نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۷، ص. ۹۳۰-۹۱۹

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 5, Nov.-Des. 2018, p. 919-930

مدل‌سازی ریاضی و مقایسه تنفس ناشی از بستره در دو خاک جنگلی و کشاورزی

محسن برین[1*]- احسان احسان ملاحت[2]- فرخ اسدزاده[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

چکیده

یکی از ویژگی‌های مهم در ارزیابی جمعیت فعال میکروبی خاک تنفس ناشی از بستره (SIR) می‌باشد. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر منبع کربن (گلوکز)، دما و دوره خواباندن در تنفس ناشی از بستره در دو خاک جنگلی و کشاورزی با استفاده از روش سطح پاسخ و بر مبنای طرح مرکب مرکزی انجام شد. بدین منظور دامنه‌های متفاوتی از این سه متغیر شامل مقدار گلوکز (۱۰-۰/۵ میلی‌گرم در گرم)، زمان خواباندن (۱۰-۱ ساعت) و دما (۳۰-۱۵ درجه سلسیوس) در نظر گرفته شده و طرح مرکب مرکزی با ۴۰ آزمایش برای دو خاک و بر اساس مقادیر کدبندی شده متغیرهای مستقل طراحی شد. نتایج نشان داد که میانگین مقدار SIR خاک جنگلی به دلیل دارا بودن ماده آلی بیشتر و جمعیت فعال میکروبی بالاتر تقریباً دو برابر خاک کشاورزی است. نتایج بیانگر کارآمدی مدل طراحی شده برای پیش‌بینی مقدار تنفس ناشی از بستره در دو خاک کشاورزی (R^2= ۰/۹۱۹) و جنگلی (R^2= ۰/۸۲۳) بود. از بین سه متغیر مورد بررسی در مدل طرح مرکب مرکزی، تاثیر خطی دما بر تنفس ناشی از بستره در هر دو خاک معنی‌دار بود. با این حال در خاک جنگلی مقدار بستره (گلوکز) تأثیر بسیار معنی‌دار و به مراتب بیشتری در مقایسه با خاک زراعی داشت که می‌تواند به دلیل بیشتر بودن مواد آلی قابل تجزیه در این خاک باشد.

واژه‌های کلیدی: تنفس خاک، جمعیت میکروبی، سطح پاسخ، کیفیت خاک

مقدمه

خاک یک سیستم زنده، پویا و پیچیده می‌باشد. قسمت عمده‌ای از این پیچیدگی را می‌توان به دلیل بخش زنده خاک دانست که دنیای اسرارآمیز و پیچیده‌ای از روابط بین موجودات و گیاه را در خود جای داده است (۲۳). به دلیل رابطه تنگاتنگ بین ساختار میکروبی با کیفیت خاک، گیاه و پایداری اکوسیستم، خصوصیات میکروبی خاک به عنوان بخشی از شاخص‌های سلامت خاک مطرح می‌باشند (۱۲ و ۱۶). به عقیده بوسی و همکاران (۵) شکی نیست که جمعیت میکروبی خاک به تغییرات محیط حساس هستند. مطالعات نشان داد که جمعیت میکروبی خاک با بهم خوردگی خاک، اصلاح خاک، روش‌های آبیاری، شخم و حتی نوع گیاه تغییر می‌کند. برخی شاخص‌های بیولوژیکی خاک وجود دارند که به تغییرات ایجاد شده در خاک (مانند تغییر کاربری اراضی) حساس می‌باشند از جمله شاخص های بیولوژیکی کیفیت خاک، که مورد ارزیابی قرار می‌گیرند می‌توان به تنفس خاک (که به آن تنفس پایه[4] هم گفته می‌شود)، که نشان-دهندهٔ فعالیت‌های بیولوژیکی است اشاره کرد (۱۰ و ۱۱). تنفس پایه و یا معدنی شدن کربن آلی خاک فرآیندی است که طی آن، اکسیژن به عنوان گیرنده نهایی الکترون عمل می‌کند. فعالیت میکروبی خاک (شامل تنفس خاک) نقشی کلیدی در تجزیه مواد آلی خاک و همچنین بقایای افزوده شده به سطح خاک دارد (۲۷). یکی از شاخص‌های بسیار مهم در بررسی جمعیت فعال میکروبی خاک، تنفس برانگیخته یا تنفس ناشی از سوبسترا[5] می‌باشد (۳۱). تنفس برانگیخته که میزان کربن معدنی متصاعد شده از تنفس میکروبی پس از اضافه کردن سوبسترای آسان تجزیه شونده مانند گلوکز می باشد، می‌تواند نشان‌دهنده میزان جمعیت فعال میکروبی و گاهی میزان فراهمی زیستی کربن برای هتروتروف‌ها باشد (۳). رسولی صدقیانی و همکاران (۲۹) بالا بودن تنفس ناشی از بستره در خاک های با کاربری جنگلی و مرتعی را نسبت به خاک‌های با کاربری باغی و زراعی، را به جمعیت فعال میکروبی در این خاک‌ها نسبت دادند. زیرا این شاخص نشان‌دهنده جمعیت فعال میکروبی خاک می باشد که معمولاً درکاربری‌های دست‌نخورده (جنگل و مرتع) بالاتر از زمین‌های تغییر کاربری یافته (باغ و زراعت) می‌باشد. کاهش تنفس

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب استادیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: m.barin@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v32i5.68908

4- Basal Respiration
5- Substrate Induced Respiration

ناشی از سوبسترا بر اثر تغییر کاربری اراضی نشان از کاهش جمعیت و فعالیت ریزجانداران خاک بر اثر کشت و کار طولانی مدت و کاهش ورود بقایای آلی می‌باشد (۴).

عوامل مختلفی از قبیل منبع کربن (گلوکز)، دما و دوره خواباندن در مقدار کمّی تنفس ناشی از سوبسترا نقش دارند (۳۲). بنابراین بهینه‌سازی شرایط آزمایش یکی از معیارهای مهم برای تعیین تنفس ناشی از سوبسترا می‌باشد. در روش‌های معمول برای بررسی اثر عوامل مختلف بر شرایط رشد ریزجانداران‌های خاک و تنفس ناشی از سوبسترا یک عامل متغیر بوده و عوامل دیگر ثابت نگه داشته می شوند که این امر علاوه‌بر زمانبر بودن، پرهزینه نیز بوده و از سوی دیگر تضمینی برای مدل‌سازی دقیق و تشخیص شرایط کاملاً بهینه برای فعالیت متابولیکی ریزجانداران ارائه نمی‌دهد (۲۵). در این ارتباط روش‌های آماری نظیر طرح پلاکت– برمن و روش سطح پاسخ، می توانند ابزارهای مفیدی جهت تشخیص شرایط بهینه‌ی به‌منظور نیل به بیشینه کارآیی این ریزجانداران در انجام فعالیت‌های زیستی نظیر تنفس ناشی از سوبسترا محسوب شوند (۲۸ و ۳۲).

