



بررسی اثرات متقابل دینامیکی سرعت باد بر توربین بادی و شبیه سازی اجزای آن

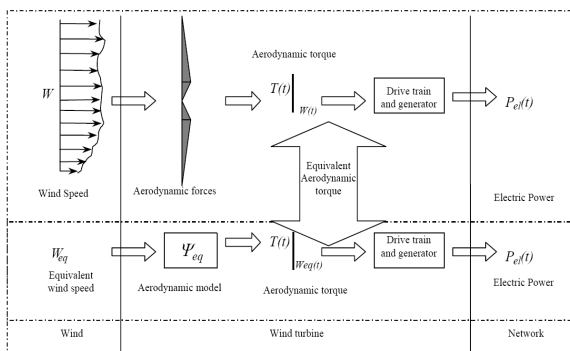
محمد رضا آقا براهیمی و محسن مظفری زاده

سرعت متوسط در یک بازه 10 دقیقه ای بدست آمده و بر روی سطح روتور ثابت در نظر گرفته می شود. بخش تصادفی که شامل نوسانات سرعت باد می باشد از مجموع پدیده هایی مانند توربولانس باد (wind turbulence) و نمونه برداری چرخشی تشکیل شده است.

به علت پراکندگی مطالب در این زمینه، سعی شده است تا مطالب جمع آوری و بصورت واضح و کاربردی ارائه گردد. همچنین مدلی برای شبیه سازی آن ارائه شده است [1].

2- مدل معادل باد

هدف از مدل معادل باد تولید یک مدل معادل برای سرعت باد بر روی تمام سطح روتور است که در مواجهه با مدل توربین بادی گشتاور آیرودینامیکی یکسان (شکل 1)) با پره های واقعی تولید کند.



شکل 1-نمایی کلی از مدلسازی یک سیستم تبدیل انرژی بادی

این مدل معمولاً یک سری زمانی 10 دقیقه ای از باد را تولید می کند. زمان 10 دقیقه ای به چند دلیل انتخاب شده است. اول اینکه یک زمان 10 دقیقه ای از بسیاری از نوسانات دوره ای مرتبط با پدیده های هواشناسی اجتناب می کند. دوم با چارچوب زمانی کنترل کننده های اولیه (primary) فرکانس در سیستم های قدرت سازگار است. سوم بسیاری از پدیده های کیفیت ولتاژ مانند

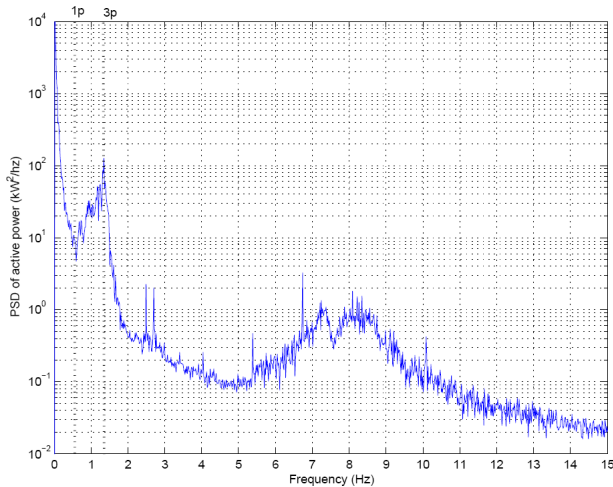
چکیده - توربین های بادی توان نوسانی پیوسته ای تولید می کنند که بخش عمده ای از آن به ورودی یعنی باد وابسته است. از آنجا که درصد تولید توان بادی به عنوان انرژی پاک و سازگار با محیط زیست روز به روز در دنیا بیشتر می شود، لازم است ابعاد مختلف این نوع توان الکتریکی تولیدی بررسی گردد. شبیه سازی باد به شکل سری زمانی و به صورت واقعی از کارهای مهمی است که کمتر مورد توجه قرار می گیرد و معمولاً تقریب زده می شود. مخصوصاً پایه و اساس مطالعات دینامیکی و کیفیت توان این نوع شبیه سازی می باشد. در این مقاله اجزای مختلف باد و اثرات متقابل آن با دینامیک های توربین بادی تشریح و در پایان مدلی برای شبیه سازی آن در نرم افزار MATLAB/Simulink ارائه می گردد.

واژه های کلیدی - مدل سرعت باد، سری زمانی باد، چگالی طیفی توان، سایه برج، توربولانس.

