

روابط متقابل میان جانداران خاک و تغییرات اقلیمی و کاربرد تجزیه‌های متا

در تفسیر آن: مروری سیستماتیک

زاهد شریفی^{۱*}

Z.sharifi@uok.ac.ir

علی اکبر صفری سنجانی^۲

چکیده

ریزجانداران خاک در تولید و مصرف گازهای گل‌خانه‌ای یعنی دی‌اکسیدکربن (CO_2)، متان (CH_4)، نیتروس اکسید (N_2O) و نیتریک اکسید (NO)، نقش اساسی دارند. از طرف دیگر دلایل معتبری وجود دارد که تغییرات آب و هوا به گونه مستقیم و غیرمستقیم می‌تواند فراوانی و ساختار جامعه زنده خاک را دگرگون سازد. به گونه‌ای که نتایج حاصل از مرور سیستماتیک نشان داد که اثرات عمده مستقیم تغییرات آب و هوا بر روی جامعه میکروبی خاک احتمالاً به علت تغییر در میزان رطوبت و درجه حرارت است؛ در حالی که اثر افزایش (CO_2) اتمسفر بر روی جامعه میکروبی خاک بیش‌تر به گونه غیرمستقیم، و از طریق اثری که این گاز بر روی افزایش فتوسنتز گیاهان دارد، می‌باشد، که این موضوع به نوبه خود می‌تواند سبب تغییر در کمیت و کیفیت کربن آلی وارد شده به خاک شود. به هر گونه، 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 خود نشان می‌دهند. به گونه‌ای که نتایج آنالیزهای متا نشان می‌دهد که پاسخ جانداران خاک به افزایش میزان (CO_2) اتمسفر به اندازه بدن، گروه تغذیه‌ای و نوع رویکرد آزمایش (مزرعه‌ای یا گل‌خانه‌ای) وابسته است. در حالی که چگونگی پاسخ جانداران خاک به تغییرات دما و بارندگی به اقلیم محلی و نوع اکوسیستم وابسته است. هم‌چنین اثرات افزایش (CO_2) بر فراوانی جانداران خاک با زمان کاهش می‌یابد؛ در حالی که اثر دما و تغییر در بارندگی با زمان شدت می‌یابد.

کلمات کلیدی: جانداران خاک، تغییرات اقلیم، مرور سیستماتیک، آنالیزهای متا.

۱- استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. * (مسئول مکاتبات).

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

مقدمه

کره زمین به وسیله لایه نازکی از هوا که این سیاره را گرم نگه داشته، و زندگی گیاهان، حیوانات و میکروبها را بر روی آن میسر می‌سازد، احاطه شده است. چرا که این لایه نازک از هوا همانند پتو عمل کرده و زمین را گرم نگه می‌دارد، به گونه‌ای که پژوهش‌ها نشان داده است که چنان چه این لایه نازک هوا در اطراف زمین نبود، کره زمین در حدود ۲۰ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد سردتر از حالت کنونی آن می‌بود، و برای زیستن نامناسب می‌شد. گرمایش زمین زمانی رخ می‌دهد که این لایه هوای نازک اطراف زمین در اثر ورود گازهای اضافی به آن ضخیم‌تر شده و گرمای بیش‌تری را به دام اندازد (۱).

برای درک عوامل موثر بر تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی آن ما نیازمند کسب دانش در مورد روابط متقابل بین عوامل اقلیمی (مانند میزان دما و رطوبت)، ویژگی‌های خاک (مانند pH، میزان و وضعیت رطوبت خاک) و عوامل زیستی (قارچ‌ها، باکتری‌ها، آرکیا، جانوران خاک و گیاهان و مصرف‌کنندگان آن‌ها) می‌باشیم (۲). در این میان جانداران خاک در بسیاری از فرآیندهای اکولوژیک همانند چرخه عناصر غذایی، تجزیه پس-مانده‌های گیاهی، تولید و یا مصرف گازهای کم‌یاب و تغییر و تبدیل فلزات، که برای نگه‌داشت زندگی بر روی این کره خاکی ضروری‌اند، نقش اساسی دارند (۳). بنابراین اگرچه پژوهش‌های تغییرات اقلیمی اغلب بر اثر این معضل محیطی در مقیاس‌های بزرگ (گیاهان و حیوانات) بر روی زمین تمرکز یافته‌اند، اما فرآیندهای میکروبی در داخل خاک نقش چشم‌گیری را در شکل‌دهی اثراتی که گرمایش زمین بر روی اکوسیستم‌های خشکی دارند، بازی می‌کنند، بنابراین درک فیزیولوژی و دینامیک جانداران خاک و چگونگی پاسخ آن‌ها به جنبه‌های مختلف تغییرات اقلیمی در اکوسیستم‌های مختلف، برای افزایش دانش ما در رابطه با سازوکارهایی که گازهای گل‌خانه‌ای و گرمایش زمین را کنترل می‌کنند، بسیار ضروری و حیاتی است (۴، ۵ و ۶).

پژوهش‌هایی وجود دارد که نشان می‌دهند تغییر در پارامترهای اقلیمی مانند افزایش گاز CO₂ و دما و هم‌چنین تغییر در توزیع و میزان بارندگی سبب دگرگونی در کارکرد و ساختار جانداران در اکوسیستم‌های خشکی می‌شود (۷)، اما روی هم رفته درک چگونگی پاسخ جانداران خاک به تغییرات اقلیمی به دلیل عواملی مانند تنوع زیاد و به‌گونه عمده ناشناخته خود جامعه زنده خاک و تنوع اکوسیستم‌ها بسیار پیچیده است. افزون بر آن عواملی مانند کاربری‌های گوناگون اراضی و تفاوت‌های مدیریتی حاکم بر آن‌ها بر این پیچیدگی می‌افزاید (۸). برای نمونه برخی از جانداران خاک ممکن است نسبت دگرگونی‌های اقلیمی حساس‌تر از بقیه جانداران خاک باشند. مثلاً باکتری‌ها کرم‌های گل‌دانی، نماتدها، پروتوزویرها به‌گونه عمده در پوشش نازک آب اطراف کلوئیدهای خاک ساکن هستند، در حالی که قارچ‌ها، کنه‌ها و دم‌فتری‌ها در فضاهای خالی درون خاک دانه‌ها ساکنند، و شرایط خشک‌تر را ترجیح می‌دهند (۹). بنابراین گروه دوم ممکن است کم‌تر تحت تاثیر خشکی ناشی از تغییرات اقلیم قرار گیرند. هم‌چنین برخی پژوهش‌ها نیز نشان داده‌اند که در مقایسه با باکتری‌ها و جاندارانی که از آن‌ها تغذیه می‌کنند، حساسیت قارچ‌ها به تغییرات اقلیمی کم‌تر است، زیرا باکتری‌ها در داخل خاک دانه‌ها و خلل و فرج ریز خاک زندگی می‌کنند، و کم‌تر تحت تاثیر تغییرات اقلیم قرار می‌گیرند (۱۰، ۱۱ و ۱۲)، در حالی که سایر پژوهش‌ها نشان داده‌اند که سکونت‌گاه‌های خلل و فرج ریز در پاسخ قارچ‌ها و باکتری‌ها در برابر خشکی ناشی از تغییرات اقلیم به دلایلی که در دنباله خواهند آمد حایز اهمیت نیستند: (I) شکارگرها می‌توانند در حباب‌های آب باقی‌مانده هم‌شکار خود را صید نمایند (۱۳)، (II) سیستم زنده‌مانی در برابر خشکی در باکتری‌ها و قارچ‌ها مشابه‌اند (۱۴، ۱۵ و ۱۶)، و (III) در زمان خشکی در نهایت آب از هر دو خلل و فرج ریز و درشت تبخیر می‌شود، و برتری را برای مقاومت به خشکی باکتری‌ها از این نظر که در

ارایه می‌گردد، و سپس به بررسی آنالیزهای متا در این مورد پرداخته می‌شود.

۱. نقش ریزجانداران خاک در تولید و مصرف گازهای گلخانه‌ای

پیش از هر چیز شایسته است که اشاره‌ای داشته باشیم بر نوع و فیزیولوژی ریزجانداران هتروتروف دخیل در تولید گازهای گل‌خانه‌ای، که انواع زیر را در بر می‌گیرند:

الف. تولید کنندگان دی اکسید کربن (CO₂)

میزان کربن موجود در خاک‌ها به ترتیب ۳/۳ و ۴/۵ برابر کربن موجود در اتمسفر و بدن موجودات است. بنابراین خاک می‌تواند محل ذخیره مناسبی برای کربن باشد (۲۰). میزان کربن ذخیره شده در خاک بستگی به تعادل بین فتوسنتز و تنفس جامعه میکروبی خاک دارد. تنفس تمام فرآیندهایی را شامل می‌شود، که به وسیله آن ریزجانداران، کربن تثبیت شده توسط گیاهان و سایر فتوسنتزکنندگان را به صورت CO₂ به اتمسفر رها می‌سازند، که می‌توان آن را در واکنش زیر خلاصه نمود:



تنفس میکروبی در حدود ۲۵ درصد از کل CO₂ رها شده به اتمسفر از طریق طبیعی را شامل می‌شود، که به نوبه خود می‌تواند نقش چشم‌گیری را در تغییرات اقلیمی داشته باشد (۲۱).

ب. تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان متان (CH₄)

امواج گرمایی که توسط گاز CH₄ به دام انداخته می‌شود، ۲۵ برابر گاز CO₂ است (۶). هم چنین برخلاف CO₂، که اغلب منشا آن از سوخت‌های فسیلی است، ورود متان به اتمسفر از راه طبیعی (تقریباً ۲۵۰ میلیون تن در سال) و فعالیت‌های انسانی (تقریباً ۳۰۰ میلیون تن در سال) به گونه‌ای عمده توسط ریزجانداران متانوژن کنترل می‌شود

خلل و فرج ریز زندگی می‌کنند، به وجود نمی‌آورد (۱۷). بنابراین با توجه به پیچیدگی‌های یاد شده، انبوهی از اطلاعات و داده‌های آماری و هم بستگی‌های تجربی، احیاناً متناقض و ناهماهنگ روی دست متخصصان علوم خاک می‌ماند. بنابراین پیدا کردن راه‌کاری که اطلاعات مربوط به چگونگی پاسخ جانداران خاک به تغییرات محیطی را با توجه به نوع این جانداران، اندازه بدن، عادات غذایی، نوع اکوسیستم، اقلیم محلی و نوع و میزان پارامترهای اقلیمی به گونه‌ای تلفیق نماید، که به تحلیلی روشن از روابط متقابل جانداران خاک و تغییرات اقلیمی برسیم، بسیار ارزشمند خواهد بود. در مرور سیستماتیک^۱ نویسنده یا نویسندگان برای یافتن پاسخ سوال مورد نظر، به مطالعه مقالات و مطالعات مرتبط پرداخته، سپس با جمع‌بندی کیفی نتایج سعی در پاسخی موجز و شفاف به سوال مورد پژوهش خود دارند. به زبان ساده- تر مرور سیستماتیک نوعی جمع‌بندی کیفی داده‌های معتبر موجود در پاسخ به یک سوال خاص می‌باشد (۱۸)؛ در حالی که متآنالیز^۲ یا فراتحلیل عبارت است از ترکیب داده‌ها و نتایج به دست آمده از یک مرور سیستماتیک با بهره‌گیری از روش‌های آماری، یعنی پس از انجام مرور سیستماتیک که لازمه فراتحلیل است- و براساس نتایج، به یک تخمین واحد برای حل مشکل یا سوال مورد نظر دست پیدا می‌کنیم. البته هر مرور سیستماتیکی به متآنالیز منجر نمی‌شود. چنانچه داده‌ها و برآوردهای خام حاصل از مرور سیستماتیک بیش از اندازه غیرهم‌سان نباشد، و به توان آن‌ها را با روش‌های خاص آماری با هم ترکیب کرد، فراتحلیل قابل انجام خواهد بود. در واقع فراتحلیل با استفاده از روش‌های آماری و نرم‌افزارها (مانند MetaWin)، مجموعه بزرگی از اطلاعات گسسته و منفرد را با هم دیگر ادغام نموده، تا به عدم هم‌سانی نتایج و علل آن‌ها پی ببرد (۱۹). بنابراین در این پژوهش در ابتدا مروری سیستماتیک بر اثرات متقابل جانداران خاک و تغییرات اقلیم

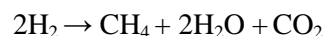
1- Systematic review
2- Meta-analysis

ریزجانداران خاک به عنوان ترکیبات میانه طی فرایندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون کنترل می‌شود (۲۲). نیتریفیکاتورها (اکسید کننده‌گان آمونیاک) از زیرشاخه بتا پروتوباکتریها^۲ بوده، و به تازگی نیز ثابت شده است که برخی از آرکیاها نیز قادر به اکسید کردن آمونیاک هستند (۲۴ و ۲۵). دنیتریفیکاسیون توسط طیف وسیعی از باکتری‌هایی که از نظر مرفولوژیکی و فیزیولوژیکی بسیار متنوع هستند، انجام می‌شود (۲۶). تولید N_2O به گونه رایج از دنیتریفیکاسیون ناقص به وجود می‌آید.

