

## تعیین مشخصات یخ و باد همزمان برای بارگذاری سازه‌های خطوط انتقال نیرو در کشور

محمدعلی جعفری صحنه‌سراییی<sup>۱\*</sup>، سلمان رضازاده بقال<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران،

<sup>۲</sup> کارشناس پژوهشی، گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران،

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۰۹

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۸-۱۶

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۲۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۹-۰۶

### کلمات کلیدی:

خطوط انتقال نیرو

یخ و باد همزمان

بارگذاری

دکل‌های انتقال نیرو

دوره بازگشت

**خلاصه:** در این مقاله، متغیرهای مورد نیاز برای حالت بارگذاری یخ و باد همزمان شامل ضخامت یخ معادل شعاعی و سرعت باد همزمان با آن به ازای دوره‌های بازگشت معین در سازه‌های خطوط انتقال نیرو، منطبق بر معیارهای استاندارد IEC 60826 تعیین و ارائه شده‌اند. متغیرهای بارگذاری مورد نظر با استفاده از تهیه منحنی‌های خطر دو متغیره، ارائه و با روش‌های ساده شده در استاندارد IEC 60826 مقایسه شده‌اند. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان با استفاده از داده‌های ثبت شده در ۱۵ عدد از ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در مناطق سردسیر کشور (شامل مناطق سنگین و فوق سنگین طبق نقشه پهنه‌بندی آب و هوایی خطوط انتقال) تهیه شده‌اند. برای تعیین ضخامت یخ تشکیل شده حول هادی خطوط انتقال با توجه به فقدان داده‌های مستقیم حاصل از اندازه‌گیری آن، از شبیه‌سازی عددی با مدل کریل برای باران یخی و مدل گسترش استوانه‌ای برف مرطوب برای برف مرطوب، استفاده شده است. نتایج حاصله نشان‌دهنده محافظه‌کاری قابل توجه ضرایب کاهش یخ و باد همزمان ارائه شده در استاندارد IEC 60826 در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه هستند. بر این اساس، با استفاده از منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان در ایستگاه‌های مورد نظر، مقادیر ضرایب کاهش جهت تعیین مقادیر متغیرهای بارگذاری در حالت یخ و باد همزمان بر حسب مقادیر مرجع آنها (که در نقشه‌های پهنه‌بندی موجودند)، تعیین و ارائه شده‌اند. ضرایب کاهش ارائه شده سازگار با معیارهای استاندارد IEC 60826 بوده و برای بارگذاری و طراحی سازه‌های خطوط انتقال با دوره‌های بازگشت مختلف در مناطق سردسیر کشور، قابل استفاده هستند.

### ۱- مقدمه

تشکیل شده حول سیم هادی و سرعت باد همزمان با یخ هستند. استانداردهای مذکور، روش‌های ساده و کاربردی برای این منظور نیز ارائه کرده‌اند. در آئین‌نامه فعلی بارگذاری خطوط انتقال در کشور [۴] مقادیر پارامترهای بارگذاری در حالت ترکیب یخ و باد بر اساس رویکرد احتمالاتی ارائه نشده است. بر این اساس، طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان سازه‌های خطوط انتقال کشور با استفاده از استاندارد فعلی امکان‌پذیر نیست. از اینرو، تعیین مقادیر پارامترهای بارگذاری یخ و باد همزمان با دوره‌های بازگشت مشخص بصورت واقع‌بینانه و منطبق با شرایط جوی کشور، از اهمیت زیادی برخوردار بوده و در تأمین قابلیت اطمینان مورد نیاز در طراحی این سازه‌ها، مؤثر است. با توجه به فقدان سوابق مطالعاتی در این حوزه در کشور از یک طرف،

یکی از حالات بارگذاری در خطوط انتقال نیرو، حالت ترکیب یخ و باد همزمان با آن است که موجب ایجاد نیروهای افقی قابل توجه بر هادی‌ها، دکل‌ها و سایر اجزای سازه‌های خطوط انتقال شده و می‌تواند در طراحی این سازه‌ها، تعیین‌کننده باشد. در استانداردها و راهنماهای معتبر برای طراحی خطوط انتقال نیرو مانند IEC 60826 [۱]، ASCE-74 [۲] و IEEE-NESC [۳] با تأکید بر طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، لزوم تعیین پارامترهای بارگذاری یخ و باد و ترکیب همزمان آنها با دوره بازگشت مشخص، تصریح شده است. پارامترهای بارگذاری یخ و باد بر خطوط انتقال نیرو شامل ضخامت (یا وزن) یخ

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mjafari@nri.ac.ir



از سرعت باد حدی طراحی) ارائه دادند [۹]. در این روش با محاسبه نیروی باد وارد بر هادی یخ زده در رویدادهای مختلف یخ شبیه‌سازی شده در ۳۰ ایستگاه هواشناسی و تحلیل آماری این نیروها، مقادیر سرعت باد حدی همراه با یخ را به نحوی ارائه دادند که منجر به نیروی حدی شود. در نهایت نسبت سرعت باد همراه با یخ به سرعت باد حدی در قالب یک ضریب برای استفاده در طراحی ارائه گردید که مقدار آن بین ۰/۴۵ و ۰/۷۵ قرار داشت.

فرزانه و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۱) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده از ۱۷۰ تست یخ در منطقه کبک کانادا، پارامترهای آماری یخ که برای تحلیل آماری ترکیب باد و یخ مورد نیاز است را تعیین کرده‌اند [۱۰]. پارامترهای مذکور شامل تعداد سالانه وقوع رویداد یخ، مدت زمان دوام یخ و مدت زمان کلی وجود یخ در سال هستند. اطلاعات حاصل از پارامترهای آماری حاصل شده در [۱۰] برای ارائه یک مدل آماری باد همراه با یخ و تعیین پارامترهای آن برای طراحی خطوط انتقال، استفاده شده و نتایج حاصله در [۱۱] ارائه شده است. در تحقیق مذکور با استفاده از شبیه‌سازی آماری، مقدار سرعت باد همزمان با یخ حدی به ازای دوره بازگشت معین در قالب یک ضریب کاهش ارائه شده است. ضریب کاهش در واقع بر مقدار سرعت مرجع باد اعمال شده و سرعت حدی باد همراه با یخ را بدست می‌دهد. نتایج حاصله نشان دادند که مقدار ضریب کاهش مذکور در منطقه کبک کانادا در بازه ۰/۴الی ۰/۷ قرار دارد. مجموعه ارزشمندی از فعالیت‌ها و تجربیات فرزانه و همکاران در زمینه بار یخ و ترکیب بارهای باد و یخ وارد بر خطوط انتقال نیرو، در [۱۲] گردآوری و ارائه شده است.

ژانگ<sup>۸</sup> (۲۰۰۶) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده در سایت آزمایشی مونت‌بلیر در کبک کانادا، ویژگی‌های آماری یخ و باد همراه با آن را تعیین و بررسی کرده است [۱۳]. نتایج حاصله نشان‌دهنده تطابق بار یخ تعیین شده بر اساس تحلیل داده‌های سایت مونت‌بلیر با روش ارائه شده در استاندارد IEC 60826 است. هنسون و استوارت<sup>۹</sup> (۲۰۰۷) با استفاده از شبیه‌سازی آماری به روش زنجیره مارکوف بر اساس داده‌های ثبت شده هواشناسی در فرودگاه دروال در مونت‌ترال کانادا، دوره بازگشت رویدادهای یخ شدید را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. نتایج حاصله نشان داد که دوره بازگشت رویداد

و اقدام شرکت توانیر جهت بازبینی آئین‌نامه بارگذاری خطوط انتقال نیرو از طرف دیگر، ضرورت انجام این دست مطالعات آشکار می‌گردد. در خصوص تعیین پارامترهای بارگذاری یخ و باد بر خطوط انتقال نیرو با استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی و همچنین توسعه مدل‌های احتمالاتی با استفاده از داده‌های حاصله، فعالیت‌های متعددی در دنیا انجام شده است. جونز و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) فعالیت‌های انجام شده در خصوص تهیه نقشه پهنه‌بندی بار یخ و باد همراه با آن را در راهنمای ASCE-74 ارائه کرده‌اند [۵]. برای تعیین ضخامت یخ با توجه به فقدان داده‌های اندازه‌گیری شده به میزان مناسب، از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. با انجام تحلیل‌های آماری روی داده‌های حاصله، مقادیر ضخامت یخ حدی و سرعت حدی باد همراه با آن به ازای دوره‌های بازگشت مختلف تعیین و بصورت نقشه‌های پهنه‌بندی و جدول ضرایب تبدیل ارائه شده‌اند. پیتلاک و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) یک مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی وقوع طوفان‌های یخی<sup>۳</sup> و تخمین پارامترهای آنها و همچنین تخمین اثر آنها بر خطوط انتقال ارائه دادند [۶]. مدل ارائه شده، داده‌های مورد نیاز را با استفاده از یک مدل عددی پیش‌بینی داده‌های هواشناسی تولید کرده و سپس با استفاده از یک مدل تشکیل یخ، وقوع یخ و مقدار مشخصات آن را در طول زمان مورد نظر محاسبه می‌کند. مک‌کامبر و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۸۳) به بررسی نیروهای ائرودینامیکی حاصل از باد بر روی هادی پوشیده شده از یخ با استفاده از تست تونل باد پرداختند [۷]. نتایج حاصله نشان داد که به دلیل شکل نامتقارن یخ تشکیل شده بر روی هادی، نیروهای رانشی به مقدار قابل توجهی بیشتر از مقادیر محاسباتی با فرض مقطع دایره‌ای شکل یخ است.

کریشناسامی و طباطبایی<sup>۵</sup> (۱۹۹۰) با استفاده از روش تحلیلی به بررسی نیروهای باد وارد بر هادی در دو حالت با و بدون پوشش یخ در ۳۰ ایستگاه هواشناسی در ایالت اونتاریو کانادا پرداختند [۸]. در این مطالعه از روش شبیه‌سازی آماری و با استفاده از داده‌های ثبت شده هواشناسی، برای تعیین ضخامت یخ و سرعت باد در زمان وجود یخ استفاده شده است. کریشناسامی و کالندران<sup>۶</sup> (۱۹۹۸) روش ساده‌ای برای تعیین سرعت باد حدی همزمان با یخ (بصورت نسبی

- 1 Jones et.al.
- 2 Pytlak et.al.
- 3 Ice Storme
- 4 McComber et.al.
- 5 Krishnasamy & Tabatabai
- 6 Krishnasamy & Kulendran

7 Farzaneh et.al.

8 Zhang

9 Henson & Stewart

نیز با استفاده از داده‌های ثبت شده در ۱۲ ایستگاه هواشناسی در لهستان و تحلیل آماری آنها با استفاده از توزیع حدی گامبل و بررسی همبستگی آنها، ضرایب لازم برای ترکیب بارهای حاصل از باد و برف برای دوره بازگشت ۵۰ سال را، ارائه کرده‌اند [۲۲]. سین<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۶) با شبیه‌سازی رویدادهای باران یخ‌زن در غرب مرکزی آمریکا، مشخصات آماری بارهای حاصل از وقوع همزمان یخ و باد را با استفاده از توزیع احتمال مشترک آنها، بررسی و با الزامات بارگذاری ASCE مقایسه کردند. نتایج این مطالعه حاکی از محافظه‌کاری الزامات بارگذاری ASCE نسبت به وقوع همزمان باد و یخ بود. [۲۳] آنها همچنین در (۲۰۱۹) با شبیه‌سازی آماری یخ و باد همزمان در ۸ ایستگاه هواشناسی واقع در غرب مرکزی آمریکا با استفاده از زنجیره مارکوف، منحنی‌های دومتغیره خطر یخ و باد را ارائه کردند. [۲۴]

در استاندارد IEC 60826 حالت بار ترکیب یخ و باد بصورت نیروی باد بر روی هادی پوشیده شده با یخ منظور شده که با دو متغیر سرعت باد در حضور یخ و وزن (یا ضخامت شعاعی معادل) یخ قابل محاسبه است. معیار اصلی این استاندارد برای تعیین مقادیر متغیرهای مذکور، ترکیب مقدار حدی یکی از متغیرها (با احتمال فراگذشت کم و مقدار زیاد) بر اساس دوره بازگشت مورد نظر (مثلاً ۵۰ سال) با مقدار کمتر از مقدار حدی متغیر دیگر (با احتمال فراگذشت زیاد و مقدار کم) است. بر این اساس، دو حالت بار به شرح زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۱. حالت بار اول: ضخامت یخ حدی با احتمال فراگذشت کم (دوره

بازگشت T) به همراه سرعت باد با احتمال فراگذشت زیاد

۲. حالت بار دوم: ضخامت یخ با احتمال فراگذشت زیاد به همراه

سرعت باد حدی در زمان وجود یخ با احتمال فراگذشت کم (دوره بازگشت T)

استاندارد مذکور برای سهولت استفاده در طراحی بر اساس معیار فوق، دو روش ساده شده به شرح زیر را برای تعیین مقادیر ضخامت یخ و سرعت باد همزمان با آن ارائه کرده است:

• **روش ساده شده اول:** در این روش مقادیر متغیرهای با احتمال فراگذشت زیاد، برابر با متوسط حداکثرهای سالانه آنها منظور می‌شوند.

