

## تأثیر فرآیندهای اقلیمی بر حساسیت پذیری فرسایش بادی (مطالعه موردی استان اصفهان)

علی سلیمی<sup>۱</sup>، طیبه مصباح زاده<sup>۲\*</sup>، آرش ملکیان<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

### چکیده

فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران از نظر کمی و کیفی حائز اهمیت بسیار است. در سطح کشور کل مساحت مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی در حدود ۲۰ میلیون هکتار است. وقوع طوفان‌های گردوغبار شدید و پایین آمدن کیفیت هوا، افزایش مشکلات تنفسی و افزایش بیماری‌ها و بیابان‌زایی از اثرات فرسایش بادی می‌باشد. در این مطالعه تأثیر فرآیندهای اقلیمی بر حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۷) و دوره آینده (۲۰۲۰-۲۱۰۰) در استان اصفهان بررسی گردید. جهت بررسی تأثیر فرآیندهای اقلیمی بر حساسیت پذیری فرسایش بادی از دو عامل اقلیمی چپیل و فائو استفاده شد. نتایج عامل اقلیمی چپیل برای دوره مشاهداتی نشان داد که حساسیت پذیری فرسایش بادی از فرآیندهای اقلیمی در ایستگاه‌های اصفهان، داران، نائین و نطنز از ابتدای دوره روند افزایشی داشته در سال ۲۰۱۶ به بیشترین مقدار رسیده است. درحالی‌که در ایستگاه خور و بیابانک بین سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۱۴ روند نزولی داشته سپس افزایش یافته و در سال ۲۰۱۶ به بیشترین مقدار رسیده است. نتایج حاصل از عامل اقلیمی فائو برای دوره مشاهداتی نشان داد که حساسیت پذیری فرسایش بادی در تمامی ایستگاه‌ها افزایش یافته و در سال ۲۰۱۶ به بالاترین حد خود رسیده است. نتایج حاصل از عامل‌های اقلیمی فرسایش بادی چپیل و فائو نشان داد که مقادیر میانگین حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. با توجه به اینکه تأثیر افزایش بارندگی و کاهش سرعت باد در دوره آینده بر عامل‌های اقلیمی بیشتر از تأثیر افزایش دما بر فاکتورها بوده، حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. به طور کلی تأثیر فرآیندهای اقلیمی بر حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره مشاهداتی روند افزایشی و در دوره آینده به طور میانگین نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد داشت.

**کلید واژه‌ها:** حساسیت پذیری؛ عامل‌های اقلیمی؛ عامل اقلیمی چپیل؛ عامل اقلیمی فائو؛ فرسایش بادی.

## مقدمه

استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی، گسترش روز افزون فعالیت‌های صنعتی برای تامین رفاه و نیازهای جمعیت کره زمین، موجب شده است تا پس از انقلاب صنعتی به تدریج تغییرات مشهودی در اقلیم کره زمین به وجود آید که بارزترین آن افزایش متوسط دمای کره زمین، افزایش پدیده‌های حدی اقلیمی نظیر سیل، توفان، تگرگ، توفان‌های حاره‌ای، امواج گرمایی، ذوب شدن یخ‌های قطبی و افزایش سطح آب دریاها و خشکسالی است. افزایش این رخدادها در سال‌های اخیر به دغدغه اصلی اقلیم‌شناسان و سران کشورهای جهان تبدیل شده است (Rezaei et al., 2016). تغییرات فراسنج‌های اقلیمی بر روی خطر فرسایش بادی تأثیر بسزایی می‌گذارد، چراکه فراسنج‌های اقلیمی تا حدودی عوامل تعیین کننده فرسایش بادی به خصوص در مناطق خشک با پوشش گیاهی کم هستند (Pouyan et al., 2015). فراسنج‌های اقلیمی یکی از موثرترین عوامل ایجاد فرسایش بادی می‌باشد که در مدل‌های فرسایش بادی در قالب عامل اقلیمی لحاظ می‌شوند. به طور خاص سرعت باد و بارندگی نقش تعیین کننده‌ای را به عنوان عوامل اصلی فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کنند (Dong & Kang, 1994; Yang and Lu, 2016). همچنین این نکته را نیز باید در نظر داشت که فراسنج‌های اقلیمی بر بسیاری از شاخص‌های دیگر استفاده شده در مدل‌های فرسایش بادی، از جمله نوع خاک و پوشش گیاهی (Bayat Movahed et al., 2010) کاملاً تأثیرگذار است. در ادامه، برخی از تحقیقاتی که در زمینه فرسایش بادی انجام شده‌اند بررسی شده است. پویان و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی به برآورد عامل اقلیمی فرسایش بادی با استفاده از توابع توزیع منطقه‌ای در استان یزد پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مقادیر عامل اقلیمی فرسایش تخمینی با استفاده از روش منطقه‌ای نسبت به روش ویبول دارای میانگین مربعات خطای کوچکتری می‌باشد. بنابراین این روش می‌تواند ارزیابی خطر فرسایش بادی در محیط‌های خشک و نیمه خشک را ارزیابی نماید. میراکبری و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی تأثیرات نوسانات اقلیمی بر تولید گرد و غبار در استان یزد پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که ارتباط بین گرد و غبار و فراسنج‌های موثر آن، از رابطه خطی تبعیت نمی‌کند و مدل‌های غیرخطی بهتر می‌توانند میزان تأثیرگذاری فراسنج‌های اقلیمی و فراسنج‌های سطح زمین را در ایجاد گرد و غبار مدلسازی کنند. بطور کلی نتایج حاصل

