

## انتخاب مدل آماری مناسب برای سرعت باد ایستگاه‌های تبریز و ارومیه

میثم محمدپور، حسین بیورانی، رضا عربی بلاغی

گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰ تاریخ پذیرش و انتشار: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰

**چکیده:** توزیع‌های احتمالی سرعت باد یکی از خصوصیات اصلی باد برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد در یک منطقه مشخص هستند. در این مقاله، توزیع لگ-لجستیک سه پارامتری معرفی شده و با شش مدل آماری مورد استفاده برای مدل‌سازی داده‌های سرعت باد واقعی گزارش شده در ایستگاه‌های تبریز و ارومیه مقایسه شده است. پارامترهای مدل با روش ماکسیمم درستنمایی و با استفاده از الگوریتم نیلدر-مید برآورد شده است. میزان برازش به توزیع‌های پیشنهادی بر اساس ضریب تعیین، آزمون خی-دو، آزمون کولموگوروف اسمیرنوف و معیار ریشه میانگین توان دوم خطا اندازه‌گیری می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که توزیع لگ-لجستیک سه پارامتری بهترین برازش را برای مدل‌بندی داده‌های سرعت باد سالانه و فصلی در ایستگاه ارومیه و به جز فصل تابستان برای ایستگاه تبریز فراهم می‌کند. همچنین شاخص خطای چگالی توان باد برای توزیع‌های مختلف محاسبه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** سرعت باد، توزیع تجربی، روش ماکسیمم درستنمایی، آزمون‌های نیکویی برازش، خطای چگالی توان باد.

## ۱ مقدمه

انرژی یکی از عوامل اصلی برای تحولات پایدار کشورها است. امروزه استفاده از انرژی با توجه به رشد جمعیت جهانی و پیشرفت‌های تکنولوژی روز به روز در حال افزایش است. در سال‌های اخیر، اکثر کشورها سوخت‌های فسیلی را تقریباً در همه زمینه‌های مختلف زندگی مانند صنعت، حمل و نقل و گرمایش به

کار می‌برند که همین موضوع سبب شده است تا ذخایر سوخت‌های فسیلی به شدت کاهش یابد. از این رو، سوخت‌های فسیلی از لحاظ پایداری ترجیح داده نمی‌شوند زیرا دارای منابع محدودی هستند. علاوه بر این، به دست آوردن و استفاده از سوخت‌های فسیلی گران است و پیش‌بینی می‌شود که هزینه‌ها در آینده به دلیل منابع محدود آنها افزایش یابد. همچنین این سوخت‌ها معایبی از دیدگاه زیست محیطی ایجاد می‌کنند. برای مثال باعث آلودگی هوا، انتشار کربن و تغییرات آب و هوایی در دراز مدت می‌شوند (آنگول و همکاران، ۲۰۱۶). این معایب نشان می‌دهند که کشورها باید به دنبال منابع انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر<sup>۱</sup> مانند انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی زمین گرمایی، انرژی هیدروژن و غیره باشند که از نظر زیست محیطی و اقتصادی سازگار هستند. این انرژی‌ها برخلاف سوخت‌های فسیلی، ریسک افزایش در هزینه‌ها را از بین می‌برند، آنها انتشارات کربن را کاهش می‌دهند و همچنین بیشتر آنها نامحدود هستند. در این مقاله، از میان منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف سازگار با محیط زیست، انرژی باد مورد توجه قرار گرفته است. انرژی باد یک منبع طبیعی ارزان و نامحدود است و در مقایسه با سوخت‌های فسیلی برای محیط زیست زیان آور نیست. علاوه بر این، استفاده از انرژی باد نیازی به فناوری پیچیده ندارد. در حقیقت، توسعه و سرمایه‌گذاری بر روی انرژی باد مزیت‌های از لحاظ فعالیت‌های اقتصادی، فرصت‌های شغلی، استقلال انرژی در بخش تولید برق، حمل و نقل آسان و مطالعات و تحقیقات ایجاد خواهد کرد. اخیراً، تحولات و تحقیقات سریع در زمینه تکنولوژی توربین‌های بادی باعث افزایش قابل توجه تولید برق بادی در سراسر جهان شده است. با این حال، انرژی باد به عنوان یک منبع اصلی از انرژی‌های تجدیدپذیر در حدود ۱۰۳ کشور در جهان مورد استفاده است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

به طور کلی دو عامل مهم برای به دست آوردن انرژی باد به صورت موثر و اقتصادی وجود دارند. عامل اول انتخاب یک مکان مناسب برای راه اندازی یک مزرعه بادی و عامل دیگر شناسایی ویژگی‌های سرعت باد با استفاده از توزیع‌های آماری است. انتخاب توزیع مناسب سرعت باد یک مرحله ضروری برای محاسبه پتانسیل انرژی باد است، زیرا تولید انرژی باد به شدت وابسته به ظرفیت و ویژگی‌های نیروی باد است. در مطالعات انرژی باد، متداولترین تابع چگالی احتمال برای مدل‌سازی داده‌های سرعت باد، توزیع وایبل دو پارامتری است. پارامترهای توزیع وایبل با روش‌هایی مانند گشتاوری، ماکسیمم درستنمایی و کمترین توان‌های دوم برآورد می‌شوند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۶).

علاوه بر توزیع وایبل، توزیع‌های جایگزین دیگری برای تحلیل داده‌های سرعت باد به کار گرفته شده‌اند. برای مثال، آکداق و همکاران (۲۰۱۰) توزیع‌های وایبل و وایبل ترکیبی دو مولفه‌ای<sup>۲</sup> را برای مدل‌بندی

<sup>1</sup>Renewable energy

<sup>2</sup>Two-component mixture Weibull distribution

داده‌های سرعت باد در ۹ مکان مختلف در نظر گرفتند. آنها نتیجه گرفتند که توزیع وایبل ترکیبی دو مولفه‌ای برای اهداف مدل‌سازی مناسب‌تر است و کمترین خطاهای نسبی را در شناسایی چگالی توان باد فراهم میکند. **عاشوری و همکاران (۱۳۹۴)** توزیع تعمیم‌یافته مقدار کرانگین ماکسیمال برای مدل‌سازی کرانگین سرعت باد شهر زاهدان را بکار برده و پارامترهای آن را برآورد کردند. **لی و همکاران (۲۰۱۲)** توزیع گامیل را به عنوان جایگزین توزیع وایبل برای مدل‌سازی سرعت‌های باد شدید پیشنهاد کردند و نشان دادند این توزیع عملکرد بهتری نسبت به توزیع وایبل دارد. **ارسلان و همکاران (۲۰۱۷)** توزیع‌های لیندلی توانی<sup>۱</sup> و لیندلی تعمیم یافته<sup>۲</sup> را برای ارزیابی داده‌های سرعت باد در ۴ مکان مختلف در ترکیه مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که این دو توزیع می‌توانند یک جایگزین مناسب نسبت به توزیع وایبل برای مدل‌بندی داده‌های سرعت باد با توجه به معیارهای آماری مانند ریشه میانگین توان دوم خطا، (RMSE) ضریب تعیین ( $R^2$ )، لگاریتم درست‌نمایی ( $\ln L$ )، ملاک اطلاعات آکائیکه<sup>۳</sup> (AIC) و خی-دو ( $\chi^2$ ) باشند. **اواردا و همکاران (۲۰۱۵)** سیزده مدل را برای توصیف مجموعه داده‌های سرعت باد در چند مکان متفاوت در امارات متحده عربی ارزیابی کردند. براساس نتایج نیکویی برازش، آنها متوجه شدند که مکان‌های مختلف، مدل‌های مناسب مختلفی برای تحلیل داده‌های سرعت باد دارند.

یکی از مسائل ارائه شده همراه با انتخاب مدل سرعت باد، روش برآورد پارامتر برای مدل‌های توزیع است. از آنجا که پتانسیل انرژی باد اندازه‌گیری شده به برآورد پارامترهای توزیع‌های انتخابی بستگی دارد، برآورد دقیق پارامترهای توزیعی خیلی مهم است. چند روش برآورد مورد استفاده قرار گرفته و با استفاده از معیارهای مناسب ارزیابی شده‌اند. در ادامه، تعدادی از متداول‌ترین توزیع‌ها که در مطالعات قبلی ارزیابی شده‌اند، برای تحلیل داده‌های سرعت باد در دو مکان در شمال غرب ایران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها شامل توزیع‌های وایبل سه پارامتری، گامای تعمیم یافته<sup>۴</sup> (**اواردا و همکاران ، ۲۰۱۵**)، لگ-لجستیک سه پارامتری (**سینگ و همکاران ، ۱۹۹۳**)، لیندلی توانی (**گیتانی و همکاران ، ۲۰۱۳**)، لیندلی تعمیم یافته (**نادارجا و همکاران ، ۲۰۱۱**)، لگ-نرمال سه پارامتری و مقدار کرانگین تعمیم یافته<sup>۵</sup> (**حسین و همکاران ، ۲۰۱۹**) هستند. به منظور ارزیابی بصری از مجموعه داده‌های سرعت باد از مدل‌های پیشنهادی، آزمون‌های نیکویی برازش مورد استفاده قرار گرفته است.

