مقایسه‌ی اثر وتیور و پلی‌اکریل آمید بر شاخص‌های پایداری ساختمان و فرسایش خاک

الهام امیری خبوشان: *گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد*
حجت امامی*: *گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد*
علیرضا آستارایی: *گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد*
محمدرضا مصدقی: *گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان*

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۰)

چکیده

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط زیست، منابع طبیعی و کشاورزی در جهان است. پایداری ساختمان خاک عنصر کلیدی سلامتی خاک است که یکی از عوامل اصلی در ارزیابی عملیات کنترل فرسایش آن به شمار می‌رود. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر سیستم کشت وتیور به عنوان یک ابزار بیومهندسی ارزنده و پلی‌اکریل آمید (PAM)، بر شاخص‌های پایداری خاکدانه و ساختمان خاک و شاخص‌های فرسایش آن در شرایط میدانی بر خاکی لوم در شیب ۵ درصد انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل تیمار کشت گیاه وتیور (VP0)، کاربرد PAM در دو سطح ۲۰ (P2) و ۴۰ (P4) کیلوگرم در هکتار، کاربرد همزمان وتیور و هر دو سطح PAM (VP2 و VP4) و تیمار شاهد (P0) بود. شاخص‌های پایداری شامل میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت مرطوب (MWD_{wet}) و خشک (MWD_{dry})، پایداری خاکدانه (AS)، شاخص پایداری (SI)، و درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD) تعیین شد. بارش با شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از سامانه‌ی شبیه‌ساز باران، اعمال و رواناب و رسوب تولید شده‌ی بارش جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که وتیور و PAM، شاخص‌های پایداری MWD_{wet}، MWD_{dry}، AS، SI را افزایش و PAD را کاهش دادند؛ البته تأثیر وتیور در افزایش شاخص‌های پایداری بسیار بیشتر از PAM بود. همچنین وتیور و PAM ، شاخص‌های فرسایش را کاهش دادند و کاهش فرسایش و رواناب و ضریب رواناب بیشتر تحت‌تأثیر وتیور بود. به طور کلی، براساس نتایج این پژوهش کاربرد وتیور به عنوان یک روش بیومهندسی کم‌هزینه و بادوام برای افزایش پایداری خاکدانه و ساختمان خاک، و کاهش رواناب و هدررفت خاک در مناطق نیمه‌خشک مانند ایران پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: پایداری خاکدانه، حفاظت زیستی خاک، رواناب، هدررفت خاک، شبیه‌ساز باران

۱ـ مقدمه

فرسایش خاک یکی از اساسی‌ترین معضلات محیط زیست، منابع طبیعی و کشاورزی در جهان است که پیامدهای ناخواسته‌ی آن با تهدید کمیت و کیفیت خاک به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات امروزی اکوسیستم‌های طبیعی و تحت مدیریت انسان تلقی می شود (صادقی، ۱۳۸۹ و ابراهیمی‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۲). این چالش در ایران به سبب شدت

* نویسنده مسئول: hemami@um.ac.ir

زیاد فرسایش خاک و مدیریت نادرست آن از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ از این‌رو، مهار فرسایش خاک در مدیریت و حفظ منابع طبیعی اهمیت زیادی دارد. عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک، بر مقاومت آن در برابر فرسایش تأثیر دارند. پایداری خاکدانه‌ها به عنوان عنصر کلیدی سلامت خاک، یکی از عوامل اصلی بهبود یا تخریب خاک به شمار می‌رود که برای ارزیابی اثرات راهکارهای استفاده شده در کنترل فرسایش خاک، حائز اهمیت است (Mamedov and Levy, 2013 & Cerda, 2000). از شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی پایداری خاکدانه و ساختمان خاک استفاده می‌شود؛ میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت مرطوب (MWD_{wet})[1] و خشک (MWD_{dry})، شاخص پایداری (SI)[2] و درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD)[3] از جمله این شاخص‌هاست که به روش‌های مختلفی تعیین می‌شود (Kemper and Rosenau, 1986 & Madari et al, 2005).

از جمله روش‌های افزایش پایداری ساختمان خاک و مقاومت آن در برابر عوامل تخریبی و مهار فرسایش آن، کاربرد سیستم‌های بیومهندسی و تثبیت‌کننده‌های خاک مانند پلیمرهای شیمیایی است. استفاده از پوشش گیاهی به عنوان یک ابزار بیومهندسی، برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند ساختمان خاک و پایداری آن و کنترل فرسایش و رسوب شاخصی مناسب است. با توجه به اهمیت زیاد کنترل بیومهندسی فرسایش، کشت گونه‌ای از گیاه وتیور با نام علمی Zizinoids vetiveria برای حفاظت خاک و آب، اولین بار توسط بانک جهانی در سال ۱۹۸۰ در هند استفاده و تحت عنوان فناوری وتیور گراس[4] (VGT) معرفی شد. گیاه وتیور یک گیاه دائمی گرمسیری و بومی هندوستان است و به‌طور طبیعی در زمین‌های پست و مرتفع و در انواع خاک‌ها و شرایط اقلیمی سازگاری نشان می‌دهد (Truong, 2002). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که وتیور در کنترل فرسایش خاک و افزایش پایداری زمین موفق بوده‌است (Materechera, 2010 & Oku et al , 2011). اوکیو و همکاران (۲۰۱۱) برخی از شاخص‌های پایداری را در کرت‌های زیرکشت وتیور و کوددهی شده، بررسی کردند (Oku et al , 2011). نتایج آنها نشان داد که کرت‌های زیرکشت وتیور و کوددهی شده، پایداری خاکدانه را به‌طور مشابهی (۶۴٪) نسبت به تیمار شاهد (۵۴٪) افزایش داده‌اند. همچنین MWD در تیمار زیر کشت وتیور ۶/۱۱ ٪ بیشتر از تیمار کوددهی شده و ۱۹ ٪ بیشتر از تیمار شاهد بود. این پژوهشگران معتقدند که کشت وتیور در زمین‌های کشاورزی مستعد فرسایش، می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود بخشد. ادم و اوکوکو[5] (۲۰۱۵)، اثر وتیور را بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک و کنترل فرسایش بررسی کردند و دریافتند که وتیور، پایداری خاکدانه‌ها را در حالت مرطوب افزایش داده؛ بنابراین مقاومت آن را در برابر تشکیل سله و فرسایش خاک افزایش داده است (Edem and Okoko, 2015). دنجادی[6] و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی تأثیر سیستم وتیور به صورت چپرهایی با فواصل متفاوت در سه شیب مختلف، مشاهده کردند که گیاه وتیور در کاهش رواناب و هدررفت خاک توان زیادی دارد. ردیف‌های وتیور، شروع رواناب را به تأخیر انداخت و سرعت اوج رواناب و میزان فرسایش را

1 Mean Weight Diameter
2 Aggregate Stability
3 Percent of Aggregate Degradation
4 Vetiver Grass Technology
5 Edem and Okoko
6 Donjadee

کاهش داد (Donjadee et al , 2010). وود[1] و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی نقش وتیور در حفاظت خاک و آب در خاک‌های ورتی‌سول، دریافتند که وتیور در کنترل فرسایش زمین‌های کشاورزی تأثیر زیادی دارد (Wolde, 2015).

