بررسی قابلیت بعد فراکتالی خاکدانه‌ها در ارزیابی مدیریت‌های متفاوت خاک

علی عطایی[1]، منوچهر گرجی و یحیی پرویزی

دانشجوی دکتری دانشگاه تبریز؛ Aliataee.kh@gmail.com

دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه تهران؛ mgorji@ut.ac.ir

استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی کرمانشاه؛ yparvizi1360@gmail.com

دریافت: 92/9/17 و پذیرش: 93/5/21

چکیده

تخریب منابع آب و خاک در بسیاری از مناطق، از جمله نگرانی‌های تولید کنندگان بوده و مدیریت خاک در مزارع زراعی تنها گزینه‌ای است که انسان از طریق آن می‌تواند باعث تشدید یا جلوگیری از تخریب خاک گردد. نتایج گزارش شده توسط خاکشناسان، حاکی از قابلیت و پتانسیل نظریه فراکتال در تبیین و مدل‌سازی ساختار سامانه خاک و درک و تخمین فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن است. در این پژوهش اثر اقدامات مدیریتی مختلف بر ویژگی-های فیزیکی خاک با استفاده از هندسه فراکتالی بررسی شده است. بدین منظور، 14 مزرعه دیم با عملیات مدیریتی متفاوت واقع در حوضه آبخیز مِرگ در جنوب شرقی کرمانشاه، مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین شرایط مدیریتی حاکم بر مزارع آزمایشی، از داده‌های استحصال شده از مطالعه میدانی و برای تعیین خصوصیات فیزیکی خاک از نمونه‌های جمع‌آوری شده از سطح مزرعه استفاده گردید. نتایج نشان داد که بُعد فراکتالی خاکدانه‌ها عامل گویایی در انعکاس تأثیر اقدامات مدیریتی بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌باشد. خاکدانه‌های پایدار و درنتیجه بعد فراکتالی کمتر در مزارعی مشاهده شد که در آن‌ها مدیریت‌های مناسب همانند افزودن کود دامی، کاهش عملیات خاک‌ورزی و مدیریت نظام تناوب حاکم است. در مقابل خاکدانه‌های ناپایدار، خردشوندگی بیشتر و بعد فراکتالی بزرگتر خاکدانه‌ها، منعکس کننده شرایط نا به سامان مدیریتی همانند خاک‌ورزی متراکم و شدید، شخم در جهت شیب و مدیریت نادرست بقایای گیاهی می‌باشد. سامانه مدیریتی جنگل- زراعی بهترین الگوی مدیریتی در اراضی مورد مطالعه است و به طور معنی‌داری باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک گردیده است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت خاک، توزیع اندازه خاکدانه‌ها، خردشوندگی

نویسنده مسئول، آدرس: تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی علوم خاک

مقدمه

بخش کشاورزی، ضمن اینکه بزرگترین عامل تخریب کننده منابع طبیعی است، در عین حال می‌تواند بیشترین نقش را در حفاظت آن بر عهده گیرد. کاربری اراضی از مهم‌ترین روش‌های دخالت انسان در فرایندهای طبیعی است که از طریق آن باعث افزایش یا کاهش تخریب خاک می‌گردد (زی‌چنگ؛ 2011). سامانه‌های زراعی مناسب، به دلیل بهبود ساختمان خاک از طریق سازوکارهایی همانند تقویت خاکدانه‌ها به وسیله ریشه-های مویین و هیف‌های قارچی، تحریک تولید کربوهیدرات‌های میکروبی یا اصلاح روابط آب-خاک تاثیرات مهمی را در ویژگی‌های فیزیکی خاک ایجاد می‌کند (گریگوری و همکارن؛ 2012).

در طول چند سال اخیر انرژی و چالش‌های ذهنی فراوانی در رابطه با مطالعه تأثیرات شخم و سایر اقدامات مدیریت خاک در اراضی زراعی بر تولیدات گیاهی صرف شده است. نتایج گزارش شده توسط خاکشناسان، حاکی از قابلیت و پتانسیل نظریه فراکتال در تبیین و مدل‌سازی ساختار خاک و درک و تخمین فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن است (ریو و اسپوزیتو، 1991؛ فیلگوریا و همکاران، 1999؛ سپاس‌خواه و همکاران، 2000؛ پیرمرادیان و همکاران، 2005). بُعد فراکتالی، سنجش ترکیبی[1] از بی‌نظمی و خردشوندگی، در امتداد تمام مقیاس‌های مکانی دربردارنده یک جسم، ارائه می‌دهد (گریگوری و همکاران؛ 2012). دلیل اصلی برای استفاده از شاخص فراکتالی، ثابت مقیاس نبودن احتمال شکست خاکدانه‌ها می‌باشد و ایده اصلی روش فراکتالی، بیان مقیاس‌گذاری بین اندازه یک ذره و تعداد آن ذره می‌باشد که توان تابع نمایی این رابطه می‌تواند به عنوان متغیر ساختمانی که به سایر ویژگی‌های خاک نیز مربوط است، استفاده شود (کارسو و همکاران؛ 2011). کمی کردن ساختمان خاک بر مبنای تئوری فراکتال، یکی از جنبه‌های مهم ارزیابی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط زیست[2] می‌باشد. تغییر در اقدامات مدیریتی باعث تغییر ساختمان خاک می‌گردد و این نیز به نوبه خود می‌تواند بر چگونگی تأثیر اقدامات انجام شده مؤثر باشد (زی‌چانگ؛ 2011).

در بیشتر مطالعات، سامانه زراعی تأثیر معنی-داری بر بعد فراکتالی نشان داده است (پرفکت و کی؛ 1991، راسیا و همکاران؛ 1993، فیلگوریا و همکاران؛ 1999). یانگ و کراوفورد(1991) کاربرد بعد فراکتال جرمی را برای کمی کردن غیریکنواختی ناشی از شخم در خاک بررسی کردند و یافتند که انجام شخم، بعد فراکتالی را از 2/75 به 2/95 افزایش می‌دهد. اقبال و همکاران (1993) توزیع اندازه خاکدانه‌ها را در خاک‌هایی که با چهار روش مختلف شخم (شامل چیزل، دیسک، بدون شخم و شخم معمولی) و دو تناوب گیاهی (ذرت-سویا-ذرت و سویا-ذرت-سویا) مدیریت می‌شدند را بررسی کردند. مقادیر بعد فراکتالی خردشوندگی توزیع اندازه خاکدانه‌ها از 2/281 تا 3/306 تغییر کرد. پرفکت و بلیونس (1997) نشان دادند که پارامترهای فراکتالی نسبت به تیمارهای کشت و زرع حساس هستند. شخم برگردان خردشوندگی خاکدانه‌ها را در مقایسه با سامانه بدون شخم افزایش می‌دهد. سپاس‌خواه و همکاران (2000) بعد فراکتالی تعداد-اندازه و بعد فراکتالی جرم-اندازه و میانگین وزنی قطر را به عنوان معیاری از پایداری خاکدانه‌ها با هم مقایسه و مشاهده کردند که ابعاد فراکتالی با افزایش کاربرد مالچ کاهش می‌یابد که مشخص کننده افزایش پایداری خاکدانه‌ها در نتیجه افزودن مالچ می‌باشد.

