بررسی برخی از فعالیت‌های آنزیمی دو خاک هیستوسول و ارتباط آن‌ها با خصوصیات بیولوژیکی و شیمیایی خاک

آسیه عباسیان[1]، احمد گلچین و محسن شکل‌آبادی

دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان؛ asiyeabasian@gmail.com

استاد گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان؛ agolchin2011@yahoo.com

استادیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان؛ sheklabadi@yahoo.com

دریافت: 92/12/18 و پذیرش: 93/11/29

چکیده

فعالیت‌های آنزیمی خاک از شاخص‌های مهم بیولوژیکی بوده و منعکس‌کننده کیفیت و حاصلخیزی خاک هستند. پژوهش حاضر با هدف بررسی ارتباط برخی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک با میزان فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اینورتاز، آلکالین فسفاتاز و آریل‌سولفاتاز بر روی دو نوع خاک هیستوسول از دو مکان متفاوت در کرمان و شهرکرد انجام شد. نمونه‌برداری در هر منطقه از 3 نیمرخ خاک (0-120 سانتی‌متر، با لایه‌های مساوی 20 سانتی‌متری) انجام شد. اندازه گیری‌های فعالیت آنزیم‌های خاک با استفاده از روش‌های استاندارد انجام شد. مطالعه تأثیر برخی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی بر فعالیت آنزیم‌ها با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون نشان‌دهنده نقش مثبت کربن آلی (r> 0/86)، نیتروژن کل (r> 0/88**)، فسفر (r> 0/77**)، کربوهیدرات‌ها (r> 0/86**)، تنفس میکروبی (r> 0/94**) و بیوماس میکروبی کربن (r> 0/87**) در سطح یک درصد آماری در هر دو نوع خاک مورد مطالعه بود. استفاده از مدل رگرسیونی گام به گام به‌منظور ارزیابی اهمیت نسبی ویژگی‌های مورد بررسی در ارتباط با یکدیگر بر فعالیت آنزیم‌ها به‌طور کلی نشان داد که بیوماس میکروبی کربن و فسفر تأثیر منفی بر روی میزان فعالیت برخی از آنزیم‌های مورد مطالعه داشتند، درحالی‌که سایر ویژگی‌ها اثر مثبت خود را به‌صورت نسبی بر روی میزان فعالیت آنزیم‌ها حفظ کردند. بطور کلی همبستگی‌های معنی‌دار تا حد 99 درصد بین فعالیت آنزیم‌های مختلف با یکدیگر مشاهده گردید که می‌تواند نشان‌دهنده پاسخ نسبتاً یکسان این آنزیم‌ها نسبت به سیستم‌های محیطی باشد.**

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های خاک، فعالیت میکروبی، مواد آلی، هیستوسول

---

[1] نویسنده مسئول، آدرس: همدان، بلوار شهید مصطفی احمدی روشن، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده کشاورزی، گروه خاکشناسی

مقدمه

آنزیم‌های خاک و میکروارگانیسم‌ها عوامل اصلی و پایه‌ای فرآیندهای بیولوژیکی خاک محسوب می‌شوند (لی و همکاران، 2009). آنزیم‌های خاک نقش‌های بیوشیمیایی کلیدی در کلیه مراحل تجزیه مواد آلی در سیستم خاک بر عهده دارند. این آنزیم‌ها در پایداری ساختمان خاک، تجزیه و تشکیل ماده آلی، چرخه عناصر در خاک و فرآیند زندگی میکروارگانیسم‌های خاک نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند (دیک و همکاران، 1994). آنزیم‌ها به‌صورت طبیعی دارای قابلیت تحرک بسیار پایینی در خاک هستند (اوداواتا و همکاران، 2009). بنابراین، برای این‌که آنزیم‌ها بیش‌ترین تأثیر را داشته باشند، سوبستراها (Substrates) باید نزدیک به نقطه منشأ آنزیم‌ها باشند. در این میان ماده آلی خاک یک حامل آلی برای آنزیم‌های خاک به شمار می‌رود (وانگ و همکاران، 2012). پژوهشگران مختلفی نظیر بندیک و دیک (1999)، نیلسن و ویندینگ (2001) و الدور (2007) آنزیم‌های خاک را به‌دلیل ارتباط نزدیک آن‌ها با ماده آلی، ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک، سهولت در اندازه‌گیری و پاسخ سریع به تغییرات در مدیریت خاک به عنوان شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی کیفیت خاک دانسته‌اند.

میزان فعالیت آنزیم‌ها که بیان‌گر فعالیت میکروبی در خاک است، به‌صورت فصلی متغیر بوده و بر ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک (نیمی و همکاران، 2005)، روند و شدت فرآیندهای بیوشیمیایی (سینسابا و همکاران، 2005) و نیز منشأ آنزیم (لاد، 1985) وابسته بوده و تحت تأثیر نوع خاک (چونکار و ترفدار، 1984)، نوع کاربری، پوشش گیاهی و طرح مدیریتی خاک تغییر می‌کند (سیکاردی و همکاران، 2004؛ آکوستامارتینز و همکاران، 2007؛ ویند و همکاران، 2010). ویژگی‌های خاک نقش مهمی در میزان فعالیت آنزیم‌های خاک بازی می‌کنند، همچنان که همبستگی بین آن‌ها توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (کلوس و طباطبایی، 1999؛ نوربخش و همکاران، 2002).

گروهی از آنزیم‌های خاک برای سنجش سطح فعالیت میکروبی درون سلولی بکار می‌روند (مانند دهیدروژناز، کاتالاز و ...) که نوعاً منعکس‌کننده فعالیت میکروبی عمومی در خاک هستند (گارسیا و همکاران، 1997)، درحالی‌که دیگر آنزیم‌ها نشان‌دهنده فعالیت برون سلولی در خاک هستند (مانند فسفاتاز، اوره‌آز و ...). آنزیم‌های برون سلولی خاک نقش حیاتی در تجزیه مواد آلی، تنظیم ذخیره کربن و فراهم کردن مواد غذایی برای جمعیت‌های زیرزمینی و روزمینی ایفا می‌کنند (برگ، 2000؛ برنز و دیک، 2002). از جمله آنزیم‌های برون سلولی می‌توان به اوره‌آز، آلکالین فسفاتاز، اینورتاز و آریل‌سولفاتاز اشاره کرد. آنزیم اوره‌آز نقش مهمی را در هیدرولیز اوره به دی‌اکسیدکربن و آمونیاک بر عهده دارد (طباطبایی، 1994). پژوهشگران نشان داده‌اند که فعالیت اوره‌آز به جمعیت میکروبی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک وابسته است (کورتانج و همکاران، 2007). اینورتاز آنزیمی است که هیدرولیز ساکاروز را تسریع می‌بخشد. اوره‌آز و اینورتاز در قالب آنزیم‌های هیدرولیتیک، نقش کلیدی در چرخه کربن و نیتروژن در خاک‌ها ایفا می‌کنند، به‌طوری‌که فعالیت این آنزیم‌ها می‌تواند شاخص بالقوه‌ای به‌منظور برآورد تغییرات طولانی مدت در منابع کربن و نیتروژن آلی فراهم کند (جین و همکاران، 2009). آنزیم‌های فسفاتاز با تسریع هیدرولیز پیوندهای استر-فسفات، سبب آزاد شدن فسفات در خاک شده که می‌تواند توسط گیاهان یا میکروارگانیسم‌ها جذب شود (کوکواپوکس و موساین، 2005). این آنزیم‌ها به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر pH خاک قرار دارند که بدون توجه به محتوای ماده آلی یا میزان اختلال و دست‌کاری در خاک، سطح در دسترس بودن فسفر را کنترل می‌کنند (آکوستامارتینز و همکاران، 2003). آنزیم‌های آریل سولفاتاز به‌طور گسترده‌ای در طبیعت و به همین صورت در خاک موجود بوده و مسئول هیدرولیز استرهای سولفاته در خاک هستند. مطالعه فعالیت این آنزیم به شناسایی و بررسی روند معدنی‌شدن گوگرد در خاک‌ها کمک می‌کند (آکوستامارتینز و همکاران، 2003). آریل‌سولفاتاز معمولاً کمترین سطوح فعالیت را در خاک‌ها دارد (طباطبایی، 1994).