در میان پلیمرهای رایج قابل استفاده، پلی‌اکریل آمید آنیونی (PAM) مؤثرترین نوع برای جلوگیری از تشکیل سله، افزایش پایداری ساختمان و نفوذپذیری خاک و در نتیجه کاهش شدت رواناب و فرسایش و دارای طولانی‌ترین آثار باقی‌مانده در خاک است که به دلیل سهولت تهیه، مصرف آن از دهه‌ی ۱۹۹۰ رشد فراوان داشته است (Levey et al , 1992 2015 et al , 2014). در نقاط مختلف جهان، پژوهش‌های مختلفی در زمینه‌ی افزایش پایداری ساختمان خاک (Lentz, & Melo) و کنترل فرسایش و رواناب (Abrol et al , 2013 & Ao et al , 2016) در اثر کاربرد PAM گزارش شده‌است. در این خصوص، ملو و همکاران (۲۰۱۴) اثر مقادیر مختلف PAM ($mg\ kg^{-1}$ ۱۲/۵، ۵۰ و ۱۰۰) را بر میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها و کیفیت ساختمان خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده‌ی دو خاک التی سول و اکسی‌سول مطالعه کردند. این محققان دریافتند که کارایی PAM به نوع خاک بستگی دارد و در پایداری خاکدانه‌های بزرگتر (۲۵ /۰-۲ و >۲mm) در هر دو خاک مؤثرتر می‌باشد (Melo et al , 2014). ممدوف[2] و همکاران (۲۰۱۶) اثر ترکیبی بافت خاک ۳ گروه اندازه خاکدانه (۵/۲۵-۰/۰، ۱/۵-۰ و ۲-۱ میلی‌متر) و کاربرد PAM را بر پایداری خاکدانه و ساختمان خاک بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش مقدار رس، اندازه خاکدانه و PAM شاخص پایداری ساختمان خاک افزایش می‌یابد. اثر PAM در افزایش شاخص پایداری ساختمان خاک به اندازه‌ی خاکدانه بستگی دارد؛ به‌طوری‌که تأثیری در پایداری خاکدانه‌هایی با اندازه‌ی کوچک‌تر نداشت. همچنین اثر اندازه خاکدانه بر افزایش شاخص پایداری، به حضور PAM بستگی دارد و این تأثیر در حضور PAM مشاهده شد (Mamedov et al , 2016). وانگ[3] و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی اثر PAM بر رواناب و فرسایش خاک پرداختند؛ آنها با بررسی اثر دو نوع PAM با وزن مولکولی متفاوت در مقادیر مختلف، دریافتند که کارایی PAM در کاهش رواناب به مقدار آن بستگی دارد؛ به‌طوری‌که مقادیر کم PAM رواناب را کاهش، درحالی‌که مقادیر زیاد آن با افزایش گران‌روی محلول و کاهش نفوذپذیری، رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. PAM با وزن مولکولی بالاتر موجب کاهش فرسایش شد، ولی در کاهش رواناب تأثیر معنی‌داری نداشت (Wang et al , 2011). ابرول و همکاران (۲۰۱۳) با هدف بررسی شناخت مکانیزم تأثیر PAM دانه‌ای بر فرسایش خاک و سرعت نفوذ در یک خاک لوم سیلتی، با استفاده از سطوح مختلف PAM، مخلوط با گچ و گچ دریافتند که کاربرد پلی‌اکریل آمید دانه‌ای به تنهایی در جلوگیری از فرسایش مؤثر بود، ولی در بهبود سرعت نفوذ آب در خاک تأثیری نداشت. درحالی‌که کاربرد مخلوط PAM دانه‌ای با گچ در کاهش فرسایش، افزایش سرعت نفوذ آب در خاک و در نتیجه کاهش رواناب مؤثر بود. این پژوهشگران انحلال PAM و گران‌روی بسیار زیاد این محلول را دلیل کاهش سرعت نفوذ آب در خاک ذکر و عنوان کردند که گچ به عنوان منبعی از الکترولیت، گران‌روی محلول PAM را کاهش داد و به افزایش سرعت نفوذ آب در خاک منجر شد. علاوه بر این، PAM حل‌شده در رواناب سبب شد پیوند ذرات خاک سطحی افزایش و جدا شدن ذرات از سطح خاک، فرسایش خاک و افزایش هم‌آوری ذرات فرسایش‌یافته کاهش یابد (Abrol and Shainberg, 2013).

1 Wolde
2 Mamedove
3 Wang

لی[1] و همکاران (۲۰۱۵) اثر بیوچار، PAM و ترکیب آنها را بر رواناب و هدرروی خاک تحت باران شبیه سازی شده و باران طبیعی مطالعه کردند و نشان دادند که هر دو، تیمار رواناب را به علت مسدود شدن منافذ خاک به‌وسیله‌ی محلول PAM با گران‌روی بالا نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. در مقابل هدرروی خاک به علت هم‌آوری ذرات رس، پایداری خاکدانه‌ها توسط PAM و ظرفیت بالای بیوچار برای جذب آب کاهش یافت (Lee et al , 2015). آو و همکاران (۲۰۱۶) اثر مقادیر مختلف PAM و موقعیت شیب (رأس، وسط و پایین شیب) را بر رواناب و هدرروی خاک برر سی و بیان کردند که کاربرد PAM در غلظت ۱-۲ گرم بر متر مربع به‌طور معنی‌داری رواناب را کاهش و سرعت نفوذ را افزایش داد. علاوه بر این کاربرد ۲ گرم بر متر مربع PAM در وسط شیب، به‌طور قابل ملاحظه‌ای هدرروی خاک را کاهش داد (Ao et al , 2016).

هر چند پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی اثر PAM بر پایداری ساختمان و فرسایش خاک صورت گرفته‌است، ولی اکثر پژوهش‌ها در شرایط آزمایشگاهی انجام شده و ترکیب آن با تکنیک‌های بیومهند سی به‌ویژه در شرایط میدانی و در مناطق نیمه‌خشک مانند ا ستان خرا سان ر ضوی بررسی نشده‌ا ست. همچنین تحقیقی مبنی بر مقایسه‌ی تأثیر وتیور و PAM بر شاخص‌های پایداری و فر سایش خاک صورت نگرفته‌ا ست. با توجه به توانایی وتیور در حفاظت خاک، به نظر می‌ر سد که وتیور سازگاری زیادی در ب سیاری از مناطق ایران دا شته با شد و فر سایش خاک را کاهش دهد که ر سیدن بدین امر به بررسی‌های بیشتر نیازمند است. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی و مقایسه‌ی اثر سیستم وتیور به عنوان یک روش بیومهند سی کم‌هزینه و بادوام و PAM و تلفیق آنها بر شاخص‌های پایداری و فر سایش خاک بر روی یک خاک لوم انجام شد.

۲ـ مواد و روش

۲ـ ۱ـ آماده‌سازی کرت‌ها و اعمال تیمارهای آزمایش

این پژوهش بر روی یک خاک لومی با ویژگی‌های ارائه‌شده در جدول ۱ و شیب ۵ درصد واقع در دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. منطقه‌ی مورد نظر برای اعمال تیمارها و آزمایش در ابعاد یک متر در یک متر کرت‌بندی گردید. در انتهای هر کرت، لوله‌ای ۵ اینچی از جنس پلیکا برای خروج و جمع‌آوری رواناب و رسوب قرار داده شد. تیمارهای آزمایش شامل کشت گیاهچه وتیور به فاصله‌ی ۳۵ در ۳۵ سانتی‌متر (تیمار VP0) و اعمال پلیمر پلی‌ا کر یل آ م ید آ نیو نی به فر مول شیمیا یی $(H_2\text{-}CH\text{-}CO\text{-}NH_2)_n$ (ت هیه شده از شر کت، CHEMICALS TIANRUN (http://WWW.TIANRUN.COM.CN کشور چین با مشخصات ارائه شده در جدول ۲) به صورت محلول با دو غلظت ۰/۲ و ۰/۴ در صد معادل ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم در هکتار (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۲ & Asghari et al , 2009) (به ترتیب تیمارهای P2 و P4) و ترکیب این دو تیمار (کشت گیاه در حضور دو غلظت پلیمر به ترتیب تیمارهای VP2 و VP4) در هر کرت بودند. یک تیمار نیز به عنوان تیمار شاهد (P0) در نظر گرفته شد. محلول مذکور با ا ستفاده از آب‌فشان به‌طور یکنواخت بر خاک کرت‌ها پا شیده شد (به طور تقریبی هزینه PAM

1 Lee

براساس سطوحی مصرفی به کار برده شده ۳۰۰-۶۰۰ هزار تومان در هکتار است). قبل و بعد از آزمایش شبیه‌ساز باران، نمونه‌های دست نخورده برای اندازه‌گیری شاخص‌های ساختمان جمع‌آوری شد.

۲ـ ۲ـ تعیین شاخص‌های پایداری ساختمان خاک

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت مرطوب (MWD_{wet}) و خشک (MWD_{dry})، براساس روش کمپر و روسنا[1] (۱۹۸۶) تعیین شد (Kemper and Rosenau, 1986). به این منظور خاکدانه‌های هوا خشک شده از الک ۸ میلی‌متری عبور داده و از خاکدانه‌های باقی‌مانده بین الک ۴ و ۸ برای اندازه‌گیری MWD_{wet} و MWD_{dry} با استفاده از سری الک‌های با قطر ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی‌متر استفاده شد. خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک، در آون در دمای ۱۰۵ درجه خشک و بعد از وزن کردن و تصحیح شن، MWD_{wet} و MWD_{dry} براساس رابطه‌ی (۱) محاسبه شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^{k} W_i \bar{x}_i \qquad (۱)$$

k تعداد دامنه اندازه خاکدانه‌ها، X_i میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک و W_i نسبت جرم خشک خاکدانه‌های روی هر الک i به جرم خشک کل خاکدانه‌های خاک است.