در ادامه، بخش ۲ توصیف داده‌های سرعت باد دو ایستگاه هواشناسی تبریز و ارومیه را مورد بررسی

<sup>1</sup>Power Lindley distribution

<sup>2</sup>Generalized Lindley distribution

<sup>3</sup>Akaike information criterion

<sup>4</sup>Generalized Gamma distribution

<sup>5</sup>Generalized Extreme Value distribution

۲۲۲ ..... انتخاب مدل آماری مناسب برای سرعت باد

قرار می‌دهد. در بخش ۳ روش مدل‌سازی، ارزیابی آن و تحلیل داده‌ها و نتایج بدست آمده با استفاده از نرم افزار R گزارش شده است. در نهایت، بخش ۴ نظرات و نتایج مطالعه را شامل می‌شود.

## ۲ داده‌های سرعت باد

مجموعه داده‌های سرعت باد (متر بر ثانیه)، برای دوره زمانی دو ساله از ۱۳۹۶/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۷/۱۲/۲۹ در بازه‌های زمانی سه ساعته در ارتفاع ۱۰ متری از دو ایستگاه هواشناسی در تبریز و ارومیه جمع‌آوری شده‌اند. مختصات مکانی طول، عرض و ارتفاع این دو ایستگاه در سیستم کارتزین در جدول ۱ ارائه شده است. در

جدول ۱. مختصات مکانی ایستگاه‌های هواشناسی تبریز و ارومیه

ایستگاه	x	y	z
تبریز	۳۴۷۵۳۶۲۹۰۴۴۷۰	۳۶۲۸۵۰۹۲۸۶۹۶۱	۳۹۱۸۰۰۵/۶۰۰۵۰۶
ارومیه	۳۵۴۷۹۵۰/۰۸۳۹۳۳	۳۵۶۰۰۸۰/۲۵۷۸۴۶	۳۹۱۵۶۳۹/۴۰۹۵۸۶

مجموعه داده‌های سرعت باد، تعداد داده‌های گمشده کم، برای مثال در ایستگاه تبریز ۱۲ مورد و در ایستگاه ارومیه ۲۳ مورد وجود داشت، که میانگین فصلی هر ایستگاه جایگزین آنان گردید و چون تعداد داده‌های گمشده بسیار ناچیز است تاثیر معنی‌داری در تحلیل نهایی نخواهد داشت.

آماره توصیفی مانند ماکسیمم، میانگین، انحراف استاندارد، خطای استاندارد میانگین، چولگی، کشیدگی و چارک‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ برای ایستگاه‌های انتخاب شده، ارائه شده‌اند. همان‌طور که

جدول ۲. نتایج آماره‌های توصیفی برای داده‌های سرعت باد (متر بر ثانیه) برای ایستگاه تبریز.

سال	فصل	تعداد نمونه	ماکسیمم	میانگین	انحراف استاندارد	خطای استاندارد میانگین	چولگی	کشیدگی	چارک اول	میانه	چارک سوم
۱۳۹۶	سالانه	۲۹۲۰	۱۷۰۳	۳۶۰	۲۳۱	۰/۰۴	۱/۲۵	۵/۰۳	۲۰۱	۳۰۰	۴۹۴
	بهار	۷۴۴	۱۵/۱۰	۴۰۳	۲۵۰	۰/۰۹	۱/۱۵	۴/۵۶	۲/۱۱	۳/۰۹	۵/۱۱
	تابستان	۷۴۴	۱۳/۱۳	۴۵۲	۲۳۲	۰/۰۹	۰/۵۸	۳/۱۱	۲/۹۱	۴/۰۵	۶/۰۴
۱۳۹۷	پاییز	۷۲۰	۱۵/۰۵	۲۸۸	۱۸۶	۰/۰۷	۱/۷۷	۸/۳۷	۱/۸۶	۲/۸۲	۳/۱۴
	زمستان	۷۱۲	۱۷/۰۳	۲۹۲	۲۰۲	۰/۰۸	۲/۰۳	۹/۶۸	۱/۸۶	۲/۲۳	۳/۱۱
	سالانه	۲۹۱۹	۱۸۰۱	۳۵۶	۲۳۷	۰/۰۴	۱/۰۷	۴/۴۱	۱/۹۹	۲/۹۹	۴/۹۵
۱۳۹۷	بهار	۷۴۴	۱۸۰۱	۳۹۰	۲۴۷	۰/۰۹	۱/۳۴	۵/۷۱	۲/۰۶	۳/۰۸	۵/۰۰
	تابستان	۷۴۴	۱۲/۱۲	۴۷۴	۲۴۲	۰/۰۹	۰/۵۰	۲/۸۶	۲/۸۶	۴/۲۲	۶/۱۳
	پاییز	۷۲۰	۱۱/۸۹	۲۸۵	۲۱۰	۰/۰۸	۱/۲۱	۴/۶۷	۱/۸۹	۲/۱۳	۳/۸۷
زمستان	۷۱۱	۱۱/۹۵	۲۶۷	۱۷۹	۰/۰۷	۱/۳۳	۵/۹۳	۱/۹۱	۲/۱۲	۳/۰۸	

جدول ۳. نتایج آماره‌های توصیفی برای داده‌های سرعت باد (متر بر ثانیه) برای ایستگاه ارومیه.

سال	فصل	تعداد نمونه	ماکسیمم	میانگین	انحراف استاندارد	خطای استاندارد میانگین	چولگی	کشیدگی	چارک اول	میان	چارک سوم
۱۳۹۶	سالانه	۲۹۲۰	۱۲۸۰	۲۷۹	۱،۴۴	۰،۰۳	۱،۶۴	۸،۶۴	۱،۸۸	۲،۸۸	۳،۱۰
	بهار	۷۴۴	۱،۰۰۶	۳۲۴	۱،۶۱	۰،۰۶	۱،۶۱	۵،۶۰	۲،۰۳	۲،۸۸	۳،۹۷
	تابستان	۷۴۴	۱۲،۰۷	۲،۷۶	۱،۱۳	۰،۰۴	۱،۱۳	۱۲،۱۹	۲،۰۱	۲،۹۲	۳،۰۷
	پاییز	۷۲۰	۱،۰۰۱	۲،۶۸	۱،۳۰	۰،۰۵	۱،۳۰	۹،۵۸	۱،۹۶	۲،۵۳	۳،۰۶
۱۳۹۷	زمستان	۷۱۲	۱۲،۸۰	۲،۴۸	۱،۵۶	۰،۰۶	۱،۵۶	۱۰،۱۷	۱،۸۸	۲،۰۸	۳،۰۶
	سالانه	۲۹۲۰	۱۵،۱۲	۲،۸۱	۱،۵۰	۰،۰۳	۱،۵۰	۱۱،۳۲	۱،۸۸	۲،۸۷	۳،۱۱
	بهار	۷۴۴	۱۴،۹۵	۳،۰۸	۱،۷۲	۰،۰۶	۱،۷۲	۱۱،۵۲	۲،۰۱	۲،۹۲	۳،۸۱
	تابستان	۷۴۴	۱۵،۱۲	۳،۰۶	۱،۳۴	۰،۰۵	۱،۳۴	۱۴،۳۶	۲،۰۵	۲،۹۷	۳،۸۶
۱۳۹۷	پاییز	۷۲۰	۱۱،۱۱	۲،۵۱	۱،۴۶	۰،۰۵	۱،۴۶	۸،۱۸	۱،۹۱	۲،۱۰	۳،۰۳
	زمستان	۷۱۲	۱۱،۱۴	۲،۵۷	۱،۳۷	۰،۰۵	۱،۳۷	۹،۹۵	۱،۹۲	۲،۱۰	۳،۰۵

ملاحظه می‌شود ماکسیمم مقدار سرعت باد در تبریز برای هر دو سال بالاتر از ارومیه است. همچنین مقدار متوسط سرعت باد سالانه برای تبریز در سال‌های در نظر گرفته شده بیشتر از ارومیه است. مقدار متوسط سرعت باد برای ایستگاه تبریز در فصل تابستان و برای ایستگاه ارومیه در فصل بهار بیشتر از فصل‌های دیگر است. فصل تابستان کمترین چولگی و کشیدگی را نسبت به دیگر فصل‌ها در هر سال برای ایستگاه تبریز دارد. برای داشتن یک درک بهتر در مورد پراکندگی مجموعه داده‌های سرعت باد، انحراف معیار از داده‌ها می‌تواند به کار برده شود. در جزئیات واضح است که در هر دو سال، فصل بهار بالاترین پراکندگی را در میان همه فصل‌ها برای هر دو ایستگاه دارد. از این رو، خطای استاندارد میانگین در بهار نسبت به فصل‌های دیگر در هر سال بالاتر است.

