

فاصله بهینه بین توربین‌های بادی در یک نیروگاه برق بادی

مجید جمیل، کمال عباسپور ثانی و اسماعیل خراسانی

چکیده: در این مقاله مراحل شش‌گانه مطالعات فنی آرایش توربین‌ها در یک نیروگاه برق بادی ارائه شده است. به نحوه آرایش توربین‌های یک سایت نمونه نیروگاه برق بادی در اتریش و نیروگاه برق بادی منجیل اشاره و ضمن ارائه روش تجربی برای تعیین حداقل فاصله بین توربین‌ها بر روی شبیه‌سازی کامپیوتری سایت نیروگاه قبل از سرمایه‌گذاری تأکید شده است.

واژه‌های کلیدی: توربین‌های بادی، آرایش بهینه، نیروگاه برق بادی

۱. مقدمه

تولید برق از نیروی باد توسط توربین‌های بادی را اصطلاحاً نیروگاه برق بادی می‌نامیم. این نیروگاه‌ها معمولاً در ظرفیتهای چند صد کیلو وات طراحی و ساخته می‌شوند و به سه گروه نیروگاه‌های بادی کوچک، متوسط و بزرگ مگا واتی تقسیم‌بندی می‌شوند (جدول ۱). چون ظرفیت این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های متداول سوخت فسیلی (نفت کوره، گاز و ذغال سنگ) پایین است در عمل تعدادی از این توربین‌ها بصورت یک نیروگاه برق بادی بکار گرفته می‌شوند که معمولاً شبکه سراسری برق را تغذیه می‌نمایند. بعنوان مثال از تعداد ۲۷ توربین بادی نیروگاه‌های برق بادی منجیل و رودبار واقع در استان گیلان که در سال ۱۳۷۵ از شرکت دانمارکی نورد تانک (Nordtank) به ظرفیت کل ۱۰/۱ مگاوات و به هزینه ۱۰ میلیون دلار با اعتبارات بانک جهانی خریداری شده است، در وضعیت سال ۱۳۸۰ تعداد ۱۹ توربین به ظرفیت ۳۰۰ کیلو وات و تعداد ۸ توربین به ظرفیت ۵۵۰ کیلو وات می‌باشند قطر توربین‌های اخیر (۵۵۰ کیلو وات) ۴۱ متر است که در ارتفاع دماغه ۴۳ متری از سطح زمین نصب شده‌اند. قطر روتور توربین‌های سیصد کیلو واتی ۳۱ متر است که در ارتفاع ۳۱ متری از سطح زمین در منطقه منجیل نصب شده‌اند [1,2]. تعداد توربین‌های این نیروگاه اخیراً افزایش یافته و زیر نظر وزارت نیرو- سانا (سازمان انرژی‌های نو ایران) فعالیت می‌نماید. نحوه چیدن و نصب توربین‌های بادی با توجه به محدود بودن زمین و مورفولوژی منطقه به محاسبات دقیقی

نیاز دارد که تداخل جریان باد بین توربین‌ها به صورت بهینه انجام گیرد و برق تولیدی حداکثر شود و در ضمن آلودگی صوتی در منطقه ایجاد نشود. بررسی فنی - علمی این کار و مسائل مرتبط با مکان یابی نیروگاه برق بادی با توجه به شرایط موجود، موضوع پژوهش این مقاله می‌باشد. در اینجا بیان دو نکته با توجه به روند توسعه این نیروگاه‌ها طی بیست و پنج سال گذشته حائز اهمیت است:

الف - ظرفیت میانگین توربین‌های نصب شده تدریجاً افزایش داده شده است. بطوریکه طی ۲۵ سال گذشته (۲۰۰۵-۱۹۸۰) از نیروگاه‌های بادی کوچک و متوسط به سمت نیروگاه‌های بادی بزرگ و مگاواتی گرایش نشان می‌دهد. در آلمان به عنوان یک کشور پیشرو در زمینه کاربرد این نیروگاه‌ها ظرفیت میانگین توربین‌های نصب شده طی ۲۳ سال گذشته در مورد تعداد ۱۲۲۵۷ توربین در دست بهره برداری ۵۸ / ۸۰۲ کیلو وات بوده است [3]. چنانکه از جدول ۲ معلوم می‌شود بیشترین تعداد توربین‌های بکار گرفته شده از نوع نیروگاه‌های نوع متوسط ۳۱۰ تا ۷۵۰ کیلوواتی (۲ / ۴۵ درصد) می‌باشد [3]. واضح است که هر اندازه ظرفیت توربین‌ها بالا باشد تعداد کمتری از آنها مجموعه یک مجتمع نیروگاهی را با یک ظرفیت کل ثابت تشکیل خواهند داد. مثلاً تعداد ۷ توربین ۱/۵ مگاواتی جمعاً ۱۰/۵ مگاوات ظرفیت دارد و همین ظرفیت را می‌توان با ۳ توربین ۳/۵ مگاواتی نیز پوشش داد. در نتیجه چنانکه مکان نصب نیروگاه قبلاً مشخص شده باشد می‌توان در یک سطح محدود و مشخص تعداد کمتری از توربین‌های بادی با ظرفیت بالا را جای داد بطوریکه فواصل آنها به اندازه کافی از هم زیاد و تداخل جریان باد بین آنها به حداقل برسد. اخیراً در دانمارک و آلمان توربین‌های چند مگاواتی که قطر پره آنها بیش از یک صد متر است، ساخته می‌شوند. تولید توربین‌های بادی مدل E-112 در مرداد ماه ۱۳۸۱ از طرف شرکت انرکون^۲ به ظرفیت

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۷/۱۴ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۴/۱/۲۷ به تصویب نهایی رسیده است.

مجید جمیل، عضو هیات علمی پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی،
m_limaj@yahoo.com

کمال عباسپور، عضو هیات علمی پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی،
k-abspour@merc.ac.ir

اسماعیل خراسانی، دانشجوی دوره دکترای دانشکده مهندسی مکانیک، ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران،
khorasani_e@yahoo.com

² Enercon

جدول ۲- درصد ظرفیت توربین‌های بادی استفاده شده در مجتمع نیروگاه‌های بادی آلمان [۳]

نوع	درصد	تعداد	ظرفیت نیروگاه بادی
نیروگاه‌های بادی کوچک	۶/۱	۷۴۶	۵ تا ۸۰ کیلو وات
نیروگاه‌های بادی متوسط	۵/۱	۶۲۰	۸۰ تا ۱۳۰ کیلووات
“	۷/۰	۸۵۸	۱۳۰ تا ۳۱۰ کیلووات
“	۴۵/۲	۵۵۴۵	۳۱۰ تا ۷۵۰ کیلووات
نیروگاه‌های بادی بزرگ	۱۴/۸	۱۸۲۰	۷۵۰ تا ۱۵۰۰ کیلووات
“	۲۱/۸	۲۶۶۸	۱۵۰۰ تا ۳۱۰۰ کیلووات
“	۰	۰	بیشتر از ۳۱۰۰ کیلووات
	۱۰۰٪	۱۲۲۵۷	جمع

که از مجموعه‌ای از توربین‌های بادی تشکیل شده و اصطلاحاً نیروگاه برق بادی^۱ گفته می‌شود.

با بهره‌برداری از تعداد بیشتری از توربین‌های بادی جریان برق تولیدی رویهم انباشته شده و ظرفیت‌های بالایی در حد چند مگاوات ایجاد می‌شود.

بدین طریق می‌توان برق تولیدی را از نظر اقتصادی با نیروگاه‌های متداول قابل رقابت و عملکرد نیروگاه و هزینه‌های نگهداری آن را به صرفه و بهینه نمود.

تعداد توربین‌های بادی که یک مجتمع نیروگاهی را تشکیل می‌دهند در عمل متفاوت است و در جمع آوری جریان برق از توربین‌های بادی، مسائل متعددی از جمله کیفیت برق علاوه بر کمیت آن برای مهندسی برق که با این موضوعات سروکار دارند اهمیت دارد.

برق تولیدی می‌بایست با کیفیت قابل قبول وارد شبکه شود و در دراز مدت بازدهی خوبی داشته باشد.

از دیگر مسائل، فاصله بهینه بین توربین‌های نصب شده و نحوه آرایش آنها می‌باشد تا از زمین و باد موجود منطقه حداکثر استفاده شده و در حوالی نیروگاه آلودگی صوتی ایجاد نشود.