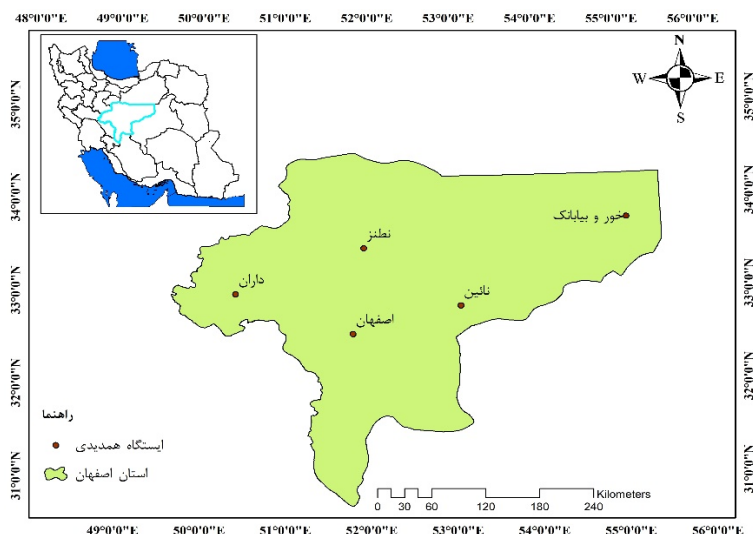
مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل دارا بودن شرایط نامساعد محیطی متأثر از زمین‌شناسی و اقلیم همراه با فعالیت‌های انسانی زمینه را برای وقوع فرسایش بادی بسیار مساعد نموده است. به نحوی که برداشت خاک و انتشار گردوغبار از بارزترین نشانه‌های فرسایش بادی در این مناطق می‌باشد. فرسایش بادی فرآیندی است که به سبب افزایش سرعت باد و در اثر تلاطم آن در سطح زمین عاری از پوشش ایجاد می‌شود. این وضعیت در زمین‌های با خاک بدون ساختمان، لخت، خشک، صاف و دانه‌بندی ریز مشهود است (Pahlavanravi et al., 2013). خسارت‌های ناشی از این پدیده توسط چند عامل خاک، سنگ شناسی، اقلیم، پوشش گیاهی و اثرات انسانی تعیین می‌شود (Nordstrom & Hotta, 2004; Shao, 2008). در سطح کشور کل مساحت مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی در حدود ۲۰ میلیون هکتار است (Ahmadi, 2006). مساحت کانون‌های بحرانی فرسایش بادی در کشور بالغ بر ۶۴۲۲۸۴۷ هکتار است که ۲۱۰۷۸۳۷ هکتار آن دارای شدت زیاد و ۲۲۱۲۶۵ هکتار دارای شدت متوسط و مابقی دارای شدت کم می‌باشد (Ahmadi, 2006). وقوع طوفان‌های گردوغبار شدید و پایین آمدن کیفیت هوا، افزایش مشکلات تنفسی و افزایش بیماری‌ها (Shamshiri et al., 2014) و بیابان‌زایی (Lian-You et al., 2003) از اثرات فرسایش بادی می‌باشد. همچنین فرسایش بادی منجر به از بین رفتن خاک (Movahedan et al., 2013)، آسیب به زیرساخت‌ها و خطوط راه آهن و تهدید گونه‌های گیاهی و جانوری می‌شود. در این میان عوامل اقلیمی یکی از فراسنج‌هایی است که بیشترین تأثیر در هدر رفت خاک را دارد (Gomes et al., 2003; Leenders et al., 2005; Mezösi et al., 2013). انتظار می‌رود تغییرات فراسنج‌های اقلیمی بر روی خطر فرسایش بادی تأثیر بگذارد، زیرا تغییرات اقلیمی با تأثیر بر روی رطوبت، دما، پوشش گیاهی و ... بصورت مستقیم و غیر مستقیم تا حدودی عوامل تعیین کننده فرسایش بادی به خصوص در مناطق خشک هستند (Pouyan et al., 2015). در چند دهه گذشته افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو که در اثر گسترش صنعت و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی ایجاد شده، موجب بهم خوردن ایستایی روند متغیرهای اقلیمی به خصوص دمای کره زمین شده است (IPCC, 2014). افزایش جمعیت جهان،

(CV) ۱۴.۷-۱۰.۸.۹ درصد و تغییرات ماهانه ۰.۱-۰.۷ درصد متغیر است. همان‌طور که اشاره شد فراسنج‌های اقلیمی یکی از موثرترین عوامل ایجاد فرسایش بادی می‌باشد، بنابراین ارزیابی مناطق حساس به فرسایش بادی براساس عاملهای تاثیرگذار آن در زمان حال و آینده از اهمیت بسزایی برخوردار است. با توجه به اینکه فراسنج‌های اقلیمی در طول زمان در معرض تغییرات زیادی می‌باشند لذا تغییرات اقلیمی می‌تواند بر روی فرسایش‌پذیری خاک تاثیر داشته باشد. در این تحقیق تاثیر فراسنج‌های اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد بر حساسیت‌پذیری فرسایش بادی در غالب دو عامل اقلیمی چپیل و فائو در زمان حال و آینده مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان با مساحت ۱۰۷۰۱۸ کیلومترمربع، بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. وضعیت آب‌وهوا در منطقه مورد مطالعه همراه با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد است، به طوری که میانگین دمای حداکثر روزانه ۳۵ درجه سانتی‌گراد در تابستان تا حدود ۱۷ درجه سانتی‌گراد در زمستان متغیر است. میانگین سالانه میزان تبخیر ۲۵۰۰ میلی‌متر است. باش سالانه در این منطقه بسیار متغیر است، به طور متوسط میزان بارندگی سالانه آن ۱۱۶/۹ میلی‌متر ثبت شده است. بادهایی که در استان اصفهان می‌وزند، عموماً بادهای غربی و جنوب غربی‌اند. وزش بادهای جنوب غربی زمان خاصی ندارد و این بادهای در اغلب ایام سال می‌وزند؛ اما بادهای غربی معمولاً در دو موقع از سال، یکی از نیمه اسفند تا نیمه اردیبهشت، و دیگری از اوایل شهریور تا اواسط مهر می‌وزند. بادهای شدید فقط در نواحی بیابانی استان می‌وزند و سایر بادهای استان معمولاً به صورت نسیم و بادهای خفیف محلی هستند. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی اصفهان، داران، خور و بیابانک، نائین و نظنز استفاده گردید. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

از این تحقیق نشان داد علی‌رغم اینکه فراسنج‌های اقلیمی از عوامل محرک ایجاد پدیده گرد و غبار هستند، اما نمی‌توان شرایط اقلیمی منطقه را مهمترین عامل و یا تنها عامل ایجاد گرد و غبار قلمداد کرد. لی و همکاران (Lee, 1999) به بررسی فرسایش خاک و تغییرات اقلیمی، ارزیابی اثرات بالقوه و شیوه‌های سازگاری پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که فرسایش بادی در مکان‌های مختلف تحت شرایط آب و هوایی آینده که تغییری در دما، بارش و CO<sub>2</sub> وجود نداشته باشد ولی سرعت باد ۲۰ درصد افزایش یابد و چهار برابر می‌شود. ژائو و همکاران (Gao, 2012) تاثیرات اختلالات آب و هوایی در توفان‌های گرد و غبار بر افزایش اراضی ماسه‌ای در شمال شرقی چین مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند با وجود اینکه از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۸ از فراوانی کلی توفان‌های گرد و غبار در این منطقه کاسته شده ولی وسعت پهنه‌های ماسه‌ای در اثر فعالیت‌های گرد و غبار بخصوص بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ افزایش یافته است. پس از بررسی متغیرهای آب و هوایی (دما، بارش، رطوبت نسبی، تبخیر، خشکی) خشکی به عنوان مهمترین عامل افزایش توفان‌های گرد و غبار شناسایی شد. مزوسی و همکاران (Mezősi, 2016) در پژوهشی به بررسی سناریوهای آینده تغییرات حساسیت‌پذیری فرسایش بادی بر اساس داده‌های شبیه سازی مدل‌های منطقه‌ای آلدین و رمو پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این روش برای تجزیه و تحلیل منطقه‌ای تغییرات حساسیت‌پذیری فرسایش بادی مناسب است و پشتیبانی از برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای در حوزه تغییرات فن‌آوری‌های به کار رفته در حوزه کشاورزی و استفاده از زمین باید در اولویت قرار گیرد. یانگ و لو (Yang and Lu, 2016) به ارزیابی تغییرات عامل اقلیمی فرسایش بادی در مناطق خشک چین طی سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۱۲ پرداختند. آن‌ها با استفاده معادله فائو و تجزیه تحلیل آماری مقدار عامل اقلیمی فرسایش بادی و روند تغییرات زمانی آن را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که میانگین سالانه عامل اقلیمی فرسایش بادی در ۲۹۲ ایستگاه بین ۲-۱۶۶ و در ۷ ایستگاه بین ۲۳۷-۴۷۱ با توزیع مکانی بسیار مطابق با سرعت باد ( $R^2 = 0.94$ ) بود. همچنین آن‌ها نشان دادند که عامل اقلیمی فرسایش بادی با تغییرات سالانه