• **روش ساده شده دوم:** در این روش مقادیر متغیرها با استفاده

مورد نظر در مونترال بطور متوسط برابر ۳۲ سال است. همچنین اثر مدت زمان ماندگاری یخ (تشکیل تا ریزش) بر حداکثر نیروی افقی نیز بررسی گردید و با انجام شبیه‌سازی با فرض مقادیر مختلف زمان ماندگاری یخ از ۱۲ الی ۹۶ ساعت، مشخص گردید که زمان مذکور به دلیل ذوب شدن بخشی از یخ قبل از پیک سرعت باد، تأثیر قابل توجهی در حداکثر نیرو ندارد. ویرینگ و فیکه<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) اقدامات انجام شده در راستای به روزرسانی پهنه‌بندی پارامترهای جوی یخ و باد و ترکیب یخ و باد را برای انگلستان ارائه کرده‌اند [۱۵]. در پروژه مذکور برای تعیین و پهنه‌بندی سرعت باد همراه با یخ، از روش ارائه شده در استاندارد IEC 60826 استفاده شده است.

مارالباشی زمینی<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با دو و سه متغیر ورودی، مدلی را برای پیش‌بینی نوع یخ تشکیل شده بر هادی‌های خطوط انتقال توسعه داد [۱۶]. وی همچنین، مدلی تجربی با استفاده از شبکه عصبی با ۵ پارامتر ورودی برای پیش‌بینی نرخ تشکیل یخ توسعه داد. داده‌های مورد استفاده در یادگیری این مدل از ایستگاه مونت‌بلیر کانادا حاصل شده و شامل سه فاز رویداد یخ (افزایش، ماندگاری و ریزش) بود. یانگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۰ و ۲۰۱۳) با استفاده از یک مدل احتمالاتی، احتمال خرابی خطوط انتقال را تحت اثر طوفان‌های یخی بدست آوردند [۱۷ و ۱۸]. آنها با استفاده از مدل احتمالاتی بارهای حاصل از باد و یخ، احتمال پارگی هادی و شکست برج را بدست آوردند. آنها همچنین در [۱۹] روش نوینی بر اساس ترکیب یادگیری حدی ماشین و تابع کوپولا برای پیش‌بینی آسیب‌های وارد بر خطوط انتقال در اثر طوفان‌های یخی ارائه کردند.

وانگ و رزوسکی<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) روشی آماری را برای تعیین مشخصات ترکیب بارهای حاصل از باد و برف جهت استفاده در طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد ارائه کردند [۲۰]. در این روش رخداد‌های باد و برف بصورت فرآیندهای تصادفی پالسی مدل شده و با استفاده از شبیه‌سازی آماری هر یک به روش مونت‌کارلو، ترکیب شدند. آنها همچنین در [۲۱] ترکیب بار برف و باد مورد نیاز به ازای دوره‌های بازگشت کوتاه‌تر برای سازه‌های با اهمیت کم (مانند قالب‌بندی و سازه‌های موقتی) را، ارائه کردند. زورانسکی و سوبولوسکی<sup>۵</sup> (۲۰۱۶)

1 Wareing & Fikke

2 Maralbashi-Zamini

3 Yang et.al.

4 Wang & Rosowsky

5 Żurański & Sobolewski

برای تعیین مقادیر متغیرها به منظور استفاده در طراحی سازه‌ها بر اساس قابلیت اطمینان (با توجه به اینکه نیروی حاصله دارای احتمال فراگذشت مورد نظر خواهد بود) رویکرد دوم مناسب‌تر بوده و در این تحقیق نیز از این رویکرد استفاده شده است.

## ۲-۱- روش انجام تحقیق

در هر رویداد تشکیل یخ در ایستگاه هواشناسی مورد نظر، با داشتن حداکثر سرعت باد و ضخامت یخ تشکیل شده در طول زمان وقوع رویداد یخ‌زدگی، نیروی باد وارد بر واحد طول هادی پوشیده از یخ از رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$F_i = 0.000613V_{ice-i}^2 C(D + 2t_{ice-i}) \quad (1)$$

که در آن،  $F_i$  برابر حداکثر نیروی باد وارد بر واحد طول هادی یخ‌زده در طول زمان وقوع رویداد یخ‌زدگی  $i$ ام بر حسب نیوتن بر متر،  $V_{ice-i}$  برابر حداکثر سرعت باد در طول زمان وقوع رویداد یخ‌زدگی  $i$ ام بر حسب متر بر ثانیه،  $C$  برابر ضریب ترکیبی باد شامل ضرایب پسا<sup>۴</sup>، ارتفاع، ناهمواری زمین، نایکنواختی باد در دهانه خط و پاسخ تندباد<sup>۵</sup>،  $D$  برابر قطر هادی (که در این مطالعه برابر ۳۰ میلیمتر فرض شده) و  $t_{ice-i}$  نیز برابر حداکثر ضخامت یخ در طول زمان وقوع رویداد یخ‌زدگی  $i$ ام بر حسب میلیمتر هستند. مقدار ضریب  $C$  تأثیری در محاسبات مربوط به تهیه منحنی‌های خطر نداشته (با توجه به روابط (۱) و (۲)) و برابر یک فرض می‌شود. ضریب ثابت ۰/۰۰۰۶۱۳ برای چگالی هوا در حالت استاندارد (دمای ۱۵ درجه سانتیگراد و ارتفاع سطح دریا) معتبر بوده و با توجه به عدم تأثیر آن در منحنی‌های خطر، نیازی به اصلاح آن در دمای زمان رویداد یخ‌زدگی نیست. پس از محاسبه نیروی باد در هر رویداد یخ‌زدگی، مقادیر حداکثر سالانه متغیرهای اصلی شامل سرعت باد ( $V_{ice-max}$ )، ضخامت یخ ( $t_{ice-max}$ ) و نیروی باد وارد بر هادی یخ‌زده ( $F_{max}$ ) استخراج می‌شوند. سپس با انجام تحلیل مقادیر حدی<sup>۶</sup> (EVA) با استفاده از توزیع احتمال مقدار حدی نوع I (گامبل) روی آنها، مقادیر حدی<sup>۷</sup> آنها با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال (دوره‌های بازگشت طراحی خطوط انتقال طبق استاندارد IEC 60826) محاسبه می‌شوند. در نهایت به ازای نیروی متناظر با

از مقادیر حدی مرجع هر یک از آنها که با اعمال ضرایبی کاهش داده شده‌اند، تعیین می‌شود. مقادیر ضرایب فوق در استاندارد مذکور (و جدول ۳ این مقاله) ارائه شده‌اند.

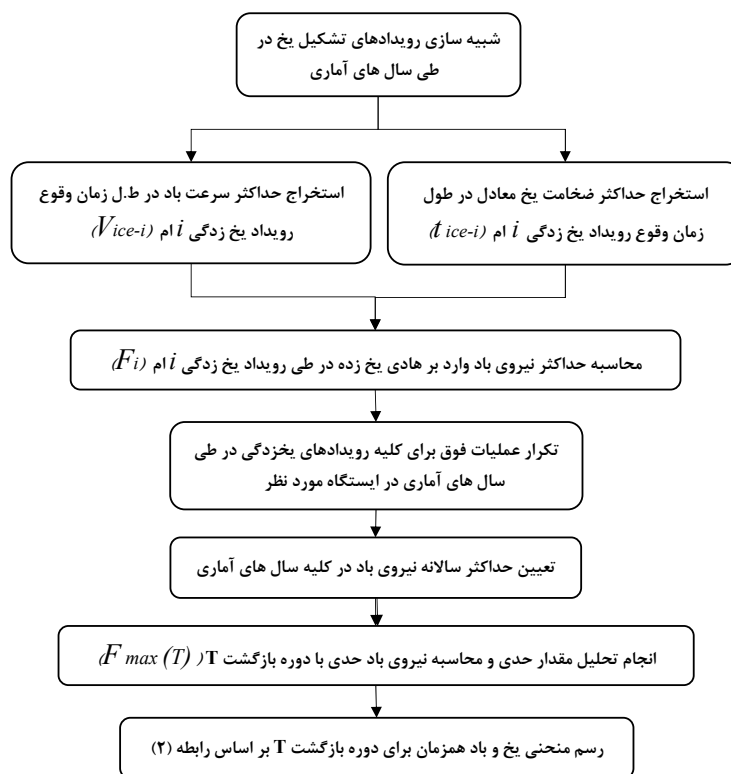
در این مقاله، متغیرهای مورد نیاز برای حالت بارگذاری یخ و باد همزمان شامل ضخامت یخ معادل شعاعی<sup>۱</sup> و سرعت باد همراه با آن<sup>۲</sup> به ازای دوره‌های بازگشت معین، تعیین و ارائه شده‌اند. بدین منظور از رویکرد منحنی‌های خطر دو متغیره<sup>۳</sup> استفاده شده و متغیرهای بارگذاری مطابق با معیار اصلی استاندارد IEC 60826 تعیین و با روش‌های ساده شده در استاندارد مذکور مقایسه شده‌اند. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان با استفاده از داده‌های ثبت شده در ۱۵ عدد از ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در مناطق سردسیر کشور (مناطق سنگین و فوق‌سنگین طبق نقشه پهنه‌بندی آب و هوایی خطوط انتقال [۲۵]) تهیه شده‌اند. برای تعیین ضخامت یخ تشکیل شده حول هادی خطوط انتقال با توجه به فقدان داده‌های حاصل از اندازه‌گیری آن، از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. همچنین با استفاده از منحنی‌های خطر، مقادیر ضرایب کاهش جهت تعیین مقادیر متغیرهای بارگذاری در حالت یخ و باد همزمان با استفاده از مقادیر مرجع متغیرها (که در نقشه‌های پهنه‌بندی موجودند)، تعیین و ارائه شده‌اند. ضرایب کاهش فوق که برای نخستین بار در کشور ارائه شده‌اند، سازگار با معیارهای استاندارد IEC 60826 بوده و برای استفاده در بارگذاری سازه‌های خطوط انتقال با دوره‌های بازگشت مختلف در مناطق سردسیر کشور، قابل استفاده هستند.

## ۲- مواد و روش‌ها

برای تعیین پارامترهای بارگذاری در حالت ترکیب یخ و باد بصورت احتمالاتی، دو رویکرد کلی قابل استفاده است. در رویکرد اول، متغیرهای طراحی (سرعت باد و ضخامت یخ) بطور مستقیم تحلیل شده و مدل‌های احتمالاتی آنها بصورت جداگانه و مشترک تهیه شده و مقادیر مورد استفاده در طراحی (با دوره بازگشت مورد نظر) استخراج می‌شوند. در رویکرد دوم، مدل‌های احتمالاتی آثار حاصل از متغیرها (مانند نیروی حاصل از باد وارد بر هادی پوشیده از یخ) تهیه و مقادیر متغیرهای طراحی بطور غیرمستقیم تعیین می‌گردند.

4 Drag  
5 Gust  
6 Extreme Value Analysis  
7 Extreme

1 Equivalent radial ice thickness  
2 Concurrent wind speed  
3 Bivariate Hazard Curve



شکل ۱. روندنمای تهیه منحنی های یخ و باد همزمان برای یک ایستگاه هواشناسی  
 Fig. 1. Process of preparing ice and wind hazard curves for a typical meteorological station

مرطوب<sup>۲</sup> و یا برف خشک<sup>۳</sup> باشد. باران یخزن پدیده ای است که در آن بارش بصورت مایع بوده ولی در هنگام برخورد با اجسام (بخصوص فلزی) سرد تبدیل به یخ می گردد. باران یخ زن بطور کلی پدیده نادری بوده و برای تشکیل آن شرایط ویژه ای نیاز می باشد. برای تشکیل چنین پدیده ای وجود دو توده هوای گرم و مرطوب و سرد خشک بطور همزمان در منطقه جغرافیایی مورد نظر ضروری می باشد. به همین دلیل است که بیشتر موارد باران های یخزن مشاهده شده، در کانادا و شمال آمریکا اتفاق افتاده اند. برف خشک زمانی می تواند ایجاد شود که سرعت باد به اندازه کافی پایین باشد (کمتر از ۲ متر بر ثانیه). هرچند که این شرایط می تواند باعث بارش های سنگین برف گردد، ولی چگالی برف در این حالت از  $100,0 \text{ kg/m}^3$  بیشتر نمی شود. بنابراین در اکثر مواقع بار اعمال شده به خطوط انتقال بر اثر برف خشک کمتر از سایر انواع یخ می باشد. بنابراین یخ تشکیل شده ناشی از برف خشک مورد بحث و بررسی قرار نمی گیرد.

