هوافضای جهانی³ پس از انجام آزمایشات مختلف، معادلاتی را برای توزیع فشار و دما در ارتفاعات مختلف از سطح زمین بدست آورده است که در این تحقیق از این معادلات استفاده شده است. این معادلات دارای فرض هایی می باشند که در زیر آورده شده است.

الف- هوا خشک و گاز ایده آل است بنابراین قانون گاز ایده آل برای آن صادق است.

ب- با توجه به اینکه در محدوده ارتفاع این مقاله مقدار شتاب جاذبه تغییرات چشمگیری ندارد بنابراین در طول مسیر ثابت و برابر با مقدار آن روی زمین در نظر گرفته می شود.

ج- قانون تعادل هیدرواستاتیکی حاکم و برقرار می باشد.

د- در بخش تروپوسفر دمای هوا به صورت خطی کاهش می یابد و شیب این خط به صورت زیر می باشد.

ذ- در پایان بخش تروپوسفر دمای هوا به 216.6 کلوین می رسد و در بخش استراتوسفر این مقدار ثابت است.

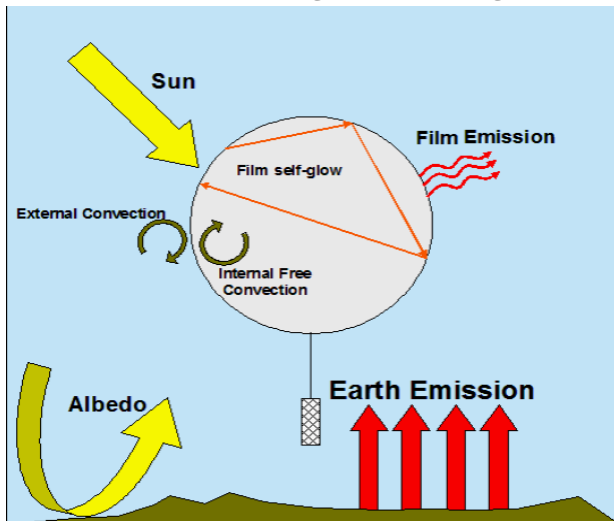
$$\alpha = -6.5 * 10^{-3} \frac{K}{m} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن فرض های بالا معادلات مربوط به فشار و دما و چگالی در محیط اتمسفر به صورت زیر در می آیند. [8]

که در معادله (14) منظور از HC_{int} ضریب انتقال حرارت داخلی می باشد که در مرجع [1] آمده است.

معادلات مربوط به مساحت های A_{surf} و $A_{effective}$ و $A_{projected}$ و A_{top} در مرجع های [3] و [9] آمده است.

در شکل 1 می توان بارهای گرمایی وارد بر بالون را مشاهده کرد.



شکل 1 بارهای گرمایی وارد بر بالون در جو

معادلات دیفرانسیل مربوط به محاسبه دمای فیلم بالون:

برای خلاصه کردن عبارت های گرما به صورت زیر عمل شده است.

$$Q_1 = Q_{sun} + Q_{Albedo} + Q_{IRearth} \quad (15)$$

$$Q_2 = Q_{IRfilm} + Q_{convext} - Q_{convint} \quad (16)$$

$$\frac{dT_{film}}{dt} = \frac{Q_1 + Q_2 - Q_{IRout}}{c_f M_{film}} \quad (17)$$

که در معادله بالا منظور از c_f ظرفیت گرمایی پوسته بالون و M_{film} جرم پوسته بالون می باشد.

از آنجا که دمای گاز هلیوم نقش مهم و اساسی در محاسبه حجم بالون و در ادامه محاسبات مربوط به برآ و سرعت بالارفتن بالون دارد لازم است که دمای فیلم و سپس با استفاده از آن دمای هلیوم استخراج شود. بر اساس مرجع [3] داریم:

معادله دیفرانسیل مربوط به محاسبه دمای هلیوم:

$$\frac{dT_{gas}}{dt} = \frac{Q_{convint}}{\gamma c_v M_{He}} - \frac{(\gamma - 1)\rho_{air}g}{\gamma \rho_{He} R_{He}} R_{oc} \quad (18)$$

در معادله (16) منظور از T_{gas} دمای هلیوم، γ نسبت ظرفیت حرارتی، M_{He} جرم مولکولی هلیوم، ρ_{He} چگالی هلیوم، R_{He} ثابت گازی هلیوم، g شتاب جاذبه زمین و R_{oc} سرعت عمودی بالون می باشد. هر دو معادله بالا به روش رانج کوتاه مرتبه 4 که یکی از روش های عددی با دقت مرتبه چهارم می باشد حل شده اند.

1- نیروهای وارد بر بالون

به طور کلی سه نیرو به بالون وارد می شود که شامل نیروی شناوری، نیروی پسا و نیروی جاذبه می باشد. نیروی شناوری به

قانون جابجایی وین، قدرت انتشار زمین در محدوده طیف طول موج بلند خواهد بود.