### ۳ مدل‌سازی و ارزیابی آن

در این بخش، بین توزیع‌های مختلف آماری، هفت تابع توزیع احتمال که شامل توزیع‌های وایبل سه پارامتری، گامای تعمیم یافته، لگ-لجستیک سه پارامتری، لیندلی توانی، لیندلی تعمیم یافته، لگ-نرمال سه پارامتری و مقدار کرانگین تعمیم یافته هستند برای برازش و ارزیابی انتخاب شده‌اند. برای برآورد پارامترهای مدل از روش ماکسیمم درستنمایی استفاده شده که معادلات درستنمایی بدست آمده به روش تحلیلی قابل حل نبود و لذا از روش عددی مرسوم نیلدر-مید<sup>۱</sup> (کوجا و همکاران، ۲۰۱۹) استفاده شد. جداول ۴ الی ۷ پارامترهای برآورد شده را به همراه  $p$  - مقدارها (اعداد داخل پارانتر) برای توزیع‌های در نظر گرفته شده با استفاده از روش ماکسیمم درستنمایی برای دو ایستگاه تبریز و ارومیه نشان می‌دهند.

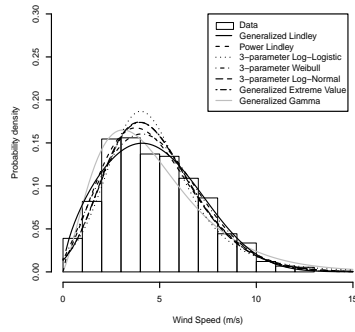
<sup>1</sup>Nelder-Mead

برای ارزیابی عملکرد توابع چگالی احتمال مختلف، ملاک‌های گوناگون یا آزمون‌های نیکویی برازش به کار گرفته می‌شوند. در اینجا علاوه بر ملاک‌های ریشه میانگین توان دوم خطا، ضریب تعیین و آزمون‌های کولموگوروف اسمیرنوف و خی-دو از ملاک خطای چگالی توان باد<sup>۱</sup> (WPDE) نیز استفاده می‌شود (کاتر و همکاران، ۲۰۱۸).

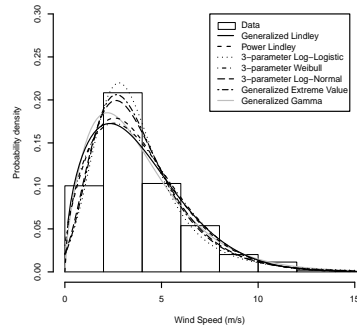
جدول ۴. برآورد پارامترها و نتایج ملاکهای نیکویی برازش برای داده‌های سرعت باد تبریز در سال ۱۳۹۶

$\chi^2$	RMSE	$R^2$	KS	$\hat{\theta}$ (p-value)	$\hat{\beta}$ (p-value)	$\hat{\alpha}$ (p-value)	مدل توزیع
۴۰۶۸۳	۰/۰۵۷	۰/۹۶۱	۰/۱۶۰	-	۱/۴۸۷ (< ۰/۰۰۱)	۰/۵۶۴ (< ۰/۰۰۱)	GL
۳۱۹۹۵	۰/۰۵۴	۰/۹۶۵	۰/۱۳۸	-	۱/۲۶۰ (< ۰/۰۰۱)	۰/۳۲۷ (< ۰/۰۰۱)	PL
۲۰۵۴۰	۰/۰۴۵	۰/۹۷۶	۰/۱۰۲	-۱/۳۶۵ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۰۱ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۵۳ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۲۹/۲۷۰	۰/۰۵۶	۰/۹۶۳	۰/۱۴۱	-۰/۱۳۵ (< ۰/۰۰۱)	۴/۱۸۲ (< ۰/۰۰۱)	۱/۶۷۸ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup> سالیانه
۲۳/۱۹۸	۰/۰۴۸۲	۰/۹۷۲	۰/۱۱۶	-۱/۹۳۹ (< ۰/۰۰۱)	۱/۶۳۳ (< ۰/۰۰۱)	۰/۳۹۷ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۳۶/۳۹۷	۰/۰۵۸	۰/۹۶۰	۰/۱۵۵	۱/۱۱۶ (< ۰/۰۰۱)	۰/۶۲۹ (< ۰/۰۰۱)	۱/۴۱۸ (< ۰/۰۰۱)	GG
۲۲/۲۱۶	۰/۰۴۷	۰/۹۷۴	۰/۱۱۱	۲/۵۴۲ (< ۰/۰۰۱)	۱/۶۸۰ (< ۰/۰۰۱)	۰/۰۵۰ (< ۰/۰۰۱)	GEV
۸۵۲۷	۰/۰۴۸	۰/۹۷۳	۰/۱۲۹	-	۱/۵۹۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۵۲۷ (< ۰/۰۰۱)	GL
۶/۲۵۷	۰/۰۴۷	۰/۹۷۴	۰/۱۱۵	-	۱/۲۸۸ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۷۷ (< ۰/۰۰۱)	PL
۴/۰۹۲	۰/۰۴۱	۰/۹۸۰	۰/۱۰۹	-۱/۴۰۳ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۹۲ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۵۵ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۵/۹۳۲	۰/۰۴۹	۰/۹۷۱	۰/۱۱۷	-۰/۱۳۶ (۰/۰۲۹)	۴/۶۷۵ (< ۰/۰۰۱)	۱/۷۳۱ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup> بهار
۴۵۷	۰/۰۴۲	۰/۹۷۸	۰/۱۱۴	-۲/۱۰۰ (< ۰/۰۰۱)	۱/۷۳۵ (< ۰/۰۰۱)	۰/۳۹۳ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۷۵۲۴	۰/۰۵۰	۰/۹۷۰	۰/۱۲۸	۱/۰۶۹ (< ۰/۰۰۱)	۰/۶۰۸ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۲۱ (< ۰/۰۰۱)	GG
۴/۳۶۷	۰/۰۴۱۶	۰/۹۷۹	۰/۱۱۳	۲/۸۷۵ (< ۰/۰۰۱)	۱/۸۴۵ (< ۰/۰۰۱)	۰/۰۴۵ (۰/۰۹۷)	GEV
۲۵/۹۵۴	۰/۰۴۰	۰/۹۸۱	۰/۰۹۲	-	۱/۹۹۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۵۲۰۴ (< ۰/۰۰۱)	GL
۶/۲۶۲	۰/۰۳۱	۰/۹۸۹	۰/۰۷۰	-	۱/۴۸۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۸۰ (< ۰/۰۰۱)	PL
۳/۷۰۰	۰/۰۳۷	۰/۹۸۳	۰/۰۸۷	-۳/۳۲۶ (۰/۰۰۲)	۲/۰۲۰ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۷۳ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۳/۱۱۱	۰/۰۳۲	۰/۹۸۸	۰/۰۷۵	-۰/۳۶۵ (۰/۰۰۵)	۵/۵۲۱ (< ۰/۰۰۱)	۲/۲۲۲ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup> تابستان
۳/۲۰۲	۰/۰۳۳	۰/۹۸۷	۰/۰۸۰	-۴/۷۵۴ (< ۰/۰۰۱)	۲/۱۹۷ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۴۹ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۶/۲۳۳	۰/۰۳۲	۰/۹۸۸	۰/۰۹۳	۱/۲۸۷ (< ۰/۰۰۱)	۰/۴۷۸ (< ۰/۰۰۱)	۱/۶۹۱ (< ۰/۰۰۱)	GG
۳/۲۴۴	۰/۰۳۳	۰/۹۸۶	۰/۰۸۱	۳/۵۲۶ (< ۰/۰۰۱)	۲/۰۰۵ (< ۰/۰۰۱)	-۰/۰۹۱۸ (< ۰/۰۰۱)	GEV
۱۶/۲۷۱	۰/۰۸۲	۰/۹۱۸	۰/۲۱۴	-	۱/۵۲۱ (< ۰/۰۰۱)	۰/۶۹۵ (< ۰/۰۰۱)	GL
۱۲/۵۲۳	۰/۰۷۴	۰/۹۲۴	۰/۱۸۵	-	۱/۲۹۱ (< ۰/۰۰۱)	۰/۴۰۷ (< ۰/۰۰۱)	PL
۷/۷۰۰	۰/۰۵۸	۰/۹۶۰	۰/۱۳۸	-۱/۸۴۱ (< ۰/۰۰۱)	۱/۴۸۳ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۹۵ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۱۱/۲۰۶۲	۰/۰۷۶	۰/۹۳۰	۰/۱۸۹	-۰/۱۲۰ (۰/۰۱۳)	۳/۳۵۱ (< ۰/۰۰۱)	۱/۶۷۰ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup> پاییز
۸/۹۹۰	۰/۰۶۶	۰/۹۴۸	۰/۱۶۲	-۱/۸۵۰ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۱۰ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۵۵ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۱۴/۱۲۱	۰/۰۸۰	۰/۹۲۳	۰/۲۰۴	۱/۰۸۱ (< ۰/۰۰۱)	۰/۶۴۱ (< ۰/۰۰۱)	۱/۱۸۰ (< ۰/۰۰۱)	GG
۹/۰۰۱	۰/۰۶۵	۰/۹۵۰	۰/۱۶۰	۲/۰۶۷ (۰/۰۲۱)	۱/۳۵۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۰۲۷ (< ۰/۰۰۱)	GEV
۱۶/۹۷۳	۰/۰۸۸	۰/۹۰۶	۰/۲۱۹	-	۱/۴۲۶ (< ۰/۰۰۱)	۰/۶۶۶ (< ۰/۰۰۱)	GL
۱۴/۱۰۷	۰/۰۸۳	۰/۹۱۷	۰/۱۹۷	-	۱/۲۳۳ (< ۰/۰۰۱)	۰/۴۲۷ (< ۰/۰۰۱)	PL
۹/۱۹۱	۰/۰۶۲	۰/۹۵۳	۰/۱۴۵	-۱/۵۸۱ (< ۰/۰۰۱)	۱/۴۱۹ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۱۲ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۱۳/۳۲۰	۰/۰۸۵	۰/۹۱۳	۰/۲۰۲	-۰/۰۸۹ (۰/۰۳۰)	۳/۳۴۷ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۶۲ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup> زمستان
۱۰/۸۳۶	۰/۰۷۳	۰/۹۳۶	۰/۱۷۱	-۱/۶۶۶ (< ۰/۰۰۱)	۱/۴۴۵ (< ۰/۰۰۱)	۰/۳۹۴ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۱۵/۹۶۲	۰/۰۸۸	۰/۹۰۶	۰/۲۱۵	۱/۰۴۳۹ (< ۰/۰۰۱)	۰/۶۷۸ (< ۰/۰۰۱)	۱/۱۸۰ (< ۰/۰۰۱)	GG
۱۰/۷۶۷	۰/۰۷۱	۰/۹۳۹	۰/۱۶۷	۲/۰۴۸ (< ۰/۰۰۱)	۱/۳۷۷ (< ۰/۰۰۱)	۰/۰۵۷ (۰/۰۱۰)	GEV