برف مرطوب در هنگامی که هوای با درجه حرارت اندکی بالاتر

هر دوره بازگشت  $T$ ،  $(F_{\max}(T))$  منحنی خطر بر حسب ضخامت یخ  $(t_{\text{ice}}(T))$  و سرعت باد همزمان با آن  $(V_{\text{ice}}(T))$  برای ایستگاه مورد بررسی، با استفاده از رابطه (۲) ترسیم می شود:

$$V_{\text{ice}}(T) = \sqrt{\frac{F_{\max}(T)}{0.000613C(D + 2t_{\text{ice}}(T))}} \quad (2)$$

روند کلی تهیه منحنی های خطر یخ و باد همزمان برای یک ایستگاه هواشناسی در نمودار شکل ۱ ارائه شده است.

با استفاده از تحلیل آماری منحنی های بدست آمده در کلیه ایستگاه های منتخب، ضرایب کاهش مقادیر حدی منطبق بر معیار IEC 60826 برای استفاده در مناطق سنگین و فوق سنگین کشور ارائه شده که برای بارگذاری یخ و باد همزمان قابل استفاده می باشد.

۲-۲- شبهه سازی عددی رویداد تشکیل یخ حول سیم هادی در

خطوط انتقال

یخ ناشی از بارش های جوی می تواند ناشی از باران یخزن<sup>۱</sup>، برف

2 Wet Snow  
 3 Dry Snow

1 Freezing Rain

که در آن،  $\phi$  قطر یخ تشکیل شده بر حسب متر،  $\phi_0$  قطر اولیه سیم هادی بر حسب متر،  $P$  شدت بارش بر حسب متر بر ساعت،  $U$  متوسط سرعت افقی روزانه باد بر حسب متر بر ثانیه،  $W$  سرعت قائم بارش ذرات برف بر حسب متر بر ثانیه،  $\rho_s$  چگالی برف مرطوب بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب،  $\beta$  ضریب چسبندگی و  $t$  مدت زمان بارش بر حسب ثانیه، هستند. روابط فوق در صورتی که شرایط آب و هوایی و جوی پایدار باشد، یعنی در زمانی که پارامترهای  $P$ ،  $U$  و  $W$  در طول بازه‌های زمانی ثابت باشند و همچنین پارامتر  $\beta$  دارای مقدار ثابتی باشد؛ قابل استفاده هستند. [۱۲]

با توجه به اینکه برف مرطوب متشکل از ذرات برف، قطرات مایع آب و حباب‌های هوا است، چگالی آن به طور قابل توجهی متأثر از مقدار حباب‌های هوای موجود در آن می‌باشد، که آن نیز به شدت متأثر از فشار باد است. در باد با فشار بالا، برف تشکیل شده متراکم‌تر بوده و به تبع آن چگالی برف تشکیل شده نیز بیشتر می‌شود. می‌توان بیان نمود که هنگامی که سرعت باد از مقدار  $3,0 \text{ m/s}$  به  $10,0 \text{ m/s}$  افزایش می‌یابد، چگالی یخ تشکیل شده نیز از مقدار  $100,0 \text{ kg/m}^3$  به  $400,0 \text{ kg/m}^3$  افزایش می‌یابد. [۱۲]

از طرف دیگر، از میان ذرات برفی که از سطح مشخص عبور می‌نمایند، تنها بخشی از آن به سیم چسبیده و تشکیل یخ می‌دهند. که این نسبت با ضریب چسبندگی  $\beta$  ( $\beta > 0$ ) بیان می‌شود. ضریب چسبندگی به شدت متأثر از سرعت باد است به گونه‌ای که مقدار آن با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد. پارامترهایی همانند ابعاد ذرات برف، شکل ذرات و مقدار آب مایع موجود نیز در مقدار ضریب چسبندگی مؤثر هستند. مقدار ضریب چسبندگی در طول زمان در فرآیند شکل‌گیری یخ ثابت نبوده و اندازه‌گیری آن در طول آزمایش‌های شبیه‌سازی، از لحاظ عملی امکان‌پذیر نیست. با مقایسه جرم و قطر برف محاسباتی و مشاهده شده در آزمایش‌ها، در شرایطی که پارامترهای مؤثر جوی و چگالی ثابت باشند، می‌توان بیان نمود که تطابق خروجی‌های حاصل از این دو روش تنها متأثر از مقدار عدد در نظر گرفته شده برای ضریب چسبندگی است. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده، هنگامی که سرعت از  $10,0 \text{ m/s}$  به  $3,0 \text{ m/s}$  کاهش می‌یابد، مقدار ضریب چسبندگی از مقدار  $0,1$  به  $0,4$  افزایش می‌یابد. [۱۲]

از صفر درجه سانتی‌گراد، از یک سطح باریک عبور می‌نماید، تشکیل می‌گردد. ذرات برف در نزدیکی سطح زمین ممکن است درجه حرارت بالاتر از نقطه انجماد را تجربه نمایند. این پدیده معمولاً در بازه‌ای بین  $+0,5$  تا  $+2$  درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. به محض اینکه ذرات برف دمای بالاتر از نقطه انجماد را تجربه کنند، شروع به ذوب شدن می‌نمایند. با افزایش رطوبت ذرات برف، نیروی چسبندگی آنها کاهش یافته و اکثر ذرات پس از برخورد با یک شی از روی آن جدا شده و به سمت زمین سقوط می‌نمایند. در صورتی که مقدار آب موجود در ذرات برف بین  $15$  تا  $40$  درصد کل وزن آنها باشد، این ذرات به راحتی در هنگام تماس با اشیاء به آنها می‌چسبند. [۱۲]

با توجه به عدم اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های یخ جوی (وزن واحد طول، قطر، چگالی و مدت زمان ماندگاری) در ایستگاه‌های هواشناسی، تعیین ضخامت یخ مورد نیاز در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی عددی انجام شده است. شبیه‌سازی رویداد تشکیل یخ جوی و تعیین پارامترهای مشخصه آن، بر اساس مدل کریل<sup>۱</sup> ساده شده برای باران یخ‌زن و مدل گسترش استوانه‌ای برف مرطوب برای برف مرطوب<sup>۲</sup> انجام شده است. روش کریل شامل دو مدل شار ساده<sup>۳</sup> و تبادل حرارتی<sup>۴</sup> برای محاسبه ضخامت یخ با استفاده از داده‌های هواشناسی است. با توجه به داده‌های هواشناسی موجود در کشور، روش تبادل حرارتی قابل استفاده نبوده و در این مطالعه از روش شار ساده استفاده شده است. جزئیات محاسباتی روش شار ساده برای شبیه‌سازی باران یخی در [۲۶] ارائه شده و با توجه به غالب بودن برف مرطوب در کشور (نسبت به باران یخ‌زن)، در ادامه تنها مبانی محاسباتی مدل برف مرطوب ارائه می‌شود.

## ۲-۲-۱- مدل گسترش استوانه‌ای برای شبیه‌سازی برف مرطوب

در مدل گسترش استوانه‌ای، قطر برف مرطوب تشکیل شده بر روی سیم در زمان  $t$  پس از بارش از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌گردد:

$$\phi = \frac{2}{\pi \rho_s} K t + \phi_0 \quad (3)$$

$$K = \frac{\beta P}{3.6 \times 10^3} \sqrt{1 + \frac{U^2}{W^2}} \quad (4)$$

- 1 CRREL
- 2 Cylindrical Growth of Wet Snow Sleeves
- 3 Simple flux model
- 4 Heat-balance model



ماند در غیر اینصورت بعد از ۲۴ ساعت برف تشکیل شده فرو خواهد ریخت)

۵. اگر در بازه ۲۴ ساعت از انتهای وقوع بارش اول، بارش دیگری رخ دهد و شرایط برف مرطوب نیز وجود داشته باشد، محاسبات فوق تکرار شده و برف مرطوب حاصل از بارش جدید، به برف قبلی افزوده می‌شود.

### ۳-۲- انتخاب ایستگاه‌های هواشناسی

در این تحقیق، ایستگاه‌هایی مورد نظر هستند که اولاً دارای سابقه ثبت داده به اندازه کافی (حداقل ۳۰ سال) بوده [۱] و ثانیاً دارای شرایط اقلیمی نسبتاً شدید به لحاظ یخ و باد (واقع در مناطق بادخیز و سردسیر کشور) باشند. بر این اساس در مرحله اول، تعداد ۹۲ ایستگاه در کشور که دارای حداقل ۳۰ سال ثبت داده هستند، انتخاب شدند. پس از اخذ داده‌های مورد نیاز (شامل سرعت باد روزانه، دمای روزانه و میزان بارش)، احراز شرایط تشکیل رویداد یخ‌زدگی در طول مدت زمان ثبت داده‌ها در ۹۲ ایستگاه منتخب بررسی گردید. سپس نرخ وقوع رویداد یخ‌زدگی (تعداد رویداد در سال) و سرعت باد مرجع<sup>۱</sup> ۵۰ ساله (حداکثر سالانه مستقل از وجود یخ) به عنوان شاخص‌های سردسیری و بادخیزی برای هریک از ایستگاه‌ها محاسبه گردید. مقادیر نرخ وقوع یخ‌زدگی و سرعت باد مرجع برای ایستگاه‌های مورد نظر، در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

در نهایت، بحرانی‌ترین ایستگاه‌ها برای انجام مطالعات تکمیلی انتخاب گردید که تعداد آنها ۱۵ عدد بوده و مشخصات آنها در شکل ۲ با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. فهرست ۱۵ ایستگاه منتخب به همراه مقادیر نرخ وقوع رخداد یخ‌زدگی، سرعت باد مرجع و ضخامت یخ مرجع<sup>۲</sup> (برای دوره بازگشت ۵۰ سال) برای هریک از آنها نیز در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

موقعیت ۱۵ ایستگاه هواشناسی منتخب در سطح کشور در شکل ۳ نشان داده شده است. با مقایسه موقعیت ایستگاه‌ها با نقشه پهنه‌بندی آب و هوایی کشور [۲۵]، مشخص است که کلیه ایستگاه‌های منتخب در مناطق سنگین و فوق‌سنگین کشور واقع شده‌اند.

### ۳- تولید منحنی‌های دومتغیره خطر یخ و باد همزمان

بر اساس روش ارائه شده در بخش‌های قبل، با استفاده از اطلاعات

### ۲-۲-۲- اعتبارسنجی و کالیبراسیون مدل برف مرطوب

مدل گسترش استوانه‌ای برف مرطوب توسط داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های تونل بادی که در طول چند ساعت شرایط جوی آن ثابت بوده، تأیید شده است. نتایج حاصل از این روش برای شرایط واقعی در طول بازه‌های زمانی کوچکی (به عنوان مثال ۱ ساعت) که در آن شرایط جوی مطابق با فرضیات این روش ثابت می‌باشد، تطابق خوبی دارد [۱۲]. مقادیر پارامترهای  $\beta$  و  $\rho_s$  با متوسط سرعت باد روزانه  $U$  در زمان بارش نیز ارتباط مستقیمی دارند. بر اساس کالیبراسیون مدل با داده‌های ثبت شده برف مرطوب در برخی مناطق دنیا، روابط (۵) و (۶) برای حالت  $s$  ارائه شده‌اند [۱۲]

$$\beta = \frac{1}{U} \quad (5)$$

$$\rho_s = 200 + 20U \quad (6)$$

### ۲-۲-۳- روند انجام شبیه‌سازی برف مرطوب

مزیت عمده مدل گسترش استوانه‌ای این است که تنها در صورت مشخص بودن سه پارامتر هواشناسی سرعت باد، درجه حرارت و میزان بارش، می‌توان قطر معادل شعاعی مقدار برف مرطوب تشکیل شده را تعیین نمود. پارامترهای هواشناسی مذکور، در ایستگاه‌های هواشناسی کشور ثبت شده و در رکوردهای داده‌های هواشناسی، موجود می‌باشند. با داشتن داده‌های مذکور در هر روز از بازه زمانی ثبت داده‌ها (حداقل ۳۰ سال)، روند گام به گام شبیه‌سازی جهت محاسبه قطر برف مرطوب، به شرح زیر است: [۱۲]

۱. بررسی وقوع رویداد بارش برف و تعیین دمای حین بارش و احراز شرایط تشکیل برف مرطوب در هر رویداد بارش و صحت سنجی آن (با بررسی داده‌های ساعات قبل و بعد از بارش و داده‌های ایستگاه‌های مجاور).