ج- تشعشع پوسته بالون: پوسته بالون معمولاً در محدوده دمایی 270-210 کلوین می باشد. بنابراین آن را به عنوان یک جسم خاکستری در محدوده طیف الکترومغناطیسی بلند در نظر می گیریم. د- گاز هلیوم داخل بالون کاملاً شفاف بوده و نه گرمایی جذب و نه منتشر می کند و دمای آن تنها در اثر تغییر حجم بالون و انتقال حرارت جابجایی داخلی تغییر می کند.

بارهای کلی گرمایی وارد شده بر بالون بر اساس معادلات زیر می باشد: تشعشع خورشیدی مستقیم جذبی کل:

$$Q_{sun} = \alpha A_{projected} q_{sun} [1 + \tau(1 + r_{eff})] \quad (9)$$

که در این معادله منظور از α ضریب جذب پوسته بالون، $A_{projected}$ مساحت تصویر شده بالون، q_{sun} گرمای مستقیم جذبی که در مرجع [1] آمده است، τ ضریب انتقال پوسته بالون، r_{eff} ضریب بازتاب موثر پوسته بالون می باشد.

گرمای آلبدوی جذبی کل:

$$Q_{Albedo} = \alpha A_{surf} q_{Albedo} viewfactor [1 + \tau(1 + r_{eff})] \quad (10)$$

در معادله (9) منظور از A_{surf} مساحت سطح بالون، q_{Albedo} و $viewfactor$ به ترتیب گرمای آلبدو و ضریب دید می باشد که در مرجع [1] آمده است.

گرمای طول موج بلند سیاره ای جذبی کل:

$$Q_{IRearth} = \alpha_{IR} \cdot A_{surf} \cdot Q_{IRearth} \cdot viewfactor [1 + \tau(1 + r_{eff})] \quad (11)$$

در معادله (10) منظور از α_{IR} ضریب جذب فروسرخ و $Q_{IRearth}$ گرمای طول موج بلند سیاره ای می باشد که در مرجع [1] آمده است. خودتابشی فروسرخ جذبی داخلی:

$$Q_{IRfilm} = \sigma \cdot \epsilon \cdot \alpha_{IR} \cdot A_{surf} \cdot T_{film}^4 [(1 + r_{eff})] \quad (12)$$

در معادله (11) منظور از σ ثابت استفان بولتزمن، ϵ ضریب انتشار پوسته بالون و T_{film} دمای فیلم بالون می باشد.

گرمای انتشار یافته از پوسته بالون:

$$Q_{IRout} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A_{surf} \cdot T_{film}^4 [1 + \tau_{IR}(1 + r_{eff})] \quad (13)$$

که در معادله (12) منظور از τ_{IR} ضریب انتقال فروسرخ می باشد.

انتقال حرارت جابجایی خارجی کل:

$$Q_{convext} = HC_{ext} \cdot A_{effective} \cdot (T_{air} - T_{film}) \quad (13)$$

که در معادله (13) منظور از HC_{ext} ضریب انتقال حرارت جابجایی است که در مرجع [1] آمده است، $A_{effective}$ مساحت موثر بالون و T_{air} دمای هوا می باشد.

انتقال حرارت جابجایی داخلی کل:

$$Q_{convint} = HC_{int} \cdot A_{effective} \cdot (T_{film} - T_{He}) \quad (14)$$

مشخصات جرم بالون و مشخصات نوری پوسته بالون به ترتیب در جدول 1 و 2 آورده شده است.

جدول 1 مشخصات جرمی بالون [10]

جرم پوسته بالون (m_b)	1600 گرم
جرم محموله بالون (m_{pay})	1100 گرم
جرم هلیوم (m_{he})	611 گرم
جرم کل بالون (m_{tot})	2760 گرم

از آنجا که آزمایشات کافی بر روی مشخصات نوری لتکس طبیعی انجام نشده است بنابراین در اینجا از مشخصات نوری ماده پلی اتیلن که دیگر ماده سازنده بالون ها می باشد استفاده شده است.

جدول 2 مشخصات نوری پوسته بالون [1]

ضریب جذب (α)	0.024
ضریب انتشار (ϵ)	0.1
ضریب انتقال (τ)	0.916
ضریب جذب طول موج بلند (α_{IR})	0.1
ضریب انتقال طول موج بلند (τ_{IR})	0.86

ضریب بازتاب r و ضریب بازتاب طول موج بلند r_{IR} نیز به صورت زیر بدست می آید:

$$r = 1 - \alpha - \tau \quad (26)$$

$$r_{IR} = 1 - \alpha_{IR} - \tau_{IR} \quad (27)$$

مشخصات ترمودینامیکی بالون نیز در جدول 3 آمده است.

جدول 3 مشخصات ترمودینامیکی بالون و محیط اطراف [1]

ظرفیت گرمایی پوسته بالون (C_f)	$2092 \frac{J}{Kg.K}$
ثابت گاز هوا (R_{air})	$287 \frac{J}{Kg.K}$
ثابت گاز هلیوم (R_{He})	$2077 \frac{J}{Kg.K}$
گرمای ویژه هلیوم در حجم ثابت (C_v)	$3115 \frac{J}{Kg.K}$
نسبت گرمای ویژه هلیوم (γ)	1.667

مشخصات هندسی بالون در جدول 4 قابل مشاهده است.