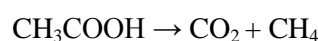
۲. اثر تغییرات آب و هوا بر جانداران خاک و رویکردهای جانداران در پاسخ به آن

اثر تغییرات اقلیم بر جانداران خاک ممکن است از راه مستقیم (تغییر دما و میزان و توزیع بارندگی) و یا غیرمستقیم (افزایش میزان گاز CO_2) باشد. پاسخ جانداران خاک به این تغییرات ممکن است از دو راه باشد، نخست تغییرات اقلیم فیزیولوژی جامعه میکروبی کنونی را تغییر می‌دهد. برای نمونه با افزایش دما رشد ریزجانداران افزایش می‌یابد، و سوبسترا را با سرعت بیش‌تری دگرگون می‌سازند، در این رویکرد کنترل سازوکار تغییر نمی‌کند. دوم اینکه تغییر آب و هوا ممکن است ساختار جامعه میکروبی را دگرگون سازد. در این رویکرد سرعت فرایندها و سازوکار کنترل آن‌ها نیز تغییر می‌کند، زیرا جامعه میکروبی جدید فیزیولوژی متفاوتی را از جامعه میکروبی اول خواهد داشت (۲۷ و ۲۸). تغییر در تنوع جامعه میکروبی در نهایت ممکن است برخی از گروه‌های کارکردی مانند دنیتریفیکاتورها و متانوزنها را از بین ببرد، و یا این که موجب غالب شدن جامعه میکروبی شود، که قبلاً فعالیت چشم‌گیری نداشته‌اند، مثلاً جامعه میکروبی که ظرفیت فیزیولوژی بالاتری در تجزیه کربن آلی خاک دارند (۲۷ و ۲۹). در دنباله به بحث در مورد روابط متقابل

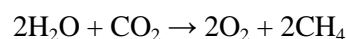
(۲۲). متانوزنها ریزجاندارانی هستند شیمیولیتوتروف تا شیمیوارگانوتروف که در شرایط بی‌هوازی و غنی از مواد آلی (مانند شکمبه نشخوارکنندگان، شالیزارها، محل دفن زباله‌ها و اراضی مرطوب)، طی تنفس بی‌هوازی، گاز H_2 را اکسید و گاز CO_2 را به عنوان گیرنده الکترون به کار می‌گیرند، و طی واکنش زیر CO_2 را به گاز CH_4 احیا می‌کنند:



هم چنین متانوزنها در شرایط بی‌هوازی از تخمیر ترکیباتی مانند فرمات و استات می‌توانند گاز متان تولید کنند (۹).



در برابر متانوزنها، متانوتروف‌ها به گونه عمده در شرایط هوازی طبق واکنش زیر متان را برای به دست آوردن انرژی اکسید می‌کنند، و سالانه در حدود ۳۰ میلیون تن متان از اتمسفر می‌کاهند (۲۲).



یادآوری می‌شود که متان موجود در خاک بیش‌تر توسط متانوتروف‌های نوع I (جز گاما پروتوباکتریا^۱) که میل ترکیبی زیادی با متان ندارند، و در غلظت‌های بیش از ۴۰ ppm متان فعال می‌شوند، اکسید می‌گردد. اما متانی که از پیش در هوا وجود دارد، توسط متانوتروف‌های نوع II (جز آلفا پروتوباکتریا^۲) که میل ترکیبی زیادی با متان دارند، و در غلظت‌های کم تر از ۱۲ ppm متان فعال می‌شوند، اکسید می‌گردد (۲۲). بنا به آن چه گفته شد متانوزنها و متانوتروف‌ها هم‌خوراک‌ده بوده، و زمانی که تولید CH_4 توسط متانوزنها از مصرف آن توسط متانوتروف‌ها پیشی گیرد، متان اضافی وارد اتمسفر شده، و پدیده گرمایش زمین تشدید می‌شود (۲۳).

ج. تولید کنندگان نیتروس اکسید (N_2O) و نیتریک اکسید (NO)

نیتروس اکسید و نیتریک اکسید نیز از جمله گازهایی هستند، که ورود آن‌ها به اتمسفر به گونه‌ی عمده توسط

1- *Gammaproteobacteria*
2- *Alphaproteobacteria*

3- *Betaproteobacteria*

بی‌جنبش شدن نیتروژن ناشی از افزایش فعالیت و فراوانی میکروب‌ها در پاسخ به افزایش نهشته‌های کربنی ریشه گیاهان در دراز مدت باشد، که در دنباله به شرح آن خواهیم پرداخت. به گونه عموم کمیت و کیفیت نهشته‌های ریشه مانند اسیدهای آمینه، اسیدهای آلی و قندهای فراهم تحت اتمسفر غنی از گاز CO₂ تغییر می‌کند (۳۱). برای نمونه بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اتمسفر غنی از گاز CO₂ سبب افزایش نهشته‌های ریشه در مخروطیان، درختان برگ‌ریزان، گیاهان علفی و محصولات زراعی می‌شود (۸). افزون بر آن شواهدی نیز وجود دارد که اتمسفر غنی از گاز CO₂ سبب افزایش طول عمر، قطر و نفوذ ریشه‌های مویین در خاک می‌گردد (۸). به سخن دیگر رشد گیاهان تحت اتمسفر غنی از گاز CO₂ می‌تواند سبب تغییر کمیت، کیفیت و الگوی توزیع بهتر ترشحات آلی ساده تجزیه شونده از ریشه به ریزوسفر شود، که به نوبه خود در کوتاه مدت می‌تواند رشد و فعالیت میکروبی خاک را افزایش دهد. چرا که در چنین شرایطی در اثر افزایش ترشح مواد کربنی ساده تجزیه شونده از ریشه، فراوانی جانداران کوبیوتروف^۲ خاک به دلیل داشتن V_{max} و K_m بالاتر در برابر جانداران الیگوتروف^۳ که دارای V_{max} و K_m کم تری می‌باشند، غالب می‌شود (۳۲). شواهدی نیز در دست است که جانوران درشت خاک برای برآورده کردن نیاز غذای شان مجبور به مصرف میزان بیش‌تری از پس‌مانده‌های گیاهی که تحت اتمسفر غنی از گاز CO₂ به وجود آمده‌اند می‌باشند، که خورد و ریز کردن ماده آلی بیش تر توسط این جانداران خود می‌تواند حاکی از تسهیل تجزیه و رهاسازی بیش تر کربن خاک به اتمسفر تحت افزایش گاز CO₂ باشد (۳۳، ۳۴ و ۳۵)، اما افزایش فعالیت میکروبی ناشی از فراوانی نهشته‌های ریشه در اثر رشد گیاهان تحت اتمسفر غنی از گاز CO₂ در دراز مدت به دلیل اینکه خاک قادر به تامین متعادل سایر مواد معدنی هم‌سان با کربن مترشحه از ریشه نمی‌باشد (۳۶)، و از طرفی چون ریزجانداران خاک در جذب عناصر در رقابت با گیاه برتری

جانداران خاک و پارامترهای تغییرات آب و هوا پرداخته می‌شود.

۲-۱. اثر افزایش گاز CO₂ بر جانداران خاک

میزان CO₂ اتمسفر با سرعت ۰/۴ درصد در سال در حال افزایش است، و به نظر می‌رسد تا سال ۲۱۰۰ غلظت آن ۲ برابر میزان فعلی شود (۲۲).

الف. اثر افزایش گاز CO₂ بر گیاهان

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بعید به نظر می‌رسد، که اثر افزایش گاز CO₂ اتمسفر بر فعالیت و فراوانی جانداران خاک از طریق افزایش مستقیم غلظت این گاز در خلل و فرج خاک باشد (۸). زیرا در بیش‌تر خاک‌ها در حالت معمولی به دلیل تنفس خود جانداران خاک، میزان غلظت CO₂ در خلل و فرج خاک (بین ۰/۱ تا ۵ درصد و گاهی ۲۰ درصد) بیش تر از غلظت این گاز در اتمسفر (۰/۰۳۵٪) می‌باشد (۳۰). اثر افزایش گاز CO₂ بر جانداران خاک به گونه غیرمستقیم و از راه افزایش رشد گیاهان به ویژه درختان در اکوسیستم‌های خشکی می‌باشد. به سخن دیگر گیاهان از طریق افزایش فتوسنتز در پاسخ به افزایش گاز CO₂ و متعاقباً افزایش پس‌ماندها و نهشته‌های ریشه^۱ خود، نقش افزایش CO₂ اتمسفر در تامین و جریان انرژی در شبکه غذایی درون خاک را میانجی‌گری می‌کنند (۸). به گونه‌ای که پژوهش‌ها نشان داده‌اند، که افزایش غلظت گاز CO₂ می‌تواند سبب تغییرات کمی (افزایش زی‌توده) و کیفی (افزایش C/N) بخش‌های هوایی، و هم چنین تغییر در کمیت و کیفیت نهشته‌های ریشه در گیاهان شود (۸).

رشد گیاهان تحت اتمسفر غنی از گاز CO₂ سبب ایجاد بافت‌های گیاهی با C/N بالا می‌شود. این مساله در مرحله نخست می‌تواند ناشی از افزایش کربن‌گیری (فتوسنتز) و افزایش زی‌توده بخش‌های هوایی گیاه باشد، و دوم اینکه این امر ممکن است ناشی از فقر نیتروژن فراهم برای گیاهان در اثر

2- Copiotrophic
3- Oligotrophic

1- Rhizodeposition

کربن اتمسفر عمل خواهد کرد، و در اکوسیستم‌هایی که میزان نیتروژن بالاتر از سطح بهینه است، در روندی عکس خاک به عنوان ذخیره‌گاه کربن عمل خواهد نمود (۸ و ۲۸). هر چند این دو سناریو در اسناد علمی پشتیبانان خاص خود را دارند. اما به گونه عموم بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش CO_2 اتمسفر سبب افزایش رشد گیاهان و افزایش تنفس خاک همگام با آن می‌شود (۲۳، ۴۵ و ۴۶)؛ به گونه‌ای که افزایش کربن ورودی به خاک ناشی از این امر بر اثر تنفس جانداران خاک دوباره به اتمسفر برمی‌گردد، تا جایی که افزایش CO_2 اتمسفر بر ذخیره کربن خاک بی‌تاثیر است (۸). البته پژوهش‌های پیش‌تری در این رابطه مورد نیاز است.

ب. اثر افزایش گاز CO_2 بر میکروفلور خاک

اگرچه اتمسفر غنی از گاز CO_2 می‌تواند کمیت، کیفیت و توزیع مواد آلی در خاک را تغییر دهد، اما این تغییرات مسلماً فراوانی و فعالیت همه جامعه میکروبی خاک را به یک اندازه دگرگون نمی‌سازد. همان گونه که در بالا آمد به دلیل نیاز بیش‌تر جامعه باکتریایی به نیتروژن نسبت به جامعه قارچی، افزایش پس‌ماندهای گیاهی با C/N بالا تحت رشد گیاهان در شرایط غنی از CO_2 می‌تواند در دراز مدت به نفع افزایش زیتوده قارچی تمام شود. در تایید مطلب یاد شده آنالیزهای متا نشان داده است که افزایش غلظت CO_2 تا دو برابر غلظت معمولی آن در اتمسفر سبب افزایش زی‌توده قارچ-های هم زیست میکوریزای بیرونی و درونی می‌شود (۴۷ و ۴۸). در برابر این پژوهش‌ها، پژوهش‌هایی نیز وجود دارد که نشان می‌دهند که اتمسفر غنی از CO_2 می‌تواند فراوانی برخی از باکترهای خاک را افزایش دهد. برای نمونه دریگو و همکاران (۲۰۰۹) گزارش نمودند که رشد گیاهان تحت اتمسفر غنی از CO_2 ، فراوانی جنس‌های بورخولیدا^۳ و سودوموناس^۴ را در ریزوسفر افزایش، در حالی که تاثیری بر گونه‌های جنس باسیلوس^۵ ندارد (۴۹). هم‌چنین گزارش‌های متعددی وجود