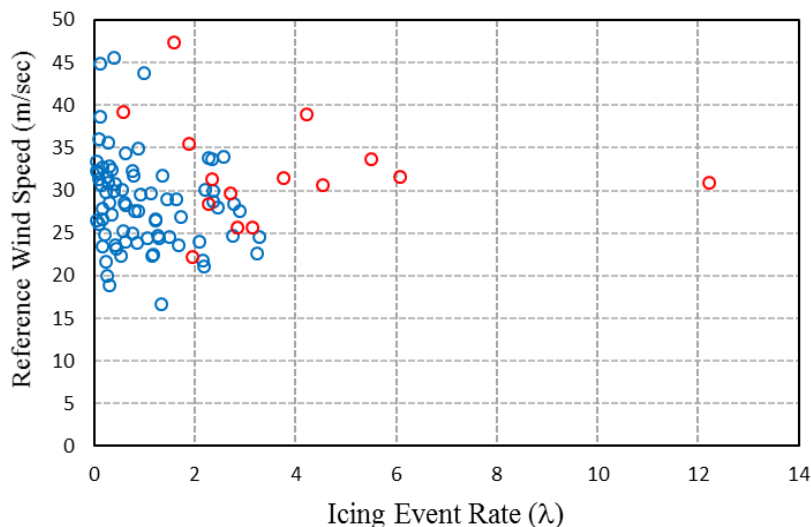
۲. در صورت احراز شرایط تشکیل برف مرطوب (وقوع رویداد یخ‌زدگی)، محاسبه ضرایب چسبندگی و چگالی برف مرطوب (روابط ۵ و ۶).

۳. محاسبه ضریب  $K$  و قطر یخ در رویداد بارش مورد نظر (روابط ۳ و ۴).

۴. بررسی احراز شرایط ماندگاری برف مرطوب. (برف مرطوب دور سیم تا ۲۴ ساعت بشرط باقی ماندن دما زیر ۳ درجه باقی خواهد

1 Reference Wind Speed

2 Reference Ice Thickness



شکل ۲. مقادیر نرخ وقوع رویداد یخزدگی و سرعت باد مرجع ۵۰ ساله در ایستگاه‌های مورد بررسی (نقاط با رنگ قرمز: ایستگاه‌های منتخب نهایی)  
 Fig. 2. The values of icing event occurrence rate and 50 year reference wind speed in the considered stations (the red points are final selected stations)

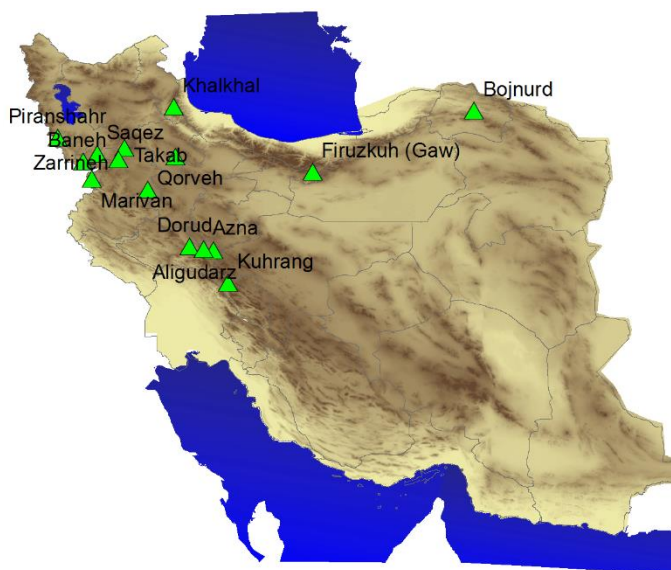
جدول ۱. فهرست ایستگاه‌های هواشناسی منتخب  
 Table 1. The selected meteorological stations

ضخامت یخ مرجع ( $t_R$ ) ۵۰ ساله (میلیمتر)	سرعت باد مرجع ( $V_R$ ) ۵۰ ساله (متر بر ثانیه)	نرخ وقوع رویداد یخزدگی (تعداد وقوع در سال)	منطقه	نام ایستگاه
۳۸۴	۳۰.۸	۱۲.۲	سنگین	کوه‌رنگ
۱۸۱	۳۱.۵	۶.۱	سنگین	مربوان
۲۰۴	۳۳.۶	۵.۵	فوق سنگین	پیرانشهر
۱۴۰	۳۰.۶	۴.۶	فوق سنگین	بانه
۱۲۷	۳۸.۸	۴.۲	سنگین	فیروز کوه
۱۲۰	۳۱.۴	۳.۸	فوق سنگین	ازنا
۱۱۴	۲۵.۵	۳.۲	فوق سنگین	الیگودرز
۱۱۷	۲۵.۵	۲.۶	سنگین	قروه
۱۴۴	۲۹.۵	۲.۷	فوق سنگین	سقز
۸۶	۲۸.۶	۲.۴	فوق سنگین	تکاب
۷۹	۳۱.۳	۲.۳	سنگین	خداآباد
۷۸	۲۲.۰	۲.۰	فوق سنگین	خلخال
۸۳	۳۵.۴	۱.۹	فوق سنگین	زرینه
۱۷۲	۴۷.۲	۱.۶	فوق سنگین	درود
۴۳	۳۹.۱	۰.۶	فوق سنگین	بجنورد

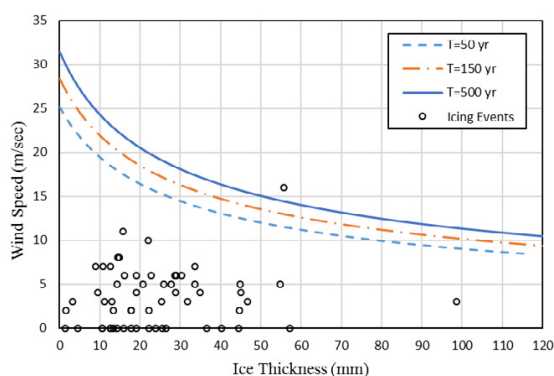
حدی روی مقادیر حداکثر سالانه نیروی باد وارد بر هادی یخزده، از توزیع مقدار حدی نوع اول (گامبل) استفاده گردید. پارامترهای این توزیع احتمال در هر ایستگاه با استفاده از روش حداقل مجموع

حاصله از شبیه‌سازی رویدادهای یخزدگی در بازه زمانی ۳۰ ساله برای دو نوع یخ (باران یخزده و برف مرطوب)، در ایستگاه‌های منتخب، منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان تهیه گردیدند. برای تحلیل مقادیر

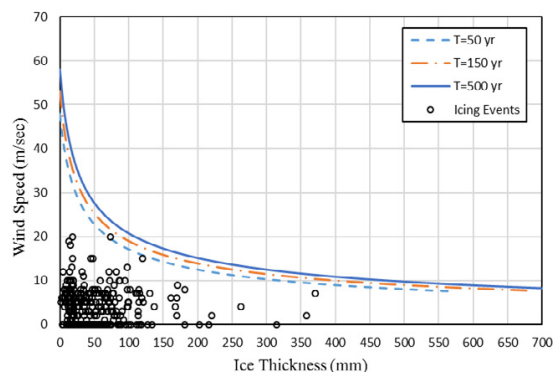




شکل ۳. جانمایی ایستگاه‌های منتخب در سطح کشور  
Fig. 3. Layout of Selected stations in country



ب) ایستگاه خلخال



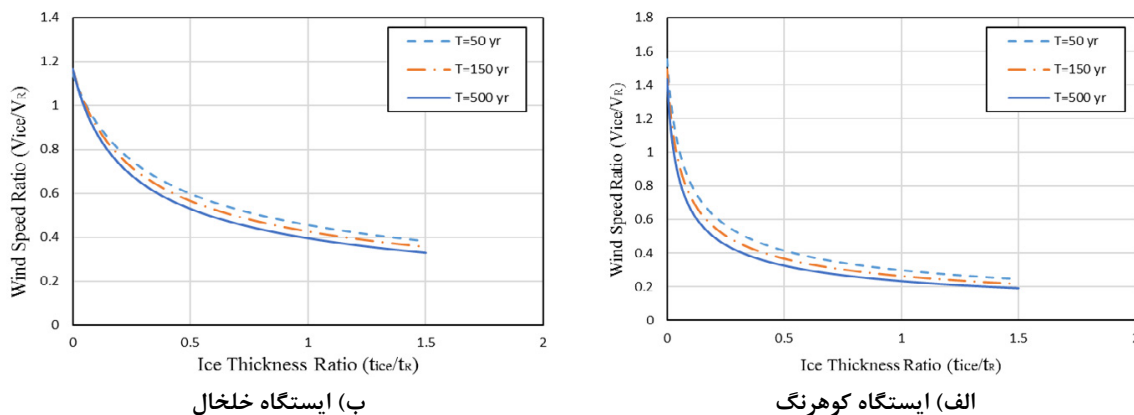
الف) ایستگاه کوه‌رنگ

شکل ۴. منحنی‌های دومتغیره خطر یخ و باد همزمان  
Fig. 4. Bivariate ice and concurrent wind hazard curves

واقع، هر نقطه از منحنی مربوط به یک دوره بازگشت مشخص  $T$ ، مقادیر ضخامت یخ و سرعت بادی را بدست می‌دهد که در صورت اعمال آنها بصورت همزمان، نیروی افقی وارد بر هادی متناظر با دوره بازگشت  $T$  حاصل شود. لازم به ذکر است که نقاط مختلف روی یک منحنی با دوره بازگشت مشخص، به لحاظ سطح خطر (احتمال فراگذشت مقادیر یخ و باد همزمان) یکسان بوده ولیکن، تأثیر کلی آنها روی اعضای سازه‌ای خط انتقال یکسان نیست. از اینرو، لازم است که نقاط واقع در نواحی مختلف از منحنی (بخصوص در کران‌های بالا و پایین) در بارگذاری خطوط انتقال لحاظ شوند. این موضوع، بصورت ارائه دو حالت بار در استاندارد IEC 60826 تصریح شده

مربعات تعیین گردیده و میزان انطباق داده‌ها با توزیع گامبل نیز با استفاده از ضریب  $R^2$  کنترل گردید. تحلیل مقادیر حدی روی متغیر تصادفی حداکثر سالانه سرعت باد در زمان وقوع یخ‌زدگی ( $V_{wic}$ ) که در تعیین مشخصات حالت بارگذاری یخ و باد همزمان طبق IEC 60826 نقش دارد نیز، بصورت مستقل انجام گردید. برای مدل احتمالاتی این متغیر نیز از توزیع احتمال گامبل استفاده شد.

شکل ۴ منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان را برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال، در دو ایستگاه کوه‌رنگ و خلخال نشان می‌دهد. همانطور که در بخش روش تحقیق اشاره شد، این منحنی‌ها بر اساس نیروی باد وارد بر هادی یخ زده تهیه شده‌اند. در



شکل ۵. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان نرمال شده به مقادیر حدی مرجع  
 Fig. 5. Normalized ice and concurrent wind hazard curves to reference values

در اشکال مذکور قابل مشاهده است، علیرغم اینکه روند کلی نقاط مشخص شده با روش IEC از منحنی‌های خطر پیروی می‌کنند، مقادیر آنها انطباق خوبی با این منحنی‌ها ندارند. به عنوان نمونه، معیار یخ حدی به همراه متوسط باد همراه با یخ سالانه (نقاط مربوط به IEC واقع در سمت راست و پایین شکل‌ها) در کلیه ایستگاه‌ها بجز کوهرنگ و بانه، پایین‌تر از منحنی‌های خطر قرار دارند. این امر در صورت بارگذاری خط انتقال طبق استاندارد IEC، منجر به حصول نتایج غیرمحافظة کارانه (تا بیش از دو برابر) می‌شود. از طرف دیگر، معیار باد حدی همزمان به همراه متوسط یخ سالانه (نقاط مربوط به IEC واقع در سمت چپ و بالای شکل‌ها) در ایستگاه فیروزکوه انطباق نسبتاً خوبی با منحنی‌های خطر داشته (همچنین ایستگاه‌های خلخال و تکاب برای دوره بازگشت ۵۰ سال) و در سایر ایستگاه‌ها بالاتر از منحنی‌ها قرار گرفته و نتایج محافظه کارانه بدست می‌دهد.