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

توصیف می کنند و به طور رسمی توسط IPCC پذیرفته شده اند. RCP مسیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم را توصیف می کند که همه آنها بسته به میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در سال‌های آینده در نظر گرفته شدند. در نهایت عامل‌های اقلیمی بدست آمده حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره مشاهداتی و آینده را نشان می دهند. مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۲ آمده است.

ارزیابی تغییرات فرسایش بادی با استفاده از عامل اقلیمی معادله چیپل

کامل‌ترین فرمول تجربی ارائه شده جهت برآورد مقدار فرسایش بادی که توسط ودرف و سیدوی (۱۹۶۵) و به دنبال تحقیقات چیپل-ودرف که در کانزاس آمریکا انجام شد ارائه شده است. با توجه به تعدد و پیچیدگی عوامل و فرآیندهای موثر در فرسایش بادی برخلاف فرسایش آبی به منظور محاسبه فرسایش‌های این مدل همواره روش‌ها و گام‌های مختلفی پیشنهاد شده که معادله کلی این روش به صورت زیر است:

$$WE = f(I, C, K, L, V) \quad (1)$$

که در آن:

I: قابلیت فرسایش پذیری خاک

C: عامل اقلیمی فرسایش بادی

K: زبری سطح زمین

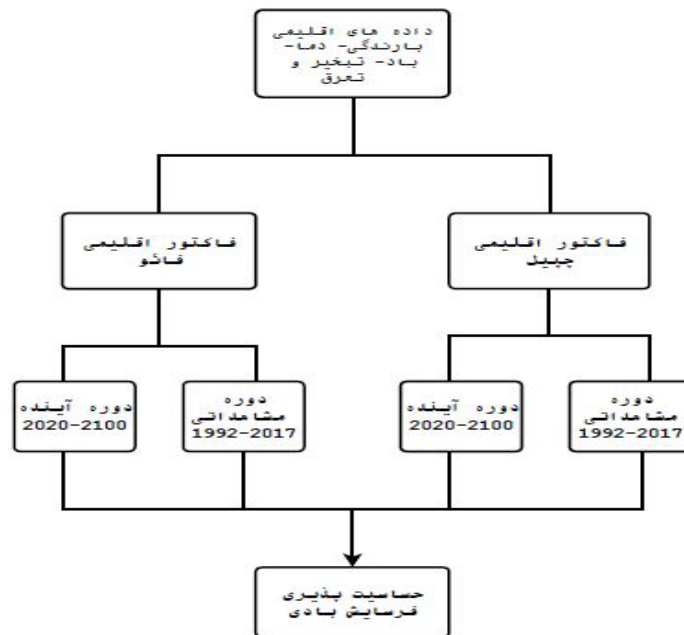
L: طول مسیری که باد بر روی سطح زمین اثر می گذارد

V: شاخص پوشش گیاهی

## مواد و روش‌ها

### ارزیابی تغییرات فرسایش بادی بر اساس عامل اقلیمی

فرآیندهای موثر در فرسایش بادی شامل دو دسته فرآیندهای اقلیمی و فرآیندهای اداپتیکی می باشند. فرآیندهای اقلیمی شامل قدرت فرسایندهای باد و فرسایش‌های اقلیمی تاثیرگذار بوده و فرآیندهای اداپتیکی شامل حساسیت‌پذیری خاک و فرسایش‌های مربوط به خاک می باشد. در این تحقیق به بررسی فرآیندهای اقلیمی موثر بر فرسایش بادی پرداخته شده است. جهت بررسی تاثیر فرآیندهای اقلیمی بر حساسیت پذیری فرسایش بادی از دو عامل اقلیمی چیپل و فائو استفاده شد. عامل اقلیمی چیپل با استفاده از فرسایش‌های دما، بارش و سرعت باد میزان حساسیت‌پذیری عامل اقلیمی فرسایش بادی را با استفاده از معادله عامل اقلیمی چیپل محاسبه می کند و عامل اقلیمی فائو با استفاده از فرسایش‌های دما، بارش، سرعت باد و تبخیر و تعرق به محاسبه حساسیت‌پذیری فرسایش بادی با استفاده از معادله عامل اقلیمی فائو می پردازد. در ادامه معادلات محاسبه عامل اقلیمی چیپل و فائو بیان شده است. ارزیابی تغییرات فرسایش بادی برای دوره مشاهداتی (۱۹۹۲-۲۰۱۷) و آینده (۲۰۲۰-۲۱۰۰) با استفاده از سناریوهای RCP با محاسبه عامل اقلیمی هر یک از رابطه‌های چیپل و فائو به صورت جداگانه بررسی شده و تغییرات فرسایش بادی برای هر معادله محاسبه می شود. سناریوهای RCP برای پیش‌بینی غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده مورد استفاده قرار می گیرند. این سناریوها غلظت گازهای گلخانه‌ای آینده را



شکل ۲: مراحل انجام پژوهش

معادله فائو یک نسخه اصلاح شده از مدل چپیل (۱۹۶۲) است. اغلب به دلیل سادگی برای ارزیابی یک تخمین قابل اعتماد در مقایسه با مدل‌های فیزیکی پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله به عنوان تابعی از میانگین سرعت باد و رطوبت خاک تدوین شده است. بر این اساس که سرعت حرکت ذرات متناسب با مکعب میانگین سرعت باد و فرسایش پذیری خاک رابطه معکوس با مربع رطوبت خاک در چند میلی‌متری بالای خاک دارد (Skidmor, 1986). حساسیت‌پذیری فرسایش بادی در مدل فائو با محاسبه عامل اقلیمی (C) معادله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (FAO, 1979) که طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} U_i^3 \left( \frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right) d \quad (4)$$

