



چشم اندازهای آینده برای تولید برق بادی و خورشیدی تحت سناریوهای تغییر اقلیم با وضوح بالا

کیارش کرم نیا^۱، مهرداد موحد پور^{۲*}

گروه مهندسی برق دانشگاه فنی حرفه ای، یاسوج، واحد پسران، ایران،
mehرداد.movahedpoor@gmail.com^۱، kyarash.karamnia.2000@gmail.com^۲

چکیده

تأثیر تغییر اقلیم بر در دسترس بودن و تنوع منابع بادی و خورشیدی برای تولید برق تجدیدپذیر تحت سناریوهای اخیر مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک ارزیابی شد. برای انجام این کار، مدل تحقیق و پیش‌بینی آب و هوا برای انجام شبیه‌سازی‌های آب و هوایی با وضوح بسیار بالا (~ 1 کیلومتر مربع) برای یک سناریوی فعلی و دو سناریوی آینده (2SSP-4.5 و 5SSP-8.5) استفاده شد. سپس از متغیرهای هواشناسی مدل‌سازی‌شده برای محاسبه تغییرات بالقوه آینده در نیروی باد و انرژی فتوولتائیک خورشیدی برای تولید برق برای هر سناریوی تغییر آب و هوا در مقایسه با حال استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش شدید سرعت باد در طول زمستان +45٪ و کاهش 45٪ در طول تابستان است، با تفاوت‌های تولید فصلی آینده برای قدرت باد ~ 100 کیلووات ساعت برای هر دو سناریو. برای تابش خورشیدی، بیشترین تفاوت در طول زمستان (+30٪ تا +45٪ افزایش) با تغییرات تولید فتوولتائیک خورشیدی از 10 کیلووات ساعت تا +20 کیلووات ساعت، بسته به سناریو و فصل متفاوت است. تغییرات فصلی در سرعت باد و تشعشعات خورشیدی حاکی از دست دادن فصلی است که می‌تواند تهدیدی برای ثبات تولید برق تجدیدپذیر در آینده در منطقه باشد و تلاش برای کربن زدایی را دشوارتر کند. این مطالعه اهمیت یک رویکرد جامع در ارزیابی سیستم تولید برق را برجسته می‌کند، زیرا تغییرات فصلی و متناوب بودن برخی از منابع انرژی تجدیدپذیر به طور بالقوه می‌تواند توسط سایرین پوشش داده شود.

کلید واژه ها: باد، خورشیدی، کربن زدایی، سناریوهای اقلیمی، 6CMIP.

1- مقدمه

در طول دهه‌های گذشته، انتشار گازهای گلخانه‌ای انسانی (GHG) در جهان همچنان رو به افزایش بوده است، و اگرچه میزان افزایش آن به اندازه دهه 2000 تا 2010 نیست (افزایش سالانه 2.1٪)، انتشار گازهای گلخانه‌ای همچنان ادامه دارد. یکی از بزرگترین چالش‌های امروز، با افزایش متوسط سالانه 1.3٪، بیشترین سهم از انتشار گازهای گلخانه‌ای را می‌توان به مناطق شهری نسبت داد، جایی که بخش‌های مصرف و تامین انرژی در طول تاریخ بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته‌اند. از سال 2020، بخش تامین انرژی به تنهایی بیش از 30 درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی را به خود اختصاص داده است. P.R. Shukla et al., 2022 در حالی که در اتحادیه اروپا، بخش انرژی (که شامل تامین انرژی و مصرف انرژی می‌شود) بیش از 75٪ (کمسیون اروپا، 2019)، [1] سیاست‌های قرارداد سبز اروپا برای مقابله با چالش کاهش این انتشارات، با جزئیات استراتژی بلندمدت برای خنثی‌سازی کربن، با اهداف کلی دستیابی به انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای تا سال 2050 و حصول اطمینان از رشد اقتصادی اروپا مستقل از منابع است. برای دستیابی به این اهداف، بهبودهای قابل توجهی در بخش انرژی مورد نیاز است، مانند کاهش شدت انرژی در تولید ناخالص داخلی و شدت کربن در انرژی، برق‌رسانی سیستم‌های انرژی، برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای استقرار انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در فعالیت‌های چندانگانه. بخش‌ها (کمسیون اروپا، 2011؛ آژانس بین‌المللی انرژی، 2021). بنابراین، کربن زدایی از عرضه برق و استقرار گسترده انرژی‌های تجدیدپذیر در تامین برق 80٪ تا 95٪ داشته باشد و اخیراً این کار را انجام داده است. هدف کوتاه مدت سهم انرژی‌های تجدیدپذیر برای سال 2030 را از 32 درصد به 40 درصد افزایش داد (کمسیون اروپا، 2021). برآوردهای دقیق از تولید برق آینده بخش مهمی از این اهداف است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا استراتژی‌های قوی‌تر و کارآمدتری برای اجرای منابع انرژی پاک‌تر و افزایش سهم بازار بسازند. با این حال، انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن و متناوب بودن منابع اصلی مانند تابش خورشیدی، در دسترس بودن آب و باد بسیار متغیر است. بنابراین، درک تغییرپذیری این منابع در اقلیم‌های آینده، ما را یک قدم به دستیابی به اهداف تعیین‌شده نزدیک‌تر می‌کند و به کاهش عدم قطعیت هنگام برنامه‌ریزی تاسیسات تجدیدپذیر جدید کمک می‌کند. مجموعه‌ای از سناریوهای آینده وجود دارد که برای درک تأثیرات تغییرات آب و هوایی (CC) و کمک به توسعه بهترین استراتژی‌ها برای توسعه پایدار ایجاد شده است. آخرین تلاش در مجموعه سناریوهای تغییر اقلیم، مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) است که سناریوهای پیچیده اجتماعی-اقتصادی هستند که تغییرات منطقه‌ای آینده را در رشد اقتصادی، برنامه ریزی شهری، سیاست‌های زیست محیطی و پیشرفت‌های تکنولوژیکی همراه با نیروی تشعشع آب و هوایی در نظر می‌گیرند (ریاحی). و همکاران، 2017). این سناریوها در جدیدترین پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP) که در حال حاضر در فاز ششم خود است، استفاده شد. هدف برنامه 6CMIP ارائه شبیه‌سازی‌های مدل اقلیمی از سناریوهای تغییر آب و هوا، ارائه نتایج چند مدلی است که می‌تواند برای ارزیابی تأثیر تغییر آب و هوا برای هر سناریوی SSP مورد استفاده قرار گیرد (ایرینگ و همکاران، 2016). از آنجایی که مدل‌های مختلف آزمایش‌های مشابهی را انجام می‌دهند (سناریوهای تغییر آب و هوا)، برنامه 6 CMIP همچنین بینش ارزشمندی را در مورد عدم قطعیت‌ها و خطاهای مدل ارائه می‌کند. صرف نظر از عدم قطعیت در برآورد مدل، مدل‌های آب و هوای جهانی و منطقه‌ای می‌توانند تمام متغیرهای هواشناسی لازم برای محاسبات تولید برق برای حال و آینده را فراهم کنند (روسو و همکاران، 2022). [12] ثابت شده است که این بهترین رویکرد برای ارزیابی منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین مطالعه پیش‌بینی‌های انرژی تجدیدپذیر در سناریوهای آینده است. با این حال، تعداد کمی از مطالعات تأثیر تغییرات آب و هوایی را بر تولید برق تجدیدپذیر ارزیابی می‌کنند و تعداد کمی از آنها هنوز از داده‌های جدید 6 CMIP استفاده می‌کنند. از ادبیات موجود

