

بررسی و تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد در استان اصفهان جهت نصب توربین باد

محمد ابوالحسنی مقدم^۱، مجید رضائی^۲، احمد صداقت^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، m.abolhasanimoghadam@me.iut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، majid-rezaei@me.iut.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، sedaghat@cc.iut.ac.ir

چکیده

در ایران ظرفیت تولید ۱۰ هزار مگاوات برق از نیروگاه‌های بادی پیش‌بینی شده است که در حال حاضر نیروگاه بادی منجیل با ظرفیت ۷۰ مگاوات و نیروگاه بادی بینالود با ظرفیت ۲۸ مگاوات برق تولید می‌کند [۲]. طبق گزارش سازمان جهانی انرژی باد [۳]، ایران با ۲۳/۳٪ رشد در رده سی و پنجم تولید برق بادی جهان در سال ۲۰۰۸ قرار داشته است.

در جدول ۱ ظرفیت تولید توان الکتریکی از انرژی باد چند کشور از جمله ایران نشان داده شده است [۳].

جدول ۱: ظرفیت تولید توان الکتریکی از انرژی باد چند کشور

	Nation	2005	2006	2007	2008	2009
1	United States	9,149	11,603	16,819	25,170	35,159
2	Germany	18,428	20,622	22,247	23,903	25,777
3	China	1,266	2,599	5,912	12,210	22,500
4	Spain	10,028	11,630	15,145	16,740	18,263
5	India	4,430	6,270	7,850	9,587	11,587
6	Italy	1,718	2,123	2,726	3,537	4,850
7	France	779	1,589	2,477	3,426	4,410
8	United Kingdom	1,353	1,963	2,389	3,288	4,070
9	Denmark	3,132	3,140	3,129	3,164	
10	Portugal	1,022	1,716	2,130	2,862	
11	Canada	683	1,460	1,846	2,369	3,249
35	Iran	32	47	67	82	

در اروپا قرار است در سال ۲۰۱۰ توان تولیدی از انرژی باد را به ۷۵۰۰۰ مگاوات و تا سال ۲۰۲۰ به ۱۸۰۰۰۰ مگاوات برساند [۴].

یکی دیگر از مزایای استفاده از انرژی باد مبارزه با پدیده گازهای گلخانه‌ای است که باعث گرم شدن زمین می‌شود. یکی از عوامل مهم در تولید گازهای گلخانه‌ای استفاده از سوخت‌های فسیلی است که عامل تولید گاز CO₂ می‌باشد. به عنوان مثال بر طبق گزارشات IEA سوخت‌های فسیلی ۱۰۲۴*۳۱۵/۱ TWh توان تولید می‌کند که حاصل آن تولید ۹۸۱ میلیون تن، CO₂ می‌باشد هر یک TWh توان تولید شده از انرژی باد ۷۵ میلیون تن از CO₂ را کم کرد. در شکل ۲ کاهش انتشار CO₂ با استفاده از انرژی باد در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۹ نشان داده شده است و برای سال ۲۰۱۰ الگوی ۹۹۲ مگاوات تخمین زده شده است [۵].

در این پژوهش بر روی داده‌های بادی ایستگاه ورزنه استان اصفهان تحلیل آماری صورت گرفته است تا پتانسیل نصب توربین باد در منطقه مذکور مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. به منظور برآورد اولیه انرژی باد در این ایستگاه محاسبات لازم بر روی اطلاعات آماری اندازه‌گیری شده توسط سازمان انرژی‌های نو ایران انجام شده است که داده‌های بادی برای یک دوره یکساله بوده است. بکمک سرعت باد، در ارتفاعات ۴۰، ۳۰ و ۱۰ متری که در ماه‌های مختلف سال اندازه‌گیری شده است، میانگین سرعت باد، انحراف استاندارد سرعت باد، چگالی توان و انرژی باد بر اساس تقسیم‌بندی ماهیانه، تخمین پتانسیل انرژی باد توسط تابع توزیع احتمال ویبول برای دوره یکساله مورد بررسی قرار گرفته است و چگالی توان باد بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی

انرژی باد، ایستگاه ورزنه، توربین باد، توزیع ویبول، چگالی توان.