دارند، در نتیجه افزایش فعالیت و زی‌توده میکروبی می‌تواند سبب آلی شدن عناصر غذایی به ویژه نیتروژن شود. به سخن دیگر رشد گیاهان تحت اتمسفر غنی از گاز CO_2 به مدت طولانی سبب می‌شود که در ابتدا کمبود کربن در خاک به وجود آید و با گذشت زمان در نهایت به کمبود کل عناصر غذایی خاک تبدیل شود (۳۷). این مساله به نوبه خود در دراز مدت می‌تواند سبب کاهش رشد گیاهان (۳۸) و ایجاد بافت‌های گیاهی برگشتی با C/N بالاتر شود (۳۹، ۴۰ و ۴۱). بنابراین در دراز مدت تغییر در کمیت و کیفیت مواد آلی برگشتی می‌تواند ساختار و فیزیولوژی جامعه میکروبی را به گونه مستقیم هم گام با خود دگرگون سازد (۴۲). به عنوان نمونه در چنین شرایطی ممکن است جامعه میکروبی الیگوتروف در خاک غالب شود (۲۸، ۳۶، ۴۳ و ۴۴)، و یا اینکه در صورت افزایش C/N مواد آلی برگشتی به خاک جامعه میکروبی خاک به سمت قارچ‌ها که راندمان متابولیکی بالاتر و دیواره سلولی سخت‌تر (کتین و ملانین) نسبت به غشای و دیواره سلولی باکتری‌ها (فسفولیپیدها و پپتیدوگلیکان)، تمایل پیدا کند، که در برابر تجزیه مقاوم‌ترند. بنابراین در چنین اکوسیستم‌هایی ذخیره‌سازی کربن به دلیل غالب‌شدن جامعه قارچی که آهنگ تنفس پایین‌تر دارند افزایش می‌یابد (۳۹، ۴۰ و ۴۱). افزون بر مسایل یاد شده در بالا به دلیل این که اغلب جامعه میکروبی خاک منابع کربنی ساده را چه به عنوان منبع انرژی و یا منبع کربن به منابع کربنی پیچیده ترجیح می‌دهند، در نتیجه برگشت مواد آلی با C/N بالاتر سبب کاهش فعالیت و تنفس میکروبی خاک می‌شود (۲۸). از دو فرضیه بالا چنین می‌توان نتیجه‌گیری نمود، که میزان سطح حاصل‌خیزی خاک به ویژه نیتروژن خاک تعیین‌کننده این خواهد بود که در صورت افزایش گاز CO_2 اتمسفر، خاک به عنوان منبع تولید^۱ و یا ذخیره^۲ کربن عمل خواهد کرد، که به نظر می‌رسد در اکوسیستم‌هایی که میزان نیتروژن پایین‌تر از سطح بهینه است (مانند جنگل‌های مناطق معتدله)، خاک به عنوان منبع تولید

3- *Burkholdia*

4- *Pseudomonas*

5- *Bacillus*

1- Source

2- Sink

خشکی داشته باشند (۹). بنابراین بررسی اثر تغییرات اقلیم بر این جانداران خاک دارای اهمیت است. اثر چشم‌گیر اتمسفر غنی از CO₂ بر نماتدها و دم‌فنی‌ها گزارش شده است. به گونه‌ای که اتمسفر غنی از CO₂ (۴۷۵ ppm) در یک مترع چرا شده سبب افزایش بسیار چشم‌گیر جمعیت نماتدهای ریشه‌خوار (لونگیدوروس/لونگاتوس^۲) و نماتدهای شکارگر شده بود (۲۶ و ۶۱). سایر مطالعات اثر اتمسفر غنی از CO₂ بر جمعیت نماتدها را چشم‌گیر اما نه بسیار گزارش نموده‌اند (۶۲، ۶۳ و ۶۴). هم‌چنین اتمسفر غنی از CO₂ (۵۵۰ ppm) در مزارع چغندر قند و گندم سبب افزایش چشم‌گیر در تنوع گروه‌های تغذیه‌ای دم‌فنی‌ها پس از پنج سال شده بود، که نشان‌دهنده تغییر کیفیت مواد آلی برگشتی به خاک تحت این شرایط می‌باشد (۶۶).

۲-۲. اثر افزایش دما بر جانداران خاک

پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ دمای اتمسفر به گونه میانگین بین ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد در سطح کره زمین افزایش یابد (۲۲). عقیده کلی بر این است که افزایش دما سبب افزایش تنفس ریزجانداران هتروتروف خاک و افزایش رهاسازی CO₂ به اتمسفر می‌گردد، به گونه‌ای که به طور میانگین به ازای افزایش هر دو درجه سانتی‌گراد دمای اتمسفر میزان کربن از دست رفته از خاک ۱۰۰ میلیون تن خواهد بود (۴، ۲۱ و ۶۷). افزایش تنفس در اثر افزایش دما به این دلیل است که افزایش دما برای ریزجانداران خاک به مثابه یک تنش است، در شرایط تنش بهره‌متابولیکی^۳ (qCO₂) ریزجانداران افزایش می‌یابد، افزایش qCO₂ نشان می‌دهد که انرژی در زیست‌گاه از رشد به سوی نگه‌داری بافت‌های زنده سوق پیدا کرده است. به سخن دیگر در این شرایط جانداران بیش‌تر کربن را می‌سوزانند تا به زی‌توده تبدیل کنند، و در نتیجه تنفس ریزجانداران افزایش، و کارایی مصرف کربن در آن‌ها کاهش پیدا

دارد که فراوانی باکتری‌های هم‌زیست تثبیت‌کننده نیتروژن و هم‌چنین اندازه و تعداد گره‌های ناشی از هم‌زیستی آن‌ها (۵۰ و ۵۱) و شمار رایزوبیال‌ها (۵۲) در خاک ریزوسفری، و سایر باکتری‌های تثبیت‌کننده ازت در خاک غیرریزوسفری (۵۳)، در شرایط افزایش گاز CO₂ افزایش می‌یابند. در رابطه با متانوتروف‌ها چندین پژوهش نشان داده‌اند که افزایش CO₂ اتمسفر سبب کاهش ۷۰ درصدی در فراوانی متانوتروف‌ها، و به تبع آن افزایش غلظت گاز CH₄ در اتمسفر می‌شود (۵۴ و ۵۵). این مساله ممکن است به علت اثر مستقیم افزایش میزان گاز CO₂ در تغییر فیزیولوژی و فعالیت متانوتروف‌ها و یا به صورت غیرمستقیم از طریق اثر این گاز در افزایش رشد گیاهان و افزایش رطوبت و CO₂ خاک که سبب افزایش فعالیت متانوتروف‌ها و کاهش فعالیت متانوتروف‌ها می‌شود، باشد (۲۸). گزارش‌های متناقضی نیز در رابطه با اثر افزایش CO₂ اتمسفر بر فعالیت نیتریفیکاتورها و دنیتریفیکاتورها وجود دارد، به گونه‌ای که بارنارد و همکاران (۲۰۰۴ و ۲۰۰۵)، نشان دادند که با افزایش میزان CO₂ اتمسفر میزان دنیتریفیکاسیون کاهش می‌یابد (۵۶ و ۵۷)؛ درحالی‌که هانگات (۱۹۹۷) و چنگ (۲۰۰۶)، نشان دادند که افزایش CO₂ اتمسفر اثری بر میزان دنیتریفیکاسیون ندارد (۵۸ و ۵۹). هم‌چنین انیسون و همکاران (۱۹۹۸) و باگز (۲۰۰۳)، گزارش کردند که میزان N₂O متصاعد شده از خاک با افزایش CO₂ هوا تنها در صورتی افزایش خواهد یافت که نیتروژن معدنی به میزان کافی در دسترس باشد (۵۴ و ۶۰).

ج. اثر افزایش گاز CO₂ بر جانوران درشت خاک

جانوران خاک مانند پروتوزوئرها، نماتدها، موربانه‌ها و دم‌فنی‌ها در سطوح بالای تغذیه به دلیل استفاده مستقیم از میکروفلور خاک به عنوان منبع غذا و هم‌چنین به گونه غیر-مستقیم با خرد و ریز کردن پس‌ماندهای گیاهی، به هم زدن زیستی^۱ خاک و بهبود ساختمان خاک می‌توانند اثرات چشم-گیری بر چرخه کربن و سایر عناصر غذایی در اکوسیستم‌های

2- *Longidorus elongatus*

۳- بهره‌متابولیکی (qCO₂) = کربن آزاد شده در تنفس پایه /

(C_{mic}) کربن ریزجانداران

1- Bioturbation

از افزایش دما ممکن است اثر بسیار چشم‌گیری بر مناطق گرمسیری به دلیل تغییرات عمده در رشد ریشه گیاهان و کاهش چشم‌گیر بیومس میکروبی و یا تغییر ساختار جامعه میکروبی داشته باشد (۷۴ و ۷۵). هر گونه افزایش دما در خاک‌های مناطق یخ زده (مناطق قطبی و آلبی) به دو دلیل بسیار خطرناک خواهد بود، نخست اینکه افزایش دما در خاک‌های یخ زده^۱ مناطق قطبی، سبب آب شدن یخ‌ها شده و می‌تواند منابع عظیمی از مواد آلی (در حدود ۴۰۰۰ میلیون تن) را در معرض تجزیه قرار دهد، و بر میزان فعالیت جانداران خاک و متعاقباً CO₂ اتمسفر اثر مثبت داشته باشد (۷۶). دوم این که آب گرفتگی ناشی از آب شدن یخ‌ها می‌تواند شرایط بی‌هوای را که برای فعالیت متانوژن‌ها مناسب است، را فراهم نماید (۲۱). هم چنین در مناطق معتدله افزایش دما می‌تواند اثرات مشابهی داشته باشد (۷۷ و ۷۸). بنا به آن چه گفته شد میزان بارندگی (رطوبت خاک) تعیین کننده چگونگی پاسخ جانداران خاک در برابر افزایش دما خواهد بود؛ به گونه‌ای که چنان چه میزان بارندگی (رطوبت خاک) محدود کننده نباشد، افزایش دما سبب بهبود فعالیت و کارایی جامعه میکروبی، افزایش تجزیه ریشه و سایر پس‌ماندهای گیاهی و در نهایت خروج بیش‌تر کربن از خاک خواهد شد، اما چنان چه میزان بارندگی (رطوبت خاک) محدود کننده باشد، افزایش دما سبب ممانعت بیش‌تر کارکردهای میکروبی، کاهش تجزیه ریشه و سایر پس‌ماندهای گیاهی و در نهایت کاهش خروج کربن از خاک خواهد شد (۷۹ و ۸۰). بنابراین به دلیل شرایط آب و هوایی ایران به نظر می‌رسد، افزایش دما سبب ممانعت از کارکردهای میکروبی در این اقلیم شود. در دنباله به اثر دما بر فعالیت و فراوانی جانداران خاک به گونه جداگانه پرداخته می‌شود.

الف. اثر افزایش دما بر گیاهان

پژوهش‌ها نشان داده است که افزایش دما می‌تواند ترکیب گونه‌های گیاهی را در یک جمعیت طبیعی تغییر دهد.

می‌کند (۶۸). اما چندین پژوهش نشان داده است که افزایش فعالیت میکروبی و رهاسازی CO₂ با افزایش دمای هوا در طول زمان رابطه مستقیم و خطی ندارد، بلکه در ابتدا افزایشی و سپس روند کاهشی دارد، تا این که دوباره به همان تنفس معمولی خاک برمی‌گردد (۶۹). پژوهندگان چندین دلیل را برای این مساله ذکر کرده‌اند که عبارتند از (I) به دلیل اینکه دامنه دمای بهینه رشد و فعالیت ریزجانداران خاک با هم متفاوتند، ممکن است افزایش دما ترکیب جامعه میکروبی را تغییر دهد، و آزادسازی کربن خاک به دلیل از دست رفتن گروه میکروبی که با شرایط آب و هوایی گذشته سازگار شده بودند، کاهش یابد. برای نمونه مونسون و همکاران (۲۰۰۶) و آلیسون و تریسیدر (۲۰۰۸) نشان دادند که افزایش دما در اکوسیستم‌های مرتفع (آلپ) سبب کاهش پنجاه درصدی در فراوانی باکتری‌ها، قارچ‌ها و تنفس خاک می‌شود، هم چنین ساختار جامعه میکروبی به سمت قارچ‌ها گرایش می‌یابد (۷۰ و ۷۱)، (II) گروه‌های میکروبی خاک ممکن است به وسیله تغییر در فیزیولوژی‌شان به دمای بالاتر خاک سازگار شوند، و در نهایت به فیزیولوژی اولیه خود و سرعت تجزیه نرمال اولیه برگردند، (III) ممکن است کمیت و کیفیت مواد آلی برگشتی ناشی از پس‌ماندهای گیاهی در اثر افزایش دوره رشد گیاهان به دلیل افزایش دما تغییر کند، و همین مساله سبب تغییر در ترکیب و فعالیت جامعه میکروبی خاک شود (۷۲ و ۲۱) و (IV) ممکن است مواد آلی ساده تجزیه شونده که سبب تحریک اولیه فعالیت میکروبی شده در نهایت تمام شود، و یا این که برخی از مواد آلی به گونه فیزیکی و یا شیمیایی از تجزیه میکروبی به دور بمانند (۷۳). به هر حال پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیم نشان می‌دهد که اگرچه افزایش دما برای بیش‌تر کره زمین رخ می‌دهد (۲۲)، اما اثر آن بر فعالیت‌های جانداران خاک بسته به نوع اکوسیستم متفاوت است. برای نمونه افزایش دما احتمالاً اثرات چشم‌گیری را در مناطق با ارتفاع زیاد (مناطق آلبی)، مناطق قطبی، و مناطق معتدله داشته باشد، زیرا فعالیت‌های میکروبی در این مناطق اغلب به دلیل پایین بودن درجه حرارت محدود می‌شود. در روندی عکس، افزایش شرایط خشکی ناشی