توربین‌های بادی با توجه به مورفولوژی (فرم یا شکل مکانی) منطقه با فواصل مشخص نزد یکدیگر و در شکل متقارن و مناسب (منظره متناسب با طبیعت) طوری نصب می‌شوند که در اغلب اوقات در جهت وزش باد غالب منطقه باشند و بیشترین انرژی را از باد بگیرند و نیاز چندانی هم به چرخش مکرر دماغه توربین نباشد.

- سرعت میانگین باد منطقه (در صورت امکان میان مدت و یا درازمدت)

- تعیین مشخصه‌های باد منطقه

○ پارامترهای ویبول k و c منطقه (Weibull parameters)

○ مشخص نمودن تابع احتمال باد منطقه $p(v)$

○ تعیین پتانسیل انرژی باد منطقه بر حسب وات بر متر مربع (W/m^2)

○ محتمل ترین سرعت باد منطقه (V_{mp})

○ سرعتی که حداکثر توان را در توربین ایجاد می‌کند (V_{mec}) .

۵. تعیین ظرفیت مورد نیاز و نهایی نیروگاه بادی و تعداد توربین‌های لازم و خریداری آنها

۶. شبیه سازی کامپیوتری سایت نیروگاه بادی با استفاده از اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده فوق نرم‌افزارهای تجاری در این زمینه از طرف شرکت‌های دانمارکی و آلمانی نظیر Wind Pro و WAsP فراهم شده است که اطلاعات لازم را می‌توان از سایت‌های اینترنتی www.emd.dk و www.risoe.dk کسب نمود.

۳. نحوه آرایش توربین‌های بادی

برای تولید برق به مقدار زیاد که بتواند شبکه سراسری برق را تغذیه کند نیاز به ایجاد مزرعه یا پارک توربین‌های بادی^۱ است

² Wind Power Plants (WPP) or Wind Power Systems

¹ Wind Farms or Wind Parks

مثلاً این فاصله در مورد مزرعه بادی تاورن در اتریش (Tauern Windpark – Oberzeiring) ^۱ برابر ۲/۸ قطر روتور انتخاب شده است.

یعنی به فاصله ۱۷۳/۶ متر. باید گفت که قطر و تور هر کدام از توربین‌های مجتمع ۶۲ متر است و ارتفاع دماغه توربین‌ها از سطح زمین برابر ۴۹ متر می‌باشد.

هر کدام از این توربین‌ها در شرایط باد منطقه سالانه حدود ۳ میلیون کیلووات ساعت برق تولید می‌نماید [7].

نقشه این نیروگاه بادی در شکل ۳ نشان داده شده است.

در مورد نیروگاه برق بادی منجیل که تعداد ۲۱ توربین بادی از شرکت نورد تانک دانمارکی به تدریج طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۸ در کنار سد سفید رود خریداری و نصب شده‌اند.

تعداد یک توربین ۵۰۰ کیلوواتی، پنج توربین ۵۵۰ کیلوواتی، و پانزده توربین ۳۰۰ کیلوواتی طبق شکل ۴ توربین‌ها در سه ردیف و به فاصله حداقل ۱۸۰ متر و در هر ردیف به فاصله حداقل ۱۲۵ متر از یکدیگر نصب شده‌اند [2].

یادآوری می‌شود که محاسبات فنی و مهندسی مسئله بیش از حد انتظار پیچیده و مستلزم حل معادلات ناویه استوکس در دینامیک شاره‌ها می‌باشد.

در سایت اینترنتی شرکت نرم افزار EMD دانمارک (www.emd.dk) نرم افزارهای ویژه‌ای در ارتباط با حل مسائل مربوطه برای فروش عرضه شده است.

۴. خلاصه مطالب و نتیجه گیری

در بحث آرایش توربین‌های نیروگاه برق بادی ضمن انجام مطالعات ششگانه مندرج در مقاله نیاز به مشخص نمودن تعداد دقیق توربین‌های نیروگاه برق بادی و مشخصات فنی آنها می‌باشد.