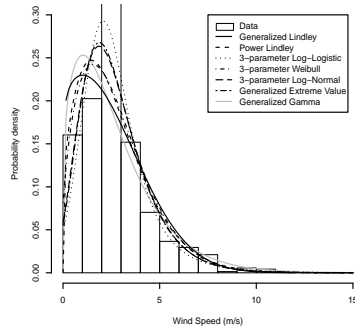
<sup>1</sup>Wind Power density error



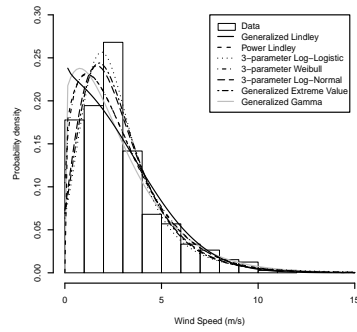
(ب)



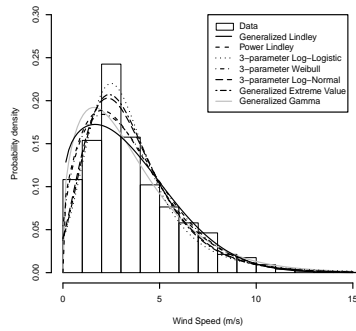
(الف)



(د)

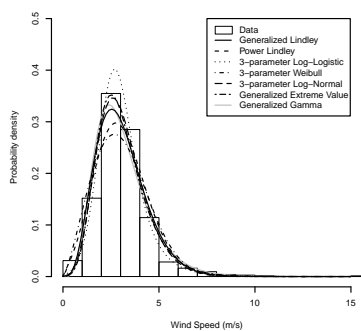


(ج)

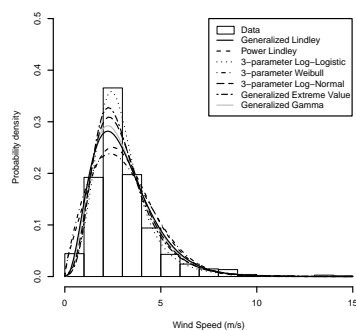


(هـ)

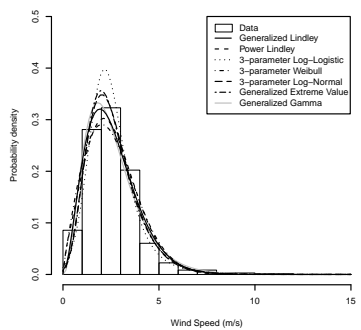
شکل ۱. بافتنگارها و مدل‌های برازش داده شده برای تبریز در سال ۱۳۹۷، الف-بهار، ب-تابستان، ج-پاییز، د-زمستان، ه-سالانه



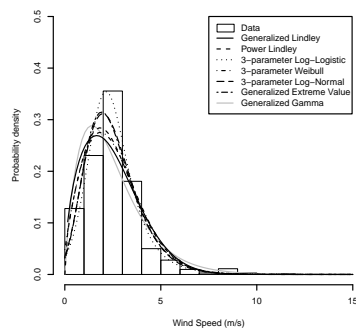
(ب)



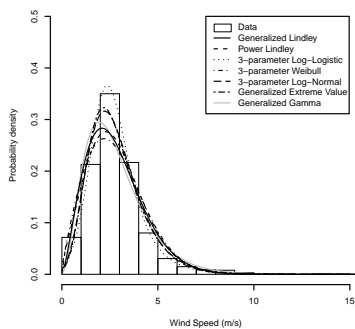
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۲. بافتنگارها و مدل‌های برازش داده شده برای ایستگاه ارومیه در سال ۱۳۹۷، الف-بهار، ب-تابستان، ج-پاییز، د- زمستان، ه-سالانه



جدول ۵. برآورد پارامترها و نتایج ملاکهای نیکویی برازش برای داده‌های سرعت باد تبریز در سال ۱۳۹۷

