Technical Note

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 1 (53)

Received:
2023-07-08

Accepted:
2024-04-14

Pages: 133-146

The Effect of Climate Change on SoilOrganic Matter and Biological Activity

Yaser Azimzadeh[1] and Arash Mohammadzadeh[*2]

1) Assistant Professor of Natural Resources Management Research, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran.
2) Assistant Professor of Administrative and Service Unit, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran.
*Corresponding Author email: mohammadzadeh.arash@yahoo.com

Abstract:
Climate change phenomenon is one of the most important global challenges for mankind in providing sufficient and healthy food for the ever-increasing world population. The leading factors of climate change, such as increasing temperature, changing precipitation patterns, and increasing the frequency and intensity of weather events, affect soil characteristics, especially in the ecosystems of arid and semi-arid regions. These changes can directly affect the growth and production of crops. The amount of soil organic matter is one of the most important indicators of soil quality and health, which affects many physical, chemical and biological characteristics of soil and is directly and indirectly affected by climatic factors such as temperature and rainfall. On the other hand, the balance of input and output of organic carbon to the soil is effective on the amount of carbon dioxide in the atmosphere and thus on global warming and the climate change phenomenon. The results of many forecasts show that in arid and semi-arid regions, climate change will lead to an increase in temperature and a decrease in rainfall. Therefore, considering that the amount of organic matter in the soil decreases with the increase in temperature and decrease in humidity, it seems that the phenomenon of climate change will have adverse effects on the amount of soil organic matter and biological activity, and then on the production of crops in arid and semi-arid regions. Therefore, it is very important to use the necessary solutions to mitigate these adverse effects and adapt to the upcoming conditions. Mitigation refers to methods that lead to the reduction of greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide; But the goal of adaptation is to mitigate the inevitable effects of climate change. Based on the results of various publications, compliance with the principles of the conservation agriculture system is considered one of the most important mitigation and adaptation solutions in dealing with the consequences of climate change in arid and semi-arid regions. Due to the fact that the climate change phenomenon is an inevitable event and its adverse effects and consequences in human life are felt more and more intense day by day, it is necessary for the management of soil resources to have the necessary foresight regarding the results of this phenomenon on the quality of the soil and the potential of producing agricultural products, especially in Arid and semi-arid areas should be considered.

Keywords: Soil organic carbon, Soil health, Climate change, Global warming, Greenhouse gases

یادداشت فنی

اثر تغییر اقلیم بر مواد آلی خاک و فعالیت زیستی خاک

یاسر عظیم زاده[1] و آرش محمدزاده[2*]

۱) استادیار بخش تحقیقات مدیریت منابع طبیعی، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران.
۲) استادیار بخش خدمات فنی و تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران.
*ایمیل نویسنده مسئول: mohammadzadeh.arash@yahoo.com

چکیده:
پدیده تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی بشر در تأمین غذای کافی و سالم جمعیت روزافزون جهان به شمار می‌رود. عوامل پیش‌برنده تغییر اقلیم مانند افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و افزایش فراوانی و شدت رخدادهای جوی، ویژگی‌های خاک را به‌ویژه در بوم‌نظام‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. این اثرات می‌توانند مستقیماً بر رشد و تولید گیاهان زراعی اثر بگذارند. میزان مواد آلی خاک از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت و سلامت خاک است که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت‌تأثیر عوامل اقلیمی ازجمله دما و بارندگی قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، تعادل ورود و خروج کربن آلی به خاک بر میزان دی‌اکسید کربن اتمسفر و در نتیجه بر گرمایش جهانی و پدیده تغییر اقلیم مؤثر است. نتایج بسیاری از پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییر اقلیم منجر به افزایش دما و کاهش بارندگی خواهد شد. بنابراین، با توجه به اینکه با افزایش دما و کاهش رطوبت، میزان ماده آلی خاک کاهش می‌یابد، به نظر می‌رسد پدیده تغییر اقلیم اثرات نامطلوبی بر میزان ماده آلی و فعالیت زیستی خاک و به دنبال آن بر تولید محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک خواهد گذاشت. لذا بکارگیری راهکارهای لازم در خصوص تخفیف این اثرات نامطلوب و سازگاری با شرایط پیش‌رو از اهمیت بسزایی برخوردار است. تخفیف به روش‌هایی مربوط می‌شود که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسید کربن می‌شود؛ اما هدف از سازگاری ملایم نمودن اثرات غیرقابل اجتناب ناشی از تغییر اقلیم است. بر اساس نتایج آزمایش‌های مختلف منتشر شده، رعایت اصول سیستم کشاورزی حفاظتی از مهم‌ترین راهکارهای تخفیف اثرات و سازگاری با پیامدهای تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود. با توجه به این که پدیده تغییر اقلیم رخدادی اجتناب‌ناپذیر بوده و آثار و پیامدهای نامطلوب آن در زندگی بشر روزبه‌روز بیشتر و شدیدتر احساس می‌شود، لازم است در مدیریت منابع خاک، پیش‌آگاهی‌های لازم درخصوص نتایج این پدیده بر کیفیت خاک و پتانسیل تولید محصولات کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک در نظر گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: کربن آلی خاک، سلامت خاک، تغییر اقلیم، گرمایش جهانی، گازهای گلخانه‌ای

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم
شماره ۱ (۵۳)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۴/۱۷

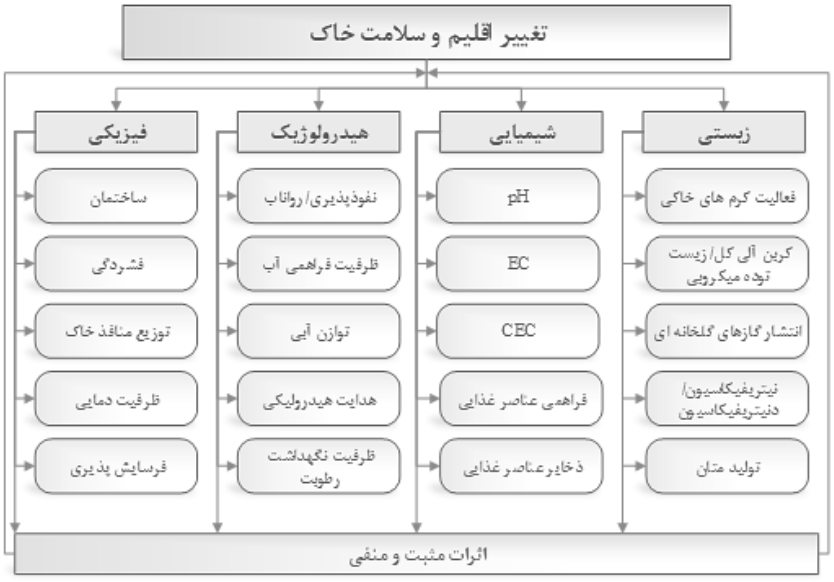
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۱/۲۶

صفحات: ۱۴۶-۱۳۳

مقدمه

در نظام‌های کشاورزی، سلامت خاک به توانمندی خاک در کارکردهای کشاورزی و محیط زیستی اشاره دارد. از مهم‌ترین این کارکردها می‌توان به حاصلخیزی و تولید محصول، واکنش به مدیریت و نهاده‌ها و مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی اشاره کرد (Singh et al., 2011). خاک سالم این توانایی را دارد که به صورت پایدار از رشد گیاه و حیوانات حمایت کرده و در عین حال محیط زیست را حفظ و بهبود بخشد. در واقع خاک را می‌توان به‌عنوان یک سیستم زنده و پویا در نظر گرفت که همانند یک موجود زنده به اقدامات مدیریتی بشر واکنش نشان می‌دهد (Kibblewhite et al., 2008). مفهوم سلامت خاک نیز مانند سلامت انسان با حفظ ویژگی‌ها و فرایندهای کلیدی خاک در شرایط مطلوب تعیین می‌شود. از ویژگی‌های خاک که در حفظ سلامت خاک دارای اهمیت ویژه‌ای هستند می‌توان به بافت، ساختمان و تهویه مطلوب خاک، زهکشی خوب، ظرفیت نگهداری مناسب آب، مقاومت در برابر فرسایش، حفظ و نگه‌داری عناصر غذایی و واکنش خاک اشاره کرد (Magdoff, 2001). از این میان، مقدار ماده آلی خاک از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده و با بسیاری از ویژگی‌های مهم فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک برهم‌کنش دارد و وجود مقدار مناسب ماده آلی خاک برای همه ویژگی‌ها و فرایندهای تعیین‌کننده سلامت خاک ضروری است. خاک سالم باید فعالیت زیستی مناسب داشته و عوامل بیماری‌زای آن در کمترین مقدار بوده و دارای ذخایر متعادلی از عناصر غذایی باشد (Magdoff, 2001). بیشترین ارتباط بین سلامت خاک و اقلیم جهانی، به تثبیت (ذخیره) و انتشار کربن مربوط می‌شود؛ به‌طوری که عوامل پیش‌برنده تغییر اقلیم مانند افزایش سطح غلظت دی‌اکسیدکربن و دمای هوا و تغییر در الگوهای بارش بر کارکردهای شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک اثر گذاشته (شکل ۱) و همه این عوامل به طور مستقیم و غیرمستقیم بر میزان کربن آلی ذخیره شده در خاک مؤثر می باشند (French et al., 2009).