جدول 4 مشخصات هندسی بالون

شعاع بالون در ابتدای حرکت	0.875 متر
شعاع بالون در هنگام ترکیدن	4.5 متر
ارتفاع هدف بالون	34 کیلومتر
حجم بالون در ابتدای حرکت	2.806 متر مکعب

پروفیل باد در نظر گرفته شده برای بالون از مرجع [9] که توسط دانشگاه بیهانگ در شهر بیجینگ از کشور چین برای ارتفاعات مختلف

هر جسمی که در یک سیال حرکت می کند رو به بالا وارد می شود و معادله آن نیز به صورت زیر می باشد:

$$F_B = (\rho_{air})V_B g \quad (19)$$

در معادله (19) منظور از F_b نیروی شناوری و V_B حجم بالون می باشد.

نیروی پسا در اثر حرکت بالون و سرعت آن و مقاومت مولکولهای هوا و اصطکاک به وجود می آید و به صورت زیر می باشد.

$$F_D = 0.5\rho_{air}C_{d_y}A_{top}V_y^2 \quad (20)$$

در معادله (20) منظور از F_d نیروی پسا، C_{d_y} ضریب پسا، A_p مساحت تصویر شده بالون در راستای جریان، V_y سرعت بالون در راستای ارتفاع جغرافیایی می باشد.

با توجه به اینکه عدد رینولدزی که بالون بر اساس آن حرکت می کند بسیار بالا می باشد و در منابع برای اعداد رینولدز بالا معادله دقیق و مناسبی برای ضریب پسا کره ارائه نشده است با در نظر گرفتن شرایط مراجع قبلی می توان گفت که عدد 0.45 مقدار مناسبی برای ضریب پسا می باشد که در این شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین در هر سه جهت داریم:

$$C_{d_x} = C_{d_y} = C_{d_z} = 0.45 \quad (21)$$

نیروی جاذبه زمین نیز به صورت زیر می باشد.

$$F_g = m_b g \quad (22)$$

که در معادله بالا منظور از m_b جرم بالون می باشد.

در نهایت با توجه به نیروهایی که در بالا گفته شد می توان معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت بالون را به صورت زیر نوشت:

$$m_{tot}\ddot{x} = \sum F_x = 0.5\rho_{air}C_{d_x}A_{top}V_x^2 \quad (23)$$

$$m_{tot}\ddot{y} = \sum F_y = F_B - F_D - F_g \quad (24)$$

$$m_{tot}\ddot{z} = \sum F_z = 0.5\rho_{air}C_{d_z}A_{top}V_z^2 \quad (25)$$

که در معادلات (20) تا (23) منظور از m_{tot} جرم کل بالون، \dot{x} و F_x و C_{d_x} به ترتیب شتاب، نیروی وارد بر بالون، ضریب پسا و سرعت بالون در راستای طول جغرافیایی، \dot{y} و F_y به ترتیب شتاب و نیروی وارد بر بالون در راستای ارتفاع جغرافیایی، \dot{z} و F_z و C_{d_z} شتاب بالون، نیروی وارد بر بالون، ضریب پسا و سرعت بالون در راستای عرض جغرافیایی می باشند.

هر سه معادله (20) و (21) و (22) با روش رانج کوتا مرتبه 4 و در نظر گرفتن گام زمانی $h=1$ ثانیه حل شده اند.

2- مشخصات بالون و شرایط اولیه

در این قسمت مشخصات بالون شامل جرم بخش های مختلف، مشخصات نوری پوسته بالون، پروفیل باد در نظر گرفته شده و شرایط اولیه مکانی و زمانی پرواز آورده شده است.

زمان پرواز بالون	شنبه 22 خرداد سال 1400 ساعت 8 صبح
سرعت اولیه عمودی بالون	صفر متر بر ثانیه
سرعت اولیه بالون در راستای عرض جغرافیایی	0.08- متر بر ثانیه
سرعت اولیه بالون در راستای طول جغرافیایی	2.48 متر بر ثانیه
دمای محیط در ابتدای حرکت	288 کلوین
فشار محیط در ابتدای حرکت	101325 پاسکال

با قرار دادن این شرایط اولیه در معادلات (16) و (17) و (20) تا (22) می توان سرعت بالون، مکان بالون و مسیر حرکت آن را بدست آورد.

6- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی کار حاضر از مقاله مرجع [1] استفاده شده است. در این مرجع همانند کار حاضر از معادلات دینامیکی و ترمودینامیکی برای حل مساله استفاده شده است و حل معادلات غیرخطی با روش های عددی انجام شده است و اعتبارسنجی نتایج حل نیز با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است. از آنجا که مرجع از شکل اصلی بالون که به صورت دوکی شکل هست استفاده کرده است ما نیز برای اعتبارسنجی و مطابقت دادن، شکل بالون را در این قسمت دوکی شکل در نظر گرفتیم. شرایط اولیه پروازی مرجع همانند کار حاضر بوده و مشخصات بالون آن در جدول 5 آمده است.