$\chi^2$	RMSE	$R^2$	KS	$\hat{\theta}$ (p-value)	$\hat{\beta}$ (p-value)	$\hat{\alpha}$ (p-value)	مدل توزیع
۳۳۴۶۷	۰٫۵۴	۰٫۹۶۵	۰٫۱۶۳	-	۱٫۲۱۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۲۰ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۲۸۵۵۳	۰٫۴۵	۰٫۹۷۶	۰٫۱۳۵	-	۱٫۱۷۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۷۱ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۱۶۶۷۶	۰٫۳۹	۰٫۹۸۲	۰٫۰۹۵	-۱٫۶۴۴ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۵۳ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۵۷ (< ۰٫۰۰۱)	LL۳
۲۱۷۹۵	۰٫۴۵	۰٫۹۷۵	۰٫۱۳۱	-۰٫۱۵۲ (< ۰٫۰۰۱)	۴٫۱۲۵ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۹۱ (< ۰٫۰۰۱)	WE۳
۱۷۵۳۹	۰٫۴۰	۰٫۹۸۰	۰٫۱۰۸	-۲٫۱۸۹ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۶۶۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۴۰۲ (< ۰٫۰۰۱)	LN۳
۲۷۲۵۱	۰٫۵۱	۰٫۹۶۸	۰٫۱۵۳	۱٫۳۵۴ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۶۴۱ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۴۶۹ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۱۶۹۰۷	۰٫۴۰	۰٫۹۸۱	۰٫۱۰۳	۲٫۴۵۷ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۷۷۷ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۲۸ (۰٫۰۰۹)	GEV
۱۷۰۶۹	۰٫۴۸	۰٫۹۷۲	۰٫۱۳۵	-	۱٫۵۴۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۳۵ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۷٫۱۸۹	۰٫۴۶	۰٫۹۷۴	۰٫۱۱۸	-	۱٫۲۷۱ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۹۵ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۳۸۱۰	۰٫۳۷	۰٫۹۸۳	۰٫۰۹۳	-۱٫۳۷۳ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۶۱ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۵۵ (< ۰٫۰۰۱)	LL۳
۵۱۰۰	۰٫۴۹	۰٫۹۷۱	۰٫۱۲۳	-۰٫۱۲۲ (۰٫۰۳۲)	۴٫۵۰۷ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۶۹۰ (< ۰٫۰۰۱)	WE۳
۴۳۵۲	۰٫۴۰	۰٫۹۸۰۹	۰٫۰۹۹	-۱٫۸۶۱ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۶۸۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۴۰۱ (< ۰٫۰۰۱)	LN۳
۱۲۵۷۰	۰٫۵۰	۰٫۹۷۰	۰٫۱۳۵	۱٫۰۵۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۶۲۴ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۴۸۱ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۴۱۱۲	۰٫۳۸	۰٫۹۸۲	۰٫۰۹۷	۲٫۷۶۴ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۷۸۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۵۵ (۰٫۰۳۵)	GEV
۱۲۷۶۰	۰٫۳۹	۰٫۹۸۲	۰٫۰۸۸	-	۲٫۰۰۷ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۰۱ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۴۱۶۷	۰٫۳۸	۰٫۹۹۱	۰٫۰۶۱	-	۱٫۴۸۴ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۱۶۷ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۲۸۹۲	۰٫۳۳	۰٫۹۸۷	۰٫۰۸۲	-۴٫۳۱۶ (۰٫۰۰۲)	۲٫۱۷۰ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۱۵۷ (< ۰٫۰۰۱)	LL۳
۲۲۵۱	۰٫۲۸	۰٫۹۹۱	۰٫۰۶۵	-۰٫۴۱۴ (۰٫۰۰۶)	۵٫۸۱۴ (< ۰٫۰۰۱)	۲٫۲۵۵ (< ۰٫۰۰۱)	WE۳
۲۳۸۲	۰٫۳۰	۰٫۹۸۹	۰٫۰۷۳	-۵٫۹۱۸ (< ۰٫۰۰۱)	۲٫۳۴۰ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۲۶ (< ۰٫۰۰۱)	LN۳
۳۸۹۰	۰٫۲۹	۰٫۹۹۰	۰٫۰۷۸	۱٫۳۳۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۴۶۵ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۷۴۹ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۲۴۱۵	۰٫۳۰	۰٫۹۹۰	۰٫۰۷۵	۳٫۷۱۸ (< ۰٫۰۰۱)	۲٫۱۳۰ (< ۰٫۰۰۱)	-۰٫۱۱۷ (< ۰٫۰۰۱)	GEV
۹۰۴۶	۰٫۶۷	۰٫۹۴۵	۰٫۲۰۱	-	۱٫۰۰۹ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۷۶ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۹۴۸۴	۰٫۶۰	۰٫۹۵۷	۰٫۱۷۹	-	۱٫۰۷۵ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۲۶ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۶۱۹۲	۰٫۴۹	۰٫۹۷۱	۰٫۱۳۴	-۱٫۴۶۴ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۳۵۹ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۶۹ (< ۰٫۰۰۱)	LL۳
۸۳۹۵	۰٫۵۹۵	۰٫۹۵۸	۰٫۱۷۷	-۰٫۶۶۰ (۰٫۰۸۸)	۳٫۱۶۷ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۳۶۰ (< ۰٫۰۰۱)	WE۳
۶۴۸۷	۰٫۵۲	۰٫۹۶۷	۰٫۱۵۱	-۱٫۶۱۵ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۳۹۳ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۴۵۶ (< ۰٫۰۰۱)	LN۳
۷۴۴۹	۰٫۶۳	۰٫۹۵۳	۰٫۱۸۴	۱٫۴۶۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۷۰۷ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۲۷۷ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۶۲۳۳	۰٫۵۱	۰٫۹۷۰	۰٫۱۴۳	۱٫۸۶۹ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۱۱ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۶۹ (۰٫۰۲۴)	GEV
۱۵۲۵	۰٫۸۷	۰٫۹۰۹	۰٫۲۳۳	-	۱٫۱۷۷ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۶۵۷ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۱۴۷۴۶	۰٫۷۳	۰٫۹۳۵	۰٫۱۹۹	-	۱٫۱۹۴ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۴۹۱ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۸۰۳۱	۰٫۵۷	۰٫۹۶۱	۰٫۱۴۲	-۲٫۲۹۱ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۴۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۱۸۹ (< ۰٫۰۰۱)	LL۳
۱۰۴۳۳	۰٫۷۱	۰٫۹۳۹	۰٫۱۸۹	-۰٫۱۵۲ (۰٫۰۰۵)	۳٫۱۴۲ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۶۰۱ (< ۰٫۰۰۱)	WE۳
۸۶۱۰	۰٫۶۳	۰٫۹۵۲	۰٫۱۶۵	-۲٫۲۴۶ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۳۲ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۴۷ (< ۰٫۰۰۱)	LN۳
۱۲۲۲۷	۰٫۷۹	۰٫۹۲۴	۰٫۲۱۴	۱٫۳۸۷ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۶۵۹ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۱۸۵ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۸۵۹۴	۰٫۶۲	۰٫۹۵۳	۰٫۱۶۳	۱٫۸۷۹ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۳۷۲ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۰۵ (۰٫۸۳۴)	GEV

#### ۴ بحث و نتیجه‌گیری

جداول ۴ الی ۷ مقادیر آزمون‌های نیکویی برازش را برای توزیع‌های برازش داده شده نشان می‌دهند. توزیع LL۳ یک برازش بهتر نسبت به مدل‌های دیگر برای داده‌های سرعت باد سالانه و فصلی به جز فصل تابستان را برای ایستگاه تبریز فراهم می‌کند، زیرا LL۳ دارای بالاترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر KS، RMSE و  $\chi^2$  است. از طرف دیگر، توزیع LL۳ مناسب‌ترین مدل ارائه شده با توجه به آزمون‌های آماری

جدول ۶. برآورد پارامترها و نتایج ملاکهای نیکویی برازش برای داده‌های سرعت باد ارومیه در سال ۱۳۹۶