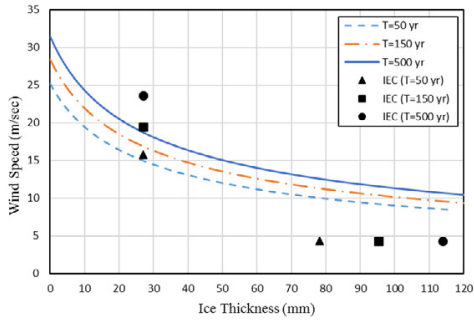
#### ۴- بحث و بررسی نتایج

منحنی‌های خطر برای ۱۵ ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه بصورت نرمال شده به مقادیر حدی (مرجع) برای کلیه ایستگاه‌ها، در شکل ۷ الی شکل ۹ به ترتیب برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال ارائه شده‌اند. در اشکال فوق، منحنی‌های نرمال شده مربوط به ایستگاه‌های مختلف قابل مقایسه بوده و پراکندگی نسبتاً زیادی در آنها قابل مشاهده است. از طرف دیگر تفاوت قابل توجهی در منحنی‌های مربوط به دوره‌های بازگشت مختلف وجود ندارد. بطور کلی با افزایش دوره بازگشت، مقادیر منحنی‌های نرمال شده کاهش

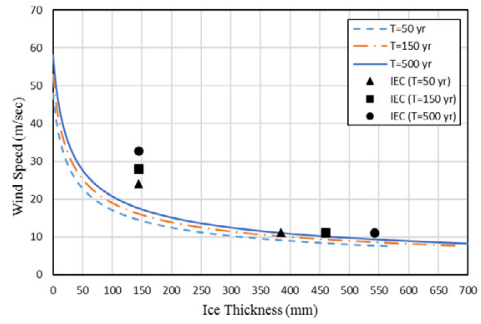
است. روند کلی منحنی‌ها بصورت اکیداً نزولی و مقعر بوده و با افزایش دوره بازگشت، منحنی‌ها بالاتر می‌روند که قابل انتظار است. در شکل ۴ رویدادهای یخ‌زدگی در ایستگاه‌های مربوطه به همراه حداکثر باد همزمان نیز بصورت نقطه‌های توخالی نشان داده شده‌اند. همانطور که مشخص است، عمده رویدادها در زیر منحنی‌های حدی قرار گرفته و تعداد محدودی در روی یا بالای منحنی‌ها واقع شده‌اند که تصدیق‌کننده صحت و اعتبار منحنی‌ها هستند.

شکل ۵ منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان نرمال شده به مقادیر حدی مرجع هر متغیر را برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال، در دو ایستگاه کوهرنگ و خلخال نشان می‌دهد. در این منحنی‌ها، هریک از مقادیر ضخامت یخ و سرعت باد همزمان با آن، به مقدار حدی مستقل خود (بدون لحاظ همزمانی) با دوره بازگشت مربوطه (مقادیر مرجع سرعت باد و ضخامت یخ) تقسیم شده‌اند. نکته قابل توجه این است که با افزایش دوره بازگشت، منحنی‌های نرمال شده بر خلاف منحنی‌های غیرنرمال، پایین‌تر می‌روند. در واقع، نسبت مقادیر همزمان به مقادیر حدی، با افزایش دوره بازگشت کاهش می‌یابد.

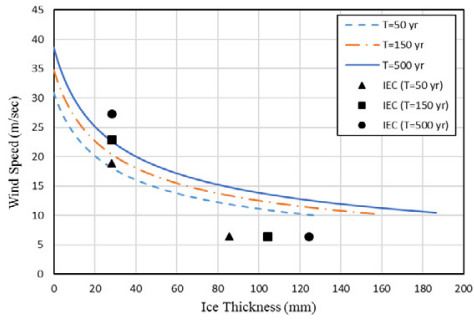
به همین ترتیب، منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان در دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال برای کلیه ایستگاه‌های منتخب در شکل ۶ ارائه شده‌اند. در اشکال مذکور جهت مقایسه، نقاط طراحی بر اساس روش ساده شده اول IEC 60826 (مقدار حدی یک متغیر با دوره بازگشت مورد نظر، همزمان با متوسط مقادیر حداکثر سالانه متغیر دیگر) نیز برای هر ایستگاه محاسبه و ارائه شده‌اند. همانطور که



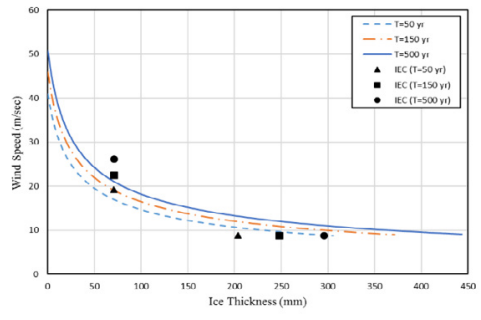
ایستگاه خلخال



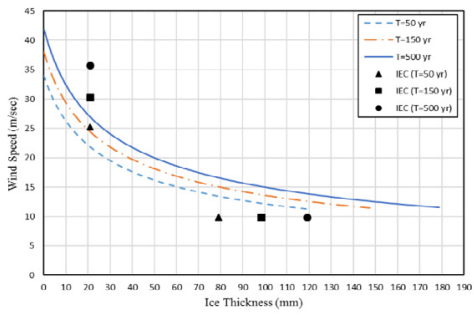
ایستگاه کوهرنگ



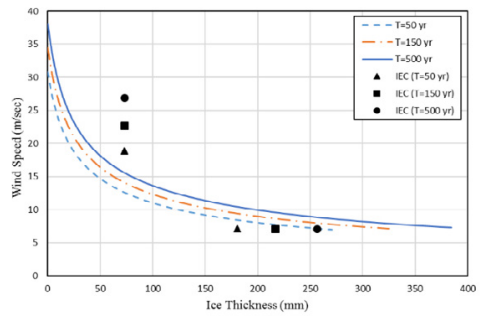
ایستگاه تکاب



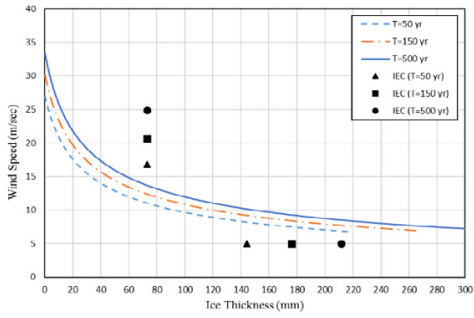
ایستگاه پیرانشهر



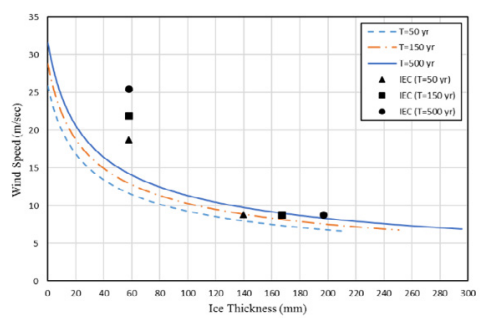
ایستگاه خدابنده



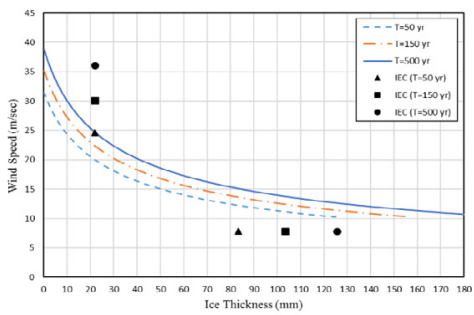
ایستگاه مریوان



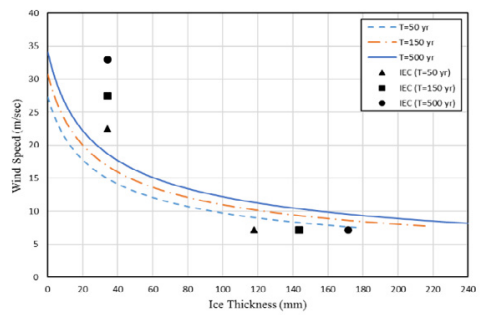
ایستگاه سقز



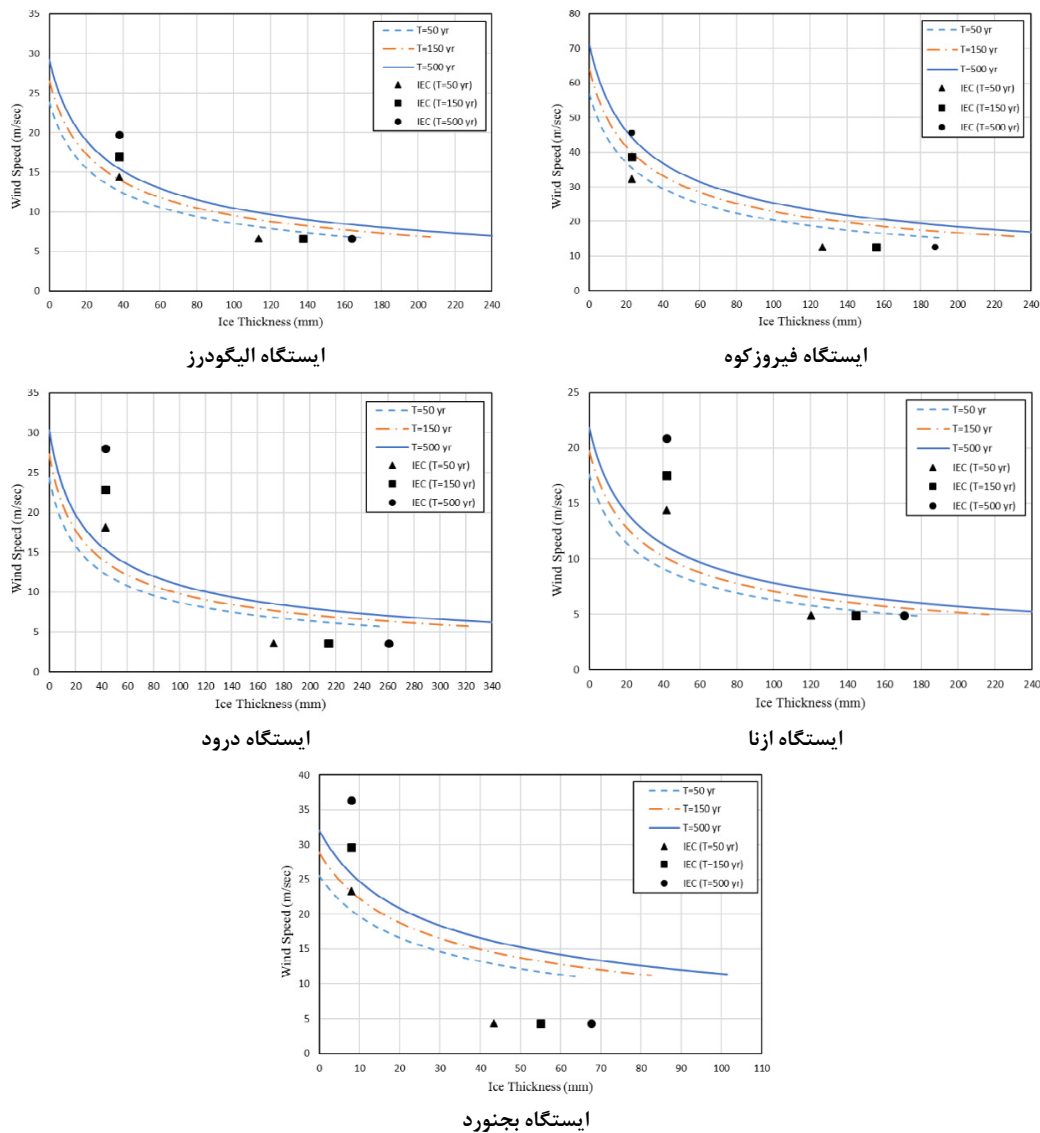
ایستگاه باهه



ایستگاه زرینه



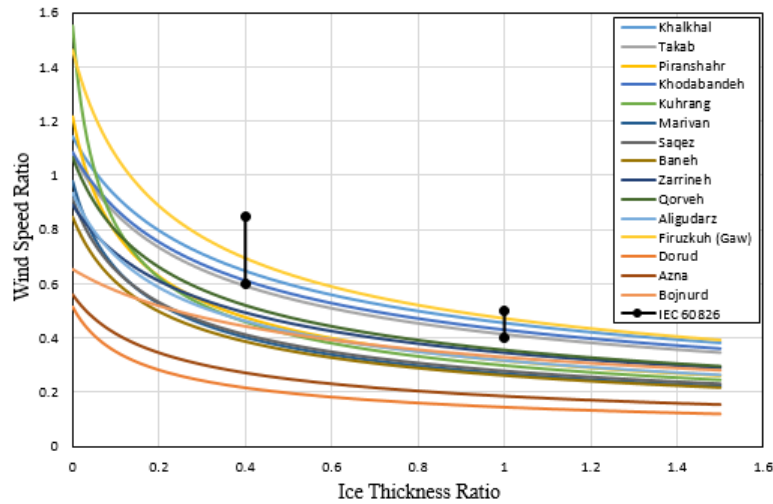
ایستگاه قروه



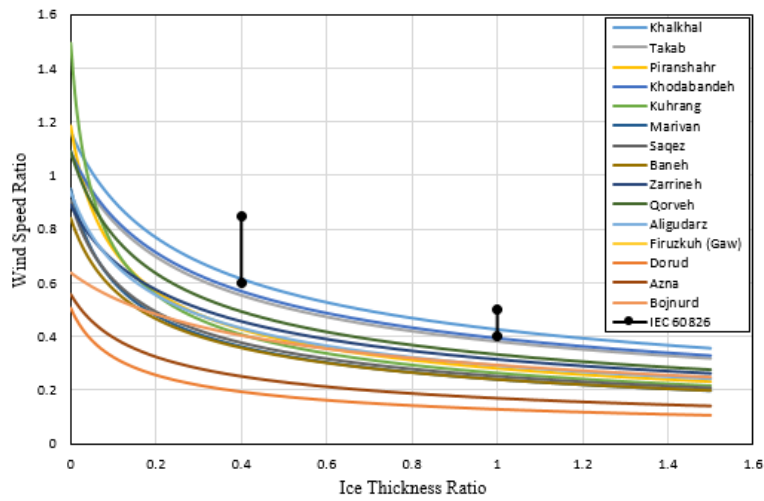
شکل ۶. منحنی‌های دومتغیره خطر یخ و باد همزمان برای کلیه ایستگاه‌های مورد مطالعه  
 Fig. 6. Bivariate ice and concurrent wind hazard curves for all stations