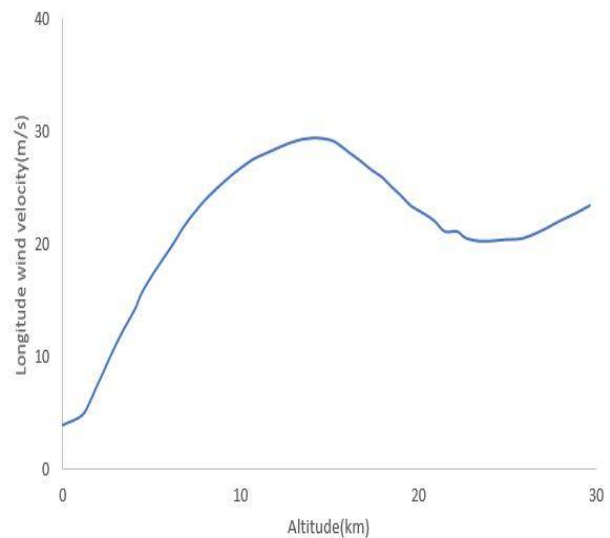
جدول 6 مشخصات بالون مرجع [1]

حجم کلی بالون	98862 متر مکعب
جرم پوسته بالون	1433 کیلوگرم بر متر مکعب
جرم محموله	457.5 کیلوگرم
جرم کیسه شن	150 کیلوگرم
جرم گاز داخل بالون	365.6 کیلوگرم
جرم کل	2406 کیلوگرم
مکان بلند شدن بالون	فرودگاه تراپانی میلو-ایتالیا
زمان بلند شدن بالون	7 ژوئن 2003- ساعت 4:54 به وقت گرینویچ
مشخصات نوری و ترمودینامیکی بالون	جنس پلی اتیلن

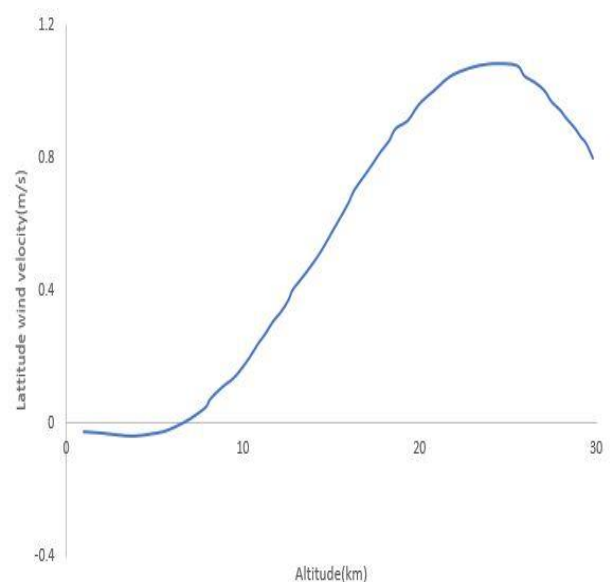
شکل 4 و 5 مقایسه سرعت عمودی و ارتفاع بالون حاضر با مرجع [1] را نشان می دهد.

دلیل اختلاف یک متر بر ثانیه ای سرعت کار حاضر با مرجع در ابتدای حرکت 2 مورد می باشد. مورد اول تفاوت ضریب پسا می باشد زیرا مرجع از یک فرمول خاص برای بدست آوردن ضریب درگ استفاده

از سطح زمین جمع آوری شده است، گرفته شده است. این پروفیل بادها در راستای طول و عرض جغرافیایی به ترتیب در شکل های 2 و 3 آورده شده است.



شکل 2 پروفیل باد در راستای طول جغرافیایی

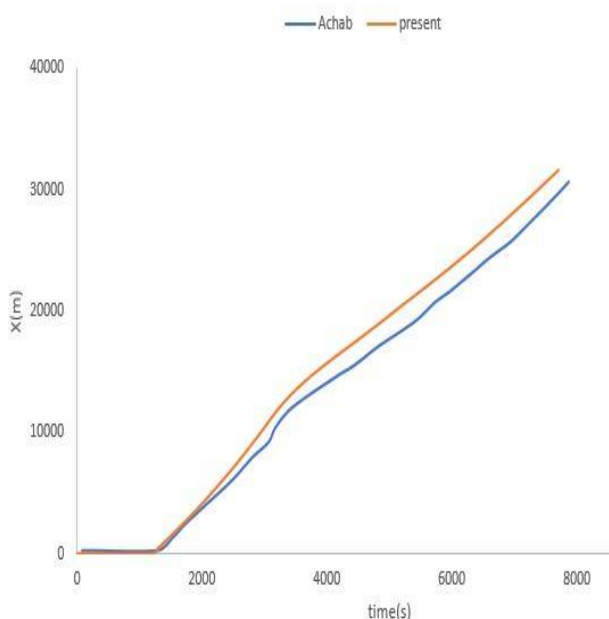


شکل 3 پروفیل باد در راستای عرض جغرافیایی

پس از تعیین مشخصات بالون و پروفیل باد حاکم بر مساله لازم است که شرایط اولیه پروازی بالون مشخص شود. این شرایط شامل مکان و زمان پرواز، سرعت اولیه، دما و فشار و چگالی اولیه محیط و دمای اولیه پوسته بالون و گاز هلیوم داخل آن می باشد. این شرایط اولیه در جدول 4 آورده شده است. لازم به ذکر است که برای سادگی دمای اولیه پوسته بالون و گاز هلیوم با دمای محیط یکسان در نظر گرفته شده است.