روش‌های مذکور تکنیک‌هایی ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی به‌منظور طراحی آزمایش‌ها[1] با هدف ایجاد مدل ریاضی پیش بینی کننده هستند که توانایی ارزیابی میزان تأثیر تعدادی عامل به‌عنوان متغیرهای مستقل را بر روی یک پاسخ مطلوب به عنوان متغیر وابسته دارند (۲۲). در حقیقت در این روش‌ها از اطلاعات کمّی حاصل از تعداد مناسبی از آزمایش‌ها به‌طور همزمان استفاده شده و با تلفیق آن‌ها از طریق تحلیل معادلات چندپارامتری، متغیر پاسخ، پیش‌بینی و یا بهینه‌سازی می‌گردد. روش سطح پاسخ با استفاده از طرح‌های مختلف مانند باکس– بنکن[2] و یا طرح مرکب مرکزی[3] انجام‌پذیر است. در سال‌های اخیر این روش‌ها به عنوان ابزارهایی توانمند در پژوهش‌های مربوط به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند در علوم مهندسی و زیستی مورد استفاد قرار گرفته‌اند (۱ و ۲۱). بر این اساس هدف از پژوهش حاضر مدل‌سازی تأثیر منبع کربن (گلوکز)، دما و دوره خواباندن در تنفس ناشی از سوبسترا با استفاده از طرح مرکب مرکزی در دو نمونه خاک جنگلی و کشاورزی بوده و طی آن تلاش شده تا تأثیر عوامل فوق در دو خاک با کاربری متفاوت مورد مقایسه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از دو نوع خاک، شامل خاک زراعی (با مواد آلی نسبتاً کم) و خاک جنگلی (با مواد آلی نسبتاً زیاد) استفاده شد. نمونه های مورد استفاده در این پژوهش از حوضه آبخیز دریاچه زریوار در استان کردستان و از دو کاربری زراعت و جنگل در مجاور همدیگر برداشته شدند. یک بخش از نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن در دمای اتاق از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۴)، pH خاک در عصاره گل اشباع به روش پتانسیومتری (۱۹)، هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره گل اشباع (۸)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون (۲۶) و کربن آلی به روش والکی بلک (۲۴) تعیین شد (جدول ۱). براساس آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی معمول بر روی نمونه‌های خاک، از نظر توزیع اندازه ذرات به رغم اینکه دو کاربری در کلاس بافت جداگانه قرار گرفته‌اند، فراوانی ذرات اولیه در آن‌ها بسیار مشابه است. نمونه‌های خاک مورد استفاده شور نبوده و از نظر pH نیز در محدوده‌ی خنثی تا آهکی هستند. تفاوت اصلی در دو نمونه خاک مورد استفاده در مقدار ماده‌ی آلی آن‌ها است که در خاک جنگلی تقریباً دو برابر خاک با کاربری زراعی است. بخش دوم نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش‌های بیولوژیکی (اندازه‌گیری تنفس ناشی از بستره یا سوبسترا) تا زمان آزمایش در یخچال نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری تنفس ناشی از بستره از روش اندرسون و دومسچ (۲) با تغییر دامنه‌ی کمّی متغیرها استفاده شد.

متغیرهای مستقل مورد استفاده برای مدل‌ساری SIR در این تحقیق شامل دما و زمان خواباندن و همچنین مقدار گلوکز بود. دامنه ی مورد استفاده برای هر یک از این متغیرها در جدول ۱ ارائه شده است. طراحی آزمایش‌ها با ترکیب مقادیر مختلف هر یک از متغیرهای مستقل با استفاده از روش سطح پاسخ و بر مبنای طرح مرکب مرکزی انجام شد. در این روش مقدار هر یک از متغیرهای مورد نظر با استفاده از رابطه زیر کدبندی می‌شود (۱).

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x} \qquad (۱)$$

در این رابطه X_i، x_i و x_0 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار کد شده ی متغیر، مقدار واقعی هر متغیر و مقدار میانگین دامنه‌ی هر متغیر است. Δx نیز مقدار تغییر گام هر پارامتر است. براساس جدول ۲ مقدار x_0 برای متغیرهای زمان خواباندن، مقدار گلوکز و دمای خواباندن به ترتیب برابر با ۵/۵ ساعت، ۵/۲۵ میلی‌گرم بر گرم و ۲۲/۵ درجه سلسیوس است. مقدار Δx نیز برای این متغیرها به ترتیب برابر با ۴/۵، ۴/۷۵ و ۷/۵ در نظر گرفته شد.

در روش سطح پاسخ از یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم (معادله‌ی ۲) که شامل ترکیب خطی، درجه دوم و همچنین برهمکنش بین متغیرها براساس مقادیر کد شده است، برای پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده شد.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_0 X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ \neq j}}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^{k} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad i \qquad (۲)$$

1- Design of experiments (DOE)
2- Box-Behnken
3- Central composite design (CCD)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک

Table 1- Selected physical and chemical properties of the soil samples

کاربری Land use	رس (٪) Clay (%)	سیلت (٪) Silt (%)	شن (٪) Sand (%)	ماده آلی (٪) OM (%)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dSm^{-1})	اسیدیته pH	کلاس بافتی Textural class
زراعت Agriculture	25	36	39	1.2	1.9	7.5	Loam
جنگل Forest	29	39	32	2.3	1.8	7.2	Clay loam

جدول ۲- دامنه مقادیر آزمایشی متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی

Table 2– Range of the variables used in the modeling procedure

متغیرهای مستقل	فاکتور Factor	دامنه و مقادیر Range and value		
Independent variables	X_i	-1	0	+1
زمان Time (h)	x_1	1	5.5	10
گلوکز Glucose (mgg^{-1})	x_2	0.5	5.25	10
دما Temperature (°C)	x_3	15	22.5	30

در این معادله،Y متغیر پاسخ (مقدار تنفس ناشی از بستره)، Xi و Xj متغیرهای مستقل کد شده، k تعداد متغیرهای مستقل، ε باقیمانده‌های مدل (اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده مدل) و β_0، β_i، β_{ii}، β_{ij} نیز به ترتیب نشان دهنده‌ی اثر عرض از مبدأ (ضریب ثابت)، اثر توابع خطی، درجه دو و برهمکنش بین متغیرها است.