پایداری خاکدانه‌ها (AS) نیز به روش کمپر و روسنا (۱۹۸۶) به استفاده از الک تر و بعد از تصحیح شن براساس رابطه‌ی (۲) تعیین شد (همان):

$$AS = \frac{WSA - M_{sand}}{M_{sample} - M_{sand}} \times 100 \qquad (۲)$$

WSA جرم خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متری، M_{sand} جرم شن و M_{sample} جرم نمونه خاک

شاخص پایداری (SI) با استفاده از رابطه‌ی (۳) تعیین شد:

$$SI = \frac{1}{MWD_{dry} - MWD_{wet}} \qquad (۳)$$

درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD) یکی دیگر از شاخص‌های مناسب برای تشخیص ارزیابی ساختمان فیزیکی خاک است که براساس اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها قبل از باران (MWD_b) و بعد از باران (MWD_a) براساس رابطه‌ی (۴) محاسبه شد. هر چه مقدار PAD کمتر باشد، بیانگر پایداری بیشتر خاکدانه‌ها است.

$$PAD = 1 - \frac{MWD_a}{MWD_b} \times 100 \qquad (4)$$

۲ـ ۳ـ تعیین شاخص‌های فرسایش

به منظور تعیین شاخص‌های فرسایش، شدت متوسط رواناب، هدررفت خاک و ضریب رواناب، بارش با شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت (شدت بارش در مناطق فرسایش‌پذیر) با استفاده از سامانه‌ی شبیه‌ساز باران با مشخصات ارتفاع ۱/۸ متر، ابعاد یک متر در یک متر، تعداد ۲۲۵ نازل از نوع ثابت با فاصله‌ی ۷ سانتی‌متر به مدت ۳۰ دقیقه بر روی کرت‌ها اعمال شد. اصولاً در هر زمانی که شدت تولید رواناب به حالت پایدار می‌رسد، آن زمان به‌عنوان خاتمه‌ی بارندگی در

[1] Kamper and Rousenau

نظر گرفته می‌شود (Lal , 1994)، ولی در این پژوهش با توجه به تنوع تیمارها ـ شاهد، وتیور و PAM ـ زمان حصول حالت پایدار برای رواناب، در همه‌ی تیمارها یکسان نبود؛ بنابراین برای مقایسه‌ی اثر تیمارها، مدت بارش اعمال شده یکسان در نظر گرفته شد. رواناب تولید شده و رسوب حاصله در مدت ۳۰ دقیقه در کرت‌های آزمایشی جمع‌آوری شد و شدت رواناب از حاصل تقسیم حجم رواناب جمع‌آوری شده، بر مدت زمان جمع‌آوری نمونه و سطح مقطع کرت به دست آمد. میزان هدررفت خاک نیز با توزین رسوب پس از قرار دادن رواناب حاوی ذرات رسوب در آون، با دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. ضریب رواناب نیز از نسبت حجم آب خروجی از کرت ـ حجم رواناب تولیدی ـ به حجم باران رسیده به سطح خاک به‌دست آمد.

۲ـ ۴ـ تجزیه و تحلیل آماری

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها و مقایسه‌ی میانگین‌ها در سطح ۵ درصد، برای بررسی اثر تیمارهای مورد بررسی بر شاخص‌های پایداری ساختمان و فرسایش و هدررفت خاک، شدت متوسط رواناب و ضریب رواناب به ترتیب براساس تجزیه‌ی واریانس یک طرفه و آزمون دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

جدول ۱: برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	بافت	OC (%)	TNV (%)	BD (g cm^{-3})
۱۱	۴۱	۴۸	لوم	۰/۱۲	۱۲/۶۳	۱/۶۰

*OC: کربن آلی، TNV: کربنات کلسیم معادل، BD: جرم مخصوص ظاهری

جدول۲: مشخصات پلی‌اکریل آمید مورد استفاده

مشخصات PAM	مقدار
شکل ظاهری	پودر دانه‌ای سفید
درجه هیدرولیز	٪ ۳۰-۳۵
وزن مولکولی	۱۵-۲۰ میلیون
جرم مخصوص ظاهری (g cm^{-3})	≥۰/۶۷
pH	۶-۸
حلالیت در آب	٪ ≥۰/۸
درجه خلوص	٪۹۵
منومر اکریل آمید	٪≥۰,۰۲

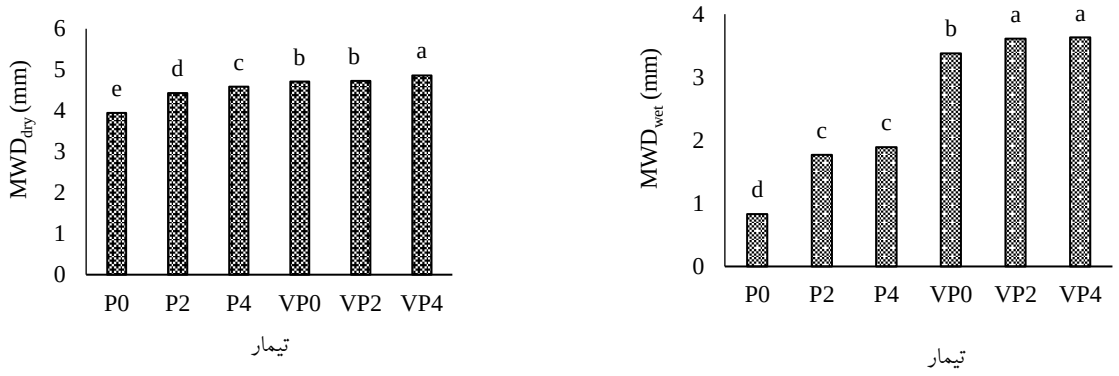
۳ـ یافته‌ها (نتایج)

نتایج حاصل از تجزیه‌ی واریانس یک طرفه، تأثیر تیمارهای مختلف آزمایشی را بر برخی از شاخص‌های پایداری ساختمان و فرسایش خاک نشان می‌دهد که وتیور و PAM اثر معنی‌داری بر شاخص‌های پایداری نظیر MWD_{wet}،

MWD_{dry}، AS، SI، و PAD و شاخص‌های فرسایش یعنی شدت متوسط رواناب، هدررفت خاک و ضریب رواناب نسبت به شاهد در سطح پنج درصد داشتند.

۳ـــ۱ـــ اثر پلی‌اکریل آمید و وتیور بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت مرطوب (MWD_{wet}) و خشک (MWD_{dry})

نتایج مقایسه‌ی میانگین مربوط به میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت مرطوب (MWD_{wet})، نشان داد که تیمارهای PAM و وتیور بر افزایش MWD_{wet} تأثیر معنی‌داری داشتند (شکل ۱- الف)؛ به گونه‌ای که کمترین و بیشترین مقدار MWD_{wet} مربوط به تیمار شاهد (P0)، ۰/۸۳ میلی‌متر و تیمار VP4، ۳/۶۳ میلی‌متر بود. با اعمال تیمارهای PAM مقدار MWD_{wet} تقریباً ۹۷ درصد افزایش یافت هرچند بین غلظت‌های مختلف PAM اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. تیمار وتیور مقدار MWD_{wet} را نسبت به شاهد، چهار برابر افزایش داد و تیمار تلفیقی وتیور و غلظت‌های مختلف PAM با ۴/۴ برابر افزایش MWD_{wet}، بیشترین تأثیر را در افزایش MWD_{wet} داشت. همچنین مشاهده گردید که تیمار تلفیق وتیور و PAM (VP2 و VP4)، با تیمار وتیور (VP0) در افزایش MWD_{wet} اختلاف معنی‌داری دارند. نتایج مقایسه‌ی میانگین نشان داد که تیمارهای PAM و وتیور، MWD_{dry} را نیز به طور معنی‌داری افزایش دادند (شکل ۱- ب). کمترین مقدار MWD_{dry} مربوط به تیمار شاهد (۳/۹۵ میلی‌متر) و بیشترین مقدار آن مربوط به تیمار VP4 (۴/۸۶ میلی‌متر) بود. در تیمارهای PAM با افزایش غلظت PAM، MWD_{dry} افزایش یافت که بین دو غلظت ۲۰ کیلوگرم در هکتار (تیمار P2) و ۴۰ کیلوگرم در هکتار آن (تیمار P4) اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. نتایج نشان داد تیمار P4 به افزایش معنی‌دار MWD_{dry} نسبت به تیمار P2 منجر شد؛ در حالی‌که تیمارهای P2 و P4 اختلاف معنی‌داری در مقدار MWD_{wet} نداشتند.



(الف) **(ب)**

*میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، در سطح پنج درصد طبق آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

شکل ۱): مقایسه‌ی میانگین اثر تیمارهای وتیور و PAM بر (الف) MWD_{wet} و (ب) MWD_{dry}

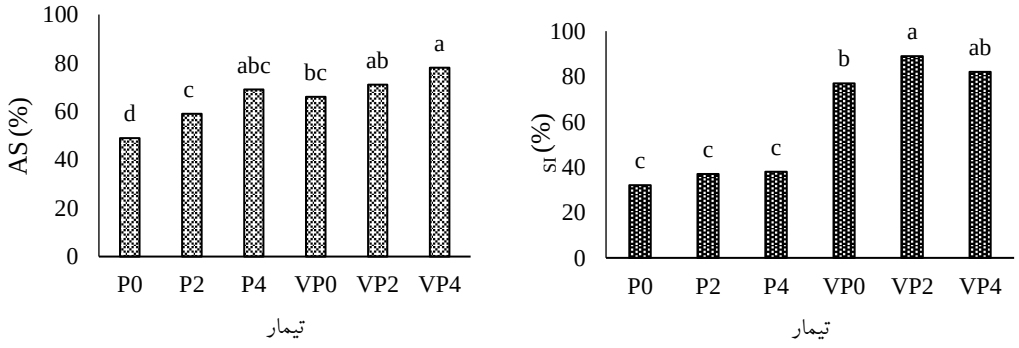
می‌توان گفت که غلظت‌های بالاتر PAM، MWD_{dry} را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد؛ درحالی که برای افزایش معنی‌دار MWD_{wet} نسبت به P2، احتمالاً به مقدار بیشتر PAM نیاز می‌باشد. تیمار وتیور نیز MWD_{dry} را به

طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دادند که اختلاف معنی‌داری با تیمار PAM دارد. همچنین مشاهده می‌شود که بین دو تیمار VP0 و VP2 اختلاف معنی‌داری وجود ندارد؛ به‌طوری‌که در تیمار تلفیق وتیور و PAM، غلظت ۲۰ کیلوگرم بر هکتار PAM تأثیر چندانی در افزایش MWD_{dry} ندارد و افزایش معنی‌دار MWD_{dry} در تیمار ترکیب وتیور با غلظت ۴۰ کیلوگرم بر هکتار PAM مشاهده می‌شود.

