مجله ترویجی حفاظت و بهره‌برداری جنگل‌های هیرکانی، سال ۱۳۹۹، دوره ۲، شماره ۲، صفحات: ۱۰۶- ۹۱

آشنایی با فن‌های رادیوایزوتوپی برای آشکارسازی اثربخشی طرح‌های جنگل‌داری بر روی حفاظت خاک جنگل‌های هیرکانی

محمدرضا غریب‌رضا[۱*]، مجتبی محمودی[۲]، حسین رحیم‌زاده[۳]، صمد شادفر[۴]

[۱] استادیار پژوهشی، رئیس گروه تحقیقات مهندسی رودخانه و سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. (رایانامه نویسنده مسئول: gharibreza4@yahoo.com)

[۲] استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.

[۳] محقق مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.

[۴] دانشیار پژوهشی، گروه تحقیقات مهندسی حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹ **تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷**

چکیده

استفاده حفاظت و بهره‌برداری از جنگل دو رویکرد ملازم یکدیگر در مدیریت حوزه‌های آبخیز جنگلی به‌شمار می‌روند. از طرف دیگر، برآورد خاک جابجا شده در عرصه‌های مختلف از روش‌های گوناگون امکان‌پذیر است. هدف از این مقاله، معرفی فن‌های رادیوایزوتوپی و چگونگی استفاده از آنها و نیز ارائه نتایج یک مطالعه انجام شده در جنگل‌های هیرکانی می‌باشد. در بخش اول مقاله دستورالعمل استفاده از این فن‌ها و در بخش دوم اثربخشی اجرای طرح‌های جنگل‌داری بر روی حفاظت خاک از طریق مقایسه نرخ فرسایش در ترانسکت کشاورزی دیم مدیریت نشده پس از بهره‌برداری از جنگل با ترانسکت مدیریت‌شده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. با اندازه‌گیری فعالیت سزیم- ۱۳۷ در ترانسکت کشاورزی دیم مدیریت نشده و نیز در ترانسکت مدیریت‌شده در طرح جنگل‌داری و استفاده از معادله با استفاده از مدل تعادل جرمی II، میزان هدر رفت خاک در هر نقطه و نرخ خالص فرسایش در طول ترانسکت محاسبه گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان از نرخ متوسط فرسایش سالانه ۱۵/۹۷ و ۳۷/۴۴ تن در هکتار به‌ترتیب در ترانسکت‌های شاهد و طرح جنگل‌داری نکا- ظالم‌رود به‌عنوان عرصه معرف روش کاشت درختان دانه‌زاد همسال افرا دارند. بدین ترتیب، اعمال مدیریت از طریق اجرای طرح‌های جنگل‌داری علاوه بر بهره‌برداری از جنگل، با اثربخشی ۵۷ درصدی از منظر حفاظت خاک نقش تأثیرگذاری در مدیریت منابع طبیعی داشته است. تغییر الگوی کشت از دیم‌زار به زراعت چوب به‌ویژه کاشت درختان همسال در جنگل‌های هیرکانی به‌دلیل توزیع تاج پوشش همسان در دوره رشد برای حفظ معیشت کشاورزان و کاهش بیش از ۵۰ درصدی نرخ فرسایش مؤکداً توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بازپخش خاک، جنگل‌های هیرکانی، فن‌های رادیونوکلوئیدی، نرخ فرسایش.

بیان مسئله

جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان مهم‌ترین ذخیره‌گاه زیستی و منبع چوب از دیرباز توسط بهره‌برداران مختلف دولتی و بخش خصوصی مورد بهره‌برداری قرار داشته‌اند. این جنگل‌ها از آستارا در شمال غرب تا گرگان در شمال شرق ایران امتداد داشته و مساحت آن به ۱/۸۵ میلیون هکتار می‌رسد (اسپهبدی، ۱۳۹۸).

اولین موج گسترده بهره‌برداری از جنگل‌ها در ۶۰ سال گذشته شروع شد. دومین موج بهره‌برداری گسترده از ابتدای دهه ۷۰ شروع و عمدتاً با رویکرد اقتصادی و با الگوی متفاوت از نظر فیزیوگرافی منطقه ادامه پیدا کرده است. با شروع دهه ۸۰، جنگل‌داری همگام با طبیعت به‌مثابه اندیشه و دیدگاهی علمی و فنی نوین در مدیریت جنگل‌ها مطرح شد. از این‌رو، طرح‌های جنگل‌داری شمال کشور با نظام جنگل‌داری دانه‌زاد ناهمسال و شیوه‌های مختلف تک گزینی تهیه و یا در طرح‌های فعال در چارچوب روش جدید تجدیدنظر شدند (Bobek, 2005).

با فعالیت کارخانه‌هایی همچون شرکت سهامی چوب فریم، نکاچوب و چوب و کاغذ مازندران در دهه اول شروع به کار آن‌ها برداشت‌ها در راستای اهداف احیای جنگل‌های مخروبه (مناطق پایین‌دست) و جلگه‌ای که در اثر حضور دام و دخالت انسان بیش از حد تخریب شده بود تحت عنوان *قطع یکسره*[1] با رعایت شیب عرصه انجام گرفت که در زمان حاضر همه آن‌ها به نهال‌کاری خیلی موفق و مؤثر در تولید بیولوژیک و اقتصادی منطقه تبدیل شده است و بخش زیادی از درآمد حاصل از چوب از این ناحیه تأمین می‌گردد.

تغییر کاربری اراضی جنگلی به جنگل دست کاشت، کشاورزی اعم از زراعت و باغبانی و جاده‌های دسترسی دارای پیامدهای بی‌شمار در محل[2] و دور از محل[3] است. ازجمله مهم‌ترین اثرات تغییر کاربری اراضی جنگلی، هدر رفت و فرسایش خاک و تغییر ویژگی‌های ذاتی آن هست که از دیرباز مورد توجه محققین بسیاری در جهان و ایران قرار گرفته است. در مقابل، روش‌های متفاوت حفاظت خاک ازجمله جنگل‌کاری اراضی پاک‌تراشی شده به‌منظور کاهش اثرات در محل و دور از محل بهره‌برداری از جنگل در دهه‌های اخیر توصیه و اجرا شده است. بدین ترتیب، این مطالعه پژوهشی- ترویجی برای نخستین بار در کشور و با هدف تعیین اثربخشی اجرای طرح‌های جنگل‌داری

[1] clear cutting
[2] on-site
[3] off-site

در حفاظت خاک با استفاده از فن‌های رادیوایزوتوپی و با نظارت و حمایت آژانس بین‌المللی انرژی اتمی[1] در جنگل‌های هیرکانی انجام شده است.