مرتبط در مورد این موضوع، مارتینز و ایگلسیاس (2021) تأثیر دو سناریوی تغییر آب و هوا SSP را بر سرعت باد در اروپا ارزیابی کردند و دریافتند که نتایج شبیه‌سازی CMIP 6 کاهش چگالی توان باد را تا 15 درصد برای SSP 5- نشان می‌دهد. 8.5، در حالی که وجود دارد. افزایش و کاهش برابر برای 2SSP-4.5 بسته به منطقه است. در چین، ارزیابی انجام شده توسط Zhuo و همکاران. (2022) به این نتیجه رسیدند که در سناریوی 5SSP-8.5، میانگین سرعت باد سالانه $\sim 4\%$ متفاوت خواهد بود که منجر به کاهش قدرت باد در شمال چین و افزایش تقریباً 2% در جنوب منطقه می‌شود. کاروالیو و همکاران (2021) پیش بینی های انرژی باد را تحت سناریوهای 6CMIP مطالعه کرد و آنها را با 5CMIP مقایسه کرد و نشان داد که سناریوهای جدید به طور قابل توجهی الگوهای فضایی و تغییرات تخمین های باد آینده را تغییر می دهند، به عنوان مثال، پروژه 6CMIP افزایش در جنوب اروپا در طول تابستان را پیش بینی می کند در حالی که 5CMIP افزایش می یابد. برعکس پروژه می کند. کاستویا و همکاران (2023) اثرات این سناریوهای جدید را بر مکمل بودن نیرو بادی و فتوولتائیک خورشیدی در آمریکای شمالی مورد مطالعه قرار دادند و خاطرنشان کردند که 2SSP-4.5 دارای پتانسیل انرژی بادی و خورشیدی کمی بالاتر در مقایسه با 5SSP-8.5 است. [3] با تمرکز بر خورشید، دوتا و همکاران. (2022) [4] تغییر در پتانسیل جهانی فتوولتائیک خورشیدی را در محدوده 10% تا 10% بسته به سناریو و منطقه SSP تعیین کرد، و نتیجه گرفت که افزایش از پیش پیش بینی شده در پوشش ابر، تابش خورشیدی موجود در آسیا را کاهش می دهد. توافق با کاهش ثبت شده توسط نیو و همکاران (2023) [5] و آفریقا، در حالی که افزایش حداکثر دما منجر به افزایش خروجی فتوولتائیک خورشیدی در اروپا و سواحل شرقی آمریکا خواهد شد. در نهایت، برای انرژی آبی، Duratorre و همکاران. (2020) [6] و Bombelli و همکاران. (2021) [7] نشان داد که سناریوهای جدید منجر به تغییرات مثبت در تولید برق آبی در اروپای مرکزی و شرق آفریقا می‌شود، اما تنوع محلی پوشش ابر، دما و بارندگی می‌تواند بر سایت‌های خاص نیروگاه آبی تأثیر منفی بگذارد. به عنوان یک کشور عضو اتحادیه اروپا، پرتغال همچنین تصمیم گرفته اند تا انتشار گازهای گلخانه ای در بخش برق را با دو هدف اصلی کاهش دهند: افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر در مصرف انرژی نهایی به حداقل 85% و کربن زدایی کل عرضه برق (República Portuguesa, 2019). [8] برای دستیابی به این اهداف، منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر در تولید برق RES-E تا سال 2050، انرژی فتوولتائیک خورشیدی متمرکز و غیرمتمرکز، نیروی باد خشکی و فراساحلی، و برق آبی خواهد بود. در حال حاضر، پرتغال دارای RES-E 55 است. $\%$ ، و سهم 34% از انرژی های تجدیدپذیر در استفاده نهایی از انرژی، با بزرگترین مشارکت کنندگان انرژی بادی و برق آبی (APREN, 2021). [9] در حالی که ظرفیت برق آبی به دلیل منافع ژئوپلیتیکی نمی تواند به راحتی افزایش یابد، هنوز هم پتانسیل زیادی برای افزایش تولید انرژی بادی و خورشیدی به ویژه در مناطق فراساحلی. هدف از این مطالعه کمی سازی تغییر در تولید برق آینده این RES-E تحت دو سناریوی تغییرات آب و هوایی SSP، نزدیک به سال هدف بی‌ثباتی کربن در سال 2050، با وضوح بسیار بالا (~ 1 کیلومتر مربع) پیش‌بینی آب و هوا و تحقیقات است. شبیه سازی WRF تا به امروز، مطالعاتی که شامل پرتغال می‌شود، با وضوح بیشتر انجام شده است، که قادر به توصیف دقیق تفاوت‌های منطقه‌ای در داخل این کشور نیست. علاوه بر این، این مطالعه با انجام اولین رویکرد برای ارزیابی منابع تجدیدپذیر با وضوح بسیار بالا با استفاده از داده‌های جدید 6CMIP، و نشان دادن تأثیر افزایش وضوح مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای بر کمی‌سازی RES-E، به ادبیات موجود می‌افزاید. بخش 2 داده ها و روش ها، از جمله اطلاعات راه اندازی مدل WRF، محاسبات برای تخمین های تولید توان و اعتبار سنجی WRF را ارائه می دهد. در بخش 3، نتایج اصلی، یعنی تغییر در سرعت باد و تابش خورشیدی برخورداری، و سپس چگالی نیروی باد و خروجی توان فتوولتائیک خورشیدی بررسی می‌شوند. در نهایت، بخش 4 برخی از پیامدهای یافته های اصلی را بررسی می کند و نتایج مطالعه را خلاصه می کند.

2- داده ها و روش ها

برای این مطالعه، مدل تحقیق و پیش‌بینی آب و هوا برای ارائه مقادیر ساعتی برای سرعت باد، جهت باد، تابش خورشیدی و دما، برای محاسبه تغییرات واقعی در نیروی باد و توان فتوولتائیک خورشیدی در سناریوهای تغییرات آب و هوایی آینده استفاده شد.

1-2- راه اندازی مدل WRF

مدل WRF یک سیستم پیش‌بینی عددی آب و هوای پیشرفته است که توسط NCEP و NCAR توسعه یافته است، که می‌تواند هم برای تحقیقات جوی و هم برای پیش‌بینی عملیاتی استفاده شود، به طور گسترده برای کاربردهای مختلف، در همه مناطق، با تمرکز بر روی استفاده می‌شود. مطالعات هواشناسی و اقلیم شناسی، Skamarock et al., WRF2008 معمولاً [9] برای مطالعات آب و هوای منطقه ای با استفاده از رویکرد کاهش مقیاس پویا استفاده می‌شود و مطالعات مختلف ظرفیت آن را برای تخمین دقیق پارامترهای هواشناسی در منطقه مورد مطالعه نشان داده اند، برای جزئیات بیشتر لطفاً به Cardoso Pereira و همکاران مراجعه کنید. (2020)، [10] کاروالیو و همکاران. (2014، 2017)، [11] García-Valdecasas (2021) Ojeda (2020) Garrido et al [12] و مارتا آلمیدا و همکاران. (2016)، [13] بنابراین، WRF برای یک سناریو از قبل ارسالی و دو سناریوی آتی برای پرتغال اعمال شد تا متغیرهای هواشناسی لازم را برای انجام تخمین‌های پتانسیل تولید توان هر یک از RES-E مورد مطالعه در هر سناریو ارائه دهد. WRF خروجی ساعتی سه‌بعدی دارد. فیلدها برای هر متغیر هواشناسی، ارائه یک مقدار متوسط تخمینی از منابع مورد مطالعه برای کل حوزه مطالعه و هر مرحله زمانی. این رویکرد، اگرچه تغییرپذیری لحظه‌ای باد را کاهش می‌دهد، رایج‌ترین رویکرد برای پیش‌بینی روندهای بلندمدت در تغییر سرعت و جهت باد، و همچنین تشعشعات خورشیدی انباشته شده است. سناریو، 2014، و دو سناریوی تغییرات آب و هوایی SSP، 2SSP-4.5 و 5SSP-8.5. حوزه شبیه‌سازی، سرزمین اصلی و فراساحلی پرتغال است، با وضوح افقی بسیار بالای 1 کیلومتر \times 1 کیلومتر، که مقادیر ساعتی را ارائه می‌کند (شکل 1). وضوح شبیه‌سازی‌ها برای شبیه‌سازی دقیق تولید برق، به‌ویژه برای نیروی باد بسیار مهم است، زیرا تأثیر قابل توجهی از زمین (هم توپوگرافی و هم کاربری زمین) در میدان‌های باد نزدیک به سطح وجود دارد.



شکل (1) دامنه مدل WRF.