نتایج و بحث

در این مطالعه از طرح مرکب مرکزی بر پایه روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی تنفس ناشی از بستره استفاده شد. بر این اساس مجموع ۴۰ آزمایش (برای دو نوع خاک) و با ترکیب سطوح متفاوتی از مقادیر کدبندی شده این متغیرها طراحی و اجرا گردید. دامنه‌ی تغییرات مقادیر هر کدام از متغیرها براساس مقادیر کد شده هر متغیر در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین در این جدول مقادیر مشاهده‌ای تنفس ناشی از بستره برای هر آزمایش ارائه شده است.

بر مبنای طرح مرکب مرکزی و براساس ورودی‌های جدول ۳ برای متغیرهای مستقل (شامل زمان خواباندن، مقدار گلوکز و دما) و متغیر پاسخ (مقدار تنفس ناشی از بستره) جدول ۴ برای ضرایب هر یک از پارامترهای خطی، درجه دوم و برهمکنش متغیرها به دست آمد. در این جدول ضرایب هر یک از بخش‌های معادله‌ی چندجمله‌ای به همراه سطح معنی‌داری آن‌ها براساس آماره P ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود. اثر خطی متغیرهای مستقل در خاک کشاورزی شامل دما و زمان خواباندن ($P < ۰/۰۰۱$) بر تنفس ناشی از بستره معنی‌دار اما اثر گلوکز غیرمعنی‌دار بود، در حالی که در خاک جنگلی اثر دما ($P < ۰/۰۱$) و گلوکز ($P < ۰/۰۵$) معنی‌دار بودند اما اثر زمان خواباندن بر این ویژگی غیرمعنی‌دار شد. در بخش درجه‌ی دوم معادله نیز اثر دما بر مقدار تنفس ناشی از بستره معنی‌دار شد ($P < ۰/۰۱$). نتایج جدول ۴ نشان‌دهنده‌ی این است که برهمکنش متغیرهای دما در زمان خواباندن و گلوکز در زمان خواباندن بر میزان تنفس ناشی از بستره به‌ترتیب در خاک کشاورزی و خاک جنگلی معنی‌دار شدند ($P < ۰/۰۱$).

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۴ برای معنی‌داری هر یک از ضرایب تابع چند جمله‌ی طرح مرکب مرکزی و با در نظر گرفتن ضرایب دارای اثر معنی‌دار تابع پیش‌بینی‌کننده مقدار تنفس ناشی از بستره به‌صورت معادله ۳ (خاک کشاورزی) و ۴ (خاک جنگلی) قابل ارائه خواهد بود. در این معادله X_1، X_2 و X_3 به‌ترتیب مربوط به مقادیر کد شده زمان خواباندن، مقدار گلوکز و دما می‌باشند.

$$\begin{aligned} \mathrm{SIR}\ (\mathrm{mgCO2g-1day-1}) &= 0.586 - 0.1194X_1 + \\ 0.154X_3 &- 0.100X_3^2 - 0.116X_1X_3 \end{aligned} \quad (۳)$$

$$R^2 = 91.98\% \quad R^2_{adj.} = 84.76\%$$

$$\begin{aligned} \mathrm{SIR}\ (\mathrm{mgCO2g-1day-1}) &= 1.13 - 0.1594X_2 + \\ 0.289X_3 &+ 0.201X_2X_1 \end{aligned} \quad (۴)$$

$$R^2 = 82.32\% \quad R^2_{adj.} = 66.42\%$$

معادله‌ی ۳ و ۴ بیانگر این است که دما (X_3) تأثیر مثبت و افزاینده‌ای بر تنفس ناشی از بستره در هر دو خاک دارد. به منظور ارزیابی کارآیی مدل حاصل از طرح مرکب مرکزی، در شکل ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده تنفس ناشی از بستره از آزمایش‌ها و مقدار برآورد شده‌ی آن از معادله‌ی ۳ و ۴ در مقابل یکدیگر ترسیم شده‌اند. مدل طرح مرکب مرکزی توانایی مطلوبی در پیش‌بینی تنفس ناشی از بستره داشته و ۹۱/۹۸ درصد و ۸۲/۳۲ درصد از تغییرات تنفس ناشی

از بستره به ترتیب در خاک کشاورزی و خاک جنگلی توسط مدل طرح مرکب مرکزی قابل تبیین است. صرف‌نظر از کارایی مناسب مدل در هر دو خاک جنگلی و کشاورزی مقادیر کمّی تنفس ناشی از بستره در دو خاک تفاوت قابل توجهی داشتند به‌طوری که مقدار میانگین تنفس در آزمایش‌های مربوط به خاک جنگلی برابر با ۰/۹۷ ($mgCO_2\text{-}Cg_{Soil}^{-1}day^{-1}$) و در خاک کشاورزی برابر ۰/۵۰ ($mgCO_2g^{-1}day^{-1}$) بود که نشان‌دهنده افزایش تقریباً دو برابری تنفس در خاک جنگلی نسبت به خاک است (شکل ۱).

به منظور تحلیل حساسیت مدل‌های آماری توسعه داده شده، درصد تأثیر هر یک از پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی با استفاده از آماره پارتو در شکل ۲ نشان داده شده است. از بین متغیرهای مستقل بررسی شده به ترتیب زمان خواباندن، دما، توان دوم دما و برهمکنش زمان در دما بیشترین تأثیر را بر تنفس ناشی از بستره در خاک کشاورزی دارند و مقدار گلوکز، دما و برهمکنش گلوکز در زمان خواباندن بیشترین تأثیر را بر این ویژگی در خاک جنگلی داشتند (شکل ۲). درصد تأثیر زمان خواباندن، دما، توان دوم دما و برهمکنش زمان در دما در خاک کشاورزی به ترتیب برابر با ۲۱/۹۳، ۳۶/۸۳، ۱۵/۶۶ و۲۰/۸۰ بوده و مجموع درصد اثرات این ۴ متغیر نیز برابر با ۹۵/۲۴ درصد است. در خاک جنگلی درصد تأثیر مقدار گلوکز، دما و برهمکنش گلوکز در زمان خواباندن به ترتیب برابر با۱۲/۶۶، ۴۱/۷۱ و۲۰/۲۷ بوده و مجموع درصد اثرات این ۳متغیر نیز برابر با ۷۴/۶۵ درصد می‌باشد.