در این رابطه:

U: میانگین ماهانه سرعت باد ( $m/s$ )

Pi: بارندگی ماهانه (mm)

ETP: تبخیر تعرق پتانسیل ماهانه (mm)

d: کل روزهای ماه

بر اساس روش تورنت- وایت تبخیر تعرق پتانسیل (PET)

بصورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$PE_x = 0.63 \left( \frac{10T}{I} \right)^m \quad (5)$$

که در فرمول فوق:

در این تحقیق ما از عامل اقلیمی فرسایش بادی جهت برآورد تغییرات فرسایش بادی استفاده کردیم. عامل اقلیمی فرسایش بادی معیاری جهت بیان نقش عوامل اقلیمی در فرسایش بادی می‌باشد. این شاخص به سرعت باد و رطوبت خاک بستگی دارد و به صورت مقدار عامل اقلیمی (C) اندازه‌گیری شده و تحت شرایط گاردن سیتی، کانزاس آمریکا که به طور استاندارد مقدار ۱۰۰ می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. شاخص عامل اقلیمی با استفاده از فرانسج‌های متوسط دمای ماهانه (T)، بارندگی ماهانه (P) و میانگین ماهانه داده‌های سرعت باد (U) طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{386 * U^3}{PE^2} \quad (2)$$

U: میانگین ماهانه سرعت باد ( $m/s$ ) در ارتفاع ۱۰ متری

PE: شاخص بارندگی موثر تورنت وایت که طبق رابطه (۳)

محاسبه می‌شود.

$$PE = 3.16 \sum \left[ \frac{P_i}{1.8 * T_i + 22} \right]^{\frac{10}{9}} \quad (3)$$

Pi: بارندگی ماهانه (mm)

Ti: میانگین دمای ماهانه ( $^{\circ}C$ )

ارزیابی تغییرات فرسایش بادی با استفاده از عامل اقلیمی

معادله فائو

عامل اقلیمی برای دوره آینده در ایستگاه داران نشان دهنده کاهش فرسایش بادی تحت هر سه سناریو RCP نسبت سال ۲۰۱۶ می‌باشد. نتایج نشان داد که مقدار میانگین فرسایش تحت هر سه سناریو RCP نسبت به میانگین دوره مشاهداتی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج عامل چپیل نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش در دوره آینده تحت سناریو RCP8.5 و در سال ۲۰۷۳ رخ خواهد داد (شکل ۲).

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل در ایستگاه اصفهان در دوره مشاهداتی نشان داد که فرسایش بادی در این منطقه دارای نوسانات زیادی می‌باشد. بین سالهای ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ روند صعودی داشته سپس کاهش یافته است و از سال ۲۰۰۹ مجدداً افزایش یافته و در سال ۲۰۱۶ به بیشترین مقدار خود رسیده است. درحالی‌که مقدار فرسایش بادی با توجه به عامل اقلیمی فرسایش چپیل در دوره آینده تحت هر سه سناریوی تغییر اقلیم نسبت به دوره مشاهداتی نوسانات کمتری را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقدار میانگین فرسایش تحت هر سه سناریو RCP نسبت به میانگین دوره مشاهداتی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش در دوره آینده تحت سناریو RCP2.6 در سال ۲۰۶۱ و کمترین مقدار فرسایش تحت سناریو RCP4.5 در سال ۲۰۵۹ رخ می‌دهد (شکل ۳).

PEX: تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه برحسب اینچ،

T: متوسط درجه حرارت ماهانه برحسب °C،

I: اندیس حرارتی سالانه است که برابر با حاصل جمع اندیس‌های حرارتی ۱۲ ماه سال می‌باشد. اندیس‌های حرارتی ماهانه (i) از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (6)$$

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (7)$$

m طبق رابطه (۸) محاسبه گردید.

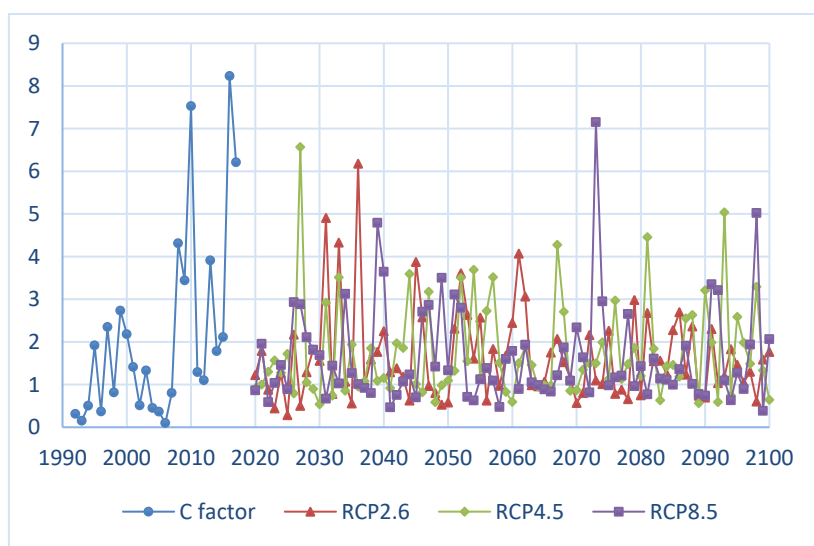
$$m = 675 \times 10^{-9} (I)^3 - 771 \times 10^{-7} (I)^2 + 1792 \times 10^{-5} (I) + 0.49239 \quad (8)$$

### یافته‌ها (نتایج)

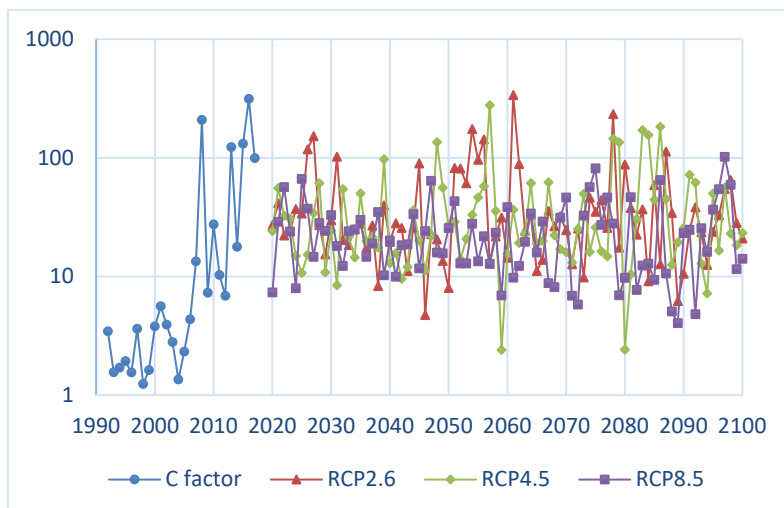
ارزیابی تغییرات فرسایش بادی در دوره مشاهداتی و