فعالیت آنزیمی و بیوماس میکروبی ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند زیرا تبدیل عناصر آلی مهم از طریق میکروارگانیسم‌ها صورت می‌گیرد (آجوا و همکاران، 1999). تنفس میکروبی خاک اساساً فرآیندی سلولی بوده و واکنش‌های بیوشیمیایی بسیاری را در بر می‌گیرد. این فرآیند علاوه بر اینکه شاخصی از وضعیت و فعالیت میکروب‌های خاک است، بیان‌گر روند و چگونگی تجزیه مواد آلی، فعالیت آنزیمی و چرخه برخی از عناصر غذایی خاک می‌باشد (لو و ژو، 2006). تحقیق و بررسی بر روی آنزیم‌ها اطلاعات کمّی در رابطه با تنوع عملکردی فعالیت‌های میکروبی خاک، فرآیندهای شیمیایی خاک، نرخ معدنی شدن، و تجمع ماده آلی به دست می‌دهد (اوداواتا و همکاران، 2009). افزایش فعالیت آنزیمی در خاک با عملکرد میکروبی خاک تناسب دارد (کالدول، 2005). هم‌چنین از آنجا که فعالیت آنزیمی با فرآیندهای

اکوسیستمی مختلفی شامل تشکیل خاک، تبدیل مواد آلی و فعالیت‌های زیست پالایی در ارتباط است، یافتن عوامل فیزیکوشیمیایی متفاوت اثرگذار بر فعالیت‌های آنزیمی دارای اهمیت ویژه‌ای است (کوجور و همکاران، 2012). بر این اساس، مطالعه حاضر بر آن است تا با بررسی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی همراه با ویژگی‌های بیوشیمیایی دو نوع خاک هیستوسول در دو منطقه مطالعاتی واقع در استان چهارمحال و بختیاری و استان کرمان، ارتباط بین عوامل مورد مطالعه و فعالیت آنزیمی این خاک‌ها را مورد ارزیابی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

تشریح مناطق مورد مطالعه

این تحقیق در دو منطقه دشت لاله‌زار واقع در استان کرمان، با مختصات جغرافیایی 29 درجه و 10 دقیقه و 52/3 ثانیه عرض شمالی و 56 درجه و 46 دقیقه و 55 ثانیه طول شرقی، در 75 کیلومتری جنوب شرق شهر بردسیر و ارتفاع حدود 2680 متر از سطح دریا دارای اقلیم معتدل کوهستانی، و منطقه واقع در استان چهارمحال و بختیاری در چهار کیلومتری جنوب غربی شهرکرد مجاور فرودگاه با مختصات جغرافیایی 32 درجه و 16 دقیقه عرض شمالی و 50 درجه و 49 دقیقه طول شرقی و ارتفاع حدود 2070 متر از سطح دریا دارای اقلیم نیمه خشک انجام شد. در هر منطقه سه نیمرخ خاک حفر و از شش عمق با فواصل مساوی 20 سانتی‌متری و از هر عمق، شش نمونه جمع‌آوری شد. خاک‌های منطقه دشت لاله‌زار کرمان دارای رژیم حرارتی مزیک و رژیم رطوبتی زریک و خاک‌های منطقه پشت فرودگاه شهرکرد دارای رژیم حرارتی مزیک و رژیم رطوبتی آکوئیک بوده و هر دو به‌عنوان خاک‌های هیستوسول طبقه‌بندی شدند (فائو/یونسکو، 2012).

مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌های جمع‌آوری شده از مناطق مورد مطالعه به‌منظور انجام آزمایش‌های شیمیایی و بیولوژیکی شامل کربن آلی به روش اکسیداسیون تر با دی‌کرومات پتاسیم (والکی و بلک، 1934)، نیتروژن کل به روش کجلدال (برمنر، 1965)، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق و آب داغ 85 درجه سانتی‌گراد به روش شرح داده شده توسط دوبایز و همکاران (1956)، فسفر به‌روش اولسن (اولسن و سامرز، 1982)، بیوماس میکروبی کربن به روش تدخین با کلروفرم (جنکینسون و لاد، 1981) و تنفس میکروبی خاک طی 270 روز انکوباسیون (اندرسون، 1982) مورد استفاده قرار گرفت. فعالیت آنزیم اوره‌آز به روش شرح داده شده توسط طباطبایی و برمنر (1972)، فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز به روش شرح داده شده توسط عیوضی و طباطبایی (1977)، فعالیت آنزیم اینورتاز به روش شرح داده شده توسط اسچینر و وُن‌مرسی (1990) و فعالیت آنزیم آریل‌سولفاتاز به روش شرح داده شده توسط طباطبایی و برمنر (1970) تعیین شد.

آنالیز داده‌ها

به منظور بررسی رابطه بین میزان فعالیت آنزیم‌ها با ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی مورد مطالعه، ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مورد مطالعه در خاک محاسبه شد. به منظور بررسی نقش توأم ویژگی‌های مورد مطالعه بر میزان فعالیت آنزیم‌ها، آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی گام به گام مورد استفاده قرار گرفت. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه 16 انجام شد.

نتایج و بحث

رده‌بندی خاک‌های مورد مطالعه

خاک‌های منطقه دشت لاله‌زار استان کرمان کلیه خصوصیات هیستوسول را دارند. این خاک‌ها برای حداقل 30 روز تجمعی در سال از آب اشباع بوده و به‌دلیل وجود افق هیستیک در سطح خاک که مواد آلی آن با درجه پوسیدگی متوسط است در تحت رده همیست قرار می‌گیرند. در این خاک‌ها در دو افق 40 تا 60 و 60 تا 80 سانتی‌متری از سطح خاک کاهش ناگهانی و بیش از اندازه واکنش خاک مشاهده گردید. تجمعات زرد رنگ کانی جاروسایت در زمینه خاک مشاهده شد. کانی جاروسایت در طی فرآیند سولفیدی شدن کانی پیریت تشکیل می‌گردد. در طی سال‌های اخیر با کاهش رطوبت و برقراری شرایط اکسایش موضعی که در عمق این خاک‌ها فراهم شده، کانی پیریت اکسایش یافته و باعث کاهش واکنش خاک از طریق تولید اسید سولفوریک در این خاک‌ها شده است. بر این اساس خاک‌های این منطقه در گروه بزرگ سولفی‌همیست و به‌دلیل وجود لایه‌ای با مشخصات فوق که دارای 30 سانتی‌متر ضخامت بوده و در بخش مقطع کنترل قرار دارد در تحت گروه تریک‌سولفی‌همیست رده‌بندی شدند. ساختمان خاک به‌صورت دانه‌ای درشت با درجه متوسط بوده که به‌راحتی به خاکدانه‌های دانه‌ای ریز شکسته می‌شود. ریشه‌ها در سرتاسر افق‌های بالایی به‌صورت ریز با فراوانی متوسط یافت می‌شوند. رنگ حالت‌های خشک و مرطوب نمونه‌های خاک به‌ترتیب به‌صورت 5YR4/3 و 5YR3/1 مشاهده شد.