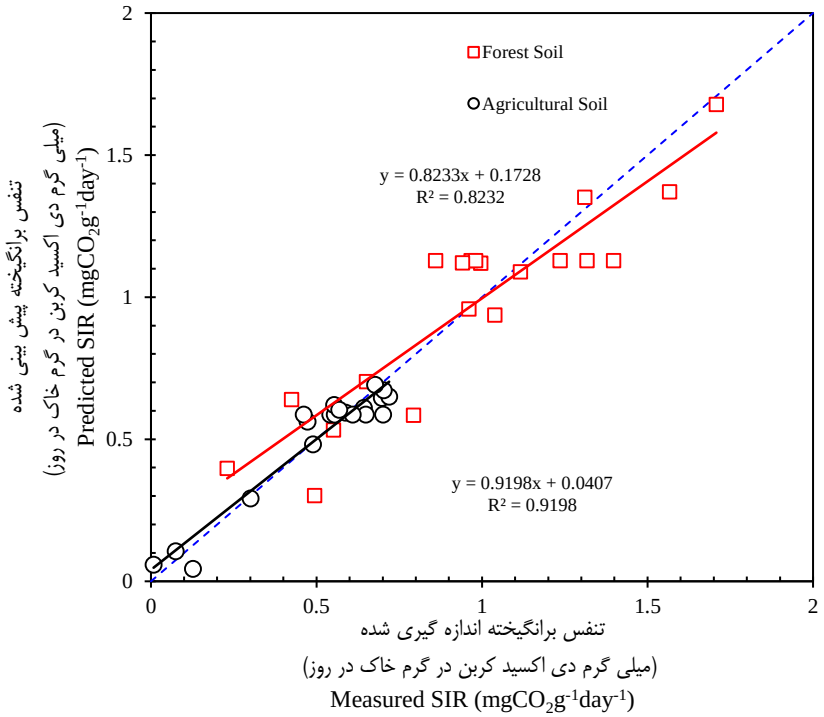
همچنین به منظور تحلیل باقیمانده‌های مدل‌های آماری ارائه شده، توزیع آماری مقادیر باقیمانده‌ی مدل طرح مرکب مرکزی نیز نرمال بوده و براساس علامت (مثبت و یا منفی بودن) مقادیر باقیمانده‌ی مدل می‌توان نتیجه گرفت که مدل مذکور فاقد بیش برآوردی و یا کم‌برآوردی سیستماتیک بوده و جهت خطای آن تابعی از مقدار تنفس ناشی از بستره نبوده و حالت تصادفی دارد (شکل ۳).

به‌منظور نشان دادن اثر ترکیبی متغیرها شامل زمان خواباندن، دما و مقدار گلوکز، نمودار کانتوری تغییرات مقدار تنفس ناشی از بستره برای این متغیرها به صورت دو به دو و بر اساس مدل طرح مرکب مرکزی ترسیم و در شکل ۴ ارائه شده است. در خاک کشاورزی تأثیر زمان خواباندن بر مقدار تنفس ناشی از بستره مشهود است که این اثر به‌ویژه در دماهای کم محسوس‌تر می‌باشد، با این حال حداکثر مقدار تنفس ناشی از بستره مربوط به مقادیر بالای دما و زمان آزمایش‌ها است.

جدول ۳- ماتریس مقادیر متغیرهای کد شده در مدل‌سازی روش طرح مرکب مرکزی

Table 3- Coded matrix of the variables used in the CCD modeling

شماره آزمایش Experiment number	تنفس ناشی از بستره در خاک جنگلی (میلی‌گرم دی‌اکسید کربن در گرم خاک در روز) SIR in forest soil ($mgCO2g^{-1}day^{-1}$)	تنفس ناشی از بستره در خاک کشاورزی (میلی‌گرم دی اکسید کربن در گرم خاک در روز) SIR in agricultural soil ($mgCO2g^{-1}day^{-1}$)	مقادیر کد شده متغیرها Coded values of the variables		
			دما Temperature	گلوکز Glucose	n
1	0.996	0.588	0.595	-0.595	-0.595
2	0.425	0.698	0.595	-0.595	0.595
3	1.708	0.643	0.595	0.595	0.595
4	0.230	0.127	-1.000	0.000	0.000
5	1.039	0.490	-0.595	0.595	0.595
6	1.317	0.542	0.000	0.000	0.000
7	1.236	0.555	0.000	0.000	0.000
8	0.494	0.008	-0.595	0.595	-0.595
9	1.311	0.719	0.595	0.595	-0.595
10	1.398	0.701	0.000	0.000	0.000
11	0.652	0.075	-0.595	-0.595	-0.595
12	0.793	0.703	0.000	-1.000	0.000
13	0.968	0.649	0.000	0.000	0.000
14	0.551	0.553	-0.595	-0.595	0.595
15	0.981	0.609	0.000	0.000	0.000
16	1.567	0.473	1.000	0.000	0.000
17	0.941	0.569	0.000	1.000	0.000
18	0.860	0.461	0.000	0.000	0.000
19	1.116	0.677	0.000	0.000	1.000
20	0.961	0.301	0.000	0.000	-1.000



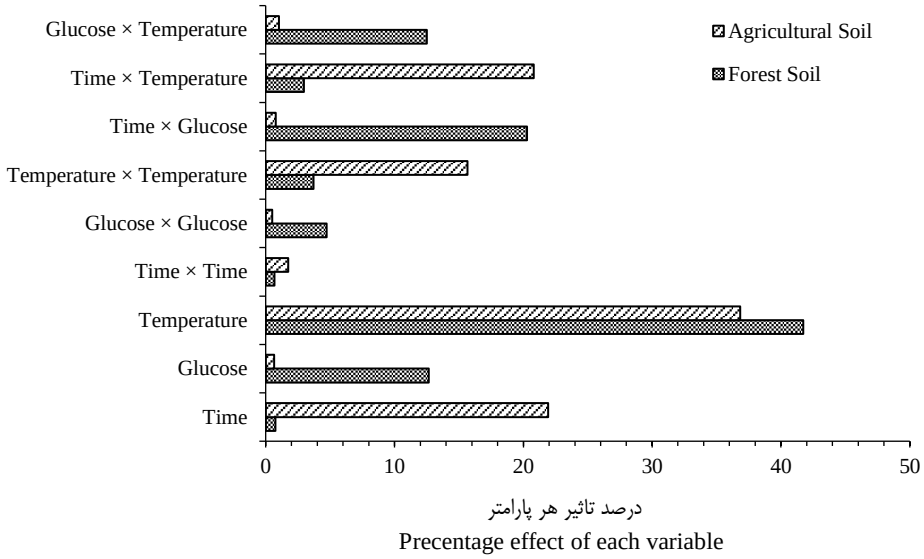
شکل ۱- مقایسه تنفس ناشی از بستره مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل طرح مرکب مرکزی در دو نوع خاک

Figure 1- Comparison of the measured and predicted SIR values for agricultural and forest soils with the CCD model