زیر و رو کردن خاک توسط شخم برگردان و خرد کردن قطعات درشت‌تر توسط دیسک خردشوندگی بیشتر خاکدانه‌ها و در نتیجه مقادیر بالای بعد فراکتالی را سبب شده است. شخم چیزل به دلیل نازک بودن تیغه‌ها و فاصله کم بین آن‌ها تنها 25% سطح خاک را تخریب می‌کند، و باعث خردشوندگی کمتر نسبت به شخم برگردان می‌شود (پیرمرادیان و همکاران؛ 2005). احمدی و همکاران (2011) و کانتون و همکاران (2009)، به این نتیجه رسیدند که بعد فرکتالی خردشوندگی (Dn) و جرمی (Dt) حاصل از داده‌های الک تر همبستگی مثبت و معنی‌داری با عامل فرسایش‌پذیری، فرسایش پاشمانی و فرسایش بین شیاری داشته، به نحوی که آن‌ها بیان داشتند که پیش‌بینی فرسایش از این ابعاد فراکتالی می‌تواند قابل اعتمادتر باشد.

تاکنون تحقیقات فراوانی در رابطه با تأثیر تیمارهای مدیریت خاک بر شاخص‌های ارزیابی خاکدانه-ها صورت گرفته، که بیشتر این مطالعات در مزارع تحقیقاتی بوده است. در تحقیق حاضر سعی شده است که تأثیر شرایط و عوامل مدیریتی که به صورت طولانی مدت در مزارع دیم کوچک مقیاس استان کرمانشاه از سوی کشاورزان اعمال می‌شود، بر شاخص‌های ارزیابی خاکدانه بررسی گردد.

---

1. Combined measure
2. Ecological environment

مواد و روش‌ها

مشخصات کلی منطقه

حوضه آبخیز مِرگ با وسعتی معادل 14000 هکتار دارای مزارعی با زراعت دیم و آبی، در 20 کیلومتری جنوب شرقی کرمانشاه و در مختصات "45 و'4 و°47 تا "18 و'22 و °47 طول شرقی و "38 و'0 و °34 تا "31 و '9 و °34 عرض شمالی با اقلیم نیمه مرطوب سرد قرار گرفته است. متوسط ارتفاع حوضه 1666 متر می‌باشد. تنوع کشت و الگوهای مدیریتی متفاوت از نظر سامانه خاک‌ورزی، تناوب زراعی، و مدیریت بقایای گیاهی در این حوضه وجود دارد که معرفی از مدیریت-های رایج در دیم‌زارهای منطقه و کشور می‌باشد.

تعیین متغیرهای مدیریتی مزارع

در این پژوهش 14 مزرعه کشاورزی با عملیات مدیریتی متفاوت از نواحی مختلف حوضه مورد مطالعه، انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های عمومی این مزارع در جدول 1 آمده است. برای بررسی اثر یک شاخص مدیریتی بر شرایط مزارع بایستی سایر شاخص‌های مدیریتی و همچنین ویژگی‌های فیزیکی خاک تا حد ممکن یکسان باشند، ولی از آنجایی که این پژوهش در شرایط طبیعی و در مزارعی که مدیریت آن‌ها در اختیار صاحبان مزارع و روستاییان است، انجام گردیده، یافتن چنین مزارعی مشکل می‌باشد. متغیرهای مدیریتی بررسی شده شامل این موارد است:

الف) عرصه مالکیت یا مساحت مزارع؛ با استفاده از تصاویر رقومی و تأیید آن‌ها در بررسی‌های میدانی انجام شد. ب) کوددهی دامی؛ با پرسش مستقیم از صاحبان اراضی در قطعات نمونه‌برداری تعیین و بر حسب متوسط میزان سالانه مصرف کود دامی به صورت تن در هکتار در سال مشخص گردید. ج) فراوانی بغولات و غلات در طول دوره تناوب؛ با تقسیم تعداد سال‌های کشت بغولات یا غلات بر تعداد سال دوره تناوب محاسبه شد.

د) اجرا یا عدم اجرای آیش زمستانه؛ با پرسش از صاحبان اراضی تعیین شد. در این سامانه در فصل پاییز به منظور از بین بردن آفات و ذخیره رطوبت برای کشت بهاره در زمین یک شخم عمیق زده می‌شود. ه) مدیریت بقایای محصول به صورت سه متغیر 1) وجود یا عدم وجود پس‌چر در مزارع (که برای وجود پس‌چر عدد 1 و در نبود آن عدد 0 یادداشت شد)، 2) برداشت کاه و کلش از مزارع (درصدی از بقایا که در زمان برداشت محصول جمع آوری می‌شود)، و 3) سوزاندن بقایای محصول (برای وجود سوزاندن عدد 1 و در نبود آن عدد 0)، کمی شد. و) مدیریت سامانه خاک‌ورزی نیز در قالب سه متغیر کمی شد:

1) متغیر انرژی که معرف مصرف انرژی ماشین در مزرعه است و به عنوان تابعی از میزان تردد ماشین آلات کشاورزی و تعداد دفعات به هم خوردگی خاک، بر حسب مگاژول در هکتار در سال می‌باشد (بیلی و همکاران، 2003؛ فرارو و گرسا، 2007).

2) متغیر خاک‌ورزی که معرف و مبین اثر ادوات مختلف خاک‌ورزی و کشت در تخریب خاکدانه‌ها و میزان پایائی بقایای محصول و مخلوط شدن آن‌ها با خاک به وسیله هر روش خاک‌ورزی است (بیلی و همکاران، 2003؛ فرارو و گرسا، 2007). و

3) جهت شخم که انطباق یا عدم انطباق جهت شخم با جهت شیب نشان می‌دهد.

ز) تخریب خاک: برای ارزیابی فرسایش، از روش بررسی کارشناسی و کیفی و بر مبنای مشاهده نوع و شدت فرسایش انجام شد (زاکار؛ 1982). کلاس‌های فرسایش و توصیف آنها در جدول 2 آمده است.