سناریوی پایه سال 2014 به این دلیل انتخاب شد که جدیدترین سال از دوره تاریخی است که پیش بینی نشده است و سناریوهای آتی مربوط به سال 2055 است که به عنوان سالی با کمترین ناهنجاری برای سرعت باد، تابش خورشیدی و بارندگی شناسایی شد. (متغیرهای کلیدی برای محاسبات انرژی خورشیدی، نیروی باد و برق آبی) از یک شبیه سازی درشت تر 20 ساله از سال 2046 تا 2066. SSPها انتخاب شدند زیرا به ترتیب سناریوهای توسعه وسط جاده و سوخت فسیلی را نشان می دهند. سناریوی 2SSP-4.5 فرض می کند که توسعه فن آوری های نوآورانه و روندهای اجتماعی-اقتصادی تفاوت قابل توجهی با آنچه در طول تاریخ اتفاق افتاده است، ندارد و منجر به دستیابی برخی مناطق به اهداف تعیین شده توسعه پایدار می شود، در حالی که برخی دیگر قادر به دستیابی به آنها نیستند، بنابراین، وجود دارد. پیشرفت کند اما رضایت بخش است، اما چالش های اصلی اجتماعی-اقتصادی و زیست محیطی همچنان ادامه دارد. در مورد 5SSP-8.5، فرض بر این است که توسعه پایدار با پیشرفت های سریع فناوری و تغییرات اجتماعی هموار خواهد شد، استفاده سریع از سوخت های فسیلی در نتیجه افزایش شدت انرژی و رشد بالای اقتصاد جهانی رخ خواهد داد، در حالی که اصلی ترین عامل اجتماعی-اقتصادی و انتظار می رود چالش های زیست محیطی با پیشرفت های فناوری حل شود. [14]

2-2- محاسبات پتانسیل انرژی

محاسبات برای هر خروجی RES-E با در نظر گرفتن میانگین فناوری فعلی برای برآورد بازده توان واقعی از هر انرژی تجدیدپذیر انجام شد. این روش مناسب ترین رویکرد برای مطالعه تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر تولید برق بالقوه است، زیرا تخمین های واقعی تری را برای خروجی برق ارائه می دهد. علاوه بر این، مزارع بادی تجدیدپذیر معمولاً دارای عمر پیش بینی شده ۲۰ تا ۲۵ سال با مزارع خورشیدی هستند. معمولاً بیش از 25 سال، به این معنی که تأسیسات تجدیدپذیر جدید هنوز نزدیک به سال 2050 فعال خواهند بود. برای توان بادی (WPO)، میانگین ظرفیت نصب شده برای توربین های بادی خشکی و

دریایی به ترتیب 3.5 و 10 مگاوات است. (ایرنا، 2019). یک منحنی توان واقعی برای یک توربین خشکی و فراساحلی نزدیک به این مقادیر استفاده شد، به طور خاص، (3.45-126Vestas MW) (خشکی) و (9.5-164Vestas MW) (دریایی)، که منحنی های قدرت برای آنها هستند. در زیر نشان داده شده است [15] (شکل 2). مقادیر سرعت باد توسط مدل WRF در ارتفاع توپی فرضی 100 متر ارائه شد، که معمولاً در ارزیابی منابع باد استفاده می شود (Akinsanola و همکاران، 2021؛ Carvalho [16]؛ Moemken et al. [18]؛ 2017؛ Matthew and Ohunakin [17]؛ 2021). [19]؛ 2018 وانگ و همکاران، 2020). [20] پانل های فتوولتائیک خورشیدی به شرایط محیطی (دمای هوا، تابش خورشیدی سطح خالص و باد نزدیک به سطح) پاسخ غیر خطی دارند و خروجی آنها به شدت به مشخصات پنل وابسته است. با توجه به ضریب پاسخ دمایی، ضریب ظرفیت و دمای سلول، تشعشعات تابشی بالاتر همیشه برابر با توان خروجی بالاتر نیست. بنابراین، برای تخمین یک خروجی توان فتوولتائیک بالقوه واقعی ((PVO، این مشخصات یک نیاز است. دمای سلول با استفاده از معادله محاسبه می شود. (1) با استفاده از پارامترها و ضریب پاسخ دما از یک پنل خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی پیشرفته، به دنبال آن محاسبه (PVO معادل (2)) با در نظر گرفتن میانگین بازده استاندارد در حال حاضر در بازار (17٪) (گرنات و همکاران، 2021؛ جرز و همکاران، 2015). مقادیر تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد سطحی توسط WRF ارائه شد.

$$T_{\text{cell}} = c_1 + c_2 T_{\text{ambient}} + c_3 G + c_4 ws \quad \text{Equation 1}$$

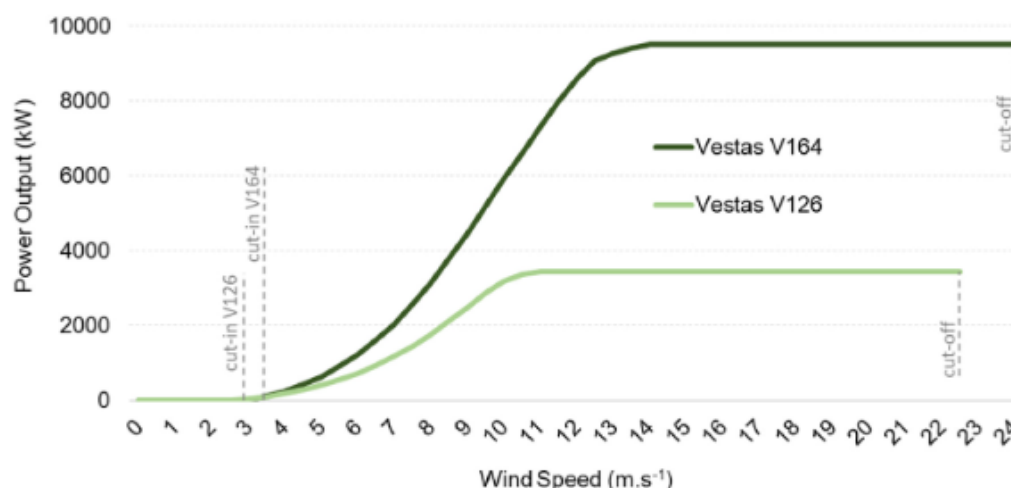
$$PVO = G * \eta_p * [1 + \mu (T_{\text{cell}} - T_r)] \quad \text{Equation 2}$$

منحنی ها و معادلات توان برای هر ساعت و سلول شبکه قبل از هر پردازش بیشتر اعمال شد تا اطمینان حاصل شود که محاسبات پایه برای بالاترین وضوح مکانی و زمانی موجود از خروجی مدل انجام شده است. تغییرات سرعت باد و تابش خورشیدی به ترتیب به عنوان اختلاف میانگین و میانگین درصد و مقایسه خروجی برق به عنوان تفاوت های انباشته شده در هر فصل برای هر RES-E نشان داده می شود.

3-2- اعتبار سنجی شبیه سازی های آب و هوایی با وضوح بالا

برای ارزیابی اینکه آیا می توان شبیه سازی های سناریوهای تغییر اقلیم آینده را با اطمینان تجزیه و تحلیل کرد، دو شبیه سازی کاهش مقیاس پویا WRF برای سناریوی حاضر انجام شد، یکی از مدل های 6CMIP 1.2MPI-ESM (WRF-MPI)-HR و دیگری که توسط تحلیل مجدد 5ERA (WRF-ERA) انجام شده است. شبیه سازی WRF-ERA به عنوان مرجعی برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی WRF-MPI استفاده می شود، اگر تفاوت بین شبیه سازی های تاریخی (WRF-MPI) در مقابل 5WRF-ERA در محدوده قابل قبولی باشد، این به ما اطمینان به WRF-MPI می دهد. نتایج برای سناریوهای آینده اعتبارسنجی فقط برای سناریوی حاضر انجام شد زیرا دوره تاریخی تنها دوره ای است که داده هایی برای اعتبارسنجی در دسترس دارد. این روش قبلاً برای تأیید نتایج WRF-MPI برای شبه جزیره ایبری استفاده شده است، که در آن دامنه این مطالعه گنجانده شده است، برای اطلاعات بیشتر و تجزیه و تحلیل عمیق بین این دو تنظیم به (Marta-Almeida et al., 2016) مراجعه کنید. به طور خلاصه، ثابت شده است که تنظیم WRF-MPI برای مطالعات آب و هوایی آینده در پرتغال به دلیل تفاوت بین WRF-MPI، WRF-ERA و مشاهدات برای یک دوره تاریخی 20 ساله که در محدوده قابل قبولی قرار دارند، کافی است. مقایسه بین هر دو تنظیم برای متغیرهای مورد مطالعه، سرعت باد در 100 متر و تابش خورشیدی برخوردی در سطح، در شکل 3 نشان داده شده است. درصد میانگین ساعتی اختلاف سرعت باد محاسبه شد و من ویتنی (M-W) غیر برای