منحنی‌های خطر نرمال شده به مقادیر حدی به لحاظ مفهومی، همان ضرایب کاهش حالت بارگذاری یخ و باد همزمان هستند که در روش ساده شده دوم استاندارد IEC 60826 ارائه شده‌اند. مقادیر ضرایب کاهش ارائه شده در IEC برای تمام دوره‌های بازگشت، یکسان هستند. در واقع مقادیر ضرایب فوق، دو ناحیه خطی را در منحنی‌های خطر دربر می‌گیرند که متناظر با دو حالت بار استاندارد IEC هستند. این دو ناحیه برای دوره‌های بازگشت مختلف در شکل ۷ الی شکل ۹ بصورت خطوط سیاه رنگ نشان داده شده‌اند. همانطور که در اشکال فوق قابل مشاهده است، منحنی‌های خطر در اغلب ایستگاه‌ها پایین‌تر

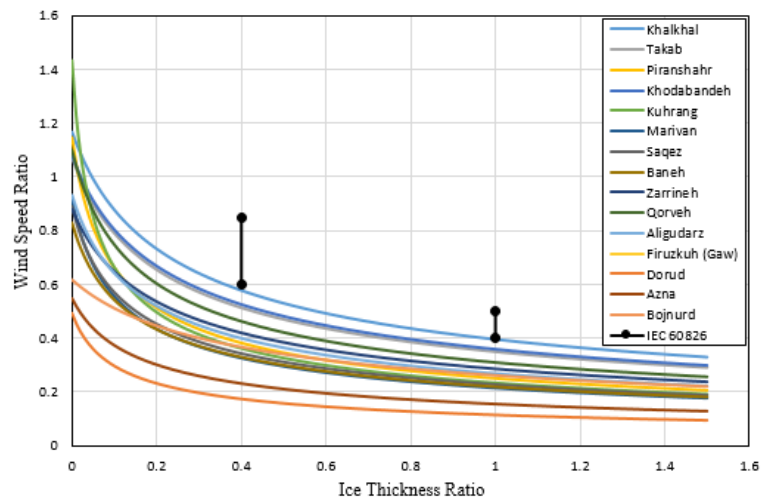
می‌یابند. ایستگاه‌های مربوط به منحنی‌های حداکثر و حداقل نیز الزاماً در دوره‌های بازگشت مختلف یکسان نیستند. بالاترین (حداکثر) منحنی‌های خطر در دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال، به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های فیروزکوه (منطقه سنگین)، خدابنده (منطقه سنگین) و خلخال (منطقه فوق سنگین) است. از طرف دیگر پایین‌ترین منحنی‌های خطر نیز در تمام دوره بازگشت، مربوط به ایستگاه درود (در منطقه فوق سنگین) است. پایین رفتن منحنی می‌تواند به دلیل بالا بودن مقادیر حدی پارامترهای باد و یخ (بطور مستقل) باشد که مقادیر همزمان نسبت به آنها، کوچک می‌شوند.



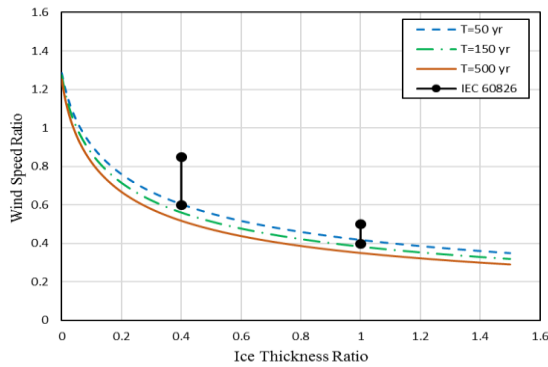
شکل ۷. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان نرمال شده به مقادیر حدی مرجع برای کل ایستگاه‌ها (۵۰ ساله)  
Fig. 7. Normalized ice and wind hazard curves to reference values for all stations (T=50 year)



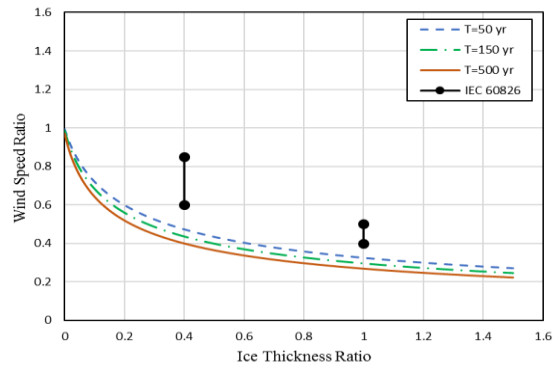
شکل ۸. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان نرمال شده به مقادیر حدی مرجع برای کل ایستگاه‌ها (۱۵۰ ساله)  
Fig. 8. Normalized ice and concurrent wind hazard curves to reference values for all stations (T=150 year)



شکل ۹. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان نرمال شده به مقادیر حدی مرجع برای کل ایستگاه‌ها (۵۰۰ ساله)  
Fig. 9. Normalized ice and concurrent wind hazard curves to reference values for all stations (T=500 year)



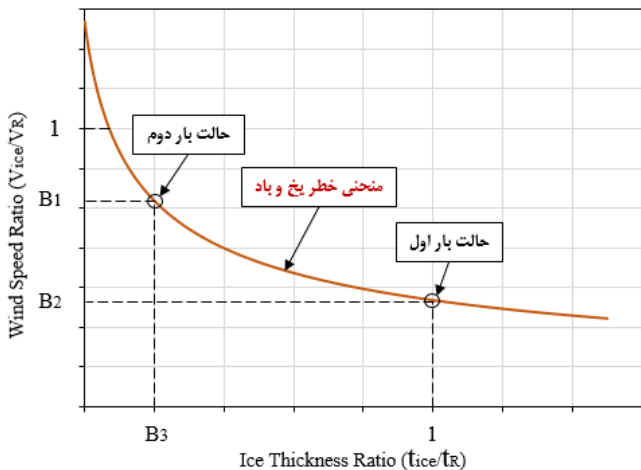
ب) میانگین بعلاوه انحراف استاندارد منحنی‌های خطر (۸۴ درصد)



الف) میانگین منحنی‌های خطر (۵۰ درصد)

شکل ۱۰. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان ۵۰ و ۸۴ درصد کل ایستگاه‌ها (نرمال شده به مقادیر حدی مرجع)

Fig. 10. 50 and 84 percentile ice and concurrent wind hazard curves for all stations (Normalized to reference values)



شکل ۱۱. شکل شماتیک مفهوم ضرایب کاهش مورد استفاده در حالات بارگذاری یخ و باد همزمان در استاندارد IEC 60826

Fig. 11. Schematic figure of reduction factor concept in the wind and ice loading cases in IEC60826 standard

گردند. بدین منظور با استفاده از منحنی‌های خطر نرمال شده در ایستگاه‌های مورد بررسی، ضرایب مورد نظر محاسبه گردیده و مقدار میانگین بعلاوه یک انحراف استاندارد آنها (بر اساس منحنی شکل ۱۰-ب) به عنوان ضرایب پیشنهادی در بارگذاری ارائه گردیده‌اند. ضرایب کاهش یخ و باد که بصورت مفهومی با استاندارد IEC 60826 سازگار هستند به شرح زیر می‌باشند:

- ضریب  $B_1$ : نسبت سرعت باد حدی در زمان‌های یخ‌زدگی (با دوره بازگشت  $T$ ) به سرعت باد مرجع (با دوره بازگشت  $T$ )
- ضریب  $B_2$ : نسبت سرعت باد متناظر با ضخامت یخ مرجع (با دوره بازگشت  $T$ ) به سرعت باد مرجع (با دوره بازگشت  $T$ )

از ضرایب IEC قرار داشته و بنابراین، ضرایب IEC در اکثر ایستگاه‌های منتخب محافظه‌کارانه هستند. همچنین این محافظه‌کاری با افزایش دوره بازگشت، بیشتر می‌شود.

#### ۴-۱- بررسی آماری منحنی‌های خطر در ایستگاه‌های مورد مطالعه

منحنی‌های خطر میانگین (منحنی ۵۰ درصد) و میانگین بعلاوه یک انحراف استاندارد (منحنی ۸۴ درصد) برای کل ایستگاه‌های مورد بررسی، به ترتیب در شکل ۱۰ الف و ب ارائه شده‌اند. محدوده ضرایب کاهش یخ و باد استاندارد IEC 60826 نیز در این اشکال مشخص شده‌اند. همانطور که در اشکال فوق مشاهده می‌شود، منحنی‌های میانگین برای تمام دوره‌های بازگشت پایین‌تر از ضرایب IEC قرار دارند. منحنی میانگین بعلاوه یک انحراف استاندارد به ازای دوره بازگشت ۵۰ سال تقریباً بر مقادیر حداقل ضرایب منطبق بوده و دوره‌های بازگشت بالاتر، پایین‌تر از ضرایب IEC قرار می‌گیرند. بر این اساس مشخص است که مقادیر ضرایب کاهش یخ و باد ارائه شده در استاندارد IEC برای مناطق سنگین و فوق‌سنگین کشور، محافظه‌کارانه هستند.

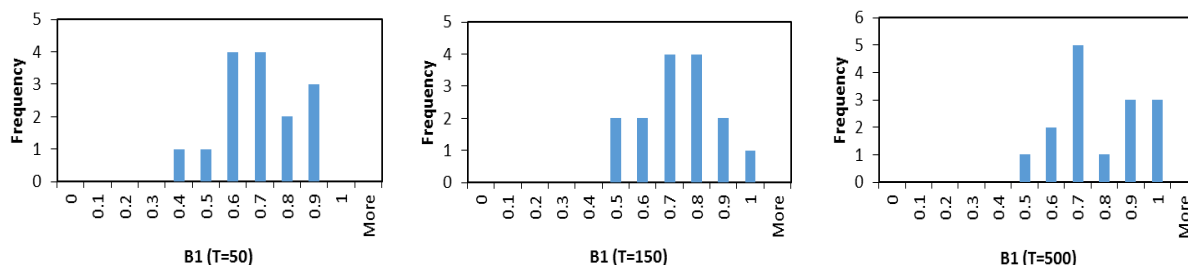
#### ۴-۲- ارائه ضرایب کاهش پیشنهادی برای حالات بارگذاری یخ و باد همزمان

با توجه به محافظه‌کارانه بودن مقادیر ضرایب کاهش یخ و باد IEC 60826 برای اغلب مناطق سنگین و فوق‌سنگین کشور، این ضرایب برای استفاده در کشور مناسب نیستند. ازاینرو لازم است تا ضرایب مناسب بر اساس منحنی‌های خطر یخ و باد تعیین و ارائه



جدول ۲. مقادیر ضرایب کاهش یخ و باد در ایستگاه‌های مورد بررسی  
Table 2. The values of reduction factors in the studied stations