1- مقدمه

با پذیرش تولید توان بادی به عنوان انرژی سازگار با طبیعت تحقیقات فراوانی بر روی جنبه های مختلف آن صورت گرفته است. یکی از جنبه هایی که با همه گیر شدن این نوع انرژی اهمیت پیدا می کند، بحث کیفیت این نوع توان تولیدی می باشد. خاصیت نوسانی سرعت باد باعث اهمیت پدیده های کیفیت توان در این نوع نیروگاه ها می شود. در این مقاله مدل دینامیکی باد برای مطالعات کیفیت توان توربین های بادی خصوصاً توربین سه پره افقی روبه باد بررسی می شود. مدل سرعت باد در حقیقت شامل دو بخش قطعی (deterministic) و تصادفی (stochastic) می باشد. این بخش قطعی شامل یک پروفایل متوسط سرعت باد می باشد. این

چگالی طیفی توان (PSD) مربوط به یک توربین بادی سه پره



شکل 3- PSD توان الکتریکی اندازه گیری شده از یک توربین بادی سه پره سرعت ثابت 500KW از نوع stall .

سرعت ثابت 500KW از نوع stall را نشان می دهد. فرکانس پایه 1P تقریباً 0.4Hz است. بیشترین مقدار توان، مربوط به فرکانس 3P (1/2Hz) است که در تحلیل های کیفیت توان استفاده می شود و می بایست در مدل باد لحاظ گردد. در گستره فرکانس 6 تا 11 هرتز مقداری افزایش انرژی دیده می شود که مربوط به یک مد پیچیده توربین بادی است و ربطی به توربولانس باد ندارد. بنابراین نوسانات توان در فرکانس های 0 تا 3 برابر سرعت روتور عمدتاً به باد مربوط می باشد.

4- بخش قطعی باد

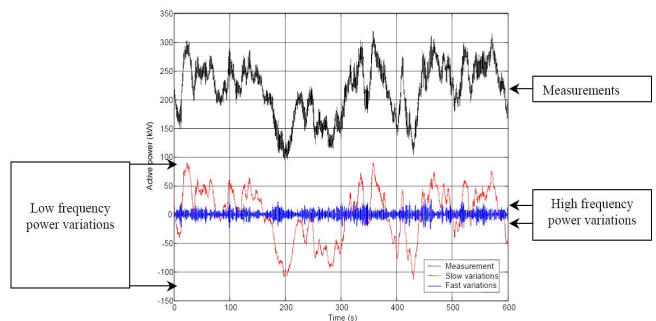
این قسمت شامل مقدار متوسط سرعت باد است که پدیده های دیگری مانند اثر سایه برج (tower shadow) و تغییرات سمتی باد (wind shear) نیز بر آن تاثیر می گذارد. این دو پدیده به نوسانات چرخشی (rotational fluctuations) باد معروفند.

4-1 اثر سایه برج

اثر سایه برج به همراه سرعت متوسط باد قسمت عمده بخش قطعی باد را شکل می دهند. برج توربین های محور افقی از دو نوع استوانه ای (برای توربین های بادی بزرگ جدید) و مشبک (برای توربین های بادی کوچک) ساخته می شوند. برج ها مانع عبور آزاد باد می شوند و یک کاهش جریان در جلوی برج و یک جریان گردابی مغشوش در پشت برج ایجاد می کند [6]. اثر این پدیده برای توربین های پشت به باد شدید تر از توربین های رو به باد است [7]. برای توربین های پشت به باد نوسانات توان ناشی از سایه برج به صورت پیک تا پیک تا 10 درصد مقدار متوسط می رسد. ماکزیمم تغییر سرعت نیز تا 20 درصد یا بیشتر می تواند اتفاق بیفتد. برای برج های مشبک این اثر بسیار پیچیده است و می تواند

شاخص کوتاه مدت فلیکر [2] همچنین مشخصه های توربین بادی مانند منحنی توان بر مبنای اندازه گیری های 10 دقیقه ای قرار گرفته اند.

شکل (2) توان اکتیو اندازه گیری شده از یک توربین بادی سه پره از نوع stall نشان می دهد. در این شکل نوسانات توان به دو بخش کند و تند تقسیم و با حذف مقدار متوسط نمایش داده شده اند. بخش کند شامل فرکانس های 0,5 هرتز به پایین و بخش تند فرکانس های بالای 0,5 هرتز هستند. بخش نوسانات کند مربوط به توربولانس بر روی سطح روتور است. بخش نوسانات تند دارای اندازه ای بسیار کوچکتر بوده و به طور مستقیم به توربولانس مربوط نمی شود بلکه به دینامیک های توربین بادی که شامل چرخش پره ها درون میدان بادی می باشد مربوط هستند. این بخش از نوسانات توان به عنوان یکی از دلایل اصلی برای مشکل فلیکر معرفی شده است [3].