آگاهی از اثرات ناشی از پدیده تغییر اقلیم بر ویژگی‌ها و کارکردهای خاک می‌تواند بشر را در رویارویی با اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر کشاورزی و امنیت غذایی آماده سازد. این موضوع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران با توجه به شرایط جغرافیایی آن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. مناطق خشک به مناطقی گفته می‌شود که تبخیر و تعرق از سطح خاک و گیاه به واسطه دمای زیاد و خشکی هوا بیشتر از نزولات جوی می‌باشد. تغییرات زمانی و مکانی درجه حرارت و خشکی در این مناطق وسیع بوده و بارندگی پراکنده و غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد. این مناطق به ۴ دسته مناطق فراخشک، خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب تقسیم می‌شوند. بیش از یک‌سوم از سطح خشکی‌های کره زمین را مناطق فراخشک، خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد؛ به طوری که حدود ۴/۲ درصد از سطح خاک‌های دنیا در مناطق بسیار خشک، ۱۴/۶ درصد در مناطق خشک و ۱۲/۲ درصد در مناطق نیمه‌خشک قرار دارد (Houghton et al., 2007). با توجه به این که کشور ما در کمربند خشک و نیمه‌خشک کره زمین واقع شده است، بیش از ۸۵ درصد از مساحت آن را مناطق فراخشک، خشک و نیمه خشک تشکیل می‌دهد؛ به طوری که حدود ۳۵/۵ درصد از مساحت آن در منطقه بسیار خشک، ۲۹/۲ درصد در مناطق خشک، ۲۰/۱ درصد در مناطق نیمه‌خشک، ۵ درصد در مناطق مدیترانه‌ای و مابقی در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب واقع شده است.



شکل ۱. اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات خاک‌ها (Lal, 2014)

میزان نزولات جوی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کم، توزیع بارش‌ها نامناسب و بارش‌ها بیشتر به صورت رگباری می‌باشند. علاوه‌بر آن، رطوبت خاک و در نتیجه، فعالیت زیستی و مواد آلی خاک کم و نوسانات رطوبتی و دمایی خاک زیاد است. تبخیر از سطح خاک زیاد و خاک‌ها مستعد شور و سدیمی شدن بوده، پوشش گیاهی ضعیف و فرسایش‌پذیری خاک در این مناطق معمولاً زیاد است. بنابراین، مناطق خشک و نیمه‌خشک در مقابل تغییرات اقلیمی شکننده بوده و ممکن است بیش از مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب تحت‌تأثیر آثار منفی ناشی از تغییر اقلیم قرار گیرند. بارندگی در کشور به صورت فصلی بوده و حدود ۵۰ درصد بارش در فصل زمستان، ۲۳ درصد در بهار، ۲۳ درصد در پاییز و تنها ۴ درصد در تابستان رخ می‌دهد (Amiri and Eslamian, 2010). از طرف دیگر، متوسط بلندمدت بارش در کشور حدود ۲۲۸ میلی‌متر بوده که کمتر از یک سوم میانگین جهانی است و میزان تبخیر و تعرق نیز بیش از ۳ برابر میزان بارندگی‌ها می‌باشد (Saatsaz, 2020). با توجه به نقش محوری ماده آلی در میزان حاصلخیزی خاک و تولید محصول از یک سو و تأثیرپذیری آن از پدیده تغییر اقلیم از سوی دیگر به ویژه در شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران وجود یک مطالعه مروری کمک موثری بر شناخت اهمیت مسأله و جستجوی راهکارهای مناسب آن می نماید. بنابراین، مقاله حاضر به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات ماده آلی و فعالیت زیستی خاک‌های کشاورزی با تأکید بر مناطق خشک و نیمه‌خشک می پردازد.

پوشش سطح خاک

پوشش سطح خاک (بقایای گیاهی یا لایه زیستی خاک)، کارکردهای اکولوژیکی مهمی مانند حفاظت از سطح خاک در برابر اثرات ناشی از ضربه قطرات باران، تثبیت خاک، کاهش سطح قابل‌فرسایش خاک، نگه‌داشت آب و عناصر غذایی، تثبیت کربن و نیتروژن و حمایت از جوانه‌زنی بذرها را فراهم می‌کند و به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع افزایش‌دهنده ماده آلی خاک محسوب می‌شود (Kaye and Quemada, 2017). علاوه‌بر آن، به دلیل ترشحات متنوع ریشه گیاهان، جمعیت، تنوع و فعالیت ریزجانداران خاک و همچنین فعالیت‌های آنزیمی در ریزوسفر بسیار بیشتر از خاک غیرریزوسفری است. یکی از اثرات مستقیم و غیرمستقیم تغییر اقلیم، اثر بر پوشش گیاهی سطح خاک است؛ زیرا دما و رطوبت که از مؤلفه‌های اصلی تغییر اقلیم به‌شمار می‌روند، کنترل‌کننده پراکنش و رشد گیاهان هستند (Yahdjian and Sala, 2008). افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای اتمسفر و به‌ویژه دی‌اکسیدکربن نیز از عوامل اقلیمی مؤثر بر پوشش گیاهی سطح خاک است (Azimzadeh et al., 2019). افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفر می‌تواند سبب افزایش باروری گیاهان و افزایش ورود ماده آلی به خاک شود که این افزایش کربن در خاک می‌تواند زیست‌توده میکروبی خاک را نیز افزایش دهد (Azimzadeh and Najafi, 2017). افزایش زیست‌توده میکروبی خاک می‌تواند از طریق افزایش فراهمی و یا ساکن‌سازی (تثبیت) عناصر غذایی بر رشد گیاه اثر بگذارد اما نهایتاً تجزیه مواد آلی می‌تواند سبب آزاد شدن عناصر غذایی و ورود آن‌ها به داخل محلول خاک شود (Sharma, 2022). نتایج تحقیقات نشان داده است که واکنش گیاهان به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر مثبت است و در بین گونه‌های گیاهی مختلف متفاوت بوده و در گیاهان سه‌کربنه بیشتر از گیاهان چهارکربنه است. با این حال، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌تواند به‌طور غیرمستقیم و با افزایش دما و تغییر الگوی بارش بر پراکنش و پوشش گیاهی تأثیر بگذارد (Pritchard, 2011).

افزایش دما بسته به عوامل دیگری نظیر نوع خاک و مقدار رطوبت و محتوی ماده آلی خاک می‌تواند اثرات مختلفی بر رشد گیاهان و ورود کربن آلی به خاک داشته باشد. چنانچه تغییر اقلیم در منطقه‌ای با افزایش دما و میزان بارش کم همراه باشد، افزایش دما می‌تواند با افزایش میزان تبخیر و تعرق، سبب کاهش رطوبت خاک و فراهمی آب برای گیاه شده و رشد گیاه را محدود سازد (Kaye and Quemada, 2017). در چنین شرایطی، طبیعتاً میزان مواد آلی تولیدی و فعالیت میکروبی خاک نیز تحت‌تأثیر قرار خواهد گرفت. افزایش دما می‌تواند دمای بهینه برای رشد گیاه را تحت‌تأثیر قرار دهد، به‌طوری که افزایش دما در مناطق سردسیر مانند مناطق شمال‌غرب و غرب کشور می‌تواند به دلیل افزایش متوسط دمای محیط و یا افزایش طول دوره رشد گیاه، محیط را برای رشد گیاهان بیشتری مساعد سازد. برعکس، در مناطق گرمسیری مانند مناطق شمال شرق، شرق، جنوب و قسمت‌های مرکزی کشور، افزایش دما می‌تواند با افزایش نیاز اتمسفری و تبخیر و تعرق و با ساز و کارهای مختلفی مانند شور شدن خاک‌ها، کاهش ماده آلی و محتوی رطوبتی خاک، میزان آب قابل‌دسترس گیاهان و در نتیجه پوشش گیاهی را کاهش دهد. تغییر در الگوی بارش نیز شدیداً بر وضعیت پوشش گیاهی خاک تأثیرگذار خواهد بود. انتظار می‌رود با تغییر شرایط اقلیمی به‌ویژه عوامل دما، بارندگی و همچنین افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفر، پوشش گیاهی خاک و در پی آن ویژگی‌های مرتبط خاک مانند ماده آلی، قابلیت نگه‌داری آب و عناصر غذایی، فعالیت موجودات زنده خاک، حاصلخیزی و فرسایش‌پذیری خاک در برابر فرسایش‌های آبی و بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تغییر پیدا کند. مطالعه انجام گرفته توسط خورشید دوست و همکاران (Khorshid Doust *et al.*, 2022) در خصوص تاثیر

پارامترهای اقلیمی بر توزیع پوشش گیاهی در ایران مرکزی بر اساس شاخص NDVI نشان داد که متغیر اقلیمی دما بیشترین تأثیر را بر توزیع و تراکم پوشش گیاهی در ایران مرکزی دارد. راهب و حیدری (Raheb and Heidari, 2022) با برررسی تأثیر اقلیم و تحول خاک بر منابع ذخیره کربن آلی خاک در البرز مرکزی بیان کردند که مقادیر بالای ذخیره کربن آلی در لایه‌های سطحی خاک را می‌توان به دلیل پوشش و تولید زیست توده گیاهی در سطح و تهویه تا حدودی کمتر در اثر وجود ریشه‌های در هم تنیده و ضخیم که باعث کاهش میزان تجزیه ماده آلی می‌گردد، نسبت داد. به عبارت دیگر، نوع پوشش گیاهی که تحت تاثیر اقلیم قرار می‌گیرد نقش بسیار مهمی در افزایش ورودی کربن از طریق افزایش لاشبرگ ورودی دارد. خداقلی و همکاران (Khodagholi *et al.*, 2023) در مطالعه خود بیان کردند که تغییرات اقلیمی می‌تواند آشیان اکولوژیک گونه‌ها و در نتیجه توزیع جغرافیایی آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. آنها پیش‌بینی کردند که در دو سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5، مناطق مناسب رشد گونه *Bromus tomentellus* تا سال ۲۰۵۰ به ترتیب ۵۳ و ۸۹ درصد در کشور کاهش خواهد یافت.

