

مدلسازی یک سیستم انرژی بادی هوابرد مدل کایت پمپی

مهرداد ذوالفقاری^۱، فرهود آذرینا^{۲*} و علیرضا کنی^۳^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران^۲ استادیار دانشکده ی علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران^۳ استادیار دانشکده ی محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

* مسئول مکاتبات: f.azarsina@srbiau.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

سیستم انرژی بادی هوابرد
کایت پمپی
توان سیکلی
فاکتور کشش
هزینه ی همتراز شده ی انرژی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۶/۰۱
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۵/۱۸

سیستم انرژی بادی هوابرد مدل کایت پمپی با استفاده از پرواز کایت در ارتفاع تولید توان می کند. این سیستم در دو فاز کشش و بازکشش با استفاده از کشش کلاف واصل و چرخاندن فلکه ی کششی متصل به ژنراتور تولید توان می کند. در این مقاله پس از توصیف عملکرد تولید توان کایت مولد، اجزاء و تجهیزات سیستم معرفی شده اند. با استفاده از مدل ریاضی کواسی و مدل لوید، پارامترهای این سیستم مانند زاویه ی کلاف، زاویه ی آزیموث، نسبت کشش، ضریب کایت، توان سیکلی و... معرفی شده اند. سپس یک سیستم کایت پمپی با نسبت ضریب لیفت به درگ کایت ۱۲/۴۶، مساحت ۲۰ متر مربع، ضریب عدم تقارن ۵ و ضریب کشش ۳۰٪ در فاز رفت و ضریب کشش ۵٪ در فاز برگشت، مدلسازی شده است. ضریب کایت برابر با ۱۸/۳۱، ضریب توان برابر با ۴۸٪، نسبت معادل سرعت نوک پره برابر با ۸/۸۲، فاکتور توان برابر با ۹٪ و راندمان سیکل برابر با ۵۳٪ به دست آمده است. نیروی وارد شده به کلاف در سرعت نامی ۸ متر بر ثانیه در مرحله ی رفت برابر با ۱۶۰۴۲ نیوتن و در مرحله ی بازگشت برابر با ۴۰/۳۳ نیوتن می باشد. توان نامی این سیستم برابر با ۴۷/۱۶۲ کیلووات (توان نامی ۵۰ کیلوواتی) و توان سیکل کامل در سرعت نامی برابر با ۲۵/۱۶ کیلووات می باشد. در آخر با استفاده از جداول مقایسه ی ضریب ظرفیت و هزینه ی همتراز شده ی انرژی نیروگاه های گوناگون با نیروگاه کایت مولد این نتیجه حاصل می شود که این سیستم به غیر از نیروگاه حرارتی با زغال سنگ، ضریب ظرفیت بیشتر و هزینه ی همتراز شده ی کمتری نسبت به دیگر نیروگاه های تولید انرژی دارد.

۱ مقدمه

- اجزاء بال شامل کایت و سیستم کنترل کننده
 - سیستم کنترل کننده ی کابل که شامل یونیت کنترل و سنسورها است.
 - اجزاء استاتیکی شامل کلاف متصل و سیستم پرتاب و فرود
 - اجزاء مبدل توان مکانیکی شامل درام و ژنراتور
 - اجزاء مبدل الکتریکی شامل باتری، اینورتر، ترانسفورمر و دیگر تجهیزات الکترونیکی
- این سیستم شامل زیرساخت ایستگاه، تجهیزات مانیتورینگ، بادسنج و... نیز می باشد [۱].

۲ اساس عملکرد انرژی بادی هوابرد مدل کایت

پمپی

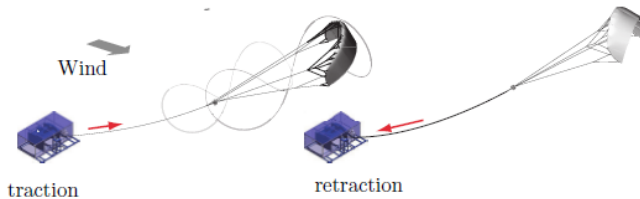
تئوری اولیه ولی اساسی کایت مولد توسط لوید به دست آمد. لوید دو حالت پروازی بسیار مهم را معرفی کرد. پرواز بدون مانور که کایت هیچ گونه چرخش و حرکتی ندارد و پرواز در باد مخالف در صورتی که کلاف واصل موازی با جهت باد باشد. پرواز واقعی بین این دو حالت ایده آل است. او محاسبات نیروهای آیرودینامیکی را با فرض بر بدون جرم بودن کایت و کلاف مستقیم، انجام داد. مدل کلاسیک تحلیل پارامترهای کایت مولد

سیستم های بادی هوابرد^۱ جایگزین مناسبی برای توربین های محور افقی هستند. این سیستم جهت استحصال انرژی از باد از یک ایرفویل پرنده (کایت) استفاده می کند. این وسیله به صورت عمودی با باد برخورد کرده و به دلیل محل تماس بیشتر امکان جابجایی بال در هوا و در نهایت تولید الکتریسیته ی بیشتر را باعث می شود. این سیستم به دلیل استفاده از ارتفاع زیاد دسترسی مناسبی به باد با سرعت بالا دارد که این مزیت مناسبی نسبت به توربین بادی است. در این سیستم کایت به وسیله ی یک کلاف به یک فلکه ی کششی بر روی زمین متصل است. هنگامی که به دلیل نیروی لیفت کایت حرکت می کند فلکه ی کششی نیز می چرخد و این حرکت مکانیکی به ژنراتور منتقل شده و تولید الکتریسیته می کند. هنگامی که کشش کلاف کامل شد، زاویه ی حمله کاهش یافته و نیروی کششی متقابلاً کاهش می یابد. اکنون فلکه ی کششی در جهت عکس می چرخد و کایت ارتفاعش کم می شود. در این حرکت بازگشتی در صورت تولید توان، انرژی تولید شده ی کمتری نسبت به کشش توسط جریان باد ایجاد می شود. عمده تاً این فاز مصرف کننده ی انرژی است [۱]. در این حرکت بازگشتی انرژی تولید شده ی کمتری نسبت به کشش توسط جریان باد ایجاد می شود. اجزاء مدل کایت پمپی عبارتند از:

¹ Airborne wind energy

بازکشش متفاوتند. فاز برگشت در سرعت بالا ولی نیروی کششی پایین اتفاق می افتد. این در حالی است که در فاز کشش دقیقاً برعکس این اتفاق رخ می دهد. عموماً سیستم انتقال قدرت این سیستم، ژنراتور سنکرون آهنربای دائمی تک درایو پیشنهاد می شود. این به دلیل:

۱. تلفات آهنی کمتر به دلیل مترتال فعال کمتر
۲. استحصال انرژی بالاتر
۳. قابل اطمینان در شرایط عدم حضور گیربکس
۴. هزینه ی اندک تعمیرات می باشد [۱].



شکل ۲: سیستم کایت پمپی در دو فاز کشش و بازکشش [۱]

پارامترهای عملیاتی سیستم عبارتند از:

۱. نیروی کلاف کشش
۲. نیروی کلاف بازکشش
۳. طول حداقلی کلاف
۴. طول حداکثری کلاف
۵. زاویه ی ارتفاع

۵ پارامتر اولیه بسیار پارامترهای مهمی هستند. طول کلاف با فرض بر وجود بادهای با سرعت بیشتر در ارتفاع بالاتر محسوب می شود البته باید در نظر داشت که در این صورت درگ وارده بر کلاف و وزن سیستم در حالت پرواز نیز اضافه می شود.

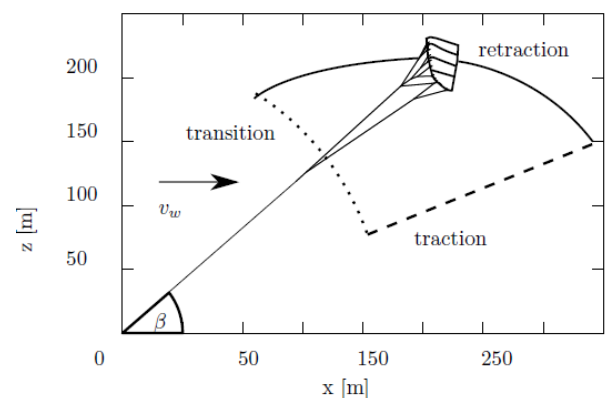
نیروی کشش کلاف مهم ترین پارامتر در پروسه ی تولید انرژی است. زیرا این نیروها مستقیماً به سرعت های کشش مرتبط هستند و سیستم بسیار حساس به تغییرات این پارامترهاست. پارامتر زاویه ی ارتفاع کم اهمیت ترین پارامتر در تولید توان است که با محدوده ی تغییرات $\pm 5^\circ$ تغییرات مهمی در تولید انرژی مشاهده نمی شود ولی اگر تغییرات نسبت به زاویه ی بهینه خیلی زیاد شود، توان تولیدی به سرعت کاهش پیدا می کند [۱].

در حالت کشش هنگامی که کلاف به حداکثر ارتفاع خود می رسد بعد از آن به فاز کشش می رود زیرا آنجا حداکثر نیروی نیروی لیفت را دارد و از آن به بعد کاهش لیفت اتفاق می افتد. پس در جایی که توان نامی به دست می آید نباید ارتفاع کلاف بیشتر شود. در هنگامی که کلاف به حداکثر خود می رسد فاز کشش کامل می شود. در فاز بازکشش ارتفاع کلاف از قبل تعریف شده به حداقل خود می رسد. در این فاز ژنراتور تبدیل به موتور الکتریکی می شود و حتی برای نگه داشتن کایت در این وضعیت حداکثر توان را صرف می کند. حتی در این فاز نیز با افزایش سرعت باد نیرو و توان فاز برگشت افزایش می یابد اما هنگامی که حداکثر توان به دست آمد دیگر سرعت فاز برگشتی نمی تواند بیشتر شود.

هر فاز بازکشش هنگامی کامل می شود که کلاف به حداقل ارتفاع خود

مدل کواسی نام دارد. مدل کواسی کایت را بی جرم و کلاف مستقیم را در یک سیستم کروی شکل و زمین ثابت فرض می کند و در هر حالت پرواز، موازنه ی نیروهای وارده بر کایت در نظر گرفته می شود. این مدل ساده در محاسبات و برنامه نویسی به سرعت جواب می دهند و به منظور انجام طراحی اولیه مناسب جلوه می کنند. در صورتی که مدل دینامیکی نیازمند دیتای دقیق در یک بازه زمان مشخص جهت شبیه سازی پارامترهای مکانیکی سیستم کایت پمپی است. هر چند که مدل دینامیکی دقیق تر از مدل کواسی است اما نیازمند داده های دقیق تجربی است که در ایران به دلیل عدم آزمایش در زمینه ی انرژی بادی هوایرید میسر نیست.