مقدمه

در سال ۲۰۰۸ توان تولیدی از انرژی باد ۱۲۱۱۸۸ مگاوات بوده که ۵۵٪ آن را اروپا تولید کرده است. توان تولیدی از انرژی باد از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ بیش از ۴ برابر رشد کرد که ۸۱٪ آن را اروپا و آمریکا تولید می‌کردند. در سال ۲۰۰۴، ۵ کشور ۷۱٪ از توان کل تولید شده از انرژی باد در جهان را تولید می‌کردند که در سال ۲۰۰۶ این میزان به ۶۲٪ رسید و این در آن زمان به معنای ورود کشورهای جدید به این صنعت و توسعه تولید توان از انرژی باد بود ولی این مقدار در سال ۲۰۰۸ به ۷۳٪ رسید و کشورهای نظیر آمریکا، آلمان، اسپانیا، چین و هند در آن سهم بودند.

در میان این کشورها توسعه و پیشرفت چین در تولید توان از انرژی باد قابل توجه است.

این مقدار در سال ۲۰۰۹ رشد خوبی داشت که نسبت به سال ۲۰۰۸، ۱/۸۴ برابر و نسبت به سال ۲۰۰۷، ۳/۸ برابر افزایش داشت. این نشان دهنده اهمیت توسعه بهره‌برداری از توان انرژی باد در کشورهای توسعه یافته می‌باشد و می‌توان آن را یکی از نمادهای توسعه یافتگی دانست.

ایران، به عنوان اولین تمدن حدود ۹۰۰ سال قبل از میلاد از انرژی باد برای پمپ آب و خرد کردن دانه استفاده کرده است [۱].

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

برای تعیین c و k از روابط تجربی زیر استفاده می‌شود [۱،۷]:

الف) رابطه تجربی **Justus**

با داشتن انحراف معیار و سرعت متوسط می‌توان ضرایب k و c را مطابق فرمول زیر بدست آورد.

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^{-1.086} \quad (4)$$

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (5)$$

در رابطه اخیر Γ ، تابع گاما می‌باشد.

ب) رابطه تجربی **Lysen**

در روش فوق ابتدا ضریب k از معادله (۴) بدست آمده و سپس به کمک معادله زیر مقدار c بدست می‌آید.

$$\frac{c}{\bar{U}} = \left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (6)$$

در رابطه اخیر σ_U ، انحراف معیار استاندارد و \bar{U} ، سرعت متوسط داده‌ها است.

(۲) چگالی توان

چگالی توان باد (توان باد بر واحد سطح) به دانسیته هوا (در شرایط استاندارد سطح دریا $\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3}$) و توان سوم سرعت باد بستگی دارد. توان باد علاوه بر این به مساحت جاروب شده توسط روتور توربین باد (قطر روتور) وابسته است. چگالی توان متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_c^\infty U^3 p(U) dU \quad (7)$$

همچنین چگالی انرژی باد در یک بازه زمانی داده شده عبارتست از:

$$\frac{\bar{E}}{A} = \left(\frac{\bar{P}}{A}\right)(N\Delta t) \quad (8)$$

نسبت $K_e = \frac{U^3}{(\bar{U})^3}$ بعنوان ضریب الگوی انرژی تعریف شده که برابر

توان کل در دسترس باد به توانی که از مکعب کردن سرعت متوسط حاصل می‌شود، است.