آینده بر اساس عامل اقلیمی چپیل

نتایج ارزیابی عامل اقلیمی چپیل در دوره مشاهداتی نشان داد که فرسایش بادی در ایستگاه داران دارای نوسانات زیاد می‌باشد. بر اساس نتایج این عامل در ایستگاه داران بیشترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۱۶ رخ داده است. همچنین نتایج



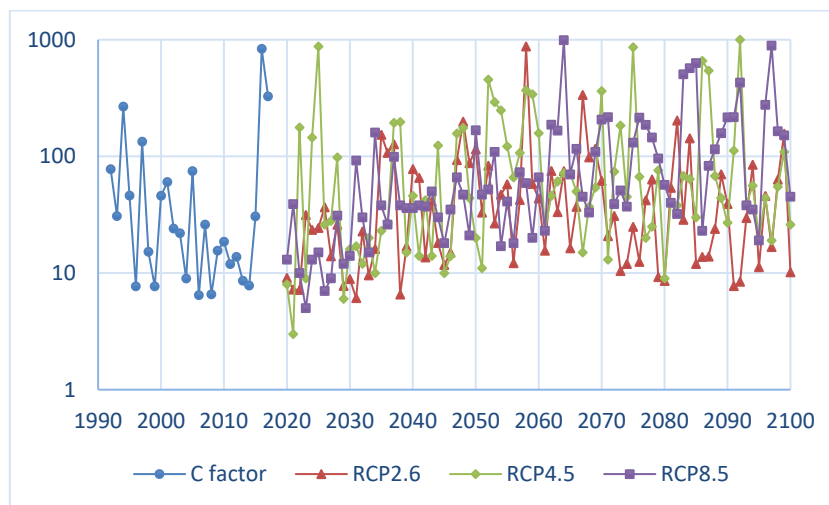
شکل ۲: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه داران



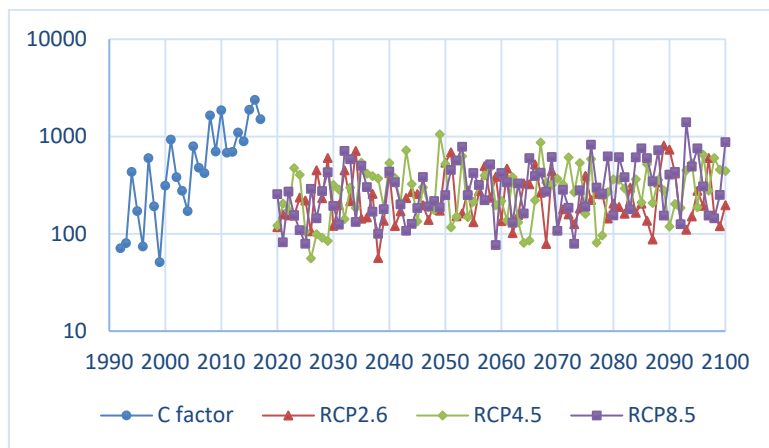
شکل ۳: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه اصفهان

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل ایستگاه نائین در دوره مشاهداتی نشان داد که فرسایش بادی در این منطقه دارای نوسانات زیادی می‌باشد و از سال ۲۰۰۴ به بعد فرسایش در این منطقه سیر صعودی داشته است. بیشترین مقدار فرسایش بادی در این منطقه در سال ۲۰۱۶ رخ داده است. درحالی‌که فرسایش بادی با توجه به نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل در دوره آینده تحت هر سه سناریوی تغییر اقلیم کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش در دوره آینده تحت سناریو RCP8.5 در سال ۲۰۹۳ و کمترین مقدار فرسایش تحت سناریو RCP2.6 در سال ۲۰۳۸ رخ می‌دهد (شکل ۵).

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل ایستگاه خور و بیابانک در دوره مشاهداتی نشان داد که فرسایش بادی در این منطقه دارای نوسانات زیادی می‌باشد. به طوری که بین سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۴ روندی نزولی داشته و از سال ۲۰۱۴ افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در دوره مشاهداتی در سال ۲۰۱۶ رخ داده است. نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل ایستگاه خور و بیابانک در دوره آینده نیز دارای نوسانات زیادی بوده و مقدار میانگین فرسایش تحت هر سه سناریو RCP نسبت به میانگین دوره مشاهداتی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش در دوره آینده تحت سناریو RCP4.5 در سال ۲۰۹۲ و تحت سناریو RCP8.5 در سال ۲۰۶۴ رخ خواهد داد. (شکل ۴).



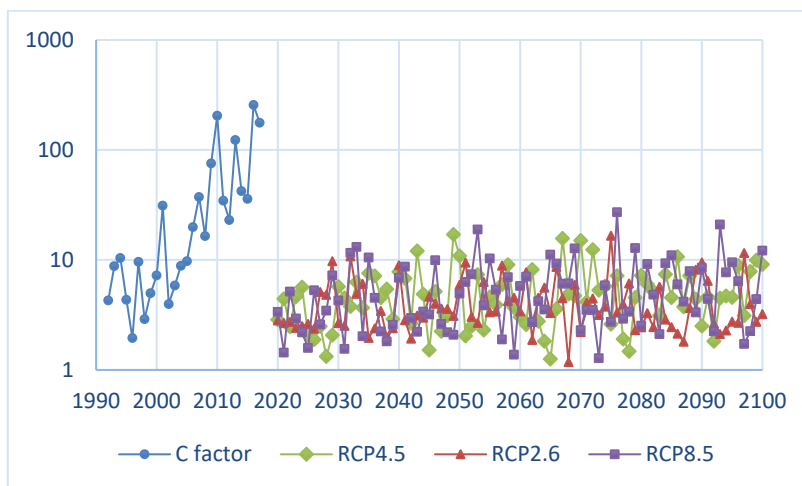
شکل ۴: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه خور و بیابان



شکل ۵: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه نائین

در دوره دوره آینده تحت هر سه سناریوی تغییر اقلیم کاهش می‌یابد. کمترین مقدار فرسایش بادی در دوره آینده تحت سناریو RCP2.6 در سال ۲۰۶۸ و بیشترین مقدار فرسایش تحت سناریو RCP8.5 در سال ۲۰۷۶ رخ می‌دهد (شکل ۶).