سیستم کایت مولد در سه فاز کشش^۱، بازکشش^۲ و گذار^۳ تولید توان می کند. در فاز کشش نیروی آیرودینامیکی بر کایت وارد می شود و کایت با افزایش نیروی لیفت و در نتیجه نیروی آیرودینامیک ارتفاع پرواز را افزایش می دهد و کلاف را تا ارتفاع مورد نظر می کشد. در این حالت نیروی لیفت از نیروی وزن و نیروی کششی وارد بر کلاف (نیروی تراست^۴ یا پیشرانه) از نیروی درگ بیشتر است. کشش کلاف در این فاز درام فلکه کششی را به کمک کلاف و فلکه ی هرزگرد، به چرخش در می آورد و این حرکت چرخشی به ژنراتور منتقل شده و الکتریسیته تولید می شود. فاز بازکشش تقریباً کایت در حالت پایدار قرار دارد. جهت پایدار ماندن کایت در صورت افزایش نیروی درگ و کاهش نیروی لیفت، ژنراتور تبدیل به موتور می شود و مقداری از انرژی تولید شده مصرف می گردد. البته ممکن است که در این فاز تولید توان نیز صورت گیرد ولی این مقدار بسیار اندک است. جهت ایستا ماندن کایت ممکن است ارتفاع نیز کم شود. جهت پایدار ماندن کایت نیروی لیفت با نیروی وزن و نیروی درگ با نیروی کشش کلاف (نیروی تراست یا پیشرانه) با یکدیگر برابر هستند. فاز گذار، مرحله ی حرکت کایت از فاز کشش به فاز بازکشش یا بالعکس است. مجموعه ی این فازها را یک سیکل کامل می گویند (شکل ۳ [۱]).

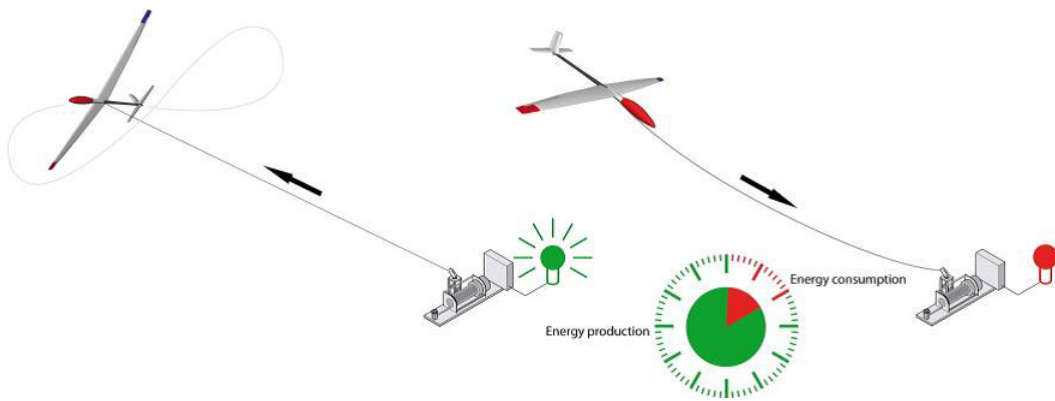


شکل ۱: تولید انرژی از سیستم کایت پمپی در حالت کشش، بازکشش و گذار [۱]

۱.۲ مکانیسم عملکرد انرژی بادی هوایرید مدل کایت پمپی

اساس کار کایت پمپی پرواز در ارتفاع است. کایت در سه فاز کشش، بازکشش و ترانزیشن پرواز می کند. فاز کشش فاز تولید توان و فاز بازکشش عموماً فاز مصرف توان می باشد. سرعت و نیرو در دو فاز کشش و

¹Traction Phase ²Retraction phase ³Transition phase ⁴Thrust



شکل ۳: تولید انرژی از سیستم کایت پمپی در حالت کشش (سمت چپ) و در حالت بازگشت (سمت راست) [۱]

ژنراتور: وظیفه ی ژنراتور تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریسیته است. به عبارتی سیستم کایت مولد به یک ماشین الکتریکی نیازمند است که در فاز کشش ژنراتور و در فاز بازگشت تبدیل به موتور الکتریکی شود [۶].

تجهیزات الکترونیکی انتقال توان: این تجهیزات مانند اینورتر و تجهیزات انتقال توان به شبکه، وظیفه دارند تا انرژی الکتریسیته DC را به AC تبدیل کنند [۳].

درايو ياو: این وسیله امکان تغییر مسیر پرواز کایت را با توجه به زاویه ی بادهای ظاهری به سیستم می دهد. در واقع قطعه ی کنترلی الکترونیکی با محاسبه پارامترها و مقادیر مورد نیاز مانند سرعت باد (بادسنج نیز در نیروگاه موجود است)، توان تولیدی در هر فاز، نیروهای لیفت و درگ و ... به یاو فرمان می دهد [۲].

تجهیزات هیدرولیک و خنک کاری: در فاز بازگشت ماشین الکتریکی بایستی تبدیل به موتور الکتریکی شود. برای این امر از سیستم هیدرولیکی و موتور متصل به فلکه کششی استفاده می شود. از فن ها و تجهیزات خنک کاری نیز جهت کاهش دمای سیستم هیدرولیک استفاده می شود [۵].

ایستگاه احداث شده بر روی زمین: به منظور کنترل سیستم انرژی بادی هوابرد بایستی کارشناسان و تعمیرکاران در داخل ایستگاه حاضر باشند. در داخل ایستگاه رایانه ها و تجهیزات کنترلی جهت کنترل کارکرد سیستم قرار گرفته اند [۵].