برای آشنایی با جنبه‌های کاربردی روش‌ها و فن‌ها هسته‌ای در برآورد فرسایش و رسوب خاک، بخش اول مقاله به معرفی این فن‌ها و چگونگی استفاده از آنها می‌پردازد و در بخش دوم نتایج استفاده از این فن‌ها در اثربخشی طرح‌های جنگل‌داری بر روی حفاظت خاک جنگل در طرح نکا- ظالم‌رود، بخش ۲، سری ۱ ارائه می‌گردد.

۱. معرفی و دستورالعمل استفاده از فن‌های رادیوایزوتوپی

علاوه بر روش‌های تجربی همچون پین و پلات آزمایشی که دارای عدم قطعیت‌های زیادی هستند، فن‌های رادیوایزوتوپی از دهه ۱۹۷۰ میلادی به‌طور گسترده در جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به غریب‌رضا و همکاران در کشور مالزی (۲۰۱۴) اشاره کرد. در ایران، به گزارش خواجوی و همکاران (۱۳۹۴) تا سال ۱۳۹۴ تعداد ۱۶ تحقیق و مطالعه در خصوص استفاده فن‌های رادیوایزوتوپی در مبحث فرسایش خاک انجام شده است،

استفاده از فن‌های رادیوایزوتوپیک و ردیاب‌های محیطی (رادیوایزوتوپ‌های ^{210}Pb, ^{137}Cs, ^{7}Be) در برآورد نرخ فرسایش و تلفات خاک تحت کاربری‌های مختلف اراضی از مهم‌ترین فناوری‌ها و فن‌های شناخت مسائل محیطی و مدیریت منابع آب و خاک به شمار می‌روند. در کشورهای توسعه‌یافته از رادیوایزوتوپ‌های یاد شده در تعیین میزان و سهم تغییرات کاربری اراضی در حوزه ازجمله جنگل‌زدایی و توسعه پروژه‌های شهرسازی، صنعتی و کشاورزی در انتقال رسوب و آلاینده‌ها و انباشت رسوب در تالاب ها، دریاچه ها، خورها و خلیج‌ها استفاده فراگیری می‌گردد.

معرفی رادیوایزوتوپ سزیم-۱۳۷

سزیم-۱۳۷ رادیوایزوتوپی مصنوعی است که در پی انفجار بمب‌های اتمی در بین سال‌های ۱۹۵۰-۱۹۸۰ میلادی در اتمسفر پراکنده شد و عمدتاً در طی سه دهه یاد شده توسط بارش به سطح زمین بازگشته است. مجموع ۴۲۳ آزمایش بمب اتمی، ۲۱۷۲۰۰ کیلوتن مواد رادیواکتیو به اتمسفر متصاعد شده است. بیشینه بارش‌های رادیوایزوتوپ‌های ^{137}Cs، استرانسیم-۹۰ (^{90}Sr) و پلوتونیوم-۲۱۸ (^{218}Po) در سال ۱۹۶۳ رخ داد و

[1] International Atomic Energy Agency, IAEA

روند این آزمایش‌ها در سال‌های آغازین دهه ۸۰ میلادی به‌شدت کاهش یافت. بر اساس پروتکل‌های جهانی، آزمایش بمب‌های اتمی در سال ۱۹۷۲ میلادی متوقف شده است، لیکن سال‌ها پس‌ازآن اتمسفر زمین سرشار از رادیوایزوتوپ‌های مصنوعی متصاعد شده بوده است. حادثه چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ نیز به‌طور چشمگیری رادیوایزوتوپ‌های یادشده را به جو زمین منتشر کرده است (Ritchie & Ritchie, 2007). نیمه عمر رادیوسزیم ۳۰/۲ سال است و به‌عنوان ابزاری جهت بررسی روندهای میان‌مدت فرآیندهای فرسایش، انتقال رسوب و رسوب‌گذاری شناخته شده است. مهم‌ترین مشخصه‌ای که آن را به‌عنوان یک شاخص مستقل زمانی مطرح کرده، قابلیت جذب سریع و ماندگاری آن‌ها توسط ذرات ریزدانه خاک و رسوبات هست. این عنصر رادیو اکتیو که از طرفی نقش بسیار مخربی در سلامت محیط زیست ایفا کرده، به‌عنوان ردیاب در مطالعات مختلف محیطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از قابلیت رادیوسزیم در برآورد فرسایش خاک، نقشه فرسایش خاک و خطرات فرسایش در مقیاس‌های متفاوت استفاده بی‌شمار شده است. مدل‌های بسیار پیشرفته‌ای بر پایه همین قابلیت برای برآورد فرسایش خاک توسعه‌یافته است (Walling & He, 1999). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل تناسبی (Proportional) و مدل‌های توازن جرمی (Mass Balance I, II, III) اشاره کرد. این رادیوایزوتوپ نیز جهت بررسی فرآیند انتقال رسوب و رسوب‌گذاری در محیط‌های آبی نظیر دریاچه‌ها، دشت‌های سیلابی، خورها و خلیج‌ها به‌مراتب استفاده شده است (Yeager *et al.*, 2005).

نمونه‌برداری از ایستگاه مرجع[1]

اصولاً استفاده از فن‌های رادیوایزوتوپی بر مبنای مقایسه نمونه‌های هدف با نمونه‌های مرجع است که در آن نمونه‌های مرجع نشان‌دهنده فعالیت تجمعی فعالیت رادیونوکلوئیدهای بارشی[2] در آن محل است. طبق استاندارد (IAEA, 2014) موقعیت نمونه‌های مرجع جایی است که در آنجا فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری رخ نداده باشد و ترجیحاً دارای پوشش مرتعی یا جنگل تنک داشته باشند. شناسایی محل نمونه مرجع نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت و دستیابی به اهداف تعیین شده دارد. از آنجایی که میزان ذخیره رادیواکتیویته[3] عناصر رادیونوکلوئیدهای بارشی مستقیماً با میزان و نوع بارش و میزان درصد بخش