در خاک‌های منطقه پشت فرودگاه شهرکرد به دلیل شرایط احیایی حاکم در گذشته، اکسیژن کمی برای اکسیداسیون و تجزیه مواد آلی حاصل از گیاهان با ریشه‌های متراکم وجود داشته، که این شرایط منجربه انباشته شدن مواد آلی در سطح این خاک‌ها و تشکیل افق آلی ضخیم شده است. این افق‌های آلی به دلیل درجه تخریب کم، حاوی مواد فیبریکی هستند. به‌دلیل وجود اپی‌پدون هیستیک با درجه تجزیه و تخریب کم (فیبر خیلی زیاد) و کلیه خصوصیات هیستوسول، خاک‌های این قسمت از اراضی در رده هیستوسول و تحت رده فیبریست رده‌بندی شدند. ساختمان خاک در لایه‌های سطحی خاک دانه‌ای درشت با درجه متوسط بوده که به خاکدانه‌های دانه‌ای ریز شکسته می‌شوند. در لایه‌های عمقی، ساختمان خاک از نوع مکعبی گوشه‌دار متوسط و درجه وضوح متوسط تا ضعیف مشخص گردید. ریشه‌ها در سرتاسر افق‌های بالایی به‌صورت درشت و خیلی درشت و فراوان یافت شدند. رنگ خاک در نمونه‌های خشک و مرطوب به‌ترتیب 5YR4/2 (خاکستری مایل به قرمز تیره) و 5YR2.5/1 (خاکستری خیلی تیره مایل به سیاه) مشاهده شد. به‌دلیل عدم وجود رژیم حرارتی کرائیک و نیز مواد خزه‌های اسفاگنوم در بیش از 75 درصد حجم افق، در گروه بزرگ هاپلوفیبریست رده‌بندی و تحت گروه تیپیک هاپلوفیبریست قرار گرفته است.

بررسی ارتباط بین ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی با میزان فعالیت آنزیم‌ها با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون

مقادیر مربوط به ویژگی‌های شیمیایی، بیوشیمیایی و بیولوژیکی مورد مطالعه مربوط به دو نوع خاک مورد مطالعه در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1- مقادیر مربوط به ویژگی‌های شیمیایی، بیوشیمیایی و بیولوژیکی مورد مطالعه مربوط به دو نوع خاک

عمق (cm)	شهرکرد			کرمان		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
UA (µgNH_4/g2h)	132/00	355/00	222/00	98/00	281/00	186/00
ALP (mgPNP/gh)	601/00	1021/00	794/08	621/00	831/00	737/08
INV (µgGlocose/g24h)	109/00	234/00	172/67	91/00	205/00	147/56
ARS (µgPNS/gh)	75/00	160/00	107/58	50/00	141/00	94/75
OC (درصد)	8/84	18/33	14/38	7/20	20/74	12/15
TN (درصد)	0/26	1/25	0/70	0/33	1/34	0/68
P (mg/kg)	64/58	145/21	121/30	30/68	171/77	103/51
HWE (mg/kg)	1/40	39/88	15/10	4/08	27/65	17/46
DAE (mg/kg)	1/39	32/68	18/89	10/58	48/37	29/22
RE (mg/100gr)	803/37	1343/37	1052/37	1104/12	1680/12	1348/50
BMC (mg/100gr)	157/56	227/56	183/80	122/11	283/56	182/39

UA: اوره‌آز، ALP: آلکالین فسفاتاز، INV: اینورتاز، ARS: آریل‌سولفاتاز، OC: کربن آلی، TN: نیتروژن کل، P: فسفر، HWE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ، DAE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق، RE: تنفس میکروبی، BMC: بیوماس میکروبی کربن

با هدف بررسی میزان تأثیر آنزیم‌های مختلف و دیگر خصوصیات مورد مطالعه، ضرایب همبستگی پیرسون محاسبه شده بین خصوصیات شیمیایی، بیوشیمیایی و بیولوژیکی مورد مطالعه در این پژوهش برای دو نوع خاک مورد مطالعه در جداول 2 و 3 آورده شده است. در بررسی ارتباط بین میزان فعالیت آنزیم‌های مختلف با ویژگی‌های خاک مشاهده شد که در هر دو نوع خاک کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ 85 درجه سانتی‌گراد و اسید رقیق همبستگی نسبتاً بالا و معنی‌داری را با میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز نشان دادند. در تحقیقات متعددی، ارتباط ویژگی‌های ذکر شده بر فعالیت آنزیم‌ها مورد ارزیابی و بحث قرار گرفته‌اند. آنزیم اوره‌آز در خاک به‌دلیل نقش آن در هیدرولیز اوره که منجر به تجزیه سریع نیتروژن به سمت اتمسفر از طریق تصعید آمونیاک می‌گردد، در این زمینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در بررسی‌های انجام شده توسط زنگ و همکاران (2009) میزان رطوبت، کربن آلی خاک، نیتروژن کل و فسفر از عوامل تأثیرگذار

بر فعالیت آنزیم اوره‌آز ذکر شده‌اند. همچنین در مطالعه‌ای بر روی 26 نمونه از خاک‌های سطحی (عمق 0 تا 25 سانتی‌متری) ناحیه باتیناه عمان که توسط کوکسون و لپیس (1996) انجام شد، مشابه با نتایج به دست آمده در این مطالعه، ارتباط معنی‌داری بین مقدار کربن آلی خاک و میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز مشاهده شد. در خاک‌های هیستوسول مواد آلی زیاد است. وجود مقادیر بالای کربن آلی، نیتروژن و فسفر در خاک علاوه بر فراهم نمودن امکان فعالیت میکروب‌ها در خاک، جذب مولکول‌های آنزیم را بر روی سطوح کلوئیدهای آلی فراهم کرده و سبب ادامه فعالیت مولکول‌های آنزیم خصوصاً آنزیم اوره‌آز به صورت برون‌سلولی می‌گردد و علاوه بر آن فعالیت‌های آنزیمی را بالا می‌برد. در خاک‌های مورد مطالعه مواد آلی شامل کربن، کربوهیدرات، قسمت اعظم نیتروژن و قسمت اعظم فسفر می‌باشد. از طرفی حضور مولکول‌های آنزیم روی سطح کلوئیدهای آلی سبب تثبیت و حفاظت از آنزیم‌ها در برابر صدمات ناشی از عوامل مختلف می‌گردد.

جدول 2- ضرایب همبستگی پیرسون بین کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات، بیوماس میکروبی، تنفس میکروبی و میزان فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، آلکالین فسفاتاز، اینورتاز و آریل‌سولفاتاز برای خاک شهرکرد

خصوصیت	OC	TN	P	HWE	DAE	UA	ALP	INV	ARS	RE	BMC
OC	1										
TN	0/94**	1									
P	0/89**	0/78**	1								
HWE	0/77**	0/91**	0/64**	1							
DAE	0/94**	0/93**	0/94**	0/86**	1						
UA	0/88**	0/97**	0/77**	0/96**	0/94**	1					
ALP	0/86**	0/93**	0/80**	0/96**	0/95**	0/98**	1				
INV	0/97**	0/96**	0/85**	0/86**	0/94**	0/92**	0/92**	1			
ARS	0/86**	0/95**	0/77**	0/95**	0/94**	0/98**	0/97**	0/92**	1		
RE	0/90**	0/96**	0/84**	0/92**	0/98**	0/98**	0/97**	0/94**	0/99**	1	
BMC	0/80**	0/92**	0/66**	0/98**	0/87**	0/96**	0/95**	0/87**	0/95**	0/94**	1

OC: کربن آلی، TN: نیتروژن کل، P: فسفر، HWE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ، DAE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق، UA: اوره‌آز، ALP: آلکالین فسفاتاز، INV: اینورتاز، ARS: آریل‌سولفاتاز، RE: تنفس میکروبی، BMC: بیوماس میکروبی کربن

** معنی‌دار در سطح یک درصد آماری

جدول 3- ضرایب همبستگی پیرسون بین کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات، بیوماس میکروبی، تنفس میکروبی و میزان فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، آلکالین فسفاتاز، اینورتاز و آریل‌سولفاتاز برای خاک کرمان