جدول ٤- ضرایب تابع چند جمله‌ی طرح مرکب مرکزی برای پیش‌بینی تنفس ناشی از بستره

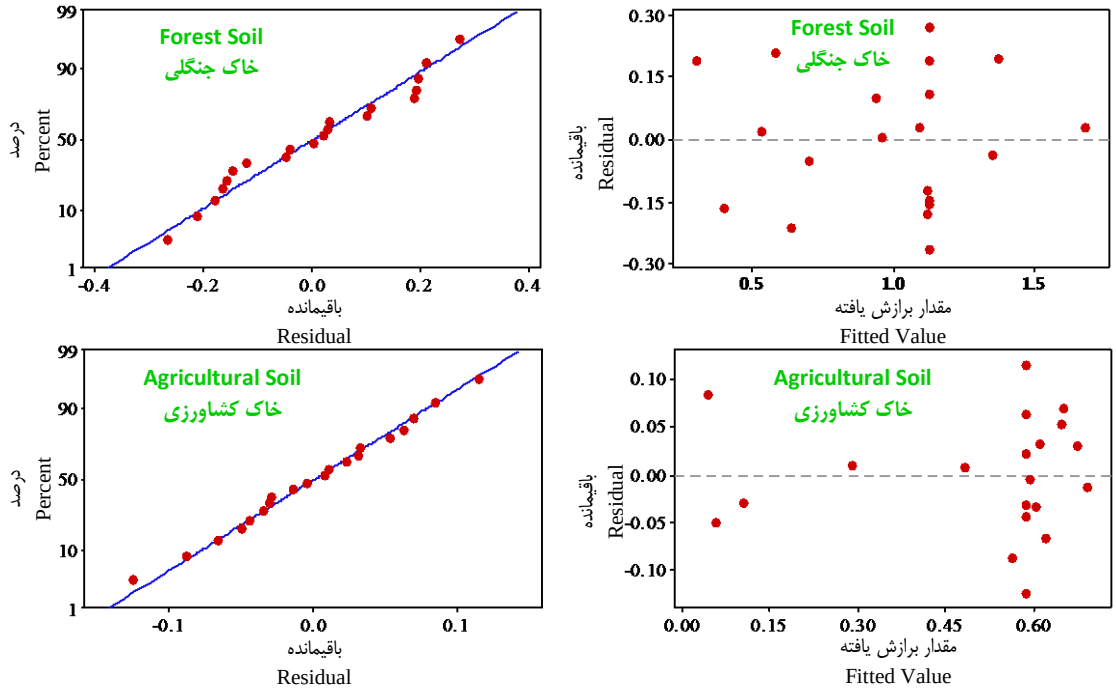
Table 4- Coefficients of the full quadratic CCD model for predicting SIR

بخش مدل Part model	پارامترهای مدل Parameters	خاک جنگل Forest Soil			خاک کشاورزی Agricultural soil		
		آماره P P-value	آماره T T-value	ضریب Coefficient	آماره P P-value	آماره T T-value	ضریب Coefficient
ثابت مدل Constant	–	0.000	12.410	1.128	0.000	17.130	0.586
خطی Linear	زمان Time	0.533	0.650	0.039	0.000	5.240	0.119
	گلوکز Glucose	0.025	2.640	0.159	0.388	-0.900	-0.021
	دما Temperature	0.001	4.800	0.289	0.000	6.790	0.154
درجه‌ی دو Square	زمان × زمان Time × Time	0.546	-0.620	-0.037	0.159	-1.520	-0.034
	گلوکز × گلوکز Glucose × Glucose	0.128	-1.660	-0.097	0.427	0.830	0.018
	دما × دما Temp. × Temp.	0.173	-1.470	-0.086	0.001	-4.550	-0.101
برهمکنش Interaction	گلوکز× زمان Time × Glucose	0.028	2.560	0.202	0.463	-0.760	-0.023
	دما × زمان Time × Temp.	0.349	-0.980	-0.077	0.003	-3.900	-0.116
	دما × گلوکز Glucose × Temp.	0.072	2.010	0.158	0.402	0.870	0.026
		R^2 = 82.32% R^2adj = 66.42%			R^2 = 91.98% R^2adj = 84.76%		



شکل ۲- نتایج تحلیل پارتو برای مقایسه اثر پارامترهای ورودی مدل طرح مرکب مرکزی بر مقدار تنفس ناشی از بستره

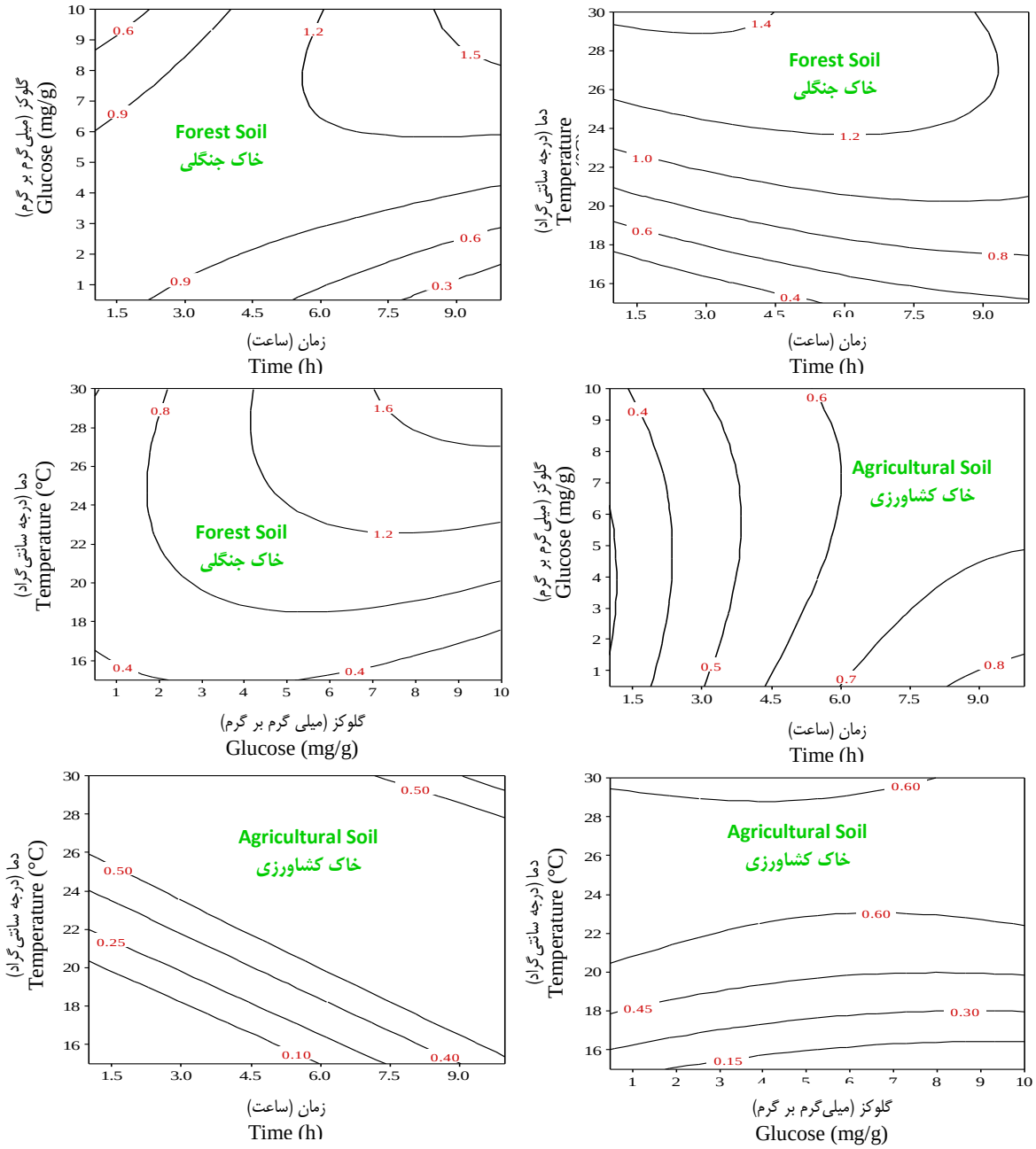
Figure 2- Pareto analysis for determining the percentage effects of each CCD model variables