[1] reference samples
[2] fallout radionuclides
[3] inventory

ریزدانه پروفیل خاک و جنس سنگ مادری در ارتباط است، انتظار می‌رود این میزان در حوزه‌های آبخیز مجاور نیز متفاوت باشد. از این‌رو در مراجع موجود فاصله محل نمونه‌های مرجع با ترانسکت‌های نمونه‌برداری را حداکثر بین ۱ تا ۵ کیلومتر ذکر کرده‌اند. برای برداشت نمونه از محل‌های مرجع دو شیوه رایج و مکمل هم وجود دارد. از آنجایی که ضروری است روند نمایی کاهشی فعالیت رادیوایزوتوپ‌ها در ستون خاک ثابت شود، با استفاده از دستگاه نمونه‌بردار صفحه خراش دهنده[1] تا عمق حداکثر ۳۰ سانتی‌متری (حداکثر عمق مهاجرت رادیوسزیم) و به ازای هر ۲ سانتی‌متر، یک نمونه برداشت می‌شود (شکل ۱). دستگاه با قابلیت تعویض محل نصب دسته نمونه‌بردار با فاصله ۲ سانتی‌متر، کاربر را قادر می‌سازد از اعماق مختلف نمونه‌برداری کند. نمونه‌ها مطابق عمق برداشت‌شده در کیسه پلاستیکی برای حفظ رطوبت خاک ذخیره و نام‌گذاری می‌شوند. علاوه بر نمونه لایه‌لایه که توسط دستگاه نمونه‌بردار برداشته می‌شود، حداقل تعداد ۱۱ مغزه خاک با دستگاه نمونه‌بردار خاک[2] از پیرامون نمونه لایه‌لایه تا عمق مشابه برداشته می‌شود (شکل ۲). به‌علاوه، در نمونه‌برداری مطلوب است نمونه‌های دست‌نخورده‌ای برای محاسبه درصد رطوبت و چگالی خاک نیز به‌دست آید.

اختلاف متوسط ذخیره ۱۱ نمونه نباید بیش از ۳۰ درصد با نمونه لایه‌لایه تفاوت داشته باشد (IAEA, 2014). عدم وجود آرایش مورد انتظار نشان از به هم خوردگی پروفیل خاک نمونه مرجع انتخاب شده و نامناسب بودن آن دارد. در صورت عدم دستیابی به روند نمایی کاهنده اکتیویته رادیوایزوتوپ‌ها، محل دیگری برای برداشت نمونه لایه‌لایه انتخاب می‌شود.

آنالیزهای آزمایشگاهی

مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس پروتکل‌های موجود (IAEA, 2014; Gharibreza & Ashrat, 2014) انجام می‌شود. اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی در نمونه‌های خاک ترانسکت و سایت مرجع، از قبیل بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری و غیره، در آزمایشگاه آب و خاک و اندازه‌گیری اکتیویته رادیوایزوتوپ ^{137}Cs این نمونه‌ها نیز در آزمایشگاه گاما اسپکترومتر سازمان انرژی اتمی کشور انجام می‌شود. میزان موجود و فعالیت رادیوسزیم در واحد جرم بکرل بر کیلوگرم ($Bq.kg^{-1}$) گزارش می‌شود که البته با

[1] scraper plate
[2] soil corer

توجه به سطح نمونه‌های برداشت شده، به بکرل بر مترمربع تبدیل می‌گردد.

شکل ۱- A) نمایش‌دهنده اجزاء و عملکرد مغزه گیر خاک دست‌نخورده و B) مراحل استفاده از دستگاه Scraper Plate

شکل ۲- A) بازیابی مغزه خاک به‌صورت دست‌نخورده و B) نمونه‌برداری از لایه‌های عمقی نمونه مرجع در حوضه نکارود

اجرای مدل‌های برآورد نرخ بازپخش[1] (فرسایش/رسوب‌گذاری) خاک

برآورد نرخ فرسایش خاک با استفاده از رادیوایزوتوپ‌ها بر مبنای مقایسه میزان رادیواکتیویته نمونه موردنظر با میزان اکتیویته محل مرجع است. مهم‌ترین مشخصه‌های محل مرجع دست‌نخورده بودن و دریافت حداکثر بارش رادیوایوتوپی و عدم وجود آثار انباشت رسوب و فرسایش خاک است. ساده‌ترین روش در برآورد هدر رفت خاک استفاده از رابطه ۱ است که در آن رادیواکتیویته نمونه موردنظر با نمونه سایت مرجع مقایسه شده است.

$$\frac{A_{ref}-A}{A_{Ref}} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن A رادیواکتیویته ^{137}Cs نمونه مورد نظر و A_{ref} رادیواکتیویته ^{137}Cs نمونه مرجع هست. در شرایط استقرار رژیم فرسایشی، رادیواکتیویته ^{137}Cs نمونه مورد آزمون از رادیواکتیویته ^{137}Cs

[1] Soil redistribution

سایت مرجع کمتر و در شرایط انباشت رسوب، رادیواکتیویته ^{137}Cs نمونه مورد نظر به‌دلیل غنی شدن ناشی از انباشت خاک‌های فرسوده شده بالادست دامنه بیشتر خواهد بود.

روابط و معادلات معتبر ارائه شده توسط Walling و He (2007) در برآورد نرخ فرسایش خاک و انباشت رسوب بر اساس مفروضات حاکم بر استفاده از رادیوایزوتوپ‌های بارشی و تعاریف فوق‌الذکر واژه "بازپخش خاک" را جایگزین فرسایش خاک کرده‌اند که از طرفی قابلیت منحصر به‌فرد این روش بوده و امکان جابجایی خاک را در سطح دامنه و مزرعه آشکار می‌سازد. این در شرایطی است که در روش‌های سنتی مانند پلات آزمایشی میزان جابجایی خاک و انباشت آن در جای‌جای دامنه قابل‌اندازه‌گیری نیست. ضرورت وجود نرم‌افزار کاربردی و قابل استفاده برای کلیه رادیوایزوتوپ‌های بارشی (^{137}Cs, ^{210}Pb, ^{7}Be) و کاربرد روزافزون این روش منجر به ارائه مجموعه مدل‌های تبدیل در قالب یک Macro تحت نرم‌افزار Excel توسط Walling و He (2007) شد.