$\chi^2$	RMSE	R <sup>2</sup>	KS	$\hat{\theta}$ (p-value)	$\hat{\beta}$ (p-value)	$\hat{\alpha}$ (p-value)	مدل توزیع
۲۸۸۷۵۳۱	۰/۰۸۷	۰/۹۱۰۰	۰/۲۰۶	-	۲۳۵۸ (< ۰/۰۰۱)	۰/۸۵۴ (< ۰/۰۰۱)	GL
۵۹۴۷۴	۰/۰۷۵	۰/۹۳۳	۰/۱۶۸	-	۱۵۸۸ (< ۰/۰۰۱)	۰/۳۰۹ (< ۰/۰۰۱)	PL
۳۰۵۶۶	۰/۰۶۰	۰/۹۵۷	۰/۱۱۵	-۲/۲۴۰ (< ۰/۰۰۱)	۱۵۷۸ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۴۱ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۴۷۸۰	۰/۰۷۹	۰/۹۲۵	۰/۱۷۸	-۰/۱۵۱ (< ۰/۰۰۱)	۳۳۱۴ (< ۰/۰۰۱)	۲/۱۰۱ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۳۶۲۴۲	۰/۰۶۶	۰/۹۴۷	۰/۱۴۴	-۲/۴۳۱ (< ۰/۰۰۱)	۱۶۴۰ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۵۸ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۲۲۷۷۳۲	۰/۰۸۰	۰/۹۲۳	۰/۱۸۸	۰/۹۶۱ (< ۰/۰۰۱)	۰/۵۱۹ (< ۰/۰۰۱)	۱/۱۲۸ (< ۰/۰۰۱)	GG
۳۸۱۱۰	۰/۰۶۷	۰/۹۴۶	۰/۱۴۵	۲/۱۸۶ (< ۰/۰۰۱)	۱/۱۴۸ (< ۰/۰۰۱)	-۰/۰۳۲ (< ۰/۰۰۱)	GEV
۱۸۶۱۸۵۰	۰/۰۶۳	۰/۹۵۱	۰/۱۵۲	-	۳۱۷۰ (< ۰/۰۰۱)	۰/۸۴۱ (< ۰/۰۰۱)	GL
۱۱۳۶۷	۰/۰۶۸	۰/۹۴۴	۰/۱۵۱	-	۱۶۳۶ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۳۵ (< ۰/۰۰۱)	PL
۷۵۳۳	۰/۰۵۳	۰/۹۶۶	۰/۱۰۳	-۱/۰۲۲ (< ۰/۰۰۱)	۱۳۷۸ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۹۵ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۱۱۶۹۴	۰/۰۷۲	۰/۹۳۸	۰/۱۵۸	-۰/۰۹۰ (۰/۰۵۸)	۳۷۶۱ (< ۰/۰۰۱)	۲/۱۵۱ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۸۶۳	۰/۰۵۸	۰/۹۶۰	۰/۱۲۸	-۱/۶۳۷ (< ۰/۰۰۱)	۱۵۳۷ (< ۰/۰۰۱)	۰/۳۰۹ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۱۴۸۵۴۵	۰/۰۶۵	۰/۹۴۹	۰/۱۴۹	۰/۷۴۵ (< ۰/۰۰۱)	۰/۴۹۲ (< ۰/۰۰۱)	۱/۲۳۴ (< ۰/۰۰۱)	GG
۸۵۰۰	۰/۰۵۶	۰/۹۶۲	۰/۱۲۱	۲/۵۳۹ (< ۰/۰۰۱)	۱/۲۱۸۴۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۰۰۴ (۰/۸۵۱)	GEV
۱۱۹۴۹۲۳	۰/۰۸۸	۰/۹۰۶	۰/۱۷۵	-	۴۲۰۶ (< ۰/۰۰۱)	۱/۰۶۲ (< ۰/۰۰۱)	GL
۱۴۹۷۸	۰/۰۷۸	۰/۹۲۷	۰/۱۶۲	-	۱۹۴۷ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۱۸ (< ۰/۰۰۱)	PL
۱۰۰۰۲۹	۰/۰۷۰	۰/۹۴۰	۰/۱۴۴	-۳/۳۰۶ (< ۰/۰۰۱)	۱/۷۸۶ (< ۰/۰۰۱)	۰/۰۹۴ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۱۴۷۵۸	۰/۰۸۴	۰/۹۱۴	۰/۱۶۸	-۰/۱۱۲ (۰/۰۳۴)	۳۲۱۲ (< ۰/۰۰۱)	۲/۵۲۵ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۱۰/۷۱۵	۰/۰۷۲	۰/۹۳۷	۰/۱۴۳	-۳/۲۹۳ (< ۰/۰۰۱)	۱/۷۸۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۷۸ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۶۱/۲۶۰	۰/۰۷۹	۰/۹۲۴	۰/۱۵۳	۰/۷۷۲ (< ۰/۰۰۱)	۰/۴۱۳ (< ۰/۰۰۱)	۱/۰۸۳ (< ۰/۰۰۱)	GG
۱۲۲۲۲	۰/۰۷۵	۰/۹۳۳	۰/۱۴۷	۲/۲۸۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۹۸۴ (< ۰/۰۰۱)	-۰/۰۶۳ (< ۰/۰۰۱)	GEV
۱۱۰۳۲۷۳	۰/۰۹۳	۰/۸۹۵	۰/۲۲۰	-	۲/۷۲۴ (< ۰/۰۰۱)	۰/۹۳۷ (< ۰/۰۰۱)	GL
۶۶۸۷۵	۰/۰۸۱۳	۰/۹۲۱	۰/۱۸۲	-	۱/۶۸۲ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۹۹۰ (< ۰/۰۰۱)	PL
۹/۲۸۰	۰/۰۶۶	۰/۹۴۷	۰/۱۲۷	-۲/۱۶۰ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۴۲ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۳۰ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۱۴۸۲۹	۰/۰۸۶	۰/۹۱۱	۰/۱۹۳	-۰/۱۲۷ (۰/۰۰۸)	۳/۱۵۲ (< ۰/۰۰۱)	۲/۰۰۲ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۱۰/۷۲۳	۰/۰۷۲	۰/۹۳۷	۰/۱۵۷	-۲/۲۹۴ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۷۳ (< ۰/۰۰۱)	۰/۲۴۳ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۳۱۳۰۰۵	۰/۰۸۶	۰/۹۱۲	۰/۲۰۰	۰/۹۰۳ (< ۰/۰۰۱)	۰/۴۹۱ (< ۰/۰۰۱)	۱/۰۷۳ (< ۰/۰۰۱)	GG
۱۱/۴۰۰	۰/۰۷۳	۰/۹۳۵	۰/۱۵۹	۲/۱۳۶ (< ۰/۰۰۱)	۱/۰۴۱ (< ۰/۰۰۱)	-۰/۰۳۷۰ (۰/۰۲۲)	GEV
۲/۳۰۰	۰/۰۸۹	۰/۹۰۴	۰/۲۳۰	-	۱/۴۲۰ (< ۰/۰۰۱)	۰/۷۶۶ (< ۰/۰۰۱)	GL
۱۵۹۲۶	۰/۰۷۳	۰/۹۳۵	۰/۱۹۲	-	۱/۳۱۳ (< ۰/۰۰۱)	۰/۴۷۳ (< ۰/۰۰۱)	PL
۶۳۵۵	۰/۰۵۶	۰/۹۶۲	۰/۱۳۵	-۲/۵۸۰ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۸۲ (< ۰/۰۰۱)	۰/۱۵۲ (< ۰/۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۹/۵۷۶	۰/۰۷۳	۰/۹۳۶	۰/۱۸۶	-۰/۱۵۳ (< ۰/۰۰۲)	۲/۹۴۷ (< ۰/۰۰۱)	۱/۷۴۴ (< ۰/۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۷/۳۷۸	۰/۰۶۳	۰/۹۵۲	۰/۱۶۳	-۲/۲۳۲ (< ۰/۰۰۱)	۱/۵۰۲ (< ۰/۰۰۱)	۰/۳۰۶ (< ۰/۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۱۵/۴۴۱	۰/۰۸۲	۰/۹۱۹	۰/۲۱۲	۱/۲۱ (< ۰/۰۰۱)	۰/۶۳۲ (< ۰/۰۰۱)	۱/۰۶۱ (< ۰/۰۰۱)	GG
۷/۶۸۶	۰/۰۶۳	۰/۹۵۱	۰/۱۶۵	۱/۸۱۱ (< ۰/۰۰۱)	۱/۱۹۲ (< ۰/۰۰۱)	-۰/۰۰۴ (۰/۸۲۱)	GEV

سالانه

بهار

تابستان

پاییز

زمستان

برای داده‌های سرعت باد سالانه و فصلی گزارش شده در ارومیه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، توزیع PL برازش مطلوبی را برای مدل‌بندی داده‌های سرعت باد در فصل تابستان برای ایستگاه تبریز فراهم می‌کند. شکل‌های ۱ و ۲ بافتنگارها و منحنی‌های توابع چگالی برازش داده شده را در سال ۱۳۹۷ برای ایستگاه‌های تبریز و ارومیه نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده، از روی جداول را تایید می‌کنند. جداول ۸ و ۹ نتایج مقادیر WPDE را برای توزیع‌های احتمال سرعت باد نشان می‌دهند. باید اشاره کرد که WPDE یک ملاک ارزیابی مدل است و مقدار آن به روش‌های برآورد پارامترهای به کار

جدول ۷. برآورد پارامترها و نتایج ملاکهای نیکویی برازش برای داده‌های سرعت باد ارومیه در سال ۱۳۹۷