ارزیابی معنی‌داری آماری تفاوت‌ها (سطح معنی‌داری ۵٪) از آزمون پارامتریک استفاده شد. این آزمون برای مقایسه تفاوت‌های بین دو گروه از داده‌ها که به طور معمول توزیع نمی‌شوند، که در مورد سرعت باد صادق است، با فرض صفر که دو نمونه داده دارای میانه یکسان هستند، اعمال می‌شود. برای تابش خورشیدی، تعداد زیادی از نقاط داده برابر با صفر در طول شب وجود دارد، بنابراین نه میانه و نه آزمون M-W مناسب نیستند زیرا مقدار میانه هر نمونه داده همیشه برابر با صفر است، بنابراین میانگین درصد ساعتی تفاوت دارد. به جای آن محاسبه شد. [20]

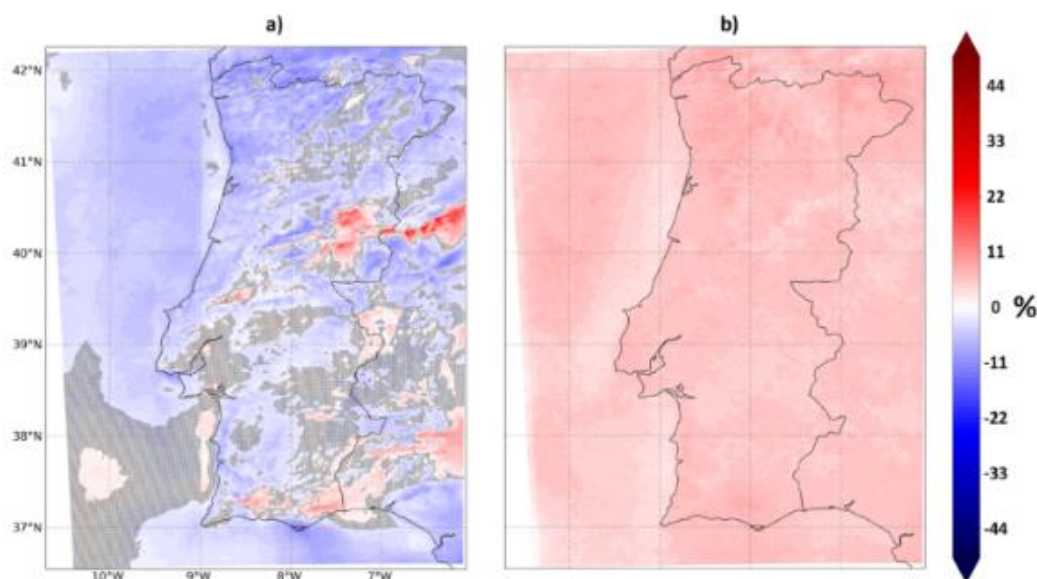


شکل (2) منحنی‌های قدرت برای توربین‌های بادی V126-3.45 خشکی (سبز روشن) و V164-9.5 دریایی (سبز تیره) در خشکی. (برای تفسیر ارجاعات به رنگ در این افسانه شکل، خواننده به نسخه وب این مقاله مراجعه می‌کند.)

تفاوت سرعت باد از ۵٪، عمدتاً در فراساحل و در مناطق مرتفع‌تر در شمال، تا +۱۰٪ برای یک منطقه کوچک در مرکز شمال شرقی پرتغال متغیر است. بخش بزرگی از قلمرو پرتغال نشانه‌های خاکستری را از آزمون آماری M-W نشان می‌دهد که نشان می‌دهد این مناطق تفاوت‌های غیر قابل توجهی در سرعت متوسط باد دارند. به طور کلی، شبیه‌سازی‌های WRF-MPI تمایل به داشتن سرعت باد کمتری نسبت به آنچه با WRF تخمین زده می‌شود دارند. -شبیه‌سازی مرجع ERA-5WRF-ERA نشان می‌دهد که حوزه‌های کل‌حوزه نشان می‌دهد، با بسیاری از مناطق دارای اختلاف میانگین نزدیک یا مساوی صفر است، که نشان می‌دهد WRF-MPI دارای مقادیر متوسط تشعشع خورشیدی بالاتر از 5WRF-ERA است. سرعت باد و تابش خورشیدی هنگام مقایسه این دو تنظیم، تفاوت‌ها در حاشیه قابل قبولی قرار می‌گیرند، بنابراین سطح بالایی از اطمینان در استفاده از شبیه‌سازی‌های WRF-MPI برای ارزیابی‌های سناریوی تغییرات آب و هوایی آینده وجود دارد.

3- تحلیل سناریوی CC

تغییرات پیش‌بینی‌شده در سرعت باد ۱۰۰ متری و تابش خورشیدی برخوردی برای سناریوهای 4.5-2SSP و 8.5-5SSP با حال (2014) مقایسه شد تا تغییرات آینده هر منبعی که مبنای محاسبات تولید برق است ارزیابی شود. درصد تغییرات با استفاده از همان رویکرد مقایسه بین WRF-MPI و WRF-ERA محاسبه شد. تفاوت سرعت باد با استفاده از اختلاف میانگین ساعتی برای هر فصل، با افزودن آزمون آماری M-W ارائه می‌شود و تابش خورشیدی برخوردی به عنوان مقدار میانگین برای هر فصل نشان داده می‌شود. برای WPO و PVO، تحلیل بر تفاوت‌های بین تولید انباشته فصلی تمرکز دارد.



شکل (3) مقایسه بین WRF-MPI و WRF-ERA (الف) اختلاف درصد میانگین ساعتی سرعت باد 100 متری (WRF-MPI - WRF-ERA) برای سال 2014، stippling خاکستری مناطقی را نشان می دهد که تفاوت بین شبیه سازی ها غیر از آن است. با توجه به آزمون آماری من ویتنی معنی دار است. ب) میانگین درصد اختلاف ساعتی تابش خورشیدی تابشی (WRF-MPI - WRF-ERA) برای سال 2014

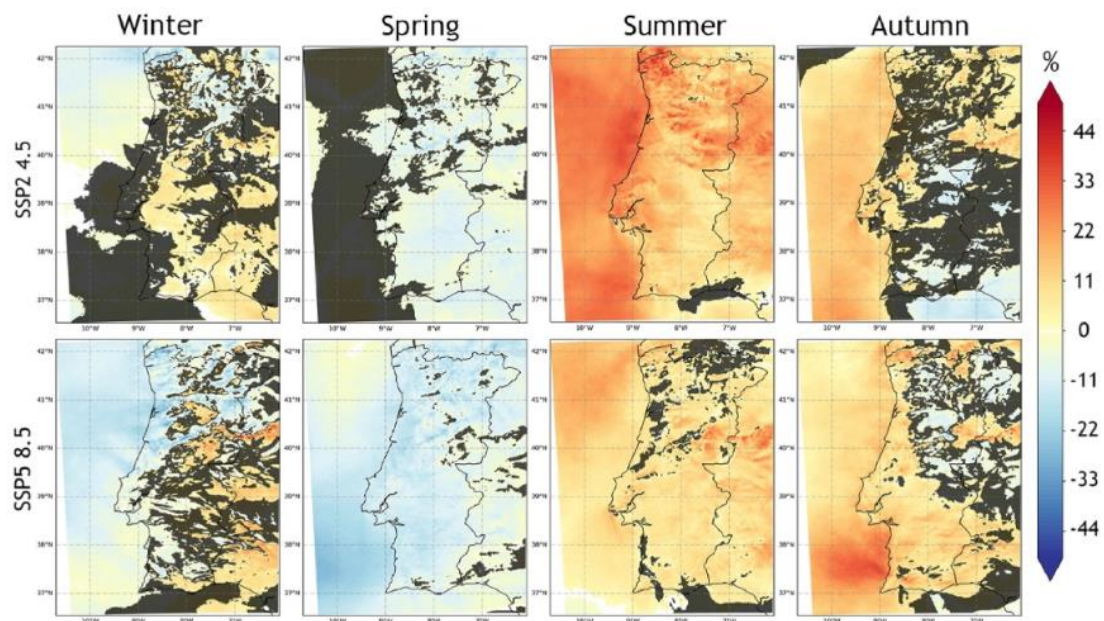
1-3- تفاوت سرعت باد و تابش خورشیدی بر خوردی

شکل (4) تفاوت فضایی تغییرات سرعت باد را برای هر دو SSP و هر فصل از سال، از چپ به راست، زمستان، بهار، تابستان و پاییز نشان می دهد.