شکل 2- توان اندازه گیری شده از یک توربین واقعی از نوع stall

همانطور که گفته شد این مدل از دو بخش قطعی و تصادفی (که بر روی بخش قطعی سوار می شود) ایجاد می گردد :

$$W(x, y, z, t) = U(x, y, z) + g(x, y, z, t) \quad (1)$$

که $W(x, y, z, t)$ سرعت باد در موقعیت xyz و در زمان t ، $U(x, y, z)$ بخش قطعی سرعت باد است که مستقل از زمان است و $g(x, y, z, t)$ بخش تصادفی است که مقدار متوسطش صفر است. به طور کلی مدل سرعت باد معادل شامل مولفه های هارمونیک $0p$ و $3p$ می شود. این مطلب توسط اندازه گیری ها اثبات شده است.

3- تاثیر تعداد پره ها بر نوسانات گشتاور

نمونه برداری چرخشی (rotational sampling) از مواجهه پره ها با گرداب های اغتشاشی هوا که از سطح روتور عبور می کنند ایجاد می شود. تحقیقات نشان داده است که پدیده نمونه برداری چرخشی مسئول نوسانات مهم گشتاور در فرکانس bP و هارمونیک های آن می باشد (b تعداد پره ها و P فرکانس گردش روتور می باشد) [4,5]. مثلاً اندازه گیری های توان از یک روتور سه پره متقارن نشان می دهد که همه ی فرکانس ها به جز فرکانس های سه برابر فرکانس روتور ($3nP$) تقریباً حذف می شوند . شکل (3)

مطابق با PSD توان اندازه گیری شده از توربین بادی که نوسانات عمده را در فرکانس 3p نشان می داد. (شکل (3))

4-2 تغییرات سمتی باد

اصطکاک بین هوای عبوری و زمین بر روی پروفایل عمودی باد تاثیر می گذارد به طوری که سرعت متوسط باد با ارتفاع افزایش می یابد. این پدیده تغییرات سمتی باد (wind shear) نامیده می شود. اصطکاک بین باد و زمین می تواند سرعت باد را تا صدها متر تحت تاثیر قرار دهد. این پدیده به نوع و عوارض زمین بستگی دارد. مثلا یک منطقه صاف با موانع کوچک مانند دریا با موج های آرام تغییرات سرعت باد کمی دارد. به طور کلی توان الکتریکی خروجی از یک توربین بادی سه پره تاثیر خیلی کمی از تغییرات سمتی باد دارد به طوری که می توان آن را نادیده گرفت، اما اثر این پدیده در تحلیل بار مکانیکی پره ها مهم است. رابطه ی سرعت باد متاثر از این پدیده در دو ارتفاع مختلف توسط (2) بیان می شود [10]:

$$\frac{U(h+z_1)}{U(h+z_2)} = \frac{\ln\left(\frac{h+z_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h+z_2}{z_0}\right)} \quad (2)$$

که z_1 و z_2 ارتفاع از مرکز روتور و h ارتفاع مرکز روتور تا زمین است. U سرعت باد و z_0 طول ناهمواری زمین است که نشان دهنده عوارض زمین می باشد. در جدول زیر مقادیر نمونه برای z_0 آورده شده است [11]:

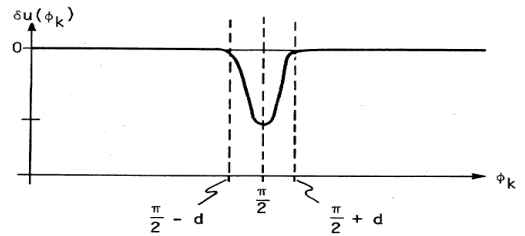
جدول 1-مقادیر نمونه برای طول ناهمواری سطح زمین

$Z_0(m)$	نوع عوارض زمین
$2-3 \times 10^{-4}$	دریای آرام
$0.2-1 \times 10^{-3}$	زمین ماسه ای
$1-4 \times 10^{-2}$	علف کوچک
$0.4-1 \times 10^{-1}$	علف بلند
0.1-1	بیشه زار
1-4	شهر

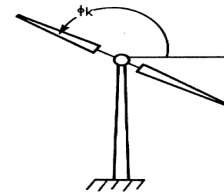
شکل (6) تغییرات سمتی باد برای چند منطقه مختلف با سرعت متوسط 10 متر بر ثانیه و ارتفاع 10 متر را نشان می دهد.