کنترل و مانیتورینگ: تجهیزات داخل ایستگاه را تجهیزات کنترلی و مانیتورینگ تشکیل می دهند [۲].

۴ مدل ریاضی

در مدل ریاضی ابتدا نقطه ای بی وزن و کلافی مستقیم را در نظر می گیریم. سرعت ظاهری از سرعت باد، سرعت مماسی دورانی $V_{k,\tau}$ و سرعت شعاعی $V_{k,r}$ شامل شده است.

$$V_a = V_w - V_k \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \cos \theta \cos \phi \\ -\sin \phi \end{bmatrix} V_w - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{k,\tau} - \begin{bmatrix} 0 \\ \cos X \\ \sin X \end{bmatrix} V_{k,r}$$

در واقع در دو فاز کشش و بازگشت دو طول کلاف از پیش تعریف شده ی حداکثری وجود دارد. در مرحله ی بازگشت زاویه ی کلاف با زمین نزدیک به ۹۰ درجه بوده و بسیار صاف و مستقیم است. حال اگر این فاز تمام شود و نسبت $\frac{Cd}{Cl}$ افزایش یابد فاز جدیدی به عنوان ترانزیشن این مهم را انجام می دهد. فازی که کایت را از فاز بازگشت به زاویه ی کلاف فاز کشش و مسیر شبه ۸، انتقال می دهد، فاز ترانزیشن گفته می شود. پس از کامل شدن این فاز قطعه ی کنترل کننده الکترونیکی زاویه ی کایت را کم کرده و برای فاز کشش آماده می کند. در فاز ترانزیشن سرعت کلاف رفت و برگشت رخ نمی دهند زیرا شتاب بالا و نیروی کلاف زیادی به کایت وارد می شود و این امر از اثرات نیروهای آیرودینامیکی و نیروی وزن است.

۳ اجزا و تجهیزات سیستم کایت مولد

کایت: کایت مهم ترین اجزا این سیستم است که وظیفه ی استحصال انرژی از باد را بر عهده دارد [۲].

قطعه ی کنترلی الکترونیکی KCU^۱: وظیفه ی این قطعه کنترل حرکت کایت است. این قطعه از یک سری مدارهای الکترونیکی کنترلی، محفظه، قرقره (ماسوره)، موتورهای کوچک و یک قلاب هدایت کننده ی کابل می باشد [۳].

دکل^۲: وظیفه ی دکل ارتفاع دادن به کایت جهت پرواز می باشد [۳].

کلاف واصل^۳: کلاف اتصال دهنده ی کایت به درام فلکه ی کشش می باشد. کلاف سرعت و توان مکانیکی کایت را به سیستم تولید قدرت منتقل می کند [۴].

درام فلکه کششی^۴: فلکه کششی قدرت منتقل شده از کلاف را به حرکت دورانی تبدیل کرده و با یک شفت واصل به ژنراتور انتقال می دهد [۵].

هدایت کننده ی کابل و کلاف: این وسیله مجهز به به فلکه هرزگرد، گیره های نگه دارنده کابل کلاف، ترمزهای کلاف و کابل و دیگر تجهیزات کنترلی جهت کنترل حرکت کلاف و کابل های متصل به کایت می باشد [۳].

یاتاقان فلکه کششی: وظیفه ی یاتاقان دادن اجازه ی انتقال حرکت دورانی به شفت گیربکس و ژنراتور است [۴].

¹Kite control unit ²Mast ³Tether ⁴Drum

۲.۴ توان سیکلی^۳

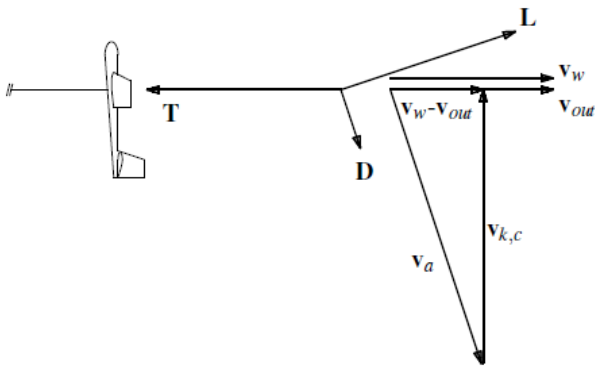
لوید به منظور محاسبه توان سیکلی کایت در حال پرواز روابطی را در دو فاز رفت و برگشت و همچنین توان سیکلی ارائه کرد. توان سیکلی در واقع برآیند دو فاز رفت و بازگشت است. یکی از مهم‌ترین فاکتورها در محاسبه ی یک سیکل کامل فاکتور عدم تقارن است. فاکتور یا ضریب بی بعد عدم تقارن پارامتر مهمی است که با ضرب در سرعت نامی کلاف مرحله ی رفت^۴، سرعت حداکثری مرحله ی بازگشت را حاصل می کند [۷].

$$V_{R,max} = AF * V_{T, rated} \quad (۷)$$

توان نامی ضرب در راندمان پمپی (سیکلی)^۵ توان سیکلی حداکثری را حاصل می کند. به عبارت دیگر

$$P_{Cycle,max} = P * P_E \quad (۸)$$

روش هایی جهت استحصال انرژی باد توسط مساحت بال A و دو ضریب برا و پسا توصیف می شود. بنابر نظر لوید ضریب برا و پسا، نیروی وارده بر کلاف T و سرعت باد مخالف $V_{k,c}$ وارد بر کایت در شکل ۳ نشان داده شده است. سرعت باد با نماد V_w و سرعت برگشتی کلاف در فاز کشش یک سیکل پمپی با نماد V_{out} نشان داده می شود. برای نسبت نیروهای برا به پسای بزرگ، سرعت باد ظاهری V_a تقریباً برابر با $V_{k,c}$ می باشد و همواره داریم [۸].