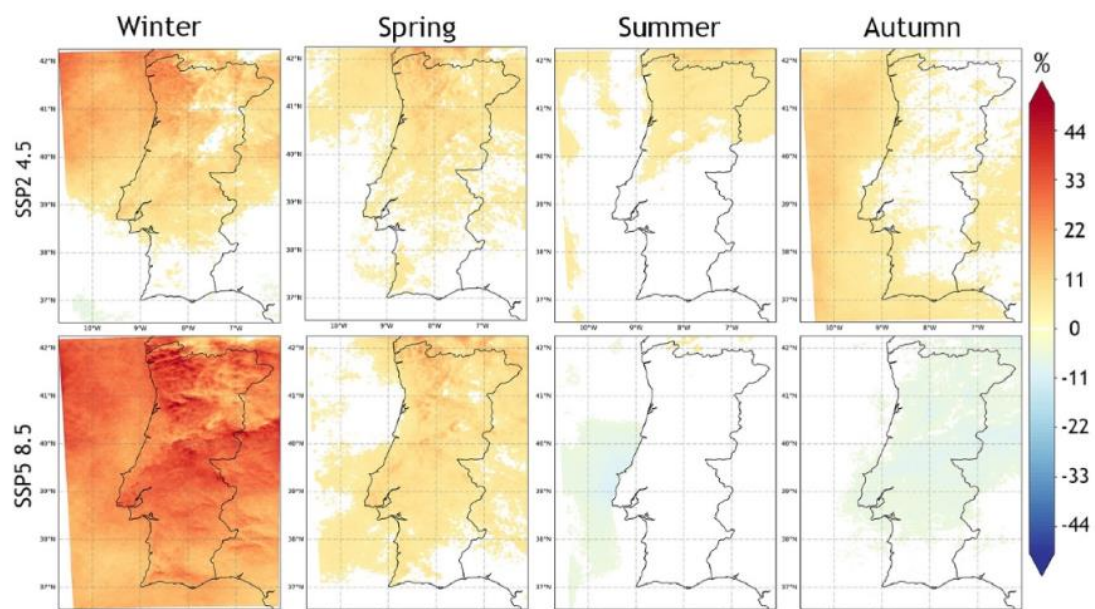
الگوهای فضایی و تغییرات فصلی برای آینده میان مدت (2055) بین سناریوها توافق دارند. زمستان و بهار کاهش کلی در سرعت باد و افزایش در طول تابستان و پاییز را نشان می دهند که نشان دهنده فصلی کمتر در هر دو SSP است. انتظار می رود که ماه های زمستانی SSP 5-8.5 در مکان های دریایی کاهش زیادی داشته باشد، تا 30 درصد، در حالی که برای SSP 2-4.5 اکثر مناطق دریایی تغییرات زیر 10 درصد یا تفاوت های غیر قابل توجهی را طبق آزمون M-W نشان می دهند. در هر دو سناریو، مناطق داخلی افزایش سرعت باد را از 10% تا 20% در طول زمستان نشان می دهند، به ویژه در مرکز و جنوب پرتغال، و برخی مناطق کاهش تا 40% در شمال را برای SSP 5-8.5 نشان می دهند. برای بهار SSP 2-4.5 کاهش کوچکی را برای کل دامنه نشان می دهد (کمتر از 10%)، با بخش قابل توجهی از منطقه دریایی تغییرات غیر قابل توجهی را ثبت می کند SSP 5-8.5. نیز کاهش را نشان می دهد اما با بزرگی بیشتر و تغییرات قابل توجهی در کل منطقه مورد مطالعه، به ویژه در مکان های دریایی در سواحل جنوب غربی و مناطق شمالی با ارتفاع بالاتر (هر دو تا 30%). ماه های تابستان افزایشی را در هر دو سناریو نشان می دهند، بیش از 45% برای SSP 2-4.5 در مرکز، شمال و مکان های فراساحل، و تا 30% در مرکز و شمال برای SSP 5-8.5. ماه های تابستان زمانی هستند که تأثیر شدید بادهای شمالی به ویژه در سواحل شمال غربی پرتغال با افزایش چشمگیر سرعت بادهای ساحلی قابل مشاهده است. بادهای شمالی در سواحل اقیانوس اطلس شبه جزیره ایبری معمولاً از برهمکنش بین پاد سیکلون نیمه گرمسیری بر فراز حوضه اقیانوس اطلس شمالی (یعنی آזור بالا) و یک سیستم حرارتی کم فشار داخلی در شبه جزیره ایبری ناشی می شود، نتایج این مطالعه نشان می دهد که این اثر در میان مدت به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت و به نظر می رسد شواهدی مبنی بر این وجود دارد. [21]

تعامل در آینده قوی تر خواهد شد (Cresswell-Clay et al., 2022). در نهایت، ماه‌های پاییز افزایش بیشتری (تا 25٪) نسبت به کاهش (زیر 15٪) برای هر دو سناریو، اما با برخی تفاوت‌های فضایی نشان می‌دهند. اگرچه تفاوت‌های دریایی بین سناریوها موافق است، 4.5-2SSP کاهش قابل توجهی را در جنوب نشان می‌دهد در حالی که 8.5-5SSP کاهش را در شمال نشان می‌دهد. از بین هر چهار فصل، پاییز تنها فصلی است که در آن تفاوت‌ها انحرافات فضایی قابل توجهی را بین سناریوها در تحلیل نشان می‌دهد. در شکل 5، تفاوت فضایی برای تابش خورشیدی برخوردی برای هر دو SSP و هر فصل از سال نشان داده شده است. برخلاف نتایج برای تغییرات سرعت باد، مقدار کلی تفاوت تابش خورشیدی برخوردی و توزیع فضایی آنها نیست. مشابه بین سناریوهای CC (به جز بهار). افزایش شدید تشعشع در طول فصل زمستان، بالاترین میزان در تمام سال برای هر دو سناریو (تا 30٪ برای 4.5-2SSP و بیش از 45٪ برای 8.5-5SSP)، برای هر دو مکان خشکی و فراساحلی وجود دارد. ارجاعات در بهار بین سناریوها مشابه است و افزایش تا 20٪ را نشان می‌دهد که عمدتاً در شمال دامنه و برخی از مناطق مرکز متمرکز است، در حالی که بقیه دامنه تفاوت‌های زیر 5٪ را نشان می‌دهد. تابستان در 4.5-2SSP افزایش جزئی در شمال حداکثر 10٪ را نشان می‌دهد [22] و تفاوت‌ها برای 8.5-5SSP تغییرات قابل توجهی در مکان‌های داخلی، فقط در مناطق ساحلی بالای آب (10٪) ثبت نمی‌کند. تفاوت‌های پاییزی بین سناریوها هم در تنوع و هم در توزیع فضایی متضاد است، در حالی که 4.5-2SSP افزایش تا 15٪ را برای مناطق فراساحلی و یک تفاوت غیر قابل توجه در اکثر مکان‌های داخلی تخمین می‌زند، 8.5-5SSP نشان می‌دهد.