نمونه‌برداری و آزمایشات

برای تعیین شرایط فیزیکی خاک، در سطح هر مزرعه سه نمونه خاک از لایه شخم، به صورت کاملاً تصادفی تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. به منظور اندازه-گیری هدایت هیدرولیکی اشباع از روش بار ثابت (کلوت؛ 1986)، برای تعیین کربنات کلسیم معادل از روش حجم سنجی (دریمانیس؛ 1962)، برای جرم مخصوص ظاهری خاک از روش‌استوانه (بلک و هارتیج؛ 1986) استفاده شد. آزمایش نفوذ با استفاده از روش استوانه‌های مضاعف و به طور میدانی در مزارع مورد مطالعه انجام گردید. کربن آلی به روش والکلی و بلک (نلسون؛ 1996)، توزیع اندازه ذرات به روش گی و اور (2002) و با استفاده از هیدرومتر بایکاس و توزیع اندازه‌ی ذرات شن (ذرات بزرگتر از 0/05 میلی متر) با استفاده از سری الک تعیین شد.

برای مشخص کردن توزیع اندازه خاکدانه‌ها از روش الک تر و الک خشک استفاده شد. به این ترتیب که در الک خشک، پس از عبور خاک‌ها از الک هشت میلی-متری، در یک سری از الک‌ها با قطرهای 4/75، 2، 1، 0/5 و 0/25 میلی‌متر به مدت 30 ثانیه و دامنه نوسان 2 میلی-متر شیک شدند (احمدی و همکاران؛ 2011).

در روش الک تر، نخست وزن خاکدانه‌های هوا خشکی که باید بر روی هر الک در سری قرار می‌گرفت، محاسبه گردید. سپس برای جلوگیری از تخریب خاکدانه-ها تحت تأثیر حبس شدن هوا، نمونه‌های قرار گرفته بر

جدول 1- مشخصات عمومی مزارع

کد* مزرعه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از دریا (m)	شیب %	سنگریزه %	نفوذپذیری (cm/hr)	آهک %	کربن آلی %	چگالی ظاهری (g/cm^3)	رس %	سیلت %	شن %	کلاس بافت
Fire	700391	3771575	1542	2	5	9/75	35/75	0/78	1/25	38	53/8	8/2	لوم رس سیلتی
R_1T_1	700709	3768340	1601	4	20	8/4	32	1/74	1/03	36	49	15	لوم رس سیلتی
Ag2	706660	3772339	1593	2	15	9/42	30/25	2/27	1/06	40/34	46	13/66	رس سیلتی
R_1T_0	709874	3770019	1619	1	5	6/6	27/25	2/6	0/86	43	51	6	رس سیلتی
R_0P_0	699666	30780092	1637	13	20	8/4	27/5	0/86	1/15	32	57	11	لوم رس سیلتی
Ag1	704376	3773460	1592	2	40	12	22/75	1/94	1/15	33/67	47/86	18/47	لوم رس سیلتی
R_1P_0	705589	3775053	1630	10	5	8/74	56/25	0/99	1/27	47	44/67	8/33	رس سیلتی
R_1P_1	706332	3774904	1665	9	45	13	9	2/01	1/12	46	45/67	8/33	رس سیلتی
R_0T_0	699614	3772597	1524	3	5	9/6	38	1/61	1/08	38	49	13	لوم رس سیلتی
R_0T_0M1	693825	3775680	1488	4	5	12	40/75	0/51	1/15	39	45/5	15/5	لوم رس سیلتی
T_0S_0	698674	3772722	1518	1	5	7/2	27	0/7	1/2	34/33	57/84	7/83	لوم رس سیلتی
R_0T_02	700276	3776815	1549	8	10	13/8	43/25	0/82	1/05	38/33	47/34	14/33	لوم رس سیلتی
R_0T_0S	704658	3773925	1582	4	30	9	38	0/48	1/22	37/33	52/34	10/33	لوم رس سیلتی
$R_1S_1^0$	699378	3776350	1521	3	5	7/5	29	2/45	1/16	30	57/33	12/67	لوم رس سیلتی

* Fire: مدیریت آتش سوزی، R : تناوب، S: مدیریت بقایا، T: سامانه خاک‌ورزی، Ag: سامانه جنگل-زراعی، M: استفاده از کود دامی، P: انجام شخم در جهت شیب

0 برای شرایط محدود کننده یک عامل مدیریتی، و 1 برای شرایط مفید عامل مدیریتی استفاده شده است.

جدول 2- وضعیت تخریب خاک و کلاس‌های مربوطه

وضعیت فرسایش	کلاس فرسایش
عدم وجود اشکال مختلف فرسایش و یا سله سطحی	صفر
وجود علائم فرسایش سطحی و پاشمان با شدت کم تا متوسط	1
وجود علائم فرسایش سطحی شدید با وجود شیارهای سطحی	2
فرسایش به شکل خندق با تراکم کم تا متوسط	3
فرسایش شدید در بیشتر اشکال آن و ایجاد شرایط هزاردره	4

ویژگی‌های مدیریتی مزارع نیز در جدول 3 آمده است.

جدول 3- مشخصات مدیریتی مزارع

کد مزرعه *	مساحت (هکتار)	وضعیت فرسایش خاک	کود دامی (تن در هکتار در سال)	فراوانی بغولات در تناوب	فراوانی غلات در تناوب	آیش زمستانه	پس چر	برداشت بقایا (درصد)	سوزندان بقایا	شاخص انرژی (مگا ژول در هکتار در سال)	متغیر خاک ورزی	جهت شخم	تراکم دام
R_1T_0	2	0	10	0/5	0/5	1	1	50	1	1624	0/90	0	1/35
R_0P_0	0/6	3	0	0/2	0/8	0	1	50	0	952	0/56	1	0/50
Ag1	3	0	15	1	0	1	1	0	0	168	0	1	1/50
R_1P_0	0/5	3	0	0/5	0/5	1	1	50	0	1008	0/70	1	0/92
R_1P_1	1	1	5	0/5	0/5	1	1	50	0	1008	0/70	0	0/92
R_0T_0M	0/9	0	20	0/3	0/3	1	1	70	0	1624	0/90	1	0/81
R_0T_01	0/9	1	0	0/2	0/8	1	1	40	0	1624	1/00	1	0/80
T_0S_0	3	0	0	0/2	0/8	1	1	50	1	1624	0/88	1	0/81
R_0T_02	1	2	0	0/3	0/7	1	1	50	0	1624	0/86	1	1/5
$R_0T_0S_0$	3	0	0	0	1	0	1	70	1	1624	1	1	0/92
R_1S_1	2	1	0	0/4	0/4	1	0	30	0	1008	0/65	0	0/35
Ag2	2	0	10	0/3	0	0	1	0	0	168	0	1	2/00
R_1T_1	1/5	0	0	0/5	0/5	1	0	50	0	800	0/50	0	0/9
Fire	2	1	0	0/3	0/7	1	0	0	1	1624	0/77	0	0/68

R_1: تناوب یک سال در میان غلات و بغولات ، R_0: حضور بغولات در تناوب کمتر از یک سال در سه سال، T_1: حداقل خاک‌ورزی، T_0: خاک‌ورزی شدید، P_1: عملیات شخم در جهت عمود بر شیب، P_0: عملیات شخم در جهت شیب، S_0: برداشت 50% و بیشتر بقایای گیاهی همراه با پس چر و یا سوزاندن، S_1: برداشت 30% و کمتر بقایا و نبود پس‌چر و سوزاندن، M: افزودن قابل توجه کود دامی به مزرعه، Ag1 و Ag2: مزارع تحت مدیریت سامانه جنگل- زراعی، Fire: مزرعه‌ای که در آن سوزاندن بقایا به صورت هرساله و شدید صورت می‌گیرد.