شکل ۵: نیروها و سرعت های یک کایت در حال پرواز تحت بادهای مخالف [۸]

$$V_a \sim V_{k,c} = (V_w - V_{out}) \frac{C_L}{C_D} \quad (۹)$$

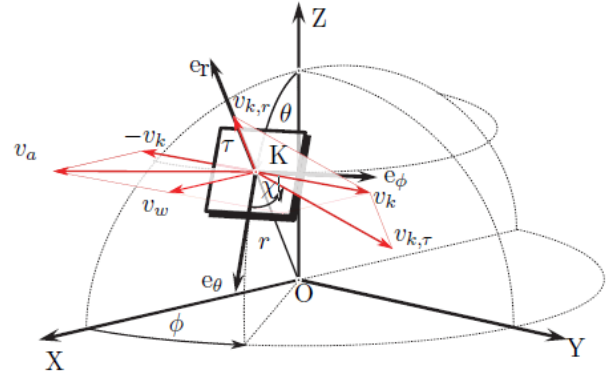
اولین نتیجه مهم این است که سرعت کایت در حال پرواز تحت بادهای مخالف رابطه مستقیم با نسبت نیروی برا بر پسای بال دارد که بسیار بزرگتر از سرعت باد می باشد. سرعت رفتی کلاف واصل V_{out} در فاز تولید توان، دو سرعت کایت و بادهای ظاهری را کاهش می دهد. بدیهی است که V_{out} نمی تواند از V_w بزرگتر باشد. نیروی کلاف T برای $\frac{C_L}{C_D}$ بزرگ، با تقریبی مناسب برابر نیروی لیفت می باشد که از چگالی، مساحت بال، ضریب لیفت و سرعت باد ظاهری محاسبه می شود [۸].

$$T \sim L = \frac{1}{2} \rho V_a^2 A C_L \quad (۱۰)$$

$$f = \frac{V_{k,r}}{V_w} \quad (۲)$$

$$\lambda = \frac{V_{k,\tau}}{V_w} \quad (۳)$$

f را ضریب کشش و λ را ضریب مماسی دورانی می نامیم [۱].



شکل ۴: ترکیب سرعت های کایت در محور مختصات قطبی [۱]

۱.۴ توان تولیدی کایت مولد

توان تولیدی سیستم کایت مولد از رابطه ای شبیه رابطه ی توان تولیدی توربین باد به دست می آید منتهی با این تفاوت که سرعت کایت نیز به علاوه ی سرعت باد در نظر گرفته می شود. توان باد قابل دسترس از رابطه ی زیر محاسبه می شود [۹].

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_{kite} V^3 \quad (۴)$$

در اینجا فاکتور توان کایت معرفی می شود. فاکتور یا ضریب توان کایت (ضریب کایت^۱) فاکتوری بی بعد است که اثر سرعت کایت را در تولید توان نشان می دهد.

سرعت کایت چندین برابر سرعت باد می باشد هر چند که با موانعی مانند سرعت کلاف و نیروی درگ کل (نیروی درگ کایت و کلاف)، ضریب توان به ۵۹٪ بتز^۲ محدود می شود ولی ضریب توان و در نتیجه توان تولیدی بیشتری نسبت به توربین بادی تولید می کند. ضریب کایت به نسبت سرعت کایت به باد بستگی دارد.

$$C_{kite} = \frac{V_{kite}}{V_w} \left(C_L - C_D \frac{V_{kite}}{V_w} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{V_{kite}}{V_w} \right)^2} \quad (۵)$$

$$= \frac{V_{kite}}{V_w} C_D \left(\frac{C_L}{C_D} - \frac{V_{kite}}{V_w} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{V_{kite}}{V_w} \right)^2}$$

در رابطه ی بالا V_{kite} سرعت کایت V_w سرعت باد می باشد. توان الکتریکی تولیدی کل با احتساب کسینوس میانگین زاویه ی کلاف و زمین و راندمان ژنراتور و گیربکس به دست می آید [۹].

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A C_{kite} V^3 h_{gearbox} h_{generator} \cos \theta \quad (۶)$$

¹Kite coefficient ²Betz ³Cycle power ⁴Rated reeling out velocity

⁵Pumping efficiency

۳.۴ نیرو و توان کلاف محدود کننده: استراتژی سه فازی

یک استراتژی برای سیستم های تولید توان کایت پمپی، تقسیم سرعت های مختلف به سه فاز است. برای سرعت های پایین $0 \leq V_w \leq V_{n,T}$ هیچ قیدی برای نیروی کلاف و توان ژنراتور وجود ندارد (بدون قید توان و نیرو). برای سرعت های میانی $V_n \leq V_w \leq V_{n,T}$ نیروی کلاف توسط سرعت بازگشتی بالاتر محدود شده است، البته هنگامی که هنوز توان محدود کننده حاصل نشده باشد (نیروی محدود کننده). برای سرعت های بالا $V_{n,p} \leq V_w \leq V_n$ هم توان محدود کننده و هم نیروی کلاف محدود کننده بر روی سیستم تأثیر می گذارند (توان و نیروی محدود کننده). این سه فاز توسط قطعه ی کنترل کننده ی الکترونیکی و سیستم یاو کنترل می شوند. $V_{n,t}$ سرعت نامی فاز نیروی کلاف محدود کننده است که از این سرعت، سرعت رفت کلاف زیاد شده و باعث کاهش توان می شود. پس بایستی نیروی کلاف را در اینجا ثابت نگه داشت. V_n سرعت نامی جهت تولید توان نامی است. $V_{n,p}$ سرعت توان محدود کننده است که از این سرعت به بعد سرعت کلاف برگشت زیاد شده و سرعت رفت ثابت می ماند که در نتیجه توان ثابت نگه داشته می شود [۸].