جدول 5 شرایط اولیه پرواز بالون

مکان پرواز بالون	شهر اصفهان از کشور ایران
	طول جغرافیایی: 51.66
	عرض جغرافیایی: 32.66

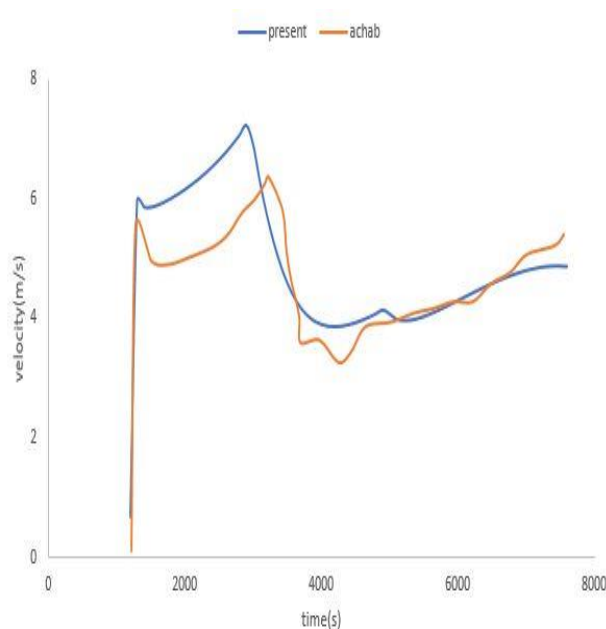


شکل 5 مقایسه ارتفاع بالون بین کار حاضر و مقاله [1]

7- نتایج

برای بدست آوردن مسیر بالون لازم است که شکل بالون مشخص باشد. در این شبیه سازی، بالون از جنس لتکس طبیعی و به شکل کروی با شعاع اولیه 0.875 متر در نظر گرفته شده است. هم چنین فرض شده است که بالون این شکل کروی را تا انتهای حرکت حفظ می کند. معادلات دینامیکی و انتقال حرارت حاکم بر بالون از طریق روش رونگ-کوتا مرتبه 4 و با در نظر گرفتن گام زمانی 1 ثانیه حل شده و در نهایت مسیر بالون بر اساس طول، عرض و ارتفاع جغرافیایی بدست آمده است. مبدا بالون ورزشگاه تختی شهر اصفهان با طول و عرض جغرافیایی 51.66 و 32.66 می باشد. سرعت اولیه بالون در راستای ارتفاع صفر، در راستای طول جغرافیایی 2.48 و در راستای عرض جغرافیایی 0.08- متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. دما و فشار اولیه محیط به هنگام بلند شدن بالون به ترتیب 288 کلوین و 101325 پاسکال بوده و روز پرواز بالون نیز شنبه 22 خرداد سال 1400 شمسی می باشد. پس از اعمال این شرایط اولیه و حل معادلات حاکم سرعت بالون در سه جهت جغرافیایی بر حسب زمان، شعاع بالون و ارتفاع بالون بر حسب زمان و در نهایت مسیر بالون به دو حالت نموداری و روی نقشه بدست آمد.

کرده است که برخی از پارامترهای آن فقط از طریق آزمایش برای شرایط مورد نظر خاص بدست می آید و این پارامترها در مرجع داده نشده است. در کار حاضر با توجه به مراجع قبلی که در فصل دوم آورده شده است ضریب پسای ثابت 0.45 برای اعتبارسنجی انتخاب شده است. مورد دوم عدم تعیین شرایط آب و هوایی و دمای بالون و پوسته بالون در ابتدای حرکت می باشد زیرا مرجع اشاره کرده است که این داده ها به صورت آنلاین از سایت هواشناسی مکان موردنظر دریافت شده است و امکان دسترسی به اطلاعات سایت برای همگان وجود نداشت در نتیجه ما بر اساس نمودارها و مراجع دیگر آن ها را به صورت تقریبی بدست آوردیم. با وجود این دو مورد می توان دید که روند حرکت و سرعت همانند مرجع بوده و اختلافات فقط به دلیل پارامترهای قابل تغییر می باشد. هم چنین دلیل صفر بودن ارتفاع و سرعت در 1300 ثانیه اول حرکت این است که بالون در این مدت به صورت افقی حرکت می کرده است و نتایج مرجع به این صورت گزارش شده است.