در مطالعه اخیر (بخش دوم مقاله) از مدل موازنه جرمی II استفاده شده است که در آن تغییرات زمانی ریزش رادیوایزوتوپ‌ها و سرنوشت رادیوایزوتوپ‌های تازه اضافه‌شده به سطح خاک قبل از عملیات به‌هم ریختگی پروفیل خاک در حین قطع یکسره یا عملیات شخم را درنظر می‌گیرد. اطلاعات ورودی به این مدل سال بهره‌برداری در طرح جنگل‌داری و تبدیل اراضی جنگلی به اراضی کشاورزی، عمق شخم یا ضخامت به‌هم ریختگی خاک (m)، وزن مخصوص ظاهری خاک ($Kg\ m^{-3}$)، رادیواکتیویته ^{137}Cs ($Bq\ m^{-2}$)، عمق بیشینه تمرکز رادیوایزوتوپ در پروفیل خاک (m) و فاکتورهای تصحیح بافت خاک (P) و تناسب (بدون بعد) و اطلاعات خروجی مدل میزان فرسایش (مقادیر منفی) و رسوب‌گذاری (مقادیر مثبت) به تن در هکتار هست. نرخ خالص بازپخش خاک، حاصل جمع جبری مقادیر فرسایش/ رسوب‌گذاری نمونه‌ها در طول ترانسکت هست. بدین ترتیب، مقادیر نرخ خالص منفی نشان‌دهنده فرسایشی بودن رژیم بازپخش خاک در طول دامنه است و عکس آن بیانگر عدم خروج خاک از دامنه و انباشت آن‌ها عمدتاً در بخش پایین‌دست دامنه است.

مدل موازنه جرمی II مدل جامع‌تری است که در آن تغییرات زمانی ریزش رادیوایزوتوپ‌ها و سرنوشت رادیوایزتوپ‌های تازه اضافه شده به سطح

خاک قبل از عملیات شخم یا به‌هم ریختگی پروفیل خاک را درنظر می‌گیرد. رابطه زیر برای مناطق فرسایش یافته ارائه شده است.

$$\frac{dA(t)}{dt} = (1-\Gamma)I(t) - (\lambda + P\frac{R}{d})A(t) \qquad (۲)$$

که در آن:
A(t)= اکتیویته ^{137}Cs در واحد سطح ($Bq\ m^{-2}$)؛
R: نرخ فرسایش ($kg\ m\text{-}2\ yr^{-1}$)؛
D: عمق تجمعی که بیان کننده میانگین عمق شخم است (m)؛
λ: ثابت فروپاشی (yr^{-1})؛
I(t): فرونشست سالانه ^{137}Cs ($Bq\ m^{-2}\ yr^{-1}$)؛
Γ: درصد فرونشست جدید ^{137}Cs که قبل از مخلوط شدن با لایه شخم توسط فرسایش جابجا شده است.
P: فاکتور تصحیح بافت خاک

بدین ترتیب اگر روند کاهنده نمایی را نیز برای ^{137}Cs (Γ) تازه به خاک اضافه شده فرض کنیم، از رابطه زیر این مقادیر قابل محاسبه است.

$$\Gamma = P\gamma(1-e^{-R/H}) \qquad (۳)$$

که در آن γ نسبت ^{137}Cs سالانه که از ستون خاک قابل فرسایش است و H ($kg\ m^{-2}$) عمق بیشینه انباشت ^{137}Cs تازه به خاک اضافه شده می‌باشد. در صورتی که t_0 (yr) سال آغاز کشت یا جنگل‌زدایی باشد، موجودی کل ^{137}Cs A(t) در سال t مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A(t) = A(t_0)e^{-(PR/d+\lambda)(t-t_0)} + \int_{t_0}^{t}(1-P\gamma(1-e^{-R/H}))I(t')e^{-(PR/d+\lambda)(t-t')}dt' \qquad (۴)$$

که در آن $A(t_0)$ موجودی ^{137}Cs (Bq m-2) در سال t_0 (yr) می باشد:

$$A(t_0) = \int_{1954}^{t_0} I(t')e^{-\lambda(t'-t_0)}dt' \qquad (۵)$$

بر این اساس، R به‌عنوان نرخ فرسایش از حل معادله بالا و با در دست داشتن اطلاعات پایه عمق شار انباشت ^{137}Cs و مقادیر پارامترهای شناخته شده، قابل محاسبه است. از طرفی غلظت ^{137}Cs رسوبات جابجا شده $C_e(t')$ با استفاده از رابطه زیر قابل دستیابی است.

$$C_e(t') = \frac{I(t')}{R}P\gamma(1-e^{-R/H}) + P\frac{A(t')}{d} \qquad (۶)$$

برای نقاط انباشتی در طول دامنه و ترانسکت مورد مطالعه که در آن غلظت ^{137}Cs از غلظت ^{137}Cs در نقاط مرجع بیشتر است، موجودی اضافه ^{137}Cs با رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A_{ex} = \int_{t_0}^{t} R'C_d(t')e^{-\lambda(t-t')}dt' \qquad (۷)$$

که در آن R' ($kg\ m^{-2}\ yr^{-1}$) نرخ رسوبگذاری و $C_d(t')$ ($Bq\ \ kg^{-1}$) غلظت ^{137}Cs در رسوب انباشته شده می‌باشد. در واقع $C_d(t')$ بیانگر اختلاط رسوب و غلظت ^{137}Cs جابه‌جا شده از تمام نقاط فرسایش یافته است که در نقطه انباشتی تجمع یافته‌اند. مقدار $C_d(t')$ عملاً دربر دارنده ^{137}Cs اضافه

تازه نهشته شده و ^{137}Cs که در حین فرسایش از مناطق شخم زده شده و به‌هم ریخته به نقطه انباشت هدایت شده‌اند. از طرفی، $C_d(t')$ را می‌توان غلظت‌های ^{137}Cs رسوبات جابه‌جا شده از مناطق فرسایش یافته بالای دامنه S از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$C_d(t') = \frac{1}{\int_S RdS} \int_S P' C_e(t') RdS \qquad (۸)$$

که همانند رابطه نخست، نرخ رسوبگذاری R' از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_{t_0}^{t} C_d(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'} \qquad (۹)$$