زیست‌توده میکروبی خاک

زیست‌توده میکروبی[1] خاک، بخش زنده ماده آلی خاک بوده و جزو ذخایر بسیار ناپایدار کربن در خاک‌ها و شاخصی حساس برای نشان دادن تغییرات موجود در فرایندهای خاک است که ارتباط زیادی با پویایی انرژی و عناصر غذایی در خاک دارد (Saha and Mandal, 2009; Sharma, 2022). زیست‌توده میکروبی خاک همانند سایر ذخایر ناپایدار کربن خاک به تغییرات کوتاه‌مدت محیطی واکنش نشان می‌دهد (Haynes, 2008)؛ به‌طوری‌که نتایج مطالعات نشان از کاهش قابل‌توجه زیست‌توده میکروبی خاک در نتیجه آزمایش‌های شبیه‌سازی گرم شدن اقلیم دارد (Rinnan et al., 2007). عوامل تغییر اقلیم مانند گرمایش جهانی، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر و تغییر نظام‌های بارندگی به‌طور بالقوه می‌توانند اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر جوامع میکروبی خاک داشته باشند. افزایش دما می‌تواند به‌طور مستقیم و با تأثیر بر فعالیت‌های آنزیمی حساس به دما در میکروب‌ها، کارکرد جوامع میکروبی خاک را تغییر دهد. افزایش دما همچنین با تأثیر بر تولید خالص اولیه و ذخایر پیش‌مادهٔ مورد استفادهٔ ریزجانداران، می‌تواند بر فراوانی و ترکیب آن‌ها اثر بگذارد. خشک شدن خاک نیز در نتیجه افزایش دما می‌تواند بر جوامع میکروبی خاک اثر بگذارد (Jansson and Hofmockel, 2020). اثر افزایش دما بر زیست‌توده میکروبی خاک متفاوت بوده و ریزجانداران خاک واکنش‌های مختلفی به این عامل نشان می‌دهند؛ به‌طوری که برخی از ریزجانداران خاک‌زی گرمادوست[2] بوده و با افزایش دما فعالیت آنها نیز افزایش می‌یابد ولی برخی دیگر از ریزجانداران سرمادوست[3] بوده و با افزایش دما فعالیت آنها کاهش می‌یابد (French et al., 2009). افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر می‌تواند زیست‌توده و ترکیب جوامع میکروبی خاک را مستقیماً از طریق افزایش زیست‌توده گیاهی، افزایش کربن ورودی به خاک از طریق بقایای گیاهی و ریشه گیاهان و کاهش سرعت خشک شدن خاک بر اثر کاهش هدایت روزنه‌ای گیاهان تغییر دهد (García-Palacios and Chen, 2022). به‌طورکلی در بسیاری از خاک‌ها بین تولید زیست‌توده گیاهی و زیست‌توده میکروبی یک رابطه مثبت وجود دارد و با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر انتظار می‌رود که زیست‌توده میکروبی نیز افزایش یابد (Zak et al., 2000). مظاهری و بازگیر[4] در مطالعه تاثیر اقلیم و کاربری‌های مختلف اراضی بر زیست توده و فعالیت میکروبی خاک در دو منطقه نیمه‌مرطوب (ایوان) و نیمه‌خشک (منطقه گنجوان) استان ایلام به این نتیجه رسیدند که مقدار کربن آلی و تنفس پایه در اقلیم نیمه‌مرطوب بیشتر از اقلیم نیمه‌خشک بوده و با تغییر کاربری از جنگل به اراضی زراعی در اقلیم خشک، کربن آلی، زیست توده و فعالیت میکروبی خاک کاهش می‌یابد (Mazaheri and Bazgir, 2019).

زیست‌توده میکروبی خاک ذخایر پویایی از مواد آلی در خاک بوده و محتوای عناصر غذایی آن‌ها اغلب بیشتر از گیاهان است. بنابراین، تغییر جریان‌های کربن ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند با اثرگذاری بر زیست‌توده میکروبی خاک، معدنی‌شدن مواد آلی، هوادیدگی مواد معدنی، فرسایش، آبشویی و سایر سازوکارهای چرخه عناصر غذایی در خاک، توزیع عناصر غذایی در خاک را تحت‌تأثیر قرار دهد. چرخه عناصر غذایی، به‌ویژه نیتروژن رابطه نزدیکی با چرخه کربن آلی خاک دارد و بنابراین، عوامل پیش‌برنده تغییر اقلیم مانند افزایش دما، تغییر در بارندگی و تثبیت نیتروژن اتمسفری می‌تواند به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر چرخه نیتروژن و احتمالاً بر چرخه عناصری مانند فسفر و گوگرد اثرگذار باشد (Singh et al., 2011; Sharma, 2022). پدیده تغییر اقلیم سرعت معدنی‌شدن مواد آلی را به صورت‌های مختلف دگرگون خواهد کرد. به‌طور مثال، کمیت و کیفیت مواد آلی تولیدی در شرایط تغییر اقلیم تحت‌تأثیر قرار گرفته و در پی آن، فعالیت‌های میکروبی و فرایند تجزیه و تخریب مواد آلی نیز تغییر می‌یابد. همچنین، عوامل غیرزنده نظیر دما و رطوبت سرعت تجزیه مواد آلی در خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (Azimzadeh and Najafi, 2017).

اثر افزایش دما بر موجودات زنده خاک

موجودات زنده خاک با توجه به تأثیری که بر فرایندهای دخیل در تولید محصولات کشاورزی (مانند عناصر غذایی خاک و کنترل بیماری‌های گیاهی) و خدمات اکوسیستمی، کنترل فرسایش، ترکیب گازهای اتمسفری، کاهش آلودگی و حفظ تنوع زیستی) دارند، ارتباط تنگاتنگی با سلامت خاک دارند (Kibblewhite et al., 2008). موجودات زنده خاک نقش‌های بسیار متنوعی در تغییرات اقلیمی داشته و می‌توانند سبب کاهش و یا تشدید تغییرات اقلیمی شوند. همچنین، اثرات تغییر اقلیم بر فعالیت موجودات خاک در بسیاری از مناطق قابل‌توجه است. بر اساس گزارش کارگروه اول تدوین گزارش پنجم ارزیابی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC[۵])، میانگین دمای کره زمین در طی دوره ۳۰ ساله از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۲ به طور پیوسته افزایشی بوده و این ۳۰ سال گرم‌ترین دوره اقلیمی در طی ۱۴۰۰ سال گذشته بوده است (IPCC, 2013). نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان داده است که افزایش درجه حرارت هوا می‌تواند فعالیت موجودات زنده خاک را به‌ویژه در مناطق سردسیر افزایش دهد و به تبع آن، سرعت تجزیه مواد آلی و تنفس میکروبی افزایش یابد. گرما می‌تواند سرعت بازچرخش زیست‌توده میکروبی و تغییر در ترکیب جامعه میکروبی را افزایش دهد. قارچ‌ها معمولاً به افزایش دما واکنش مثبتی نشان می‌دهند که این مسئله ممکن است به دلیل افزایش تولید ریشه در گیاهان باشد. افزایش دما همچنین اثر مثبتی بر سرعت رشد کرم‌های خاکی داشته و فروانی و فعالیت حلزون‌های صدف‌دار و بدون‌صدف نیز با افزایش دما افزایش می‌یابد. نماتدها نیز نسبت به افزایش دمای خاک واکنش مثبت نشان داده و افزایش گرما می‌تواند سبب افزایش تنوع، رشد، سرعت باروری و همچنین تحرک آن‌ها شود. واکنش بندپایان کوچک نسبت به افزایش دما یکسان نیست و افزایش دما می‌تواند فراوانی این موجودات را کم یا زیاد کند و یا تأثیری بر فراوانی آن‌ها نداشته باشد. بنابراین، به‌طورکلی افزایش دما منجر به افزایش تنوع، جمعیت و فعالیت موجودات زنده خاک خواهد شد و این افزایش در مناطق سردسیر بیشتر از مناطق گرم و خشک و نیمه‌خشک رخ خواهد داد (Pritchard, 2011). مطالعه هائو و همکاران[۶] در خصوص اثر افزایش CO_2 و دمای محیط بر جوامع میکروبی در خاک سطحی علفزار نشان داد که علیرغم اثر قابل توجه افزایش CO_2 محیط بر ترکیب و ساختار جوامع میکروبی، افزایش دما تاثیر منفی اندکی بر جوامع میکروبی دارد (Yu *et al.*, 2018). اگرچه بسیاری از منابع علمی جوامع میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی را که عوامل پیش‌برنده فرایندهای اکولوژیک در خاک هستند را حساس به شرایط محیطی از جمله دما می‌دانند. تغییرات دمایی مهمترین عاملی است که مستقیما بر فعالیت‌های آنزیمی تاثیر گذاشته (Kim et al., 2022) و رشد گیاهان و فعالیت موجودات زنده خاک را محدود می‌کند که این حساسیت در موجودات خاک به دماهای پایین بیشتر از دماهای بالا است (Nottingham *et al.*, 2019). تحقیقات نشان می‌دهد که ترکیب جوامع میکروبی زمانی تغییر می‌کند که دمای محیط بیش از ۶ تا ۸ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می کند. با این حال مشخص نیست که این تغییر نتیجه مستقیم عامل دما بوده یا به اثرات غیرمستقیم آن بر رشد و فنولوژی گیاهی، کاهش مواد آلی خاک یا بافت خاک بر می‌گردد (Weedon *et al.*, 2023). در کنار این موارد، وقوع آتش‌سوزی در شرایط تغییر اقلیم با فراوانی بیشتری رخ می‌دهد که می‌تواند بر مواد آلی خاک اثرگذار باشد. آتش‌سوزی معمولاً پایداری خاکدانه‌ها را کاهش داده و بسته به دمای ایجاد شده و مدت زمان آن می‌تواند باعث ایجاد، افزایش یا از بین رفتن آب‌گریزی خاک شود (Chan, 2011).

اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر بر موجودات زنده خاک

به‌طورکلی انتظار نمی‌رود که موجودات زنده خاک به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر واکنش مسقیمی نشان دهند؛ زیرا غلظت دی‌اکسیدکربن در خاک نسبتاً بالا بوده و بعید به نظر می‌رسد که با تغییر غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر، تغییر چندانی در جمعیت، تنوع و فعالیت موجودات زنده خاک رخ دهد. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر می‌تواند به‌طور غیرمستقیم از طریق افزایش بقایای گیاهی در خاک، تولید ریشه و ترشحات ریشه گیاهان بر فعالیت موجودات خاک اثر بگذارد. همچنین اثراتی که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر ترکیب گونه‌های گیاهی و ثبات و پایداری خاکدانه‌های خاک دارد، می‌تواند بر جمعیت موجودات زنده خاک اثر داشته باشد (Azimzadeh et al., 2019). شریفی و صفری سنجانی[۷] با مروری سیستمتیک بر روابط متقابل میان جانداران خاک و تغییرات اقلیمی بیان کردند که اثر افزایش CO_2 بر جانداران خاک به گونه غیرمستقیم و از طریق افزایش فتوسنتز در گیاهان است. آنها گزارش کردند که جانداران خاک بسته به نوع، اندازه بدن، عادت تغذیه‌ای، نوع اکوسیستم، اقلیم محلی و میزان بزرگی و طول دوره پارامتر اقلیمی پاسخ‌های متفاوتی را در برابر دگرگونی‌های اقلیمی از جمله فزایش CO_2 از خود نشان می‌دهند (Sharifi and Safari Sinegani, 2015). نتایج بسیاری از آزمایش‌ها و مطالعات صورت‌گرفته نشان می‌دهد که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر معمولاً اثر چندانی بر فراوانی باکتری‌ها و زیست‌توده میکروبی خاک ندارد، اما قارچ‌های مایکوریزا که با گیاهان رابطه هم‌زیستی دارند بیشترین سود را از این تغییر می‌برند (Deng et al., 2010; French et al., 2009; Bernhardt et al., 2006). افزایش ترشح ترکیبات آلی ریشه در شرایط افزایش غلظت

دی‌اکسیدکربن یکی از دلایل اصلی این مسئله است که با افزایش اشغال ریشه توسط قارچ‌های همزیست و افزایش طول هیف‌های آن‌ها همراه است. سایر موجودات خاک مانند کرم‌های خاکی و بندپایان کوچک نیز واکنش‌های متفاوتی نسبت به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر نشان می‌دهند که می‌تواند مثبت، منفی و یا بی‌تأثیر باشد (Koochaki et al., 2009). مطالعه کارنی و همکاران[۸] نشان داد که دو برابر شدن غلظت CO_2 محیط در مدت ۶ سال علیرغم افزایش رشد جامعه گیاهی سبب کاهش کربن آلی خاک گردید. آنها گزارش کردند که کاهش کربن خاک ناشی از تغییر در ترکیب و فعالیت میکروبی خاک بود. به طوری که، خاک‌هایی که در معرض CO_2 بالا قرار داشتند، دارای فراوانی بالایی از قارچها و فعالیت زیاد آنزیم تجزیه‌کننده کربن خاک بوده که منجر به سرعت بالای تخریب مواد آلی خاک نسبت به شرایط نرمال گردید (Carney *et al.*, 2007). سان و همکاران[۹] با انجام فراتحلیل و بررسی بیش از ۹۵۰ مشاهده گزارش کردند که افزایش غلظت CO_2 محیط سبب افزایش نسبت باکتری ها به قارچ ها، نسبت باکتری‌های گرم مثبت به گرم منفی؛ زیست توده باکتریایی، کربن زیست توده کربنی و فراوانی قارچهای میکروریزا در خاک می گردد (Sun *et al.*, 2021).

اثر تغییر الگوی بارش بر موجودات زنده خاک

به‌طورکلی تغییر در فراوانی و توزیع بارندگی از سه طریق می‌تواند بر موجودات زنده خاک تأثیر بگذارد: نخست، از طریق تأثیر بر سرعت متابولیسم موجودات زنده خاک؛ دوم، با تأثیر بر جابجایی و تحرک بعضی از موجوداتی که برای حرکت به غشای آبی بین ذرات خاک وابسته هستند (مانند نماتدها و آغازیان خاک) و سوم، با تغییر توزیع عمودی جمعیت موجودات زنده در پروفیل خاک (Rinnan et al., 2007). قسمت‌های سطحی خاک معمولاً خشک‌تر بوده و تغییرات دمایی زیادی دارد و موجودات خاکزی برای فرار از خشکی و تغییرات دمایی شدید، به عمق‌های پایین‌تر حرکت می‌کنند. در عمق‌های پایین‌تر، جایی که خاک رطوبت بیشتری دارد، موجودات زنده خاک برای فرار از شرایط غرقاب، به سمت بالای خاک که رطوبت و تهویه مناسب‌تری دارد حرکت می‌کنند. بارندگی می‌تواند با تغییر در ساختمان خاک مانند کاهش ثبات خاکدانه‌ها بر اثر خشکی‌های مکرر، بر تغییرات رطوبت و تهویه خاک و درنتیجه بر حرکت موجودات خاک اثر بگذارد. در نتیجه تغییر اقلیم، خاک بیشتر مناطق به مدت طولانی در معرض خشکی قرار گرفته و از سویی دیگر، احتمال وقوع بارندگی‌های شدید و ایجاد سیل افزایش پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، خاک‌ها بیشتر در معرض تخریب ساختمان قرار می‌گیرند که در نتیجه خرد شدن و از هم پاشیدن خاکدانه‌ها اتفاق می‌افتد که با افزایش شدت بارش از هم‌پاشیدگی خاکدانه‌ها تشدید می‌شود (Chan, 2011). بارندگی همچنین می‌تواند با تأثیر بر جوامع گیاهی و هوادیدگی سنگ‌ها بر میزان و فعالیت موجودات زنده خاک اثر بگذارد (Jansson and Hofmockel, 2020). در دیم‌زارهای مناطق خشک و نیمه‌خشک که تنها منبع تأمین رطوبت خاک بارندگی و صعود آب از سفره آب زیرمینی است، در زمان اوج فعالیت زیستی خاک (از اوایل بهار تا اواخر تابستان) به‌علت بارندگی کم و پایین بودن سطح آب زیرزمینی، معمولاً رطوبت خاک کم است. در این مناطق، اگر تغییر اقلیم منجر به افزایش بارش‌ها شود می‌تواند بر موجودات زنده خاک از جمله ریزجانداران و فعالیت زیستی خاک اثرات مثبتی داشته باشد ولی در صورتی که تغییر اقلیم در این مناطق منجر به کاهش بارندگی‌ها شود، فعالیت زیستی خاک در این مناطق کاهش خواهد یافت (Smith et al., 2002).