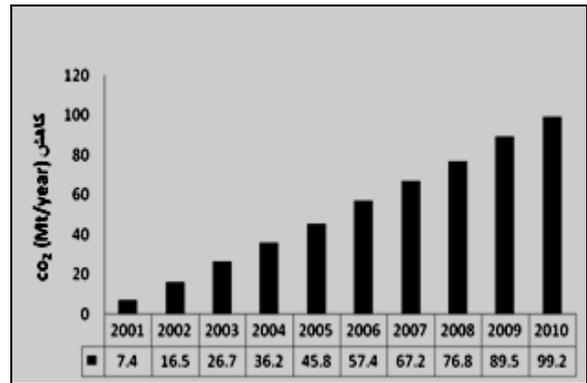
برای تخمین توان کلی که از نصب یک توربین باد می‌توان در یک سایت بدست آورد، \bar{P}_w با داشتن تابع توزیع چگالی احتمال سرعت باد، $p(U)$ ، و

نمودار توان توربین، $P_w(U)$ ، داریم:

$$\bar{P}_w = \int_0^\infty P_w(U) p(U) dU \quad (9)$$

انتگرال فوق با استفاده از روش‌های عددی قابل محاسبه است. از روش ذوزنقه در حل انتگرال فوق داریم [۶]:

$$\bar{P}_w = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{2} (U_{i+1} - U_i) \times (p(U_{i+1})P_w(U_{i+1}) + p(U_i)P_w(U_i)) \quad (10)$$



شکل ۱: کاهش سالانه انتشار گاز CO₂ با استفاده از انرژی باد

ایستگاه مورد مطالعه

شهر ورزنه در ۱۱۰ کیلومتری جنوب شرقی اصفهان واقع شده و نزدیک‌ترین شهر و ساده‌ترین راه دسترسی به تالاب گاوخونی به شمار می‌آید. این شهر با جمعیتی در حدود ۱۰۰۰ نفر مرکز بخش بن رود از توابع شهرستان اصفهان است که دارای مساحتی در حدود ۲۳۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. از لحاظ جغرافیایی ورزنه در جنوب غربی شهرستان نایین، غرب تالاب گاوخونی و خط مرزی استان یزد، شمال بخش جرقویه و شرق بخش جلگه به مرکزیت هرنه در عرض ۳۲ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی قرار دارند و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۴۷۷ متر می‌باشد مردان این شهر بیشتر به کشاورزی و زنان به کار قالی بافی مشغول هستند. از اطلاعات سرعت و جهت باد این شهرستان از تاریخ می ۲۰۰۷ تا آوریل ۲۰۰۸ در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه برای هر داده برداری، استفاده شده است.

تحلیل آماری داده‌های بادی

۱) توزیع ویبول^۱

برای تعیین پتانسیل انرژی باد در یک سایت مورد نظر و تخمین انرژی خروجی از این سایت از روش‌های آماری استفاده می‌شود. اگر سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده در یک ارتفاع خاص موجود باشد می‌توان تابع توزیع چگالی احتمال سرعت را بصورت زیر نوشت [۱]:

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU \quad (1)$$

که در آن \bar{U} نمایانگر سرعت باد می‌باشد. یکی از این توابع که صحت آن با اندازه‌گیری در نقاط مختلف جهان ثابت شده است، تابع توزیع چگالی احتمال ویبول است که نیازمند دو پارامتر k (ضریب شکل) و c (ضریب مقیاس) است و به فرم زیر می‌باشد:

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

همچنین تابع توزیع انباشتگی^۲ که برای تخمین زمانی که سرعت باد در یک بازه خاص قرار می‌گیرد به صورت زیر است [۱،۶]:

^۱ Weibull distribution
^۲ cumulative distribution function

ج) شدت آشفتنگی

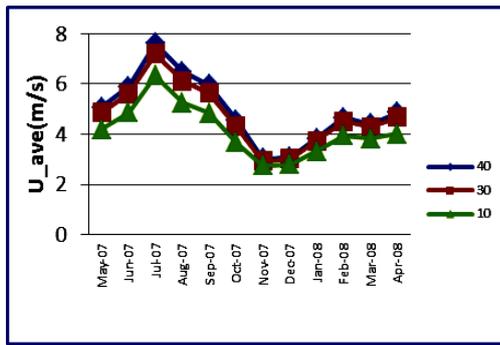
آشفتنگی در باد به دلیل هدر رفتن انرژی جنبشی باد و تبدیل آن به انرژی گرمایی بر اثر تشکیل و نابودی گردابه‌های کوچک، رخ می‌دهد. آشفتنگی باد ممکن است در زمان طولانی ثابت باشد اما در بازه‌های زمانی کوچک بسیار متغیر است. معمولاً آشفتنگی جریان بدلیل زبری سطح (درختان، ساختمانها و ...) و ارتفاع بالای سطح بوجود می‌آید [۶]. وجود آشفتنگی در جریان باد نه تنها از توان آن می‌کاهد، بلکه باعث ایجاد پدیده خستگی در توربین باد می‌شود [۶]. یکی از معیارهای اندازه گیری آشفتنگی، شدت آشفتنگی است که بصورت انحراف معیار استاندارد سرعت باد به سرعت متوسط تعریف می‌شود:

$$TI = \frac{\sigma_U}{U} \quad (11)$$

در رابطه اخیر انحراف معیار استاندارد و سرعت متوسط روی یک بازه زمانی معمولاً ۱۰ دقیقه محاسبه می‌شوند [۱].

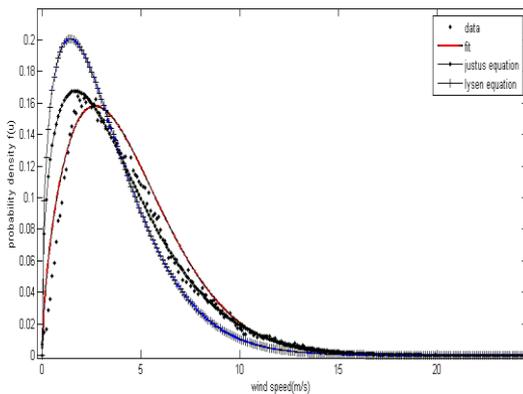
نتایج

نمودارهای چگالی انرژی، توان متوسط، توزیع سرعت ماهیانه در ارتفاع های ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۴۰ متری در شکل های ۲ تا ۴ رسم شده است. همانطور که از تمام این سه نمودار برداشت می شود دیده می شود که در ارتفاع ۴۰ متری مقدارهای سرعت متوسط، توان متوسط، چگالی انرژی متوسط نسبت به ارتفاع های دیگر و در یک ارتفاع همین مقادیر مربوط به ماه جولای ۲۰۰۷ نسبت به ماههای دیگر بالاتر است و در ارتفاع ۳۰ متری نیز نتایجی مناسب و نزدیک به ارتفاع ۴۰ متری ثبت شده است.

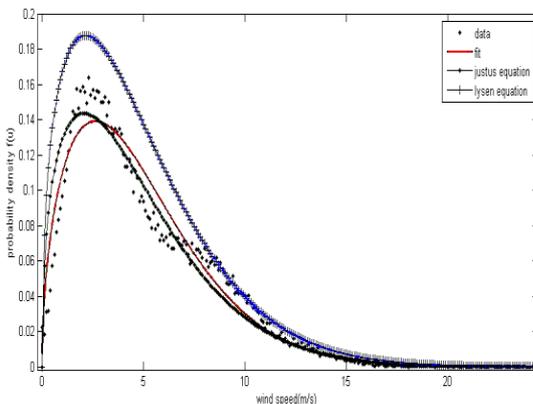


شکل ۴: سرعت متوسط باد ماهیانه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری

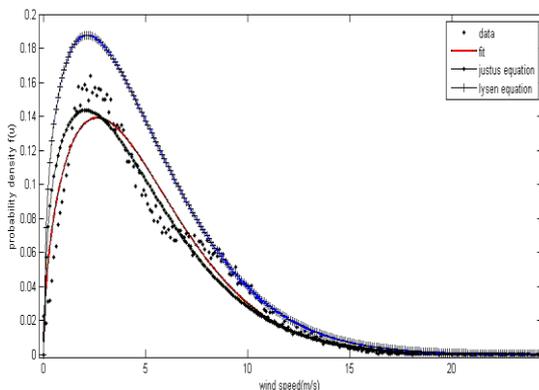
حال نمودار ویبول را برای ارتفاع‌های مختلف بر اساس روش فیت کردن روی داده‌ها رسم می‌کنیم.