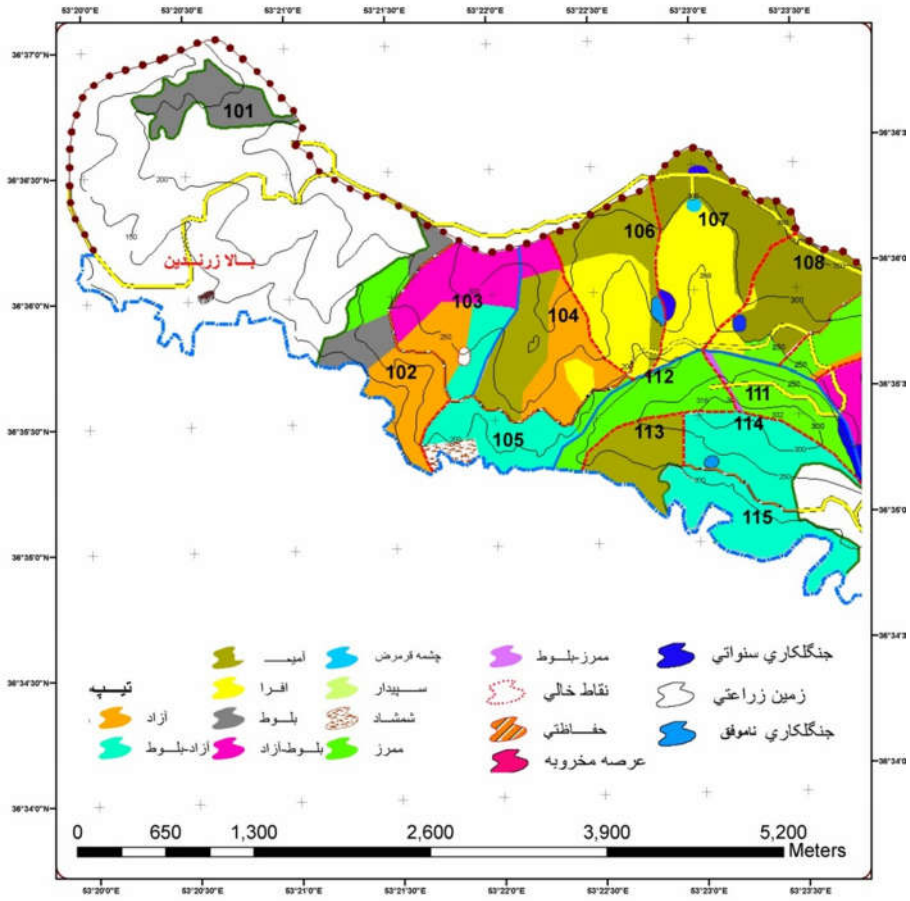
۲. اثربخشی طرح‌های جنگل‌داری بر روی حفاظت خاک جنگل، مطالعه موردی: طرح نکا- ظالم‌رود، بخش ۲، سری ۱

منطقه مورد بررسی

پس از بررسی مناطق مختلف، طرح جنگل‌داری نکا- ظالم‌رود، بخش ۲، سری ۱ واقع در منطقه زرندین شهرستان نکا در حوزه آبخیز سیل‌خیز نکا که در آن پاک‌تراشی جنگل به‌منظور زراعت دیم سابقه دیرینه دارد انتخاب شد (شکل ۳). روش جنگل‌شناسی مورد استفاده در این طرح، قطع یکسره بوده است. ترانسکت مورد بررسی در پارسل ۱۰۷ قرار دارد که در آن تیپ جنگلی افرا به شیوه همسال جنگل‌کاری شده‌اند. این منطقه علاوه بر دارا بودن ویژگی‌های مورد نظر، دارای جنگل حفاظتی در حد فاصل بین ترانسکت معرف و اراضی دیم به‌منظور انتخاب ایستگاه مرجع است که جزئیات بیشتر آن در بخش اول مقاله ارائه شده است.

نمونه‌برداری از ترانسکت معرف

طرح جنگل‌داری نکا- ظالم‌رود، بخش ۲، سری ۱ و ترانسکت شاهد هر دو در جنوب جاده بالا زرندین به سه‌کیلا واقع شده‌اند. تعداد ۱۱ نمونه از ترانسکت با کاربری کشاورزی دیم به‌عنوان اراضی جنگلی تغییر کاربری داده‌شده و بدون مدیریت در دامنه‌ای به طول ۲۷۰ متر در جهت جنوب غربی برداشته شد (شکل A۴). همچنین تعداد ۷ نمونه از ترانسکت معرف طرح جنگل‌داری (پارسل ۱۰۷) در دامنه‌ای به‌طول ۱۸۰ متر و در فاصله ۱۶۰۰ متری شرق سایت مرجع که با درختان همسال افرا جنگل‌کاری شده‌اند، برداشت شد (شکل B۴). این ترانسکت با ۱۳ درصد شیب به سمت جنوب و در بین ارتفاعات ۳۱۵ و ۲۹۰ متری واقع شده است.



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی، موقعیت نمونه مرجع، ترانسکت‌های شاهد و طرح جنگل‌داری نکا-ظالم‌رود، بخش ۲، سری ۱

یافته‌ها و تحلیل‌ها

خصوصیات فیزیکی خاک ترانسکت‌های مورد مطالعه

در مطالعه ترانسکت دیم‌زار متوسط توزیع ذرات خاک به ترتیب ماسه با ۳±۵/۱۴ درصد با ضریب تغییر ۰/۶، ۳±۴۳/۳ درصد سیلت با ضریب تغییر ۰/۰۸ و ذرات رس ۵±۲/۵۴ درصد فراوانی با ضریب تغییر ۰/۰۵ به‌دست‌آمده است. نتایج نشان از تغییر جزیی درصد ذرات سیلت و رس و تغییرات بسیار زیاد ذرات ماسه در طول ترانسکت مورد مطالعه دارد. بافت خاک ترانسکت کاربری دیم‌زار لوم سیلتی- رسی است. متوسط وزن مخصوص خشک به‌عنوان یکی از خصوصیات فیزیکی مهم در این مطالعات در طول این ترانسکت ۱۴۲±۱۳۸۱ کیلوگرم بر مترمکعب با ضریب تغییر ۰/۱ به‌دست‌آمده است.