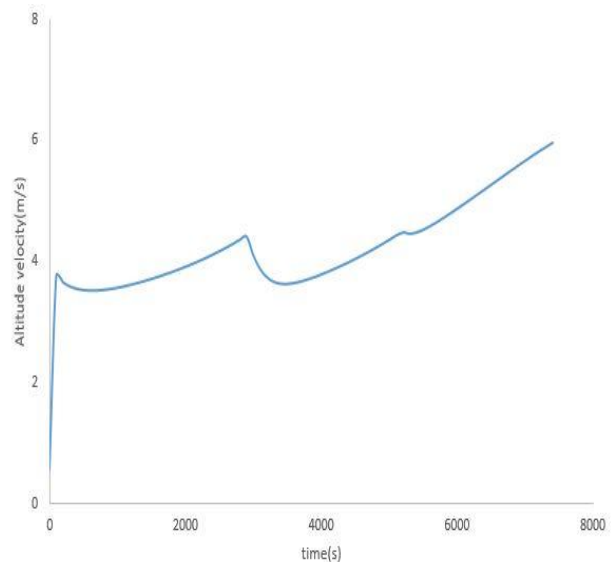


شکل 4 مقایسه سرعت عمودی بالون بین کار حاضر و مقاله [1]

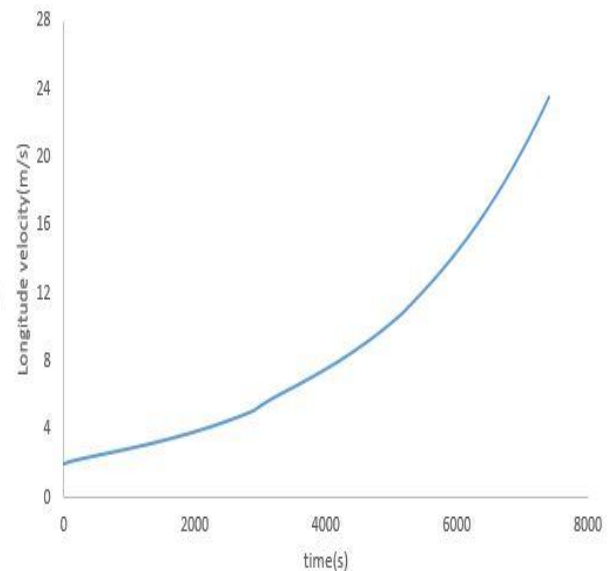
به هنگام بلندشدن بالون از سطح زمین در همان لحظات ابتدایی نیروی پیشرانش ناگهانی در اثر اختلاف چگالی بین گاز هلیوم داخل بالون و هوای بیرون به وجود می آید که باعث جهش ناگهانی بالون و افزایش سرعت آن از 0 به 3.8 متر بر ثانیه می شود. افزایش سرعت ناگهانی باعث افزایش ناگهانی نیروی پسا نیز می شود و در نتیجه بعد از جهش اولیه، بالون در اثر نیروی پسا دچار کاهش سرعت می شود و پس از مدت کوتاهی دوباره نیروی برآ اثر افزایش حجم بر نیروی پسا غلبه کرده و سرعت دوباره افزایش پیدا می کند تا به ناحیه استراتوسفر برسد. در ناحیه استراتوسفر چون دما ثابت است و فشار همچنان در حال کاهش می باشد دوباره نیروی پسا بر آ غلبه کرده و برای مدت 15 دقیقه سرعت بالون کاهش پیدا می کند اما پس از عبور از ناحیه دما ثابت و افزایش دوباره دما و حجم بالون که منجر به افزایش برآ می شود نیروی برآ غالب می شود و تا انتهای مسیر سرعت افزایش پیدا می کند تا به سرعت نهایی 6 متر بر ثانیه و ارتفاع 32 کیلومتری برسد. این فرایند در شکل 6 به خوبی قابل مشاهده می باشد.

از آنجا که سیستم مختصات در نظر گرفته شده برای بالون سه بعدی می باشد و از سطح زمین و در نیمکره شمالی شروع می شود برای حرکت در راستاهای طول و عرض جغرافیایی قراردادی در همین تحقیق تنظیم شده است به این صورت که در راستای عرض جغرافیایی چنانچه بالون به سمت قطب شمال حرکت کند سرعت مثبت و چنانچه به سمت خط استوا حرکت کند سرعت منفی می باشد. در راستای طول جغرافیایی نیز چنانچه بالون به سمت نصف النهار مبدا حرکت کند سرعت منفی و چنانچه به سمت شرق حرکت کند سرعت مثبت است. از آنجا که سرعت باد در جهت طول جغرافیایی بر اساس پروفیل در نظر گرفته شده همواره مثبت و در جهت غربی به شرقی می باشد باعث می شود که بالون نیز همواره در جهت مثبت و از غرب به سمت شرق حرکت کند و سرعت بالون در این جهت نیز همواره افزایشی می باشد که در شکل 7 قابل مشاهده می باشد. در راستای عرض جغرافیایی با توجه به اینکه نوسانات سرعت وجود دارد مشاهده می شود که ابتدا سرعت بالون در جهت شمال به جنوب و منفی بوده و سپس با افزایش ارتفاع جهت سرعت بالون برای مدت کوتاهی مثبت می شود. سپس با گذشت زمان و افزایش ارتفاع سرعت بالون در اثر ضریب پسای وارده کاهش می یابد و وارد محدوده منفی می شود و تا اواخر حرکت نیز در همین محدوده باقی می ماند. در انتهای حرکت به دلیل زیاد شدن سرعت باد در جهت مثبت و جنوب به شمال سرانجام نیروی باد بر نیروی پسا غلبه کرده و سرعت بالون دوباره افزایشی شده و تا جایی که در انتهای حرکت به مدت 100 ثانیه مثبت می شود.