B <sub>3</sub>			B <sub>2</sub>			B <sub>1</sub>			نام ایستگاه
۵۰ ساله	۱۵۰ ساله	۵۰۰ ساله	۵۰ ساله	۱۵۰ ساله	۵۰۰ ساله	۵۰ ساله	۱۵۰ ساله	۵۰۰ ساله	
۰.۲۹	۰.۲۰	۰.۱۱	۰.۴۶	۰.۴۳	۰.۳۹	۰.۷۲	۰.۸۰	۰.۸۷	خلخال
۰.۱۱	۰.۰۸	۰.۰۶	۰.۳۰	۰.۲۶	۰.۲۳	۰.۷۸	۰.۷۹	۰.۸۷	کوه‌رنگ
۰.۲۹	۰.۱۸	۰.۱۲	۰.۴۱	۰.۳۸	۰.۳۵	۰.۶۶	۰.۷۱	۰.۸۱	تکاب
۰.۲۶	۰.۱۹	۰.۱۴	۰.۳۲	۰.۲۸	۰.۲۵	۰.۵۷	۰.۵۸	۰.۷۶	پیرانشهر
۰.۱۵	۰.۰۹	۰.۰۵	۰.۴۳	۰.۳۹	۰.۳۶	۰.۸۱	۰.۸۷	۰.۵۹	خداپنده
۰.۱۳	۰.۰۹	۰.۰۶	۰.۲۷	۰.۲۴	۰.۲۱	۰.۶۰	۰.۶۳	۰.۹۲	مریوان
۰.۱۶	۰.۰۹	۰.۰۵	۰.۲۸	۰.۲۵	۰.۲۳	۰.۵۷	۰.۶۲	۰.۶۵	سقز
۰.۰۹	۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۲۶	۰.۲۴	۰.۲۲	۰.۶۱	۰.۶۴	۰.۶۶	بانه
۰.۱۱	۰.۰۵	۰.۰۲	۰.۳۵	۰.۳۱	۰.۲۹	۰.۷۰	۰.۷۶	۰.۶۷	زرینه
۰.۰۶	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۳۶	۰.۳۳	۰.۳۱	۰.۸۸	۰.۹۸	۰.۸۲	قروه
۰.۲۲	۰.۱۵	۰.۱۱	۰.۳۲	۰.۲۹	۰.۲۷	۰.۵۶	۰.۶۰	۰.۹۷	الیگودرز
۰.۲۴	۰.۱۶	۰.۱۱	۰.۴۷	۰.۴۳	۰.۳۹	۰.۸۳	۰.۸۸	۰.۶۳	فیروزکوه
۰.۰۷	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۱۴	۰.۱۳	۰.۱۱	۰.۳۸	۰.۴۲	۰.۹۳	درود
۰.۰۶	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۱۹	۰.۱۷	۰.۱۵	۰.۴۶	۰.۴۹	۰.۴۶	ازنا
۰.۰۷	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۳۳	۰.۲۹	۰.۲۶	۰.۶۰	۰.۶۵	۰.۵۲	بجنورد
۰.۱۶	۰.۱۰	۰.۰۶	۰.۳۲	۰.۳۰	۰.۲۷	۰.۶۵	۰.۷۰	۰.۷۳	میانگین
۰.۰۸	۰.۰۷	۰.۰۵	۰.۰۹	۰.۰۹	۰.۰۸	۰.۱۴	۰.۱۵	۰.۱۵	انحراف استاندارد



شکل ۱۲. نمودار فراوانی (هیستوگرام) مقادیر ضریب B<sub>1</sub> در دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال  
Fig. 12. Histogram of B<sub>1</sub> factor in the 50, 150 and 500 year return periods

در ضریب B<sub>p</sub>

۲. حالت بار دوم: ضخامت یخ مرجع در ضریب B<sub>p</sub> به همراه

سرعت باد مرجع در ضریب B<sub>p</sub>

حالت‌های بار فوق نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.

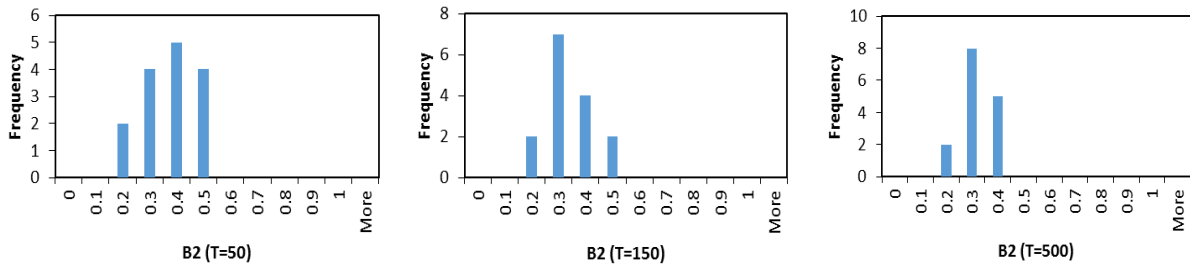
مقادیر ضرایب مورد نظر بر اساس منحنی‌های خطر برای ایستگاه‌های مورد بررسی به ازای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همانطور که در جدول فوق قابل

• ضریب B<sub>p</sub>: نسبت ضخامت یخ متناظر با سرعت باد حدی در

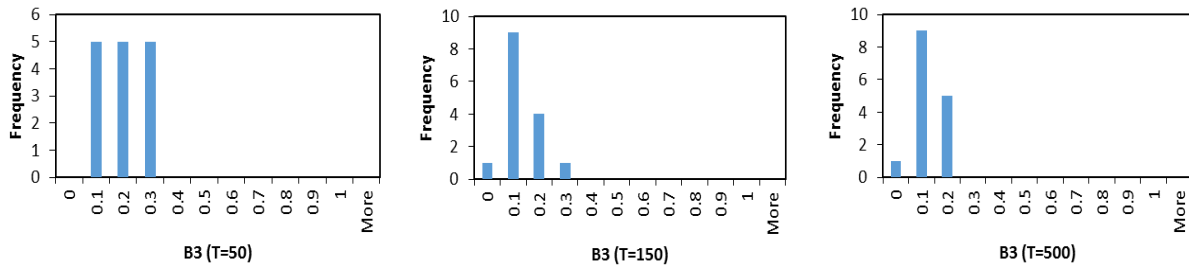
زمان‌های یخ‌زدگی (با دوره بازگشت T) به ضخامت یخ مرجع (با دوره بازگشت T)

مفهوم ضرایب فوق بصورت شماتیک در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر این اساس، حالت‌های بارگذاری یخ و باد بر حسب مقادیر حدی مرجع بصورت زیر خواهند بود:

۱. حالت بار اول: ضخامت یخ مرجع به همراه سرعت باد مرجع



شکل ۱۳. نمودار فراوانی (هیستوگرام) مقادیر ضریب  $B_2$  در دوره های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال  
 Fig. 13. Histogram of  $B_2$  factor in the 50, 150 and 500 year return periods



شکل ۱۴. نمودار فراوانی (هیستوگرام) مقادیر ضریب  $B_3$  در دوره های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال  
 Fig. 14. Histogram of  $B_3$  factor in the 50, 150 and 500 year return periods

جدول ۳. مقادیر پیشنهادی ضرایب کاهش یخ و باد برای بارگذاری خطوط انتقال در مناطق سنگین و فوق سنگین کشور

Table 3. Proposed values of reduction factors for combined wind and ice loading of transmission lines in cold regions of the country

مقدار متناظر در IEC 60826	دوره بازگشت			ضریب کاهش
	۵۰ سال	۱۵۰ سال	۵۰۰ سال	
۰.۶~۰.۸۵	۰.۸۰	۰.۸۵	۰.۹۰	$B_1$
۰.۴~۰.۵	۰.۴۵	۰.۴۰	۰.۳۵	$B_2$
۰.۴	۰.۲۵	۰.۱۵	۰.۱۰	$B_3$

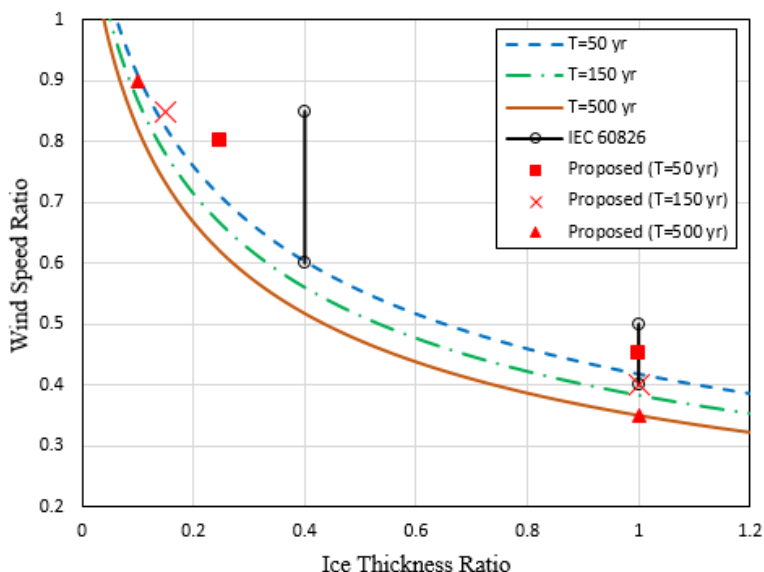
ارائه شده‌اند.

همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، مقادیر ضرایب  $B_1$  و  $B_2$  در دوره‌های بازگشت مختلف، به ترتیب نزدیک به کران‌های بالا و پایین بازه ضرایب IEC است. از طرف دیگر، مقادیر ضریب  $B_3$  در دوره‌های بازگشت مختلف به مقدار نسبتاً قابل توجهی (۳۵ الی ۷۵ درصد) کمتر از ضریب IEC است. جهت مقایسه بهتر، مقادیر ضرایب پیشنهادی به همراه ضرایب متناظر در IEC، در کنار منحنی‌های خطر ۸۴ درصد (میانگین بعلاوه یک انحراف استاندارد ایستگاه‌های مورد مطالعه)، در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند. بر اساس این شکل، ضرایب پیشنهادی دارای محافظه‌کاری کمتری نسبت به ضرایب IEC بوده (بخصوص در حالت دوم بارگذاری) و انطباق بهتری با

مشاهده است، با افزایش دوره بازگشت، ضریب  $B_1$  افزایش و ضرایب  $B_2$  و  $B_3$  کاهش می‌یابند.

توزیع فراوانی (هیستوگرام) مقادیر ضرایب مذکور نیز در شکل ۱۲ الی شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود، میزان پراکندگی در مقادیر ضریب  $B_1$  بالاتر از سایر ضرایب است.

مقدار گرد شده میانگین بعلاوه یک انحراف استاندارد ضرایب در ایستگاه‌های مورد بررسی به عنوان ضرایب پیشنهادی برای بارگذاری حالت یخ و باد همزمان در خطوط انتقال نیروی مناطق سنگین و فوق سنگین کشور تعیین و در جدول ۳ ارائه شده‌اند. مقادیر ضرایب متناظر ارائه شده در IEC 60826 نیز در این جدول برای مقایسه



شکل ۱۵. مقادیر ضرایب کاهش پیشنهادی در مقایسه با منحنی‌های خطر ۸۴ درصد یخ و باد همزمان و ضرایب IEC 60826  
 Fig. 15. proposed reduction factors compared to 84 % hazard curves and IEC60826 factors

جدول ۴. مقادیر متغیرهای بارگذاری و نیروهای وارد بر کراس‌آرم دکل نمونه در حالت بارگذاری یخ و باد همزمان  
 Table 4. The values of loading parameters and applied forces on the sample cross-arm in the wind and ice load case

حالت بارگذاری	ضخامت یخ (میلیمتر)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	نیروی قائم (نیوتن)	نیروی افقی (نیوتن)	نیروی برآیند (نیوتن)
حالت اول IEC	$t_R=80$	$B_2 \times V_R=13.5$	۲۶۶۷۵	۵۰۲۷	۲۷۱۴۴.۵
حالت دوم IEC	$B_3 \times t_R=20$	$B_1 \times V_R=24$	۴۵۲۵	۵۲۹۶	۶۹۶۵.۸
حالت یخ و باد آئین‌نامه فعلی ایران	۱۵	۲۰	۳۶۷۵	۳۰۶۵	۴۷۸۵.۴

به ترتیب برابر ۳۰ متربر ثانیه و ۸۰ میلیمتر منظور شده‌اند. با استفاده از مفروضات فوق، مقادیر پارامترهای بارگذاری (ضخامت یخ و سرعت باد) در دو حالت یخ و باد همزمان با استفاده از ضرب مقادیر مرجع در ضرایب کاهش پیشنهادی محاسبه شدند. سپس با استفاده از این مقادیر، نیروهای قائم<sup>۱</sup> (حاصل از وزن سیم هادی و یخ تشکیل شده در دور آن) و افقی<sup>۲</sup> (حاصل از باد وارد بر سیم هادی پوشیده از یخ) وارد بر نوک کراس‌آرم دکل محاسبه شدند. (طبق [۱]) سیم هادی از نوع لینکس با قطر ۲۰ میلیمتر و وزن واحد طول ۸۴۲ گرم بر متر فرض شده است. نتایج محاسبات فوق در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

در جدول فوق، نیروهای قائم و افقی در حالت یخ و باد طبق آئین‌نامه بارگذاری خطوط انتقال کشور [۴] برای مناطق آب و هوایی سنگین نیز، محاسبه و ارائه شده‌اند. با مقایسه نیروهای ارائه شده در

1 Vertical Load  
 2 Transverse Load

منحنی‌های خطر دارند.