شکل ۴- A) نمونه‌برداری از ترانسکت شاهد دیم‌زار و B) نمونه‌برداری از ترانسکت معرف طرح جنگل‌کاری نکا-ظالم‌رود

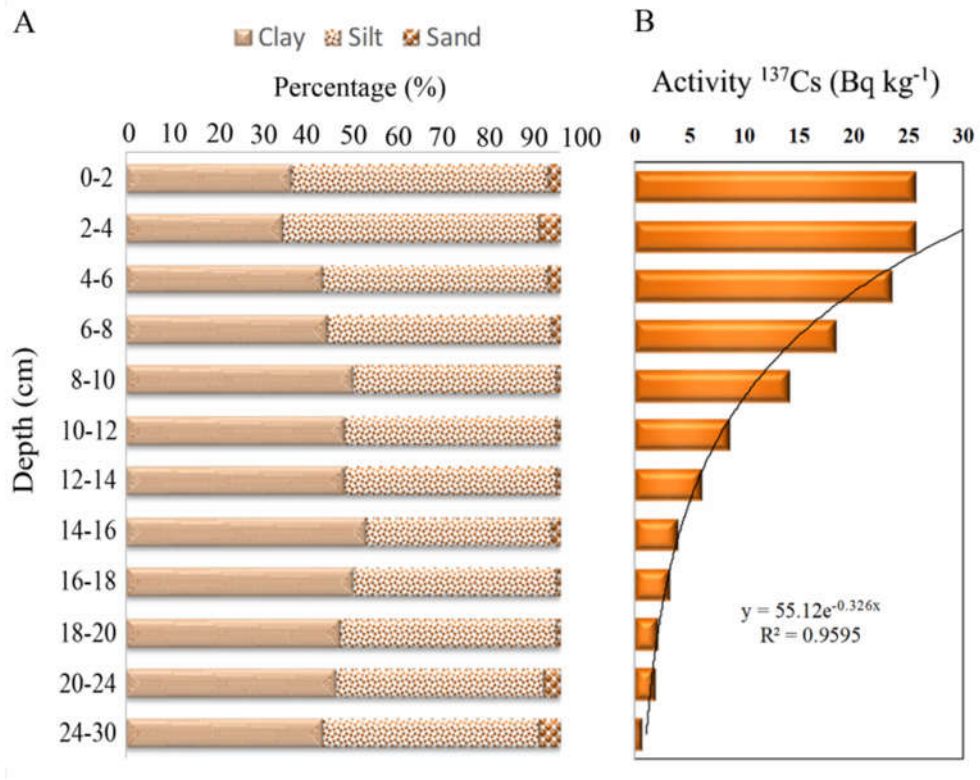
خاک ترانسکت معرف با کاربری جنگل‌کاری درختان افرا همسال و همزاد در شرق منطقه معروف به چشمه در زرندین بالا، به‌طور متوسط دارای ۱/۱۴±۰/۳۸ درصد ماسه با ضریب تغییر ۰/۳۳، ۴۱/۴۳±۴/۰۴ درصد سیلت با ضریب تغییر ۰/۱ و ۵۷/۴۳±۳/۹۵ درصد رس با ضریب تغییر ۰/۰۷ است. در این ترانسکت نیز به‌دلیل وجود پوشش جنگلی علی‌رغم تجربه بهره‌برداری جنگل سهم ذرات ریزدانه رسی بیش از ۵۷ درصد باقیمانده است. بافت خاک در طول این ترانسکت متغیر بوده و بین لوم سیلتی- رسی و رس سیلتی متغیر است. مقدار متوسط وزن مخصوص خشک به‌عنوان یکی از خصوصیات فیزیکی مهم در این مطالعات در طول این ترانسکت ۱۲۷۸±۱۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب با ضریب تغییر ۰/۰۸ محاسبه شده است.

همان‌گونه که از پروفیل خاک مرجع منطقه زرندین مشخص است، درصد فراوانی ذرات رس در اعماق ۲ و ۴ سانتی‌متر به ترتیب ۳۸ و ۳۵ است و از اعماق ۴ سانتی‌متر بیشتر ۴۰ تا ۵۰ درصد تغییر می‌کند. بافت پروفیل خاک مرجع منطقه زرندین نکا همچون بافت غالب منطقه رس سیلتی است (شکل A۵).

موجودی رادیوایزوتوپ سایت‌های مرجع

تعیین ذخیره یا اکتیویته مجموع لایه‌های سایت مرجع از مهم‌ترین مراحل کاربرد فن‌های رادیوایزوتوپی به‌شمار می‌رود. به‌هم ریختگی کامل پروفیل خاک و عدم وجود روند نمایی در فروپاشی رادیوسزیم باعث عدم تأیید سایت مرجع انتخاب شده خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده روند فروپاشی نمایی با همبستگی بالا در سایت‌های مرجع استان مازندران است. بر اساس نتایج

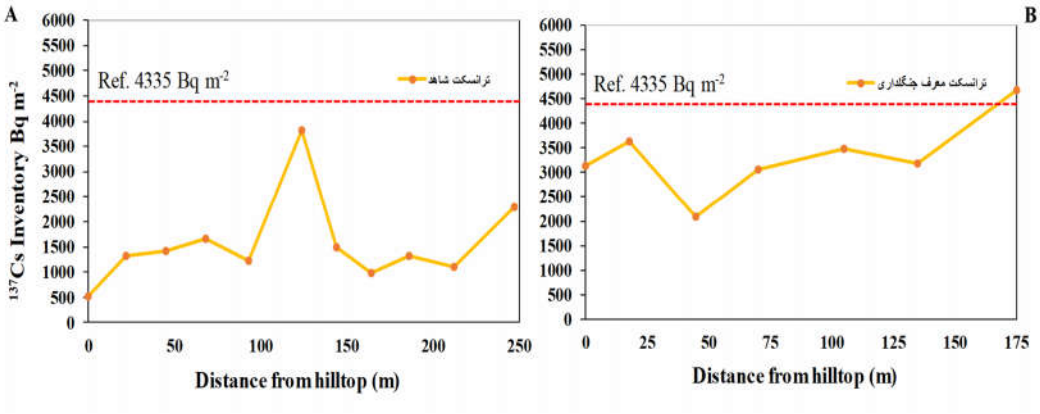
به‌دست‌آمده ذخیره رادیوسزیم سایت مرجع زرندین بالا (R^2=0.96) ۴۳۳۵ بکرل بر مترمربع به‌دست‌آمده است. همان‌گونه که در شکل B۵ مشهود است، در سایت مرجع، روند نمایی در زرندین با همبستگی بالا نشان از عدم به‌هم خوردگی پروفیل خاک و مطلوبیت آن به‌منظور مرجع بودن دارد.



شکل ۵- A) وضعیت تغییرات عمقی توزیع بافت خاک و B) روند نمایی کاهش رادیواکتیویته ^{137}Cs در عمق نمونه مرجع بالا زرندین

ذخیره رادیوایزوتوپ نمونه‌های مورد مطالعه

در مطالعه ترانسکت اول به‌طول ۲۷۰ که با کاربری کشاورزی دیم، دارای بیشینه، کمینه و متوسط ذخیره رادیوسزیم نمونه‌های مطالعه شده به ترتیب ۳۸۱۹، ۵۱۷ و ۸۷۰±۱۵۵۴ (Bq m^{-2}) با ضریب تغییر ۰/۵۶ است. این مقادیر تحت رژیم بارشی متوسط سالانه ۶۲۰ میلی‌متر حاصل شده است. ذخیره ^{137}Cs در طول این ترانسکت تا فاصله ۲۵۰ متری از بالای دامنه روند افزاینده به سمت پایین دامنه دارد (شکل A۶).