ب. اثر افزایش دما بر میکروفلور خاک

اگرچه پاسخ ریزجانداران خاک نسبت به افزایش دما ممکن است موقتی باشد (۸۹). اما به گونه عموم افزایش دما در دامنه دمایی بهینه فعالیت جانداران خاک (معمولاً ۲۸ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد)، سبب افزایش فعالیت میکروبی، تنفس کل، نیتریفیکاسیون، معدنی شدن فسفر و نیتروژن خاک می‌شود (۹۰). اثر افزایش دما بر جانداران خاک ممکن است از طریق تغییر در ترکیب جمعیتی جانداران خاک (۸۹)، تغییر در قابلیت دسترسی سوسترا (۲۱ و ۹۱)، تغییر در کیفیت پس‌ماندهای حاصل از گیاهانی که تحت شرایط گرم‌تر رشد کرده‌اند، و در نهایت تغییر در تنظیمات فیزیولوژیک خود جانداران خاک باشد (۹۲). در این رابطه گزارش‌هایی وجود دارد که افزایش دما کلنیزاسیون میکوریزایی ریشه گیاهان را به گونه مستقیم از طریق افزایش رشد قارچ‌ها و به گونه غیرمستقیم از طریق افزایش رشد گیاهان افزایش می‌دهد (۹۲). برای نمونه گلویتو و همکاران (۲۰۰۵) دریافتند که افزایش دما سبب افزایش رشد هیف‌های بیرونی و هم چنین افزایش جذب سوسترای کربنی قابل دسترس می‌گردد (۹۳). هم چنین گرمایش زمین سبب افزایش هیف قارچ‌های میکوریزای درونی گلوموس موسه^۱ در ارتباط با گیاه پلانٹاگو لانسولاتا^۲ شده بود (۹۲). به گونه مشابه افزایش دما سبب انتقال مواد فتوسنتزی بیش‌تر به قارچ گلوموس موسه در ارتباط با گیاه یاد شده، شده بود؛ به گونه‌ای که ساختارهای ذخیره‌ای (وزیکول) کاهش و رشد هیف‌ها در قارچ هم زیست افزایش یافته بود (۹۴). هم چنین لو و همکاران (۲۰۱۳) با شبیه‌سازی گرمایش زمین به اندازه دو درجه سانتی‌گراد به وسیله اشعه مادون قرمز به مدت ده سال در یک چمن‌زار در اوکلاهما آمریکا و سپس ردیابی تغییرات جانداران خاک از طریق استخراج مستقیم DNA از خاک (مطالعات متانژنومیکس^۳) دریافتند که فراوانی ژن‌های مربوط به فعالیت‌های متابولیسمی کربن فراهم

به گونه‌ای که افزایش دما به اندازه سه درجه سانتی‌گراد می‌تواند باعث پراکندگی بیش‌تر گونه‌های گیاهی و یا حتی تمام جوامع گیاهی به سمت دو قطب زمین شود، که این به نوبه خود می‌تواند به گونه غیرمستقیم اثر چشم‌گیری بر جانداران خاک داشته باشد (۳۵). اما این اثر افزایش دما بر تنوع و فراوانی جامعه میکروبی خاک زمانی موثر خواهد بود، که میزان رطوبت خاک در حد بهینه باشد، به سخن دیگر عدم وجود رطوبت کافی در خاک می‌تواند اثر تنوع جامعه گیاهی را بر فراوانی و فعالیت جانداران خاک را بی‌اثر سازد (۸۰). افزون بر میزان رطوبت خاک چگونگی اثر افزایش دما بر رشد ریشه و ریزجانداران وابسته به آن، بسته به دمای بهینه رشد گونه‌های گیاهی متفاوت است، به گونه‌ای که گیاهانی که در حال حاضر در دمایی کم‌تر از دمای بهینه‌اشان در حال رشد هستند، احتمالاً با افزایش دما رشد ریشه آن‌ها افزایش یابد، درحالی‌که گیاهانی که در حالت کنونی تحت دمای بهینه و یا بالای بهینه خود رشد می‌کنند، احتمالاً افزایش دما سبب کاهش رشد ریشه و جانداران وابسته به آن خواهد شد (۸۱). پژوهش‌ها نشان می‌دهند زمانی که دما افزایش می‌یابد، تنفس نکه داشت ریشه‌های مویین اغلب گونه‌های گیاهی افزایش می‌یابد، این مساله به نوبه خود سبب کاهش طول عمر بهینه ریشه‌های مویین و برگشت زود هنگام آن‌ها به خاک می‌شود (۸۲). به سخن دیگر افزایش دما با طول عمر ریشه‌های مویین رابطه عکس دارد (۸۳، ۸۴ و ۸۵). با چنین سازوکاری، افزایش دما سبب تسریع برگشت کربن به خاک از طریق ریزش ریشه‌های مویین می‌شود (۸۶). در تایید مطلب یاد شده تجزیه‌های متا هم نشان می‌دهد که میزان برگشت ریشه‌های مویین از شمال به طرف مناطق گرمسیری افزایش می‌یابد (۸۷). در برابر این پژوهش‌ها لو و همکاران (۲۰۱۳) با شبیه‌سازی گرمایش زمین به اندازه دو درجه سانتی‌گراد به وسیله اشعه مادون قرمز به مدت ده سال در یک چمن‌زار تفاوت چشم‌گیری را در ترکیب جامعه گیاهی بین شاهد و خاک حرارت داده شده مشاهده نکردند (۸۸).

1- *Glomus mosseae*

2- *Plantago lanceolata*

3- Metagenomics studies

می‌تواند سبب افزایش فعالیت هر دوی متانوژن‌ها و متانوتروف‌ها شود. اما بیلان CH_4 وارد شده به اتمسفر در اکوسیستم‌های مختلف متفاوت است. مثلاً افزایش دما در مناطق توندرا (قطبی) به دلیل افزایش رشد گیاهان، تغییر سطح آب زیرزمینی و میزان رطوبت خاک، ممکن است فعالیت متانوژن‌ها را تحریک و سبب افزایش رهاسازی CH_4 به اتمسفر شود (بیلان مثبت)، درحالی‌که در سایر مناطق کاهش رطوبت و خشکی خاک ممکن است سبب افزایش قابلیت دسترسی اکسیژن و اکسید شدن CH_4 و کاهش رهاسازی CH_4 به اتمسفر شود (بیلان منفی) (۹۷). گزارش‌های متناقضی نیز در رابطه با اثر دما بر فعالیت نیتروبیفیکاتورها و دنیتروبیفیکاتورها وجود دارد، به گونه‌ای که بارنارد و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که افزایش دما بر فعالیت این موجودات چشم‌گیر نبوده (۵۷)، در حالی که آورهای و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که میزان N_2O وارد شده به اتمسفر به دلیل تغییر ساختار جامعه باکتریایی اکسید کننده آمونیاک در دماهای بالا کاهش می‌یابد (۹۸).

ج. اثر افزایش دما بر جانوران درشت خاک

افزون بر باکتری‌ها و قارچ‌ها، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که افزایش دما بر فراوانی و فعالیت سایر جانداران خاک نیز موثر است. برای نمونه هارت و همکاران (۱۹۹۶) گزارش نمودند که افزایش دما در چمنزارهای مرطوب دامنه کوه‌های آلپ سبب افزایش زیستوده جانوران درشت و متوسط شده بود (۹۹)؛ در حالی‌که در مناطق خشک سبب کاهش زی‌توده جانوران مذکور، شده بود. هم چنین بریونز و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که افزایش دما به اندازه ۳/۵ درجه سانتی‌گراد در طول دو سال در یک چمنزار سبب تغییر در جامعه زنده خاک شده بود؛ به گونه‌ای که اگرچه افزایش دما اثری بر رشد بخش هوایی گیاهان و تنفس خاک نداشت، اما سبب افزایش رشد ریشه، کاهش چشم‌گیر در کرم‌های حلقوی کم‌تار^۸

مانند تجزیه سلولز (۱۳+) درصد، تولید CO_2 (۱۰+) درصد، متابولیسم گلیسرین (۱۳+) درصد و تجزیه بتا-گلوکوزونید (۲۲+) درصد، بیش‌تر شده بود، در حالی که فراوانی ژن‌های مربوط به فعالیت‌های متابولیسمی کربن سخت مانند تجزیه کتین (۹-) درصد و لیگنین (۱۸-) درصد و هم‌چنین تخمیر کاهش یافته بود (۸۸). این یافته‌ها با یافته‌های ژاو و همکاران (۲۰۱۲)، که افزایش میزان کربن فراهم (۸+) درصد و کربن سخت و هم‌چنین افزایش تنفس خاک (افزایش خروج ۳۱ درصدی CO_2 از خاک) را در همین منطقه گزارش کردند، هم‌خوانی دارد (۹۵). در رابطه با چرخه نیتروژن فراوانی ژن‌های مربوط به دنیتروبیفیکاسیون (۱۲+) درصد افزایش یافته بود، درحالی‌که برخلاف مطالعات ژاو و همکاران (۲۰۱۲) که افزایش ژن‌های مربوط به تثبیت نیتروژن را گزارش کرده بودند (۹۵)، در این پژوهش افزایشی در مقایسه با شاهد مشاهده نشد. اما فراوانی ژن‌های مربوط به چرخه سایر عناصر مانند فسفر تغییری نکرده بود (۸۸). هم‌چنین در این پژوهش میزان فراوانی ژن‌های اسپورزایی و مسیرهای مربوط به آن مانند آبیگری هسته اسپور (۵+) درصد و جوانه‌زنی اسپور (۱۲+) درصد و ژن‌های با میزان بالای بازه‌های آلی گوانین و سیتوزین (۳+) درصد افزایش یافته بود، که نشان دهنده آن است که میزان مقاومت باند گوانین و سیتوزین در مقابل دما بیش‌تر است (۹۶). این مساله (بالا بودن بازه‌های آلی گوانین و سیتوزین) با غالب بودن اکتینوباکتریها^۱، پرتئوباکتریها^۲، اسیدوباکتریها^۳، پلانکتومایسیتیس^۴ و باکترئوئیدتیس^۵ در خاک حرارت داده شده هم‌خوانی دارد. اما فراوانی قارچ‌ها به ویژه آسکومایکوتاه^۶ و بازیدیومایکوتاه^۷ در خاک حرارت داده شده کاهش یافته بود (۸۸). هم‌چنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد که چنان‌چه سایر فاکتورها محدود کننده رشد وجود نداشته باشند، افزایش دما

- 1- Actinobacteria
- 2- Proteobacteria
- 3- Acidobacteria
- 4- Planctomycetes
- 5- Bacteroidetes
- 6- Ascomycota
- 7- Basidiomycota

می‌دهد، در حالی که غیرقابل پیش‌بینی بودن این اثرات را نیز خاطر نشان می‌کند.

۲-۳. اثر تغییرات رطوبت بر جانداران خاک

بر خلاف افزایش دما که پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیم نشان می‌دهند که افزایش آن برای بیش‌تر کره زمین رخ می‌دهد (۲۲). اما به نظر می‌رسد که تغییر در میزان نزولات جوی بیش‌تر منطقه‌ای و محلی باشد؛ به گونه‌ای که در برخی مناطق ممکن است نزولات جوی افزایش و در مناطق دیگر کاهش یابد. افزون بر آن الگوی توزیع مکانی و زمانی بارندگی نیز ممکن است دگرگون شود. به هر گونه رطوبت نیز یکی از فاکتورهایی کلیدی است که بر ساختار و فیزیولوژی جامعه زنده خاک اثرگذار است. این اثر می‌تواند به گونه مستقیم (اثر رطوبت بر فعالیت‌های فیزیولوژیک) و غیرمستقیم (اثر رطوبت خاک بر روی میزان و سرعت پخش گازها و قابلیت دسترسی اکسیژن در خاک) باشد. برای نمونه کناپ و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که در یک چمن‌زار با رژیم رطوبتی مزیک اثر الگوی بارندگی (افزایش شدت و فاصله بین دو بارندگی) بر رشد گیاهان و جانداران خاک بیش‌تر از میزان بارندگی است (۱۰۵). هم چنین فای و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که افزایش زمان بین دو بارندگی در یک چمن‌زار معتدله سبب کاهش تنفس میکروبی خاک می‌شود، و به طور هم‌زمان سبب افزایش میزان کربن ورودی به خاک از طریق افزایش کربن-گیری (فتوسنتز) در گیاهان می‌شود (۱۰۶).