۴.۴ توان حداکثری سیکل پمپی

کل سیکل پمپی را با فاز کشش یا رفت و فاز بازکشش یا همان برگشت در نظر گرفته می شود. هدف اصلی تعیین سرعت رفت V_{out} و سرعت برگشت V_{in} همینطور بدست آوردن توان میانه ی مکانیکی در سیکل پمپی PC به صورت حداکثری می باشد. در اینجا فاکتور بی بعد Υ_{out} (ضریب کشش رفت) توسط $V_{out} = \Upsilon_{out} \cdot V_w$ تعریف می شود [۸].

نیروی کلاف در فاز کشش توسط روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می آید:

$$T_{out} = \frac{1}{\sqrt{3}} \rho V_w^2 A (1 - \Upsilon_{out})^2 F_{out} \quad (11)$$

همینطور ضریب نیروی بی بعد F_{out} را معرفی می کنیم:

$$F_{out} = \frac{C_L^3}{C_D^2} \quad (12)$$

به طور مشابه نیروی کلاف در فاز باز کشش برابر است با:

$$T_{in} = \frac{1}{\sqrt{3}} \rho V_w^2 A (1 + \Upsilon_{in})^2 F_{in} \quad (13)$$

Υ_{in} ضریب کشش بازگشت نام دارد. این مقدار بی بعد توسط $V_{in} = \Upsilon_{in} \cdot V_w$ تعریف می شود. فاکتور نیروی بی بعد F_{in} نیز معرفی می شود. بطور ایده آل در فاز بازکشش یا همان برگشت فقط نیروی درگ کایت نیاز به جبران شدن دارد، پس:

$$F_{in} = C_D \quad (14)$$

توان متوسط یک سیکل برابر است با:

$$\frac{P_c}{PWA F_{out}} = f_c = \left((1 - \Upsilon_{out})^2 - \frac{F_{in}}{F_{out}} (1 + \Upsilon_{in})^2 \right) \left(\frac{\Upsilon_{out} \Upsilon_{in}}{\Upsilon_{out} + \Upsilon_{in}} \right) \quad (15)$$

۵ بحث و نتایج

نسبت لیفت به درگ را $12/6$ و ضریب لیفت در مرحله ی بازگشت $2/0$ در نظر گرفته می شود. فاکتور کشش در مرحله ی رفت برابر با 30% ، فاکتور عدم تقارن برابر با 5 و فاکتور کشش در مرحله ی بازگشت برابر با 57% می باشد. در این مدل نیروی وارد شده به کلاف و بار وارد شده به کایت نیز در یک سیکل کامل محاسبه می شود.

مساحت کایت برابر با 20 متر مربع، زاویه ی آزیموس برابر با 0 ، زاویه ی ارتفاع برابر با 60 درجه و زاویه ی کلاف برابر با 30 درجه می باشد. پس از انجام مدلسازی نتایج زیر به دست آمده است. سرعت رفت کلاف در سرعت باد نامی 8 متر بر ثانیه برابر با $2/4$ متر بر ثانیه، سرعت کایت برابر با $18/31$ ، ضریب توان برابر با $70/56$ متر بر ثانیه، ضریب کایت برابر با $18/31$ ، ضریب توان برابر با 48% ، نسبت معادل سرعت نوک پره برابر با $8/82$ ، فاکتور توان برابر با $9/$ و راندمان سیکل برابر با 53% به دست آمده است.

نیروی وارد شده به کلاف در سرعت 3 متر بر ثانیه در مرحله ی رفت برابر با $2255/9$ نیوتن و در مرحله ی بازگشت برابر با $5/6$ نیوتن می باشد. این مقادیر در سرعت نامی 8 متر بر ثانیه در مرحله ی رفت برابر با 16042 نیوتن و در مرحله ی بازگشت برابر با $40/33$ نیوتن می باشند. نیروی کشش کلاف که در واقع نیروی وارده بر کایت است، حداکثر در سرعت 25 متر بر ثانیه در مرحله ی رفت برابر با $110592/4$ نیوتن و در مرحله ی بازگشت برابر با $277/96$ نیوتن است.