شکل ۳- توزیع باقیمانده‌های مدل طراحی ترکیبی مرکزی

Figure 3- Distribution of the CCD model residuals

از سوی دیگر تغییر مقدار گلوکز چه در ارتباط با دما و یا زمان تأثیر نسبتاً کمی بر مقدار کمّی تنفس ناشی از بستره داشته است. به نظر می‌رسد در خاک کشاورزی به دلیل مقدار اندک ماده آلی افزایش گلوکز تاثیر چندان قابل توجهی بر تغییر مقدار تنفس ناشی از بستره نداشته است (۲۹). با این حال دما و زمان به‌عنوان عواملی که شرایط را برای فعالیت باکتری‌ها مهیا می‌کنند تا حدودی توانسته‌اند مقدار تنفس ناشی از بستره را در خاک کشاورزی تحت تأثیر قرار دهند. در مجموع با افزایش زمان و دما مقدار تنفس ناشی از بستره افزایش محسوس داشته ولی با افزایش گلوکز، افزایش مقدار تنفس ناشی از بستره چندان قابل توجه نبوده است.



شکل ٤- نمایش کانتوری تغییرات مقدار تنفس ناشی از بستره در مقابل متغیرهای ورودی مدل طرح مرکب مرکزی زمان (Time, h)؛ غلظت گلوکز ($mg\ gl^{-1}$,Clucose)؛ دما (Temprature, C°)

Figure 4- Counter plot of the SIR values at different levels of the CCD model variables

در خاک جنگلی روند تغییرات تنفس ناشی از بستره به‌طور مشخص در پاسخ به متغیرهای مستقل متفاوت از خاک کشاورزی است. برای نمونه در بررسی توأم اثر گلوکز و زمان در خاک جنگلی مشاهده می‌شود که اثر افزایش گلوکز به‌ویژه در زمان‌های بالا بر مقدار تنفس ناشی از بستره بسیار زیاد است به‌طوری‌که حداکثر مقدار تنفس ناشی از بستره در این خاک مربوط به زمان طولانی‌تر و مقدار بیشینه گلوکز است. این امر به‌خوبی نشان می‌دهد که ابتدا با افزایش گلوکز تنفس ناشی از بستره در هر دو نوع خاک افزایش یافته

(تحریک میکروبی) اما با گذشت زمان خاک جنگلی در مقایسه با خاک کشاورزی که حاوی مقادیر قابل توجهی از مواد آلی قابل تجزیه و سهل‌الوصول است تنفس ناشی از بستره بیشتر می‌باشد (۲۹، ۱۳ و ۴). با این حال زمان و دما تا حدودی اثر هم‌افزایی بر تنفس ناشی از بستره داشته و از این جهت پاسخ دو خاک نسبت به این دو متغیر مشابهت دارد. نکته قابل توجه دیگر تأثیر توأم دما و گلوکز در خاک جنگلی می‌باشد که افزایش گلوکز در دماهای بیش از ۲۵ درجه سلسیوس سبب افزایش شدید تنفس ناشی از بستره میکروبی شد، به نظر می‌رسد که در این حالت دمای مطلوب به‌همراه افزایش مقدار سوبسترا، در محیطی که حاوی ماده آلی قابل توجهی باشد (خاک جنگلی) شرایط را برای افزایش تنفس ناشی از بستره فراهم می آورد.

آزمایش‌های مزرعه‌ای نشان داده است که مدیریت اراضی موجب تغییر در وضعیت مواد آلی می‌شود و این تغییر در ذخایر سهل‌الوصول (ذخایر مواد آلی تعریف شده در بخش سهل‌الوصول عبارتند از: ذرات مواد آلی، کربن زیست‌توده میکروبی، کربن محلول، کربن قابل معدنی شدن و کربن قابل استخراج با عصاره‌گیرهای مختلف) گزارش شده است (۱۵ و ۷). وجود مواد آلی بیشتر، در خاک جنگلی به دلیل عدم خاکورزی و دوره طولانی‌تر رشد ریشه از جمله دلایل بالا بودن تنفس ناشی از بستره در خاک جنگلی نسبت به خاک کشاورزی است. ابراهیم زاد و همکاران (۱۳) گزارش کردند کاهش تنفس ناشی از بستره در کاربری‌های مختلف (مرتع، باغ سیب و زراعت) و نیز با افزایش عمق خاک در این کاربری‌ها، ناشی از کاهش موادآلی خاک می‌باشد و همچنین بیان داشتند که در تنفس ناشی از بستره اکثراً ریزجانداران غیربومی خاک دخیل بوده که این ریزجانداران در زیست توده میکروبی خاک نقش چندانی ندارند و پس از تمام شدن ماده غذایی سهل‌الوصول مانند گلوکز جمعیت آنها به شدت کاهش می‌یابد. کربوهیدرات‌های محلول در آب داغ ترکیبات غذایی سهل‌الوصول بوده و تحریک کننده تنفس هستند (۱۳).