در روندی مشابه با دما، رطوبت در اکوسیستم‌های مختلف می‌تواند اثرهای ناهم‌گونی را بر فعالیت‌های میکروبی خاک داشته باشد، برای نمونه در اکوسیستم‌هایی که رطوبت در حد بهینه نیست، خشکی طولانی مدت ممکن است رشد میکروبی و به تبع آن تجزیه ترکیبات آلی را محدود کند (۱۰۷). به هر گونه خشک شدن خاک در برخی اکوسیستم‌ها ممکن است بر روی جریان کربن اثر منفی داشته باشد، در حالی که در برخی اکوسیستم‌ها (مناطق مرطوب و خاک‌های پیتی) این امر ممکن است سبب قابلیت دسترسی بیش‌تر اکسیژن و افزایش رهاسازی CO₂ به اتمسفر شود (۱۰۸). روی

شده بود؛ به گونه‌ای که تمام کرم‌های خاکی سطحی‌زی^۱ ناپدید شده بودند، و تمامی کرم‌های گل‌دانی^۲ هم برای فرار از گرما به به طرف پایین حرکت کرده بودند. هم چنین شمار موربانه‌های پروتواستیگماتا^۳ کاهش، اما جمعیت موربانه‌های قارچ‌خوار افزایش یافته بود (۱۰۰). این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که افزایش دما تمایل غذایی جانداران خاک را از طرف باکتری-خواران به طرف قارچ‌خواران سوق می‌دهد. این پژوهندگان چنین نتیجه‌گیری کردند که افزایش دما بر جامعه هتروتروف خاک اثر چشم‌گیری دارد به گونه‌ای که سبب افزایش تنفس، کاهش ماده آلی خاک و افزایش معدنی شدن نیتروژن خاک می‌شود. هم چنین آنالیزهای متا نشان می‌دهد که افزایش دما در بالای حد بحرانی ۱۶ درجه سانتی‌گراد جمعیت کرم‌های گل‌دانی را به گونه فزاینده‌ای کاهش می‌دهد (۱۰۱). هم چنین سیمونس و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که افزایش دما سبب کاهش چشم‌گیر در فراوانی نماتدها می‌شود (۱۴). هم چنین دونگ و همکاران (۲۰۱۳) با شبیه‌سازی گرمایش زمین (یک درجه سانتی‌گراد) به وسیله اشعه مادون قرمز در دو سیستم بدون شخم و شخم رایج تحت کشت ذرت دریافتند که افزایش دما سبب افزایش تنوع نماتدها در هر دو نوع سیستم کشت در ابتدای رشد شده بود، اگرچه تنوع در سیستم بدون شخم در پایان رشد کاهش یافت. اما بر خلاف تنوع افزایش دما اثری بر افزایش فراوانی نماتدها در هر دو سیستم شخم نداشت. روی هم رفته این پژوهندگان چنین نتیجه‌گیری کردند که افزایش دما به اندازه یک درجه سانتی‌گراد اثر اندکی بر فراوانی و تنوع نماتدهای خاک دارد (۱۰۲). هم چنین هودکینسون و همکاران (۱۹۹۴) و کولسون و همکاران (۱۹۹۶) گزارش کردند که به گونه عموم به نظر می‌رسد که موربانه‌ها در برابر دم‌فتری‌ها نسبت به دما و خشکی حساس‌ترند (۱۰۳ و ۱۰۴). گزارش‌هایی که در پیش آمد اثر افزایش دما بر جانداران درشت خاک را به وضوح نشان

- 1- Epigeic
- 2- Enchytraeids
- 3- Prostigmata mites

به عنوان یک نتیجه، مطالعات اندکی در رابطه با اثر هم‌زمان تغییر در میزان بارندگی و افزایش CO₂ و دما انجام شده است، اما بنا به آن چه در پیش بحث شد و گزارش‌هایی که وجود دارد، از میان سه عامل تغییرات اقلیم، یعنی تغییر در میزان بارندگی، افزایش CO₂ و دما، وجود آب اولین شرط لازم برای تغییر در کارکردهای اکوسیستم مانند ترکیب جامعه گیاهی و میکروبی یا فعالیت‌های آنزیمی می‌باشد (۱۱۵، ۱۱۶ و ۱۱۷).

۳. تجزیه‌های متا یا فراتحلیل

آن چه در پیش آمد یک مرور سیستماتیک بر اثرات متقابل جانداران خاک و تغییرات اقلیم بود، که ممکن است نتواند خواننده را از این که به یک نتیجه کلی از اثر پارامترهای اقلیمی بر جانداران خاک برسد، را اغنا نماید. بنابراین آبلنکین-شپ و همکاران (۲۰۱۱) با تلفیق ۷۵ پژوهش در رابطه با چگونگی پاسخ جانداران مختلف خاک در برابر تغییرات اقلیمی چنین اظهار کردند که پاسخ جانداران خاک به تغییرات آب و هوا به وسیله تجزیه‌های فراتحلیل قابل پیش‌بینی است، به گونه‌ای که پاسخ این جانداران به افزایش میزان CO₂ اتمسفر به اندازه عرض بدن، گروه تغذیه‌ای و نوع روی کرد آزمایش (مزرعه‌ای یا گل خانه‌ای) وابسته است. درحالی‌که چگونگی پاسخ جانداران خاک به تغییرات دما و بارندگی تنها به اقلیم محلی و نوع اکوسیستم بستگی دارد (۱۱۸).

الف. فرا تحلیل اثر افزایش CO₂ بر جانداران خاک

همان‌گونه که در بالا آمد پاسخ جانداران خاک به افزایش میزان CO₂ اتمسفر به اندازه عرض بدن، گروه تغذیه‌ای و نوع روی کرد آزمایش (مزرعه‌ای یا گل خانه‌ای) وابسته است. تجزیه‌های فراتحلیل توسط آبلنکین-شپ و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که از نظر اندازه عرض بدن، فراوانی جانداران میکروفلور و میکروفون به افزایش میزان گاز CO₂ اتمسفر پاسخ مثبت نشان می‌دهند، درحالی‌که مزوفون‌ها به این امر پاسخ منفی دادند. از نظر نوع روی کرد آزمایش (مزرعه‌ای یا گل خانه‌ای)، زمانی که پژوهندگان یاد شده نتایج آزمایشات

هم‌رفته پیش‌بینی اثر تغییرات بارندگی بر جانداران خاک به دلایل زیر اگر ناممکن نباشد مشکل است این دلایل عبارتند از: (I) اصولاً الگوی توزیع و میزان نزولات جوی در آینده در یک منطقه خاص غیرقابل پیش‌بینی است، (II) در مقایسه با افزایش دما و گاز CO₂ اتمسفر میزان اطلاعات در رابطه با چگونگی پاسخ مستقیم جانداران خاک به تغییرات میزان بارندگی اندک است، افزون بر آن گزارشات متناقضی نیز در رابطه با اثر رطوبت خاک بر تغییرات کربن خاک در اثر نهشته-های ریشه گیاهان وجود دارد، برای نمونه سانتاتونیو و هرمان (۱۹۸۵)، و میتچل و همکاران (۱۹۹۹)، نشان دادند که میزان کربن خاک با افزایش میزان آب قابل دسترس خاک افزایش می‌یابد (۱۰۹ و ۱۱۰). در حالی که کومیوا و کیممون (۱۹۸۹) نشان دادند که میزان کربن خاک با افزایش میزان آب قابل دسترس خاک کاهش می‌یابد (۱۱۱)، این مساله احتمالاً به دلیل افزایش فعالیت ریزجانداران در اثر افزایش آب قابل استفاده خاک، و به تبع آن مصرف کربن قابل دسترس خاک باشد. هم چنین گوور و همکاران (۱۹۹۲) و هندریکس و همکاران (۲۰۰۶) نیز گزارش کردند، که افزایش میزان آب قابل دسترس خاک بر میزان کربن خاک تاثیری ندارد (۱۱۲) و (۱۱۳) و (III) اطلاعات کافی در مورد این که افزون بر دوره‌های خشکی و رطوبت، تغییر در میزان تبخیر و تعرق ناشی از تغییرات محیطی چگونه بر میزان رطوبت خاک تاثیر می‌گذارد، وجود ندارد. اما به گونه عموم تصور می‌شود به دلیل تغییر در هیدرولوژی کل دنیا در اثر بارندگی‌های شدید، میزان آب خاک در آینده افزایش یابد (۸). بنابراین تصور می‌شود که در آینده در اثر تغییر نزولات جوی تنوع و فراوانی جانداران خاک بیش تر شود، چرا که در مقایسه با خاک‌های خشک، خاک‌های با رطوبت بیش‌تر دارای تنوع و سرعت تجزیه میکروبی بالاتر، سرعت برگشت میکروبی بالاتر و جامعه نیرومندتری از جانواران متوسط و درشت خاک می‌باشند (۳۵)، ازسویی بیماری‌های خاک زاد در مقایسه با خاک‌های خشک مشکل‌سازتر خواهند بود (۱۱۴).

که اثر مثبت افزایش گاز CO₂ بر افزایش فراوانی جانداران خاک با گذشت زمان کاهش می‌یابد، و پس از گذشت یک دوره خاص (سه سال) جانداران خاک به این امر دیگر پاسخی نشان نمی‌دهند، همان‌گونه که در پیش یادآوری شد، این مساله احتمالاً به این دلیل است که وضعیت عناصر غذایی خاک از کمبود کربن در ابتدا به سمت کمبود کل عناصر غذایی پیش می‌رود (۳۷). در برابر این پژوهش تجزیه‌های فراتحلیل توسط وان گروینینگین و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که اثر اصلی افزایش گاز CO₂ اتمسفر بر سیستم خاک، افزایش خروج گازهایی مانند N₂O از خاک است که شدت خروج گازها با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

ب. فرا تحلیل اثر افزایش دما بر جانداران خاک

همان‌گونه که در بالا آمد چگونگی پاسخ جانداران خاک به افزایش دما تنها به نوع اکوسیستم و اقلیم محلی (دما و بارندگی سالیانه) وابسته است. به گونه‌ای که تجزیه‌های فراتحلیل توسط آبلنکین‌شپ و همکاران (۲۰۱۱) نشان داده است که افزایش دما به احتمال زیاد سبب کاهش چشم‌گیر فراوانی جانداران خاک در خاک‌هایی می‌شود که دارای میانگین دما و بارندگی سالیانه پایین‌تری می‌باشند. به سخن دیگر اثر کاهشی، افزایش دما بر کاهش جانداران خاک بیش‌تر در اقلیم‌های سردتر و خشک‌تر اتفاق می‌افتد. نتایج تجزیه‌های فراتحلیل، این تفسیر را که افزایش دما ناشی از تغییرات اقلیم می‌تواند اثرات چشم‌گیری را بر کاهش جانداران خاک در بیش‌تر مناطق کشور ایران داشته باشد را تایید می‌کند. چرا که در بیش‌تر مناطق کشور ایران یا میانگین دما و بارندگی سالیانه پایین و یا دست کم یکی از این شرایط وجود دارد. برای نمونه شریفی و همکاران (۲۰۱۲) براساس طبقه‌بندی کوپن، منطقه قروه کردستان را با میانگین دما و بارندگی سالیانه به ترتیب ۱۱/۴ °C و ۳۳۹ میلی‌متر را یک منطقه سرد با تابستان‌های خشک گزارش کرده‌اند (۶۸). کوتاه سخن اینکه کشور ایران در اقلیم خشک و نیمه خشک واقع شده است.