روی هر الک با جریان بخار سرد اشباع شدند. سپس سری الک را در آب غوطه‌ور کرده و در داخل آب به مسافت 35میلی‌متر و مدت 10 دقیقه شیک شدند (پرفکت و کی؛ 1991). در نهایت خاکدانه‌های مانده بر روی هر الک، پس از خشک نمودن در دمای 105 درجه سانتی‌گراد، توزین شدند. برای تفکیک بخش شن، پس از تیمارمواد به جا مانده از الک تر با محلول هگزا متافسفات سدیم، ذرات ریزتر از قطر الک مربوطه با فشار آب شسته شده و ذرات درشت بر جا مانده توزین شدند. برای تعیین جرم ظاهری خاکدانه‌ها از روش چپیل (1950) استفاده شد.

محاسبات

میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (شیرازی و بورسما (1984).

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \quad (1)$$

$$GMD = exp(\sum_{i=1}^{n} w_i \log x_i) \quad (2)$$

MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر)، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر)، x_i: میانگین قطر خاکدانه‌ها در هرگروه قطری (میلی‌متر)، w_i: جزؤ وزنی خاکدانه‌ها در آن گروه قطری، n: تعداد الک به کار رفته در آزمایش می‌باشد.

بعد فراکتالی خاکدانه‌ها با استفاده از رابطه ریو و اسپوزیتو (1991) و همچنین رابطه تایلر و ویت‌کرافت (1992) به دست آمد. رابطه ریو و اسپوزیتو (1991) به صورت زیر است:

$$N_{(>x_i)} = K_n (x_i)^{-D_n} \quad (3)$$

که در اینجا $N_{(>x_i)}$ تعداد تجمعی خاکدانه‌های بزرگتر از x_i، D_n و K_n به ترتیب شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون N در مقابل x_i در مقیاس لگاریتمی می‌باشد. بُعد فراکتالی به دست آمده از این معادله (D_n) به عنوان بُعد فراکتالی خردشوندگی شناخته شده است (احمدی و همکاران؛ 2011). کمیت متناسب با تعداد خاکدانه‌ها $N(d_i)$ در هر کلاس اندازه‌ای برمبنای رابطه (4) (ریو و اسپوزیتو، 1991) به دست می‌آید:

$$N_{(>x_i)} = \sum N(d_i) \qquad N(d_i) = \frac{M(d_i)}{d_i^3 \rho_i} \qquad i = 0,1,2,\dots,n \quad (4)$$

$M_{(di)}$: جرم خاکدانه‌ها (گرم)، d_i: قطر میانگین خاکدانه‌ها (میلی‌متر) و ρ_i:چگالی خاکدانه‌ها در کلاس اندازه i (گرم بر میلی‌متر مکعب). کلاس صفر بزرگترین اندازه خاکدانه‌ها در نظر گرفته می‌شود. $\frac{M(d_i)}{d_i^3 \rho_i}$ یک فاکتور هندسی وابسته به شکل خاکدانه‌ها است که تعادل بین $d_i^3 \rho_i$ و متوسط جرم هر خاکدانه را که در اغلب فرض‌ها نادیده گرفته شده و برای تمام اندازه‌ها یکسان فرض می‌شود را حفظ می‌کند (ریو و اسپوزیتو؛ 1991). رابطه تایلر و ویت‌کرافت (1992) به این صورت ارائه شده است:

$$\frac{M(x<X)}{M_t} = \left(\frac{x}{XL}\right)^{3-D_T} \quad (5)$$

در آن $M(x < X)$ جرم تجمعی از خاکدانه‌های باقی مانده بر روی هر غربال و جمع شده از پایین به بالا در سری غربال‌ها (گرم)، M_t کل جرم خاکدانه‌ها (گرم)، XL قطر بزرگترین خاکدانه (میلی‌متر) و D_T بعد فراکتال جرمی است.

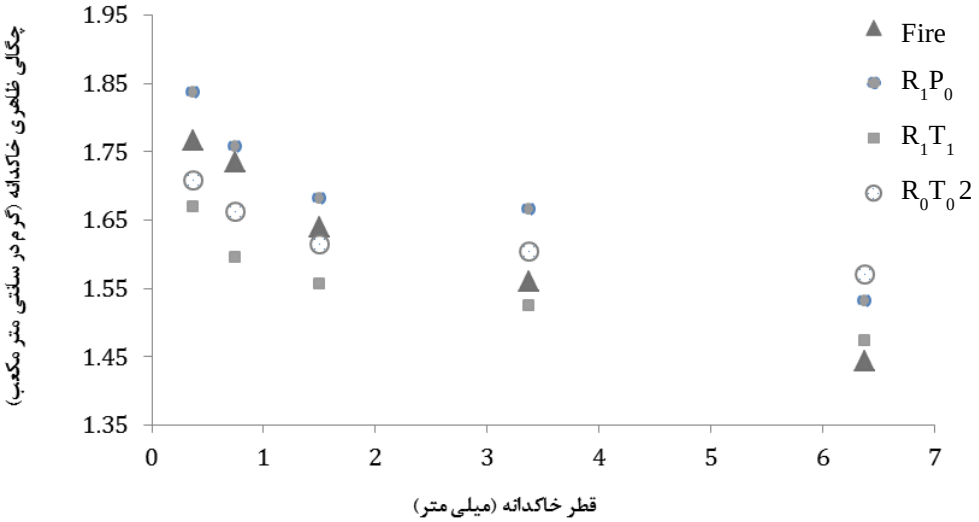
نتایج و بحث

مشخصات مدیریتی مزارع نمونه برداری شده در جدول 3 آمده است. برای هر مزرعه بر اساس شرایط مدیریتی یک کد اختصاص یافته که برگرفته از تاثیرگذارترین پارامترهای مدیریتی است. به عنوان نمونه در مزرعه R_1T_0 تناوب مناسب بغولات و غلات (به صورت یک سال در میان) و وضعیت نا مناسب خاک-ورزی (شخم شدید با شاخص خاک‌ورزی 0/9) حاکم است. Ag، نشان دهنده مزرعه تحت مدیریت سامانه جنگل-زراعی و Fire، نشان دهنده سوزاندن هرساله بقایای گیاهی پس از برداشت محصول می باشد.