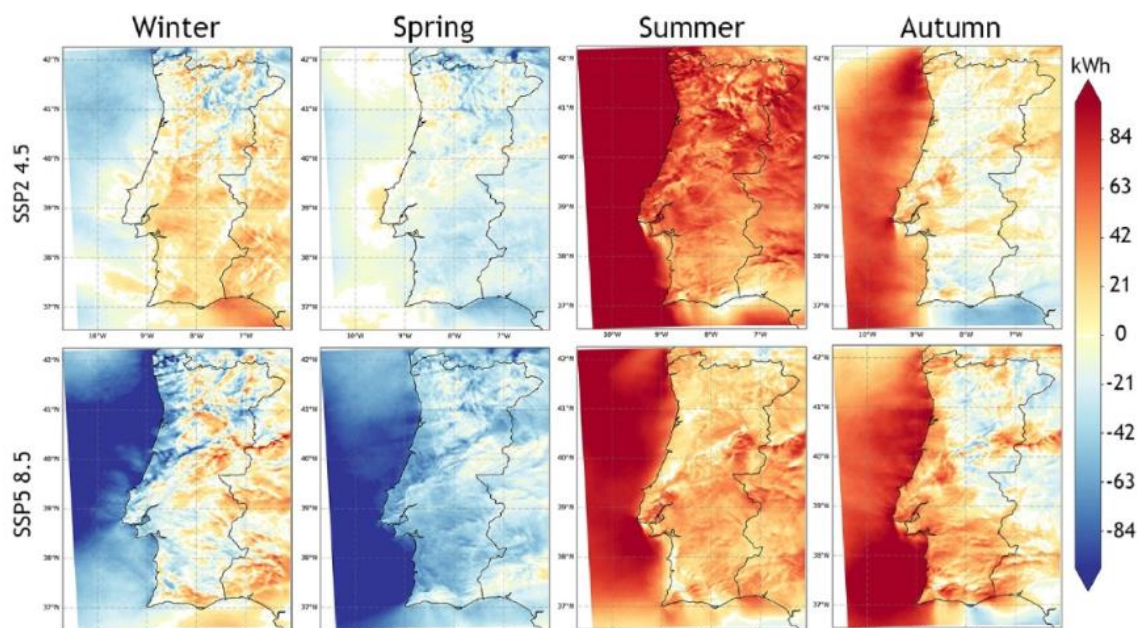
کاهش تا 15 درصد برای سرزمین اصلی پرغال. سناریوی 4.5-2SSP تخمین می‌زند که افزایش تابش خورشیدی تابشی در کل سال بیشتر در طول زمستان و بهار وجود خواهد داشت. به طور مشابه، تفاوت 8.5-5SSP در طول زمستان و بهار افزایش نشان می‌دهد، با این حال، در نیمه دوم سال، کاهش تابش خورشیدی تابشی برای تابستان و پاییز وجود دارد. تغییرات در تابش خورشیدی نیز به الگوهای پیش بارش مرتبط است. پیش‌بینی‌ها برای شبه جزیره ایبری کاهش در آینده را نشان می‌دهد (Duratorre et al., 2020; Russo et al., 2022) که در آن باران و باد کمتر می‌تواند منجر به کاهش پوشش ابر در منطقه شود و منجر به افزایش تابش خورشیدی تابشی شود. به خصوص در ماه‌های زمستان و بهار. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که در طول ماه‌های گرم‌تر یا تغییر غیر قابل توجهی یا کاهش تابش خورشیدی در امتداد ساحل وجود دارد که همراه با افزایش سرعت باد در همان دوره، نشان می‌دهد که پوشش ابری بیشتر در طول تابستان وجود خواهد داشت. [23] در مجموع، نتایج نشان دهنده کاهش سرعت باد در زمستان و بهار و به دنبال آن افزایش در طول تابستان و پاییز است که همراه با تابش خورشیدی در طول زمستان و بهار افزایش می‌یابد (و در برخی از سناریوها برای تابستان و پاییز کاهش می‌یابد، به عنوان مثال، 5SSP-8.5)، از دست دادن فصلی را در طول سال نشان می‌دهد.



شکل (4) میانگین سرعت باد فصلی 100 متر اختلاف درصد ساعتی بین سال 2014 و سناریوهای تغییرات آب و هوایی (از چپ به راست، زمستان، بهار، تابستان و پاییز)، پانل‌های بالایی برای 2014-2SSP-4.5 و پانل‌های پایینی برای سال 2014-5SSP-8.5 هستند. stippling خاکستری مناطقی را نشان می‌دهد که طبق آزمون آماری Mann-Whitney تفاوت بین مجموعه داده‌ها غیر قابل توجه است.



شکل (5) تابش خورشیدی تابشی فصلی میانگین درصد اختلاف ساعتی بین سناریوهای 2014 و تغییرات آب و هوایی (از چپ به راست، زمستان، بهار، تابستان و پاییز)، پانل‌های بالا برای سال 2014-2SSP-4.5 و پانل‌های پایین برای سال 2014-5SSP-8.5 هستند. تفاوت‌های غیر قابل توجه سفید هستند.



شکل (6) تفاوت فصلی WPO انباشته شده بین سناریوهای 2014 و تغییرات آب و هوایی (از چپ به راست، زمستان، بهار، تابستان و پاییز)، پانل های بالا برای سال 2014 - SSP2 4.5 و پانل های پایین برای سال 2014 - SSP5 8.5 هستند. تفاوت های غیر قابل توجه سفید است. [24]

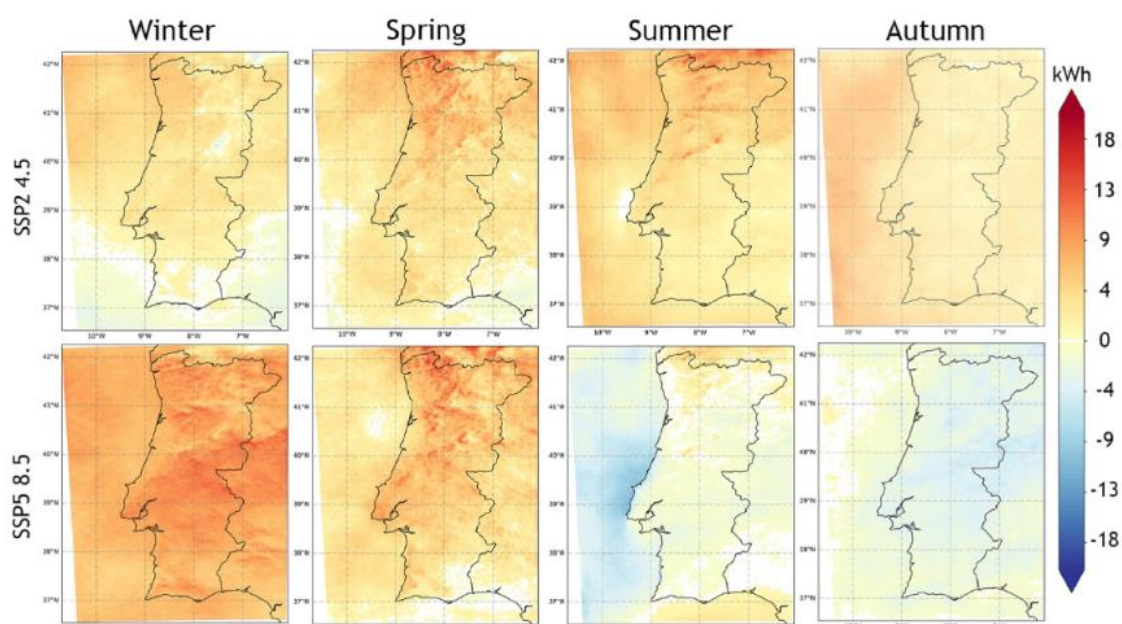
2-3- تغییرات WPO و PVO

برای تولید برق آینده، تفاوت های انباشته فصلی برای هر RES-E محاسبه شد. شکل 6 تفاوت فضایی WPO انباشته شده را برای هر دو SSP و هر فصل از سال نشان می دهد که توسط PVO در شکل 7 دنبال می شود. همان الگوی شکل 4 برای تفاوت های فصلی انباشته شده در WPO بین زمان حال و سال وجود دارد. سناریوهای آینده، با تغییرات جزئی در توزیع فضایی، زیرا منحنی های قدرت برای توربین های بادی غیر خطی هستند. ماه های زمستان و بهار بیشترین کاهش را از نظر WPO به ویژه در مناطق فراساحلی و شمال حوزه مورد مطالعه مشاهده می کنند [25] که از 60 کیلووات ساعت برای SSP2 4.5 تا بیش از 90 کیلووات ساعت برای SSP5 8.5 متغیر است. [33] در حالی که افزایش قابل توجهی در طول زمستان وجود دارد، در مرکز SSP (2-4.5) و شمال SSP (5-8.5) (پرتغال تا +45 کیلووات ساعت، ماه های بهار عمده کاهش را برای کل دامنه مشاهده می کنند، با افزایش های کوچک زیر 10. در مقابل، SSP5 8.5 برای SSP2 4.5 در مناطق فراساحلی کاهش کمتر از 100 کیلووات ساعت در دریا و تا 60 کیلووات ساعت در خشکی را تخمین می زند. نتایج فصل تابستان افزایش شدید تولید برق را نشان می دهد که در حدود +85 کیلووات ساعت SSP (5-8.5) (تا بیش از +100 تخمین زده می شود. [26]