شکل (7) گشتاور مکانیکی نرمال شده از همان توربین بادی سه پره قبلی ناشی از تغییرات سمتی باد در یک منطقه با z_0 نشان می دهد. جابجایی مکانی 120 درجه بین سه پره باعث حذف گشتاور های با فرکانس غیر مضرب 3 می شود. FFT گشتاور منتجه نیز نشان می دهد که در روتور های متقارن، گشتاور کلی بر روی شافت اصلی به طور عمده در فرکانس 3p قرار دارد.

توابعی از جهت باد باشد [8]. همچنین برای این برج ها اثر تقریبی

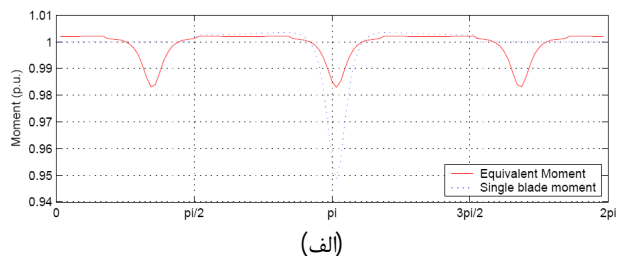


2d = shadow width

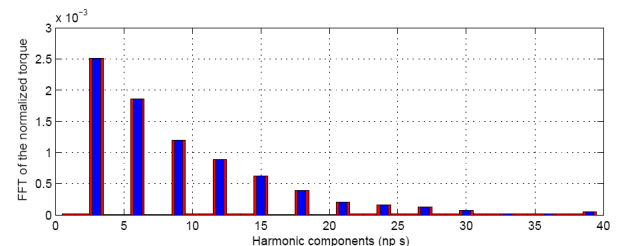


شکل 4- سایه برج یک توربین بادی دو پره است که $\delta u(\phi_k)$ تغییر در سرعت باد بر اثر سایه برج است. می تواند با فرض یک برج معادل استوانه ای خیالی تخمین زده شود.

شکل (4) اثر سایه برج یک توربین بادی دو پره را نشان می دهد [9]. در مورد یک توربین رو به باد (up-wind) اغتشاش در جریان جلوی برج است که این اثر را ایجاد می کند. برای یک برج استوانه ای از یک توربین سه پره رو به باد سرعت باد در جلوی برج می تواند تا 20 درصد کاهش یابد [6] و برج فقط نیمصفحه پایین روتور را تحت تاثیر قرار می دهد.



(الف)



(ب)

شکل 5- (الف) گشتاور نرمالیزه متاثر از اثر سایه برج (ب) FFT گشتاور نرمالیزه از شکل (الف)

اثر سایه برج بر روی گشتاور روتور توربین بادی سه پره در شکل (5) نشان داده شده است. در قسمت (الف) سری زمانی گشتاور نرمال شده و در قسمت (ب) تبدیل فوریه سری زمانی نشان داده شده است. قسمت (ب) نشان می دهد که بصورت عملی فقط مولفه های 3np در آن ظاهر می شود. همان طور که می بینیم دینامیک های توربین بادی مولفه های فرکانس بالای 3np را فیلتر می کنند،

5- بخش تصادفی باد (توربولانس)

بخش تصادفی باد همان بخش متغیر باد بر روی سطح روتور است. این نوسانات سرعت در گستره ی وسیعی از ثانیه تا دقیقه قرار می گیرند. نوسانات ذاتا رفتار تصادفی دارند اما دینامیک های هوا یک الگوی اصلی برای این نوسانات سرعت ایجاد می کنند. نوسانات فرکانس کم اندازه ی بزرگی دارند و نوسانات فرکانس بالا اندازه های کوچکتری دارند. این بخش تصادفی، توربولانس نیز نامیده می شود. توربولانس یا بر اساس واریانسش (3) یا بر اساس انحراف معیار (4) آن سنجیده می شود.

$$S^2 = E[(W - E[W])^2] \quad (3)$$

$$I_u = \frac{S}{U_0} \quad (4)$$

که S^2 واریانس، $E[]$ اپراتور امید ریاضی، W سرعت باد، S انحراف معیار، $E[W]=U_0$ متوسط سرعت باد و I_u شدت توربولانس می باشد.