اثرات افزایش دما بر تنفس خاک

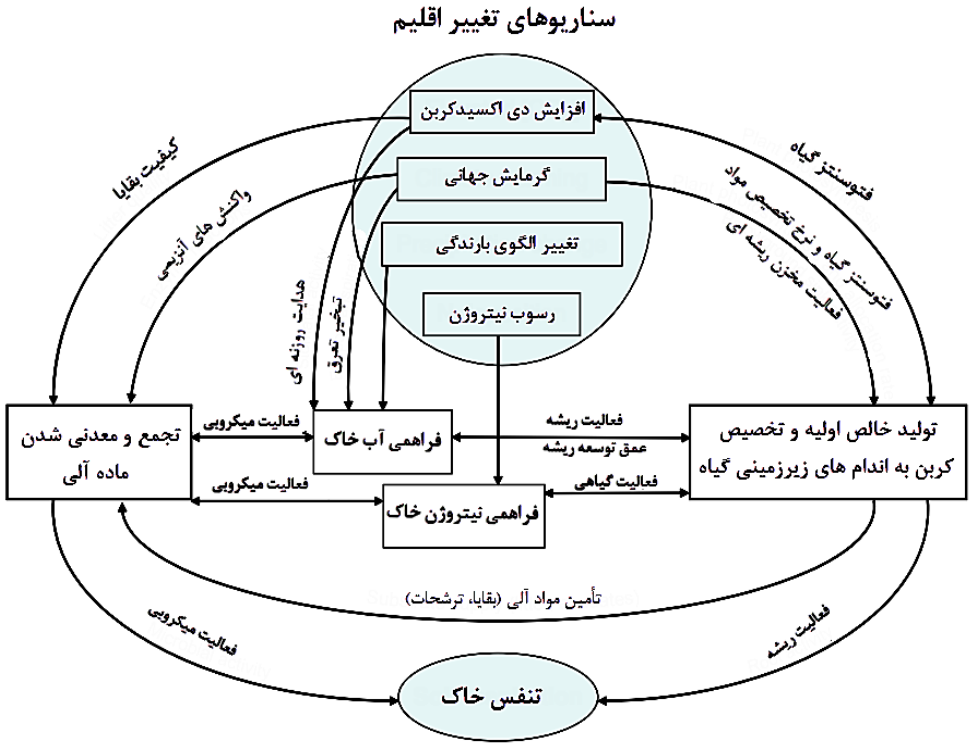
تنفس خاک عمدتاً به‌عنوان یک شاخص زیستی برای سلامت خاک محسوب می‌شود و رابطه مستقیمی با محتوای مواد آلی خاک، زیست‌توده و فعالیت میکروبی دارد. گرم شدن اقلیم می‌تواند اکوسیستم‌های خشکی را از مخزن کربن به منبع آن تبدیل کند. نتایج برخی از مطالعات نشان می‌دهد گرم شدن خاک میزان تنفس آن را به طور متوسط ۲۰٪ افزایش می‌دهد و اکوسیستم‌های جنگلی در مقایسه با سایر اکوسیستم‌ها ازجمله مناطق خشک و نیمه‌خشک واکنش شدیدتری به این امر نشان می‌دهند (Rustad et al., 2001). Schindlbacher et al., (2009) گزارش کردند زمانی که دمای خاک ۴ درجه سلسیوس بیشتر از دمای محیط باشد، تنفس خاک به‌طور مداوم طی دو سال ۴۷-۴۵٪ افزایش پیدا می‌کند. طی آزمایش مشابهی، بارونز و همکاران[۱۰] نیز گزارش کردند که با ۵ درجه سلسیوس افزایش در دمای خاک، میزان تنفس خاک در سال اول ۲۴٪ و در سال دوم ۱۱٪ افزایش یافت (Bronson et al., 2008) در بسیاری از مناطق، افزایش دما می‌تواند طول فصل رشد و فتوسنتز گیاهان را افزایش داده و بدین‌ترتیب سبب افزایش تنفس خاک شود (Beillouin, 2022). افزایش دما همچنین می‌تواند از طریق تغییر در ترکیب جوامع میکروبی خاک، کاهش سریع مواد آلی تازه، کاهش زیست‌توده ریشه و زیست‌توده میکروبی و کاهش محتوی رطوبتی خاک بر تنفس خاک اثر بگذارد (Singh et al., 2011). به نظر می‌رسد با افزایش دمای خاک، فراوانی گونه‌های متحمل به دما مانند قارچها افزایش پیدا می‌کند و فراوانی نسبی و فعالیت باکتری‌ها کاهش می‌یابد (Pritchard, 2011). با این حال، نتایج برخی از مطالعات اثر افزایش دما بر تنفس خاک را بی‌تأثیر گزارش و برخی حتی کاهش تنفس خاک با افزایش دما را گزارش کرده‌اند (Singh et al., 2011). بنابراین برای روشن شدن مطلب به تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز است.

اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر بر تنفس خاک

تنفس خاک و به‌ویژه واکنش آن به دما تحت‌تأثیر تغییر اقلیم و چرخه جهانی کربن قرار دارد و می‌تواند با میزان دی‌اکسیدکربن تولیدی یا اکسیژن جذبی مشخص شود. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر سرعت فتوسنتز گیاه و در نهایت تولید اولیه را افزایش می‌دهد؛ به‌طوری‌که در برخی از مطالعات، بر اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، سرعت رشد گیاهان خانوادهٔ گندمیان حدود ۵۱٪ و گونه‌های چوبی ۴۲٪ افزایش یافته است (Zak et al. 2000). همچنین مطالعات زیادی افزایش کربن خاک و افزایش تنفس خاک را در نتیجه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر گزارش کرده‌اند (Bernhardt et al., 2006; Deng et al., 2010). بنابراین، افزایش تنفس خاک در شرایط افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر می‌تواند سبب کاهش ذخیره کربن خاک در اکوسیستم‌های خشکی شود (Singh et al., 2011). هر چند مطالعه فراتحلیلی جاسترو و همکارن[11] نشان داد که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر در اکوسیستم‌های خشکی به دلیل تولید و حفظ نسبتاً زیاد کربن ریشه‌ای در داخل خاکدانه‌های ریز، ذخیره کربن خاک را افزایش می‌دهد (حدود ۵/۶٪) (Jastrow et al., 2005). تحقیقات هلس و همکاران[12] نشان داد که می‌توان افزایش تنفس هتروتروفیک خاک را در شرایط افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر به افزایش تولید گیاهی و ترشحات ریشه گیاهان نسبت داد (Heath et al., 2005). این مواد ترشح شده از ریشه می‌تواند سرعت تجزیه کربن آلی قدیمی خاک را افزایش دهد (García-Palacios and Chen, 2022). بقایای گیاهی که در شرایط غلظت بالای دی‌اکسیدکربن تولید شوند، غنی از لیگنین بوده و محتوای نیتروژن کمتری خواهد داشت که بر روند تجزیه بقایا اثرگذار خواهد بود. با این حال، نتایج برخی از مطالعات نشان داده است که با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، بسیاری از گیاهان دولپه به‌ویژه بقولات، فراهمی نیتروژن خاک را افزایش داده و بنابراین کمبود نیتروژن برای تجزیه مواد آلی را جبران می‌کنند (Allard et al., 2004).

اثر تغییر الگوی بارش بر تنفس خاک

به‌طورکلی تنفس خاک به‌ویژه در خاک‌هایی که به‌مدت طولانی در معرض خشکی بوده‌اند به بارندگی واکنش سریعی نشان می‌دهد (شکل ۱) (Jarvis et al., 2007). خشک و تر شدن متوالی خاک سبب از هم گسستن خاکدانه‌ها شده و کربن ناپایدار خاک را در معرض تجزیه میکروبی قرار می‌دهد. خاک بعد از یک بارندگی سنگین، غرقاب شده و به دلیل اشباع شدن منافذ ریز و درشت خاک با آب و بر اثر کاهش انتشار گازهای اکسیژن و دی‌اکسیدکربن، ممکن است تنفس خاک در کوتاه‌مدت کاهش یابد؛ اما پس از مدت کوتاهی، بر اثر افزایش



شکل ۲. طرح کلی اثرات مستقیم و غیرمستقیم سناریوهای تغییر اقلیم بر تنفس خاک (Singh et al., 2011).

شکل ۳. اثر دما و رطوبت بر تجزیه مواد آلی و هوموسی شدن (Scharpenseel and Shoemaker, 1990).

محتوای رطوبتی خاک، فعالیت ریزجانداران دگرپرور (هتروتروف) و خودپرور (اوتوتروف) افزایش پیدا می‌کند (Singh et al., 2011). بخش عمده‌ای از افزایش تنفس خاک پس از بارندگی می‌تواند به دلیل افزایش ریشه‌های ظریف و فعالیت متابولیک ریشه باشد. نوع پوشش گیاهی نیز می‌تواند تنفس خاک را به‌ویژه در شرایط خشکی تحت‌تأثیر قرار دهد. به‌طور مثال، گیاهان با ریشه عمیق می‌توانند آب را از اعماق خاک به سطح بیاورند و بنابراین فعالیت ریشه‌ای و ریزجانداران را در سطح خاک تقویت کنند (Singh et al., 2011).

مواد آلی خاک

مواد آلی خاک، گسترهٔ وسیعی از اجزاء زنده و غیرزنده و ترکیبات پیچیده و ناهمگنی را شامل می‌شود که بر اساس ویژگی‌ها، کارکردها، مدت زمان و مرحله تجزیه متفاوتند (Azimzadeh and Najafi, 2017). مادهٔ آلی خاک به دلیل کارکردهای مهمی ازجمله ذخیره کربن و نیتروژن در خاک، تأثیر بر چرخه عناصر آلی مانند نیتروژن، فسفر و گوگرد، توانایی ترکیب با یون‌های چندظرفیتی و مولکول‌های آلی، تأمین زیستگاه ریزجانداران خاک و همچنین تأثیر بر ثبات خاکدانه‌ها، نفوذپذیری خاک، نگهداری آب و ویژگی‌های آب‌شناختی خاک، از ویژگی‌های بسیار مهم کیفیت خاک محسوب می‌شود (Haynes, 2008). بنابراین کاهش مواد آلی خاک می‌تواند منجر به کاهش باروری، تنوع زیستی و ظرفیت نگهداری آب و افزایش فرسایش‌پذیری، جرم مخصوص ظاهری و فشردگی خاک شود. مواد آلی موجود در خاک منبع اصلی کربن زیست‌سپهر بوده و میزان آن تقریباً معادل دو برابر میزان دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر برآورد شده است (Beillouin et al., 2022). این مواد در نتیجه تعادل فرآیندهای فتوسنتز و تنفس در اکوسیستم‌های خشکی در بلندمدت تشکیل شده‌اند و مهمترین نقش را در چرخه کربن ایفا می‌کنند. مقدار مواد آلی موجود در خاک به تعادل بین ورود مواد آلی به خاک و خروج مواد آلی از خاک بستگی دارد و این تعادل تحت‌تأثیر عوامل اقلیمی، خاکی و مدیریتی می‌باشد. دما و رطوبت (بارندگی)، از مهمترین عوامل اقلیمی هستند که فعالیت زیستی خاک و سرعت تجزیه و تخریب مواد آلی را کنترل می‌کنند (شکل ۳) (Scharpenseel and Shoemaker, 1990).