کیلووات ساعت (SSP2 4.5) در مناطق فراساحلی، به ویژه در امتداد ساحل شمال غربی پرتغال و مناطق با ارتفاع بالاتر. همچنین این فصلی است که یک الگو در تفاوت بین سناریوها ظاهر می شود، در SSP2 4.5 تمایل به افزایش در شمال دامنه وجود دارد، در حالی که SSP5 8.5 برعکس را نشان می دهد. این به دلیل تشدید بادهای شمالی در طول ماه های تابستان و پاییز است که در SSP2 4.5 بارزتر است. در حالی که هر دو سناریو افزایش WPO فراساحلی را در طول پاییز نشان می دهند (تا +90 کیلووات ساعت)، در اکثر مکان های داخلی تغییرات فضایی به WPO در پیش بینی های SSP5 8.5 مطلوب تر به نظر می رسد (افزایش +20 کیلووات ساعت به +60 کیلووات ساعت). به جای SSP2 4.5 (30 کیلووات ساعت تا +20 کیلووات

ساعت). هر دو سناریو تفاوت های قابل توجهی را در مقایسه با فعلی تخمین می زنند و تغییرات قابل توجهی را در تنوع درون سالانه خود، به ویژه در مکان های دریایی نشان می دهند. [27]

تغییرات در PVO انباشته شده بسیار کمتر از WPO است که بیشتر به دلیل دو عامل است. اول، تفاوت در تابش خورشیدی کمتر از تغییرات در سرعت باد است، زیرا مقادیر تابش خورشیدی در محدوده 5٪ تا ~10٪ تغییرات برای کل حوزه قرار می گیرد، به استثنای معدود. دوم، توربین های بادی به طور کلی قادر به مهار و کنترل هستند. - تبدیل بیشتر منابع خام به الکتریسیته، به این معنی که اگرچه برخی مناطق درصد تغییرات مشابهی را در تابش خورشیدی برخوردی با سرعت باد نشان دادند، این تغییر منجر به تغییر PVO کمتری نسبت به WPO می شود. [32] هنوز تفاوت های قابل توجهی بین سناریوها وجود دارد. در تجزیه و تحلیل در مورد تنوع درون سالانه و الگوهای عمومی آنها. در حالی که 2SSP-4.5 افزایش در طول سال را پیش بینی می کند، 5SSP-8.5 کاهش فصلی PVO را با افزایش در زمستان و بهار، و در طول تابستان و پاییز کاهش می دهد. [28] برای ماه های زمستان، بزرگترین تغییر برای PVO در مکان های داخلی برای 5SSP-8.5، از +10 کیلووات ساعت به +20 کیلووات ساعت خواهد بود، و در حالی که سناریوی 2SSP-4.5 تغییرات مثبت و منفی را برای PVO زمستانی تخمین می زند، مقادیر نسبتاً پایین در ~5 کیلووات ساعت هستند. [31] همانطور که در شکل 5 مشاهده می شود، بهار تنها فصلی است که در آن هر دو SSP با الگوهای فضایی و تفاوت های مشابه در مقایسه با سناریوی فعلی مطابقت دارند. نتایج نشان دهنده افزایش در کل قلمرو، بیشتر در شمال نسبت به جنوب، از +5 کیلووات ساعت تا +20 کیلووات ساعت است. نتایج متضادی بین سناریوهای مورد مطالعه برای تابستان و پاییز وجود دارد، که در آن PVO تا +20 کیلووات ساعت برای 2SSP-4.5 افزایش می یابد، در شمال برای تابستان و فراساحل برای پاییز، و از 5 کیلووات ساعت به 15 کیلووات ساعت کاهش می یابد. برای 5SSP-8.5 در مکان های دریایی در طول تابستان و مکان های داخلی در طول پاییز. تغییرات برای PVO انباشته شده منعکس کننده همان الگوی تغییرات تابش خورشیدی برای هر سناریو آب و هوایی است. افزایش مورد انتظار در پوشش ابر و افزایش سرعت باد به طور قابل توجهی بر خروجی پانل های فتوولتائیک خورشیدی تأثیر می گذارد و منجر به کاهش خروجی می شود (5SSP-8.5). یا افزایش اندک در شرایط مطلوب تر (2SSP-4.5). [29]



شکل (7) تفاوت فصلی PVO انباشته شده بین سناریوهای 2014 و تغییرات آب و هوایی (از چپ به راست، زمستان، بهار، تابستان و پاییز)، پانل های بالایی برای سال 2014 - 2SSP - 4.5 و پانل های پایینی برای سال 2014 - 5SSP - 8.5 هستند. تفاوت های غیر قابل توجه سفید است. [30]

3-3- ارزیابی کلی

کاهش تفاوت های فصلی می تواند پیامدهای مثبت و منفی برای بخش تولید برق داشته باشد: افزایش سرعت باد در تابستان می تواند تولید برق بادی را بهبود بخشد. افزایش تابش خورشیدی در زمستان می تواند به انرژی خورشیدی کمک کند، که هر دو از کاهش تولید برق در فصل خارج مربوطه خود رنج می برند. در مقابل، این RES-E در طول فصل پرمصرف خود می توانند خروجی طبیعی خود را به دلیل تغییرات مورد انتظار در داخل سالانه کاهش دهند. تنوع منابع برای بخش برق، توازن کلی بین مثبت و منفی را تنها می توان همزمان با تقاضای انرژی ارزیابی کرد، به عنوان مثال، اگر تقاضای انرژی به دلیل کاهش ناشی از CC کاهش یابد، کاهش تولید برق در طول زمستان نمی تواند مشکلی ایجاد کند. [34] نیازهای انرژی برای گرمایش یا تغییرات قابل توجه آتی در الگوهای مصرف انرژی از طریق سیستم های تعرفه یا زمان بندی مختلف. انتظار این است که به دلیل افزایش دمای کلی برای سناریوهای آینده، افزایش بیشتری در نیازهای سرمایشی نسبت به کاهش گرمایش وجود داشته باشد، که همچنین می تواند باعث ایجاد برخی اختلافات بین الگوهای تولید و مصرف شود. بنابراین، عادی سازی تولید برق در طول سال و تغییر در روند مصرف انرژی همچنان مسائل اصلی در این زمینه است. در نهایت، تفاوت های مربوطه بین سناریوهای 2SSP - 4.5 و 5SSP - 8.5 وجود دارد که عدم قطعیت در ارزیابی های آینده انرژی های تجدیدپذیر را برجسته می کند. تولید توان و ضرورت هر دو رویکرد مدل سازی با وضوح بسیار بالا و تجزیه و تحلیل سناریوهای متعدد برای تعیین کمیت محدوده پیش بینی شده در WPO و PVO سناریوی 2SSP - 4.5 نسبت به تولید برق بادی مطلوب تر است، و اگرچه 5SSP - 8.5 افزایش سالانه بالاتری در PVO انباشته نشان می دهد، افزایش کمتر اما ثابت مشاهده شده در 2SSP - 4.5 می تواند گزینه ایمن تر باشد. [35]

4- نتیجه گیری

بزرگترین تغییرات WPO در مناطق دریایی و در مکان هایی است که نیروگاه های بادی متعددی وجود دارد، یعنی شمال و مرکز پرتغال، که نشان می دهد که تغییرات آب و هوایی می تواند تهدیدی برای توربین های بادی نصب شده در حال حاضر باشد (از سال 2020، باد 24 درصد از باد را تشکیل می دهد. تولید برق، دومین پس از برق آبی APREN)، (با این وجود، برخی از این مناطق نیز افزایش زیادی در WPO ثبت کردند، بنابراین تراز کلی مثبت یا منفی در WPO برای آن مناطق تنها با تجزیه و تحلیل هر مزرعه قابل ارزیابی است، که می تواند با داده های تولید شده برای این مطالعه امکان پذیر باشد. تاسیسات بادی جدید در مناطق فراساحلی می تواند فرصتی عالی برای تولید انرژی های تجدیدپذیر بیشتر در طول تابستان باشد، که در حال حاضر فصل کم تولید برق بادی است. در حال حاضر، تولید خورشیدی در پرتغال کم است (زیر 5٪ APREN، 2021) بنابراین نتایج این مطالعه از نظر افزایش تولید از این RES-E امیدوارکننده است و می تواند برای شناسایی مناطق قابل دوام که در آن این فناوری تجدیدپذیر می تواند مورد استفاده قرار گیرد. گزینه خوبی باشد. هر دو سناریو نشان دهنده از دست دادن فصلی است که برخی از بخش ها را آسیب پذیر می کند، اگرچه در همان بخش می تواند جنبه های مثبت و منفی برای تغییرات اقلیمی وجود داشته باشد، در بیشتر مواقع اثرات منفی آن قوی تر است. در بخش انرژی، کاهش مصرف انرژی در شمال اروپا به دلیل افزایش دما به احتمال زیاد خواهد بود.