5-1 چگالی طیفی توان توربولانس

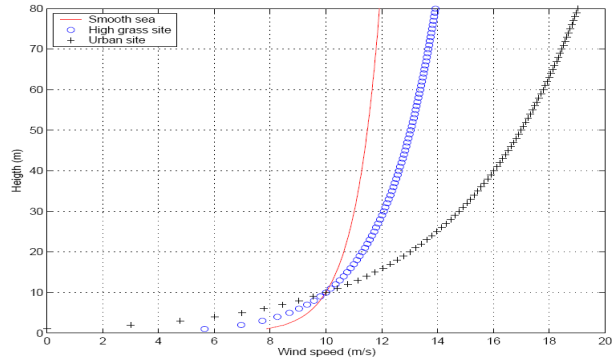
توربولانس در یک گستره بزرگی از فرکانس تغییر می کند. تابع چگالی طیفی توان (Power Spectral Density) توربولانس سالها تحقیق شده است و چندین مدل مختلف برای آن ارائه شده است. مدل kaimal برای نمایش PSD توربولانس بسیار مورد استقبال قرار گرفته است، هر چند در سالهای اخیر مدل های تخمینی بهتری مانند Friedrich-Kleinhans [12] نیز ارائه شده است. اما از آنجا که مدل kaimal [13] توسط استاندارد IEC [14] و استاندارد دانمارک [15] توصیه شده است مورد استفاده قرار می دهیم. این مدل که به شکل توزیع گوسی عمل می کند به شکل ساده زیر تعریف می شود:

$$\frac{f * S(f)}{S^2} = \frac{f * x_L}{U_0} \frac{1}{(1 + 1.5 * (\frac{f * x_L}{U_0}))^{\frac{5}{3}}} \quad (3)$$

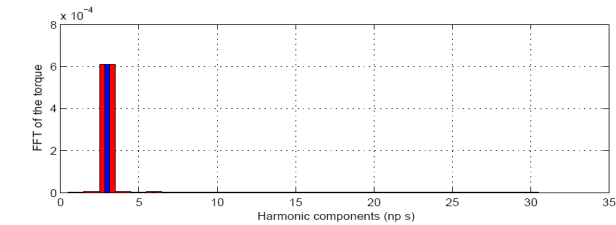
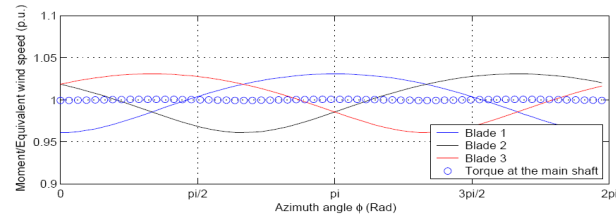
که f فرکانس توربولانس، $S(f)$ PSD توربولانس، S^2 واریانس، x_L مقیاس طول (scale length) توربولانس (ماکزیمم 600 متر پیشنهاد شده است) و U_0 سرعت متوسط باد است. شکل (9) طیف توانی لگاریتمی ($f * S(f)$) توربولانس شبیه سازی شده با مدل kaimal با یک سرعت باد متوسط 10m/s، شدت توربولانس 10% و مقیاس طول 600 متر را نشان می دهد.

5-2 کوهرنس باد

کوهرنس باد (coherence of the wind) نشان دهنده ی ارتباط بین سرعت باد در نقاط مختلف می باشد. این ارتباط وابسته



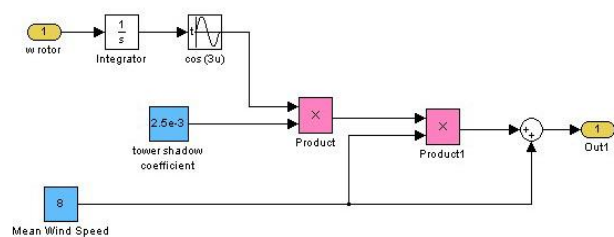
شکل 6- تغییرات سمتی باد بر حسب ارتفاع برای مناطق مختلف



شکل 7- گشتاور نرمالیزه ناشی از تغییرات سمتی باد (z_0 مقدار متوسطی دارد)

4-3 شبیه سازی مدل قطعی باد

همانطور که دیدیم اندازه اثر سایه برج (مقدار FFT در فرکانس 3p برای مثال قبلی حدود 2.5×10^{-3}) خیلی بزرگتر از تغییرات سمتی باد (6×10^{-4}) است. بنابراین با نادیده گرفتن تغییرات سمتی باد، بخش قطعی باد می تواند از مجموع مقدار متوسط باد بعلاوه ی هارمونیک سوم اثر سایه برج مدل شود. شکل زیر شبیه سازی این قسمت را در MATLAB/Simulink نشان می دهد:



شکل 8- شبیه سازی بخش قطعی در MATLAB/Simulink

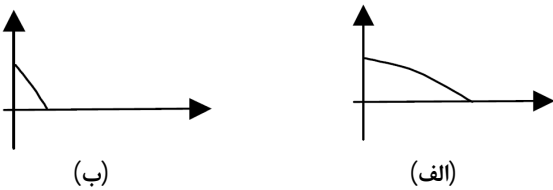
ورودی شکل سرعت روتور می باشد که با انتگرالگیری از آن زاویه گردش پره های روتور بدست می آید. وجود ضریب 3 در آرگومان تابع کسینوسی بیانگر هارمونیک سوم است. بلوک Tower shadow coefficient اندازه هارمونیک سوم محاسبه شده بر اساس پارامترهای هندسی توربین بادی می باشد. فقط بخش کسینوسی هارمونیک در مدل وارد شده زیرا اثر سایه برج متقارن است و بخش سینوسی هارمونیک سوم حذف می شود.

در هر فرکانس نمونه برداری چرخشی است و چون برای یک توربین بادی سه پره متقارن فقط فرکانس 0p و 3p مهم می باشند (شکل 2)، در این دو فرکانس دو فیلتر درجه دو معرفی شده است که با عبور سیگنال از آنها، اثر نمونه برداری چرخشی در آن اعمال می شود [19]. این فیلتر های درجه دو توابع ادمیتانس نامیده می شوند و به شکل تابع انتقال ارائه می گردند. تابع ادمیتانس در حقیقت وابسته به کوهرنس باد است [20]. تابع (4) برای فرکانس 0p و (5) برای فرکانس 3p استخراج شده است [19].

$$H_{adm[3p]} = \frac{4.7869d_{TF}^2 s^2 + 0.9904}{7.6823d_{TF}^2 s^2 + 7.3518d_{TF} s + 1} \quad (4)$$

$$H_{adm[0p]} = \frac{0.2766d_{TF} s + 0.0307}{0.3691d_{TF}^2 s^2 + 1.7722d_{TF} s + 1} \quad (5)$$

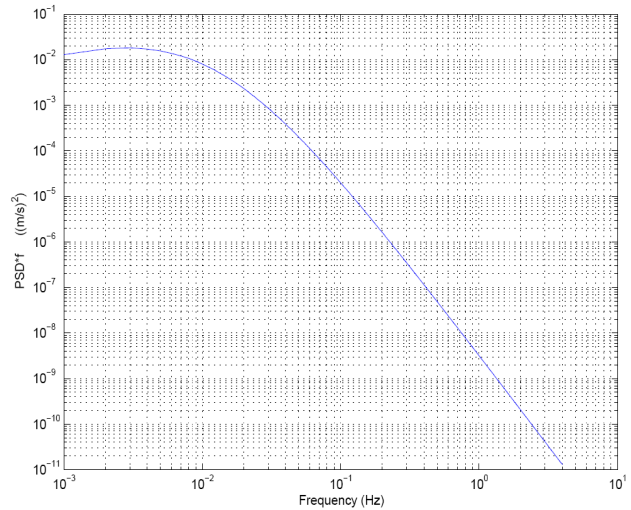
که $d_{TF} = \frac{R}{U_0}$ پارامتر نرمال سازی، R شعاع روتور توربین بادی و U_0 سرعت متوسط باد است. تابع ادمیتانس برای مولفه های هارمونیک 0p به شکل یک تابع صاف کننده برای نوسانات توربولانس عمل می کند. در فرکانس پایین، نوسانات توربولانس به طور کامل به توان آیرودینامیکی تبدیل می شود در حالی که در فرکانس بالا نوسانات به علت کوهرنس توربولانس فیلتر می شوند. تابع ادمیتانس 3p نیز عملکردی مشابه تابع ادمیتانس 0p انجام می دهد با این تفاوت که اثر کاهش آن خیلی بیشتر از ادمیتانس 0p است (شکل 10).



شکل 10- (الف) تابع ادمیتانس 0p (ب) تابع ادمیتانس 3p

5-1 شبیه سازی مدل تصادفی باد

توربولانس سرعت باد با اعمال فیلتر kaimal به یک تولید کننده عدد تصادفی شبیه سازی می شود [19]. مانند بخش قطعی باد در اینجا نیز ابتدا ضرایب هارمونیک های 0p و 3p به عنوان اندازه مولفه ی هارمونیک محاسبه و سپس به آن هارمونیک ها اعمال می شود. در شکل (11) در ابتدا موقعیت روتور با انتگرالگیری از سرعت روتور بدست می آید. با اعمال فیلترهای kaimal به اعداد تصادفی، توربولانس سرعت باد شبیه سازی می شود که با عبور از توابع ادمیتانس اثر صاف سازی به آن اعمال می شود. سرانجام سه مولفه با هم جمع شده و بخش تصادفی سرعت باد معادل را شبیه سازی می کنند [1].