خصوصیت	OC	TN	P	HWE	DAE	UA	ALP	INV	ARS	RE	BMC
OC	1										
TN	0/99**	1									
P	0/81**	0/83**	1								
HWE	0/85**	0/86**	0/95**	1							
DAE	0/90**	0/92**	0/97**	0/97**	1						
UA	0/93**	0/92**	0/88**	0/96**	0/94**	1					
ALP	0/88**	0/88**	0/90**	0/98**	0/95**	0/98**	1				
INV	0/94**	0/92**	0/88**	0/95**	0/94**	0/99**	0/98**	1			
ARS	0/90**	0/91**	0/94**	0/98**	0/97**	0/98**	0/98**	0/98**	1		
RE	0/98**	0/97**	0/88**	0/93**	0/95**	0/98**	0/96**	0/98**	0/97**	1	
BMC	0/97**	0/98**	0/88**	0/90**	0/96**	0/92**	0/89**	0/92**	0/94**	0/97**	1

OC: کربن آلی، TN: نیتروژن کل، P: فسفر، HWE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ، DAE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق، UA: اوره‌آز، ALP: آلکالین فسفاتاز، INV: اینورتاز، ARS: آریل‌سولفاتاز، RE: تنفس میکروبی، BMC: بیوماس میکروبی کربن

** معنی‌دار در سطح یک درصد آماری

نتایج نشان داد که بین آنزیم اینورتاز و کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ 85 درجه سانتی‌گراد و اسید رقیق در هر دو نوع خاک مورد مطالعه ارتباط معنی‌داری برقرار بود. همراستا با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، زنگ و همکاران (2009) به اثرات مثبت کربن آلی، نیتروژنَ کل و فسفر کل بر فعالیت این آنزیم اشاره کرده‌اند. برخی پژوهشگران نیز در بررسی ارتباط این آنزیم با ویژگی‌های مختلف خاک، به نتایج متفاوتی رسیده‌اند. شی و همکاران (2008) با انجام تحلیل‌های همبستگی بین خصوصیات مختلف خاک و میزان فعالیت آنزیم اینورتاز مشاهده کردند که فعالیت این آنزیم با مقدار کربن آلی خاک همبستگی مثبت معنی‌دار داشت، درحالی‌که با هیچ‌یک از دیگر خصوصیات مورد بررسی از جمله نیتروژن کل، فسفر و هدایت الکتریکی همبستگی معنی‌داری از خود نشان نداد. آن‌ها در بررسی رابطه بین میزان فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اینورتاز، اسید فسفاتاز و کاتالاز به‌طور کلی به این نتیجه رسیدند که عوامل اصلی تأثیرگذار بر فعالیت آنزیم‌های خاک کربن آلی، واکنش خاک و هدایت الکتریکی است.

وانگ و همکاران (2003) در مطالعه خود بر روی فعالیت سه آنزیم اوره‌آز، اینورتاز و کاتالاز دریافتند که حساسیت این سه آنزیم نسبت به فشارهای محیطی از بیش‌ترین به کم‌ترین به ترتیب اوره‌آز، اینورتاز و کاتالاز است. آن‌ها اظهار کردند که از آن‌جا که آنزیم اوره‌آز بیش‌تر در معرض شرایط محیطی قرار داشته و به ویژگی‌های شیمیایی خاک وابسته است، فعالیت این آنزیم را می‌توان به عنوان شاخص احیای زمین‌های بایر مورد استفاده قرار داد. همبستگی مثبت بین آنزیم اینورتاز و فسفر در پژوهش حاضر، اینگونه تداعی می‌کند که با توجه به اینکه آنزیم اینورتاز مسئول تبدیل ساکاروز به گلوکوز و فروکتوز می‌باشد، این واکنش نیاز به ATP دارد و فسفر می‌تواند در تأمین ATP برای واکنش مؤثر باشد. بررسی ضرایب همبستگی پیرسون در جداول 2 و 3 نشان داد که در هر دو نوع خاک مورد مطالعه در این پژوهش، میزان فعالیت آنزیم‌های آلکالین فسفاتاز و آریل‌سولفاتاز به‌طور مثبت و معنی‌داری با کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ 85 درجه سانتی‌گراد و اسید رقیق ارتباط مثبت و معنی‌دار داشت.

ارتباط مثبت بین فعالیت آنزیم آریل‌سولفاتاز و ماده آلی خاک نشان می‌دهد که ماده آلی نقش تعیین کننده‌ای بر میزان فعالیت این آنزیم ایفا می‌کند. با توجه به این رابطه مثبت و این حقیقت که خاک‌های هیستوسول مورد مطالعه غنی از ماده آلی هستند، ما را به این نکته رهنمون می‌سازد که احتمالاً این آنزیم به شکل ترکیب هیومیک-پروتئین در خاک موجود است که مانع از تجزیه میکروبی آن می‌گردد. به‌دلیل اهمیت آنزیم فسفاتاز در تغذیه گیاهان، این آنزیم بسیار مورد توجه قرار گرفته است. وجود مقادیر زیاد ترکیبات آلی در خاک سبب افزایش مقدار ترکیبات استری فسفات شده و در نتیجه باعث القای تولید آنزیم آلکالین فسفاتاز در خاک می‌گردد (طباطبایی، 2003). می‌بایست در نظر داشت که ماده آلی خاک، بخش اعظمی از بستر مورد نیاز آنزیم آلکالین فسفاتاز را دارا می‌باشد. نتایج تحقیقات آکوستامارتینز و همکاران (2003) نشان داد که فعالیت آنزیم‌های آلکالین فسفاتاز، اسید فسفاتاز و آریل‌سولفاتاز رابطه مثبت و معنی‌داری با کربن آلی داشت که مؤید نتایج به‌دست آمده در این پژوهش است. ایشان هم‌چنین رابطه مثبتی بین فعالیت آنزیم‌های ذکر شده و نیتروژن کل مشاهده کردند، اما این ارتباط معنی‌دار نبود که علت آن را به کم‌تر بودن سطح ماده آلی خاک‌های نیمه‌خشک مورد مطالعه نسبت دادند. در مطالعات انجام شده توسط ترنر و هایگارث (2005) بر روی خاک‌های مراتع معتدل انگلیس و ولز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز و نیتروژن کل خاک مشاهده شد.

همراستا با نتایج ما، سلام و همکاران (1999) در مطالعات خود بر روی خاک‌های سطحی چهار اکوسیستم با کاربری‌های متفاوت گزارش کردند که میزان فعالیت آنزیم‌های آلکالین فسفاتاز، اسید فسفاتاز و اوره‌آز به‌صورت معنی‌داری با مقدار کربن آلی و نیتروژن کل خاک در ارتباط است. این مطالب نشان‌دهنده اهمیت این ویژگی‌ها در حفظ و نگهداری فعالیت آنزیمی خاک است. توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق و گزارشات ارائه شده توسط محققان مختلف بر ما آشکار می‌سازد که عموماً فعالیت‌های آنزیمی با مقدار کربن آلی خاک همبستگی دارند. همبستگی قوی این آنزیم‌ها با کربن آلی خاک نشان‌دهنده آن است که هر چهار آنزیم دارای تمایل قوی برای برقراری پیوند با بخش آلی خاک می‌باشند. در این میان، وانگ و همکاران (2013) دلیل این همبستگی انکارناپذیر را نقش کلیدی کربن آلی به عنوان پیش ماده برای سنتز آنزیمی عنوان کردند.