محاسبات فنی از نظر ریاضی مستلزم حل معادلات ناویه استوکس در دینامیک شاره‌ها است که بعلا پیچیده بودن جریان‌های گردبادی و شرایط مسئله و نیز تأثیر آن در کارایی توربین‌ها مدل‌های محاسباتی مختلفی در سال‌های اخیر از طرف پژوهشگران ارائه و استفاده از نرم افزارهای Wind Pro و WASP در این زمینه اغلب توصیه شده است.

در مواردی که بیش از یک ردیف توربین نصب می‌شود معلوم است که جریان باد بعد از عبور از یک توربین به توربین دیگری می‌وزد و مقدار انرژی آن اندکی کاهش یافته و سرعت وزش باد کم می‌شود (شکل ۱).

چنانکه از نظر زمین موجود و در دسترس محدودیتی وجود دارد بهتر است از توربین‌هایی با ظرفیت بالا استفاده نموده و فواصل آنها را به حد محاسبه شده و معقولی از یکدیگر انتخاب نماییم.

همچنانکه در شکل ۱ نشان داده شده است جریان باد بعد از عبور از توربین‌های ردیف اول به توربین‌های ردیف دوم و سوم و ... برخورد می‌کند که هر بار نیز با نقصان انرژی و کاهش تراکم بین مولکول‌های هوای در حال حرکت توأم می‌باشد.

مسلم است که توربین‌های ردیف‌های دوم و سوم و ... با اندکی کاهش در برق تولیدی مواجه هستند.

همین طور واضح است که مقدار کاهش در سرعت باد در یک مزرعه بادی همواره تابعی از مورفولوژی زمین، اغتشاش باد بین توربین‌ها و خود سرعت باد و جهت آن می‌باشد.

طبق یک برآورد تجربی این کاهش در حد ۵ تا ۱۰ درصد در حوالی ۱۰ برابر قطر روتور توربین بادی گزارش شده است [5].

مسلماً ایجاد فاصله بیشتر از ۱۰ برابر قطر روتور این اغتشاش را کاهش داده و برق تولیدی را افزایش می‌دهد ولی البته می‌بایست سرمایه‌گذاری زیادی در تهیه زمین و ایجاد راه‌های ارتباطی بیشتری برای دسترسی به توربین‌ها بشود.

مضافاً اینکه کابل کشی برای انتقال برق هم هزینه‌های قابل توجهی دارد.

در اینجا به محاسبات عملی که جانسون [5] ارائه نموده اشاره می‌شود.

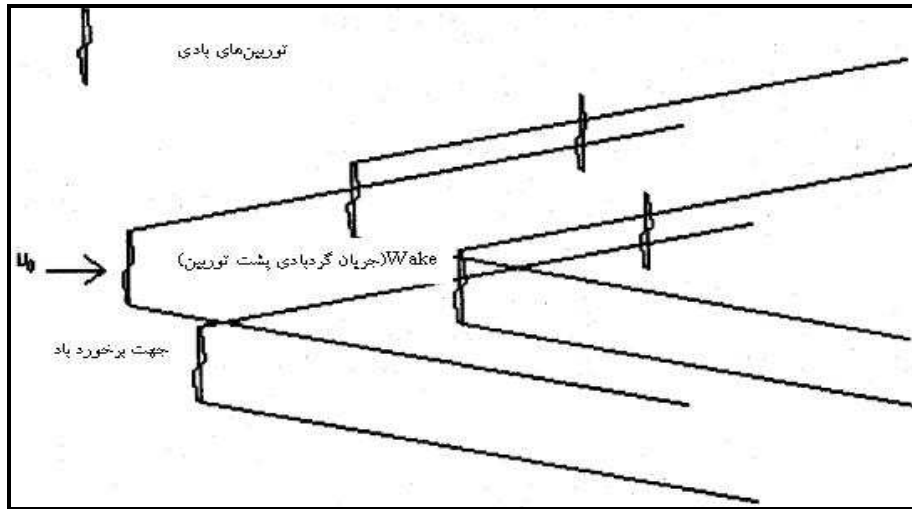
لازم به توضیح است که مسئله تا بحال فقط از نظر تئوری و مدل‌های ریاضی بسیار ساده مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نهایتاً می‌توان با نرم‌افزارهای کامپیوتری بطور نسبی به فواصل بهینه در هر مورد خاص دست یافت (با تجارب عملی و آزمایش‌های میدانی).