منابع

- [1] Akinsanola, A.A., Ogunjobi, K.O., Abolude, A.T., Salack, S., 2021. Projected changes in wind speed and wind energy potential over West Africa in CMIP6 models. *Environ.Res. Lett.* 16 .
- [2] Bombelli, G.M., Tomiet, S., Bianchi, A., Bocchiola, D., 2021. Impact of prospective climate change scenarios upon hydropower potential of Ethiopia in gerd and gibe dams. *Water (Switzerland)* 13.
- [3] Cardoso Pereira, S., Marta-Almeida, M., Carvalho, A.C., Rocha, A., 2020. Extreme precipitation events under climate change in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* 40 , 1255–1278.
- [4] Carvalho, D., Rocha, A., G´omez-Gesteira, M., Silva Santos, C., 2014. Offshore wind energy resource simulation forced by different reanalyses: comparison with observed data in the Iberian Peninsula. *Appl. Energy* 134, 57–64. [apenergy.2014.08.018](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.018).
- [5] Carvalho, D., Rocha, A., G´omez-Gesteira, M., Silva Santos, C., 2017. Offshore winds and wind energy production estimates derived from ASCAT, OSCAT, numerical weather prediction models and buoys – a comparative study for the Iberian Peninsula Atlantic coast. *Renew. Energy* 102, 433–444.
- [6] renene.2016.10.063.Carvalho, D., Rocha, A., Costoya, X., deCastro, M., G´omez-Gesteira, M., 2021. Wind energy resource over Europe under CMIP6 future climate projections: what changes from CMIP5 to CMIP6. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 151 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111594>.
- [7] Costoya, X., deCastro, M., Carvalho, D., G´omez-Gesteira, M., 2023. Assessing the complementarity of future hybrid wind and solar photovoltaic energy resources for North America. *Renew. Sustain. Energy Rev. rser.* 2022
- [8] Cresswell-Clay, N., Ummenhofer, C.C., Thatcher, D.L., Wanamaker, A.D., Denniston, R.F., Asmerom, Y., Polyak, V.J., 2022. Twentieth-century Azores High expansion unprecedented in the past 1,200 years. *Nat. Geosci.* 15, 548–553.
- [9] Duratorre, T., Bombelli, G.M., Menduni, G., Bocchiola, D., 2020. Hydropower potential in the alps under climate change scenarios. The Chavonne plant, Val D'Aosta. *Water* 12 , 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12072011>.
- [10] Dutta, R., Chanda, K., Maity, R., 2022. Future of solar energy potential in a changing climate across the world: a CMIP6 multi-model ensemble analysis. *Renew. Energy* 188, 819–829. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.023>.
- [11] European Commission, 2011. Energy Roadmap 2050, Brussels, COM(2011) 885 Final. European Commission, 2019. The European Green Deal, 2019. COM, Brussels, p. 640(final). European Commission, 2021. Fit for 55 - Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality, 14. Brussels, 7.2.
- [12] European Environment Agency, 2019. Adaptation Challenges and Opportunities for the European Energy System: Building a Climate-Resilient Low-Carbon Energy System.
- [13] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the coupled model Intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev. (GMD)* 9, 1937–1958.

- [14] García-Valdecasas Ojeda, M., Gámiz-Fortis, S.R., Romero-Jiménez, E., Rosa-Cánovas, J.J., Yeste, P., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J., 2021. Projected changes in the Iberian Peninsula drought characteristics. *Sci. Total Environ.*
- [15] Garrido, J.L., González-Rouco, J.F., Vivanco, M.G., Navarro, J., 2020. Regional surface temperature simulations over the Iberian Peninsula: evaluation and climate projections. *Clim. Dynam.* 55, 3445–3468.
- [16] Gernaat, D.E.H.J., de Boer, H.S., Daioglou, V., Yalaw, S.G., Müller, C., van Vuuren, D.P., 2021. Climate change impacts on renewable energy supply. *Nat. Clim. Change* 11, 119–125.
- [17] International Energy Agency (IEA), 2021. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector. IRENA, 2019. Future of Wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (report).
- [18] Jacobs, C., Berglund, M., Kurnik, B., Dworak, T., Marras, S., Mereu, V., Michetti, M., 2019. Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe (2019/4). EEA Rep 112.
- [19] Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J.P., López-Romero, J.M., Thais, F., Bartok, B., Christensen, O.B.O.B., Colette, A., Déqué, M., Nikulin, G., Kotlarski, S., Van Meijgaard, E., Teichmann, C., Wild, M., 2015. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe.
- [20] Marta-Almeida, M., Teixeira, J.C., Carvalho, M.J., Melo-Gonçalves, P., Rocha, A.M., 2016. High resolution WRF climatic simulations for the Iberian Peninsula: model validation. *Phys. Chem. Earth* 94, 94–105.
- [21] Martinez, A., Iglesias, G., 2021. Wind resource evolution in Europe under different scenarios of climate change characterised by the novel Shared Socioeconomic Pathways. *Energy Convers.*
- [22] enconman.2021.113961. Matthew, O.J., Ohunakin, O.S., 2017. Simulating the effects of climate change and afforestation on wind power potential in Nigeria. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 22, 41.
- [23] Moemken, J., Reyers, M., Feldmann, H., Pinto, J.G., 2018. Future changes of wind speed and wind energy potentials in EURO-CORDEX ensemble simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 6373–6389. <https://doi.org/2018/10.1029JD028473>.
- [24] Niu, J., Qin, W., Wang, L., Zhang, M., Wu, J., Zhang, Y., 2023. Climate change impact on photovoltaic power potential in China based on CMIP6 models. *Sci. Total Environ.*
- [25] Portuguesa, República, 2019. Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) - Estratégia De Longo Prazo Para a Neutralidade Carbónica Da Economia Portuguesa Em 2050.
- [26] Portuguese Renewable Energy Association (APREN), 2021. Panorama Energético Nacional e Comunitário 2020. Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S.,
- [27] Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaserna, J.C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E.,
- [28] Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A.,

- [29] Tavoni, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environ. Change* 42, 153–168.
- [30] Russo, M.A., Carvalho, D., Martins, N., Monteiro, A., 2022. Forecasting the inevitable : a review on the impacts of climate change on renewable energy resources Special Report on Emissions Scenarios.
- [31] IPCC, 2022: summary for policymakers. In: Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Khouardjie, A. Al, Diemen, R. van, McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., Malley, J. (Eds.), 2022.
- [32] Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- [33] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhi, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.- Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A description of the advanced research WRF version 3. Tech. Rep. 113 <https://doi.org/10.5065/D6DZ069T>.
- [34] Wang, S., Zhu, J., Huang, G., Baetz, B., Cheng, G., Zeng, X., Wang, X., 2020. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. *J. Clean.*
- [35] Zhuo, C., Junhong, G., Wei, L., Fei, Z., Chan, X., Zhangrong, P., 2022. Changes in wind energy potential over China using a regional climate model ensemble. *Renew. Sustain.*

Future prospects for wind and solar power generation under High-resolution climate change scenarios

Kyarash karamnia kaluos* - Yasouj Men's Vocational Technical University

kyarash.karamnia.2000@gmail.com

Mehrdad Mohadpur - Yasouj Men's Vocational Technical University

mehrdad.movahedpoor@gmail.com

Abstract The impact of climate change on the availability and diversity of wind and solar resources for renewable electricity generation was evaluated under recent scenarios of joint social and economic pathways. To do this, the Climate Research and Prediction Model was used to perform very high-resolution ($\approx 1 \text{ km}^2$) climate simulations for one current scenario and two future scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). Modeled meteorological variables were then used to calculate potential future changes in wind power and solar photovoltaic energy for electricity generation for each climate change scenario compared to the present. The results show a sharp increase in wind speed during winter of +45% and a decrease of +45% during summer, with future seasonal generation differences for wind power of $\approx 100 \text{ kWh}$ for both scenarios. For solar radiation, the biggest difference is during winter (+30% to +45% increase) with solar photovoltaic production varying from +10 kWh to +20 kWh, depending on the scenario and the season. Seasonal changes in wind speed and solar radiation imply a seasonal loss that could threaten the stability of future renewable electricity generation in the region and make decarbonization efforts more difficult. This study highlights the importance of a holistic approach in the assessment of the electricity generation system, as the seasonal variations and intermittency of some renewable energy sources can potentially be covered by others.

Keywords: wind, solar, decarbonization, climate scenarios, CMIP6.