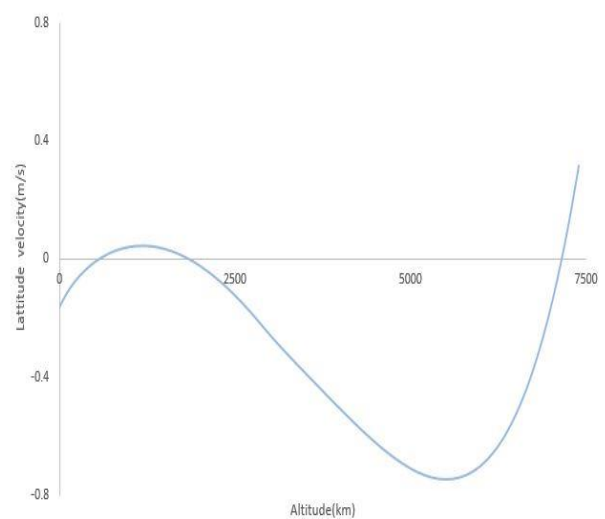
شعاع ترکیدن بالون بر طبق جدول 4 مقدار 4.5 متر می باشد. این مقدار به صورت آزمایشگاهی و تحت شرایط خاص و برای سرعت تقریباً ثابت اندازه گیری شده است. در این تحقیق ما برای امنیت بیشتر مقدار 4 متر را برای شعاع ترکیدن در نظر گرفتیم که اگر بالون زودتر تحت شرایط مختلف ترکید از آسیب های ناشی از آن جلوگیری شود. همانطور



شکل 6 سرعت بالون در راستای ارتفاع جغرافیایی

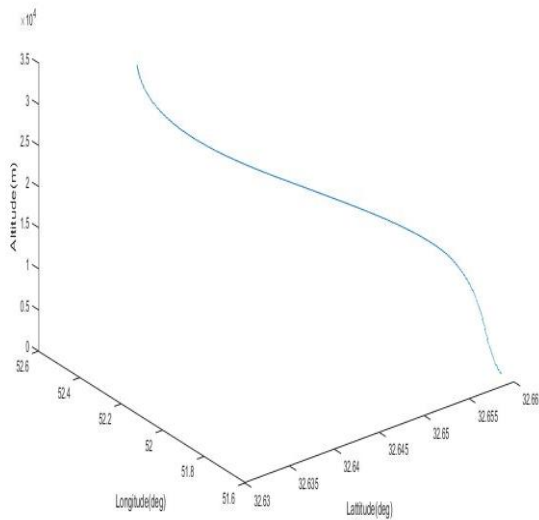


شکل 7 سرعت بالون در راستای طول جغرافیایی



شکل 8 سرعت بالون در راستای عرض جغرافیایی

که در شکل 9 مشاهده می شود بالون پس از گذشت زمان 7400 ثانیه معادل دو ساعت و 3 دقیقه به ارتفاع هدف 32 کیلومتر و شعاع 4 متری می رسد و ما اینجا را پایان کار بالون و لحظه ترکیدن آن در نظر می گیریم.