گل‌خانه‌ای و مزرعه‌ای را از هم جدا کردند، دریافتند که روابط بین ویژگی‌های جانداران خاک و افزایش میزان گاز CO₂ چشم‌گیر نیست. به سخن دیگر اثرات افزایش گاز CO₂ بر جانداران خاک بیش‌تر در شرایط گل‌خانه‌ای رخ داده است تا مزرعه. از نظر گروه تغذیه‌ای افزایش میزان گاز CO₂ به گونه چشم‌گیری سبب افزایش جمعیت خرده‌ریزخواران شده بود، درحالی‌که بر فراوانی گیاه خوارها، باکتری‌خوارها، قارچ‌خوارها و شکارگرها تاثیری نداشت (۱۱۸). به سخن دیگر فراوانی میکروفلور و میکروفان خاک به ویژه خرده‌ریزخواران با افزایش گاز CO₂ افزایش می‌یابد، که نشان گر کمبود کربن فراهم برای این جانداران تحت غلظت معمولی اتمسفر است؛ درحالی‌که جانداران خاک در سطوح بالای تغذیه به این امر پاسخی نشان ندادند (۱۱۸). بنابراین دسته‌بندی‌های کارکردی (مانند گروه‌های تغذیه‌ای و اندازه بدن) در توصیف چگونگی پاسخ جانداران خاک به افزایش CO₂ اتمسفر سودمندتر از طبقه‌بندی سیستماتیک این جانداران است (۱۱۹). این مساله شاید به این دلیل باشد که در شرایط افزایش میزان CO₂ اتمسفر، خلل و فرج ریز خاک که دارای میران کربن و آب فراهم بیش‌تری هستند، برای جانداران ریز قابل دست‌یابی است (۴۹ و ۱۲۰). دلیل دیگر می‌تواند این باشد که در شرایط افزایش میزان CO₂ اتمسفر، میزان خاک دانه‌سازی که ریززیست گاه‌های پایدار بیش‌تری را برای قارچ‌ها و باکتری‌ها به وجود می‌آورد (۲)، و هم چنین موجب جداسازی مکانی بیش‌تر شکار و شکارگر می‌گردد، افزایش می‌یابد (۱۲۱).

هم‌چنین افزایش جمعیت خرده‌ریزخواران به افزایش CO₂

ممکن است ناشی از افزایش آب فراهم ناشی از تغییرات نزولات جوی نیز باشد، زیرا در تجزیه‌های فراتحلیل این دسته از جانداران خاک همین پاسخ را در برابر افزایش آب فراهم ناشی از تغییرات نزولات جوی از خود نشان داده‌اند (۱۱۸). بنا به آن چه گفته شد نوع رده جانداران، نوع اکوسیستم، میانگین دما و بارندگی سالیانه و میزان گاز CO₂ در چگونگی پاسخ جانداران خاک به افزایش میزان CO₂ اتمسفر در این پژوهش تاثیری نداشته‌اند. هم‌چنین نتایج این تجزیه نشان داد

زارها یا اکوسیستم‌های توندرا ندارد. این مساله شاید به این علت باشد که در اکوسیستم‌های غیرجنگلی، فعالیت و فراوانی جانداران خاک بیش‌تر توسط کربن فراهم محدود می‌شود، تا میزان رطوبت. درحالی‌که در اکوسیستم‌های جنگلی فراوانی جانداران خاک بیش‌تر به وسیله کمبود بارندگی به ویژه در اقلیم‌های خشک محدود می‌شود. به سخن دیگر از میان فاکتورهای محدود کننده رشد در اکوسیستم‌های غیرجنگلی، کربن فراهم و در اکوسیستم‌های جنگلی، میزان رطوبت فراهم در رجه اول اهمیت قرار دارند. علت این مساله احتمالاً به دلیل اثرات فیزیکی نزولات جوی در خرد و ریز کردن پس‌ماندهای گیاهی (۱۲۶)، کمبود آب در میان لایه‌های پس‌ماندهای گیاهی در مقایسه با افق‌های معدنی خاک (۱۲۷) و یا رقابت بین درختان و جانداران خاک برای رطوبت در شرایط کمبود رطوبت فراهم در مناطق جنگلی باشد (۱۲۸). در تایید این مطلب تجزیه‌های فراتحلیل نشان داد که حساسیت جانداران خاک به خشکی در لایه‌های آلی بیش‌تر از لایه‌های معدنی است (۱۱۸). بنابراین بارندگی تمامی سطوح تغذیه‌ای و رده‌ها را به ویژه در اکوسیستم‌های جنگلی محدود می‌کند (۱۱۸). اثر افزایش بارندگی بر افزایش جانداران خاک با گذشت زمان تشدید می‌شود، به سخن دیگر اثر مثبت بارندگی بر فراوانی جانداران خاک در دراز مدت اتفاق می‌افتد. این مساله نشان دهنده آن است که تغییرات دایمی در آب فراهم خاک سبب تغییرات پایدار در اندازه جمعیت جانداران خاک می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه مروری نشان می‌دهد که جانداران خاک به ویژه ریزجانداران به عنوان یکی از عوامل موثر در تغییرات اقلیمی در تولید و مصرف گازهای گل‌خانه‌ای (دی-اکسیدکربن، متان، نیتروس‌اکسید و نیتریک‌اکسید) نقش اساسی دارند. از طرفی درک چگونگی پاسخ جانداران خاک به تغییرات اقلیمی به دلیل عواملی مانند تنوع زیاد و به گونه عمده ناشناخته خود جامعه زنده خاک، تنوع اکوسیستم‌ها، کاربری-های گوناگون اراضی و تفاوت‌های مدیریتی حاکم بر آن‌ها

علت کاهش فراوانی جانداران خاک در اثر افزایش دما شاید به این دلیل باشد که جانداران خاک برای فرار از گرما به عمق خاک می‌روند که پژوهندگان از آن نمونه‌برداری نکرده‌اند (۱۰۱). هم چنین علت این کاهش می‌تواند ناشی از تنش خشکی (۱۰۴ و ۱۲۳) و یا مردن در اثر تنش گرمایی (۱۰۰ و ۱۰۳) باشد. این احتمال نیز وجود دارد که ترکیب جمعیتی جانداران خاک در اثر افزایش دما با کاهش گونه‌هایی که به شرایط سرد (۱۰۳) و یا شرایط مرطوب (۱۲۳)، گذشته سازگار شده بودند، باشد. در تجزیه فراتحلیل انجام شده توسط آبلنکین‌شپ و همکاران (۲۰۱۱) پاسخ جانداران خاک به افزایش دما رابطه چشم‌گیری با میزان بزرگی افزایش دما نداشت، اما این پاسخ به گونه چشم‌گیری با طول دوره افزایش دما رابطه مستقیم داشت. به سخن دیگر اثر افزایش دما بر کاهش فراوانی جانداران خاک با گذشت زمان شدت می‌یابد. این مساله احتمالاً به دلیل شدت کاهش آب فراهم در اثر افزایش دما در طول زمان باشد (۹۹، ۱۲۴ و ۱۲۵). به گونه‌ای که افزایش دما در اقلیم‌های خشک‌تر یک رابطه متقابل منفی مهم را بین افزایش دما و آب فراهم را در این مناطق به وجود می‌آورد. بنابراین افزایش دما کمبود رطوبت برای موجودات خاک را در مناطق خشک و نیمه خشک تشدید می‌کند.

ج. فراتحلیل اثر تغییرات بارندگی بر جانداران خاک

همان‌گونه که در پیش آمد تجزیه فراتحلیل نشان داد که اثر مثبت بارندگی بر فراوانی جانداران خاک در میان رده‌ها، گروه‌های تغذیه‌ای مختلف با اندازه عرض بدن متفاوت، یکسان بود. اما اثر این عامل بر جانداران خاک بسته به نوع اکوسیستم متفاوت بود، و نوع پوشش گیاهی نقش عمده‌ای را در چگونگی پاسخ جانداران خاک در مقابل تغییرات بارندگی بازی می‌کند. به گونه‌ای که با افزایش بارندگی میزان فراوانی رده‌های مختلف جانداران خاک در جنگل‌های سوزنی برگ شمالی، جنگل‌های کاج و جنگل‌های برگ‌ریزان افزایش می‌یابد، درحالی‌که اثری بر جمعیت جانداران خاک در علف‌زارها، بوته-

با نتایج تجزیه‌های فراتحلیل هم‌خوانی داشتند، به گونه‌ای که نتایج حاصل از تجزیه‌های فراتحلیل نشان می‌دهد که پاسخ جانداران خاک به افزایش میزان CO₂ اتمسفر به اندازه بدن، گروه تغذیه‌ای و نوع روی کرد آزمایشی (مزرعه‌ای و گل خانه-ای) وابسته است؛ در حالی که چگونگی پاسخ جانداران خاک به تغییرات دما و بارندگی به اقلیم محلی و نوع اکوسیستم وابسته است. هم چنین نتایج تجزیه‌های فراتحلیل نشان می‌دهد که اثرات افزایش CO₂ بر جانداران خاک با زمان کاهش، در حالی که اثر دما و تغییر در بارندگی با زمان شدت می‌یابد. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پژوهش‌های اندکی در رابطه با اثر هم زمان پارامترهای تغییر اقلیم یعنی تغییر در میزان بارندگی و افزایش CO₂ و دما انجام شده است، به دلیل این که اثر هر کدام از پارامترهای یاد شده بر جانداران خاک از هم دیگر مستقل نمی‌باشد، لذا نگارنده‌گان پیشنهاد پژوهش‌های سنجش اثر هم زمان پارامترهای اقلیمی بر جانداران خاک را می‌نمایند.

منابع

1. Burdass, Dariel., 1998. Microbes and Climate Change – A resource for secondary schools. Edited by Janet Hurst.
2. Six, J., Carpentier, A., van Kessel, C., Merckx, Harris, D., Horwath, W.R., Luscher, A., 2001. Impact of elevated CO₂ on soil organic matter dynamics as related to changes in aggregate turnover and residue quality. Plant Soil Vol. 234, pp. 27-36.
3. Panikov, N.S. 1999. Understanding and prediction of soil microbial community dynamics under global change. Applied Soil Ecology Vol. 11, pp. 161-176.
4. Allison, S.D., Wallenstein, M.D., Bradford, M.A., 2010. Soil-carbon

بسیار پیچیده است. اما آن چه از نتایج این مطالعه برمی‌آید این است که اثر افزایش CO₂ بر جانداران خاک به گونه غیرمستقیم و از طریق افزایش فتوسنتز در گیاهان است، به گونه‌ای که افزایش CO₂ اتمسفر سبب افزایش کمی کربن ورودی به خاک از طریق افزایش پس‌ماندها و نهشته‌های ریشه گیاهان، اما کاهش کیفیت پس‌ماندها (افزایش C/N) می‌شود. روی هم رفته باور عمومی بر این است که افزایش CO₂ اتمسفر سبب افزایش فعالیت و فراوانی ریزجانداران خاک می‌شود، به گونه‌ای که افزایش کربن ورودی به خاک ناشی از این امر بر اثر تنفس جانداران خاک دوباره به اتمسفر برمی‌گردد، تا جایی که افزایش CO₂ اتمسفر بر ذخیره کربن خاک بی‌تاثیر است. اما اثر تغییر در نزولات جوی و درجه حرارت بر جانداران خاک به گونه مستقیم و غیرمستقیم (از طریق تغییر در فیزیولوژی، ساختار و رشد گیاهان) می‌باشد. اثر دما بر فعالیت و فراوانی جانداران خاک به میزان رطوبت خاک و دمای بهینه رشد گیاهان و جانداران خاک دارد. به گونه‌ای که افزایش دما در مناطقی که درختان در دمای پایین‌تر از دمای بهینه خود رشد می‌کنند، و در مناطقی که رطوبت خاک چه با آب شدن یخ‌ها در اثر افزایش دما (مناطق آلبی و قطبی) و یا خود نزولات جوی (مناطق معتدله) تامین شود، افزایش دما سبب افزایش فعالیت و فراوانی جانداران خاک می‌شود؛ به گونه‌ای که باور عمومی بر این است که در این مناطق افزایش دما سبب افزایش فعالیت ریزجانداران هتروتروف و کاهش ذخیره کربن خاک می‌شود. اگرچه شواهدی وجود دارد که ممکن است جانداران خاک در نهایت به شرایط دمایی جدید عادت کنند و تنفس خاک به حالت معمولی خود برگردد. هم چنین نتایج این مطالعه نشان داد که در اثر افزایش دما و CO₂ اتمسفر جریان انرژی در خاک بیش‌تر در مسیر قارچ‌ها می‌افتد تا باکتری‌ها. اما پیش-بینی چگونگی پاسخ جانداران خاک به تغییرات بارندگی مشکل است، و به فاکتورهای گوناگونی مانند نوع منطقه، چگونگی تغییر در الگوی شدت و میزان کل بارندگی و چگونگی پاسخ پوشش گیاهی موجود وابسته است. هم‌چنین در این بررسی روی هم رفته نتایج حاصل از مرور سیستماتیک