$\chi^2$	RMSE	R <sup>2</sup>	KS	$\hat{\theta}$ (p-value)	$\hat{\beta}$ (p-value)	$\hat{\alpha}$ (p-value)	مدل توزیع
۹۵۲۱۵	۰٫۷۳	۰٫۹۳۵	۰٫۱۷۳	-	۲٫۷۰۷ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۹۰۰۱ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۳۸۳۶۵	۰٫۷۰	۰٫۹۴۰	۰٫۱۵۳	-	۱٫۵۶۵ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۱۳ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۲۶۲۶۲	۰٫۵۶	۰٫۹۶۲	۰٫۱۰۸	-۱٫۷۰۵ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۴۵۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۱۶۳ (< ۰٫۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۴۲۵۳۳	۰٫۷۵	۰٫۹۳۲	۰٫۱۶۷	-۰٫۷۲ (< ۰٫۰۰۱)	۳٫۲۴۳ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۹۸۴ (< ۰٫۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۳۰۱۸۰	۰٫۶۲	۰٫۹۵۴	۰٫۱۳۴	-۱٫۸۳۳ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۴۹۰ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۹۷ (< ۰٫۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۵۶۹۱۶	۰٫۷۱	۰٫۹۴۰	۰٫۱۶۴	۰٫۷۸۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۲۶ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۰۹۶ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۳۰۸۷۴	۰٫۶۲	۰٫۹۵۴	۰٫۱۳۴	۲٫۱۷۱ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۱۳۷ (< ۰٫۰۰۱)	-۰٫۰۰۰۲ (۰٫۸۰۴)	GEV
۸۵۲۸۲۷	۰٫۶۵	۰٫۹۴۸	۰٫۱۴۱	-	۳٫۴۰۲ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۹۰۹ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۱۲۷۹۹	۰٫۷۸	۰٫۹۲۷	۰٫۱۷۱	-	۱٫۵۳۱ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۸۵ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۷۳۴۵	۰٫۵۶	۰٫۹۶۳	۰٫۱۱۴	-۰٫۵۵۸ (۰٫۰۰۲)	۱٫۱۹۳ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۲۲ (< ۰٫۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۱۴۰۳۳	۰٫۸۲	۰٫۹۱۹	۰٫۱۷۴	-۰٫۲۵ (۰٫۲۷۶)	۳٫۵۰۵ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۹۱۵ (< ۰٫۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۸۷۷۲	۰٫۶۲	۰٫۹۵۴	۰٫۱۳۶	-۰٫۸۶۲ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۲۹۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۳۹ (< ۰٫۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۱۲۲۱۱۳	۰٫۶۸	۰٫۹۴۴	۰٫۱۴۸	۰٫۵۲۱ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۲۳ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۱۲۴ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۸۳۵۸	۰٫۵۹	۰٫۹۵۸	۰٫۱۲۵	۲٫۳۴۵ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۱۲۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۷۰ (< ۰٫۰۰۱)	GEV
۳۱۶۳۸۳	۰٫۶۸	۰٫۹۴۳	۰٫۱۳۸	-	۵٫۲۲۲ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۰۴۹ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۱۰۵۴۵	۰٫۷۳	۰٫۹۳۶	۰٫۱۶۰	-	۱٫۸۳۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۰۵ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۷۹۸۹	۰٫۶۱	۰٫۹۵۶	۰٫۱۲۴	-۱٫۴۲۶ (۰٫۰۰۱)	۱٫۴۵۹ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۱۴۷ (< ۰٫۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۱۲۶۸۱	۰٫۷۹	۰٫۹۲۵	۰٫۱۵۷	۰٫۱۱ (۰٫۷۳۳)	۳٫۴۲۲ (< ۰٫۰۰۱)	۲٫۲۹۱ (< ۰٫۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۸۴۹۰	۰٫۶۳	۰٫۹۵۲	۰٫۱۳۳	-۱٫۶۹۰ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۲۳ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۶۰ (< ۰٫۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۵۱۵۱۴	۰٫۶۷	۰٫۹۴۶	۰٫۱۳۷	۰٫۴۲۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۴۲۱ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۱۳۶ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۸۹۶۶	۰٫۶۴	۰٫۹۵۱	۰٫۱۲۸	۲٫۴۹۳ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۰۴۵ (< ۰٫۰۰۱)	-۰٫۰۱۸ (۰٫۲۴۴)	GEV
۱۷۶۶۴	۰٫۸۵	۰٫۹۱۲	۰٫۲۲۰	-	۱٫۷۱۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۸۲۵ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۱۱۵۴۸	۰٫۷۰	۰٫۹۴۲	۰٫۱۷۹	-	۱٫۴۲۲ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۴۲۰ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۶۳۰۰	۰٫۵۶	۰٫۹۶۲	۰٫۱۳۱	-۲٫۸۹۹ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۶۵۶ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۱۳۷ (< ۰٫۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۸۸۱۹	۰٫۷۱	۰٫۹۴۰	۰٫۱۷۸	-۰٫۱۷۰ (۰٫۰۰۲)	۳٫۰۰۸ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۸۹۲ (< ۰٫۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۷۱۲۲	۰٫۶۲	۰٫۹۵۳	۰٫۱۵۸	-۲٫۵۵۴ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۵۸۴ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۲۷۲ (< ۰٫۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۱۲۷۰۵	۰٫۷۷	۰٫۹۲۹	۰٫۱۹۸	۱٫۱۴۸ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۸۰ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۰۶۰ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۷۴۷۸	۰٫۶۳	۰٫۹۵۲	۰٫۱۶۱	۱٫۸۸۳ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۱۶۹ (< ۰٫۰۰۱)	-۰٫۰۲۹۷ (۰٫۱۲۳)	GEV
۱۴۶۳۷	۰٫۷۱	۰٫۹۳۹	۰٫۱۷۲	-	۳٫۰۴۸ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۰۱۹ (< ۰٫۰۰۱)	GL
۸۶۶۲	۰٫۷۰	۰٫۹۴۱	۰٫۱۵۴	-	۱٫۵۹۵ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۴۳ (< ۰٫۰۰۱)	PL
۷۰۵۶	۰٫۶۰	۰٫۹۵۷	۰٫۱۲۱	-۱٫۴۹۵ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۳۵۴ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۱۶۷ (< ۰٫۰۰۱)	LL <sup>۳</sup>
۹۶۱۲	۰٫۷۴	۰٫۹۳۴	۰٫۱۶۷	-۰٫۲۳ (۰٫۴۸۹)	۲٫۹۲۳ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۹۷ (< ۰٫۰۰۱)	WE <sup>۳</sup>
۷۳۹۸	۰٫۶۴	۰٫۹۵۱	۰٫۱۴۳	-۱٫۵۲۲ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۳۶۱ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۳۰۷ (< ۰٫۰۰۱)	LN <sup>۳</sup>
۱۰۸۸۲	۰٫۶۹	۰٫۹۴۲	۰٫۱۶۳	۰٫۶۹۹ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۵۱۹ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۹۸۸ (< ۰٫۰۰۱)	GG
۷۵۷۸	۰٫۶۴	۰٫۹۵۱	۰٫۱۴۵	۱٫۹۸۷ (< ۰٫۰۰۱)	۱٫۰۳۲ (< ۰٫۰۰۱)	۰٫۰۰۱ (۰٫۹۳۸)	GEV

برده شده و توزیع‌های انتخاب شده وابسته است. از این رو، مدل مناسب با عملکرد برازش بالا، می‌تواند کمترین خطا را در توان باد نسبت به عملکردهای ضعیف نشان دهد. توزیع LL<sup>۳</sup> دارای کمترین مقدار WPDE نسبت به توزیع‌های دیگر برای مجموعه داده‌های سالانه و فصل بهار برای ایستگاه تبریز در هر دو سال است. از طرف دیگر، توزیع GG برای داده‌های سرعت باد سالانه و پاییز برای ایستگاه ارومیه و برای فصل تابستان در ایستگاه تبریز ترجیح داده می‌شود. به علاوه، توزیع GEV در ارزیابی و تحلیل داده‌های فصل پاییز برای تبریز و فصل‌های بهار و تابستان برای ایستگاه ارومیه موثر است.

جدول ۸. نتایج ملاک WPDE برای داده‌های سرعت باد تبریز.

سال	فصل	WPDE <sub>GL</sub>	WPDE <sub>PL</sub>	WPDE <sub>LL<sup>۳</sup></sub>	WPDE <sub>WE<sup>۳</sup></sub>	WPDE <sub>LN<sup>۳</sup></sub>	WPDE <sub>GG</sub>	WPDE <sub>GEV</sub>
۱۳۹۶	سالانه	۱۵۵۷	۳۰۳	۷۳۵۳	۴۶۸	۰۳۲	۲۸۱	۲۶۹
	بهار	۱۵۱۵	۲۴۸	۸۴۶۲	۳۹۰	۱۵۰	۲۱۳	۳۸۳
	تابستان	۳۲۸۵	۲۸۱	۳۳۳۱	۰۴۲	۲۴۸	۰۴۴	۰۴۸
	پاییز زمستان	۱۰۲۱ ۰۸۰	۹۹۴ ۱۴۳۱	۸۲۸ ۴۲۸	۱۰۱۶ ۱۳۸۷	۱۲۵۹ ۱۶۹۸	۷۶۵ ۱۱۱۵	۰۴۵ ۱۱۸۸
۱۳۹۷	سالانه	۱۲۰۷	۴۸۴	۷۳۸۸	۵۸۵	۱۶۱	۳۸۱	۱۸۲
	بهار	۳۳۶۵	۳۷۰	۲۸۴۲	۰۴۴	۲۵۲	۰۴۲	۰۴۷
	تابستان	۲۲۸۰	۱۰۱۵	۱۴۳۴۸	۴۴۳	۹۰۹	۸۹۳	۱۴۸
	پاییز زمستان	۳۱۰۲ ۲۷۱	۲۶۹ ۱۴۷۶	۳۷۳ ۱۴۷۶	۲۶۹ ۳۷۳	۴۶۹ ۳۷۳	۲۶۸ ۲۶۸	۲۸۴ ۲۸۴

جدول ۹. نتایج ملاک WPDE برای داده‌های سرعت باد ارومیه.