چگالی ظاهری خاکدانه‌ها

تفاوت زیادی بین حداکثر و حداقل مقدار چگالی خاکدانه‌ها (به ترتیب 1/84 و 1/44 گرم بر سانتی-متر مکعب) مشاهده می‌شود، ولی این تغییرات از یک روند غیرخطی پیروی می‌کند (شکل 1، جدول 4). همان گونه که از تئوری فراکتال در خاک انتظار می‌رفت، کاهش چگالی ظاهری خاکدانه‌ها با افزایش قطر متوسط آن‌ها در تمامی مزارع، مشاهده شد که سرعت کاهش چگالی برای خاکدانه‌های ریز بیشتر بود. بزرگ بودن چگالی خاکدانه‌ها می‌تواند به معنی متراکم‌تر و کلوخه‌ای‌تر بودن خاکدانه‌ها باشد (مارتینزمنا و همکاران؛ 1999). مزرعه کد R_1P_0 بیشترین مقدار و مزرعه کد R_1T_1 کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. شاید دلیل این نتایج در شرایط فیزیکی و مدیریتی مزارع نهفته باشد. بیشترین میزان درصد رس، آهک و چگالی ظاهری خاک، و کمترین میزان درصد سیلت، به مزرعه R_1P_0 تعلق دارد. در ضمن ماده آلی نیز در این مزرعه در حد پایینی قرار دارد. نظام خاک‌ورزی سنتی، شخم در جهت شیب و برداشت بیش از 50 درصد بقایای گیاهی به صورت سالانه و دفن کردن مابقی توسط شخم در خاک، اقدامات مدیریتی هستند که در این مزرعه اعمال شده‌اند. برهمکنش بین این عوامل

(رس و آهک زیاد به همراه مدیریت نادرست)، می‌تواند باعث شکل‌گیری خاکدانه‌های متراکم با حداکثر چگالی ظاهری گردد. در مقابل در مزرعه R_1T_1 هم شرایط فیزیکی و شرایط مدیریتی در جهتی برقرار است که چگالی خاکدانه حداقل باشد (جدول 1و 3).



شکل 1- تغییرات چگالی ظاهری خاکدانه‌ها با قطر در چند مزرعه مختلف

جدول4- مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط جرم مخصوص ظاهری خاکدانه‌ها در قطرهای متفاوت

قطر متوسط(میلی‌متر)	کمینه	بیشینه	میانگین
6/375	1/442	1/570	1/501
3/375	1/524	1/665	1/583
1/5	1/556	1/681	1/618
0/75	1/594	1/757	1/679
0/375	1/636	1/836	1/732

شاخص‌های توزیع اندازه خاکدانه‌ها

مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین مربوط به شاخص توزیع اندازه خاکدانه‌ها در سه بخش مربوط به داده‌های حاصل از الک خشک، الک تر بدون اصلاح بخش شن و همچنین الک تر همراه با اصلاح بخش شن، در جدول 5 آمده است. میانگین حسابی قطر، میانگین قطر ذرات را براساس جرم‌های باقیمانده بر روی هر الک را نشان می‌دهد. اگرچه این می‌تواند یک شاخص خاکدانه-سازی باشد، ولی بنا به این دلیل که یک خاکدانه با قطر چهار میلی‌متر، تقریباً 10 برابر یک خاکدانه با قطر 0/4 میلی‌متر وزن دارد، باعث بیش برآورد در محاسبه میانگین قطر خاکدانه‌ها می‌گردد. در میانگین هندسی قطر هرچند این خطا برطرف شده است، ولی توابع توزیع لگاریتمی بر این فرض استوارند که احتمال شکست خاکدانه در تمامی اندازه‌ها یکسان است و این فرض برای خرد شدن خاکدانه‌ها نمی‌تواند صادق باشد، چرا که خاکدانه‌های بزرگ به راحتی و بیشتر از خاکدانه‌های ریز، خرد می‌شوند (راسیاه و همکاران 1993). بعد فراکتالی یک شاخص از خردشوندگی است که در مقیاس‌های مختلف روی می‌دهد و برای محاسبه آن از قطر، جرم و چگالی-خاکدانه‌ها که خود نتیجه‌ای از شرایط مزرعه است، استفاده می‌شود. شکل اشیاء خردشونده، تأثیری در محاسبه بعد فراکتالی ندارند، بزرگتر یا کوچکتر بودن اندازه باعث اهمیت بیشتر یک سری از ذرات نمی‌گردد، و مهم‌تر اینکه با تغییر احتمال شکست و نیروی وارده، بُعد فراکتالی تغییر می‌کند.

جدول 5- حدود بیشینه، کمینه، میانگین و ضریب تغییرات مربوط به شاخص‌های قطر خاکدانه

شاخص توزیع اندازه خاکدانه‌ها	بیشینه	کمینه	میانگین	ضریب تغییرات %
MWD خشک (میلی‌متر)	2/306	1/172	1/619	9/776
MWD تر بدون اصلاح بخش شن(میلی‌متر)	2/625	1/093	1/66	10/207
MWD تر با اصلاح بخش شن (میلی‌متر)	2/472	1/098	1/548	11/557
GMD خشک (میلی‌متر)	1/525	0/627	0/844	9/576
GMD تر بدون اصلاح بخش شن (میلی‌متر)	1/827	0/715	1/071	12/611
GMD تر با اصلاح بخش شن (میلی‌متر)	1/839	0/672	1/013	17/730
D_n خشک	3/322	2/703	3/098	2/387
D_n تر بدون اصلاح بخش شن	3/954	2/85	3/446	2/526
D_n تر با اصلاح بخش شن	4/015	2/926	3/612	6/206
D_t خشک	2/464	2/051	2/340	1/107
D_t تر بدون اصلاح بخش شن	2/542	2/15	2/408	1/113
D_t تر با اصلاح بخش شن	2/619	2/022	2/424	1/459

D_n: بعد فراکتالی خردشوندگی، D_t: بعد فراکتالی تیلر ویت کرافت

بعد فراکتالی نشان دهنده میزان غالبیت درشت خاکدانه‌ها در الک خشک و تر می‌باشد، بزرگتر بودن بعد فراکتالی در داده‌های حاصل از الک تر نشان می‌دهد که شمار زیادی از خاکدانه‌های ناپایدار در آب، پس از غوطه وری در آب به خاکدانه‌های ریز، خرد می‌شوند و تعداد خاکدانه‌های ریز افزایش می‌یابد. در ضمن تفاوت موجود بین ابعاد فراکتالی خردشوندگی و عددی- جرمی نشان می‌دهد که جرم حجمی خاکدانه‌ها در تمامی مقیاس‌ها یکسان نیست و ثابت گرفتن این پارامتر علیرغم اینکه باعث کاهش ضریب تغییرات می‌شود، بعد فراکتالی را نیز کاهش می‌دهد و از نظر تئوری ثابت گرفتن یک عامل متغیر، خطا می‌باشد (مشابه با احمدی و همکاران؛2011، گیمنز و همکاران؛ 2002).