#### ۳-۴- مثال کاربردی: بارگذاری یک دهانه خط انتقال در حالت یخ و باد همزمان

در این بخش به منظور نشان دادن نحوه استفاده از ضرایب کاهش پیشنهادی در بارگذاری دکل‌های انتقال، یک دکل آویزی از یک خط انتقال ۶۳ کیلوولتی به عنوان نمونه مورد نظر قرار گرفته و بارهای وارد بر یک کراس‌آرم آن محاسبه شده‌اند. طول دهانه‌های اطراف دکل، ۲۵۰ متر و ارتفاع کراس‌آرم مورد نظر از سطح زمین، ۲۵ متر منظور شده‌اند. خطوط انتقال برق ۶۳ کیلوولتی طبق الزامات IEC 60826 باید برای بارهای جوی با دوره بازگشت ۵۰ سال طراحی شوند. از اینرو با فرض واقع بودن دکل در منطقه سنگین آب و هوایی، مقادیر سرعت باد و ضخامت یخ مرجع ۵۰ ساله با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی،

قابل استفاده هستند.

۲. استفاده از روش ساده شده اول استاندارد IEC 60826 (مقدار حدی مرجع یک متغیر همزمان با مقدار متوسط سالانه متغیر دیگر) در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه، در حالت اول بارگذاری یخ و باد غیرمحافظة کارانه و در حالت دوم محافظه کارانه است.

۳. روش ساده شده دوم استاندارد IEC 60826 (استفاده از مقادیر مرجع متغیرها با اعمال ضرایب کاهش) در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه، در هر دو حالت بارگذاری یخ و باد محافظه کارانه است. همچنین میزان محافظه کاری آن با افزایش دوره بازگشت، بیشتر می‌شود.

۴. با استفاده از منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان تهیه شده و براساس معیارهای استاندارد IEC 60826، مقادیر پیشنهادی ضرایب کاهش برای تعیین متغیرهای بارگذاری خطوط انتقال در حالت یخ و باد همزمان ارائه گردیدند. ضرایب مذکور در دوره‌های بازگشت مختلف و برای مناطق سنگین و فوق سنگین کشور تعیین شده‌اند. با استفاده از این ضرایب و مقادیر حدی مرجع ضخامت یخ و سرعت باد (که در نقشه‌های پهنه‌بندی موجود هستند)، مقادیر متغیرهای بارگذاری یخ و باد همزمان قابل محاسبه می‌باشند. مقادیر ضرایب پیشنهادی نسبت به مقادیر متناظر در IEC 60826 دارای محافظه کاری کمتری بوده و انطباق بهتری با شرایط آب و هوایی کشور دارند.

## فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$B_1$	ضرایب کاهش مربوط به حالات بارگذاری یخ و باد همزمان
$B_2$	
$B_3$	
$C$	ضریب ترکیبی باد
$D$	قطر هادی بر حسب میلی‌متر
$F_i$	حداکثر نیروی باد وارد بر واحد طول هادی یخ‌زده در طول زمان وقوع رویداد یخ‌زدگی $i$ ام بر حسب نیوتن بر متر
$F_{max}(T)$	مقدار حدی حداکثر سالانه نیروی باد وارد بر هادی یخ زده متناظر با دوره بازگشت $T$ بر حسب نیوتن بر متر
$P$	شدت بارش بر حسب متر بر ساعت
$t$	مدت زمان بارش بر حسب ثانیه
$T$	دوره بازگشت بر حسب سال
$t_{ice-i}$	حداکثر ضخامت یخ در طول زمان وقوع رویداد یخ‌زدگی $i$ ام بر حسب میلی‌متر

جدول فوق، مشخص می‌شود که نیروهای حالت بار یخ و باد طبق آئین‌نامه ایران به حالت دوم IEC نزدیکتر بوده و برآیند آنها به میزان ۳۱ درصد از آن کمتر هستند. بر این اساس، استفاده از آئین‌نامه ایران در این مثال، منجر به حصول نتایج غیرمحافظه کارانه شده و قابلیت اطمینان دکل نسبت به مقدار مورد نظر طراحی، کمتر خواهد شد. این مثال، ضرورت انجام بازنگری در مقادیر پارامترهای بارگذاری خطوط انتقال، منطبق بر شرایط آب و هوایی کشور را نشان می‌دهد. در صورت نیاز به محاسبه نیروهای حاصل از یخ و باد در حالتی بجز دو حالت استاندارد IEC، (مثلاً در نواحی میانی منحنی خطر) می‌توان مستقیماً از منحنی‌های خطر (شکل ۱۰) استفاده نموده و ضرایب کاهش را تعیین و استفاده نمود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پارامترهای مورد نیاز برای بارگذاری خطوط انتقال نیروی برق در حالت یخ و باد همزمان، برای مناطق سنگین و فوق سنگین کشور بر اساس مفاهیم استاندارد IEC 60826 تعیین و ارائه شده‌اند. پارامترهای بارگذاری مورد نظر شامل ضخامت یخ و سرعت باد همزمان با آن به ازای دوره‌های بازگشت مشخص، می‌باشند. بدین منظور، منحنی‌های دومتغیره خطر یخ و باد با استفاده از داده‌های ثبت شده در ۱۵ ایستگاه هواشناسی منتخب و شبیه‌سازی وقوع رویدادهای یخ‌زدگی در آنها، تهیه شدند. با استفاده از منحنی‌های خطر یخ و باد، ضرایب کاهش برای حالت بارگذاری یخ و باد همزمان طبق استاندارد IEC 60826 جهت استفاده در بارگذاری خطوط انتقال در مناطق سنگین و فوق سنگین کشور تعیین و ارائه گردیدند. خلاصه نتایج حاصله عبارتند از:

۱. منحنی‌های خطر یخ و باد همزمان متناظر با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ سال برای ۱۵ ایستگاه هواشناسی منتخب، به همراه منحنی‌های میانگین (۵۰ درصد) و میانگین بعلاوه یک انحراف استاندارد (۸۴ درصد) ارائه شده‌اند. منحنی‌های خطر در دو نوع شامل منحنی‌های با مقادیر مطلق ضخامت یخ و سرعت باد همزمان با آن، و منحنی‌های با مقادیر ضخامت یخ و سرعت باد نرمال شده به مقادیر حدی مرجع آنها ارائه شده‌اند. این منحنی‌ها برای تعیین دقیق متغیرهای بارگذاری خطوط انتقال (و یا ضرایب کاهش) در حالت یخ و باد همزمان، در سطوح مختلف قابلیت اطمینان (دوره بازگشت)

195-206.

- [8] S.S.G. Krishnasamy, M. Tabatabai, Wind loads on bare and ice-covered overhead conductors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36 (1990) 171-180.
- [9] S. Krishnasamy, S. Kulendran, Combined wind and ice loads from historical extreme wind and ice data, *Atmospheric research*, 46(1-2) (1998) 123-129.
- [10] M. Farzaneh, K. Savadjiev, J. Druetz, Icing event occurrence in Quebec: Statistical analysis of field data, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 11(01) (2001).
- [11] K. Savadjiev, M. Farzaneh, Probabilistic model of combined wind and ice loads on overhead power line conductors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(4) (2003) 704-710.
- [12] M. Farzaneh, *Atmospheric icing of power networks*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [13] Y. Zhang, Analysis of rime ice accumulation at Mont Belair and design of transmission lines, Ms.C Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal. (2006).
- [14] W. Henson, R. Stewart, Severity and return periods of icing events in the Montreal area, *Atmospheric research*, 84(3) (2007) 242-249.
- [15] B. Wareing, S. Fikke, A UK Probabilistic Wind/Ice Map, in: 14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 2011.
- [16] S. Maralbashi-Zamini, Developing neural network models to predict ice accretion type and rate on overhead transmission lines= Développement de réseaux de neurone [s] pour la prédiction du type et du taux de glace accumulée sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique, Ms.C Thesis. The University of Quebec, Canada. 2007.
- [17] W.J. Xu, H.M. Yang, M.Y. Lai, S. Wang, The Probabilistic Method of Failure Analysis to Transmission Facilities under Ice Storms, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2010, pp. 1525-1528.
- [18] H. Yang, C. Chung, J. Zhao, Z. Dong, A probability model of ice storm damages to transmission facilities, *IEEE*

مقدار حدی ضخامت یخ همراه با باد با سرعت  $V_{ice}(T)$  بر حسب میلیمتر  $t_{ice}(T)$

ضخامت یخ شعاعی معادل مرجع (حدی) با دوره بازگشت مشخص  $T$  (بر اساس حداکثر سالانه ضخامت یخ) بر حسب میلیمتر  $t_R$

متوسط سرعت افقی روزانه باد بر حسب متر بر ثانیه  $U$

حداکثر سرعت باد در طول زمان وقوع رویداد یخ زدگی  $i$  ام بر حسب متر بر ثانیه  $V_{ice-i}$

مقدار حدی سرعت باد همزمان با یخ به ضخامت  $t_{ice}(T)$  بر حسب متر بر ثانیه  $V_{ice}(T)$

سرعت باد مرجع (حدی) با دوره بازگشت مشخص  $T$  (بر اساس حداکثر سالانه سرعت باد مستقل از وجود یخ) بر حسب متر بر ثانیه  $V_R$

حداکثر سالانه سرعت باد در زمان های وقوع یخ زدگی  $V_{wic}$

سرعت قائم بارش ذرات برف بر حسب متر بر ثانیه  $W$

#### علائم یونانی

ضریب چسبندگی برف مرطوب به سیم هادی  $\beta$

قطر یخ تشکیل شده دور سیم هادی بر حسب متر  $\phi$

قطر اولیه سیم هادی بر حسب متر  $\phi_0$

نرخ وقوع رویداد یخ زدگی بر حسب تعداد در سال  $\lambda$

چگالی برف مرطوب بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب  $\rho_s$

#### مراجع

- [1] IEC, IEC-60826-2003: Design Criteria of Overhead Transmission Lines, in, International Electrotechnical Commission Geneva, Switzerland, 2003.
- [2] C.J. Wong, M.D. Miller, Guidelines for electrical transmission line structural loading, in, American Society of Civil Engineers, 2009.
- [3] T.A. EDITION, 2017 National Electrical Safety Code (NESC-C2), (2017).
- [4] Tavanir, "Standard for Loading of Overhead Transmission Line Towers": Moshanir Co., (1998). (In Persian)
- [5] K. Jones, R. Thorkildson, J. Lott, The development of the map of extreme ice loads for ASCE Manual 74, in: *Electrical transmission in a new age*, 2002, pp. 9-31.
- [6] P. Musilek, P. Pytlak, E. Lozowski, D. Arnold, J. Toth, Wind and Ice Load Model Using Numerical Weather Prediction. In Proc. 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures IWAIS 2009, 8-11 September, (2009), Andermatt, Switzerland.
- [7] P. McComber, G. Morin, R. Martin, L.V. Van, Estimation of combined ice and wind load on overhead transmission lines, *Cold Regions Science and Technology*, 6(3) (1983)

- Archives of Civil Engineering, 62(4) (2016) 205-230.
- [23] H. Nguyen Sinh, F.T. Lombardo, C.W. Letchford, D.V. Rosowsky, Characterization of joint wind and ice hazard in Midwestern United States, *Natural Hazards Review*, 17(3) (2016) 04016004.
- [24] H.N. Sinh, F.T. Lombardo, C. Letchford, Multivariate simulation for assessing the joint wind and ice hazard in the United States, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 184 (2019) 436-444.
- [25] Tavanir, "Map of Zoning of the Four Climatic Regions in Iran": Moshanir Co., (1999). (In Persian)
- [26] K. Jones, Ice accretion in freezing rain, CRREL Report 96-2, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, (1996).
- Transactions on power delivery, 28(2) (2013) 557-565.
- [19] H. Yang, W. Xu, J. Zhao, D. Wang, Z. Dong, Predicting the probability of ice storm damages to electricity transmission facilities based on ELM and Copula function, *Neurocomputing*, 74(16) (2011) 2573-2581.
- [20] Y. Wang, D.V. Rosowsky, Characterization of joint wind-snow hazard for performance-based design, *Structural safety*, 43 (2013) 21-27.
- [21] D.V. Rosowsky, Y. Wang, Joint wind-snow hazard characterization for reduced reference periods, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(1) (2014) 121-127.
- [22] J. Żurański, A. Sobolewski, An analysis of snow and wind loads combinations based on meteorological data,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.A. Jafari Sahnehsaraei, S. Rezazadeh Baghaal, *Characterization of Ice and Concurrent Wind for Loading of Transmission Line Structures in Iran, Amirkabir J. Civil Eng., 52(11) (2021) 2847-2866.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.16450.6232](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16450.6232)