در چرخه کربن، بین کربن اتمسفر و کربن ذخیره شده در خاک یک تعادل پویا وجود دارد. هر تغییری در افزایش یا کاهش مواد آلی خاک، میزان کربن موجود در خاک را تحت‌تأثیر قرار داده و موجب کاهش یا افزایش میزان گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفر می‌شود (Azimzadeh and Najafi, 2021). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که ذخایر کربنی خاک با افزایش دما رابطه عکس و با بارندگی رابطه مستقیم دارد. بنابراین، اثر متقابل دما و رطوبت، عامل اصلی تجزیه و یا انباشت کربن در خاک است. به طورکلی، افزایش دما در شرایط رطوبت مناسب می‌تواند سبب افزایش سرعت تجزیه مواد آلی شود. هر چند که پیش‌بینی اثرات گرم شدن زمین بر ماده آلی خاک کار ساده‌ای نبوده و به عوامل متعددی بستگی دارد (Singh et al., 2011). در هر شرایطی از بارندگی، مقدار کربن خاک معمولاً با کاهش دما افزایش می‌یابد. سرعت تجزیه و تخریب مواد آلی خاک با افزایش همزمان دما و بارندگی افزایش

یافته و بعد از رسیدن به مقدار حداکثر، مجدداً کاهش می‌یابد. با افزایش دما و رطوبت، فعالیت زیستی خاک تشدید شده و سرعت تجزیه و تخریب مواد آلی خاک افزایش می‌یابد (Beillouin, 2022). از طرف دیگر، افزایش رطوبت و دما منجر به بهبود رشد گیاه، بهبود فعالیت زیستی خاک و افزایش ورودی مواد آلی به خاک می‌شود. بنابراین، در مناطق گرم و مرطوب هم ورودی مواد آلی به خاک و هم خروجی مواد آلی از خاک زیاد است (Azimzadeh et al., 2019). در مناطق خشک و نیمه‌خشک ازجمله در دیم‌زارهای ایران که معمولاً رطوبت خاک کم و دما زیاد است، از یک طرف ورودی مواد آلی به خاک کم است و از طرف دیگر، به‌علت ضعف فعالیت زیستی خاک، سرعت تجزیه مواد آلی خاک و خروجی مواد آلی از خاک کم است. بنابراین، در مناطقی که بر اثر تغییرات اقلیمی، دما و میزان بارندگی همزمان افزایش یابند، سرعت تجزیه مواد آلی وارد شده به خاک نیز افزایش خواهد یافت.

به‌طور کلی، افزایش یا کاهش میزان ماده آلی خاک به اثر متقابل عوامل دمایی و بارش و سایر عوامل مانند غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر و تثبیت نیتروژن بستگی دارد؛ به‌طوری که اگر این عوامل، ماده آلی ورودی به خاک را در مقایسه با مواد آلی تجزیه‌شده افزایش دهند، ماده آلی خاک افزایش پیدا خواهد کرد (Singh et al., 2011). با توجه به این که نتایج پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد بر اثر پدیده تغییر اقلیم، در مناطق خشک و نیمه‌خشک میزان بارندگی کاهش و میانگین دمای هوا افزایش خواهد یافت، پیش‌بینی می‌شود این تغییرات منجر به کاهش میزان مواد آلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران خواهد شد. به عنوان مثال، شکیبا و متکان[۱۳] در تحقیقی با استفاده از بارندگی، دما، داده‌های رقومی خاک و پوشش گیاهی و با استفاده از مدل (RothC-26.3) تأثیر احتمالی تغییرات اقلیمی بر کربن آلی خاک در طی صد سال آینده و تحت شرایط ۳ سناریوی متفاوت تغییر اقلیم مورد بررسی قرار دادند. این سه سناریو عبارت بودند از: سناریوی کنترل، سناریوی افزایش گازهای گلخانه‌ای (GHG[۱۴]) و سناریوی تأثیر مشترک گازهای گلخانه‌ای و هواویزها ($GHG+SO_4$). نتایج این تحقیق نشان داد که سطح مواد آلی موجود در خاک‌های جهان در نتیجه تغییر در میزان دما و بارندگی در هر سه سناریو روندی کاهشی خواهد داشت (Shakiba and Matkan, 2005). البته میزان تغییرات کربن در اکوسیستم‌های مختلف تابعی از میزان شدت تغییرات اقلیمی در آن اکوسیستم براساس سناریوهای متفاوت می‌باشد؛ به‌طوری‌که میزان این تغییرات تحت‌تأثیر سناریوی (GHG) نسبت به دو سناریوی دیگر بیشتر بود. Farzanmanesh et al., (2016) با بررسی و مدل‌سازی اثر تغییر اقلیم بر کربن آلی خاک در اراضی خشک و نیمه‌خشک شمال‌شرق ایران، پیش‌بینی کردند که با افزایش دمای هوا و کاهش میزان بارندگی، کربن آلی خاک در طی ۵۵ سال آینده کاهش خواهد یافت و این کاهش در اراضی زراعی شدیدتر از اراضی غیرزراعی خواهد بود. علاوه‌بر آن، کاهش احتمالی میزان مواد آلی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک بر اثر پدیده تغییر اقلیم توسط پژوهشگران دیگری نیز پیش‌بینی شده است (Dimobe et al., 2018; Wang et al., 2018).

راهکارهای کاهش اثرات نامطلوب تغییر اقلیم بر ویژگی‌های خاک: تخفیف و سازگاری

در رابطه با تغییر اقلیم و نحوه مواجهه با این پدیده دو رویکرد کلی وجود دارد. این دو رویکرد عبارتند از تخفیف[۱۵] و سازگاری[۱۶]. تخفیف به روش‌هایی مربوط می‌شود که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود اما هدف از سازگاری ملایم نمودن اثرات غیرقابل اجتناب ناشی از تغییر اقلیم است. این دو رویکرد هم‌اکنون به‌طور جدی در دستور کار IPCC قرار دارد. البته نحوه برخورد با آن تاحد زیادی تابع مکان است؛ به‌طوری که بخشی از پاسخ‌ها در مقیاس جهانی و بخشی در مقیاس محلی قابل انجام هستند (Heydari, 2018).

تخفیف

افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفر منجر به افزایش دمای کره زمین شده و الگوی بارش را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد که می‌تواند خشکسالی و یا بارش‌های سیل‌آسا را در پی داشته باشد. این تغییرات به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم، شاخص‌های کیفیت خاک و توان باروری آن را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. افزایش در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به فعالیت‌های تشدیدی بشر در استفاده از سوخت‌های فسیلی مربوط می‌شود. بر اساس آمار سال ۲۰۱۴ شش کشور چین (۳۰ درصد)، ایالات متحده (۱۵ درصد)، اتحادیه اروپا (۹ درصد)، هندوستان (۷ درصد)، فدراسیون روسیه (۵ درصد) و ژاپن (۴ درصد)، در مجموع ۷۰ درصد گاز دی‌اکسیدکربن جهان را تولید نموده و سهم سایر کشورها فقط ۳۰ درصد بوده است (Boden et al., 2017). در این برآوردها، آمار مرتبط با انتشار و یا جذب گازهای گلخانه‌ای ناشی از کاربری اراضی لحاظ نشده است، اما تغییرات در کاربری اراضی نیز می‌تواند در انتشار گازهای گلخانه‌ای مهم باشد. برآوردها حاکی از آن هستند که خالص انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کشاورزی، جنگل و سایر کاربری‌های اراضی در ابعاد جهانی معادل ۸ میلیارد تن تولید گاز دی‌اکسیدکربن و یا حدود ۲۴ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته در جهان است (Boden et al., 2017).

جایگزین کردن انرژی‌های پاک و تجدیدشونده مانند انرژی خورشید، باد، امواج دریا، زمین‌گرمایی و انرژی هسته‌ای با سوخت‌های فسیلی و کاهش سوزاندن سوخت‌های فسیلی از راهکارهای اساسی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند. علاوه‌بر آن، در سال‌های اخیر استفاده از فن‌آوری بیوچار

برای تثبیت کربن در خاک، راهکار نسبتاً جدید و مؤثری است که برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پیشنهاد شده است (Azimzadeh and Najafi, 2017). در این روش زیست‌توده‌های آلی در شرایط اکسیژن محدود و یا در محیط فاقد اکسیژن در دماهای بیشتر از ۳۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده می‌شوند. بر اثر این فرآیند، زیست‌توده آلی به یک ماده جامد سیاه‌رنگ غنی از کربن پایدار با ساختمان آروماتیک به نام بیوچار تبدیل می‌شود که می‌تواند کربن را برای مدت چندصد تا چندهزار سال در خاک تثبیت کند (Azimzadeh and Najafi, 2017 و 2021؛ Azimzadeh et al., 2019).

علاوه‌بر سوخت‌های فسیلی، خاک نیز در انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش قابل‌توجهی دارد. به‌عنوان مثال، فعالیت میکروبی، تنفس ریشه، فرآیندهای تجزیه شیمیایی و تنفس هتروتروفی موجودات خاک منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای در خاک‌ها می‌شوند. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک متأثر از عوامل گوناگون محیطی و مدیریتی است. دی‌اکسیدکربن منتشر شده از خاک غالباً بر اثر تنفس ریشه گیاهان و ریزجانداران خاک و همچنین بر اثر تجزیه مواد آلی در خاک تولید می‌شود. گاز گلخانه‌ای نیتروزاکسید که پتانسیل گرمایش جهانی آن ۲۹۸ برابر دی‌اکسیدکربن است، از طریق فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون تولید می‌شود و گاز متان بر اثر فعالیت میکروب‌های تولیدکننده متان تحت شرایط غیرهوازی تولید می‌شود. مدیریت صحیح خاک‌های کشاورزی می‌تواند نقش قابل‌توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. به‌عنوان مثال، به‌کارگیری تناوب زراعی، استفاده از محصولات پوششی، اعمال روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی، نگهداری و برگرداندن بقایای گیاهی به خاک و پرهیز از سوزاندن یا حذف نمودن آن‌ها، از جمله روش‌های مدیریتی مناسب جهت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک هستند. راه‌کارهایی از قبیل مدیریت بهتر نیتروژن از طریق کاربرد به‌موقع کودهای نیتروژنی و متناسب با نیاز محصول، گنجاندن محصولات لگوم در تناوب زراعی، مدیریت مناسب بقایای گیاهی، استفاده از کودهای آهسته‌رهش و مصرف مواد بازدارنده نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون باعث کاهش انتشار نیتروزاکسید از خاک می‌شود. کاهش انتشار متان نیز از طریق زهکشی شالیزارها به‌منظور ایجاد تهویه مناسب برای اکسیداسیون متان و تجزیه بقایای گیاهی قبل از غرقاب شدن از طریق خاک‌ورزی یا تبدیل آن‌ها به کمپوست امکان‌پذیر است (Mirzai et al., 2022).