۳-۲- اثر پلی‌اکریل آمید و وتیور بر پایداری خاکدانه‌ها (AS) و شاخص پایداری (SI)

نتایج مقایسه‌ی میانگین اثر PAM و وتیور بر پایداری خاکدانه‌ها نشان می‌دهد که هر دو تیمار، پایداری خاکدانه‌ها را به طور معنی‌داری افزایش دادند؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار AS مربوط به تیمار شاهد (۴۹٪) و بیشترین آن مربوط به تیمار VP4 (۷۸٪) بود (شکل ۲- الف). با افزایش غلظت PAM، پایداری خاکدانه افزایش یافت و بین دو غلظت PAM اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. وتیور نیز پایداری خاکدانه‌ها را به طور معنی‌داری افزایش داد (۵۹٪ افزایش پایداری در تیمار VP4 نسبت به تیمار شاهد) و پایداری خاکدانه‌ها در تیمارهای وتیور بیشتر از تیمار PAM بود. اگر چه اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای وتیور و PAM مشاهده نشد.

نتایج نشان داد که PAM موجب افزایش شاخص پایداری شد، ولیکن اثر آن معنی‌دار نبود. همچنین اختلاف معنی‌داری بین دو غلظت PAM (تیمارهای P2 و P4) مشاهده نشد، درحالی‌که افزایش قابل‌توجه و معنی‌دار شاخص پایداری خاک در تیمارهای وتیور نسبت به تیمار شاهد (P0) و تیمارهای PAM (P2 و P4) مشاهده شد. بیشترین مقدار شاخص پایداری در تیمار VP2 (۸۹٪) مشاهده گردید. البته بین تیمارهای وتیور و تلفیق وتیور و دو غلظت PAM (VP0 و VP4) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.



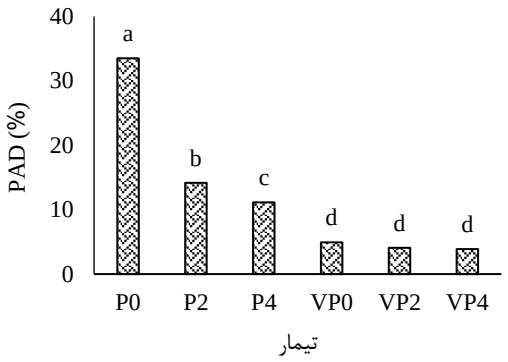
*میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، در سطح پنج درصد طبق آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

شکل ۲: مقایسه‌ی میانگین اثر تیمارهای PAM و وتیور بر (الف) پایداری خاکدانه و (ب) شاخص پایداری

۳-۳- اثر پلی‌اکریل‌آمید و وتیور بر درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD)

نتایج مقایسه‌ی میانگین اثر تیمارهای PAM و وتیور بر PAD ارائه شده در شکل (۳)، نشان داد که PAM و وتیور تأثیر معنی‌داری در PAD داشته‌اند؛ به گونه‌ای‌که بیشترین و کمترین PAD در تیمار شاهد (۳۳٪/۵) و تیمار VP4 (۳٪/۸۶) مشاهده شد. کاربرد PAM به کاهش معنی‌دار PAD منجر شد. همچنین با افزایش غلظت PAM، درصد

تخریب خاکدانه کاهش یافت و بین دو غلظت PAM اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. تیمار وتیور نسبت به تیمار شاهد (۸۸٪) و تیمارهای PAM (۶۷٪)، کاهش قابل ملاحظه‌ای در PAD داشت. نقش وتیور در بهبود پایداری ساختمان خاک و کاهش تخریب در مقایسه با کاربرد PAM به طور چشم‌گیری مشاهده شد؛ به‌طوری‌که بین تیمار وتیور (VP0) و تیمار تلفیق وتیور و کاربرد دو غلظت PAM (VP2 و VP4) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.



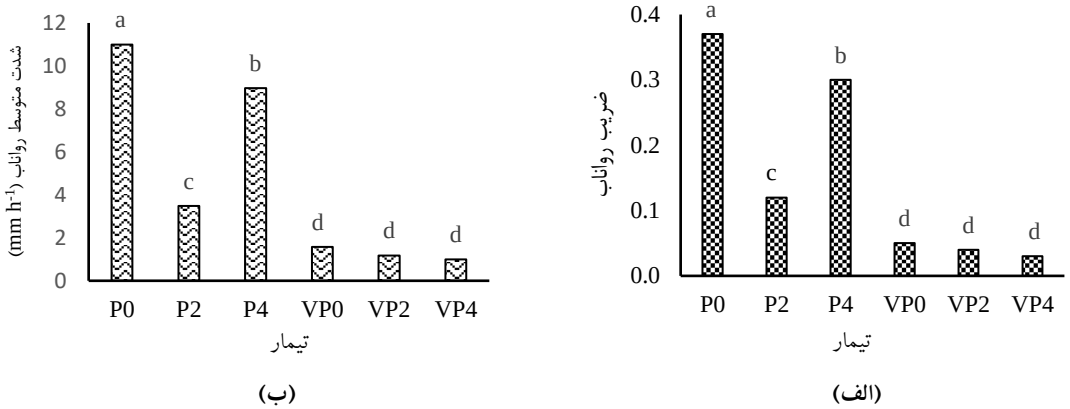
*میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند در سطح پنج درصد طبق آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

شکل ۳: مقایسه‌ی میانگین اثر تیمارهای PAM و وتیور بر شاخص تخریب (PAD)

۳ـ۴ـ اثر پلی‌اکریل‌آمید و وتیور بر شدت متوسط رواناب و ضریب رواناب

نتایج مقایسه‌ی میانگین مربوط به شدت متوسط رواناب در مدت ۳۰ دقیقه بارندگی با شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت (شکل ۴- الف)، نشان داد که وتیور و PAM شدت متوسط رواناب را به طور معنی‌داری کاهش دادند. بیشترین و کمترین شدت متوسط رواناب به ترتیب مربوط به تیمار شاهد (P0) و تیمار VP4 بود. همچنین PAM نیز باعث کاهش شدت متوسط رواناب شد، هرچند شدت متوسط رواناب در تیمار P4 بیشتر از تیمار P2 بود. در تیمارهای وتیور با افزایش غلظت PAM، شدت متوسط رواناب کاهش یافت. در کل، شدت رواناب در تیمارهای VP0، VP2 و VP4 به طور معنی‌داری در مقایسه با تیمارهای PAM (P2 و P4) کاهش یافت و VP0 کاهش معنی‌داری را در شدت رواناب نشان داد.

نتایج مقایسه‌ی میانگین اثر تیمارهای مورد مطالعه بر ضریب رواناب (شکل ۴- ب) نیز نشان داد که هر دو تیمار وتیور و PAM، موجب کاهش معنی‌دار ضریب رواناب شدند. بیشترین و کمترین مقدار ضریب رواناب به ترتیب در تیمار شاهد (۰/۳۷) و تیمار VP4 (۰/۰۳) مشاهده شد. کاربرد PAM ضریب رواناب را در تیمار P2، ۶۷ درصد کاهش داد که نسبت به تیمار P4 (۱۱ درصد) کاهش بیشتری داشته‌است. این روند مشابه روند تأثیر PAM بر شدت رواناب است. وتیور نیز موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی ضریب رواناب (۸۶ درصد) شد که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای PAM داشت. همچنین بین تیمار وتیور (VP0) و تیمارهای تلفیقی وتیور و دو غلظت ۰/۲ (VP2) و ۰/۴ درصد (VP4) PAM اختلاف معنی‌داری وجود نداشت که این امر بیانگر نقش قابل ملاحظه‌ی وتیور در کاهش ضریب رواناب نسبت به PAM می‌باشد.

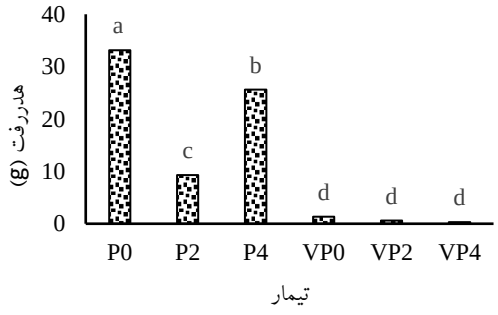


*میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، در سطح پنج درصد طبق آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

شکل ۴: مقایسه‌ی میانگین (الف) شدت متوسط رواناب و (ب) ضریب رواناب در تیمارهای مختلف مورد بررسی

۳ـ۵ ـ اثر پلی‌اکریل آمید و وتیور بر هدررفت خاک

نتایج مقایسه‌ی میانگین مربوط به هدررفت خاک (شکل ۵)، نشان داد که وتیور و PAM بر کاهش هدررفت خاک در شدت بارش ۳۰ میلی‌متر در ساعت، اثر معنی‌داری داشتند؛ به‌طوری‌که بیشترین و کمترین هدررفت خاک به ترتیب مربوط به تیمارهای P0 و VP4 بود که م شابه تأثیر تیمارها بر رواناب ا ست. تیمارهای وتیور، کاهش قابل ملاحظه‌ای در هدررفت خاک نشان دادند. در تیمارهای وتیور با افزایش غلظت PAM، هدررفت خاک کاهش یافت. تیمار VP4، هدررفت خاک را ۹۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد، ولی اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای وتیور مشاهده نشد. کاربرد PAM نیز به کاهش معنی‌دار هدررفت خاک منجرشـــد، ولی روند کاهش هدررفت با افزایش غلظت PAM منظم نبود. همان‌طور که در شـــکل مشـــاهده می‌شـــود، تیمار P2 هدررفت را ۷۱ درصـــد نســـبت به شـــاهد کاهش داد؛ درحالی‌که با افزایش غلظت PAM، در تیمار P4 هدررفت خاک ۲۲ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. با توجه به شکل ۴- الف مشاهده می‌شود که شدت رواناب نیز در تیمار P2 بیشتر از تیمار P4 است.



*میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، در سطح پنج درصد طبق آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

شکل ۵: مقایسه‌ی میانگین هدررفت خاک در تیمارهای مختلف مورد بررسی

۴ـ بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، اثر تیمارهای PAM و وتیور بر شاخص‌های پایداری و فرسایش خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که تیمارهای PAM و وتیور، MWD_{wet} را در خاک مورد بررسی افزایش داد. افزایش MWD_{wet} در تیمارهای PAM را می‌توان به ساختار زنجیره‌ای PAM نسبت داد؛ به گونه‌ای‌که جذب زنجیره‌ی طولانی پلیمرهای PAM روی سطوح خارجی ذرات و خاکدانه‌ها از طریق پیوندهای شیمیایی و ایجاد پل‌هایی بین ذرات، سبب اتصال ذرات خاک و افزایش استحکام پیوند بین ذرات اولیه و در نتیجه افزایش خاکدانه‌سازی و در عین حال پایداری بیشتر خاکدانه‌ها می‌شود. این نتایج با یافته‌های ملو و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. این پژوهشگران، افزایش معنی‌دار MWD را با افزایش غلظت محلول PAM گزارش کردند. آنها بیان کردند که با افزایش غلظت PAM، پایدارسازی خاکدانه‌های درشت توسعه می‌یابد که با مقادیر بزرگ‌تر MWD نشان داده می شود؛ به طوری‌که پایداری خاکدانه در بزرگ‌ترین کلاس قطر آنها به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می یابد (Melo et al , 2014). همچنین اکبرزاده[1] و همکاران (۲۰۰۹) گزارش دادند که با افزایش مصرف پلیمر، پایداری خاکدانه‌ها افزایش یافت و دلیل این امر را توانایی پلیمرها در ایجاد پل‌هایی بین ذارت خاک و اتصال آنها به هم عنوان کردند که باعث ایجاد خاکدانه‌های درشت و پایدار در خاک می‌شود (Akbarzadeh et al , 2009). کوکال[2] و همکاران (۲۰۰۷) نیز از افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت مرطوب و پایداری آنها در اثر کاربرد پلیمر گزارش کردند (Kukal et al , 2007). افزایش قابل ملاحظه‌ی MWD_{wet} در تیمارهای تحت کشت وتیور با یافته‌های ادم و اوکوکو (۲۰۱۵) مبنی بر افزایش پایداری خاکدانه‌ها در حالت مرطوب در کرت‌های زیرکشت وتیور مطابقت دارد (Edem and Okoko, 2015). درواقع، بقایای اندام‌های هوایی گیاه وتیور و هوموسی که بعد از تجزیه‌ی این بقایا تولید می شود و از طرف دیگر ترشح ترکیبات آلی از ریشه و بقایای پیوسته‌ی ریشه‌ها به‌ویژه ریشه‌های ریز یا موئینه، فعالیت میکروبی را تشدید می‌کند که به تولید بیومس میکروبی بزرگ در زیست توده‌ی گیاه وتیور و مواد پیوند دهنده‌ی هومیکی منجر می‌شود و با ذرات معدنی خاک پیوند برقرار می‌کند و شرایط تشکیل خاکدانه را فراهم می‌سازد. همچنین شبکه‌ی گسترده‌ی ریشه‌های وتیور، خاکدانه‌های خاک را محصور و از طرف دیگر، به آن فشار یا نیرویی وارد می‌کند که موجب فشرده شدن خاکدانه‌ها می‌شود. البته ریشه‌ها نیز از طریق جذب آب به تفاوت آبگیری (هیدراسیون) خاکدانه‌ها و ایجاد شکاف‌های کوچک منجر می‌شود. مجموعه‌ی این عوامل موجب افزایش خاکدانه‌سازی، پایداری آنها و بهبود ویژگی‌های ساختمانی خاک می‌شود (همان). نتایج اوکیو و همکاران (۲۰۱۱) نیز افزایش ۱۹ درصدی MWD را در خاک تحت کشت گیاه وتیور نسبت به خاک بایر نشان می‌دهد (Oku et al , 2011). همچنین تأثیر بیشتر تیمار تلفیق وتیور و PAM (VP2 و VP4) در افزایش MWD_{wet} نسبت به تیمار وتیور (VP0)، بیانگر تأثیر عوامل شیمیایی (PAM) در تشدید فرایند خاکدانه سازی و پایداری خاکدانه‌ی ناشی از حضور وتیور (عوامل بیولوژیکی و فیزیکی) می‌باشد.

1 Akbarzadeh
2 Kukal

لی بیسنس[1] (۱۹۹۶) پایداری خاکدانه‌ها را با توجه به مقادیر MWD در پنج کلاس طبقه‌بندی کرد: ۱- خیلی پایدار MWD > ۲ میلی‌متر؛ ۲- پایدار ۲> MWD > ۱/۳ میلی‌متر؛ ۳- پایداری متوسط ۱/۳> MWD >۰/۸ میلی‌متر؛ ۴- ناپایدار، ۰/۴> MWD >۰/۸ میلی‌متر؛ ۵ - بسیار ناپایدار، ۰/۴> MWD میلی‌متر (Le Bissonnais, 1996). بر طبق سیستم طبقه‌بندی لی بیسینس (۱۹۹۶)، PAM خاکدانه‌ها را به پایدار و وتیور خاکدانه‌ها را به خیلی پایدار تبدیل کرده؛ بنابراین، وتیور در پایدار سازی خاک‌ها بسیار مؤثرتر بوده‌است. کاربرد PAM، MWD_{dry} را نیز افزایش داد که نقش PAM به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده‌ی ذرات خاک و مؤثر در خاکدانه‌سازی و پایداری آن را تأیید می‌کند که با نتایج گرین[2] و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد. آنها اثر PAM را بر پایداری سه خاک با بافت و کانی شناسی متفاوت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که تأثیر PAM در افزایش پایداری خاکدانه‌های خشک بیشتر است (Green et al , 2004). افزایش MWD_{dry} نقش مهم و قابل‌توجه وتیور (عامل زیستی) را در افزایش خاکدانه‌سازی و افزایش قطر خاکدانه‌های پایدار نشان می‌دهد. این نتایج مشابه یافته‌های ماترکرا[3] (۲۰۱۰) و ادم و اوکوکو (۲۰۱۵) است که خاکدانه‌سازی و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها و در نتیجه افزایش MWD_{dry} را در کرت‌های زیرکشت وتیور گزارش کردند (Materechera , 2010 & Edem and Okoko , 2015). به طور کلی مقادیر MWD_{dry} بیشتر از مقادیر MWD_{wet} است که با نتایج ادم و اوکوکو (۲۰۱۵) منطبق می‌باشد (Edem and Okoko , 2015).

کاربرد PAM، پایداری خاکدانه و شاخص پایداری را افزایش داد که با نتایج پژوهش‌های مختلف (& 1992 Lentz , 2015 & Melo et al , 2004 & Bryan , Green et al 2000) همخوانی دارد. ملو و همکاران (۲۰۱۴)، از افزایش پایداری خاکدانه‌ها در اثر اعمال PAM گزارش دادند. این پژوهشگران بر هم‌کنش‌های فیزیکی- شیمیایی بین مولکول‌های PAM و اجزای تشکیل دهنده‌ی خاکدانه به‌وسیله‌ی پیوندهای یونی، پیوندهای شیمیایی و نیروهای واندروالس را دلیل افزایش پایداری خاکدانه دانستند؛ به‌طوری‌که مولکول‌های درشت موجود در سطح خاکدانه یک لایه را با گران‌روی بالا و الاستیک تشکیل می‌دهند که پایداری خاکدانه را تضمین می‌کند. آنها همچنین اظهار کردند که پلیمرهای با وزن مولکولی بالا مانند PAM خیلی سریع سطح خاکدانه را به طور کامل می‌پوشاند و ورود آب را به درون خاکدانه و در نتیجه حبس هوا را در آن محدود می‌کند و موجب کاهش یا به حداقل رساندن شکستن خاکدانه‌ها می شود (Melo et al , 2014). به طور مشابه لنتز و همکاران (۲۰۱۵) نیز از افزایش ۱/۳۵ برابری پایداری خاکدانه‌ها در تیمار PAM نسبت به تیمار بیوپلیمرها گزارش کردند (۸۸/۷٪ در مقابل ۶۵/۵٪) (Lentz, 2015) . اواد[4] و همکاران (۲۰۱۳) نیز اظهار کردند که PAM و بیوپلیمرها خاکدانه‌های در اندازه‌ی ۱-۲ میلی‌متر را در خاک‌های شنی و لوم شنی افزایش می‌دهند (Awad et al , 2013). نتایج ممدوف و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان داد که شاخص پایداری با افزایش غلظت PAM، مقدار رس و اندازه خاکدانه به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و اثر PAM بر افزایش شاخص پایداری، به مقدار رس و و اندازه‌ی خاکدانه بستگی دارد. آنها اظهار داشتند که PAM را نمی‌توان به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده‌ی جهانی در اراضی کشت شده و بنابراین ابزار عمومی در مدیریت حفاظت خاک و آب در نظر گرفت. کاربرد PAM به نوع خاک و شرایط موجود و حاکم بر منطقه (زمین) بستگی دارد (Mamedov et al , 2016). وتیور