به‌طور کلی در تمامی مطالعات فوق بر نقش کلیدی کربن آلی خاک در حفظ فعالیت آنزیمی خاک تأکید شده تا آنجا که سطح فعالیت آنزیم‌ها در خاک به‌دلیل حساسیتی که به تخریب مواد آلی از خود نشان می‌دهند به عنوان شاخص‌های سنجش کیفیت خاک پیشنهاد گردیده‌اند (مونریل و برگستروم، 2000). با توجه به اینکه

خاک‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر هیستوسول هستند و از سطح مواد آلی بالایی برخوردارند، این مواد آلی به شکل کلوئیدهای آلی نیز هستند. این سطوح کلوئیدی آلی به دلیل فعالیت کلوئیدی و الکترواستاتیکی قوی، سبب جذب بیشتر مولکول‌های آنزیم بر روی سطح خود شده و فعالیت‌های آنزیمی را بالا می‌برد. در چنین وضعیتی بین فعالیت‌های آنزیمی و کربن آلی همبستگی بالایی برقرار است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جداول 2 و 3 برای خاک‌های مورد مطالعه در شهرکرد و کرمان مشاهده شد که میزان فعالیت هر چهار آنزیم مورد مطالعه، با تنفس خاک و بیوماس میکروبی خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند. ارتباط میزان فعالیت آنزیم‌ها با بیوماس میکروبی نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم‌ها با میکروارگانیسم‌های فعال موجود در خاک که منبع اصلی آنزیم‌های خاک هستند، در ارتباطند. مشابه با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، والدراپ و همکاران (2000) در مطالعات خود به‌طور عمومی شاهد همبستگی معنی‌دار فعالیت چند آنزیم از جمله فسفاتاز با بیوماس میکروبی کربن بودند. دودور و طباطبایی (2003) در برخی از سایت‌های تحقیقاتی خود مشاهده کردند که بین آلکالین فسفاتاز با بیوماس میکروبی کربن ارتباط معنی‌داری برقرار است. علاوه بر بیوماس میکروبی، تنفس میکروبی خاک نیز از جایگاه ویژه‌ای در ارتباط با میزان فعالیت آنزیم‌ها برخوردار است. این ارتباط به حدی بوده است که بونمان و همکاران (2006) تنفس میکروبی را یک معیار مستقیم برای برآورد فعالیت میکروبی خاک عنوان کرده‌اند.

در جداول 2 و 3، علاوه بر ضرایب همبستگی برخی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی با میزان فعالیت آنزیم‌ها، ضرایب همبستگی این ویژگی‌ها در ارتباط با یکدیگر نیز در خاک‌های مورد مطالعه نشان داده شده است که اطلاعات مفیدی درباره دینامیک این ویژگی‌ها در این دو نوع خاک ارائه می‌دهد. در هر دو نوع خاک، تنفس و بیوماس میکروبی همبستگی مثبت و بالایی با کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و کربوهیدرات از خود نشان دادند. نقش مثبت فسفر به تنفس خاک را می‌توان به نقش تغذیه‌ای این عنصر برای میکروارگانیسم‌های خاک و افزایش جمعیت آن‌ها نسبت داد (ایل‌استد و همکاران، 2003؛ اهلرس و همکاران، 2010). بطوری‌که شواهد بسیاری وجود دارد که نشان می‌دهد تنفس میکروبی خاک شدیداً تحت تأثیر کربن و فسفر موجود در خاک قرار دارد (ایل‌استد و همکاران، 2006؛ فریرا و همکاران، 2008). ارتباط بین بیوماس و تنفس میکروبی با یکدیگر مثبت و معنی‌دار بود. هم‌چنین بین کربن آلی و نیتروژن کل نیز با یکدیگر رابطه قوی مثبت و معنی‌داری برقرار بود. علاوه بر آن شاهد رابطه همبستگی مثبت بین کربن آلی با فسفر و کربوهیدرات خاک بوده‌ایم. مطابق با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، شارما و همکاران (2010) به همبستگی بالایی بین تنفس خاک و بیوماس میکروبی خاک با ماده آلی رسیدند. براساس نتایج کوجور و همکاران (2012)، تغییر در مقدار کربن آلی با ملاحظه انواع خاک‌های مختلف، همبستگی مثبت و معنی‌داری با نیتروژن کل و فسفر از خود نشان داد. محققان مختلفی نیز همبستگی‌های بین کربن آلی و نیتروژن کل را در مناطق با آب و هوای مرطوب و معتدل گزارش کرده‌اند (آکوستامارتینز و همکاران، 2003). وانگ و همکاران (2013) نیز وجود ارتباط قوی و معنی‌دار بین تنفس خاک با بیوماس میکروبی کربن را مشاهده کردند.

بررسی ضرایب همبستگی پیرسون آشکار ساخت که به‌طورکلی در هر دو نوع خاک، بین فعالیت آنزیم‌های مختلف با یکدیگر همبستگی‌های معنی‌دار تا حد 99 درصد (در سطح یک درصد آماری) برقرار بود. آکوستامارتینز و همکاران (2003) نیز در تحقیقات خود روی آنزیم‌های مختلف مقادیر همبستگی متقابل تا 98 درصد (در سطح یک درصد آماری) بین میزان فعالیت آنزیم‌ها گزارش کردند. این همبستگی بین میزان فعالیت آنزیم‌های مختلف مورد مطالعه با یکدیگر نشان می‌دهد که آنزیم‌ها به‌صورت تقریباً مشابهی نسبت به سیستم‌های محیطی و نوع خاک پاسخ می‌دهند.

بررسی نقش توأم ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی با میزان فعالیت آنزیم‌ها با استفاده از رگرسیون چند متغیره

بررسی ضرایب همبستگی هر یک از ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی در ارتباط با میزان فعالیت آنزیم‌ها در خاک‌های مورد مطالعه به تنهایی اطلاعات مفید و با ارزشی درباره نقش این ویژگی‌ها بر میزان فعالیت آنزیمی خاک به ما ارائه داد، با این حال نمی‌توان تنها بر بررسی نقش این ویژگی‌ها به‌صورت مستقل بسنده کرد و به‌دلیل وجود اثرات متقابل بین ویژگی‌های مختلف، رسیدن به نتایج متفاوتی در رابطه با نقش توأم این ویژگی‌ها دور از انتظار نیست. به همین منظور، رگرسیون خطی چند متغیره گام به گام برای نیل به این هدف و تعیین مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر میزان فعالیت آنزیمی خاک در هر دو نوع خاک مورد استفاده قرار گرفت. جداول 4 و 5 رابطه رگرسیونی به‌دست آمده از شرکت دادن هر هفت ویژگی مورد مطالعه بر فعالیت آنزیم‌ها به همراه ضریب همبستگی کلی هر

معادله را به ترتیب در دو نوع خاک مورد مطالعه در شهرکرد و کرمان نشان می‌دهد. هم‌چنین ضرایب همبستگی هر متغیر در روابط رگرسیونی چند متغیره که بیان‌گر اهمیت نسبی آن ویژگی در معادله مربوطه است، برای خاک شهرکرد در جدول 6 و برای خاک کرمان در جدول 7 آورده شده است. بررسی نتایج حاصل از رگرسیون چند متغیره برای آنزیم اوره‌آز نشان می‌دهد که به ترتیب اهمیت، در خاک شهرکرد کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ، تنفس میکروبی و نیتروژن هر سه با اثر مثبت، و در خاک مورد مطالعه واقع در استان کرمان تنفس میکروبی با اثر مثبت، بیوماس میکروبی با اثر منفی و کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق با اثر مثبت، به عنوان مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر افزایش یا کاهش میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز به‌دست آمدند. بنابراین برای میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز یک مدل سه متغیره خطی معنی‌دار برای هر نوع خاک به‌دست آمده است به‌طوری‌که با استفاده از آن‌ها و تنها به کمک ویژگی‌های ذکر شده، برای خاک شهرکرد بتوان 97 درصد از تغییرات و برای خاک منطقه واقع در استان کرمان بتوان 98 درصد از تغییرات در میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز را توصیف کرد. شی و همکاران (2008) در بررسی اثرات توأم ویژگی‌های مختلف خاک بر میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز مشاهده کردند که میزان فعالیت این آنزیم همبستگی مثبت و معنی‌داری با نیتروژن کل خاک داشت که با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش برای خاک شهرکرد همراستا است، با این حال، برخلاف نتایج ارائه شده در این مطالعه، در معادله به‌دست آمده توسط ایشان کربن آلی خاک نیز نقش داشت.