مسئله دیگر مشاهده اعداد بزرگتر از سه برای بعد فراکتالی خردشوندگی است. برطبق مدل فراکتالی، بُعد فراکتالی باید زیر سه باشد. از نظر فیزیکی از آنجایی که یک جرم به صورت کامل در بین الک‌های مختلف پخش شده است، مقادیر با $D>3$ و $D<2$ سوال برانگیز می‌باشد. از نظر فیزیکی مقادیر D بزرگتر از سه به این معنی است که قطعات در سطوح مختلفی از خرد شوندگی فراکتالی باقی مانده‌اند (پیرمرادیان و همکاران؛ 2005). در رابطه با تفسیر این امر ریو و اسپوزیتو (1991) بیان کردند که در ساختمان خاک، خردشوندگی به طور کامل صورت نگرفته است. چراکه این ساختمان می‌تواند خرد شده و به ذرات اولیه تبدیل گردد. در محیط فراکتالی متخلخل کامل نشدن فرایند خردشوندگی می‌تواند به عنوان یک ویژگی مستقل از مقیاس در نظر گرفته شود. پارنت و همکاران (2011) اشاره کردند که اگر ذرات خرد شده هیچ شباهتی با آرایش اولیه‌اشان نداشته باشند، ممکن است بعد فراکتالی از سه بیشتر شود. از آنجایی که در یک نیروی وارد شده معین، احتمال شکست خاکدانه‌های بزرگتر بیشتر از خاکدانه‌های کوچک می‌باشد، بعد فراکتالی می‌تواند به مقدار $3+r$ برسد که r مقدار وابستگی به مقیاس احتمال شکست آغاز کننده‌ها را مشخص می‌کند. مدل تیلر و ویت‌کرافت (1992) نیز برای حل این مسئله ابداع شده است.

اثر اقدامات مدیریتی در بعد فراکتالی خاکدانه ها

اقدامات مدیریتی تأثیرات قابل توجهی بر بعد فراکتالی خاکدانه‌ها داشته‌اند. در مزارع تحت مدیریت جنگل-زراعی که متغیر خاک‌ورزی صفر و شاخص انرژی کمترین مقدار را دارد (جدول3)، خاکدانه‌ها دچار کمترین خردشدگی شده و کمترین مقدار بعد فراکتالی را به خود اختصاص داده‌اند (جدول 6).

عملیات خاک‌ورزی مهم‌ترین عامل در فرایند خردشدگی و تشکیل خاکدانه در خاک می‌باشد. در مزارعی که شاخص خاک‌ورزی بالا بوده، بعد فراکتالی به شدت افزایش یافته و این مسئله به صورت کاملاً آشکار در جدول 6 نمود یافته است. به عنوان نمونه می‌توان دو مزرعه R_1T_1 و R_1T_0 را مقایسه کرد. از لحاظ مدیریت‌های اعمال شده، به غیر از عامل خاک‌ورزی (که مورد بحث است) این دو مزرعه تفاوت چندانی با هم ندارند. توزیع اندازه خاکدانه‌ها و ابعاد فراکتالی محاسبه شده برای دو مزرعه، نشان دهنده شرایط بهتر فیزیکی و درشت‌تر بودن خاکدانه‌ها در مزرعه R_1T_1 می‌باشد. مقایسه میانگین ابعاد فراکتالی خردشوندگی نیز این نتیجه را نشان می‌دهند.

جدول 6- مقایسه میانگین بعد فراکتالی به دست آمده برای مزارع حاصل از داده‌های الک تر و خشک به دو روش

کد مزارع	D_n خشک	D_n تر	D_t خشک	D_t تر
Ag2	2/70a	2/85 a	2/07 a	2/17a
Ag1	2/80ab	2/95 a	2/19b	2/21 a
R_0T_0M	2/94bc	3/36bc	2/21b	2/28 b
R_1T_1	2/93bc	3/23 b	2/33cd	2/47 cd
R_1P_0	3/12de	3/52de	2/29c	2/42c
R_1S_1	3/25ef	3/39cd	2/37cde	2/47cd
R_1P_1	3/12de	3/45cd	2/37cde	2/41c
R_1T_0	3/3f	3/50cde	2/34cde	2/48d
$R_0T_0S_0$	3/02cd	3/53de	2/35cde	2/486de
R_0P_0	3/28f	3/54de	2/46f	2/48 de
R_0T_01	3/31f	3/65ef	2/38def	2/49de
R_0T_02	3/29f	3/65ef	2/42ef	2/51de
Fire	3/28f	3/75fg	2/39def	2/54e
T_0S_0	3/16de	3/83g	2/383def	2/49de

D_n: بعد فراکتالی خردشوندگی، D_t: بعد فراکتالی تیلر ویت کرافت

اعداد با حروف مشابه از لحاظ آماری اختلاف معنی داری ندارند.

در مزرعه R_0T_0M نیز همانند دو مزرعه R_0T_01 و R_0T_02 ، طرح یک پارچه سازی اراضی باعث نهادینه شدن مکانیزاسیون و اعمال کشاورزی فشرده گردیده است. تنها تفاوت این مزارع مصرف کود دامی به صورت سالانه در مزرعه R_0T_0M می‌باشد. این اقدام مدیریتی به طور قابل توجهی باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها و کاهش معنی‌دار بعد فراکتالی گردیده است.

نوع اداوات خاک‌ورزی نیز اهمیت بسیاری در فرایند خردشوندگی دارد و بسته به نوع وسیله خاک‌ورزی میزان خردشدگی تغییر می‌کند (الواروفونتس[1] و همکاران؛ 2008). تنها تفاوت موجود بین دو مزرعه R_0T_01 و R_0T_02 استفاده از ادوات خاک‌ورزی سبک‌تر در مزرعه R_0T_02 است (جدول 3). بعد فراکتالی خاکدانه‌ها در این دو مزرعه تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد که بتوان به این نتیجه تأکید داشت.