1 Le Bissonnais
2 Green
3 Materechera
4 Awad

نیز پایداری خاکدانه‌ها را افزایش داد. با توجه به نتایج به د ست آمده که ن شان می‌دهد پایداری خاکدانه‌ها در تیمارهای وتیور بی‌شتر از تیمار PAM ا ست و از سوی دیگر، با توجه به اثرات مثبت و قابل‌توجه پو شش گیاهی از جمله وتیور بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، اســتفاده از وتیور به عنوان عامل افزایش دهنده‌ی پایداری خاکدانه و بهبود کیفیت خاک تو صیه می شود. خاکدانه سازی بی‌شتر و افزایش پایداری آنها در تیمارهای وتیور، احتمالاً به سبب وجود توده‌ی و سیعی از ریشه‌های ریز، افزایش فعالیت میکروبی و تولید پلی ساکاریدها در زیست توده‌ی گیاه وتیور ا ست (Pang et al , 2003). این نتایج با یافته‌های اوکیو و همکاران (۲۰۱۱) مبنی بر افزایش WSA در خاک تحت کشت گیاه وتیور (۶۴٪) نســبت به خاک بایر (۵۴٪) مطابقت دارد (Oku et al , 2011). در کل، یافته‌های این مطالعه نشــان‌دهنده‌ی نقش بسیار مؤثر وتیور به عنوان یک عامل زیستی در افزایش پایداری و بهبود ساختمان خاک نسبت به پلیمرهای شیمیایی مانند PAM می‌باشد.

تأثیر PAM در کاهش PAD، به قابلیت PAM در تشکیل پیوندهای شیمیایی بین ذرات خاک، اتصال قوی ذرات اولیه‌ی آن به هم، در نتیجه افزایش پایداری و کاهش تخریب خاکدانه نســبت داده می‌شــود (Nishihara and Shock , 2001). به هر حال، نقش وتیور در بهبود پایداری ســاختمان خاک و کاهش تخریب خاکدانه در مقایســه با کاربرد PAM، به طور چشــم‌گیری مشــاهده می‌شــود. وتیور از طریق مکانیســم‌های ذکر شــده در بخش‌های قبلی، به افزایش خاکدانه‌سازی، پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه کاهش چشم‌گیر تخریب خاکدانه انجامیده‌است. از سوی دیگر، با افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک، نفوذپذیری آن افزایش و رواناب کاهش می‌یابد. در نتیجه جدایش و تخریب خاکدانه‌های خاک نا شی از برخورد قطرات باران، و جدایش و انتقال آن به‌و سیله‌ی رواناب کاهش می‌یابد (Styczen and Morgan , 1995). نتایج به‌دســت آمده با نتایج ماترکرا و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر کاهش تخریب خاکدانه در کرت‌های زیرکشت وتیور منطبق می‌با شد. به طور کلی، می‌توان گفت خاک زیر کشت وتیور هنگامی‌که در معرض تنش نا شی از برخورد قطرات باران قرار می‌گیرد، خاکدانه‌های پایدار و منافذ آن بدون تخریب و آســیب باقی می‌ماند (Materechera , 2010).

نتایج این مطالعه در زمینه‌ی اثر تیمارهای مورد بررسی بر شاخص‌های فرسایش، شدت متوسط و ضریب رواناب، و هدررفت خاک نشــان داد که PAM و وتیور می‌توانند در کاهش فرســایش خاک و مؤلفه‌های آن نقش مثبتی داشــته باشند و در حفاظت خاک استفاده شوند؛ به گونه‌ای‌که جذب زنجیره‌ی طولانی پلیمرهای PAM بر سطوح خارجی ذرات و خاکدانه‌ها، و افزایش خاکدانه‌سازی و ایجاد منافذ درشت پیوسته و پایدار در آن، موجب افزایش نفوذپذیری خاک و در نتیجه کاهش رواناب و ضــریب آن می‌شــود. هر چند کارایی PAM در کاهش رواناب به غلظت و در نتیجه گران‌روی آن بستگی دارد؛ همان‌طور که نتایج نشان داد، افزایش غلظت PAM تأثیر کمتری در کاهش رواناب داشت که دلیل آن را می‌توان به گران‌روی زیاد محلول PAM در تیمار P4 (غلظت ۰/۴ درصــد) نســبت داد که باعث شــده اســت PAM در این غلظت با کاهش هدایت هیدرولیکی اشــباع خاک و انســداد برخی از منافذ آن، تأثیر کمتری در کاهش شدت متو سط رواناب دا شته با شد. این یافته با نتایج وانگ (۲۰۱۱) مبنی بر تأثیر PAM در غلظت‌های پایین بر کاهش رواناب هماهنگی دارد (Wang et al , 2011). علاوه بر این، PAM با افزایش هم‌آوری ذرات خاک و اتصــال آنها به هم، موجب می شود پایداری خاکدانه‌ها افزایش و پراکنده شدن آنها تو سط رواناب کاهش یابد. جذب زنجیره‌ی

طولانی پلیمرهای PAM بر سطوح خارجی خاکدانه‌ها، به اتصال آنها به هم و افزایش مقاومت آنها در برابر جدا شدن به‌وسیله‌ی رواناب می‌انجامد. این نتایج با یافته‌های یو[1] و همکاران (۲۰۰۳) و ابرول و همکاران (۲۰۱۳) هماهنگی دارد. آنها گزارش دادند که افزایش غلظت و گران‌روی PAM به کاهش فرسایش خاک منجر می‌شود (Yu et al , 2003 & Abrol et al , 2013). در این تحقیق مشاهده شد که روند کاهش هدررفت با افزایش غلظت PAM منظم نبوده‌است. رواناب، بیشتر در تیمار P2 توان و ظرفیت جدا کردن ذرات از سطح خاک، بار رسوب و حمل آن و در نتیجه هدررفت خاک را افزایش داده‌است. این روند نامنظم کاهش هدررفت خاک در اثر مصرف سطوح مختلف PAM، با یافته‌های آو و همکاران (۲۰۱۶) هماهنگ می‌باشد.آنها بیان کردند که مقادیر رسوب ناشی از کاربرد سطوح مختلف PAM متفاوت است؛ به‌طوری‌که در ابتدا با افزایش غلظت PAM، رسوب کاهش سپس در ادامه با افزایش بیشتر غلظت PAM، رسوب افزایش یافت (Ao et al , 2016).

تیمار تحت کشت وتیور نیز شدت متوسط و ضریب رواناب را نسبت به تیمار PAM به صورت چشمگیری کاهش داد. دلایل متعددی را می‌توان برای تأثیر قابل ملاحظه‌ی وتیور در کاهش رواناب ذکر کرد: ۱- بخشی از باران توسط آسمانه گیاهی وتیور جذب می شود؛ ۲- اندام‌های هوایی وتیور به عنوان سدی در مقابل رواناب عمل می‌کند که به نفوذ رواناب درون خاک و در نتیجه کاهش آن منجر می‌شود (Young , 1997)؛ ۳- ریشه‌های وتیور با افزایش پایداری خاکدانه (شکل ۲) و ایجاد منافذ پیوسته و پایدار در خاک، به افزایش نفوذ باران به خاک و کاهش رواناب می‌انجامد. تأثیر معنی‌دار وتیور در کاهش شدت متوسط رواناب، با یافته‌های دنجادی و همکاران (۲۰۱۰) هماهنگی دارد. این پژوهشگران بیان کردند که ردیف‌های وتیور، زمان شروع رواناب را به تأخیر انداخت و سرعت اوج رواناب و فرسایش را کاهش داد (Donjadee et al , 2010). علاوه بر این، بابالوا[2] و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که وتیور، رواناب را ۷۴/۴ در صد در شیب ۷ در صد کاهش داد (Babalola et al , 2007). ول[3] و همکاران (۲۰۰۶) نیز نشان دادند که ردیف‌های وتیور به دلیل ایجاد زبری نسبتاً بالا در سطح خاک، سرعت جریان رواناب را کاهش داد (Welle et al , 2007). در تیمارهای وتیور، با افزایش غلظت PAM شدت متوسط رواناب کاهش یافت که می‌توان تأثیر وتیور در تشکیل خاکدانه و ایجاد منافذ پایدار و پیوسته در خاک را دلیل آن دانست که توانسته اثر گران‌روی زیاد PAM را بر سیالیت[4] تعدیل کند. با توجه به اینکه بین تیمار وتیور و تیمار تلفیق وتیور و PAM اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، به نظر می‌رسد که در صورت کشت وتیور به منظور کاهش شدت رواناب در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت، نیازی به کابرد PAM نیست. غلامی[5] و همکاران (۲۰۱۳) نیز کاهش ضریب رواناب را در اثر اعمال تیمار حفاظتی بقایای برنج در سطح خاک گزارش کردند و ذخیره‌ی رواناب و نفوذ بیشتر آن در خاک تیمار شده را دلیل آن ذکر کردند (Gholami et al , 2013). صادقی[6] و همکاران (۲۰۱۵) به کاهش ضریب رواناب در تیمارهای PAM، بقایای برنج و کود دامی اشاره کردند. در پژوهش آنها ضریب رواناب در تیمار بقایای برنج کاهش بیشتری داشت که این امر بیانگر نقش بسیار مهم و قابل‌توجه عوامل زیستی در کاهش ضریب رواناب و حفاظت خاک است که مشابه تأثیر بیشتر وتیور