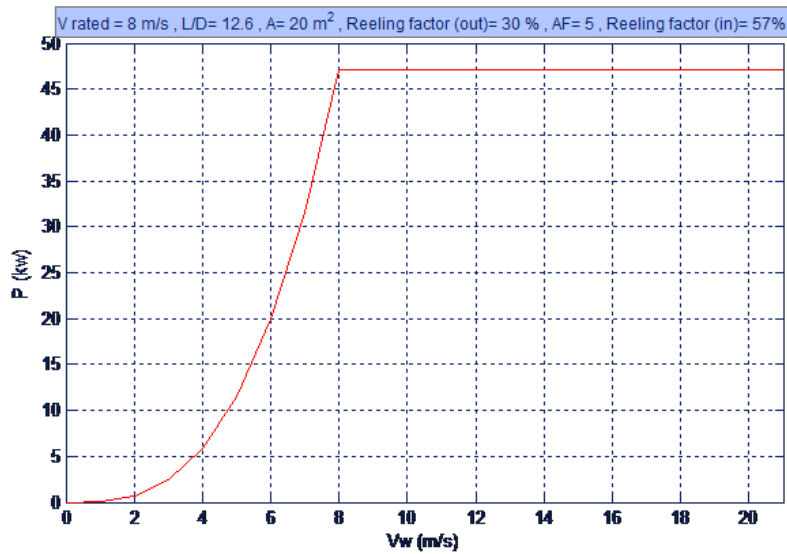
بار وارده بر کایت در سرعت نامی برابر با $802/1$ نیوتن بر متر مربع و در حالت حداکثری برابر با $5526/97$ نیوتن بر متر مربع می باشد. توان نامی این سیستم برابر با $47/162$ کیلووات (توان نامی 50 کیلوواتی) و توان سیکل کامل در سرعت نامی برابر با $25/16$ کیلووات است (شکل ۸).

شکل ۷ روند افزایش نیروی کششی وارده بر کلاف و کایت را نشان می دهد. نیروی حداکثری، نیروی میانگین و انحراف معیار در نمودار نشان داده شده اند.

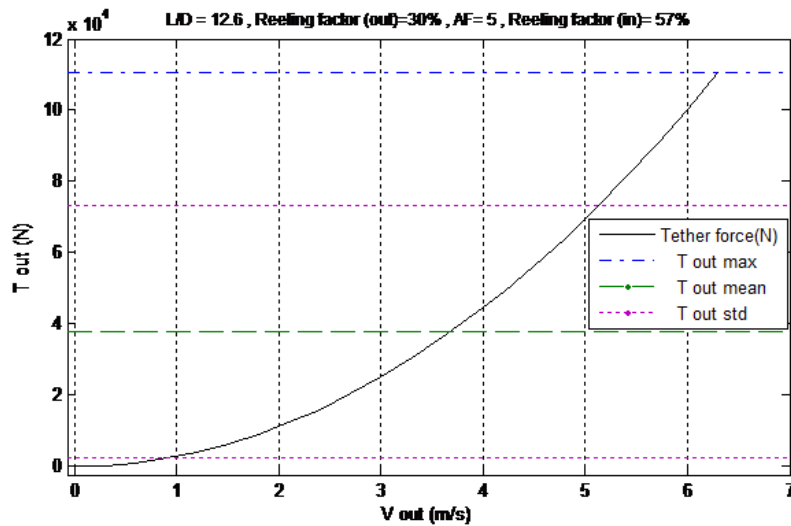
نیروی میانگین و انحراف معیار جهت تعیین نیروی نامی مشخص شده اند که نیروی میانگین تقریباً برابر با 40 کیلو نیوتن می باشد.

قابل ذکر است که نیروی کشش آیرودینامیکی کایت F_{out} در این سناریو برابر با $41/92$ نیوتن می باشد. نیروی آیرودینامیکی وارده بر کایت با ضریب درگ کلاف $0/90$ برابر با 40 کیلو نیوتن می باشد. این نیرو تقریباً برابر با متوسط نیروی کششی وارده بر کلاف است. شکل ۶ نمودار توان مکانیکی سیستم را نشان می دهد. اگر راندمان ژنراتور و گیربکس را 90% فرض شود، توان الکتریکی نامی برابر با $42/3$ کیلووات حاصل می شود. شکل ۸، سه توان مکانیکی، سیکلی و الکتریکی سیستم را نشان می دهد.

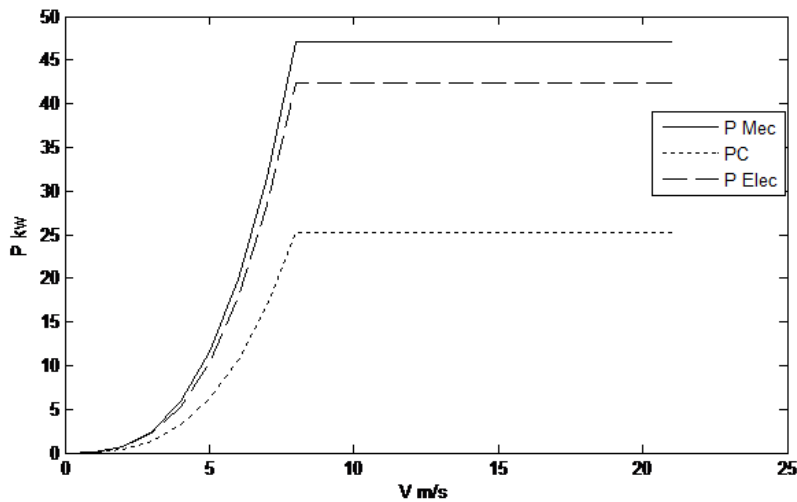
پس از انجام مدلسازی و تحلیل فنی دو پارامتر اساسی ضریب ظرفیت و هزینه ی همتراز شده ی انرژی نیز محاسبه شده است. جهت سنجیدن کارایی و مقایسه ی نیروگاه ها از فاکتور بی بعد ضریب ظرفیت استفاده می شود. ضریب ظرفیت مدت زمان عملیاتی نیروگاه را در 24 ساعت شبانه روز نشان می دهد. هر چه ضریب ظرفیت بیشتر باشد نشان از زمان عملیاتی بیشتر و



شکل ۶: نمودار توان سیستم با توان نامی ۴۷ کیلووات در سرعت نامی ۸ متر بر ثانیه، زاویه ی ارتفاع ۶۰ درجه، زاویه کلاف ۳۰ درجه، مساحت کایت ۲۰ متر مربع، فاکتور آستیمری ۵، فاکتور کشش ۳۰٪ و نسبت لیفت به درگ ۱۲.