12. Hattori, T., 1988. Soil aggregates in microhabitats of microorganisms. Rep Inst Agric Res Tohoku Univ Vol. 37, pp. 23-36.
13. Savin, M.C., Gorres, J.H., Neher, D.A., Amador, J.A., 2001. Biogeophysical factors influencing soil respiration and mineral nitrogen content in an old field soil. Soil Biol Biochem Vol. 33, pp. 429-438.
14. Simmons BL, Wall DH, Adams BJ, Ayres E, Barrett JE, Virginia RA., 2009. Long-term experimental warming reduces soil nematode populations in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. Soil Biol Biochem Vol. 41, pp. 2052-2060.
15. Strickland, M.S., Rousk, J., 2010. Considering fungal: bacterial dominance in soils—methods, controls, and ecosystem implications. Soil Biol Biochem Vol. 42, pp. 1385-1395.
16. West, A.W., Sparling, G.P., Feltham, C.W., Reynolds, J., 1992. Microbial activity and survival in soil dried at different rates. Aust. J. Soil Res. Vol. 30, pp. 209-222.
17. Van Gestel, M., Merckx, R., Vlassak, K., 1996. Spatial distribution of microbial biomass in microaggregates of a silty-loam soil and the relation with the resistance of microorganisms to soil drying. Soil Biol Biochem Vol. 28, pp. 503-510.
۱۸. صفاری، محسن، و همکاران، «چگونه یک مرور سیستماتیک در زمینه سلامت انجام دهیم: یک مرور توصیفی»، شماره ۱. فصل نامه علمی پژوهشی آموزش بهداشت و ارتقاء سلامت. ۱۳۹۲؛ صفحه ۵۱ تا ۶۱
5. Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillion, S., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. Eur. J. Soil. Biol. Vol. 33, pp. 159-193.
6. Schlesinger, W.H., Andrews, J.A., 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry Vol. 48, pp. 7-20.
7. Chapin, F.S., Walker, B.H., Hobbs, R.J., Hooper, D.U., Lawton, J.H., Sala, O.E., Tilman, D., 1997. Biotic control over the functioning of ecosystems. Science Vol. 277, pp. 500-504.
8. Pritchard, S.G. and references therein., 2011. Soil organisms and global climate change. Plant Pathology Vol. 60, pp. 82-99.
۹. صفری سنجانی ، علی اکبر، «بیولوژی و بیوشیمی خاک»، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۹۰؛ ۵۸۳ صفحه.
10. Bushby, H.V.A., Marshall, K.C., 1977. Some factors affecting the survival of root-nodule bacteria on desiccation. Soil Biol Biochem Vol. 9, pp. 143-147.
11. Deneff, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, S.D., Elliott, E.T., Merckx, R., Paustian, K., 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. Soil Biol Biochem Vol. 33, pp. 1599-1611.

- global trace gases. *Glob. Chang. Biol.* Vol. 4, pp. 745-758.
28. Singh, B.K., Bardgett, R.D., Smith, P., Reay, D.S., 2010. Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options. *Nature reviews / microbiology*, Vol. 8, pp. 779-790.
29. Smith, P., et al., 1998. Soil biota and global change at the ecosystem level: describing soil biota in mathematical models. *Glob. Chang. Biol.* Vol. 4, pp. 773-784.
۳۰. رفیع، محمدجعفر، (مترجم). «فیزیک خاک»، مولف هلموت کهنک، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۰؛ ۲۹۶ صفحه.
31. Bardgett, R. D., De Deyn, G.B. Ostle, N.J., 2009. Plant-soil interactions and the carbon cycle. *J. Ecol.* Vol. 97, pp. 838-839.
32. Button, D.K., 1991. Biochemical basis for whole-cell uptake kinetics - specific affinity, oligotrophic capacity, and the meaning of the Michaelis constant. *Appl. Environ. Microbiol.* Vol. 57, pp. 2033-2038.
33. Couteaux, M.M., Mousseau, M., Celerier, M.L., Bottner, P., 1991. Increased atmospheric CO₂ and litter quality: decomposition of sweet chestnut leaf litter with animal food webs of different complexities. *Oikos* Vol. 61, pp. 54-64.
34. Hattenschwiler, S., Buhler, S., Korner, C., 1999. Quality, decomposition and isopod consumption of tree litter produced under elevated CO₂. *Oikos* Vol. 85, pp. 271-81.
35. Wardle, D.A., 2002. Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components.
19. Glass, G.V., 1976. Primary, Secondary and Meta_Analysis. *Educational Research*, 5.
20. Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* Vol. 123, pp. 1-22.
21. Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* Vol. 440, pp. 165-73.
22. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Solomon, S. et al.) (Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2007).
23. Willey, J.M., Sherwood, L.M., Woolverton, C.J., 2009. *Prescott's Principles of Microbiology*. McGraw-Hill, New York, NY.
24. Leininger, S., et al., 2006. Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils. *Nature* Vol. 442, pp. 806-809.
25. Teske, A., et al., 1994. Evolutionary relationships among ammonia-oxidizing and nitrite-oxidizing bacteria. *J. Bacteriol.* Vol. 176, pp. 6623-6630.
26. Yeates, G.W., Newton, P.C.D., 2009. Long-term changes in topsoil nematode populations in grazed pasture under elevated atmospheric carbon dioxide. *Biology and Fertility of Soils* Vol. 45, pp. 799-808.
27. Schimel, J.P., Gullledge, J. 1998. Microbial community structure and

43. Drigo, B., Kowalchuk, G.A., van Veen, J.A., 2008. Climate change goes underground: effects of elevated atmospheric CO₂ on microbial community structure and activities in the rhizosphere. *Biology and Fertility of Soil* Vol. 44, pp. 667-79.
44. Hu, S., Chapin, F.S., Firestone, M.K., Field, C.B., Chiariello, N.R., 2001. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂. *Nature* Vol. 409, pp. 188-91.
45. Jackson, R., Cook, C., Pippen, J., Palmer, S., 2009. Increased belowground biomass and soil CO₂ fluxes after a decade of carbon dioxide enrichment in a warm-temperate forest. *Ecology* Vol. 90, pp. 3352-3366.
46. Norby, R.J., Ledford, J., Reilly, C.D., Miller, N.E., O'Neill, E.G., 2004. Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO₂ enrichment. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* Vol. 101, pp. 9689-93.
47. Alberton, O., Kuyper, T.W., Gorissen, A., 2005. Taking mycorrhizism seriously: mycorrhizal fungal and plant responses to elevated CO₂. *New Phytologist* Vol. 167, pp. 859-68.
48. Treseder, K.K., 2004. A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies. *New Phytologist* Vol. 164, pp. 347-55.
49. Drigo, B., van Veen, J.A., Kowalchuk, G.A., 2009. Specific rhizosphere bacterial and fungal groups respond Princeton, NJ, USA: Princeton University Press.
36. Luo, Y., Su, B., Currie, W.S., 2004. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *Bio. Science* Vol. 54, pp. 731-9.
37. Luo, Y., Wan, S., Hui, D., Wallace, L.L., 2001. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature* Vol. 413, pp. 622-625.
38. Diaz, S., Grime, J.P., Harris, J. Mcpherson, E. 1993. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon-dioxide. *Nature* Vol. 364, pp. 616-617.
39. Six, J., Frey, S.D., Thiet, R.K., Batten, K.M., 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci Soc Am J* 70, pp. 555-569.
40. 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* Vol. 25, pp. 1887-900.
41. Van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., van Straalen, N.M., 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecol. Lett.* Vol. 11, pp. 296-310.
42. Balser, T.C., Wixon, D.L., 2009. Investigating biological control over soil carbon temperature sensitivity. *Global Change Biology* Vol. 15, pp. 2935-49.

56. Barnard, R., Barthes, L., Le Roux., X., Leadley, P.W., 2004. Dynamics of nitrifying activities, denitrifying activities and nitrogen in grassland mesocosms as altered by elevated CO₂. *New Phytol.* Vol. 162, pp. 365-376.
57. Barnard, R., Leadley, P., Hungate, B., 2005. Global change nitrification and denitrification: a review. *Global Biogeochem. Cycles* 19, GB1007.
58. Cheng, W.G., Yagi, K., Sakai, H., Kobayashi, K. 2006. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: an experiment in controlled-environment chambers. *Biogeochemistry* Vol. 77, pp. 351-373.
59. Hungate, B.A., Lund, C.P., Pearson, H.L., Chapin, F.S., 1997. Elevated CO₂ and nutrient addition alter soil N cycling and N trace gas fluxes with early season wet-up in a California annual grassland. *Biogeochemistry* Vol. 37, pp. 89-109.
60. Baggs, E.M., Richter, M., Cadisch, G., Hartwig, U.A., 2003. Denitrification in grass swards is increased under elevated atmospheric CO₂. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 35, pp. 729-732.
61. Yeates, G.W., Newton, P.C.D, Ross, D.J., 2003. Significant changes in soil microfauna in grazed pasture under elevated carbon dioxide. *Biology and Fertility of Soils* Vol. 38, pp. 319-26.
62. Ayres, E., Wall, DH., Simmons, B.L., et al., 2008. Belowground nematode herbivores are resistant to elevated atmospheric CO₂ concentration in grassland ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 40, pp. 978-85.
- differently to elevated atmospheric CO₂. *The ISME Journal* Vol. 3, pp. 1204-17.
50. Rogers, A., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., 2009. Will elevated carbon dioxide concentration amplify the benefits of nitrogen fixation in legumes? *Plant Physiology* Vol. 151, pp. 1009-16.
51. Serraj, R., Sinclair, T.R., Allen, L.H., 1998. Soybean nodulation and N₂ fixation response to drought under carbon dioxide enrichment. *Plant, Cell and Environment* Vol. 21, pp. 491-500.
52. Schortemeyer, M., Hartwig, U., Hendry, G., Sadowsky, M.J., 1996. Microbial community changes in the rhizospheres of white clover and perennial ryegrass exposed to free air carbon dioxide enrichment (FACE). *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 28, pp. 1717-24.
53. Allen, L.H., 1990. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *Journal of Environmental Quality.* Vol. 19, pp. 15-34.
54. Ineson, P., Benham, D.G., Poskitt, J., Harrison, A.F., Taylor, K., Woods, C., 1998a. Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soils. 2. A warming study. *Global Change Biology* Vol. 4, pp. 153-61.
55. Phillips, R.L., Whalen, S.C., Schlesinger, W.H., 2001. Influence of atmospheric CO₂ enrichment on methane consumption in a temperate forest soil. *Glob. Chang. Biol.* Vol. 7, pp. 557-563.

دکتری بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک. دانشگاه بوعلی

سینا. دانشکده کشاورزی.

69. Melillo, J.M., Steudler, P.A., Aber, J.D., Newkirk, K., Lux, H., Bowles, F.P., Catricala, C., Magill, A., Ahrens, T., Morrisseau, S., 2002. Soil Warming and Carbon-Cycle Feedbacks to the Climate System. *Science* Vol. 298, pp. 2173-2176.
70. Monson, R.K., et al. 2006. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature* Vol. 439, pp. 711-714.
71. Allison, S.D., Treseder, K.K., 2008. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Glob. Chang. Biol.* Vol. 14, pp. 2898-2909.
72. Bradford, M.A., Davies, C.A., Frey, S.D., Maddox, T.R., Melillo, J.M., Mohan, J.E., Reynolds, J.F., Treseder, K.K., Wallenstein, M.D., 2008. Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature. *Ecol. Lett.* Vol. 11, pp. 1316-1327.
73. Kirschbaum, M.U.F., 2004. Soil respiration under prolonged soil warming: are rate reductions caused by acclimation or substrate loss? *Glob. Chang. Biol.* Vol. 10, pp. 1870-1877.
74. De Deyn, G.B., Cornelissen, J.H.C., Bardgett, R.D., 2008. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecol. Lett.* Vol. 11, pp. 516-531.
75. Meier, I.C., Leuschner, C., 2008. Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands
63. Drigo, B., Kowalchuk, G.A., Yergeau, E., Bezemer, T.M., Boschker, H.T.S., Van Veen, J.A., 2007. Impact of elevated carbon dioxide on the rhizosphere communities of *Carex arenaria* and *Festuca rubra*. *Global Change Biology* Vol. 13, pp. 2396-410.
64. Li, Q., Xu, C., Liang, W., Zhong, S., Zheng, X., Zhu, J., 2009. Residue incorporation and N fertilization affect the response of soil nematodes to elevated CO₂ in a Chinese wheat field. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 41, pp. 1497-503.
65. Neher, D.A., Weight, T.R., Moorhead, D.L., Sinsabaugh, R.L., 2004. Elevated CO₂ alters functional attributes of nematode communities on forest soils. *Functional Ecology* Vol. 18, pp. 584-91.
66. Sticht C, Schrader S, Giesemann A, Weigel H-J, 2008. Atmospheric CO₂ enrichment induces life strategy- and species-specific responses of collembolans in the rhizosphere of sugar beet and winter wheat. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 40, pp. 1432-45.
67. Pendall, E., Bridgman, S., Hanson, P.J., et al., 2004. Belowground process responses to elevated CO₂ and temperature: a discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytologist* Vol. 162, pp. 447-58.