جدول 4- آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی بین فعالیت آنزیم‌های مورد مطالعه و کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ و اسید رقیق، تنفس میکروبی و بیوماس میکروبی کربن برای خاک شهرکرد

رابطه رگرسیونی	ضریب همبستگی
UA = 57/480 (TN) + 1/581 (HWE) + 0/162 (RE) –12/494	0/97**
INV = 9/708 (OC) + 0/744 (HWE) + 21/840	0/98**
ALP = 1/736 (P) + 9/043 (HWE) - 0/002 (BMC) + 759/246	0/99**
ARS = - 0/214 (P) + 0/185 (RE) –61/375	0/99**

OC: کربن آلی، TN: نیتروژن کل، P: فسفر، HWE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ، RE: تنفس میکروبی، BMC: بیوماس میکروبی کربن، UA: اوره‌آز، INV: اینورتاز، ALP: آلکالین فسفاتاز، ARS: آریل‌سولفاتاز

** معنی‌دار در سطح 1 درصد آماری

جدول 5- آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی بین فعالیت آنزیم‌های مورد مطالعه و کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ و اسید رقیق، تنفس میکروبی و بیوماس میکروبی کربن برای خاک کرمان

رابطه رگرسیونی	ضریب همبستگی
UA = 1/433 (DAE) + 0/470 (RE) - 0/0010 (BMC) –311/463	0/98**
INV = 2/455 (OC) + 1/564 (HWE) + 0/197 (RE) - 0/0005 (BMC) - 86/245	0/99**
ALP = 5/185 (HWE) + 0/322 (RE) - 0/0007 (BMC) + 341/267	0/97**
ARS = - 50/969 (TN) + 0/202 (P) + 0/195 (RE) –154/441	0/99**

OC: کربن آلی، TN: نیتروژن کل، P: فسفر، HWE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ، DAE: کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق، RE: تنفس میکروبی، BMC: بیوماس میکروبی کربن، UA: اوره‌آز، INV: اینورتاز، ALP: آلکالین فسفاتاز، ARS: آریل‌سولفاتاز

** معنی‌دار در سطح 1 درصد آماری

جدول 6- ضرایب همبستگی نسبی کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ و اسید رقیق، تنفس میکروبی و بیوماس میکروبی کربن با فعالیت آنزیم‌های مورد مطالعه برای خاک شهرکرد

آنزیم	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر	کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ	کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق	تنفس میکروبی	بیوماس میکروبی کربن
اوره‌آز	-	0/54*	-	0/71**	-	0/60*	-
اینورتاز	0/94**	-	-	0/71**	-	-	-
آلکالین فسفاتاز	-	-	0/94**	0/92**	-	-	-0/55*
آریل‌سولفاتاز	-	-	-0/68**	-	-	0/98**	-

** معنی‌دار در سطح 1 درصد آماری، * معنی‌دار در سطح 5 درصد آماری

جدول 7- ضرایب همبستگی نسبی کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ و اسید رقیق، تنفس میکروبی و بیوماس میکروبی کربن با فعالیت آنزیم‌های مورد مطالعه برای خاک کرمان

آنزیم	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر	کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ	کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق	تنفس میکروبی	بیوماس میکروبی کربن
اوره‌آز	-	-	-	-	0/75**	0/97**	-0/92**
اینورتاز	0/56*	-	-	0/81**	-	0/86**	-0/92**
آلکالین فسفاتاز	-	-	-	0/91**	-	0/85**	-0/78**
آریل‌سولفاتاز	-	-0/82**	0/87**	-	-	0/94**	-

** معنی‌دار در سطح 1 درصد آماری، * معنی‌دار در سطح 5 درصد آماری

نتایج به‌دست آمده برای رگرسیون چند متغیره خطی به‌منظور تقریب میزان فعالیت آنزیم اینورتاز در خاک شهرکرد معادله‌ای را به ما ارائه کرد که در آن تنها با استفاده از دو خصوصیت (به ترتیب اهمیت) کربن آلی و کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ (هر دو با اثر مثبت) بتوان تا 98 درصد از تغییرات در میزان فعالیت آنزیم اینورتاز را در این نوع خاک توصیف کرد. در خاک مورد مطالعه واقع در استان کرمان، میزان فعالیت آنزیم اینورتاز به ترتیب اهمیت با استفاده از چهار ویژگی بیوماس میکروبی کربن (اثر منفی)، تنفس میکروبی (اثر مثبت)، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ (اثر مثبت) و کربن آلی (اثر مثبت) توصیف شد به‌طوری‌که با استفاده از این چهار ویژگی می‌توان تا 99 درصد از تغییرات این آنزیم را در خاک توصیف کرد. پژوهشگران مختلفی اثر ویژگی‌های مختلف خاک در ارتباط با یکدیگر را بر میزان فعالیت این آنزیم مورد بررسی قرار داده‌اند. تحلیل رگرسیون گام به گام انجام شده توسط شی و همکاران (2008) نشان داد که میزان فعالیت آنزیم اینورتاز تنها با کربن آلی خاک همبستگی مثبت و معنی‌دار از خود نشان داد که این نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم اینورتاز توسط کربن آلی خاک افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نیز کربن آلی را در هر دو نوع خاک مورد مطالعه به عنوان فاکتور دارای نقش مثبت و اثرگذار بر میزان فعالیت آنزیم اینورتاز معرفی می‌کند، با این حال در تقابل با نتایج شی و همکاران (2008)، در معادلات به‌دست آمده در مطالعه حاضر نیتروژن کل از معادلات رگرسیونی چند متغیره کنار گذاشته شده است. در این میان، تحلیل رگرسیون چند متغیره گام به گام توسط کوجور و همکاران (2012) نشان داد که فعالیت آنزیم اینورتاز به‌صورت عمده توسط کربن آلی (حدود 92/1 درصد از تغییرات) و در مرتبه بعدی توسط نیتروژن کل (حدود 6/8 درصد از تغییرات) بیان می‌گردد.

مدل رگرسیون گام به گام برای آنزیم آلکالین فسفاتاز نشان داد که در خاک شهرکرد، از نظر کمّی مقدار فعالیت این آنزیم توسط فسفر و کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ تشدید می‌شود، ولی بیوماس میکروبی کربن اثر بازدارنده را برای آن ایفا می‌کند. با توجه به اینکه خاک‌های مورد مطالعه هیستوسول بوده و عناصر موجود در آن مثل فسفر بیشتر به فرم آلی موجود هستند، رابطه مثبت بین فعالیت این آنزیم و فسفر می‌تواند ناشی از این امر باشد که تولیدات حاصل از تخریب میکروبی می‌تواند منجر به واجذبی فسفر جذب سطحی شده گشته و منجر- به تجمع فسفر آلی در خاک گردد. البته در مورد رابطه بین فسفر قابل استخراج به روش اولسن و فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز اختلاف نظر وجود دارد و محققان مختلف به نتایج متفاوتی رسیده‌اند (یو و همکاران، 2006؛ گارگ و باهل، 2008). نتایج ارائه شده در جداول 4 و 6 نشان می‌دهد که در این نوع خاک، با استفاده از ویژگی‌های ذکر شده می‌توان تا 99 درصد از تغییرات در میزان فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز را پیش‌بینی کرد،

به‌طوری‌که به ترتیب اهمیت، ابتدا فسفر (اثر مثبت)، سپس کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ (اثر مثبت) و در نهایت بیوماس میکروبی کربن (اثر منفی) در تعیین میزان فعالیت این آنزیم به‌صورت مستقیم اثرگذار بودند. بررسی نتایج رگرسیون گام به گام نشان می‌دهد که در هر دو نوع خاک به‌طور مشترک کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ نقش مثبت و بیوماس میکروبی کربن نقش منفی در میزان فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز داشته‌اند. با این حال در خاک مورد مطالعه واقع در استان کرمان، خصوصیت تنفس میکروبی به عنوان پارامتر سوم نقش مثبتی در میزان فعالیت این آنزیم از خود نشان داد. به‌طورکلی نتایج نشان داد که در این نوع خاک، به کمک سه ویژگی ذکر شده می‌توان تا 97 درصد از تغییرات در میزان فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز را توصیف کرد. ساراپاتکا (2003) با انجام تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی بر روی میزان فعالیت آنزیم‌های آلکالین فسفاتاز و اسید فسفاتاز مشاهده کرد که میزان فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز به مقدار فسفر و نیتروژن کل موجود در خاک وابسته بود، درحالی‌که میزان فعالیت آنزیم اسید فسفاتاز با مقدار فسفر و کربن آلی خاک در ارتباط بود. در مطالعات شی و همکاران (2008) با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره گام به گام مشاهده شد که فعالیت آنزیم اسید فسفاتاز به‌صورت کمّی توسط مقدار نیتروژن کل خاک محدود شده است، اما مقدار کربن آلی خاک اثر افزایشی بر آن دارد.