شکل ۷: نمودار تغییرات نیروی کشش وارد بر کلاف بر حسب سرعت رفتی کلاف در سرعت نامی ۸ متر بر ثانیه، زاویه ی ارتفاع ۶۰ درجه، زاویه کلاف ۳۰ درجه، مساحت کایت ۲۰ متر مربع، فاکتور آستیمری ۵، فاکتور کشش ۳۰٪ و نسبت لیفت به درگ ۱۲/۶



شکل ۸: نمودار مقایسه توان های مکانیکی، سیکلی و الکتریکی با توان نامی ۴۷ کیلووات

جدول ۲: مقایسه‌ی هزینه‌ی همتراز شده‌ی تولید انرژی نیروگاه‌های تولید الکتریسیته [۱۱]

نیروگاه	هزینه همتراز شده‌ی تولید انرژی (cent/kwh)
سلول‌های خورشیدی (پنل های خورشیدی)	۱۲/۲
توربین بادی (بر روی زمین)	۸/۸
نیروگاه سوخت فسیلی با ذغال سنگ	۴/۵
نیروگاه سوخت فسیلی با سیکل ترکیبی	۵/۶
برق آبی	۸/۵
کایت مولد	۸

۶ نتیجه گیری

تولید توان توسط کایت مولد به یک سیکل کامل نیاز دارد. با اینکه توان تولیدی حداکثری در فاز رفت اتفاق می افتد ولی فاز بازگشت یا مقداری از توان را مصرف می کند یا توان کمی تولید می کند. پارامترهای فاکتور عدم تقارن، فاکتور توان و راندمان سیکلی از جمله پارامترهای مهم در محاسبه ی یک سیکل کامل هستند که با انتخاب صحیح، توان تولیدی حداکثر می شود.

ضریب کایت میزان تفاوت سرعت کایت و سرعت باد را نشان می دهد. سرعت بیشتر کایت نشانه ی توان بیشتر است اما به دلیل سیکلی بودن این سیستم توان نهایی همان توان سیکلی است. نیروی متوسط وارد شده به کایت تقریباً برابر با ۴۰ کیلو نیوتن است که این مقدار مشابه نیروی آیرودینامیکی وارد شده به کل سیستم است.

این نتیجه نشان دهنده‌ی این امر است نیروی آیرودینامیکی وارد شده مناسب است و آسیبی به سیستم نمی زند. راندمان سیکلی برابر با ۵۳٪ است. این مقدار توان سیکلی کل را حاصل می کند. اهمیت این پارامتر در افزایش یا کاهش توان نهایی منتقل شده به شبکه است. ضریب ظرفیت سیستم برابر با ۴۵ درصد و هزینه ی همتراز شده ی انرژی برابر با ۷/۵ سنت بر کیلووات ساعت است. با توجه به مقادیر متوسط یعنی ضریب ظرفیت ۵۵ درصدی و هزینه ی همتراز شده ی ۸ سنت بر کیلووات ساعتی، این نتیجه حاصل می شود که این سیستم ضریب ظرفیت کم تر و هزینه‌ی همتراز شده ی بیشتری از مقادیر متوسط دارد. سیستم انرژی بادی هوا برد مدل کایت پمپی از لحاظ ضریب ظرفیت و هزینه شرایط بسیار بهتری نسبت به دیگر نیروگاه‌های تجدیدپذیر دارد.

مراجع

- [1] Pietro, F., 2014, pumping kites wind farm- master thesis- Delph University of technology.
- [2] <http://trente.eu/kitepower-is-this-kite-an-alternative-to-wind-turbines>
- [3] <http://danyar.ir>
- [4] <http://thebulletin.org/kite-power/latest-green-technology>
- [5] <http://pirate4x4.com/convertng-6-inch-drum-warn-winch-10-inch-drum>

همانطور که مشاهده می شود ضریب ظرفیت کایت مولد از دیگر نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر و انرژی پاک بیشتر است که این برتری این سیستم را نشان می دهد. اما نیروگاه کایت پمپی هنوز ضریب ظرفیت کمتری از نیروگاه سوخت فسیلی ذغال سنگ دارد.

جدول ۲ نشان می دهد که هزینه‌ی همتراز شده‌ی تولید یک کیلووات انرژی در کایت مولد از دیگر نیروگاه‌های تجدیدپذیر و انرژی پاک کم تر ولی هزینه ی همتراز شده‌ی انرژی بیشتری از نیروگاه‌های متداول سوخت های فسیلی دارد.

- [6] <http://ace-winch.es.com/products/drum-winch.es>
- [7] Jannis, H., 2012, the technical and economic potential of airborne wind energy- master thesis- Utrecht University.
- [8] Luchsinger, H., 2013, Pumping Cycle Kite Power, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Pages 47-64
- [9] Rageb, M., March 2010, Airbone wind turbine concepts, Proceedings of the 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC10), Amman, Jordan
- [10] <http://sunmetrix.com/what-is-capacity-factor-and-how-does-solar-energy-compare>
- [11] <https://instituteeforenergyresearch.org/analysis/the-hidden-costs-of-wind-power>