شکل ۶- روند تغییرات رادیواکتیویته ^{137}Cs در طول ترانسکت‌های شاهد (A) و معرف طرح جنگل‌داری (B)

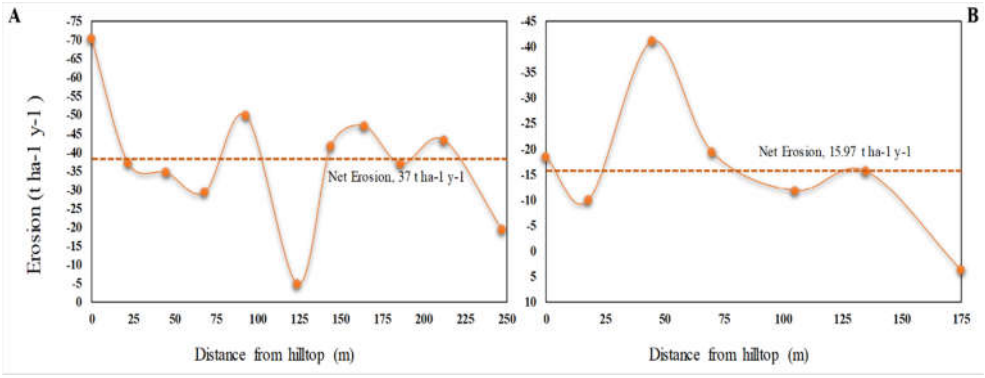
نتایج به‌دست‌آمده از ترانسکت معرف طرح جنگل‌داری که مجاور چشمه قرمرض مطالعه شد نشان داد که بیشینه، کمینه و متوسط ذخیره رادیوسزیم نمونه‌ها به ترتیب ۴۶۷۶، ۲۰۷۵ و ۳۲۲۱±۷۷۸ (Bq m^{-2}) با ضریب تغییر ۰/۲۳ است. این میزان ذخیره برای متوسط بارش ۶۲۰ میلی‌متر و تاج‌پوششی برابر ۷۵-۸۵ درصد و میزان کف پوشش ۵-۱۰ درصد و وضعیت کوبیدگی خاک نسبتاً زیاد به‌دست‌آمده است. در این ترانسکت تعداد درختان در هر هکتار ۲۱۶ و حجم درختان در هکتار ۳۰۳ است. تیپ خاک نیز قهوه‌ای پسدوگلی تا قرمز پدزولیک است و بافت غالب خیلی سنگین رس سیلتی است. نوع سنگ مادر همچون ترانسکت دیم‌زار از سنگ‌های دلومیتی سازند لار به سن ژوراسیک بالایی تشکیل شده است. بررسی تغییرات ذخیره رادیوسزیم در طول ترانسکت مطابق انتظار از بالای دامنه به سمت پایین دامنه، جایی‌که خاک‌های فرسایش یافته تجمع یافته و تا اندازه‌ای ذخیره رادیوسزیم افزایش یافته است (شکل B۶).

نرخ فرسایش خاک در ترانسکت‌های مطالعه شده

در این قسمت خروجی اصلی مطالعه اثربخشی اجرای طرح جنگل‌داری در حفاظت خاک در عرصه منتخب استان مازندران ارائه شده است. همان‌گونه که در تشریح شرایط خاک، زمین‌شناسی و توپوگرافی و بارش عنوان شد، هردو ترانسکت دارای شرایطی مشابهی هستند، لیکن تفاوت کاربری در آن‌ها شرایط متفاوتی از نرخ فرسایش در آن‌ها ایجاد کرده است. ازاین‌رو، پس از تشریح وضعیت بازپخش خاک در این دو ترانسکت، اثربخشی متصور تحلیل شده است. نرخ بازپخش خاک در ترانسکت دیم‌زار که معرف کاربری مدیریت نشده

بعد از بهره‌برداری جنگل است، با استفاده از مدل تعادل جرمی II محاسبه و میزان هدر رفت خاک در هر نقطه و نرخ خالص فرسایش در طول ترانسکت به دست آمد. نتایج تأکید بر رژیم فرسایشی در طول این ترانسکت دارد و علی‌رغم جابجایی خاک در طول آن شرایط کاملاً فرسایشی بوده است. در چنین شرایطی نرخ خالص فرسایش در طول این ترانسکت ۳۷/۴ تن در هکتار در سال است. نتایج نشان می‌دهند که بالغ بر ۶۴ درصد از بخش به‌هم ریخته خاک پس از جنگل‌زدایی و به تعبیری عمق شخم در نظر گرفته شده (۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع) در طی دوره بعد از تغییر کاربری معادل ۱۱۶ کیلوگرم بر مترمربع با احتساب وزن مخصوص ۱۳۸۱ کیلوگرم بر مترمکعب هدر رفته است. بدین ترتیب در بازه ۵۴ ساله بین زمان برداشت چوب و سال نمونه‌برداری، نرخ متوسط فرسایش سالانه ۰/۲۱۵ سانتی‌متر در طول دامنه مورد مطالعه رقم خورده است (شکل A7).

نرخ خالص بازپخش خاک در طول ترانسکت مدیریت‌شده واقع در پارسل ۱۰۷، ۱۵/۹۷ تن در هکتار در سال به‌دست‌آمده است. برآورد نرخ متوسط هدر رفت خاک نسبت به ضخامت بخش به‌هم‌ریخته آن پس از بهره‌برداری قطع یکسره و آماده‌سازی عرصه، ۲۵ سانتی‌متر و به تعبیری ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مربع منظور شده است. بر اساس نرخ هدر رفت موجودی رادیوسزیم، ۲۳/۳۸ درصد از ضخامت خاک در طی دوره بعد از تغییر کاربری، برابر ۵۸/۴۵ کیلوگرم بر متر مربع از خاک تلف شده است. از طرفی با توجه وزن مخصوص خشک به‌دست آمده برای این ترانسکت (۱۲۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب)، این میزان از فرسایش معادل ۴/۵۷ سانتی‌متر هست. بدین ترتیب در بازه ۴۳ ساله بین زمان بهره‌برداری و سال نمونه‌برداری، دامنه مورد مطالعه با نرخ متوسط فرسایش سالانه ۰/۱ سانتی‌متر فرسایش یافته است. در طول این ترانسکت، روند مورد انتظار که کاهش تدریجی نرخ فرسایش از بالادست به سمت پاشنه دامنه است رقم خورده است (شکل B7). از طرفی در پاشنه شیب انباشت خاک فرسایش یافته از بالای دامنه نیز رخ داده است. بخش عمده ترانسکت دارای نرخ فرسایشی نزدیک به نرخ متوسط هستند و اختلاف موجود در نرخ نقطه‌ای فرسایش عمدتاً به سوابق بهره‌برداری این پارسل برمی‌گردد.