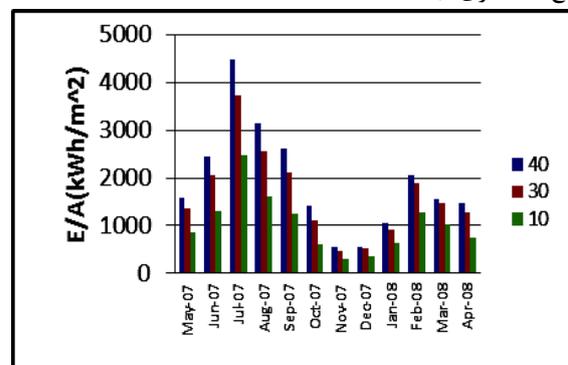
شکل ۵: نمودار ویبول سایت ورزنه در ارتفاع ۱۰ متری



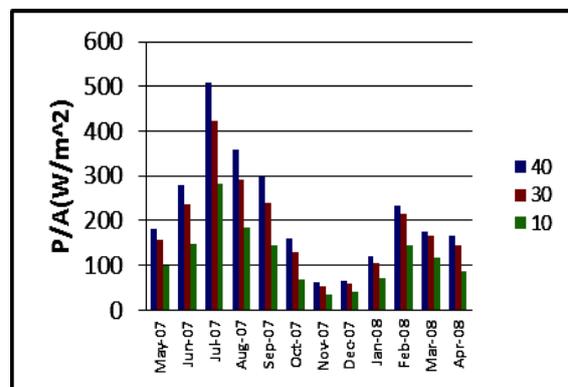
شکل ۶: نمودار ویبول سایت ورزنه در ارتفاع ۳۰ متری



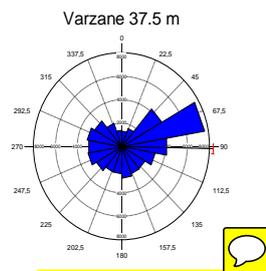
شکل ۷: نمودار ویبول سایت ورزنه در ارتفاع ۴۰ متری



شکل ۲: چگالی انرژی باد ماهیانه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری



شکل ۳: توان متوسط باد ماهیانه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری



شکل ۱۱: گلباد در ارتفاع ۳۷/۵ متر

نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل آماری داده‌های بادی ایستگاه ورزنه که در استان اصفهان قرار گرفته، پرداخته شده است. داده‌های بادی این ایستگاه از پایگاه اینترنتی سازمان انرژی‌های نو ایران اخذ شده است. داده‌های بادی مربوط به فواصل زمانی ۱۰ دقیقه در سه ارتفاع ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۴۰ متری از سطح زمین ثبت شده بود، به صورت آماری و مستقیم تحلیل شد. این ایستگاه دارای میانگین سرعت ۴/۹۶ متر بر ثانیه در ارتفاع ۴۰ متر، ۴/۷۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۳۰ متر و ۴/۱۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متر می‌باشد. از طرف دیگر این ایستگاه دارای میانگین توان ۲۱۷/۹۳ وات بر متر مربع در ارتفاع ۴۰ متر، ۱۸۵/۱۷ وات بر متر مربع در ارتفاع ۳۰ متر و ۱۱۸/۷۴ وات بر متر مربع در ارتفاع ۱۰ متر می‌باشد. همچنین گلباد بیشترین جهت وزش باد بررسی گردیده است. در ایستگاه ورزنه بیشترین فرکانس وزش باد در جهتی بین غرب اتفاقی افتاده است که می‌توان بیان کرد که تقریباً در طول سال جهت غالب باد ثابت می‌باشد. این موضوع در امر چیدمانی توربین‌ها مهم است، زیرا که ثابت بودن جهت باد مزیت عمده‌ای برای نیروگاه می‌باشد. با توجه به موارد گفته شده ایستگاه ورزنه برای نصب توربین باد مناسب است.