سازگاری

در زمینه مدیریت و عملیات کشاورزی، سازگاری نسبت به تخفیف اهمیت بیشتری دارد. استفاده از سیستم کشاورزی حفاظتی از مهم‌ترین مسائل مربوط به سازگاری در برابر پدیده تغییر اقلیم است. بازگرداندن بقایای محصول به خاک، عدم دستکاری و یا دستکاری حداقل خاک و رعایت تناوب زراعی مناسب سه مؤلفه اصلی کشاورزی حفاظتی است که هر سه مورد در جهت بهبود شاخص‌های کیفیت خاک ازجمله افزایش مواد آلی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک اهمیت بسزایی دارند (Heydari, 2018). به نظر می‌رسد با توجه به محدودیت آب، کیفیت پایین خاک و تولیدات گیاهی کم در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در اراضی دیم، تأثیرپذیری این اراضی از اثرات نامطلوب تغییر اقلیم بیشتر از اراضی آبی باشد؛ لذا سیستم کشاورزی حفاظتی اگر برای کشاورزی آبی یک انتخاب باشد برای کشاورزی دیم یک التزام است. اصلاح الگوی کشت بر اساس پتانسیل اکولوژیک مناطق و سازگاری اقلیمی و استفاده از ارقام مقاوم به شرایط اقلیمی جدید از سایر اقدامات سازگاری در برابر پدیده تغییر اقلیم است (Jamshidi et al., 2017). Amiri et al., (2021) اهمیت و نقش برهم‌کنش سه عامل ژنوتیپ، محیط و مدیریت را در افزایش بهره‌وری بوم‌نظام‌های زراعی بررسی و گزارش کردند که برای دستیابی به تولید پایدار باید هر سه عامل مذکور به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود. آنان پیش‌بینی کردند که با افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفر تا سال ۲۰۷۰ میلادی، با انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب و اِعمال مدیریت‌های صحیح زراعی می‌توان عملکرد نخود را تا ۱۱ درصد افزایش داد. Rahimi-Moghaddam, et al., (2019) نیز با بررسی برهم‌کنش ژنوتیپ-محیط-مدیریت، بیان کردند که برای جلوگیری از کاهش عملکرد ذرت بر اثر تغییر اقلیم، باید حد بهینه‌ای از مجموعه عوامل دخیل در ژنوتیپ، محیط و مدیریت انتخاب شود. تغییر تاریخ کاشت به منظور استفاده بیشینه از بارش‌ها، افزایش تنوع زیستی در سطح گونه و رقم، انتخاب گیاهان با تاب‌آوری بالا در برابر رخدادهای حدی اقلیمی، کشت مخلوط، جنگل زراعی، توسعه نظام‌های کشاورزی تلفیقی زراعت-دام، کاهش وابستگی کشاورزی به کودهای شیمیایی و افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر از کل انرژی ورودی، مصرف بهینه نهاده‌ها و استفاده از تناوب زراعی مناسب، افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب خاک، استقرار سامانه‌های هشدار اقلیمی، استفاده از سامانه‌های آبیاری کارامد و بازچرخانی آب، جلوگیری از تغییر کاربری مراتع به کشارزی، توسعه کشت در محیط‌های کنترل شده با هدف افزایش بهره‌وری منابع، تنوع بخشی منابع درآمد کشاورزان، تسهیل انتقال دانش به کشاورزان و توسعه حمایت‌های بیمه‌ای محصولات از جمله راهکارهای دیگری هستند که در منابع مختلف به عنوان راهکارهای سازگاری به تغییر اقلیم بیان شده‌اند (Mushore *et al.*, 2021; Solimani *et al.*, 2021; Gebre *et al.*, 2023; Grigorieva *et al.*, 2023).

نتیجه‌گیری کلی

تغییرات اقلیمی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم، تولیدات کشاورزی را در سرتاسر زمین تحت‌تأثیر قرار داده است و شدت این تأثیرات با گذشت زمان افزایش می‌یابد. از مهم‌ترین اثرهای تغییر اقلیم بر خاک، تحت‌تأثیر قرار دادن فعالیت زیستی و میزان کربن آلی خاک است. فعالیت زیستی و کربن آلی خاک از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت و سلامت خاک بوده و نقش محوری در میزان حاصلخیزی خاک و توان تولید محصول دارد. علاوه‌بر آن، ارتباط بین کربن آلی خاک و پدیده تغییر اقلیم یک ارتباط دوسویه است؛ به‌طوری که هم تغییر اقلیم میزان کربن آلی تثبیت شده در خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و هم میزان کربن آلی خاک می‌تواند در میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به اتمسفر و پدیده تغییر اقلیم اثر بگذارد. با شناخت این تأثیرات می‌توان راه‌کارهای مدیریتی لازم برای به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از آن را ارائه داد. اولین و مهم‌ترین راه‌حل عملی که اجماع جهانی را به همراه دارد، اقدامات لازم برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است و تثبیت کربن در خاک یکی از مؤثرترین راه‌کارهای جلوگیری از افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفر است. علاوه‌برآن، کربن آلی خاک به‌عنوان کلید حاصلخیزی خاک شناخته می‌شود و با افزایش کربن آلی خاک علاوه‌بر تثبیت کربن در خاک، ویژگی‌های کیفی خاک نیز بهبود یافته و حاصلخیزی آن افزایش می‌یابد. این موضوع با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران و میزان کربن آلی پایین خاک‌های کشور اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند. بر اساس شرایط اقلیم و خصوصیات خاک‌های کشور، به نظر می‌رسد نخستین گام کنترل عملیاتی است که موجب هدر رفت کربن آلی موجود در خاک می‌شود و به دنبال آن اقدامات لازم برای افزایش مواد آلی خاک می‌باشد. در این راستا جلوگیری از سوزاندن بقایای گیاهی و رعایت اصول کشاورزی بایستی در اولیت قرار گیرد. برای حفظ و یا افزایش کربن آلی در خاک، راهکارهای مختلف از جمله اعمال روش‌های مناسب خاک‌ورزی، مدیریت بقایای گیاهی، رعایت تناوب زراعی مناسب و کاربرد کودها و مواد آلی در خاک وجود دارد که کاربرد تلفیقی می‌تواند اثربخشی آن را افزایش دهد.

Reference:

Allard, V., Newton, P. C. D., Lieffering, M., Soussana, J. F., Grieu, P., & Matthew, C. (2004). Elevated CO_2 effects on decomposition processes in a grazed grassland. *Global Change Biology*, 10, 1553–1564.

Amiri, M. J., & Eslamian, S. S. (2010). Investigation of climate change in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 3(4), 208-216.

Amiri, S., Eyni-Nargeseh, H., Rahimi-Moghaddam, S., & Azizi, K. (2021). Water use efficiency of chickpea agro-ecosystems will be boosted by positive effects of CO_2 and using suitable genotype × environment × management under climate change conditions. *Agricultural Water Management*, 252, 106928.

Azimzadeh, Y., & Najafi, N. (2021). Reducing environmental pollution by converting organic wastes to hydrochar and it's using in the soil. *Human & Environment*, 19(1), 145-159. [in Persian]

Azimzadeh, Y., Moghiseh, M., & Asgari Lajayer. B. (2019). Biochar and hydrochar engineering for environmental application. University Press Publications. 126 pages. [in Persian]

Azimzadeh, Y., & Najafi, N. (2017). Biochar: the Material with Unique Properties for Carbon Sequestration and Global Warming Mitigation. *Land Management Journal*, 5(1), 51-63. [in Persian]

Bernhardt, E. S., Barber, J. J., Pippen, J. S., Taneva, L., Andrews, J. A., & Schlesinger, W. H. (2006). Longterm effects of free air CO_2 enrichment (FACE) on soil respiration. *Biogeochemistry*, 77, 91–116.

Beillouin, D., Cardinael, R., Berre, D., Boyer, A., Corbeels, M., Fallot, A., Feder, F., & Demenois, J. (2022). A global overview of studies about land management, land-use change, and climate change effects on soil organic carbon. *Global Change Biology*, 28(4), 1690–1702.

Boden, T. A., Marland, G., & Andres, R. J. (2017). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO_2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2017

Bronson, D. R., Gower, S. T., Tanner, M., Linder, S., & Van Herk, I. (2008). Response of soil surface CO_2 flux in a boreal forest to ecosystem warming. *Global Change Biology*, 14, 856–867.

Deng, Q., Zhou, G., Liu, J., Liu, S., Duan, H., & Zhang, D. (2010). Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China. *Biogeosciences*, 7, 315–328.

Dimobe, K., Kouakou, J. L. N., Tondoh, J. E., Zoungrana, B. J. B., Forkuor, G., & Ouédraogo, K. (2018). Predicting the potential impact of climate change on carbon stock in semi-arid west African Savannas. *Land*, 7(4), 124-133.