1 Yu
2 Babaloa
3 Well
4 Fluidity
5 Gholami
6 Sadeghi

در کاهش ضریب رواناب نسبت به کاربرد PAM در این پژوهش می‌با شد (Sadeghi et al , 2015). علاوه بر تأثیر قابل ملاحظه‌ی وتیور در کاهش رواناب، هدررفت خاک نیز در تیمار وتیور کاهش یافت. در واقع، پو شش انبوه وتیور موجب شـد تا حداقل قطرات باران به سـطح خاک برخورد کند، انرژی قطرات برخوردی هم در طی رسـیدن به سـطح خاک کاهش یابد و انرژی زیادی برای فرسایش و تولید رسوب نداشته باشد. علاوه بر این، وتیور سرعت رواناب را به علت زبری بالا کاهش می‌دهد و ظرفیت رواناب برای جدایش و انتقال ذرات خاک را محدود می‌سـازد (Welle et al , 2006). همچنین ریشـه‌های وتیور با اتصـال ذرات خاک و افزایش پایداری خاکدانه‌ها، جدایش‌پذیری ذرات خاک به‌و سیله‌ی برخورد قطرات باران و انتقال آنها تو سط رواناب را کاهش می‌دهد (Styczen and Morgan, 1995). نتایج مشابهی در منابع زیر گزارش شده‌است (Babalola et al , 2007 & Welle et al , 2006 & Chaowen et al , 2007). دنجادی و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که ردیف‌های وتیور در کرت‌های زیر کشت آن، هدرروی کل خاک را ۵۶/۲-۸۷/۹ درصد نسبت به کرت‌هات شاهد کاهش داد (Donjadee et al , 2010).

به طور کلی کاربرد وتیور و PAM، شـاخص‌های پایداری MWD_{wet}، MWD_{dry}، AS، SI را افزایش و PAD را کاهش دادند. با توجه به اینکه در پارامترهای مورد بررسی به ویژه شاخص پایداری و PAD، اثر قابل ملاحظه‌ی وتیور نسبت به PAM مشاهده می شود، می‌توان بیان کرد که وتیور در افزایش پایداری ساختمان خاک، بسیار موفق‌تر از PAM می‌باشـد. همچنین، وتیور و PAM شـاخص‌های فرسـایش خاک را کاهش داده‌اند. تأثیر وتیور در کاهش فرسایش، رواناب و ضریب رواناب بسیار بیشتر از تأثیر PAM است. با توجه به اینکه بین تیمار وتیور و تیمار تلفیق وتیور و PAM، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، به نظر می‌رسد که در صورت کشت وتیور به منظور کاهش شدت رواناب و فرسـایش خاک و ضـریب رواناب در شـدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر سـاعت، به کابرد PAM نیاز نیسـت. همچنین از جنبه‌ی اقتصادی، هزینه‌ی PAM در هر هکتار براساس سطوح مصرفی در این پژوهش بین ۳۰۰-۶۰۰ هزار تومان است که هزینه‌ی نسبتاً بالاست و شاید توجیه اقتصادی نداشته باشد، اما با توجه به اینکه وتیور گیاهی چند ساله و سازگار با محیط است و رشد و تکثیر آن به سرعت انجام می‌شود؛ بنابراین هزینه‌ی آن در مقایسه با PAM بسیار کمتر است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که سیستم وتیور به عنوان یک روش بیومهندسی کم‌هزینه و بادوام، در بهبود پایداری خاکدانه و ساختمان خاک و کنترل فرسایش و رواناب ارزشمند است.

منابع

۱. ابراهیمی‌محمدی، ش. ک.؛ صادقی، س. ح. ر.؛ و چپی، ک، ۱۳۹۲. تحلیل آورد رواناب، رسوب معلق و مواد مغذی ورودی‌های مختلف به دریاچه زریوار در پایه زمانی رگبار و آب پایه، *مجله‌ی حفاظت منابع آب و خاک*، جلد ۲، شماره‌ی ۱ ، ۶۱- ۷۶.

۲. ذبیحی، ف.؛ نیشـابوری، م. ر.؛ و دلالیان، م. ر، ۱۳۹۲. تأثیر پلی‌آکریل آمید، پومیس و کمپوسـت زباله شـهری بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی یک خاک رسی شور ـ سدیمی، *نشریه‌ی دانش آب و خاک*، جلد ۲۳، شماره‌ی ۳، ۷۹ - ۹۲.

۳. صادقی، س. ح. ر.، ۱۳۸۹. مطالعه و اندازه‌گیری فرسایش آبی، انتشارات دانشگاه تربیت‌مدرس تهران، ۲۰۰ص.

4. Abrol, V.; Shainberg, I.; Lado, M.; & M. Ben-Hur, 2013. Efficacy of dry granular anionic polyacrylamide (PAM) on infiltration, runoff and erosion, *European Journal of Soil Science*, 64, 699 - 705.
5. Akbarzadeh, A.; Taghizadeh Mehrjardi, R.; Refehi, GH.; Rouhipour, H.; & M. Gorji, 2009. Using soil binders to control runoff and soil loss in steep slopes under simulated rainfall, *International Agrophysics*, 23, 99 - 109.
6. Ao, C.; Yang, P.; Ren, S.; Xing, W.; Li, X.; & X. Feng, 2016. Efficacy of granular polyacrylamide on runoff, erosion and nitrogen loss at loess slope under rainfall simulation, *Environmental Earth Sciences*, 75, 490 - 590.
7. Asghari, SH.; Neyshabouri, M. R.; Abbasi, F.; Aliasgharzad, N.; & SH. Oustan, 2009. The effects of four organic soil conditioners on aggregate stability, pore size distribution, and respiration activity in a sandy loam soil, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 33, 47 -55.
8. Awad, Y. M.; Blagodatskaya, E.; Ok, Y. S.; & Y. Kuzyakov, 2013, Effects of polyacrylamide, biopolymer and biochar on the decomposition of 14C-labelled maize residues and on their stabilization in soil aggregates, *European Journal of Soil Science*, 64, 488 - 499.
9. Babalola, O.; Oshunsanya, S. O.; & K. Are, 2007. Effects of vetiver grass (Vetiveria nigritana) strips, vetiver grass mulch and an organomineral fertilizer on soil, water and nutrient losses and maize (Zea mays, L) yields, *Soil and Tillage Research*, 96 (1-2) , 6 - 18.
10. Bryan, R. B., 1992. The influence of some soil conditioners on soil properties: laboratory tests on Kenyan soil samples, *Soil Technology*, 5, 225 - 247.
11. Cerda, A., 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia, *Soil and Tillage Research*, 57, 159 – 166.
12. Chaowen, L.; Shihua, T.; Jingjing, H.; & C. Yibing, 2007. Effects of plant hedgerows on soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple soil area, *Acta Ecologica Sinica*, 27, 2191 - 2198.
13. Donjadee, S.; Clemente, R. S.; Tingsanchali, T.; & C. Chinnarasri, 2010. Effects of vertical hedge interval of vetiver grass on erosion on steep agricultural lands, *Land Degradation and Development*, 21(3), 219 - 227.
14. Edem, I. D., & P. Okoko., (2015). Pedo-transfer function of saturated hydraulic conductivity and soil loss under vetiver alleys for soil fertility and aggregation. *International Journal of Plant and Soil Science*. 4 (5), 461- 474.
15. Gholami, L.; Sadeghi, S. H. R.; & M. Homaee, 2013. Straw mulching effect on splash erosion, runoff and sediment yield from eroded plots, *Soil Science Society of America Journal*, 77, 268 - 278.
16. Green, V. S.; Stott, D. E.; Norton, L. D.; & J. G. Graveel, 2000. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall, *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1786 - 1791.
17. Green, V. S.; Stott, D. E.; Graveel, J. G.; & L. D. Norton, 2004. Stability analysis of soil aggregates treated with anionic polyacrylamides of different molecular formulations, *Soil Science*, 169, 573 - 581.
18. Kemer, W. D., & R. C. Rosenau, (1986). Aggregate stability and size distribution. In: Klute A. Methods of Soil Analysis. Part 1 in Physical and Mineralogical Methods. Ed. *Madison: Soil Science Society America*. p. 425 - 442.
19. Kukal, S. S.; Manmeet, K.; Bawa, S. S.; & N. Gupta, 2007. Water-drop stability of PVA-treated natural soil aggregates from different land uses, *Catena*, 70, 475 - 479.
20. Lal, R., 1994. Soil Erosion Research Methods. 2nd ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society.
21. Lee, S. S.; Shah, H. S.; Awad, Y. M.; Kumar, S.; & Y. S. Ok, 2015. Synergy effects of biochar and polyacrylamide on plants growth and soil erosion control, *Environmental Earth Sciences*, 74, 2463 - 2473.

22. Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology, *European Journal of Soil Science*, 47, 425 - 435.
23. Lentz, R. D., 2015. Polyacrylamide and biopolymer effects on flocculation, aggregate stability, and water seepage in a silt loam, *Geoderma*, 241 - 242: 289 - 294.
24. Levey, G. Y.; Levin, J.; Gal, M.; Ben-Hur, M.; & I. Shainberg, 1992. Polymers effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations, *Soil Science Society of America Journal*, 56, 902 - 907.
25. Madari, B.; Machado, P. L. O. A.; Torres, E.; Andrade, A. G .; & L. I. O. Valencia, 2005. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil, *Soil and Tillage Research*, 80, 185 - 200.
26. Mamedov, A. I., & G. J. Levy, (2013). High energy moisture characteristics: linking between some soil processes and structure stability. In: Logsdon S, Berli M, and Horn R, editors. Quantifying and modeling soil structure dynamics: advances in agricultural systems modeling. Trans-disciplinary Research, Synthesis, Modeling and Applications. Inc. Madison, WI USA: *Soil Science Society of America Journal*. p. 41-74.
27. Mamedov, A. I.; Huang, C. H.; Aliev, F. A .; & G. J. Levy, 2016. Aggregate stability and water retention near saturation characteristics as affected by soil texture, aggregate size and polyacrylamide application, *Land Degradation and Development*, n/a-n/a. Published online in Wiley Online Library (wiley online library.com) DOI: 10.1002/ldr. 2509.
28. Materechera, S., 2010. Soil physical and biological properties as influenced by growth of vetiver grass (Vetiveria zizanioides L.) in a semi-arid environment of South Africa Simeon. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1-6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
29. Melo, D. V. M.; Almeida, B. G.; Souza, E. R.; Silva, L. S.; & P. K. T. Jacomine, 2014. Structural quality of polyacrylamide-treated cohesive soils in the coastal tablelands of Pernambuco, *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 38, 476 - 485.
30. Nishihara, R., & C. Shock., (2001). Benefits and costs of applying polyacrylamide in irrigated furrow. Malheur experiment station: Organ State University Ontario, Oregon.
31. Oku, E.; Fagbola, O.; & P. Troung, 2011. Evaluation of vetiver grass buffer strips and organomineral fertilization for the improvement of soil physical properties, *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 45, 824 - 831.
32. Pang, J.; Chan, G. S.Y.; Zhang, J.; Liang, J.; M. H. Wong, 2003. Physiological aspects of vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes, Chemosphere, 52, 1559 - 1570.
33. Sadeghi, S. H. R.; Gholami, L.; Sharifi, E.; Khaledi Darvishan, A.; & M. Homaee, 2015. Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions, *Solid Earth*, 6, 1 – 8.
34. Styczen, M. E., & R. P. C. Morgan., (1995). Engineering properties of vegetation. In: Morgan RPC, Rickson RJ, editors. Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach. eds. UK: Silsoe College, Cranfield University. p. 496 - 509.
35. Truong, P. N., 2002. Vetiver Grass Technology, In Maffei M, editor. Vetiveria. ed. London and New York: Taylor and Francis, p. 114 - 132.
36. Wang, A. P.; Li, F. H.; & S. M. Yang, 2011. Effect of polyacrylamide application on runoff, erosion and soil nutrient loss under simulated rainfall, *Pedosphere*, 21(5), 628 - 638.
37. Welle, S.; Chantawarangul, K.; Nontananandh, S.; & S. Jantawat, 2006. Effectiveness of grass strips as barrier against runoff and soil loss in Jijiga area, northern part of Somali region, Ethiopia, *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 40, 549 - 558.
38. Wolde, Z., 2015. Assessment of the role of Vetiver Grass System in soil and water conservation at Kuraz Sugar Development Project, *International Invention Journal of Agricultural and Soil Science*, 3, 21 - 25.

39. Young, A., 1997. Agroforestry for soil management. 2nd ed. CAB International: Walingford, UK.
40. Yu, J.; Lei, T.; Shainberg, I.; Mamedov, A. I.; & G. J. Levy, 2003. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum, *Soil Science Society of America Journal*, 67, 630 -636.

Comparing the Effects of Vetiver and Polyacrylamide on Soil Structural Stability and Erosion Indices

Elham Amiri Khaboushan: ***Ph.D Student of Soil Physics and Conservation, Ferdowsi University of Mashhad***

Hojat Emami*: ***Associate Professor of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad***

Ali Rreza Astaraei: ***Associate Professor of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad***

Mohammad Reza Mosaddeghi: ***Professor of Soil Science, Isfahan University of Technology***

Article History (Received: 08/01/2017 Accepted: 08/02/2017)

Extended abstract

1- INTRODUCTION

Soil erosion is one of the most important problems of the environment, natural resources, and agriculture in the world. Soil structure stability is the key element of soil health, the main factor in the improvement or degradation of soils, and the important point in evaluating the effects of land management and the operations practices to control soil erosion. Bioengineering systems and soil stabilizers such as chemical polymers are applied to increase the soil structural stability and resistance against degradative agents, and to control soil erosion.

2- THEORETICAL FRAMEWORK

Although many researches have been carried out to study the effect of PAM on soil strcutursl stability and soil erosion, most of them were conducted in the lab condition, and also the mixture of PAM with the bioengineering techniques, especially in field condition and semi-arid regions such as Khorasan Razavi province, was not studied. Regarding the potential of vetiver in soil conservation, it seems that the vetiver has been well adapted in most regions of Iran, and can decrease soil erosion. Therefore, this research was performed to investigate the effect of the vetiver cultivation system, as a valuable bioengineering technique, and polyacrylamide (PAM) on soil structure and aggregate stability indices and soil erosion characteristics in a loamy soil under field condition.

3- METHODOLOGY

The study was conducted in a loamy soil on slope of 5% in Agriculture Campus, Ferdowsi University of Mashhad. To apply the treatments, experimental plots (1 m × 1 m) were prepared in the given area. Experimental treatments include vetiver cultivation (VP0), PAM (20 (P2) and 40 (P4) kg ha^{-1}), simultaneous application of vetiver and above PAM concentrations (VP2, and VP4. In addition, P0 (no PAM and vetiver) was regarded as control treatment. The undisturbed samples were collected to measure the structure indices before and after simulating the rainfall test. Structural stability indices including wet and dry mean weight diameter of aggregates (MWD_{wet} and MWD_{dry}), aggregate stability (AS), structural stability index (SI), and the percentage of aggregate degradation (PAD) were determined. The simulated rainfall intensity of 30 mm h^{-1} during 30 minutes was applied on the treated soils, and runoff and sediment volume were collected. This study was performed based on the randomized complete blocks design and a factorial arrangement with 3 replications. The data pertaining to soil structural stability and erosion indices were analyzed using SPSS software.

* Corresponding Author: hemami@um.ac.com

4- RESULTS & DISCUSION

The results showed that vetiver and PAM increased the soil structural stability indices i.e. MWD_{wet}, MWD_{dry}, AS, and SI, and decreased PAD. However, vetiver enhanced the stability indices more than PAM. Also, vetiver and PAM decreased soil erosion indices, and the decrease in soil loss, runoff, and runoff coefficient was more due to the vetiver. The higher aggregation and structural stability, and as a result, the considerable reduction of aggregate degradation in the vetiver plots is due to the effect of high density of fine roots biomass and microbial activity associated with the rhizosphere of the vetiver grass. On the other hand, when the aggregate stability increases, the water infiltration will increase and runoff will decrease. Consequently, particle detachment and aggregate degradation, and transport of soil particles due to the rain drop impact and runoff decrease. Also, vetiver increases soil resistance against raindrops; soil erosion decreases runoff probably through binding soil particles, aggregation and creating the macro pores. Adsorption of the long chains of PAM polymer on the surfaces of soil particles and aggregates, flocculating the soil particles and binding them by PAM ledad to increase aggregation and aggregate stability, creates continuous and stable macropores in soils, and decreases aggregate degradation. Therefore, PAM increases water permeability and as a results decreases the runoff, coefficient of runoff and soil loss. However, the efficiency of PAM to decrease the runoff and soil loss depends on the concentration and viscosity of the dissolved PAM.

5- CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

Generally, the results of this research indicated that the vetiver system can be recommended due to the very low cost and long-term bioengineering technique to improve the soil structure; it increases aggregate stability, and decreases runoff and soil loss in thesemi-arid regions such as Iran.

Key Words: Aggregate stability, Soil biological conservation, Runoff, Soil loss, Rainfall simulator.