در انتها باید اذعان داشت که کار حاضر تنها یک مطالعه اولیه، به منظور تخمین پتانسیل انرژی باد در شهر مذکور می‌باشد. برای کارهای جدی‌تر باید داده‌های اندازه‌گیری شده برای چند سال را بررسی نمود. علاوه بر آن دانستن شرایط محیطی از قبیل نوع زمین، ارتفاع منطقه می‌تواند در روند تصمیم‌گیری برای محل قرارگیری سایت توربین باد مؤثر باشد.

مراجع

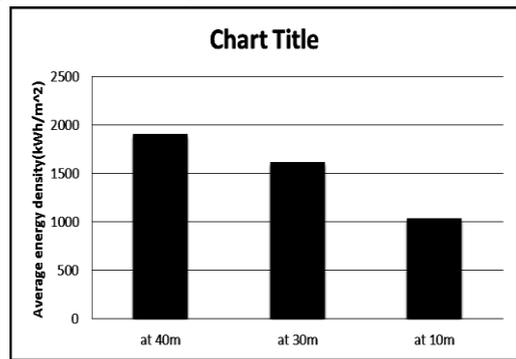
- [1] James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. Rogers, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, p.11, 2002.
- [۲] سازمان انرژی‌های نو ایران <http://www.suna.org.ir/>
- [3] World Wind Energy Association (WWEA), www.wwindea.org/
- [4] The European Wind Energy Association (www.ewea.org)
- [5] www.eia.doe.gov
- [6] Tuny Burton, David sharp, Nick Jenkins and Rvin Bossany, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, 2001.
- [7] Anastasios Balouktsis, Dimitrios Chassapis and Thodoris D. Karapantsios, "A nomogram method for estimating the energy produced by wind turbine generators", Solar Energy, Vol. 72, No.3, pp. 251-259, 2002.

شکل ۸ نمودار ارزیابی توان متوسط باد سالیانه را در ارتفاع‌های ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۴۰ متری نشان می‌دهد. معیار ارزیابی توان متوسط باد برای نصب توربین بادی در توان متوسط باد کمتر از ۱۰۰ ضعیف، ۱۰۰-۷۰۰ خوب و بیشتر از ۷۰۰ عالی ارزیابی می‌شود. همانطور که دیده می‌شود ارتفاع‌های ۳۰ متری و ۴۰ متری از نظر ارزیابی مناسب‌تر هستند که این تاییدی بر نتایج گرفته شده از شکل‌های قبل می‌باشد.



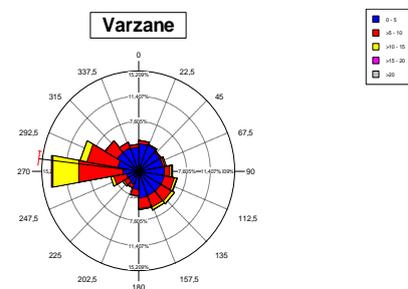
شکل ۸: ارزیابی توان متوسط باد سالیانه

شکل ۹ مقدار انرژی سالیانه را برای ارتفاع‌های مختلف به ما می‌دهد.



شکل ۹: انرژی سالیانه

شکل ۱۰ و ۱۱ نمودار گلباد این سایت را نشان می‌دهند. همانطور که از نمودار گلباد سرعت و جهت در ارتفاع ۳۰ متری دیده می‌شود که جهت باد غالب در جهت غرب مطابق شکل می‌باشد. نمودار گلباد جهتی در ارتفاع ۳۷/۵ جهت باد غالب را در جهت شرق است.



شکل ۱۰: گلباد در ارتفاع ۳۰ متر