جهت شخم مخصوصاً در اراضی شیب‌دار یک عامل مدیریتی مهم در کنترل فرسایش آبی می‌باشد. از این رو برای مقایسه اثر شخم در جهت شیب بر شاخص فیزیکی خاک، از ابعاد فراکتالی حاصل از داده‌های الک تر استفاده می‌شود. تفاوت مدیریتی دو مزرعه R_1P_0 و R_1P_1، تنها از لحاظ انجام شخم در جهت شیب در مزرعه R_1P_0 می‌باشد. اقدامات مدیریتی مزرعه R_1P_0 باعث افزایش بعد فراکتالی خردشوندگی حاصل از داده‌های الک تر نسبت به مزرعه R_1P_1 شده است. ولی ابعاد فراکتالی محاسبه شده از داده‌های سری الک خشک، را تحت تأثیر قرار نداده است. این یافته مشابه نتایج احمدی و همکاران (2011) و کانتون و همکاران (2009) می‌باشد. مقایسه میانگین آماری نتوانسته تغییرات به وجود آمده در اثر این نوع مدیریت را نشان دهد. این می‌تواند به دلیل تغییرات اندک دامنه بعد فراکتالی محاسبه شده و ضعف علم آمار کلاسیک در تفسیر داده‌های به دست آمده از تئوری فراکتال باشد.

بقایای گیاهی یک بخش جدا نشدنی از معیشت روستایی در جنوب آسیا است. به دلیل وجود سامانه‌های دام-زراعت کوچک مقیاس، بقایای گیاهی مهم‌ترین منبع غذایی برای دام‌ها بوده و استفاده به عنوان سوخت و مصالح ساختمانی، از دیگر موارد استفاده بقایا می‌باشد (ارنستین، 2011). این موضوع مخصوصاً در نواحی نیمه-خشک که بقایای گیاهی ارزش اقتصادی زیادتری دارند بیشتر مورد توجه می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه نیز مدیریت بقایای گیاهی به شکل ناصحیحی صورت می‌گیرد. به عنوان نمونه چالش اصلی در مزرعه T_0S_0، افزایش تعداد و توالی عملیات خاک‌ورزی و همچنین برداشت حجم زیاد بقایای گیاهی و پس چر مزارع و در انتها کلش سوزانی می‌باشد. مزرعه R_0T_01 نیز در شرایط مشابهی به سر می‌برد با این تفاوت که در آن فقط سوزاندن بقایا رخ نمی‌دهد (جدول 3). از جدول 6 مشاهده می‌شود که بعد فراکتالی خردشوندگی حاصل از

[1] Alvarofuentes

داده‌های الک تر مزرعه R_0T_01 با تمام شرایط نامساعدش در کلاس بالاتری از مزرعه T_0S_0 قرار دارد. از آنجایی که این عامل مدیریتی باعث از بین رفتن مواد آلی خاک می‌شود، اثر خود را در چگالی ظاهری خاک نیز بر جا می‌گذارد و وارد شدن چگالی ظاهری خاکدانه در معادله مربوط به بعد فراکتالی خردشوندگی، این شاخص را با عوامل مدیریتی، بیش از سایرین تطبیق می‌دهد. یک مثال واضح‌تر برای بررسی اثر آتش‌سوزی، مزرعه Fire است. در این مزرعه پس از برداشت محصول، باقیمانده بقایای زراعی، سالانه مورد آتش‌سوزی قرار می‌گیرد. از لحاظ سایر اقدامات مدیریتی، مزرعه R_0T_02 شرایط تقریباً یکسانی را با این مزرعه دارد. با وجود شرایط نابه سامان در هر دو مزرعه، شرایط فیزیکی خاک مزرعه R_0T_02 از مزرعه Fire بهتر می‌باشد. در این مورد نیز گروه‌بندی آماری ابعاد فراکتالی تغییرات معنی‌داری را نشان نمی‌دهد، که به دلیل دامنه اندک تغییرات بعد فراکتالی می‌باشد.

تناوب زراعی عامل دیگر تأثیرگذار بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها و شرایط فیزیکی خاک است. گیاهانی مانند نخود و عدس (بغولات) در ریشه‌های خود، با باکتری‌های ریزیوبیومی که تثبیت کننده نیتروژن هستند، همزیستی مثبتی تشکیل می‌دهند که باعث بهبود شرایط تغذیه گیاه و افزایش فتوسنتز و تولیدات گیاهی می‌شود. برای نشان دادن اثر تناوب زراعی بر ساختمان خاک می‌توان مزارع R_1P_0 را با R_0P_0 و همچنین R_1T_1 را با R_0T_01 و R_0T_02 مقایسه کرد. R_1 به مزارعی اختصاص دارد که در آن توالی غلات و بغولات در نظام تناوبی 0/5 می‌باشد. در این مورد نیز اختلافات کاملاً آشکار است. توجه دقیق‌تر به اعداد جدول 6 نشان می‌دهد که اختلاف ابعاد فراکتالی این مزارع در داده‌های حاصل از الک خشک بیشتر از الک تر می‌باشد. این نتیجه می‌تواند به دلیل عوامل تثبیت کننده باشد. به این صورت که این عوامل، خاکدانه‌ها را در حین الک خشک مستحکم نگه می‌دارند، ولی وقتی که در آب فرو می‌روند، حل شده و استحکام خود را از دست می‌دهند. در نتیجه خاکدانه‌های درشت متلاشی شده و خاکدانه‌های ریز را تشکیل می‌دهند که باعث افزایش بُعد فراکتالی آن‌ها می‌گردد. در این جا می‌توان به این نکته اشاره کرد که خاکدانه‌ها دارای منافذ با اندازه‌های مختلف هستند که توزیع و مقاومت ناحیه شکست را تعیین می‌کنند. شکست زمانی روی می‌دهد که انرژی وارد شده، از مقاومت ضعیف‌ترین ناحیه شکست بیشتر باشد. شکست خاکدانه‌ها در الک خشک نتیجه این قسمت می‌باشد. همچنین مقادیر احتمال شکست با تغییر غلظت مواد تثبیت کننده خاکدانه تغییر می‌کند. غلظت مواد تثبیت کننده که به تاریخچه زراعی یک منطقه بر می‌گردد، خود را در سری الک تر نشان می‌دهد (پرفکت وکی، 1991).

نتیجه‌گیری

مالکان خرده‌پا در اراضی زراعی استان کرمانشاه از اقدامات مدیریتی متنوعی در مزارع خود استفاده می‌کنند. بیشتر مزارع آن‌ها دیم بوده و همچنین به دلیل شرایط نامساعد اقتصادی، کشت و کار متراکمی بدون انجام اقدامات حفاظتی و یا توجه به احیای زمین، بر مزارع اعمال می‌شود. ازجمله مدیریت‌های ناصحیح اعمال شده در مزارع، شخم متراکم، شخم در جهت شیب و برداشت بیش از حد بقایای زراعی یا سوزاندن آن‌ها می‌باشد. با این وجود در تعدادی از مزارع نیز سامانه مدیریتی جنگل-زراعی حاکم است که تأثیرات چشم گیری در بهبود شرایط فیزیکی خاک داشته است.