میزان فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز در خاک شهرکرد تنها با استفاده از دو ویژگی فسفر (اثر منفی) و تنفس میکروبی خاک (اثر مثبت) به‌طور معنی‌داری برآورد شد به‌طوری‌که مدل ارائه شده تا 99 درصد از میزان فعالیت این آنزیم را به‌طور مستقیم برآورد می‌کند (جداول 4 و 6). در مقایسه با خاک مورد مطالعه واقع در استان کرمان، میزان فعالیت این آنزیم علاوه بر وابستگی به فسفر و بیوماس میکروبی کربن به عنوان فاکتورهای مثبت، بر مقدار نیتروژن کل خاک به عنوان فاکتور منفی وابستگی دارد (جداول 5 و 7). مدل رگرسیون گام به گام ارائه شده برای این نوع خاک، به‌طور معنی‌داری تا 99 درصد از تغییرات در میزان فعالیت آنزیم آریل‌سولفاتاز را توصیف می‌کند. وایت‌ویک و همکاران (2010) گزارش کردند که تحلیل‌های رگرسیون چند متغیره گام به گام به‌منظور برآورد میزان فعالیت آنزیم آریل‌سولفاتاز، کربن آلی و واکنش خاک را به عنوان دو عاملی که همراه با یکدیگر تا 63 درصد از تغییرات در میزان فعالیت این آنزیم را توصیف می‌کنند، معرفی کرد، به‌طوری‌که معادله حاصل، نیتروژن کل و فسفر را شامل نشد.

نتیجه‌گیری

خاک‌های مورد مطالعه، دو نوع هیستوسول در تحت رده متفاوت هستند. بررسی ارتباط ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک با میزان فعالیت آنزیم‌ها با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون نشان داد که در هر دو نوع خاک، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ و اسید رقیق، تنفس میکروبی و بیوماس میکروبی کربن با میزان فعالیت کلیه آنزیم‌های مورد مطالعه ارتباط معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد آماری داشتند. به‌طورکلی در هر دو نوع خاک، بین فعالیت آنزیم‌های مختلف با یکدیگر همبستگی‌های معنی‌دار تا حد 99 درصد (معنی‌دار در سطح یک درصد آماری) برقرار بود که حاکی از این است که آنزیم‌ها به‌صورت تقریباً مشابهی نسبت به سیستم‌های محیطی و نوع خاک پاسخ می‌دهند. مطالعه نقش متقابل ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی بر میزان فعالیت هر یک از آنزیم‌های مورد مطالعه با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره گام به گام نتایج متفاوتی دربرداشت، به‌طوری‌که مشاهده شد کربن آلی خاک فقط بر روی آنزیم اینورتاز (در هر دو نوع خاک)، نیتروژن کل بر آنزیم‌های اوره‌آز (خاک شهرکرد) و آریل سولفاتاز (خاک کرمان)، فسفر بر آنزیم‌های آریل سولفاتاز (در هر دو نوع خاک) و آلکالین فسفاتاز (خاک شهرکرد)، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با آب داغ بر آنزیم‌های اوره‌آز (خاک شهرکرد)، اینورتاز و آلکالین فسفاتاز (در هر دو نوع خاک)، کربوهیدرات عصاره‌گیری شده با اسید رقیق فقط بر آنزیم اوره‌آز (خاک کرمان)، تنفس میکروبی بر آنزیم‌های اوره‌آز و آریل سولفاتاز (در هر دو نوع خاک) و اینورتاز و آلکالین فسفاتاز (خاک کرمان)، و بیوماس میکروبی کربن بر آنزیم‌های آلکالین فسفاتاز (در هر دو نوع خاک)، اوره‌آز و اینورتاز (خاک کرمان) اثر دارند. به‌طور کلی نتایج ما نشان داد که فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اینورتاز، فسفاتاز و آریل سولفاتاز به تغییرات در ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی حساس است.

فهرست منابع:

1. Acosta-Martínez, V., Cruz, L., Sotomayor-Ramírez, D. and Pérez-Alegría, L. 2007. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. Applied Soil Ecology 35: 35–45.
2. Acosta-Martínez, V., Klose, S. and Zobeck, T.M. 2003. Enzyme activities in semiarid soils under conservation reserve program, native rangeland, and cropland. Journal of plant nutrition and soil science 166: 699-707.
3. Ajwa, H.A., Dell, C.J. and Rice, C.W. 1999. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization. Soil Biology and Biochemistry 31: 769-777.
4. Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. In: Page, A.L. (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 831-871.
5. Bandick, A.K. and Dick, R.P. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. Soil Biology and Biochemistry 31: 1471–1479.
6. Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. Biogeochemistry 133: 13–22.
7. Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. p. 1149–1178. In: Black, C.A., Evans, D.D. and Dinauer, R.C. (eds.) Methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy, Monograph No. 9, Madison, Wisconsin.
8. Bünemann, E.K., Schwenke, G.D. and Van Zwieten, L. 2006. Impact of agricultural inputs on soil organisms—a review. Australian Journal of Soil Research 44: 379-406.
9. Burns, R.G. and Dick, R.P. 2002. Enzymes in the environment: activity, ecology and applications. Marcel Dekker, New York.
10. Caldwell, B.A. 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review. Pedobiologia 49: 637–644.
11. Chhonkar, P.K. and Tarafdar, J.C. 1984. Accumulation of phosphatase in soils. Journal of the Indian Society of Soil Science 32: 266-272.
12. Cookson, P. and Lepiece, G.L. 1996. Urease enzyme activity of soils of Batinah region of Sultanate of Oman. Journal of Arid Environments 32: 225-238.
13. Corstanje, R., Schulin, R. and Lark, R.M. 2007. Scale-dependent relationships between soil organic carbon and urease activity. European Journal of Soil Science 58: 1087-1095.
14. Dick, R.P., Sandor, J.A. and Eash, N.S. 1994. Soil enzyme activities after 1500 years of terrace agriculture in the colca Vally, Peru. Agriculture, Ecosystems and Environment 50: 123-131.
15. Dodor, D.E. and Tabatabai, M.A. 2003. Effect of cropping systems on phosphatases in soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166: 7-13.
16. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry 28: 350-356.
17. Ehlers, K., Bakken, L.R., Frostegård, Å., Frossard, E. and Bünemann, E.K. 2010. Phosphorus limitation in a Ferralsol: impact on microbial activity and cell internal P pools. Soil Biology and Biochemistry 42: 558-566.
18. Eivazi, F. and Tabatabai, M.A. 1977. Phosphatases in soils. Soil Biology and Biochemistry 9: 167-172.
19. Eldor, P. 2007. Soil Microbiology, Ecology ,and Biochemistry. Tercera ed. Eldor P, editor. Chennai, India: Academic Press.
20. FAO/UNESCO. 2012. Soil map of the world: revised legend.