سال	فصل	WPDE <sub>GL</sub>	WPDE <sub>PL</sub>	WPDE <sub>LL<sup>۳</sup></sub>	WPDE <sub>WE<sup>۳</sup></sub>	WPDE <sub>LN<sup>۳</sup></sub>	WPDE <sub>GG</sub>	WPDE <sub>GEV</sub>
۱۳۹۶	سالانه	۲۰۱۴	۷۵۶	۱۰۳۱	۶۲۱	۱۰۴۸	۴۹۹	۵۰۰
	بهار	۸۶۶	۶۵۹	۴۶۱	۴۶۲	۶۴۸	۴۶۸	۳۷۷
	تابستان	۲۱۳۶	۵۱۶	۹۴۲	۲۶۴	۷۵۴	۳۸۶	۱۶۸
	پاییز زمستان	۲۰۶۶ ۲۲۴۶	۷۷۱ ۷۵۷	۱۳۵۴ ۹۹۹	۵۸۲ ۱۰۲۱	۱۱۲۶ ۱۴۰۹	۴۸۷ ۶۸۱	۵۳۴ ۸۸۴
۱۳۹۷	سالانه	۹۲۲	۱۱۷۵	۱۰۳	۹۲۳	۱۳۸۲	۴۳۸	۲۴۹۴
	بهار	۱۴۲۰	۱۶۳۱	۱۲۴۲	۱۲۹۱	۱۸۴۱	۱۵۲۵	۵۶۹
	تابستان	۵۹۲	۸۹۰	۱۰۳۸	۵۷۵	۱۱۶۹	۸۸۳	۰۷۹
	پاییز زمستان	۲۴۷۵ ۱۲۵	۵۸۱ ۱۱۱۱	۶۴۳ ۶۷۷	۶۷۹ ۸۶۱	۹۷۷ ۱۲۲۹	۴۵۲ ۸۹۶	۴۵۸ ۷۳۴

به طور کلی، توزیع‌های LL<sup>۳</sup> و PL نسبت به مدل‌های دیگر از لحاظ ملاکهای نیکویی برازش برای داده‌های سرعت باد سالانه و فصلی برای هر دو ایستگاه تبریز و ارومیه انعطاف‌پذیر هستند و ارزیابی‌های بهتری را انجام می‌دهند. در نهایت برای کمینه کردن خطای چگالی توان باد، نشان داده شد که توزیع‌های LN<sup>۳</sup>، GG و GEV بهترین برازش‌ها را با توجه به ملاک WPDE برای مدل‌سازی داده‌های سرعت باد گزارش شده برای دو ایستگاه در نظر گرفته شده، فراهم می‌کنند. بنابراین، هر یک از این توابع توزیع می‌توانند برای نواحی مختلف سرعت باد در دیگر ایستگاه‌ها استفاده شوند.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان از سردبیر و داوران محترم به خاطر نظرات و پیشنهادات ارزشمندشان که باعث ارتقاء و بهبود مقاله شد، و از زحمات و ویراستار مجله که باعث ارائه بهتر مقاله شد صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

- عاشوری، ف.، ابراهیم پور، م. و بزرگ نیا، الف. (۱۳۹۴)، برآورد پارامترهای توزیع تعمیم یافته مقدار کرانگین ماکسیمال و مدل بندی کرانگین سرعت باد شهر زاهدان، *مجله علوم آماری*، ۹، ۲۰۷-۲۲۵.
- Akdağ, S., Bagiorgas, H. and Mihalakakou, G. (2010), Use of Two-component Weibull Mixtures in the Analysis of Wind Speed in the Eastern Mediterranean, *Applied Energy*, **87**, 2566–2573.
- Akgül, F. G., Şenoğlu, B. and Arslan, T. (2016), An Alternative distribution to weibull for Modeling the Wind Speed Data: Inverse Weibull Distribution, *Energy Conversion and Management*, **114**, 234–240.
- Arslan, T., Acitas, S. and Senoglu, B. (2017), Generalized Lindley and Power Lindley Distributions for Modeling the Wind Speed Data, *Energy Conversion and Management*, **152**, 300–311.
- Ghitany, M., Al-Mutairi, D. K., Balakrishnan, N. and Al-Enezi, L. (2013), Power Lindley Distribution and Associated Inference, *Computational Statistics and Data Analysis*, **64**, 20–33.
- Hossain, M. M. (2019), Probability Modeling of Monthly Maximum Sustained Wind Speed in Bangladesh, *Statistics, Optimization and Information Computing*, **7**, 75– 84.
- Kantar, Y. M., Usta, I., Arik, I. and Yenilmez, I. (2018), Wind Speed Analysis Using the Extended Generalized Lindley Distribution, *Renewable Energy*, **118**, 1024–1030.
- Koca, M. B., Kilic, M. B. and ŞAHİN, Y. (2019), Assessing Wind Energy Potential Using Finite Mixture Distributions, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **27**, 2276–2294.

- Lee, B.-H., Ahn, D.-J., Kim, H.-G. and Ha, Y.-C. (2012), An Estimation of the Extreme Wind Speed Using the Korea Wind Map, *Renewable energy*, **42**, 4–10.
- Mohammadi, K., Alavi, O., Mostafaiepour, A., Goudarzi, N. and Jalilvand, M. (2016), Assessing Different Parameters Estimation Methods of Weibull Distribution to Compute Wind Power Density, *Energy Conversion and Management*, **108**, 322–335.
- Nadarajah, S., Bakouch, H. S. and Tahmasbi, R. (2011), A Generalized Lindley Distribution, *Sankhya B*, **73**, 331–359.
- Ouarda, T. B., Charron, C., Shin, J.-Y., Marpu, P. R., Al-Mandoos, A. H., Al-Tamimi, M. H., Ghedira, H. and Al-Hosary, T. (2015), Probability Distributions of Wind Speed in the UAE, *Energy Conversion and Management*, **93**, 414–434.
- Singh, V., Guo, H. and Yu, F. (1993), Parameter Estimation for 3-Parameter Log-logistic Distribution (lld3) by Pome, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, **7**(3), 163–177.
- Wang, J., Qin, S. Jin, S. and Wu, J. (2015), Estimation Methods Review and Analysis of Offshore Extreme Wind Speeds and Wind Energy Resources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **42**, 26–42.

Journal of Statistical Sciences, Spring and Summer, 2021  
Vol. 15, No. 1, pp 219-232  
DOI: 10.29252/jss.15.1.219

## **The Suitable Statistical Model Selection for the Wind Speed of Tabriz and Orumiyeh Stations**

Mohammadpour, M., Bevrani, H. and Arabi Belaghi, R.  
Department of Statistics, Faculty of Mathematical Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

**Abstract:** Wind speed probabilistic distributions are one of the main wind characteristics for the evaluation of wind energy potential in a specific region. In this paper, 3-parameter Log-Logistic distribution is introduced and it compared with six used statistical models for the modeling the actual wind speed data reported of Tabriz and Orumiyeh stations in Iran. The maximum likelihood estimators method via Nelder–Mead algorithm is utilized for estimating the model parameters. The flexibility of proposed distributions is measured according to the coefficient of determination, Chi-square test, Kolmogorov-Smirnov test, and root mean square error criterion. Results of the analysis show that 3-parameter Log-Logistic distribution provides the best fit to model the annual and seasonal wind speed data in Orumiyeh station and except summer season for Tabriz station. Also, wind power density error is estimated for the proposed different distributions.

**Keywords:** Wind speed, Empirical distribution, Maximum likelihood method, Goodness-of-fit tests, Wind power density error.

**Mathematics Subject Classification (2010):** 62F10, 62P12.