در اغلب این نظریه‌ها جهت باد و مقدار سرعت آن برای توربین‌های بادی یکسان (ساخت یک کارخانه و از یک نوع و مدل خاص با مشخصه‌های کاملاً ثابت کلیه مؤلفه‌های دستگاه توربین بادی) ثابت فرض می‌شود.

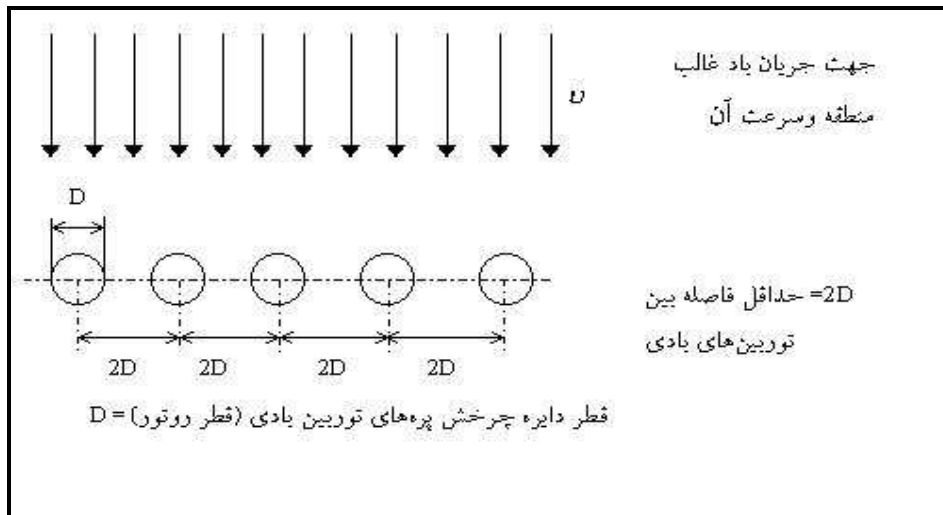
اگر فرض کنیم در یک حالت ایده‌آل باد همواره از یک جهت مشخص (جهت باد غالب منطقه مطابق شکل ۲) و با سرعت معلومی بر یک مجموعه توربین‌های یکسان که در یک ردیف نصب شده‌اند بوزد.

آنگاه فاصله ۲ تا ۴ برابر قطر روتور توربین در بین توربین‌های مجاور، کفایت می‌کند تا تداخل و اغتشاش به حداقل برسد [5,6].

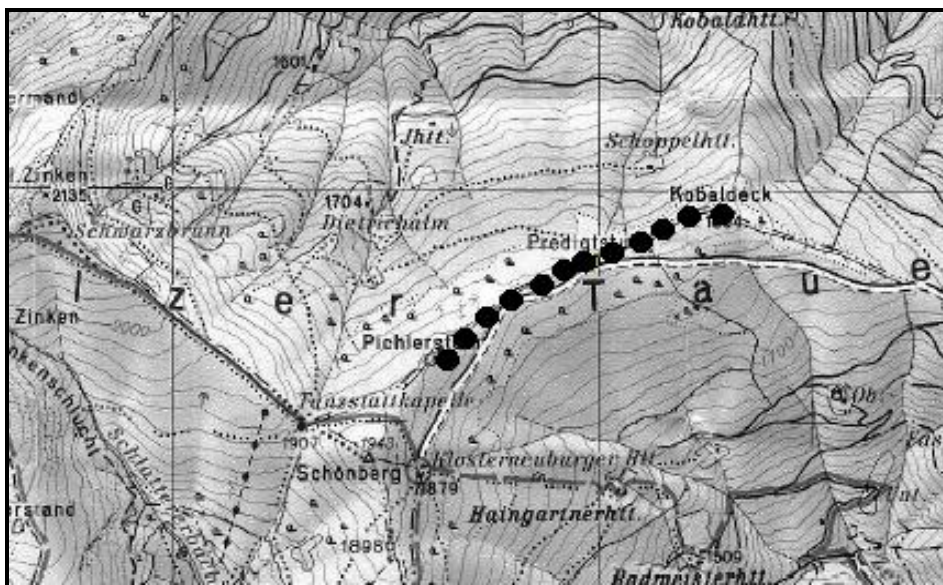
^۱ - این مزرعه بادی در سال ۲۰۰۱ به ظرفیت کل ۱۵/۶ مگاوات متشکل از ۱۲ توربین یکسان هر کدام به ظرفیت ۱/۳ مگاوات و با هزینه کل ۲۰ میلیون یورو از شرکت دانمارکی بونوس (BONUS) خریداری و احداث گردیده است.



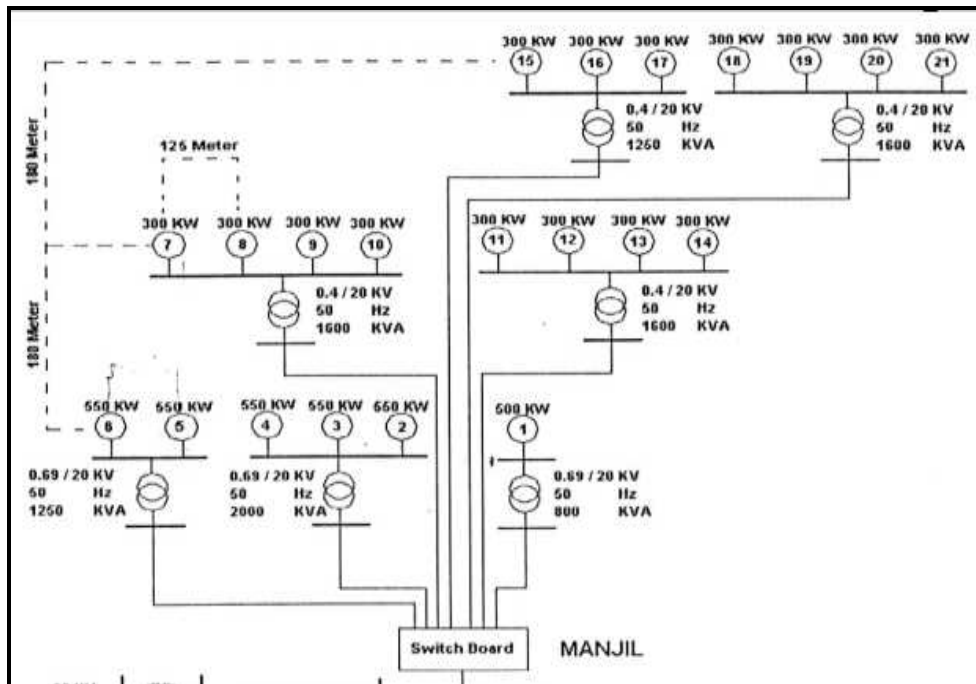
شکل ۱. جریان باد در یک مزرعه بادی (نیروگاه برق بادی)



شکل ۲. نمودار آرایش توربین‌های بادی در یک سایت نیروگاه برق بادی



شکل ۳. نمای سایت نیروگاه برق بادی تاورن [7].



شکل ۴. آرایش توربین‌های نیروگاه برق بادی منجیل [2].

مراجع

[4] Hinsch, Christian. *Through the 10000 MW Dream Mark*, New Energy, No. 4, p.15, August 2002,.

[5] Johnson, Gary L., *Wind Energy Systems*, 2nd Edition, 1994, p.357.

[6] Beyer, Hans G., et al. *A Procedure for the Choice of Geometric Configuration of a Wind Farm*, Dewi – Magazin, Feb. 1995, No 6, pp. 55 – 61.

[7] Energiewerkstatt GmbH, Austria, Friedburg 29. 06. 2001, Contract N°XVII/4.1030/A/98-296.

[1] Windkraft Journal 10 MW fuer den Iran- Nordtank Report, Sept – Oct . 1996, No. 5, p.2.

[2] Kazemi Karegar, H., et al, *Wind and Solar Energy Developments in Iran*, AUPEC 2002, Melbourne, Australia. Department of Electrical & Computer Systems Engineering, PO Box 35, Monash University, Victoria 3800, Australia.

[3] Ender, C., *Wind Energy Use in Germany*, Dewi – Magazin, August 2002, No 21, p.10, Stand: June 30, 2002.