شکل ۷- روند تغییرات فرسایش خاک در طول ترانسکت شاهد (A) و در طول ترانسکت معرف طرح جنگل‌داری (B)

توصیه ترویجی

اراضی دیم‌زار در حوضه فرسایش‌پذیر نکا که دارای سوابق سیل‌خیزی قابل‌ملاحظه‌ای است، دارای نرخ فرسایش خاک ۳۷ تن بر هکتار در سال هستند. این عرصه‌ها به‌عنوان فرسایش‌پذیرترین اراضی کشاورزی که بیشتر در شرق استان واقع شده‌اند، در اولویت برنامه‌های مدیریت فرسایش خاک قرار گیرند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده در خصوص نرخ فرسایش خاک در عرصه‌هایی که طرح جنگل‌داری به‌روش جنگل‌کاری درختان دانه‌زاد همسال (پارسل ۱۰۷ طرح نکا- ظالم‌رود- بخش ۲) اجرا و مدیریت اراضی اعمال شده است، اثربخشی ۵۶ درصدی از منظر کاهش فرسایش رقم خورده است. بدین ترتیب، روش جنگل‌داری دانه‌زاد همسال به‌ویژه کاشت درختان افرا قویاً برای بازکاشت عرصه‌های بهره‌برداری شده یا عرصه‌هایی که تحت جنگل‌کاری و تجدید حیات قرار دارند، توصیه می‌شود.

تغییر الگوی کشت از دیم‌زار به زارعت چوب، درختان مثمر یا گیاهان دارویی چند ساله با تاج پوشش کامل اقدام مدیریتی مناسبی برای حفظ معیشت کشاورزان و کاهش (بیش از ۵۰ درصدی) نرخ فرسایش می‌باشد.

بر اساس آخرین آمار اعلام شده در سمپوزیوم جهانی فرسایش خاک (ایتالیا، ۲۰۱۹)، هر تن فرسایش خاک ۴۰ یورو خسارت درپی دارد. لذا مطابق نرخ متوسط فرسایش به‌دست آمده، سالانه حدود ۵۵ میلیون تومان به ازای هر هکتار کاربری دیم‌زار در دامنه‌های پرشیب استان مازندران به منابع طبیعی کشور خسارت وارده می‌شود. بدین ترتیب، اجرای طرح جنگل‌داری در عرصه‌های

بهره‌برداری شده به‌ویژه دانه‌زاد همسال خسارات به منابع طبیعی را تا ۸ میلیون تومان در هکتار کاهش داده‌اند.

کاربرد فن‌های رادیوایزوتوپی به‌عنوان روش نوین و فناورانه برای آشکارسازی اثربخشی کلیه روش‌های جنگل‌شناسی به‌کاربرده شده در جنگل‌های هیرکانی در بازه ۵۰ سال اخیر از منظر حفاظت خاک قویاً توصیه می‌شود. پیش‌نیاز استفاده از فن‌های رادیوایزوتوپی برای تبیین اثربخشی طرح‌های جنگل‌داری، وجود اطلاعات دقیق روش و زمان بهره‌برداری، تیپ‌شناسی درختان جنگل اولیه و بازکاشت شده و ویژگی‌های خاک‌شناسی، توپوگرافی و زمین‌شناسی می‌باشد.

منابع

اسپهبدی، ک.، ۱۳۹۸. جنگل‌های هیرکانی، میراث جهانی. حفاظت و بهره‌برداری جنگل‌های هیرکانی، ۱ (۱): ۴-۱.

اکبرزاده، ع.، قربانی، ش.، نادری خوراسگانی، م.، محمدی، ج. و تقی‌زاده مهرجردی، ر.ا. ۱۳۹۶. تأثیر آتش‌سوزی بر آبگریزی و مقدار و عوامل فرسایش خاک در جنگل‌های سواحل جنوب غربی دریای خزر. مجله جنگل ایران، ۹: ۱۴۵-۱۵۷.

پرویزی، ی.، گرجی، م.، حسینی جودکی، ر. و پرویزی، خ. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر تغییر کاربری دیم‌زار کم‌بازده به مدیریت جنگل زراعی بر ویژگی‌های فیزیکی ذخیره کربن آلی خاک. مجله جنگل ایران، ۷: ۵۳۷-۵۲۳.

خواجوی، ا.، عرب‌خدری، م.، مهدیان، م.ح. و شادفر، ص. ۱۳۹۴. بررسی مقادیر فرسایش و تلفات خاک در سطح کشور با استفاده از ارقام اندازه‌گیری شده روش سزیم ۱۳۷ و پلات‌های آزمایشی. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۶ (۱۱): ۱۵۱- ۱۳۷.

Bobek, H., 2005. Historical View of Natural Forests and Iran's Trees. Geographic Organization of the Armed Forces, Tehran.

Gharibreza, M. and Ashraf, M.A. 2014. Applied Limnology. Springer, Tokyo.

IAEA, 2014. Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies. IAEA TECDOC SERIES. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Ritchie, J.C., and Ritchie, C.A. 2007. "Bibliography of publications of 137Cesium studies related to erosion and sediment deposition". USDA–ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory Occasional Paper HRSL-2007-01.

Walling, D.E. and He, Q. 1999. Using Fallout Lead-210 Measurements to Estimate Soil Erosion on Cultivated Land. Soil Science Society of America Journal, 63: 1404-1412.

Yeager, K.M., Santschi, p.H., Phillips, J D. and Herbert, B.H. 2005. Suspended sediment sources and tributary effects in the lower reaches of a coastal plain stream as indicated by radionuclides, Loco Bayou, Texas. Journal of Environmental Geology, 47: 382–395.