با افزایش دما رشد ریزجانداران افزایش یافته و سوبسترا را با سرعت بیشتری دگرگون می‌سازد پس در هر دو خاک تنفس ناشی از بستره افزایش یافت (۳۰). با افزایش دما در محدوده خاص واکنش های آنزیمی و شیمیایی درون سلول با سرعت بیشتری انجام شده و رشد و فعالیت متابولیکی افزایش می‌یابد (۸). در هر حال، در دمای بالاتر از حد معین آسیب غیرقابل جبرانی به اجزای سلولی وارد می گردد. ملیلو و همکاران (۲۰) نشان دادند افزایش فعالیت میکروبی و رهاسازی دی‌اکسید کربن با افزایش دما در طول زمان خواباندن، رابطه مستقیم و خطی ندارند بلکه در ابتدا افزایش و سپس روند کاهشی دارد تا اینکه دوباره به همان تنفس معمولی خاک بر می‌گردد. پژوهندگان چندین دلیل برای این مساله ذکر کردند: ۱) به دلیل متفاوت بودن محدوده دمای بهینه رشد و فعالیت ریزجانداران خاک، افزایش دما ممکن است ترکیب جامعه میکروبی را تغییر دهد و متعاقب آن با از دست رفتن برخی گروه‌های میکروبی، آزادسازی کربن خاک کاهش می‌یابد (۶). ۲) و یا ممکن است به دلیل اتمام مواد آلی ساده تجزیه شونده باشد که سبب تحریک اولیه فعالیت میکروبی و کاهش میزان تنفس شده بود (۱۷). وجود فاز تأخیر در دمای بالاتر از دمای مطلوب جهت رشد باکتری می‌تواند به دلیل از دست رفتن فعالیت متابولیکی سلول در دماهای بالا باشد که این موضوع باعث به تأخیر افتادن فرآیند تقسیم سلولی می‌گردد تا زمانی که باکتری خود را با شرایط دمایی موجود سازگار کرده و رشد خود را مجددا آغاز کند. از طرف دیگر تأخیر در رشد باکتری در دمای ۱۵ درجه سلسیوس به دلیل کاهش فعالیت آنزیم های اختصاصی است که باعث می شود مرحله لگاریتمی رشد باکتری طولانی شود (۱۸).

نتیجه‌گیری

نتایج کلی این پژوهش بیانگر کارایی مطلوب روش سطح پاسخ در مدل‌سازی تنفس ناشی از بستره در هر دو خاک بود. با این حال مقادیر کمی تنفس در خاک جنگلی تقریباً دو برابر خاک زراعی بود. نکته اساسی در مدل‌سازی تنفس ناشی از سوبسترا تأثیر متفاوت متغیرهای مستقل در دو نوع خاک است به نحوی که در خاک جنگلی مقدار گلوگز و دما به عنوان متغیرهای اساسی در افزایش مقدار تنفس ناشی از سوبسترا بودند در حالی‌که در خاک زراعی متغیرهای دما و زمان تعیین کننده‌تر بودند. به نظر می‌رسد افزایش ماده آلی سهل الوصول در خاک جنگلی نسبت به خاک زراعی عاملی بسیار مهم در تفاوت رفتار دو خاک بوده و این نتیجه به طور دقیق بیانگر نقش مواد آلی در افزایش کیفیت خاک و سلامت میکروبی آن است.

منابع

1- Aghaeinejad-Meybodi A., Ebadi A., Shafiei S., Khataee A., and Rostampour M. 2015. Degradation of antidepressant drug fluoxetine in aqueous media by ozone/H_2O_2 system: process optimization using central composite design. Environmental Technology, 36(12): 1477-88.

2- Anderson T.H., and Domsch K.H. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO 2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. Soil Biology and Biochemistry, 22(2): 251-255.

3- Beare M.H., Neely C.L., Coleman D.C., and Hargrove W.L. 1990. A substrate-induced respiration (SIR) method for measurement of fungal and bacterial biomass on plant residues. Soil Biology and Biochemistry, 22: 585-594.

4- Beheshti A., Raiesi F., and Golchin A. 2011. The Effects of Land Use Conversion from Pasturelands to Croplands

on Soil Microbiological and Biochemical Indicators. Journal of Water and Soil, 25(3): 548-562. (In Persian with English abstract)
5- Bossio D.A., Scow K.M., Gunapala N., and Graham K.J. 1998. Determinants of soil microbial communities: effects of agricultural management, season, and soil type on phospholipids fatty acid profiles. Microbial Ecology, 36(1): 1-12.
6- Bradford M.A., Davies C.A., Frey S.D., Maddox T.R., Melillo J.M., Mohan J.E., Reynolds J.F., Treseder K.K., and Wallenstein M.D. 2008. Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature. Ecology Letters, (12): 1316-1327.
7- Campbell C.A., Lafond G.P., Biederbeck V.O., Wen G., Schoenau J., and Hahn D. 1999. Seasonal trends in soil biochemical attributes: effects of crop management on a Black Chernozem. Canadian Journal of Soil Science, 79(1): 85-97.
8- Carter M.R., and Gregorich E.G. 2008. Soil Sampling and Methods of Analysis (2nd ed). CRC Press. Boca Raton, FL. P.1204.
9- Cooper V.S., Bennett A.F., and Lenski R.E. 2001. Evolution of thermal dependence of growth rate of Escherichia coli populations during 20,000 generations in a constant environment. Evolution, 55(5): 889-896.
10- Dick R.P. 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment, PP: 107-124.
11- Doran J.W., and Parkin T.B. 1994. Defining and assessing soil quality, In: Defining soil quality for a sustainable Environment, edited by Doran, j W., DC. Coleman, DF. Bezdicek, and B.A. Stewart, soil sci, soc. Am. Special publication, NO.35, Madison, Wisconsin, USA. Pp: 3-21.
12- Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek, D.F., and Stewart B.A. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special Publication No. 35, Soil Science Society of America, Inc. and the American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI
13- Ebrahimzad S.A., Aliasgharzad N., and Najafi N. 2013. Impressionability of Some Soil Ecophysilogical Indices by land Use Changes in Suldoz Plain (Naqadeh, West Azarbaijan). Agricultural Science and Sustainable Production, 23: 41-56. (In Persian with English abstract)
14- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods. PP: 383-411.
15- Haynes R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. Advances in Agronomy, 85: 221-68.
16- Horwath W.R., and Paul E.A. 1994. Microbial Biomass. In: Weaver RW, Angle JS, Bottomley PS (eds) Methods of soil analysis, part 2. Microbiological and biochemical properties. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp 753–773.
17- Kirschbaum M.U. 2004. Soil respiration under prolonged soil warming: are rate reductions caused by acclimation or substrate loss?. Global Change Biology, 10(11): 1870-1877.
18- Lamoochi R., and Safahieh A. 2014. Effect of environmental factors of temperature, salinity and level of heavy metal lead on growth of lead resistant bacterium isolated from Persian Gulf sediments. Journal of Aquatic Ecology, 3(4): 60-51. (In Persian with English abstract)
19- McLean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Methods of soil analysis, edited by Page, A. L., Part 2. Chemical and microbiological properties, Madison, Wisconsin, USA. 199-224.
20- Melillo J.M., Steudler P.A., Aber J.D., Newkirk K., Lux H., Bowles F.P., Catricala C., Magill A., Ahrens T., and Morrisseau S. 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. Science, 298(5601): 2173-2176.
21- Mousavi S.M., Niaei A., Salari D., Panahi P.N., and Samandari M. 2013. Modelling and optimization of Mn/activate carbon nanocatalysts for NO reduction: comparison of RSM and ANN techniques. Environmental Technology, 34(11): 1377-1384.
22- Myers R.H., and Montgomery D.C. 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments, (2end ed.), John Wiley and Sons, UK.
23- Nannipieri P., Ascher J., Ceccherini M., Landi L., Pietramellara G., and Renella G. 2003. Microbial diversity and soil functions. European Journal of Soil Science, 54(4): 655-670.
24- Nelson D.W., and Sommers L. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, Pp: 539-579.
25- Padmavathi T. 2015. Optimization of phosphate solubilization by Aspergillus niger using plackett-burman and response surface methodology. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 15(3): 781-93.
26- Pratt P.F., and Chapman H.D. 1961. Methods of Analysis for Soils, Plants and Water. Univerisity of California.
27- Raiesi F., and Asadi E. 2006. Soil microbial activity and litter turnover in native grazed and ungrazed rangelands in a semiarid ecosystem. Biology and Fertility of Soils, 43(1): 76-82.
28- Rajendran A., Meikandhan T., and Viruthagiri T. 2007. Statistical evaluation of medium components by Plackett-