Farzanmanesh, R., Makmom Abdullah, A., & Latif, M. T. (2016). Modeling of soil organic carbon in north and northeast of iran under climate change scenarios. *Scientica Iranica*. 23(5): 2023–2032.

French, S., Levy-Booth, D., Samarajeewa, A., Shannon, K. E., Smith, J., & Trevors, J. T. (2009). Elevated temperatures and carbon dioxide concentrations: effects on selected microbial activities in temperate agricultural soils. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25, 1887–1900.

García-Palacios, P., & Chen, J. (2022). Emerging relationships among soil microbes, carbon dynamics and climate change. *Functional Ecology*, 36(6), 1332–1337.

Haynes, R. J. (2008). Soil organic matter quality and the size and activity of the microbial biomass: their significance to the quality of agricultural soils. In: Huang, Q., Huang, P. M., Violante, A. (eds.), Soil mineral-microbe-organic interactions: theories and applications. Springer, Berlin, Germany, pp 201–230.

Heath, J., Ayres, E., Possell, M., Bardgett, R. D., Black, H. I. J., Grant, H., Ineson, P., & Kerstiens, G. (2005). Rising atmospheric CO_2 reduces sequestration of root-derived soil carbon. *Science*, 309, 1711–1713.

Heydari, N. (2018). Issues and Measures of Climate Change Mitigation from the Agricultural Production Management Aspects. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(1), 45-54. [in Persian]

Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., & Johnson, C. A. (2007). Climate change: the scientific basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35–46.

Jarvis, P., Rey, A., Petsikos, C., Wingate, L., Rayment, M., Pereira, J., Banza, J., David, J., Miglietta, F., Borghetti, M., Manca, G., & Valentini, R. (2007). Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: the "Birch effect". *Tree Physiology*, 27, 929–940.

Jamshidi, O., Asadi, A., & Kalantari, KH. (2017). Climate Change Adaptation Strategies for Smallholder Farmers of Hamedan Province. *Iranian Agricaltural Extention and Education Journal*, 13(2), 109-130. [in Persian]

Jastrow, J. D., Michael Miller, R., Matamala, R., Norby, R. J., Boutton, T. W., Rice, C. W., & Owensby, C. E. (2005). Elevated atmospheric carbon dioxide increases soil carbon. *Global Change Biology*, 11, 2057–2064.

Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 1–17.

Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 363, 685–701.

Koochaki, A. R., Nasiri Mahallati, M., Tabrizi, L., Kheirkhah, M., & Mirzaei Talarposhti, R. (2009). The effect of climate change on agricultural ecosystems. University of Mashhad Publications. 440 pages. [in Persian]

Magdoff, F. (2001). Concept, components and strategies of soil health in agroecosystems. Journal of Nematology, 33, 169–172.

Mirzai, M., Gorji, M., Moghiseh, E., Asadi, H., & Razavi toosi, E. (2022). Sustainable soil management and its role in mitigating greenhouse emissions. *Land Management Journal*, 9(2), 187-204. [in Persian]

Pritchard, S. G. (2011). Soil organisms and global climate change. *Plant pathology*, 60(1), 82–99.

Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2019). Optimal genotype × environment × management as a strategy to increase grain maize productivity and water use efficiency in water-limited environments and rising temperature. *Ecological indicators*,107, 105570.

Rinnan, R., Michelsen, A., Baath, E., & Jonasson, S. (2007). Fifteen years of climate change manipulations alter soil microbial communities in a subarctic heath ecosystem. *Global Change Biology*,13, 28–39.

Rustad, L. E., Campbell, J. L., Marion, G. M., Norby, R. J., Mitchell, M. J., Hartley, A. E., Cornelissen, J. H. C., & Gurevitch, J. (2001). A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 126, 543–562.

Saatsaz, M. (2020). A historical investigation on water resources management in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 1749-1785.

Saha, N., & Mandal, B. (2009). Soil health – a precondition for crop production. In: Khan, M. S., Zaidi, A., & Musarrat, J. (eds.) Microbial strategies for crop improvement. Springer, Heidelberg, pp:161–168.

Scharpenseel, H. W., & Shoemaker, M. (1990). Soils on a Warmer Earth. Elsevier Science. 296 pages.

Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., & Jandl, R. (2009). Carbon losses due to soil warming: do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? *Global Change Biology*. 15, 901–913.

Shakiba, A., & Matkan, A. (2005). Sensitivity of global soil carbon to different climate change scenarios. Environmental Sciences, 3(9), 13-23. [in Persian].

Sharma, P., Sangwan, S., Kumari, A., Singh, S., & Kaur, H. (2022). Impact of Climate Change on Soil Microorganisms Regulating Nutrient Transformation - Plant Stress Mitigators: Action and Application (Vaishnav, A., Arya, S. S., & D Choudhary, K. (eds.); pp. 145–172. Springer, Singapore.

Singh, B. P., Cowie, A. L., & Chan, K. Y. (2011). Soil Health and Climate Change. Springer Heidelberg, Dordrecht, London, New York. 403 pages.

Smith, J. L., Halvoson, J. J., & Bolton, H. J. (2002). Soil properties and microbial activity across a 500 melevation gradient in a semi-arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1749–1757.

Wang, B., Waters, C., Orgill, S., Cowie, A., Clark, A., Li Liu, D., Simpson, M., McGowen, I., & Sides, T. (2018). Estimating soil organic carbon stocks using different modelling techniques in the semi-arid rangelands of eastern Australia. *Ecological indicators*, 88, 425–438.

Yahdjian, L., & Sala, O. E. (2008). Climate change impacts on South American Rangelands, *Society for Range Management*, 30(3), 34-39.

Zak, D. R., Pregitzer, K. S., King, J. S., & Holmes, W. E. (2000). Elevated atmospheric CO_2, fine roots and the response of soil microorganisms: a review and hypothesis. *New Phytologist*, 147, 201–222.

Carney, K.M., Hungate, B.A., Drake, B.G., Megonigal, J.P. (2007). Altered soil microbial community at elevated CO_2 leads to loss of soil carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 4990-4995.

Chan, K.Y. (2011). Climate change on soil structure and soil health: Impacts and adaptation. *Soil Health and Climate Change*. Springer, pp. 49-67.

Gebre, G.G., Amekawa, Y., Fikadu, A.A. (2023). Farmers′ use of climate change adaptation strategies and their impacts on food security in Kenya. *Climate Risk Management*, 40, 100495.

Grigorieva, E., Livenets, A., Stelmakh, E. (2023). Adaptation of Agriculture to Climate Change: A Scoping Review. *Climate*, 11, 202.

Khodagholi, M., Motamedi, J., Saboohi, R. (2023). Effects of climate change on the distribution of Bromus tomentellus. *Iran Nature*, 7, 17-25.

Khorshid Doust, A.M., Panahi, A., Khorramabadi, F., Imanipour, H. (2022). The effect of climatic parameters on plant distribution in central Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazarts*, 9, 73-86.

Lal, R. (2014). Climate strategic soil management. *Challenges*, 5, 43-74.

Mazaheri, M., Bazgir, M. (2019). The effect of climate and land uses on soil microbial biomass and activities. *Iranian Journal of Forest*, 11.

Mushore, T.D., Mhizha, T., Manjowe, M., Mashawi, L., Matandirotya, E., Mashonjowa, E., Mutasa, C., Gwenzi, J., Mushambi, G.T. (2021). Climate change adaptation and mitigation strategies for small holder farmers: a case of Nyanga District in Zimbabwe. *Frontiers in Climate*, 3, 676495.

Nottingham, A.T., Bååth, E., Reischke, S., Salinas, N., Meir, P. (2019). Adaptation of soil microbial growth to temperature: Using a tropical elevation gradient to predict future changes. *Global change biology*, 25, 827-838.

Raheb, A., Heidari, A. (2022). A Review of the Effect of Climate and Soil Evolution on Soil Organic Carbon Storage Resources in Central Alborz. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52, 2935-2949.

Sharifi, Z., Safari Sinegani, A.A. (2015). Interactions between Soil Organisms and Global Climate Change and Application of Meta-Analysis in its Interpretation: A Systematic Review. *Human & Environment*, 13, 43-66.

Solimani, M., Rahimi, D., Yazdanpanah, H. (2021). Climate Change Adaptation Strategy in Agriculture (Rostam County). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10, 19-32.

Sun, Y., Wang, C., Yang, J., Liao, J., Chen, H.Y., Ruan, H. (2021). Elevated CO_2 shifts soil microbial communities from K-to r-strategists. *Wiley Online Library*, pp. 961-972.

Weedon, J.T., Bååth, E., Rijkers, R., Reischke, S., Sigurdsson, B.D., Oddsdottir, E., van Hal, J., Aerts, R., Janssens, I.A., van Bodegom, P.M. (2023). Community adaptation to temperature explains abrupt soil bacterial community shift along a geothermal gradient on Iceland. *Soil Biology and Biochemistry*, 177, 108914.

Yu, H., Deng, Y., He, Z., Van Nostrand, J.D., Wang, S., Jin, D., Wang, A., Wu, L., Wang, D., Tai, X., Zhou, J., 2018. Elevated CO2 and Warming Altered Grassland Microbial Communities in Soil Top-Layers. Frontiers in Microbiology 9.

یادداشت ها

[1] *Microbial biomass*
[2] *Thermophile*
[3] *Psychrophile*
[4] *Mazaheri and Bazgir*
[5] *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*
[6] *Yu et al*
[7] *Sharifi and Safari Sinegani*
[8] *Carney et al.*
[9] *Sun et al.*
[10] *Bronson et al.*
[11] *Jastrow et al.*
[12] *Heath et al*
[13] *Shakiba and Matkan*
[14] *Green House Gases*
[15] *Mitigation*
[16] *Adaptation*