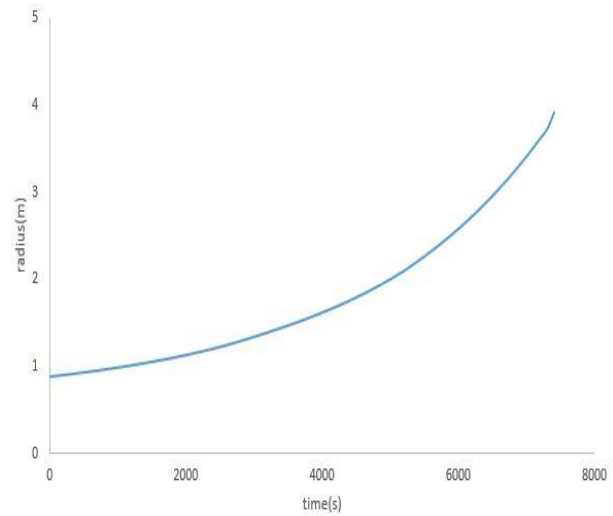


شکل 11 مسیر نهایی بالون بر اساس مختصات جغرافیایی

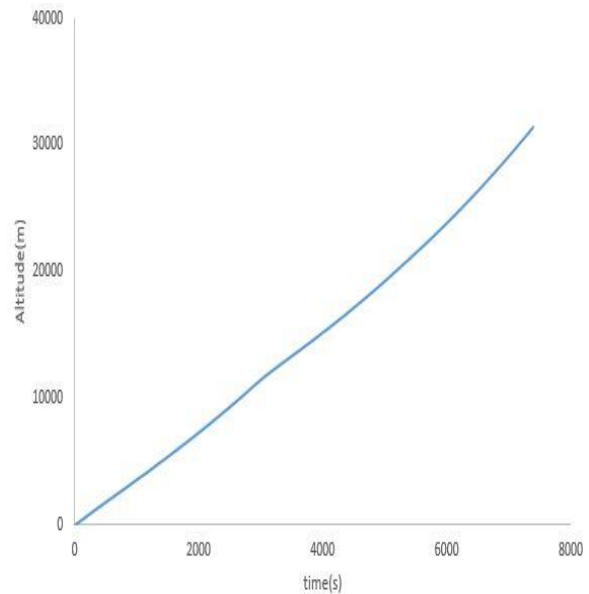


شکل 12 مسیر بالون بر اساس نقشه جی پی اس⁴

پس از یافتن سرعت بالون، مسیر کلی بالون بر حسب مختصات طول، عرض و ارتفاع جغرافیایی بدست می آید. در شکل 11 می توان مسیر بالون از ابتدای حرکت تا انتهای حرکت را مشاهده کرد. در راستای عرض جغرافیایی ابتدا بالون به میزان 1000 ثانیه در جهت منفی حرکت کرده و سپس به اندازه 1200 ثانیه در جهت مثبت و به سمت شمال حرکت می کند. در نهایت با تغییر جهت سرعت بالون دوباره جهت حرکت عوض شده و به سمت جنوب حرکت می کند و تا انتها این مسیر ادامه می یابد. در جهت طول جغرافیایی نیز به دلیل مثبت بودن همواره سرعت بالون در این راستا، حرکت بالون نیز همواره در جهت غرب به شرق بوده و مثبت می باشد. در نهایت بالون از مبدا در محل ورزشگاه تختی اصفهان با طول و عرض جغرافیایی 51.66 و 32.66 حرکت کرده و پس از گذشت زمان 2 ساعت و 3 دقیقه به



شکل 9 تغییرات شعاع بالون نسبت به زمان



شکل 10 تغییرات ارتفاع بالون بر حسب زمان

در شکل 10 می توان تغییرات ارتفاع بالون بر حسب زمان را مشاهده کرد. در این شکل می توان دید که ارتفاع بالون به طور یکنواخت افزایش پیدا می کند و کاهش یا افزایش ناگهانی ارتفاع مشاهده نمی شود. این نشان از شرایط پایدار آب و هوایی در نظر گرفته شده و نبود اغتشاشات موثر بر مسیر بالون می باشد.

trajectories while considering various uncertainties," *Journal of Aircraft*, vol. 54, no. 2, pp. 768-782, 2017.

- [6] Y. Woldu and A. Fritz, "Using CFD to analyze thermal and optical influence on a zero pressure balloon at floating condition," ed, 2018.
- [7] A. Ulloa García, "Study of the trajectory of a Stratospheric Weather Balloon," 2018.
- [8] Q. Dai, X. Fang, X. Li, and L. Tian, "Performance simulation of high altitude scientific balloons," *Advances in Space Research*, vol. 49, no. 6, pp. 1045-1052, 2012.
- [9] J. Meng, L. Zhang, J. Li, and M. Lv, "Dynamic modeling and simulation of tethered stratospheric satellite with thermal effects," *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, pp. 181-189, 2017.
- [10] R. Engineering. "Balloon Datasheets." <http://randomsolutions.co.uk/RandomAerospace/Data.html> (accessed.

مقصد نهایی خود در اطراف شهرستان کوهپایه با طول و عرض جغرافیایی 52.52 و 32.6394 رسیده است.

8- نتیجه گیری

در این تحقیق مسیر حرکت یک بالن مدل سازی گردید پس از مشخص شده مبدا حرکت، موقعیت بالن به طول لحظه ای تا ارتفاع ترکیدن پیشینی گردیده است. با وجود اینکه سازنده مقدار شعاع ترکیدن 4.5 متر و ارتفاع هدف 34 کیلومتر را برای بالن تعیین کرده بود اما برای در نظر گرفتن ایمنی بیشتر تصمیم بر آن شد که در این تحقیق از شعاع نهایی 4 متر استفاده شود. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که بالن در هنگام رسیدن به شعاع ترکیدن (4 متر) تا ارتفاع 32 کیلومتر بالا می رود. زمان لازم برای پیمودن این مسیر 7400 ثانیه معادل 2 ساعت و 3 دقیقه می باشد. بالن مورد نظر از ورزشگاه تختی اصفهان حرکت خود را شروع کرده و در انتها با توجه به اثرات باد در نظر گرفته شده در اطراف شهرستان کوهپایه از شهرستان های استان اصفهان فرود می آید.

9-- مراجع

- [1] R. Palumbo, "a simulation model for trajectory, forecast, performance analysis and aerospace mission planning with high altitude zero pressure balloons," FACOLTÀ DI INGEGNERIA, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II", INGEGNERIA AEROSPAZIALE, NAVALE E DELLA QUALITÀ XX CICLO, 2007.
- [2] F. Kreith, Kreider, J. F, "Numerical Prediction of the Performance of High Altitude Balloons," *The Goddard Library: Balloon Technology Database*, 1974.
- [3] R. Farley, "BalloonAscent: 3-D simulation tool for the ascent and float of high-altitude balloons," in *AIAA 5th ATIO and 16th Lighter-Than-Air Sys Tech. and Balloon Systems Conferences*, 2005, p. 7412.
- [4] Q. Liu, Z. Wu, M. Zhu, and W. Xu, "A comprehensive numerical model investigating the thermal-dynamic performance of scientific balloon," *Advances in Space Research*, vol. 53, no. 2, pp. 325-338, 2014.
- [5] Y. Lee and K. Yee, "Numerical prediction of scientific balloon