21. Ferreira, A.S., Oliveira, R.S., Santos, M.A. and Borges, E.M. 2008. Respiratory activity of soil microbiota and glucose content in response to phosphorus addition in Cerrado soil-Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo 32: 1891-1897.
22. Garcia, C., Roldan, A. and Costa, F. 1997. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 12: 123–134.
23. Garg, S.H. and Bahl, G.S. 2008. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphates activity in soils. Bioresource Technology 99: 5773-5777.
24. Ilstedt, U., Giesler, R., Nordgren, A. and Malmer, A. 2003. Changes in soil chemical and microbial properties after a wildfire in a tropical rainforest in Sabah, Malaysia. Soil Biology and Biochemistry 35: 1071-1078.
25. Ilstedt, U., Nordgren, A. and Malmer, A. 2006. Soil chemical and microbial properties after disturbance by crawler tractors in a Malaysian forest plantation. Forest Ecology and Management 225: 313-319.
26. Jenkinson, D.S. and Ladd, J.N. 1981. Microbial Biomass in Soil: Measurement and Turnover. p. 455–471. In: Paul, E.A. and Ladd, J.N. (eds.) Soil Biochemistry. New York: Marcel Dekker.
27. Jin, K., Sleutel, S., Buchan, D., De Neve, S., Cai, D.X., Gabriëls, D. and Jin, J.Y. 2009. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. Soil and Tillage Research 104: 115-120.
28. Klose S. and Tabatabai M.A. 1999. Urease activity of microbial biomass in soils. Soil Biology and Biochemistry 31: 205-211.
29. Kujur, M., Gartia, S.K. and Patel, A.K. 2012. Quantifying the contribution of different soil properties on enzyme activities in dry tropical ecosystems. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science 7: 763-772.
30. Ladd, J.N. 1985. Soil enzymes. In: Vaughan, D. and Malcom, R.E. (eds.). Soil organic matter and biological activity. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk publishers, Dordrecht, Netherlands, 175-221.
31. Li, Y.T., Rouland, C., Benedetti, M., Li, F.B., Pando, A., Lavelle, P. and Dai, J. 2009. Microbial biomass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress. Soil Biology and Biochemistry 41: 969-977.
32. Luo, Y. and Zhou, X. 2006. Soil respiration and the Environment. Academic press.
33. Monreal, C.M. and Bergstrom, D.W. 2000. Soil enzymatic factors expressing the influence of land use, tillage system and texture on soil biochemical quality. Canadian Journal of Soil Science 80: 419-428.
34. Nielsen, M. and Winding, A. 2001. Microorganisms as indicators of soil health. National Environmental Research Institute, Denmark.
35. Niemi, R.M., Vepsäläinen, M., Wallenius, K., Simpanen, S., Alakukku, L. and Pietola, L. 2005. Temporal and soil depth-related variation in soil enzyme activities and in root growth of red clover (Trifolium pratense) and timothy (Phleum pratense) in the field. Applied Soil Ecology 30: 113–125.
36. Nourbakhsh, F., Monreal, C., Emtiazy, G. and Dinel, H. 2002. L-asparaginase activity in some soils of central Iran. Arid Land Research and Management 16: 377-384.
37. Olsen, S.R. and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus. p. 403-430. In: Page, A.L. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Monograph No. 9, Madison, Wisconsin.

38. Quiquampoix, H. and Mousain, D. 2005. Enzymatic hydrolysis of organic phosphorus. p. 89–112. In: Turner, B.L., Frossard, E. and Baldwin, D.S. (eds.) Organic phosphorous in the environment. CABI, Wallingford.
39. Salam, A.K., Sutanto, E., Desvia, Y., Niswati, A., Dermiyati, and Kimura, M. 1999. Activities of soil enzymes in fields continuously cultivated with cassava, sugarcane, and pineapple in middle terrace areas of Lampung Province, South Sumatra, Indonesia. Soil Science and Plant Nutrition 45: 803-809.
40. Šarapatka, B. 2003. Phosphatase activities (ACP, ALP) in agroecosystem soils. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences.
41. Schinner, F. and Von Mersi, W. 1990. Xylanase-, CM-cellulase- and invertase activity in soil: An improved method. Soil Biology and Biochemistry 22: 511-515.
42. Sharma, C.M., Baduni, N.P., Gairola, S., Ghildiyal, S.K. and Suyal, S. 2010. Tree diversity and carbon stocks of some major forest types of Garhwal Himalaya, India. Forest Ecology and Management 260: 2170-2179.
43. Shi, Z.J., Lu, Y., Xu, Z.G. and Fu, S.L. 2008. Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China. Plant, Soil and Environment 54: 341-346.
44. Sicardi, M., García-Préchac, F. and Frioni, L. 2004. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial Eucalyptus grandis (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay. Applied Soil Ecology 27: 125–133.
45. Sinsabaugh, R.L., Gallo, M.E., Lauber, C., Waldrop, M.P. and Zak, D.R. 2005 Extracellular enzyme activities and soil organic matter dynamics for northern hardwood forests receiving simulated nitrogen deposition. Biogeochemistry 75: 201–215.
46. Tabatabai, M.A. 1994. Soil enzymes. p. 775-833. In: Weaver, R.W. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. Soil Science Society of America, Monograph No. 9, Madison, Wisconsin.
47. Tabatabai, M.A. 2003. Enzymes: past, present and future. Second international conference on enzyme in the environment: Activity, Ecology and Application. Prague, Czech Republic 14-17.
48. Tabatabai, M.A. and Bremner, J.M. 1970. Arylsulphatase activity of soils. Soil Science Society of America Journal 34: 225-229.
49. Tabatabai, M.A. and Bremner, J.M. 1972. Assay of urease activity in soil. Soil Biology and Biochemistry 4: 479-487.
50. Turner, B.L. and Haygarth, P.M. 2005. Phophatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorous turnover by phosphodiesterase activity. Science of The Total Environment 344: 27-36.
51. Udawatta, R.P., Kremer, R.J., Garrett, H.E. and Anderson, S.H. 2009. Soil enzyme activities and physical properties in a watershed managed under agroforestry and row-crop systems. Agriculture, Ecosystems and Environment 131: 98-104.
52. Waldrop, M.P., Balser, T.C. and Firestone, M.K. 2000. Linking microbial community composition to function in a tropical soil. Soil Biology and Biochemistry 32: 1837–1846.
53. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37: 29-38.
54. Wang, B., Xue, S., Liu, G.B., Zhang, G.H., Li, G. and Ren, Z.P. 2012. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China. Catena 92: 186-195.
55. Wang, Q., Xiao, F., He, T. and Wang, S. 2013. Responses of labile soil organic carbon and enzyme activity in mineral soils to forest conversion in the subtropics. Annals of Forest Science 70: 579-587.

56. Wang, Y., Zhang, L. and Liu, D. 2003. Relationship among soil enzyme activities, vegetation state, and soil chemical properties of coal cinder yard. Chinese Journal of Applied Ecology 14: 110–112.
57. Weand, M.P., Arthur, M.A., Lovett, G.M., McCulley, R.L. and Weathers, K.C. 2010. Effects of tree species and N additions on forest floor microbial communities and extracellular enzyme activities. Soil Biology and Biochemistry 42: 2161–2173.
58. Wightwick, A., Allinson, G., Reichman, S. and Menzies, N. 2010. Assessing effects of copper fungicide use on the biological health of vineyard soils. p. 165-166. In: Agro 2010 XIth ESA congress. Proceedings of Agro 2010 the XIth ESA congress, Montpellier, France. 29 Aug-3 Sep. 2010. Agropolis International Editions.
59. Yu, S., Hea, Z.L., Stoffella, P.J., Calvert, D.V., Yang, X.E., Banks, D.J. and Baligar, V.C. 2006. Surface runoff phosphorus (P) loss in relation to phosphatase activity and soil P fractions in Florida sandy soils under citrus production. Soil Biology and Biochemistry 38: 619-628.
60. Zeng, D.H., Hu, Y.L., Chang, S.X. and Fan, Z.P. 2009. Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. Mongolica) in sandy lands in Keerqin, northeastern China. Plant and Soil 317: 121–133.