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل ایستگاه نطنز نشان داد که فرسایش بادی در دوره مشاهداتی در این منطقه نوسانات زیاد دارد و از سال ۲۰۰۵ به بعد فرسایش در این منطقه افزایش یافته است. بیشترین مقدار فرسایش بادی در این منطقه در سال ۲۰۱۶ رخ داده است. در حالیکه فرسایش بادی

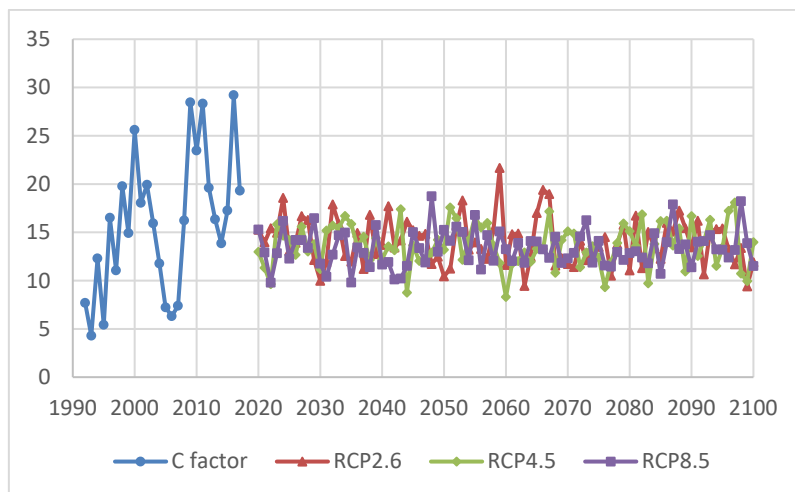


شکل ۶: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی چپیل در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه نطنز

کمترین مقدار فرسایش در سال ۱۹۹۳ رخ داده است. نتایج نشان داد که مقدار میانگین فرسایش تحت هر سه سناریو RCP نسبت به میانگین دوره مشاهداتی کاهش می‌یابد. در دوره آینده بیشترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۵۹ تحت سناریو RCP2.6 و کمترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۶۰ تحت سناریو RCP4.5 رخ خواهد داد (شکل ۷).

ارزیابی تغییرات فرسایش بادی در دوره مشاهداتی و آینده بر اساس عامل اقلیمی فائو

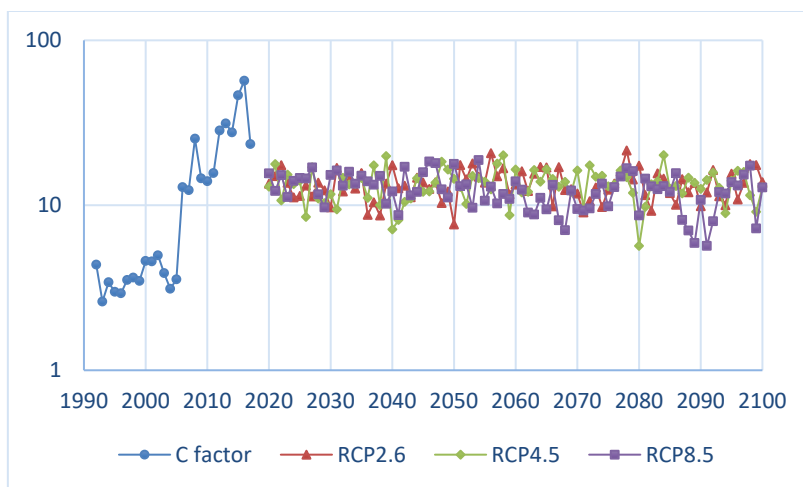
نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو ایستگاه داران در دوره مشاهداتی نشان داد که فرسایش بادی دارای نوسانات زیادی می‌باشد. بین سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ فرسایش روند صعودی داشته و بین سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ کاهش یافته است. در دوره مشاهداتی بیشترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۱۶ و



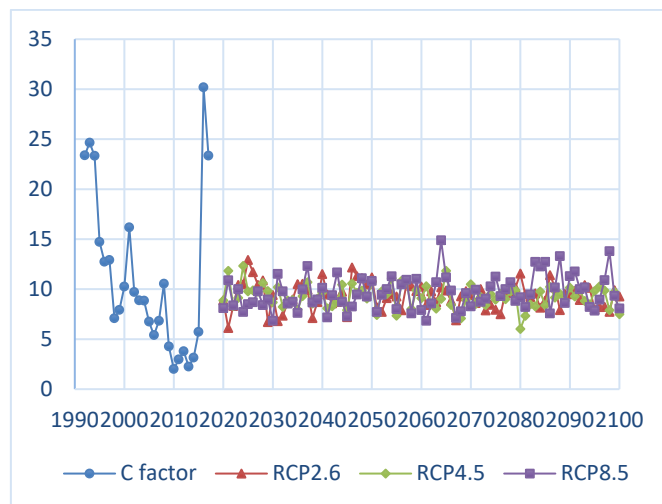
شکل ۷: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه داران

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو ایستگاه خور و بیابانک در دوره مشاهداتی نشان داد که در این ایستگاه نیز فرسایش بادی دارای نوسانات زیادی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ مقدار فرسایش بادی در این ایستگاه در دوره مشاهداتی کاهش یافته سپس در سال ۲۰۱۶ افزایش یافته است. در دوره مشاهداتی بیشترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۱۶ و کمترین مقدار آن در سال ۲۰۱۰ رخ داده است. نتایج نشان داد که مقدار میانگین فرسایش تحت هر سه سناریو RCP نسبت به میانگین دوره مشاهداتی افزایش می‌یابد. در دوره آینده بیشترین مقدار فرسایش بادی بر طبق عامل اقلیمی فائو در سال ۲۰۶۴ تحت RCP8.5 و کمترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۸۰ تحت RCP4.5 خواهد داد (شکل ۹).

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو ایستگاه اصفهان در دوره مشاهداتی نشان داد که در این ایستگاه نیز فرسایش بادی دارای نوسانات زیادی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که از سال ۲۰۰۵ به بعد مقدار فرسایش بادی در این ایستگاه در دوره مشاهداتی افزایش یافته است. در دوره مشاهداتی بیشترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۱۶ و کمترین مقدار آن در سال ۱۹۹۳ رخ داده است. درحالی‌که نتایج نشان داد که مقدار میانگین فرسایش تحت هر سه سناریو RCP نسبت به میانگین دوره مشاهداتی کاهش می‌یابد. در دوره آینده بیشترین مقدار فرسایش بادی بر طبق عامل اقلیمی فائو در سال ۲۰۷۸ تحت RCP2.6 و کمترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۸۰ تحت RCP4.5 رخ خواهد داد (شکل ۸).