Burman experimental design and kinetic modeling of lipase production by Pseudomonas fluorescens. Indian Journal of Biotechnology, 6: 469- 478.

29- Rasouli-Sadaghiani M.H., Karimi S., Khodaverdiloo H., Barin M., and Banj-Shafiei A. 2016. Impact of forest ecosystem land use on soil physico-chemical and biological indices. Iranian Journal of Forest, 8(2): 167-178. (In Persian with English abstract)

30- Sharifi Z., and Safari Sinegani A.A. 2015. Interactions between Soil Organisms and Global Climate Change and Application of Meta-Analysis in its Interpretation: A Systematic Review. Journal of Human and Environment, 13(3): 43-66. (In Persian with English abstract)

31- Sheklabadi M., Khademi H., Karimian Eghbal M., and Nourbaksh F. 2007. Effects of Climate and Long-Term Grazing Exclusion on Selected Soil Biological Quality Indicators in Rangelands of Central Zagros. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 11(41): 103-116. (In Persian with English abstract)

32- Swetha S., Varma A., and Padmavathi T. 2014. Statistical evaluation of the medium components for the production of high biomass, a-amylase and protease enzymes by Piriformospora indica using Plackett–Burman experimental design. Biotechnology, 4: 439–445.

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 5, Nov.-Des. 2018, p. 919-930

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۷، ص. ۹۳۰-۹۱۹

Mathematical Modeling and Comparison of the Substrate Induced on Forest and Agricultural Soils

M. Barin[1]*- E. Ehsan-Malahat[2]- F. Asadzadeh[3]

Received: 18-12-2017
Accepted: 29-07-2018

Introduction: Soil is a complex and dynamic biological system, and it still is difficult to determine the composition of microbial communities in soil. Most soil microorganisms are dormant, so their rate of respiration is low. However, their respiration can be stimulated by adding an easily decomposable substrate. Also, by adding a simple organic matter, respiration may rapidly increase to a maximum and remains at a constant rate for more than 4 h. Glucose is commonly used as a substrate because most soil microorganisms can readily utilize it as a carbon source. The substrate-induced respiration (SIR) method was modified and adapted to measure fungal, bacterial and total microbial contributions to glucose-induced respiration and the potentially active microbial biomass on decaying plant residues of different composition. Decomposing residues from natural and agricultural ecosystems were chopped and sieved to include the >1 mm fraction for routine SIR analyses on a continuous flow-through respiration system. Substrate induced respiration is a main factor for the assessment of the soil microbial activity. This technique is already used widely in soil microbial studies. Different factors such as the source of carbon, temperature and incubation may play a significant role in the amount of SIR. Therefore, optimizing the test conditions is one of the important criteria for SIR determination. For this purpose, statistical methods such as central composite design (CCD) and response surface method can be used as a useful tool for determining optimal conditions. This study was carried out to model and compare the effect of carbon source (glucose), temperature and incubation time on the SIR of forest and agricultural soils.

Materials and Methods: In this research, 40 experiments were conducted for two soil types including agricultural soil (with relatively low organic matter content) and forest soil (with relatively high organic matter content). Soil samples were collected from the topsoil (0-20 cm) layer. In the laboratory, all visible roots were removed and the soil samples were divided into two parts. One part was kept in plastic bottles at $4^{\circ C}$ for SIR analysis. And the rest was air dried in the shade at laboratory temperature for chemical and physical analysis. Electrical conductivity (EC) and pH were determined in saturated soil extract and organic carbon persent (%OC) was determined by di-chromate oxidation. Soil texture was determined using a Bouyoucos hydrometer in a soil suspension. Response surface methodology based on the central composite design was applied in modeling procedure. Different ranges of the independent variables including glucose (0.5-10 mg g^{-1}), incubation time (1-10 hr), and temperature (15-30$^{\circ C}$) were used in central composite design experiments. Totally, 40 experiments based on the coded values of the independent variables were conducted for two soils.

Results and Discussion: Experimental results indicated that the SIR in forest soil is two times greater than the agricultural soil, which may be related to the higher organic matter content and more microbial activity in this soil. Results also revealed the efficiency of the central composite design in predicting the SIR of forest (R^2= 0.823) and agricultural (R^2=0.919) soils. Among the three independent variables, the linear effect of temperature on the SIR were significant for both soils. However, the substrate (glucose) content has more significant effect in forest soil in comparison with agricultural soil which may be associated with the higher decomposable organic matter content of the forest soil. Glucose enhancement didn't have significant effect on SIR alteration rate which can be attributed to low organic matter content in agricultural soil. Totally, with increasing time and temperature, the amount of SIR was significantly increased, however with increasing glucose, SIR amount was not significantly increased especially in the agricultural soil. In the forest soil, the process of SIR changes is clearly distinct in response to independent variables compared to agricultural soil. Maximum levels of the SIR in forest soil is clearly associated to the highest time and glucose levels. This indicates that increasing glucose and sufficient time in the forest soil, which contains high amounts of digestible organic matter, can stimulate microorganisms to decompose more organic matter and it outcome is increasing SIR.

Conclusion: This study indicated the high efficiency of response surface methodology in SIR modeling for both forest and agricultural soils. However, the quantitative amounts of SIR were very different in two soils. The amounts of SIR in the forest soil were almost twice relative to agricultural soil. In the forest soil, the amounts of glucose and temperature were as the main variables in increasing SIR, while the temperature and time variables

1, 2 and 3- Assistant Professor, Former M.Sc. Student and Associate Professor of Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Respectively
(*- Corresponding Author Email: m.barin@urmia.ac.ir)

were more determinant in agricultural soil on it.

Keywords: Microbial community, Response surface, Soil quality, Soil respiration