بُعد فراکتالی خاکدانه‌ها عامل گویایی در انعکاس تأثیر اقدامات مدیریتی بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌باشد. سامانه جنگل-زراعی، بهترین الگوی مدیریتی در اراضی مورد مطالعه است و به طور معنی‌داری باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک گردیده است. اقدامات مدیریتی مناسب همانند افزودن کود دامی، کاهش عملیات خاک-ورزی و مدیریت نظام تناوب به خوبی در ساختمان خاک نمود یافته و باعث کاهش بعد فراکتالی خاکدانه‌ها شده است. در مقابل افزایش شدت و میزان خاک‌ورزی، انجام شخم در جهت شیب و مدیریت نادرست بقایای گیاهی به طورقابل توجهی میزان خردشوندگی و در نتیجه بعد فراکتالی خاکدانه‌ها را افزایش داده است.

از این رو لازم است با آگاه سازی کشاورزان نسبت به شرایط فیزیکی خاک توجیه آنان در پذیرش و انجام عملیات مدیریتی بهینه، اقدامات گسترده‌ای در سطح کشور صورت گیرد تا شاهد حفظ و افزایش کیفیت خاک و بهبود شرایط مشعیتی مردم باشیم.

فهرست منابع:

1. Ahmadi, A., M.R. Neyshabouri, H. Rouhipour and H. Asadi, 2011. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. Journal of Hydrology 400: 305-311.

2. Bailey, A.P., W.D. Basford, N. Penlington, J.R. Park, J.D.H. Keatinge, T. Rehman, et al., 2003. A comparison of energy use in conventional and integrated arable farming systems in the UK. Agriculture, Ecosystems & Environment 97: 241-253.
3. Blake, G. and K. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 347-380. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 1. 2nd edn. Physical and Mineralogical Methods,. Wisconsin, U.S.A.
4. Cantón, Y., A. Solé-Benet, C. Asensio, S. Chamizo and J. Puigdefábregas, 2009. Aggregate stability in range sandy loam soils Relationships with runoff and erosion. Catena 77: 192-199.
5. Caruso, T., E.K. Barto, M.R.K. Siddiky, J. Smigelski and M.C. Rillig, 2011. Are power laws that estimate fractal dimension a good descriptor of soil structure and its link to soil biological properties? Soil Biology and Biochemistry 43: 359-366.
6. Chepil, W., 1950. Methods of estimating apparent density of discrete soil grains and aggregates. Soil Science 70: 351-362.
7. Dreimanis, Aleksis, 1962. Quantitative gasometric determination of calcite and dolomite by using Chittick apparatus. Journal of Sedimentary Petrology 32: 520-529.
8. Eghball, B., L.N. Mielke, G.A. Calvo and W. Wilhelm, 1993. Fractal description of soil fragmentation for various tillage methods and crop sequences. Soil Science Society of America Journal 57: 1337-1341.
9. Erenstein, O., 2011. Cropping systems and crop residue management in the Trans-Gangetic Plains: Issues and challenges for conservation agriculture from village surveys. Agricultural Systems 104: 54-62.
10. Ferraro, D.O. and C.M. Ghersa, 2007. Quantifying the crop management influence on arable soil condition in the Inland Pampa (Argentina). Geoderma 141: 43-52.
11. Filgueira, R., L. Fournier, G. Sarli, A. Aragón and W. Rawls, 1999. Sensitivity of fractal parameters of soil aggregates to different management practices in a Phaeozem in central Argentina. Soil and Tillage Research 52: 217-222.
12. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle-size Anallysis In: Warren, A.D. (ed) Methods os soil analysis. Part 4.Physical Methods. Soil Sci. Soc. Am. J. pp: 255-295
13. Gimenez, D., J.L. Karmon, A. Posadas and R.K. Shaw, 2002. Fractal dimensions of mass estimated from intact and eroded soil aggregates. Soil and Tillage Research 64: 165-172.
14. Gregory, A.S., N.R.A. Bird, C.W. Watts and A.P. Whitmore, 2012. An assessment of a new model of dynamic fragmentation of soil with test data. Soil and Tillage Research 120: 61-68. doi:10.1016/j.still.2011.11.007.
15. Martí nez-Mena, M., L. Deeks and A. Williams, 1999. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility. Geoderma 90: 87-98.
16. Nelson D.W.,and L.E.Sommers.1996.Total carbon, organic carbon and organic matter. In "Methods of soil analysis. Part 3. chemical methods".(Ed.Dl.Sparks) pages 961-1010. (Soil Science Society of America : Madison, WI).
17. Parent, LE., Parent SE., Kätterer, T., and J.J. Egozcue, 2011. Fractal and compositional analysis of soil aggregation. Proceedings of the 4th International Workshop on Compositional Data Analysis. pp. 9-13
18. Perfect, E. and R. Blevins, 1997. Fractal characterization of soil aggregation and fragmentation as influenced by tillage treatment. Soil Science Society of America Journal 61: 896-900.
19. Perfect, E. and B. Kay, 1991. Fractal theory applied to soil aggregation. Soil Science Society of America Journal 55: 1552-1558.
20. Pirmoradian, N., A.R. Sepaskhah and M.A. Hajabbasi, 2005. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. Biosystems Engineering 90: 227-234.

21. Rasiah, V., B. Kay and E. Perfect, 1993. New mass-based model for estimating fractal dimensions of soil aggregates. Soil Science Society of America Journal 57: 891-895.
22. Rieu, M. and G. Sposito, 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. Soil Science Society of America Journal 55: 1231-1238.
23. Sepaskhah, A., S. Moosavi and L. Boersma, 2000. Evaluation of fractal dimensions for analysis of aggregate stability. Iran Agricultural Research 19: 99-114.
24. Shirazi, M.A. and L. Boersma, 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. Soil Science Society of America Journal 48: 142-147.
25. Tyler, S.W. and S.W. Wheatcraft, 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. Soil Science Society of America Journal 56: 362-369.
26. Young, I. and J. Crawford, 1991. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. Journal of Soil Science 42: 187-192.
27. Zachar, D. 1982. Soil erosion, Developments in Soil Science 10. Elsevier, Netherlands.
28. Zi-cheng, Z., H. Shu-qine and L. Ting-xuan, 2011. Fractal dimensions of soil structure and soil anti-erodibility under different land use patterns. African Journal of Agricultural Reseearch 6(24): 5496-5504.