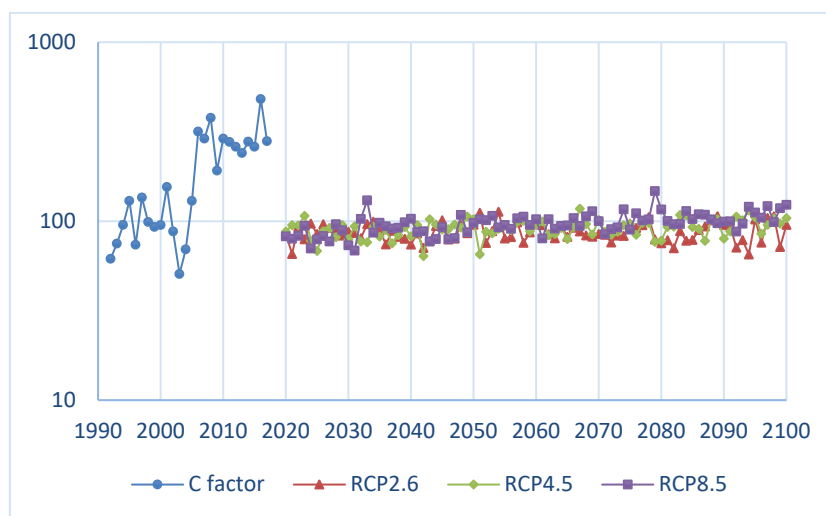
شکل ۸: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه اصفهان



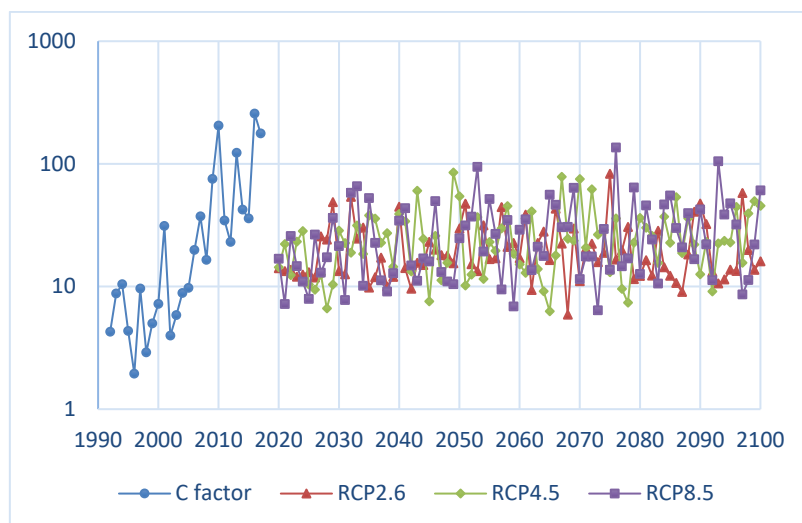
شکل ۹: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه خور و بیابانک

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو ایستگاه نطنز در دوره مشاهداتی نشان داد که در این ایستگاه نیز فرسایش بادی دارای نوسانات زیادی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که بین سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ مقدار فرسایش بادی در این ایستگاه در دوره مشاهداتی افزایش یافته سپس در سال ۲۰۰۸ کاهش یافته است. در دوره مشاهداتی بیشترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۱۶ و کمترین مقدار آن در سال ۱۹۹۶ رخ داده است. نتایج نشان داد که مقدار میانگین فرسایش تحت هر سه سناریو RCP نسبت به میانگین دوره مشاهداتی کاهش می‌یابد. در دوره آینده بیشترین مقدار فرسایش بادی بر طبق عامل اقلیمی فائو در سال ۲۰۷۶ تحت RCP8.5 و کمترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۶۸ تحت RCP2.6 رخ خواهد داد (شکل ۱۱).

نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو ایستگاه نائین در دوره مشاهداتی نشان داد که در این ایستگاه نیز فرسایش بادی دارای نوسانات زیادی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که از سال ۲۰۰۵ به بعد مقدار فرسایش بادی در این ایستگاه در دوره مشاهداتی افزایش یافته است. در دوره مشاهداتی بیشترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۱۶ و کمترین مقدار آن در سال ۲۰۰۳ رخ داده است. درحالیکه نتایج عامل اقلیمی فائو در دوره آینده نوسانات کمتری داشته و نشان داد که مقادیر میانگین فرسایش بادی تحت هر سه سناریو RCP کاهش می‌یابد. در دوره آینده بیشترین مقدار فرسایش بادی بر طبق عامل اقلیمی فائو در سال ۲۰۷۹ تحت RCP8.5 و کمترین مقدار فرسایش در سال ۲۰۹۴ تحت RCP2.6 رخ خواهد داد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه نائین



شکل ۱۱: نتایج عامل اقلیمی فرسایش بادی فائو در دوره مشاهداتی و آینده در ایستگاه نطنز

افزایش مقدار فرسایش در دوره آینده خواهد شد در نتیجه مقادیر عاملهای فرسایش بادی افزایش خواهد یافت. درحالیکه افزایش بارندگی که به صورت مستقیم بر رطوبت خاک تاثیرگذار بوده و کاهش سرعت باد به عنوان عامل اصلی فرسایش بادی باعث کاهش مقدار فرسایش و در نتیجه کاهش مقدار عاملهای فرسایش بادی شد. به طور کلی نتایج نشان داد که تاثیر افزایش بارندگی و کاهش سرعت باد در دوره آینده بر عاملهای اقلیمی بیشتر از تاثیر افزایش دما بر عاملهای بوده و حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. در زمینه بررسی تغییرات عاملهای اقلیمی فرسایش بادی در دوره آینده مطالعه‌ای صورت نگرفته اما در زمینه بررسی فرسایش‌های اقلیمی در دوره آینده نتایج مطالعات آقاخان‌افشار و همکاران (۱۳۹۵)، میراکبری و همکاران (۱۳۹۷)، ایزن و همکاران (Aizen et al. 2001)، فری و اسمیت (Frey and Smith. 2003) و المزرعی و همکاران (Almazroui et al. 2017) حاکی از افزایش بارندگی و دما در دوره آینده می‌باشد که نتایج تحقیق حاضر را تایید می‌کند. مطالعات نشان داده وقوع پدیده فرسایش بادی در کشور در سال‌های اخیر روند صعودی داشته است. در این تحقیق به تحلیل تاثیر فرآیندهای اقلیمی بر حساسیت پذیری فرسایش بادی در استان اصفهان به عنوان یکی از مناطقی که دارای کانون‌های بحرانی فرسایش بادی می‌باشد، پرداخته شد. نتایج عاملهای اقلیمی نشان داد که حساسیت پذیری فرسایش

## بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تغییرات فرسایش بادی بر اساس دو عامل اقلیمی چپیل و فائو در دو دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۷) و دوره آینده (۲۰۲۰-۲۱۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی برای دوره مشاهداتی نشان داد که حساسیت پذیری فرسایش بادی از ابتدای دوره روند افزایشی داشته و در سال ۲۰۱۶ به بالاترین مقدار خود رسیده است. فرسایش‌های بارندگی، سرعت باد و دمای متوسط به صورت مستقیم بر روی عاملهای اقلیمی فرسایش بادی تاثیرگذار می‌باشد. به این صورت که با کاهش بارندگی و افزایش سرعت باد و دمای متوسط مقدار این عاملها افزایش می‌یابد. در سال‌های اخیر به علت خشکسالی‌های متمادی بارندگی دارای روند کاهشی و سرعت باد و دمای متوسط دارای روند افزایشی بود، در نتیجه حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره مشاهداتی دارای روند افزایشی می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه رضایی و همکاران (۱۳۹۶) موبد نتایج این تحقیق می‌باشد. نتایج حاصل از عاملهای اقلیمی فرسایش بادی چپیل و فائو نشان داد که مقادیر میانگین حساسیت پذیری فرسایش بادی در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. تغییرات فرسایش‌های اقلیمی در دوره آینده نشان داد که تحت سناریوهای RCP فرسایش‌های بارندگی و دما افزایش و فرسایش باد کاهش خواهد یافت. افزایش فرسایش دما باعث افزایش مقدار تبخیر و تعرق در منطقه شده و در نتیجه باعث

- during 2001–2008. *Meteorological Applications*, 19(3), 265-278 .
- 9- Gomes, L., Arrue, J., Lopez, M., Sterk, G., Richard, D., Gracia, R., Sabre, M., Gaudichet, A., & Frangi, J. (2003). Wind erosion in a semiarid agricultural area of Spain: the WELSONS project. *Catena*, 52(3-4), 235-256 .
  - 10- Lee, J., Phillips, D., & Benson, V. (1999). Soil erosion and climate change: Assessing potential impacts and adaptation practices. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(3), 529-536 .
  - 11- Leenders, J., Van Boxel, J., & Sterk, G. (2005). Wind forces and related saltation transport. *Geomorphology*, 71(3-4), 357-372 .
  - 12- Lian-You, L., Shang-Yu, G., Pei-Jun, S., Xiao-Yan, L., & Zhi-Bao, D. (2003). Wind tunnel measurements of adobe abrasion by blown sand: profile characteristics in relation to wind velocity and sand flux. *Journal of Arid Environments*, 53(3), 351-363 .
  - 13- Mezösi, G., Blanka, V., Bata, T., Ladányi, Z., Kemény, G., & Meyer, B. C. (2016). Assessment of future scenarios for wind erosion sensitivity changes based on ALADIN and REMO regional climate model simulation data. *Open Geosciences*, 8(1), 465-477 .
  - 14- Mezösi, G., Meyer, B. C., Loibl, W., Aubrecht, C., Csorba, P., & Bata, T. (2013). Assessment of regional climate change impacts on Hungarian landscapes. *Regional Environmental Change*, 13, 797-811 .
  - 15- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H., & Mortezaie Farizhendi, G. (2018). Performance of series model CMIP5 in simulation and projection of climatic variables of rainfall, temperature and wind speed (case study: Yazd). *Physical Geography Research Quarterly*, 50(3), 593-609 . (in Persian)
  - 16- Movahedan, M., Abbasi, N., & KERAMATI, T. M. (2013). Experimental investigation of Polyvinyl Acetat effect on wind erosion of different soils by impacting sand particles . (in Persian)
  - 17- Nordstrom, K. F., & Hotta, S. (2004). Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects. *Geoderma*, 121(3-4), 157-167 .
  - 18- Pahlavanravi, A., Moghadamnia, A., Hashemi, Z., Javadi, M. R., & Miri, A. (2013). Evaluation of desertification intensity with wind erosion criterion using MICD and FAO-UNEP models in Zahak region of Sistan . (in Persian)
  - 19- Pouyan, S., Mirakbari, M., & AFZALI, S. (2015). Estimating the wind erosion climatic بادی در دوره مشاهداتی افزایش یافته و در سال ۲۰۱۶ به بالاترین مقدار خود رسیده ولی در دوره آینده با توجه به پیشبینی‌های مدل و نتایج عامل‌های اقلیمی، حساسیت پذیری فرسایش بادی به صورت میانگین کاهش خواهد داشت. بر طبق نتایج حاصل از پژوهش حاضر پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی علاوه بر فرآیندهای اقلیمی، فرآیندهای ادافیکی به عنوان یکی از عوامل اصلی تاثیر گذار بر فرسایش بادی مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع

- 1- Aghakhani Afshar, A., Hassanzadeh, Y., Besalatpour, A. A., & Pourreza Bilondi, M. (2017). Annual assessment of Kashafrood watershed basin climate components in future periods by using fifth report of intergovernmental panel on climate change. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 217-233 . (in Persian)
- 2- Ahmadi, H. (2006). *Applied Geomorphology Vol. 2, (Desert-Wind Erosion)*. In: University of Tehran press. (in Persian)
- 3- Aizen, E. M., Aizen, V. B., Melack, J. M., Nakamura, T., & Ohta, T. (2001). Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(5), 535-556 .
- 4- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Alkhalaf, A. K., & Dambul, R. (2017). Assessing the robustness and uncertainties of projected changes in temperature and precipitation in AR5 Global Climate Models over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*, 194, 202-213 .
- 5- Bayat Movahed, F., Nikkami, D., & Shami, H. (2010). Soil erosion mitigation approaches in rainfed farms. *Journal of Watershed Engineering and Management* . (in Persian)
- 6- Dong, Y.-x., & Kang, G.-d. (1994). Study on the wind erosion climatic erosivity in arid and semi-arid areas in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 8(3), 1-7 .
- 7- Frey, K. E., & Smith, L .C. (2003). Recent temperature and precipitation increases in West Siberia and their association with the Arctic Oscillation. *Polar Research*, 22(2), 287-300 .
- 8- Gao, T., Han, J., Wang, Y., Pei, H., & Lu, S. (2012). Impacts of climate abnormality on remarkable dust storm increase of the Hunshdak Sandy Lands in northern China

- 22-Shao, Y. (2008). Physics and modelling of wind erosion. Springer .
- 23- Yang, F., & Lu, C. (2016). Assessing changes in wind erosion climatic erosivity in China's dryland region during 1961–2012. *Journal of Geographical Sciences*, 26, 1263-1276 .
- 20-Rezaei, M., Sameni, A., Shamsi, S. R. F., & Bartholomeus, H. (2016). Remote sensing of land use/cover changes and its effect on wind erosion potential in southern Iran. *PeerJ*, 4, e1948 . (in Persian)
- 21-Shamshiri, S., Jafari, R., Soltani, S., & Ramezani, N. (2014). Dust detection and mapping in Kermanshah province using MODIS satellite imagery. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(8), 29-42 . (in Persian)