شکل 9-چگالی طیفی توان kaimal مربوط به توربولانس

به سرعت باد، فاصله ی بین نقاط و فرکانس است. نقاط نزدیک به هم همبستگی زیادی دارند ولی با افزایش فاصله این همبستگی کاهش می یابد. به طریق مشابه در فرکانس های پایین توربولانس خیلی همبسته است و با افزایش فرکانس این همبستگی کاهش می یابد. تابع کوهرنس نیز به شکل های متفاوت تعریف شده است که در اینجا مدل کوهرنس Davenport برای شبیه سازی کوهرنس، در سطح روتور معرفی می شود [16]:

$$g(f, d) = e^{-k \frac{f*d}{U_0}} \quad (4)$$

که g کوهرنس، U_0 سرعت متوسط باد، f فرکانس، d فاصله بین دو نقطه و k ضریب کاهش است. مقدار k در اصل 7/7 انتخاب شد [16] ولی اندازه گیری های بعدی مقدار آن را بین 2 تا 27 نشان داده اند که بیشتر با نسبت d/h (فاصله بین دو نقطه تقسیم بر ارتفاع محل اندازه گیری) مرتبط است [17]. بنابر استاندارد دانمارک [15] مقدار k برابر 12 انتخاب می شود.

5-3 نمونه برداری چرخشی توربولانس

گردش پره ها باعث انتقال محتویات انرژی توربولانس از فرکانس کم به چند برابر فرکانس روتور شده و به طور کلی نوسانات توان خاصی را تولید می کنند. این پدیده نمونه برداری چرخشی توربولانس یا توربولانس چرخشی نامیده می شود.

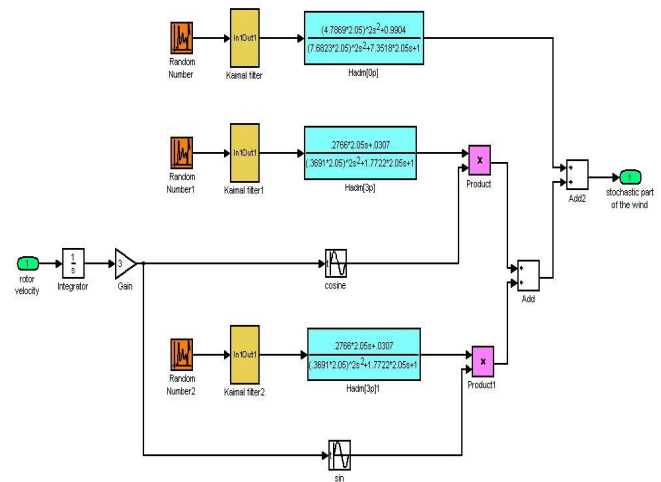
نمونه برداری چرخشی توربولانس به عنوان دلیل اصلی فلیکر از توربین های بادی گزارش شده است [3]. این پدیده سالها مورد بررسی قرار گرفته و روش های مختلفی برای شبیه سازی آن ارائه شده است. یکی از روش ها شامل تولید چندین سری زمانی همبسته از سرعت باد بر روی سطح روتور توربین بادی می باشد که به مدل شبکه ای باد معروف است [18]. از معایب این روش نیاز به حافظه ی بزرگ برای تولید چندین سری زمانی وابسته از باد است. روشی که در اینجا ارائه شده است بر اساس سرعت معادل باد

واقعی باشد یا اغلب اوقات برای سیگنال های انتزاعی می تواند به عنوان مربع اندازه سیگنال تعریف شود. در واقع شبیه به سیگنال ولتاژی که به یک مقاومت 1 اهم اعمال می شود. بنابراین توان لحظه ای این چنین داده می شود [21]:

$$P = S(t)^2 \quad (7)$$

8- مراجع

- [1] P. Rosas, P. Sørensen, and H. Bindner, "Fast wind modeling for wind turbines," in Proc. 2000 Europe. Wind Energy Assoc. Int. Conf.
- [2] "Voltage characteristics of electricity supplied by public systems", European standard, CENELEC EN 50160, November, 1994.
- [3] P. Sørensen, Methods for Calculation of the Flicker Contributions from Wind Turbines, Risø report Risø - I - 939 (EN), Roskilde, Denmark, December 1995.
- [4] J.R. Connell and R.L. George, "A New Look at Turbulence Experienced by a Rotating Wind Turbine," presented at the Second ASME Wind Energy Symposium, January 1983.
- [5] J.R. Connell, "The Spectrum of Wind Speed Fluctuations Encountered by a Rotating Blade of a Wind Energy Conversion System: Observations and Theory." Pacific Northwest Laboratory Report PNL-4083, 1981.
- [6] Madsen, Peter Hauge, Sten Fradsen, William E. Holley and Jens Carsten Hansen, "Dynamics and Fatigue Damage of Wind Turbine Rotors during Steady Operation". Risø report R-512, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark 1984.
- [7] J. L. Collins, R.K. Shaltens, et al, "Experience and Assessment of the DOE/NASA/20366-2, NAS TM-82721, April 1982.
- [8] R. R. Burley, J.M Savino et al, "Some Techniques for Reducing the Tower Shadows of the DOE/NASA MOD-O Wind Turbine Tower," Report DOE/NASA/20370-79/17, NASA TM-79202, September 1979.
- [9] S.M. Chan, R.L Cresap and D.H Curtice, "Wind Turbine Cluster Model". IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No.7. 1984.
- [10] L.L. Freris, "Wind Energy Conversion Systems". Prentice Hall, London, UK, 1990.
- [11] Engineering Science Data Unit, Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: Strong wind (neutral atmosphere). Data Item 72026, ESDU London, 1972.
- [12] D. Kleinhans, R. Friedrich, "Simulation of intermittent wind _elds: A new approach", in: DEWEK 2006 - Proceedings, Bremen (Germany), 2006.
- [13] J. C. Kaimal, J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Cote, "Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 98, 1972.
- [14] IEC, Wind turbines. Part 1: Design requirements, International Electrotechnical Commission, 2005, IEC/61400-1, 3rd Edition.
- [15] Danish standard for loads and safety of wind turbines construction, first edition may 1992, Danish Standard DS 472.
- [16] A. G. Davenport, "The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds". Quarterly Journal of Meteorology Society 87, pgs 194 - 211.
- [17] G. Solari, "Turbulence Modelling for Gust Loading". ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 113, No. 7, July 1987.
- [18] D. Winkelaar, "Fast three-dimensional wind simulation of stochastic blade loads". Paper presented at the 10th ASME Wind Energy Symposium, Houston, 20-24 January 1991.
- [19] Wiebke Lagrander, "Models for Variable Speed Wind Turbines", M.Sc. dissertation, CREST Loughborough University, UK, 1996.
- [20] P. Sørensen, "Frequency Domain Modeling of Wind Turbines Structures. Risø Rep.", Risø-R-749(EN), 1994.
- [21] www.wikipedia.com the free encyclopedia.



شکل 11- شبیه سازی بخش تصادفی در MATLAB/Simulink

6- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی سری زمانی دینامیکی باد و عناصر تشکیل دهنده آن به شکلی ساده پرداختیم. سرعت باد معادل مجموع یک بخش قطعی و یک بخش تصادفی است. بخش قطعی با استفاده از هارمونیک های صفر و سوم برای بررسی مسائل کیفیت توان برای برج های استوانه ای تخمین خوبی ارائه می دهد. اندازه گیری های توان خروجی از یک توربین بادی سه پره متقارن نشان می دهد که هارمونیک های دیگر توسط دینامیک های توربین بادی فیلتر می شوند. در حقیقت توربین بادی مثل یک فیلتر پایین گذر عمل می کند. در پایان مدلی برای آن در نرم افزار MATLAB/Simulink ارائه شده است. پیچیدگی مدل ارائه شده به مراتب کمتر از سایر مدل هاست. پیاده سازی این مدل به عنوان تابعی از موقعیت روتور برنامه را قادر می سازد که برای هر نوع توربین بادی اعم از سرعت ثابت یا سرعت متغیر به کار رود. محاسبه سریع و اشغال حافظه کمتر از دیگر مزایای این مدل است که برای شبیه سازی همزمان تعداد زیادی از توربین های بادی مناسب است و ما را قادر به تخمین موثر اثر یک مزرعه بادی بزرگ بر روی کیفیت توان شبکه می سازد.

7- پیوست

1-7 Power Spectral Density(PSD)

چگالی طیفی توان یک موج (هنگامی که در یک ضریب صحیح ضرب شود) توان حمل شده توسط موج نسبت به فرکانس نشان می دهد. به عبارت دیگر PSD یک سیگنال یا سری زمانی نحوه توزیع توان را نسبت به فرکانس نشان می دهد و بر حسب وات بر هرتز (Watts/Hz) مشخص می شود. توان می تواند توان فیزیکی