۶۸. شریفی، زاهد، «اثر آلودگی آرسنیک بر برخی از

شاخص‌های بیولوژیک خاک، و ارزیابی توانایی

گیاهان بومی منطقه در گیاه‌بهبودی آن»، رساله

83. Forbes, P.J., Black, K.E., Hooker, J.E., 1997. Temperature-induced alteration to root longevity in *Lolium perenne*. *Plant and Soil* Vol. 190, pp. 87-90.
84. Graefe, S., Hertel, D., Leuschner, C., 2008. Fine root dynamics along a 2,000-m elevation transect in South Ecuadorian mountain rainforests. *Plant and Soil* Vol. 313, pp. 155-66.
85. King, J.S., Pregitzer, K.S., Zak, D.R., 1999. Clonal variation in above and below-ground growth responses of *Populus tremuloides* Michaux: influence of soil warming and nutrient availability. *Plant and Soil* Vol. 217, pp. 119-30.
86. Eissenstat, D.M., Yanai, R.D., 1997. The ecology of root life span. *Advances in Ecological Research* Vol. 27, pp. 1-62.
87. Gill, R.A., Jackson, R.B., 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* Vol. 147, pp. 13-31.
88. Luo, C., Luis, M., Rodriguez, R., et al., 2013. Soil microbial community responses to a decade of warming as revealed by comparative metagenomics. *Appl. Environ. Microbiol.* Vol. 80, pp. 1777-86.
89. Balser, T.C., McMahon, D.K., Bart, D., et al., 2006. Bridging the gap between micro- and macro-scale perspectives on the role of microbial communities in global change ecology. *Plant and Soil* Vol. 289, pp. 59-70.
90. Andresen, L.C., Michelsen, A., Jonasson, S., et al., 2010. Plant nutrient mobilization in temperate heathlands responds to elevated CO₂, across a precipitation gradient. *Glob. Chang. Biol.* Vol. 14, pp. 2081-2095.
76. Zimov, S.A., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. 2006. III. Permafrost and the global carbon budget. *Science* Vol. 312, pp. 1612-1613.
77. Bergner, B., Johnstone, J., Treseder, K.K. 2004. Experimental warming and burn severity alter soil CO₂ flux and soil functional groups in a recently burned boreal forest. *Glob. Chang. Biol.* Vol. 10, pp. 1996-2004.
78. Rustad, L.E., et al., 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* Vol. 126, pp. 543-562.
79. Bontti, E.A., Decant, J.P., Munson, S.M., Gathany, M.A., Przeszlowska, A., Haddix, M.L., Owens, S., Burke I.C., Parton W.J., Harmon M.E., 2009. Litter decomposition in grasslands of Central North America (US Great Plains). *Global Change Biology* Vol. 15, pp 1356-1363.
80. Butenschoen, O., S. Scheu., N. Eisenhauer., 2011. Interactive effects of warming, soil humidity and plant diversity on litter decomposition and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 43, pp. 1902-1907.
81. McMichael, B.L., Burke, J.J., 1998. Soil temperature and root growth. *HortScience* Vol. 33, pp. 947-51.
82. Eissenstat, D.M., Wells, C.E., Yanai, R.D., Whitbeck, J.L., 2000. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist* Vol. 147, pp. 33-42.

- methane emissions from wetlands. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 30, pp. 10-13.
98. Avrahami, S., Liesack, W., Conrad, R., 2003. Effects of temperature and fertilizer on activity and community structure of soil ammonia oxidizers. *Environ. Microbiol.* Vol. 5, pp. 691-705.
99. Harte, J., Rawa, A., Price, V., 1996. Effects of manipulated soil microclimate on mesofaunal biomass and diversity. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 28, pp. 313-22.
100. Phillips, R.L., Whalen, S.C., Schlesinger, W.H., 2001. Influence of atmospheric CO₂ enrichment on methane consumption in a temperate forest soil. *Glob. Chang. Biol.* Vol. 7, pp. 557-563.
101. Briones, M.J.I., Ineson, P., Heinemeyer, A., 2007. Predicting potential impacts of climate change on geographical distribution of enchytraeids: a meta-analysis approach. *Global Change Biology* Vol. 13, pp. 2252-69.
102. Dong, Z., Hou, R., Chen, Q., Ouyang, Z., Ge, F., 2013. Response of soil nematodes to elevated temperature in conventional and no-tillage cropland systems. *Plant Soil* Vol. 373, pp. 907-918
103. Coulson, S.J., Hodkinson, I.D., Webb, N.R., Block, W., Bale, J.S., Strathdee, A.T., Worland, M.R., Wooley, C. 1996. Effects of experimental temperature elevation on high-arctic soil microarthropod populations. *Polar Biol* Vol. 16, pp. 147-153.
- temperature and drought. *Plant and Soil* Vol. 328, pp. 381-96.
91. Fierer, N., Craine, J.M., McLaughlan, K., Schimel, J.P., 2005. Litter quality and temperature sensitivity of decomposition. *Ecology* Vol. 86, pp. 320-6.
92. Heinemeyer, A., Ineson, P., Ostle, N., Fitter, A.H., 2006. Respiration of the external mycelium in the arbuscular mycorrhizal symbiosis shows strong dependence on recent photosynthates and acclimation to temperature. *New Phytologist* Vol. 171, pp. 159-70.
93. Gavito, M.E., Olsson, P.A., Rouhier, H., et. al., 2005. Temperature constraints on the growth and functioning of root organ cultures with arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* Vol. 168, pp. 179-88.
94. Hendricks, J.J., Hendrick, R.L., Wilson, C.A., Mitchell, R.L., Pecot, S.D., Guo, D., 2006. Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: an empirical test and methodological review. *Journal of Ecology* Vol. 94, pp. 40-57.
95. Zhou, J., Xue, K., Xie, J., Deng, Y., Wu, L., Cheng, X., Fei, S., Deng, S., He, Z., Van Nostrand, J.D., Luo, Y., 2012. Microbial mediation of carbon cycle feedbacks to climate warming. *Nature Climate Change*, pp. 106-110.
96. Nakashima, H., Fukuchi, S., Nishikawa, K., 2003. Compositional changes in RNA, DNA and proteins for bacterial adaptation to higher and lower temperatures. *Journal of biochemistry* Vol. 133, pp. 507-513.
97. Christensen, T.R., et al., 2003. Factors controlling large scale variations in

- ecosystem function in longleaf pine-wiregrass savannas. I. Aboveground net primary productivity. *Canadian Journal of Forest Research* Vol. 29, pp. 743-51.
111. Comeau, P.G., Kimmon, J.P., 1989. Above and belowground biomass production of lodgepole pine on sites with differing soil moisture regimes. *Canadian Journal of Forest Research* Vol. 19, pp. 447-54.
112. Gower, S.T., Vogt, K.A., Grier, C.C., 1992. Carbon dynamics of rocky mountain Douglas fir: influence of water and nutrient availability. *Ecological Monographs* Vol. 62, pp. 43-65.
113. Hendricks, J.J., Hendrick, R.L., Wilson, C.A., Mitchell, R.L., Pecot, S.D., Guo, D., 2006. Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: an empirical test and methodological review. *Journal of Ecology* Vol. 94, pp. 40-57.
114. Bhatti, M.A., Kraft, J.M., 1992. Influence of soil moisture on root rot and wilt of chickpea. *Plant Disease* Vol. 76, pp. 1259-62.
115. Castro, H.F., Classen A.T., Austin E.E., Norby, R.J., Schadt, C.W., 2010. Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers. *Applied and Environmental Microbiology* Vol. 76, pp. 999-1007.
116. Henry, H.A.L., 2012. Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate. *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 47, pp. 53-59.
117. Kardol, P., Cregger M.A., Company C.E., Classen A.T., 2010. Soil ecosystem functioning under climate
104. Hodkinson, I.D., Healey, V., Coulson, S., 1994. Moisture relationships of the high arctic collembolan *Onychiurus arcticus*. *Physiol Entomol* Vol. 19, pp. 109-114.
105. Knapp, A.K., Beier C., Briske, D.D., Classen, A.T., Luo, Y., Reichstein, M., Smith, M.D., Smith, S.D., Bell J.E., Fay, P.A., Heisler, J.L., Leavitt, S.W., Sherry, R., Smit, B., Weng, E., 2008. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*. Vol. 58, pp. 811-821.
106. Fay, P.A., Kaufman, D.M., Nippert, J.B., Carlisle, J.D., Harper C.W., 2008. Changes in grassland ecosystem function due to extreme rainfall events: implications for responses to climate change. *Global Change Biology* Vol. 14, pp. 1600-1608.
107. Fierer., N., Schimel., J.P., 2003. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 67, pp. 798-805.
108. Freeman, C., et al., 2002. Contrasted effects of simulated drought on the production and oxidation of methane in a mid-Wales wetland. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 34, pp. 61-67.
109. Santantonio, D., Herman, R.K., 1985. Standing crop, production, and turnover of fine roots on dry moderate and wet sites of mature Douglas fir sites in Oregon. *Annales des Sciences Forestieres* Vol. 42, pp. 113-42.
110. Mitchell, R.J., Kirkman, L.K., Pecot, S.D., Wilson, C.A., Palik, B.J., Boring, L.R., 1999. Patterns and controls of

123. Kardol, P., Reynolds, W.N., Norby, R.J., Classen, A.T., 2011. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure. *Appl Soil Ecol* Vol. 47, pp. 37-44.
124. Aerts, R., 2006. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *J Ecol.* Vol. 94, pp. 713-724.
125. Sinclair, B.J., 2002. Effect of increased temperatures simulating climate change on terrestrial invertebrates on Ross Island, Antarctica. *Pedobiologia* Vol. 46, pp. 150-160.
126. Lensing, J.R., Wise, D.H., 2007. Impact of changes in rainfall amounts predicted by climate-change models on decomposition in a deciduous forest. *Appl. Soil Ecol.* Vol. 35, pp. 523-534
127. Keith, D.M., Johnson, E.A., Valeo, C., 2010. Moisture cycles of the forest floor organic layer (F and H layers) during drying. *Water Resour Res* 46:W07529.
128. Odhiambo, H.O., Ong, C.K., Deans, J.D., Wilson, J, Khan, A.A.H., Sprent, J.I. 2001. Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya. *Plant Soil* Vol. 235, pp. 221-233.
- change: plant species and community effects. *Ecology* Vol. 91, pp. 781-767.
118. Blankinship, J.C., Niklaus, P.A., Hungate, B.A., 2011. A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia* Vol. 165, pp. 553-565.
119. Scheu, S., Falca, M., 2000. The soil food web of two beech forests (*Fagus sylvatica*) of contrasting humus type: stable isotope analysis of a macro- and a mesofauna-dominated community. *Oecologia* Vol. 123, pp. 285-296.
120. Strong, D.T., De Wever, H., Merckx, R., Recous, S., 2004. Spatial location of carbon decomposition in the soil pore system. *Eur. J. Soil Sci.* Vol. 55, pp. 739-750
121. Wright, D.A., Killham, K., Glover, L.A., Prosser, J.I., 1995. Role of pore size location in determining bacterial activity during predation by Protozoa in soil. *Appl Environ Microbiol* Vol. 61, pp. 3537-3543
122. Sharifi, Z., Safari sinigani, AA., Shariati, S., 2012. Potential of Indigenous Plant Species for the Phytoremediation of Arsenic Contaminated Land in Kurdistan (Iran). *Soil and Sediment Contamination an international journal.* Vol. 21, pp. 557-573.

Interactions between Soil Organisms and Global Climate Change and Application of Meta-Analysis in its Interpretation: A Systematic Review

Zahed Sharifi^{1*}

Z.sharifi@uok.ac.ir

Ali Akbar Safari Sinegani²

Abstract

Soil microorganisms have important role at production and consumption of greenhouse gases, such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), and nitric oxide (NO). On the other hand, there are valid reasons that climate changes can directly or indirectly alter the composition and abundance of soil microbial communities. So that, the results of the systematic review showed that the main direct effects of climate changes on soil microbial communities are likely to be caused by changes in temperature and moisture content. However, the effects of increased CO₂ levels on microbial communities are often indirect, as they are mediated by positive effects of the gas on plant photosynthesis, which in turn changes in quantity and quality of soil C inputs. Any way, depending on the taxonomy, body size, feeding habits, ecosystem type, local climate, treatment magnitude and duration, the patterns responses of the soil organisms in against of climate change parameters are differ. So that, the results of meta-analysis has show that the response of soil biota to elevated CO₂, is depend on the trophic group, body size, and experimental approaches (field or greenhouse). Whereas, the response of soil biota to warming and altered precipitation are depend on local climate and ecosystem type. Furthermore, the effects of increase CO₂ on soil organism abundance diminished with time, however the effects of warming and altered precipitation intensified with time.

Keywords: Soil organisms, Climate change, Systematic review, Meta-analysis

1- Assist Prof., Department of Soil Science, Agriculture Faculty, University of Kudistan, Sanandaj, Iran.
(Corresponding author)

2- Prof., Department of Soil Science, Agriculture Faculty, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran.