Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Investigating the application of humic acid and irrigation levels on some physical, chemical, and biological properties of the soil under bell pepper cultivation

Mahtab Roshaniyan[1] Afsaneh Alinejadian-Bidabadi✉[2] Abbas Maleki[3] Amir Lakzian[4]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran. Email: m_roshaniyan@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran. Email: alinezhadian.a@lu.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran. Email: maleki.a@lu.ac.com
4. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran. Email: lakzian@um.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 31, 2023

Revised: March. 1, 2023

Accepted: Apr. 4, 2023

Published online: Feb. 20, 2024

Keywords:
Alkaline and Acid Phosphatase Enzymes,
Soil Urease,
Aggregate Stability,
Soil Enzyme Activity.

ABSTRACT

Humic acid can improve water absorption by plants by improving soil structure and water retention in soil. These characteristics have caused the use of humic acid in the soils of dry areas to be considered. This study aimed to investigate the simultaneous effect of humic acid and deficit irrigation on soil physical and biological properties under the cultivation of bell pepper. A factorial-based experiment in a randomized complete design was carried out with three levels of humic-acid (0 (HA0), 2 (HA20), and 4 (HA40) g per pot) and four irrigation levels (60 (L60), 80 (L80), 100 (L100), 120 (L120), (percent of soil moisture depletion) with three replications in the research greenhouse of Payam Noor Bojnourd University. The results showed that the best treatments for improving soil physical properties, AS (aggregate stability), and decreasing PAD (percentage of aggregate destruction)), were L80HA40, L100HA40, and L120HA40 treatments. Also, by increasing the dose of HA and increasing the irrigation level up to L80, the activity of urease, alkaline phosphatase, and acid phosphatase enzymes increased and then decreased in L100 and L120.Therefor the highest amount of urease, alkaline phosphatase, and acid phosphatase enzymes (µg NH4+-N g-1 dry soil 2h-1) 678.98, 845.54 671.30 (µg PNP g−1 dry soil h -) were observed in L80L40, which were to be 4.6, 5.9, 2.8 and 0.6 times more than L60HA0 treatment, respectively. By increasing the amount of humic acid and increasing the irrigation levels up to L100, respiration rates increased and then decreased at L120, however, microbial activity followed by respiration at L80 and L100 were not significantly different.

Cite this article: Roshaniyan, M., Alinejadian-Bidabadi, A., Maleki, A., & Lakzian, A. (2024) Investigating the application of humic acid and irrigation levels on some physical, chemical, and biological properties of the soil under bell pepper cultivation, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (12), 1929-1943. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365880.669582

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365880.669582

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۱۲ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بررسی کاربرد اسید هومیک و سطوح مختلف آبیاری بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی خاک در کشت فلفل دلمه‌ای

مهتاب روشنیان[۱]، افسانه عالی‌نژادیان بید آبادی[۲]✉، عباس ملکی[۳]، امیر لکزیان[۴]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، رایانامه: m_roshaniyan@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک،دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، رایانامه: alinezhadian.a@lu.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان،خرم آباد، ایران، رایانامه: dr.maleki38@yahoo.com

۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، رایانامه: alakzian@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱

واژه‌های کلیدی:
آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی،
اوره‌آز خاک،
پایداری خاکدانه‌ها،
فعالیت آنزیمی خاک.

چکیده

اسید هومیک می‌تواند با بهبود ساختمان خاک و نگه‌داری آب در خاک، سبب بهبود جذب آب توسط گیاهان شود. این ویژگی سبب شده تا کاربرد اسید هومیک در خاک‌های مناطق خشک مورد توجه قرار بگیرد. بر این اساس مطالعه ی حاضر با هدف بررسی اثر همزمان اسید هومیک و کم‌آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی خاک زیر کشت فلفل دلمه‌ای به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه سطح اسید هومیک صفر ((HA0)، ۲ (HA20)) و ۴ (HA40) گرم بر گلدان) و چهار سطح آبیاری (۶۰ (L_{60})، ۸۰ (L_{80})، ۱۰۰ (L_{100}) و ۱۲۰ (L_{120}) درصد از تخلیه رطوبتی خاک)، در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشگاه پیام نور بجنورد به صورت گلدانی با چهار تکرار انجام شد. نتایج نشان داد تیمارهای L80HA40، L100HA40 و L120HA40 بیشترین تاثیر را در بهبود خصوصیات فیزیکی خاک نظیر AS (پایداری خاکدانه)، و کاهش PAD (در صد تخریب خاکدانه‌ها) داشتند. همچنین با افزایش میزان اسید هومیک، فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، فسفاتاز اسیدی و قلیایی در تیمار L80 افزایش و در تیمارهای L100 و L120 کاهش یافت. بنابراین بیشترین مقدار آنزیم‌های اوره‌آز، آلکالین فسفاتاز و اسید فسفاتاز، (۹۸/۶۷۸ µg NH4+-N g-1 dry soil 2h-1)، ۸۴۵/۵۴ و ۶۷۱/۳۰ (µg PNP g−1 dry soil h−) در L80H40 مشاهده شد که به ترتیب ۴/۶، ۵/۹، ۲/۸ و ۶/۰ برابر بیشتر از تیمار L60HA0بودند، با افزایش مقدار اسید هومیک و افزایش سطوح آبیاری تا L100، مقادیر تنفس افزایش و سپس در L120 کاهش یافتند، با این وجود فعالیت میکروبی و به دنبال آن تنفس در L80 با L100 تفاوت معنی‌داری نداشتند.

استناد: روشنیان؛ مهتاب، عالی نژادیان بیدآبادی؛ افسانه، ملکی؛ عباس، لکزیان؛ امیر (۱۴۰۲) بررسی کاربرد اسید هومیک و سطوح مختلف آبیاری بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی خاک در کشت فلفل دلمه‌ای، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۱۲)، ۱۹۴۳-۱۹۲۹.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365880.669582

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365880.669582

مقدمه

امروزه استفاده از انواع محرک‌های زیستی مانند ترکیبات هوموسی یکی از راه‌کارهای بهبود حاصلخیزی خاک است. اسید هومیک (HA) با دارا بودن ساختار پلیمری، بخشی از مواد آلی است که عموماً در خاک‌ها و آب‌های روان در اثر تجزیه گیاهان و بقایای جانوری به‌دست‌آمده و جهت افزایش محصول به کار برده می‌شود (Fan et al., 2014). کاربرد اسید هومیک در خاک می‌تواند با افزایش تخلخل خاک، سبب نگه‌داشت آب در خاک و افزایش کارایی مصرف آب شود و شرایط تنش رطوبتی را برای گیاه کاهش دهد (Hal et al., 2021). مواد هومیک به طور مستقیم و غیر مستقیم تأثیر به‌سزایی در رشد گیاه دارند به‌گونه‌ای که ترکیبات هومیک بر حاصلخیزی خاک، افزایش غلظت میکروبی درخاک (از جمله ریزجانداران‌های مفید)، افزایش کاتیون‌های تبادلی خاک و بهبود ساختار خاک تاثیر مستقیم و بر رشد گیاه تاثیر غیرمستقیم دارند (Asic et al., 2009). کاربرد اسید هومیک در فلفل می‌تواند سبب کاهش اثرات شوری و خشکی در گیاه گردد (Bacilio et al., 2016).

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل تنش‌زای غیر زنده است که بر رشد، متابولیسم و عملکرد گیاهان اثر منفی بر جای می‌گذارند (Bhati et al., 2013). اولین واکنش گیاه به تنش خشکی، کاهش رشد است که باعث پاسخ‌های مرفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاه می‌شود. این در حالی است که دهیدراسیون ناشی از تنش خشکی از طریق اختلال در واکنش بیوشیمیایی فتوسنتز نرخ فتوسنتزی را کاهش می‌دهد (Mafakheri et al., 2010). در هنگام تنش خشکی گیاه برای اجتناب از خشکی و نهایت استفاده از مقدار آب محدودی که در اختیار دارد، اقدام به بستن روزنه‌های خود می‌کند تا از هدرروی آب جلوگیری شود. بنابراین با شروع دوره خشکی تا مدتی گیاه تعرق و هدایت روزنه‌های خود را در سطح حداکثر نگه می‌دارد ولی با تداوم دوره خشکی اقدام به تنگ نمودن روزنه و در نهایت بستن آن‌ها می نماید (Nahar et al., 2018). از طرف دیگر در شرایط تنش خشکی، گیاهان با تولید برخی مواد تنظیم کننده فشار اسمزی پتانسیل آب سلول‌ها را پایین آورده و از این طریق با خشکی مقابله می‌کنند (Denaxa et al., 2012). تنش کم‌آبی می‌تواند با تأثیرگذاری بر شاخص‌های رشد و نمو، گلدهی و عملکرد گیاهان منجر به کاهش رشد رویشی و زایشی گیاهان شود (Bigluie et al., 2010).

فلفل دلمه‌ای با نام علمی Capsicum annum یکی ازمحصولات مهم جالیزی به شمار می‌رود. فلفل یکی از سبزیجات مهم از خانواده Solanacea و از جنس Capsicum و گونه annum می‌باشد. فلفل دلمه‌ای سرشار از عناصر معدنی مانند پتاسیم، ویتامین‌های A وC، آنتی اکسیدان‌ها مانند لیکوپن، کاروتنوئیدها، مواد فنولیک و فیبر غیرمحلول است (Palma et al., 2020). اخیراً برای بهبود وضعیت گیاه، از محرک‌های زیستی طبیعی استفاده می‌شود (Paradikovic et al., 2011). کوددهی برگی به گیاهان کمک می‌کند تا باروری پایین خاک، محدودیت‌های جذب مواد مغذی و تثبیت مواد مغذی را جبران کنند (Dada et al. 2016). کودهای آلی- معدنی رایج مورد استفاده در کوددهی گیاهان، مواد هومیک هستند که حاوی اسید هومیک هستند (Manas et al., 2014).

از آن‌جایی که مقدار جذب عناصر غذایی و ویژگی‌های خاک با رژیم‌های مختلف آبیاری تغییر می‌کند و این تغییرات به‌طور مستقیم رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و قابلیت دسترسی به آب از عوامل کلیدی تأثیرگذار در تولیدات گیاهان می‌باشد و از سوی دیگر بخش اعظم اراضی ایران در اقلیم خشک و نیمه خشک قرار دارد، بنابراین این پژوهش با بررسی کاربرد اسید هومیک و سطوح مختلف آبیاری بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی خاک در کشت فلفل دلمه‌ای اجرا شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تجزیه خاک

این پژوهش در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه پیام نور بجنورد به صورت گلدانی روی گیاه فلفل دلمه‌ای و به مدت زمان ۸۰ روز از کشت تا برداشت به طول انجامید. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکو شیمیایی و بیولوژیکی خاک پس از برداشت گیاه، خاک هر گلدان هوا خشک و نمونه‌هایی از خاک جهت تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، مقادیر pH گل اشباع توسط pH متر و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (ECe) با هدایت سنج تعیین شد (Thomas, 1996). ویژگی‌های اولیه خاک در جدول (۱) آمده است. کربن آلی به روش والکلی و بلاک (Walkley and Blake, 1934)، همچنین نیتروژن کل با استفاده از دستگاه کجلدال (Brennan et al., 1993)، فسفر قابل جذب به روش اولسن و با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (Olsen, 1954)، پتاسیم قابل جذب به روش آمونیوم استات با دستگاه شعله سنج (Nelson and Sumner, 1996) ، فعالیت آنزیم اوره‌آز خاک به

روش طباطبایی و برمنر (Tabatabai and Bremner., 1969) اندازه‌گیری شدند. برای سنجش فعالیت فسفاتاز (اسیدی و قلیایی) خاک از روش‌های مرسوم در اندازه‌گیری فعالیت این آنزیم استفاده شد (Tabatabai., 1982). تنفس میکروبی خاک به روش (Alef and Nannipiri, 1995) اندازه‌گیری شد. به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک پس از برداشت گیاه، خاک هر گلدان هوا خشک و نمونه‌هایی از خاک جهت تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد.

جدول ۱. خواص فیزیکوشیمیایی خاک اولیه در آزمایش

Zn(Av)	Fe (Av)	K(Av) mg/kg	P(Av)	N (T)	OC %	EC dS/m	pH	Texture	Clay	Silt %	Sand
۰/۳۶	۴/۶۰	۲۱۵	۷/۳۵	۰/۰۴۸	۱/۰۶۳	۲/۴۸	۷/۱۲	Cl	۲۹	۴۹	۲۲

طرح آزمایشی و آماده سازی گلدان‌ها

پژوهش حاضر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشگاه پیام نور بجنورد به صورت گلدانی اجرا گردید. فاکتورهای آزمایشی شامل چهار سطح آبیاری (۶۰ (L_{60})، ۸۰ (L_{80})، ۱۰۰ (L_{100}) و ۱۲۰ (L_{120}) درصد بر اساس تخلیه رطوبتی خاک) و سه سطح اسید هومیک (صفر (HA_0)، ۲ (HA_{20})و ۴ (HA_{40}) گرم بر گلدان) بودند. جهت آماده‌سازی گلدان‌ها، ابتدا خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و در مقادیر ۱۰ کیلوگرمی جهت استفاده در گلدان‌ها توزین شد. سپس مقادیر اسید هومیک مطابق تیمارهای آزمایشی به خاک‌های توزین شده اضافه گردید.

کشت فلفل دلمه‌ای و اعمال سطوح آبیاری

پس از اختلاط خاک و اسید هومیک، گلدان‌ها به صورت کامل اشباع شدند. خروج آب ثقلی از انتهای گلدان در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری گردید و حدوداً بعد از گذشت ۲۴ ساعت خروج آب ثقلی متوقف گردید. وزن گلدان در این حالت به عنوان وزن در حالت ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد (پورمنصور و همکاران، ۱۳۹۸). پس از تهیه نشاء فلفل دلمه‌ای در گلخانه، نشاءها به گلدان‌های اصلی ۱۰ کیلوگرمی که رطوبت آنها در حد ظرفیت زراعی بود، منتقل گردیدند. در هر گلدان دو نشاء فلفل دلمه‌ای با طول اندام هوایی ۸ سانتی‌متر کاشته شد. پس از گذشت ۱۵ روز از انتقال نشاءها و استقرار کامل گیاهان، سطوح آبیاری اعمال گردید و تا پایان دوره رشد به مدت ۸۰ روز ادامه یافت. آبیاری تمام گلدان‌ها بر اساس تخلیه مجاز رطوبتی و هر ۳ روز یک مرتبه انجام شد. بدین صورت که (L_{100}) به عنوان تیمار دریافت کننده آبیاری کامل (رساندن کمبود رطوبت خاک تا ظرفیت زراعی) در نظر گرفته شد و مقدار آب مورد نیاز در تیمارهای آبیاری (L_{60}، L_{80}، L_{100} ، L_{120}) به ترتیب با اعمال ضرایب ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۲ در مقدار آب مورد نیاز آبیاری کامل (L_{100}) به دست آمد و به گلدان‌ها اضافه گردید. طی دوره رشد گیاه، عملیات وجین علف‌های هرز تا مرحله برداشت به صورت دستی انجام گردید. پس از طی دوره ۸۰ روزه رشد گیاه، میوه رسیده گیاه فلفل دلمه‌ای برداشت شد (شکل ۱).

شکل ۱. کشت فلفل دلمه‌ای

ویژگی‌های فیزیکی

پایداری خاکدانه‌ها (AS)

یکی از شاخص‌ها، پایداری خاکدانه‌ها (AS) می‌باشد که با استفاده از روش الک تر و بعد از تصحیح شن بر اساس (رابطه ۱) تعیین شد

(Kemper and Rosenau, 1986).

$$AS = \frac{\text{WSA} - \text{Msand}}{\text{Msampel} - \text{Msand}} \times 100$$ رابطه ۱)

که در این رابطه Msand، وزن ذرات بین ۲ و ۰/۰۵ میلی‌متر به گرم، WSA وزن خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متری و Msample جرم نمونه خاک است.

درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD)

درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD) یکی دیگر از شاخص‌های مناسب مورد استفاده برای ارزیابی ساختار فیزیکی خاک است که بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های الک خشک (MWD_{dry}) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های الک مرطوب (MWD_{wet}) است و به شرح زیر محاسبه شد.

$$\text{PAD} = \left[\frac{\text{Md} - \text{Mw}}{\text{Md}}\right] \times 100$$ رابطه۲)

که در این رابطه (m_d) و (m_w) وزن خاکدانه‌های بزرگتر از اندازه ۰/۲۵ میلی‌متر بر حسب گرم در دو حالت الک خشک (md) و تر (mw) می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل از این آزمایش با نرم افزار آماری SPSS نسخه ۱۶ مورد تجزیه قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد محاسبه گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک

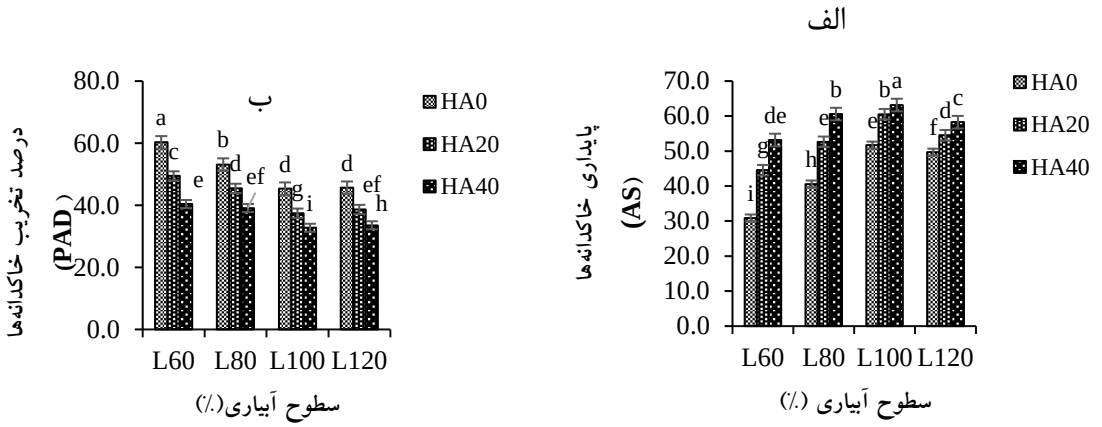
پایداری خاکدانه‌ها (AS) و درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD)

مقادیر پایداری خاکدانه‌ها (AS) با افزایش اسید هومیک مصرفی و سطح آبیاری تا (L_{100}) افزایش و در سطح آبیاری ۱۲۰ درصد (L_{120}) کاهش یافتند (شکل ۱ الف، ب). بالاترین AS در $L_{100}H_4$ مشاهده شد که ۲/۰۴ برابر نسبت به تیمار $L_{60}HA_0$ بیشتر بود. در مقابل، حداکثر مقدار PAD در $L_{60}HA_0$ با ۳۲/۹۰ درصد افزایش در مقایسه با $L_{100}HA_{40}$ مشاهده شد (شکل ۲ الف، ب). هرچه مقدار PAD کم‌تر باشد، خاکدانه‌ها پایدارتر می‌باشند زیرا خاک‌های با پایداری بالاتر، مقاومت بیشتری در مقابل تخریب دارند (Wang et al., 2013). آبیاری در مقادیر زیاد اغلب باعث سست شدن واحدهای ساختمان خاک و در نهایت منجر به تخریب ساختمان خاک می‌شود (Huisz et al., 2019). آبیاری شدید باعث شکستن خاکدانه‌ها به ذرات کوچکتر می‌شود (Emerson, 1997).

Huisz et al., (2019) اثر آبیاری و کود نیتروژن بر پایداری خاکدانه‌های خاک را بررسی و گزارش نمودند که آبیاری باعث افزایش شاخص‌های پایداری خاک از جمله MWD و AS شد و بیش آبیاری ممکن است تا حد زیادی ساختمان خاک را تغییر دهد. تخریب خاکدانه‌ها به علت حبس شدن هوا با افزایش یافتن مقدار رطوبت اولیه تا حد رطوبت اشباع کاهش می‌یابد که این هم به دلیل کاهش حجم هوایی است که در اثر خیس شدن حبس می‌گردد و هم به دلیل کاهش شیب پتانسیل ماتریک می‌باشد (Tisdoll and Adem., 1986). تخریب خاکدانه‌ها در رطوبت‌های بالاتر و پایین تر از حد بهینه افزایش می‌یابد (Arvidsson and Bolenius, 2006).

مقادیر پایداری خاکدانه‌ها در تمامی سطوح آبیاری، در تیمارهای HA_4 و HA_2 در مقایسه با HA_0 به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. ماده آلی با اتصال ذرات خاک به یکدیگر و همچنین افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی خاک، در افزایش چسبندگی بین ذرات خاک و پایداری ساختمان خاک نقش داشته و سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (Bai et al., 2019). با این وجود در شرایط رطوبتی مناسب، احتمالاً تأثیر مواد آلی در چسبندگی و خاکدانه‌سازی بهبود می‌یابد. مصرف اسید هومیک در افزایش پایداری ساختمان خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به طوری‌که در مقادیر بالاتر مصرف مواد آلی در خاک، مقادیر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابند (Fu et al., 2021). در این پژوهش در اثر کاربرد اسید هومیک و وجود درصد کربن آلی بالا (۳۶ درصد)، ماده آلی خاک به‌طور چشمگیری افزایش یافت. بنابراین افزایش شاخص پایداری خاک در این پژوهش می‌تواند به دلیل افزایش ماده آلی خاک باشد. یافته‌های این پژوهش با یافته‌های Sheng et al., (2014) مبنی بر نقش مؤثر مواد آلی در ایجاد خاکدانه‌های بزرگتر و افزایش مقدار

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و پایداری خاکدانه‌ها هم‌خوانی داشت. بنابراین در پژوهش حاضر می‌توان بیان کرد که درصد کربن آلی بالا در اسید هومیک به عنوان عامل سیمانی‌کننده منجر به تجمع ذرات اولیه‌ی خاک شده و به دلیل نیروهای هم‌چسبی بین ذرات معدنی و پلیمر آلی، درصد تخریب خاکدانه‌ها کاهش و پایداری خاکدانه‌ها افزایش یافته است (Blanco-Canqui et al., 2006).



شکل ۲. تأثیر متقابل تیمارهای هومیک اسید و سطوح آبیاری بر پایداری خاکدانه‌ها (الف) و درصد تخریب خاکدانه‌ها (ب)

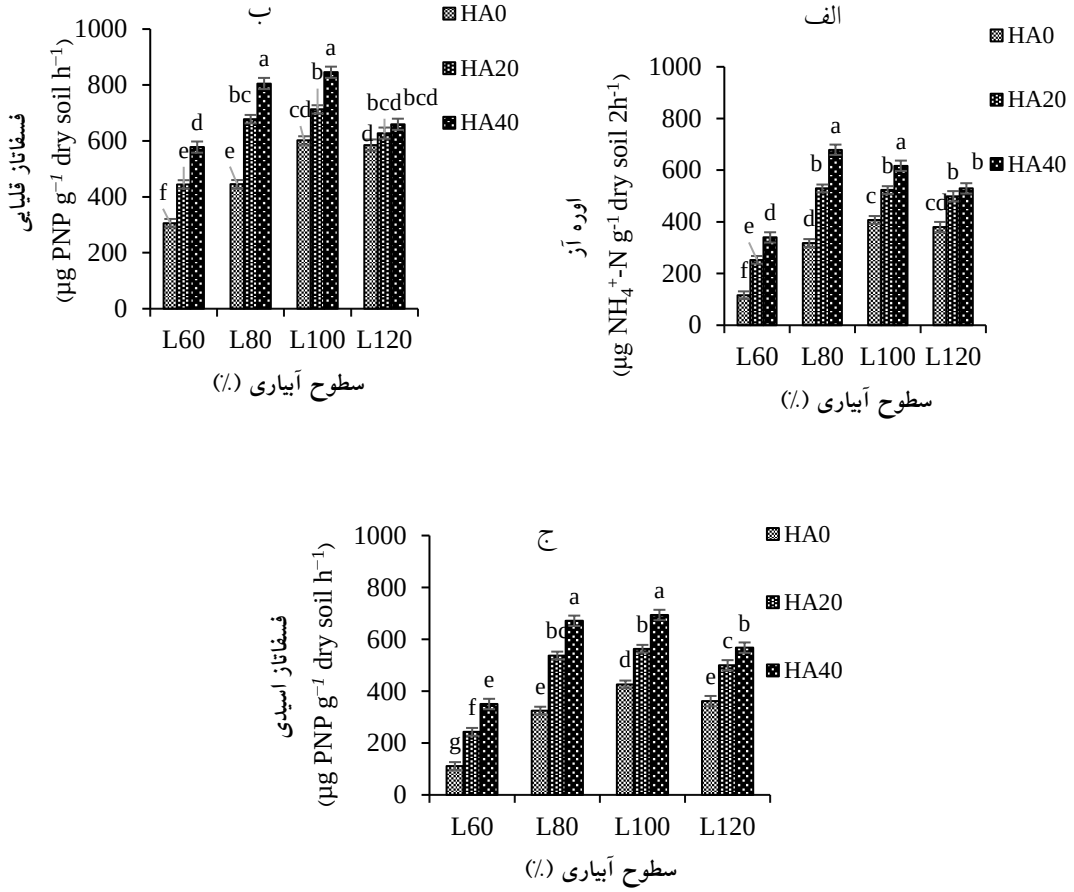
ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی، اوره‌آز خاک

اثر سطوح آبیاری و اسید هومیک بر فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، آلکالین فسفاتاز و اسید فسفاتاز در شکل ۳(الف، ب، ج) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با افزایش مقدار اسید هومیک و افزایش سطوح آبیاری تا L_{80}، مقادیر فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، آلکالین فسفاتاز و اسید فسفاتاز افزایش و سپس در L_{100} و L_{120} کاهش یافتند، با این وجود فعالیت این آنزیم‌ها در L_{80} با L_{100} تفاوت معنی‌داری نداشتند. بنابراین بیشترین مقدار آنزیم‌های اوره‌آز، آلکالین فسفاتاز و اسید فسفاتاز با ۶۷۸/۹۸ ($\mu g\ NH_4^+\text{-}N\ g^{-1}\ dry\ soil\ 2h^{-1}$)، ۸۴۵/۵۴ و۶۷۱/۳۰ ($\mu g\ PNP\mu g^{-1}\ dry\ soil\ h^{-1}$) در L_{80} مشاهده شد که به ترتیب ۵/۹، ۲/۸ و ۶/۰ برابر بیشتر از تیمار ($L_{60}H_{A0}$) بودند. مقدار آنزیم فسفاتاز اسیدی در تیمار $L_{60}H_{40}$ ($\mu g\ PNP\mu g^{-1}\ dry\ soil\ h^{-1}$) ۳۵۰/۵۰ به دست آمد که ۳/۱۵ برابر بیشتر از تیمار $L_{60}H_0$ بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کاهش رطوبت و وجود تنش در خاک بر فعالیت آنزیمی تأثیرگذار می_باشد. افزودن اسید هومیک بهترین اثر را بر فعالیت آنزیمی داشت و باعث افزایش فعالیت آنزیمی شد (شکل ۳ الف، ب، ج) افزایش ثبات و استقرار جامعه میکروبی در اثر کاربرد کودهای آلی را می‌توان عامل افزایش فعالیت آنزیمی دانست. اسید هومیک با افزایش قابلیت نگه‌داری آب در خاک باعث تعدیل شرایط تنش رطوبتی در خاک شده و فعالیت آنزیمی را در شرایط تنش افزایش داده است. Tejada et al., (2006) افزایش دسترسی ریزجانداران‌ها به مواد غذایی به دنبال اضافه کردن مواد آلی و افزایش ترشحات ریشه‌ای را دلیلی بر افزایش فعالیت فسفاتازها عنوان نموده‌اند. افزودن مواد آلی موجب افزایش زیست توده میکروبی و ترشحات ریشه‌ای شده و به دنبال آن فعالیت ریزجانداران را در ریزوسفر گیاه افزایش می‌دهد، در نتیجه باعث افزایش تولید و فعالیت فسفاتازها در ریزوسفر گیاه می‌شود (Christenen and Johnston, 1997).

رطوبت ممکن است به صورت مستقیم و غیر مستقیم بر فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی خاک تاثیر بگذارد به عنوان مثال، فعالیت میکروبی زمانی که رطوبت خاک به حد اشباع نزدیک می‌شود، به دلیل محدودیت در دسترس بودن اکسیژن، کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2022). Sardans et al., (2006) نشان دادند که کاهش رطوبت خاک به میزان ۲۱ درصد، فعالیت آنزیم اوره‌آز را به میزان ۶۰-۴۲ درصد کاهش داد. از طرفی کودهای آلی از جمله اسید هومیک، فعالیت آنزیم فسفاتاز را در خاک افزایش داده و از طریق فرایندهای معدنی شدن و انحلال، موجب فراهم شدن فسفر بیشتر در محلول خاک می‌شوند (Garg and Bahl, 2008). تحریک و بهبود رشد و فعالیت میکروبی بر اثر مصرف مواد آلی مختلف در خاک‌های مختلف توسط پژوهش‌گران زیادی مشاهده شد. برای مثال Pascual et al., (2003) علت این افزایش را به مقدار بالای کربن محلول در آب نسبت داد. با توجه به افزایش فعالیت آنزیمی در تیمارهایی که کود آلی دریافت می‌نمایند، میزان کربن قابل تجزیه افزایش یافته و شرایط برای افزایش جمعیت میکروبی فراهم شده و این جمعیت سطح بالاتری از

فعالیـت آنـزیم اوره آز را ایجـاد می‌نمایند. در مطالعه حاضر، مصرف اسید هومیک باعث افزایش فعالیت اوره آز، آلکالین فسفاتاز و اسید فسفاتاز آنزیم شد. اسید هومیک می‌تواند فعالیت آنزیم‌ها را با تأثیر مثبت بر فعالیت بیولوژیکی افزایش دهد. اسید هومیک تخلخل خاک را بهبود می‌بخشد و توانایی خاک برای حفظ رطوبت را افزایش می‌دهد و از آن‌جایی که رابطه مثبتی بین اثر بخشی آنزیم فسفاتاز و تخلخل خاک وجود دارد، اسید هومیک نقش مهمی در افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز دارد (Chen et al., 2021).

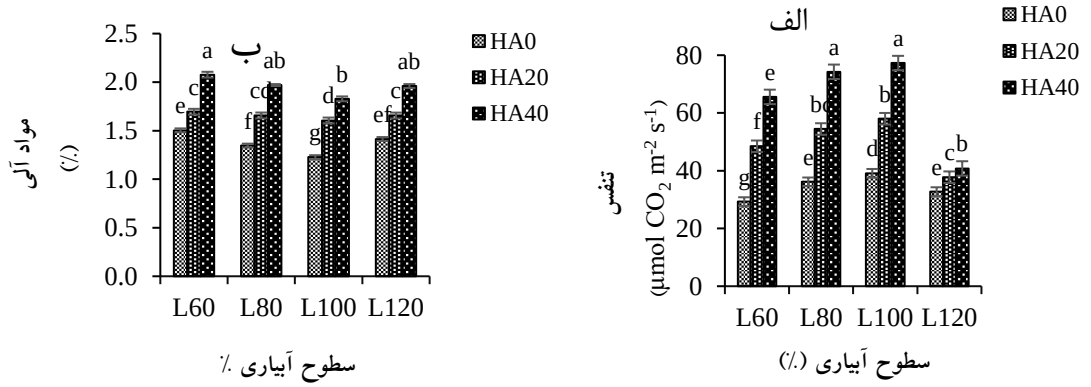


شکل ۳. تأثیر متقابل تیمارهای هومیک اسید و سطوح آبیاری براوره‌آز (الف)، فسفاتاز قلیایی (ب) و فسفاتاز اسیدی (ج)

تنفس و مواد آلی

بر اساس نتایج، با افزایش مقدار اسید هومیک و افزایش سطوح آبیاری تا L_{100}، مقادیر تنفس افزایش و سپس در L_{120} کاهش یافتند، با این وجود فعالیت میکروبی و به دنبال آن تنفس در L_{80} با L_{100} تفاوت معنی‌داری نداشتند. بنابراین بیش‌ترین مقدار تنفس با (۷۷/۳-۷۴/۲) در $L_{100}HA_{40}$مشاهده شد که به‌طور متوسط به ترتیب ۲/۵ برابر بیشتر از تیمار $L_{60}HA_0$ بودند (شکل۴ الف). مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آب آبیاری و کاربرد اسید هومیک نشان داد که در تیمارهای HA_0، HA_{20} و HA_{40} با افزایش سطح آب آبیاری از L_{60} به L_{100}، کربن آلی خاک کاهش یافت (شکل ۴ ب). به‌طوری که تیمارهای HA_0، HA_{20} و HA_{40} در L_{60} نسبت به L_{100}، ۲۱/۹، ۶/۰ و ۱۳/۷ درصد کاهش نشان داد در سطح آبیاری ۱۲۰ درصد، مقادیر کربن آلی خاک مجدداً افزایش یافت ولی این افزایش معنی‌دار نبود. به‌طور کلی، کربن بالای اسید هومیک (۲۹/۸۳ درصد) می‌تواند از عوامل مهم افزایش کربن آلی خاک در اثر افزودن اسید هومیک به خاک باشد. به‌علاوه، با افزایش سطح رطوبت به L_{100}، کاهش مقدار کربن آلی خاک مشاهده گردید. با این وجود در رطوبت بالا، به دلیل عدم دسترسی اکسیژن کافی ریزجانداران‌ها، مجدداً روند کاهشی در تجزیه مقدار کربن آلی خاک مشاهده گردید. وجود کربن آلی بیشتر در تیمارها با رطوبت بالاتر می‌تواند سبب افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی خاک شود. همچنین خشکی و کاهش سطح رطوبتی خاک سبب نامساعد شدن شرایط رشد ریز جانداران خاک و از بین رفتن سلول‌های میکروبی (Zhang et al., 2022) و در نتیجه کاهش شدت تنفس میکروبی می‌گردد. این نتایج مشابه یافته‌های Hale et al., (2021) می‌باشد. افزایش تنفس میکروبی خاک، افزایش عناصر غذایی قابل دسترس برای ریزجانداران‌ها، افزایش کربن آلی خاک و همچنین بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک را می‌توان به اثر افزودن اسید هومیک

مرتبط دانست. همچنین می‌توان افزایش تنفس میکروبی ناشی از افزودن اسید هومیک به خاک را به نقش تغذیه‌ای و بیولوژیکی این مواد برای ریزجانداران‌ها و افزایش جمعیت آن‌ها نسبت داد. به‌طور کلی، در مطالعه‌ی حاضر، افزایش کربن آلی خاک در اثر افزودن اسید هومیک به خاک می‌تواند به دلیل محتوای کربن بالا در اسید هومیک (۳۶ درصد) باشد. علاوه بر این در تیمار با سطح رطوبتی بالاتر، کاهش مقدار کربن آلی خاک مشاهده شد که این نتایج را می‌توان به افزایش نرخ تجزیه کربن آلی و در نتیجه هدر رفت کربن آلی در خاک با افزایش رطوبت نسبت داد، به‌طوری که با افزایش فعالیت میکروبی در رطوبت و دمای مناسب، رشد ریزجانداران و نرخ تجزیه‌ی کربن افزایش می‌یابد. بطور مشابه Hale et al., (2021) گزارش نمودند که با افزایش رطوبت از ۵۰ به ۸۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک در زمین چمن، در تیمارهای حاوی مواد آلی میزان کربن کل و همچنین نسبت C:N کاهش و در مقابل زیست توده میکروبی افزایش یافت. بر این اساس، این نتایج را می‌توان به دلیل تجزیه بخشی از کربن خاک طی فعالیت ریزجانداران‌ها دانست.

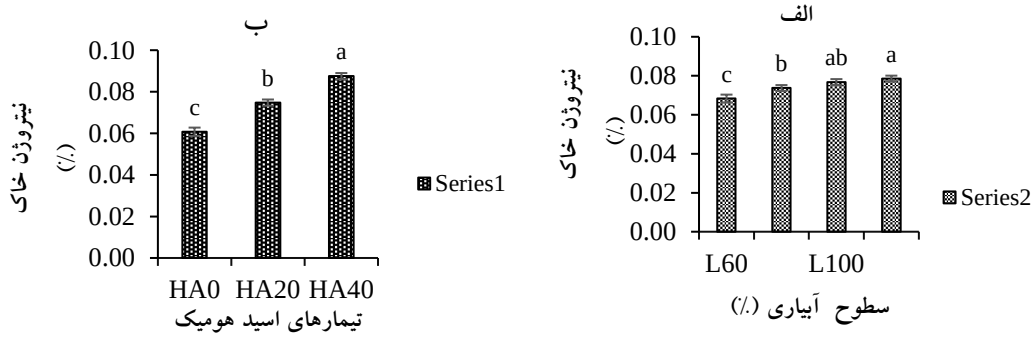


شکل ٤. تأثیر متقابل تیمارهای هومیک اسید و سطوح آبیاری بر تنفس (الف)، مواد آلی (ب)

عناصر غذایی پرنیاز خاک (نیتروژن، فسفر و پتاسیم)

نیتروژن خاک

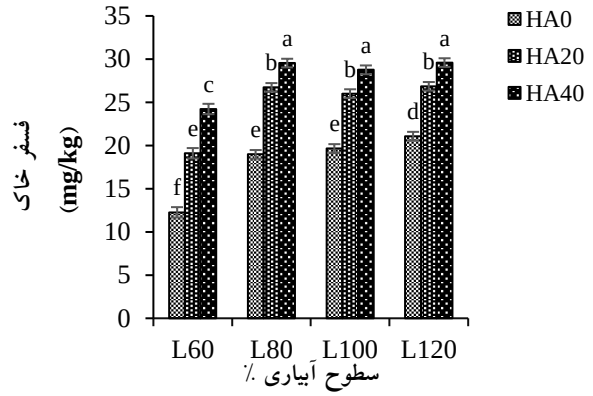
مطابق شکل ۵ الف، با افزایش سطح آبیاری از L_{60} به L_{120} نیتروژن کل خاک افزایش یافت. با این وجود بین غلظت نیتروژن کل خاک در سطح آبیاری L_{100} و L_{120} اختلاف معنی‌داری دیده نشد. غلظت نیتروژن در تیمارهای آبیاری L_{80}، L_{100} و L_{120} نسبت به L_{60} به ترتیب ۷/۳، ۱۱/۸ و ۱۴/۷ درصد افزایش داشت. با افزایش سطح رطوبت خاک و افزایش فعالیت‌های میکروبی (شکل ۴ الف)، نیتروژن خاک افزایش یافت. در این راستا، افزایش آنزیم اوره‌آز با افزایش سطح آبیاری (به‌ویژه سطوح آبیاری L_{80} و L_{100}) و افزودن اسید هومیک به خاک (شکل ۳ الف)، می‌تواند عامل مهمی در تجزیه کود اوره مورد استفاده و در نتیجه افزایش نیتروژن خاک باشد. همچنین مقایسه میانگین اثر اصلی اسید هومیک بر غلظت نیتروژن کل خاک نشان داد که در اثر کاربرد اسید هومیک در خاک، غلظت نیتروژن کل خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۵ ب). به‌طوری‌که این مقدار در تیمارهای HA_{20} و HA_{40} به‌ترتیب ۲۳/۳ و ۴۵/۸ درصد بیش‌تر از تیمار HA_0 به دست آمد. افزایش غلظت نیتروژن خاک در اثر افزودن اسید هومیک به خاک می‌تواند به‌دلیل غلظت نیتروژن اسید هومیک (۱/۰۴ درصد) و در نتیجه اضافه شدن نیتروژن آن به خاک باشد (Billingham, 2012).



شکل ۵. تأثیر تیمارهای سطوح مختلف آبیاری بر نیتروژن خاک (الف) وتاثیر تیمارهای سطوح مختلف اسید هومیک بر نیتروژن خاک (ب)

فسفر خاک

مطابق شکل ۶، نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آب آبیاری و کاربرد اسید هومیک نشان داد که در سطوح مختلف کاربرد اسید هومیک، با افزایش سطح آب آبیاری از L_{60} تا L_{120}، غلظت فسفر قابل استفاده خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. با این وجود غلظت فسفر خاک در تیمارهای HA_{20} و HA_{40} در سطوح آبیاری L_{80}، L_{100} و L_{120} از نظر معنی‌داری در یک سطح قرار داشتند. غلظت فسفر قابل استفاده خاک در $L_{80}HA_{20}$ و $L_{80}HA_{40}$ به‌ترتیب ۳۹/۷ و ۲۱/۸ درصد بیش‌تر از این مقدار در سطح آب آبیاری $L_{60}HA_{20}$ و $L_{60}HA_{40}$ بود. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد در اثر افزایش سطح آب آبیاری، تنفس میکروبی خاک افزایش یافت (شکل ۴ الف). بنابراین یکی دیگر از دلایل افزایش غلظت فسفر قابل استفاده خاک در اثر افزایش سطح آب آبیاری، می‌تواند افزایش فعالیت میکروبی خاک و در نتیجه افزایش معدنی شدن فسفر آلی خاک به‌ویژه در حضور گیاه و فعالیت ریشه گیاه باشد.



شکل ٦. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آبیاری و اسید هومیک بر غلظت فسفر خاک

با افزودن اسید هومیک در خاک غلظت فسفر به طور معنی‌داری افزایش یافت که احتمالاً اسید هیومیک با تحریک فعالیت میکروبی خاک توانسته است فسفر قابل استفاده در خاک را افزایش دهد. اسید هومیک همچنین می‌تواند به عنوان منبع فسفر عمل کند و فسفر موجود در ترکیب خود را که در اثر تجزیه آزاد شده است، در اختیار گیاه قرار دهد (Chen et al., 2019). یکی از دلایل افزایش فسفر قابل استفاده خاک در اثر کاربرد مواد آلی، می‌تواند به دلیل کاهش مکان‌های جذب فسفر در خاک باشد. مواد آلی می‌تواند با ترکیباتی که فسفر را جذب می‌کنند پیوند برقرار کرده و با کاهش مکان‌های جذب فسفر در خاک، غلظت قابل استفاده آن در خاک را افزایش دهد (Gao et al., 2019). به‌علاوه، در مطالعه حاضر، کاربرد اسید هومیک در خاک تنفس میکروبی خاک را افزایش داد. نتایج مطالعات مختلف نیز نشان داده که افزودن اصلاح کننده‌های آلی می‌توانند از طریق مکانیسم‌های مختلف، شیمی فسفر در خاک را تحت تأثیر قرار داده و فراهمی آن را در خاک افزایش دهند (صفیان و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین، اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم (حاصل از تجزیه مواد آلی)، از طریق ایجاد کلات با کلسیم، از رسوب فسفر به شکل آپاتیت جلوگیری می‌کنند.

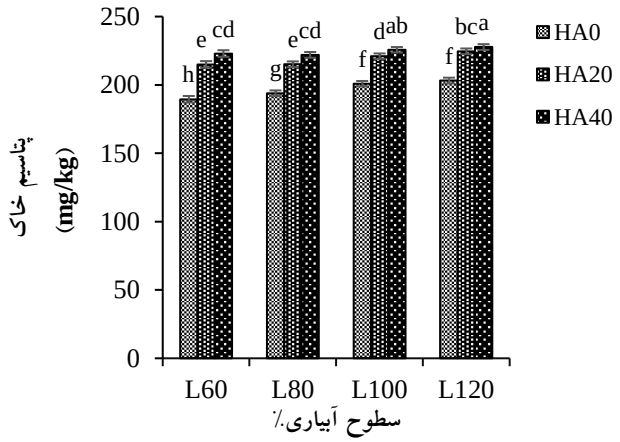
غلظت فسفر قابل استفاده خاک در $L_{80}HA_{20}$ و $L_{80}HA_{40}$ به‌ترتیب ۳۹/۷ و ۲۱/۸ درصد بیش‌تر از این مقدار در سطح آب آبیاری $L_{60}HA_{20}$ و $L_{60}HA_{40}$ بود. همچنین، نتایج نشان دهنده اثر مثبت کاربرد اسید هومیک بر غلظت فسفر قابل استفاده خاک است. اسید هومیک، تثبیت فسفر را از طریق تشکیل کلات کاهش می‌دهد و با کاهش اسیدیته خاک (به‌ویژه در خاک‌های آهکی مشابه پژوهش حاضر) و افزایش فعالیت میکروبی در افزایش دسترسی فسفر مؤثر می‌باشد (Sarir et al., 2006). اسید هومیک جذب یون‌های فسفات به ذرات خاک را کاهش و دفع آن‌ها را افزایش می‌دهد و در نتیجه فسفر را در محلول خاک افزایش می‌دهد (Zhu et al., 2018) نتایج پژوهش حاضر با نتایج (Harper et al., 2000) هم راستا بود. آن‌ها گزارش نمودند که اسید هومیک از طریق جلوگیری از تشکیل نمک نامحلول فسفات کلسیم سبب افزایش دسترسی به فسفر و کلسیم خاک می‌گردد. کاربرد اسید هومیک باعث افزایش فعالیت فسفاتاز توسط ریزجانداران‌های خاک و به دنبال آن باعث افزایش انحلال فسفر خاک می‌گردد (Sharma et al., 2013). بدین ترتیب در تمامی سطوح آب آبیاری، غلظت فسفر قابل استفاده خاک در تیمارهای حاوی اسید هومیک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار عدم کاربرد اسید هومیک بود. در تمامی سطوح آب آبیاری تأثیر تیمار HA_{40} در افزایش غلظت فسفر قابل استفاده خاک (۴۰/۴ تا ۹۷/۵ درصد)، بیش‌تر از تیمار HA_{20} (۲۷/۱ تا ۵۶/۵ درصد) بود. شیمی فسفر در خاک بسیار متأثر از غلظت کربنات کلسیم می‌باشد. خاک مورد مطالعه در پژوهش حاضر

یک خاک آهکی می‌باشد بنابراین غلظت فسفر قابل دسترس خاک کم می‌باشد و بخش زیادی از فسفر در سطح کانی‌های رسی و کربنات کلسیم قرار گرفته و از دسترس گیاه خارج می‌گردد (صفیان و همکاران، ۱۳۹۹). در تیمارهای حاوی اسید هومیک نیز فسفر قابل دسترس خاک بیشتر بود که تأثیر مستقیم اسید هومیک در افزایش حاصلخیزی خاک را نشان می‌دهد. اسید هومیک مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای غلظت زیادی از فسفر (۳۸/۳ گرم در کیلوگرم اسید هومیک) بود که با افزایش اسید هومیک، فسفر از ترکیب اسید هومیک آزاد شده و احتمالا در دسترس گیاه قرار گرفته است.

پتاسیم

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آب آبیاری و کاربرد اسید هومیک، نشان داد که در سطوح مختلف کاربرد اسید هومیک، با افزایش سطح آب آبیاری از L_{60} تا L_{100}، غلظت پتاسیم قابل استفاده خاک به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت. در حالی‌که با افزایش سطح آب آبیاری از L_{100} تا L_{120}، تغییر معنی‌داری در غلظت پتاسیم مشاهده نشد (شکل ۷). همانطور که مشاهده می‌شود، تیمارهای HA_{20} و HA_{40} نسبت به تیمار HA_0 توانسته‌اند غلظت پتاسیم را در شرایط تنش رطوبتی افزایش دهند. به‌طوری که غلظت پتاسیم قابل استفاده خاک در سطح آبیاری ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در تیمارهای HA_{20} و HA_{40} نسبت به تیمار HA_0 به ترتیب ۱۳/۵ و ۱۷/۶ درصد افزایش یافته است، در حالی که این مقادیر در سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد به ترتیب ۱۰/۰ و ۱۲ درصد می‌باشد (شکل ۷). بیشتر بودن فراهمی پتاسیم در تیمارهای سطح بالای آب آبیاری در مقایسه با سطوح پایین‌تر آن می‌تواند به این دلیل باشد که در اثر وجود مقدار رطوبت بیشتر، یون‌های یک ظرفیتی مانند پتاسیم در محلول خاک به طور نسبی بیشتر از یون‌های دوظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابند. اما با کاهش سطح رطوبت و خشک شدن خاک، کلوئیدهای رس با قدرت بیشتری پتاسیم را به سطح خود جذب کرده و سبب تثبیت آن می‌شوند و بدین ترتیب غلظت پتاسیم تبادلی خاک در تیمارهای با سطح رطوبتی بیشتر، در مقایسه با تیمارهای سطح رطوبتی کمتر، بیشتر خواهد شد (کافی و همکاران، ۱۳۸۸). به‌علاوه، فعالیت میکرو ارگانیسم‌ها از جمله ریزجانداران‌های حل‌کننده پتاسیم با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد، که خود عاملی برای افزایش پتاسیم قابل‌دسترس می‌باشد. همچنین احتمالاً فعالیت میکروبی بیشتر ریزجانداران خاک به‌ویژه ریزجانداران حل کننده پتاسیم در تیمارهای سطوح رطوبتی بالاتر، سبب افزایش فراهمی پتاسیم در این تیمارها شده است.

در تیمارهای حاوی اسید هومیک، پتاسیم قابل دسترس افزایش داشت. این نتایج را می‌توان به غلظت نسبتاً بالای پتاسیم در اسید هومیک (۲۵/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نسبت داد که با افزودن اسید هومیک به خاک، پتاسیم از ترکیب آن آزاد شده و در دسترس گیاه قرار گرفته است (Mindari et al., 2018). به‌علاوه اسید هومیک خود به عنوان منبع تغذیه‌ای برای ریزجانداران‌های خاک می‌باشد که با افزایش فعالیت ریزجانداران‌ها، احتمال آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی و ساختمانی در خاک افزایش می‌یابد.



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آبیاری و اسید هومیک بر غلظت پتاسیم خاک

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر تاثیر مثبت اسید هومیک بر بهبود پایداری ساختمان خاک، فعالیت آنزیمی، تنفس خاک، کاهش درصد تخریب خاکدانه‌ها و کاهش تنش خشکی در گیاه فلفل دلمه‌ای را نشان داد. علاوه بر آن یافته‌ها بیانگر این است که استفاده از اسید هومیک می‌تواند در

کاهش آب مورد نیاز محصول بسیار مؤثر باشد و به بهبود ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی خاک کمک شایانی کند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد اسید هومیک (به‌ویژه کاربرد مقدار بیشتر اسید هومیک در تیمار (HA_{40})) و مصرف کمتر آب آبیاری (L_{80}) بهبود ویژگی‌های فیزیکی و زیستی مانند افزایش فعالیت آنزیمی، تنفس، پایداری خاکدانه‌ها و کاهش درصد تخریب خاکدانه‌ها را در پی داشت. بنابراین با توجه به بحران شدید کم‌آبی در اکثر نقاط کشور ایران، با تکیه بر نتایج تحقیق حاضر، می‌توان کاربرد همزمان اسید هومیک و کم‌آبیاری را راهکاری ارزشمند برای افزایش شاخص‌های پایداری ساختمان خاک و صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری در نظر گرفت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

پورمنصور، سمانه؛ رزاقی، فاطمه؛ سپاسخواه، علیرضا و موسوی، سید علی اکبر (۱۳۹۸).کاربرد سطوح مختلف بیوچار و آبیاری بر رشد محصول .و اجزای محصول گیاه باقلا، علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۰(۲):۹۹-۸۹.

صفیان، مریم؛ متقیان، حمیدرضا و حسین پور، علیرضا (۱۳۹۹). بررسی برهمکنش بیوچار بقایای نیشکر و کود فسفر بر قابلیت استفاده فسفر طی زمان در یک خاک آهکی، پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران.

کافی، محمد؛ برزویی، اعظم؛ صالحی، معصومه؛ کمندی، علی؛ معصومی، علی؛و نباتی، جعفر (۱۳۸۸). فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، 502 صفحه.

REFERENCES

Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press, London, UK.

Amiołkowska, A., Buczkowska, H., & Thanoon, A. H. (2016). Effect of biological preparations on content of saccharides in sweet pepper fruits. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 15, 65- 75.

Arvidsson, J. & Bolenius, E. (2006). Effect of soil water content during primary tillage-laser measurements of soil surface changes. *Soil & Tillage Research*, 90, 222-229. doi:10.1016/j.still.2005.09.005.

Asik, B. A., Turan, M. A., Celic, H., & Katkat, A. V. (2009). Effects of humic substances on plant growth and mineral nutrients uptake of wheat (Triticum durum cv. Salihli) under conditions of salinity. *Asian Journal. Crop Science*, 1(2), 87-95. doi: 10.3923/ajcs.2009.87.95.

Asri, F. O., Demirtas, E. I., & Ari, N. (2015). Changes in fruit yield, quality and nutrient concentrations in response to soil humic acid applications in processing tomato. *Bulgarian. Journal of Agricultural Science,* 21, 585–591.

Bacilio, M., Moreno, M., & Bashan, Y. (2016). Mitigation of negative effects of progressive soil salinity gradients by application of humic acids and inoculation with *Pseudomonas stutzeri* in a salt-tolerant and a salt-susceptible pepper. *Applied Soil Ecology*, 107, 394-404. doi: 10.1016/j.apsoil.2016.04.012.

Bai, N., Zhang, H., Li, S., Zheng, X., Zhang, J., Zhang, H., Zhou, S., Sun, H., & Lv, W. (2019). Long-term effects of straw and straw-derived biochar on soil aggregation and fungal community in a rice–wheat rotation system. *PeerJ, 6*, e6171. doi: 10.7717/peerj.6171.

Bhati, J., Chaduvula, P. K., Kumar, S., & Rai, A. (2013). Phylogenetic analysis and secondary structure prediction for drought tolerant Cap binding proteins of plant species. *Indian journal of agricultural sciences*, 83(1), 21-5.

Biglouie, M. H., Assimi, M. H. & Akbarzadeh, A. (2010). Effect of water stress at different stages on quantity and quality traits of Virginia (flue cured) tobacco type. *Journal of Plant and Environment*, 2, 67-75. doi: 10.17221/163/2009-PSE.

Billingham, K. L. (2012). Humic products potential or presumption for agriculture? Can humic products improve my soil? Proceedings of the 27th Annual Conference of The Grassland Society of NSW. 43-50.

Blanco-Canqui, H., Lal, R., Post, W. M., Izurralde, R. C., & Owens, L. B. (2006). Soil structure parameters and organic carbon in no till corn with variable stover retention rates. *Soil Science*, 171, 468-482. doi:10.1016/j.still.2007.01.004.

Brennan R. F., Armour J. D., & Reuter, D. J. (1993). Diagnosis of zinc deficiency. In A.D. Robson (ed.) Zinc in Soils and Plants, P206. Springer, Netherlands. p. 167-181.

Burns R. G. (1982). Enzyme activity in soil location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biology and. Biochemistry*, 14, 423-428. doi:10.1007/978-94-011-0878-2_12.

Chen, X., Condron, L. M., Dunfield, K. E., Wakelin, S. A., & Chen, L. (2021). Impact of grassland afforestation with contrasting tree species on soil phosphorus fractions and alkaline phosphatase gene communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 159, 108274. doi:10.1016/j.soilbio.2021.108274.

Chen, Y., Shi, J., Tian, X., Jia, Z., Wang, S., Chen, J., & Zhu, W. (2019). Impact of dissolved organic matter on Zn extractability and transfer in calcareous soil with maize straw amendment. *Journal Soils Sediment*, 19(2), 774–784. https://doi.org/10.1007/s11368-018-2060-x.

Christenen, B. T., & Johnston, A. E. (1997). Soil organic matter and soil quality lessins learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted.p 157-159, In;E.G. Gregorich and M.R. Catrer, *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Healthm Elsevierm Amesterdam*, https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80045-1.

Dad, K., Nawaz, M., Hassan, R., Javed, K., Shaheen, A., Zhao, F., & Aurangzaib, M. (2021). Impact of biochar on the growth and physiology of tomato grown in the cadmium contaminated soil. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 34(2), 454-462. http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2021/34.2.454.462

Dada, O.A. & Ogunsesu, Y.O. (2016). Growth analysis and fruit yield of *Capsicum chinense*, Jacquin as influenced by compost applied as foliar spray and soil augmentation in Ibadan, southwestern Nigeria *Journal of Agriculture and Sustainability*, (9), 83-103.

Denaxa, N. K., Roussos, P. A., Damvakaris, T. & Stournaras, V. (2012). Comparative effects of exogenous glycine betaine, kaolin clay particles and Ambiol on photosynthesis, leaf sclerophylly indexes and heat load of olive cv. Chondrolia Chalkidikis under drought. *Scientia Horticulture*, 137, 87-94.doi:10.1016/j.scienta.2012.01.012.

Dursun, A., I. Guvenc & Turan, M. (2002). Effects of different levels of humic acid on seedling growth and macro and micronutrient contents of tomato and eggplant. *Acta Agrobotanica*, 56, 81-88. https://doi.org/10.5586/aa.2002.046.

Fan, H., Wang, X. W., Sun, X. & Li, Y. (2014). Effects of humic acid derived from sediments on growth, photosynthesis and chloroplast ultrastructure in chrysanthemum. *Scientia Horticulturae*, 177, 118-123.doi:10.1016/j.scienta.2014.05.010.

Emerson, W. W., (1977). Physical properties and structure. In: Soil factors and crop production in semi-arid environment. (ed: Russel J. S. - Greacen E. L.) University of Queensland Press p. 78-104.

Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., & Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164-173. http://dx.doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354.

Ganefianti, D. W., Fahrurrozi, F. & Armadi, Y. (2017). Hybrid performance testing of chilli pepper (Capsicum annum L.) for resistance to yellow leaf curl begomo virus growth in lowland environment. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 49(2), 171-191.

Gao, S., DeLuca, T. H., & Cleveland, C. C. (2019). Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: a meta-analysis. *Science of Total Environment*, 654, 463e472. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124.

Garcia, A. C., Santos, L. A., Izquierdo, F. G., Sperandio, M. V. L., Castro, R.N., & Berbara, R. L. L. (2012). Humic acids of vermicompost as an ecological pathway to increase resistance of rice seedlings to water stress. *African Journal of Biotechnology*, 47, 203-208. http://dx.doi.org/10.5897/AJB11.1960.

Garg, S. H., & Bahl G. S. (2008). Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soil. *Bioresource Technology*, 99, 5773-5777. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.063.

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. P 383-411, In: A. Klute (ed.), Methods of soil analysis, 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madision.

Guo, Y., Ma, Z., Ren, B., Zhao, B., Liu, P., & Zhang, J. (2022). Effects of humic acid added to controlled-release fertilizer on summer maize yield, nitrogen use efficiency and greenhouse gas emission. *Agriculture*, 12(4), 448. https://doi.org/10.3390/agriculture12040448

Hale, L., Curtis, D., Azeem, M., Montgomery, J., Crowley, D. E., & McGiffen, M. E. (2021). Influence of compost and biochar on soil biological properties under turfgrass supplied deficit irrigation. *Applied Soil Ecology*, 168. doi:10.1016/j.apsoil.2021.104134.

Harper S. M., Kerven G. L., Edwards D. G., & Ostatek-Boczynski, Z. (2000). Characterisation of fulvic and humic acids from leaves of Eucalyptus camaldulensis and from decomposed hay. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10), 1331-1336. doi:10.1016/S0038-0717(00)00021-3.

Hartwigsen, J. A., & Evans, M. R. (2000). Humic Acid Seed and Substrate Treatments Promote Seedling Root Development. *HortScience*, 35(7), 1231–1233. doi:10.21273/HORTSCI.35.7.1231.

Huisz, A., Toth, T., & Nemeth, T. (2009). Normalized stability index and mean weight diameter in a combined nitrogen fertilization x irrigation experiment on Hungarian *chernozem soil. Cereal Research Communications*, 37, 443-446. VIII. Alps-Adria Scientific Workshop Laboratory.*Royal Soc. Chem*, doi: 10.1556/443 CRC.37.2009.Suppl.3.

Kafi, M., Burzui, A., Salehi, M., Camandi, A., Masumi, A., & Nabati, A. (2009). Physiology of Environmental Stress in Plants. Publications University of Mashhad, 388 p. (In Persian).

Kemper, W. D. & Rosenau, K. (1986). Size distribution of aggregates. Pp: 425- 442. In: Klute, A. (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. ASA, Madison, WI.

Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P. C. & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Austraian Journal Science*, 4: 580-585.

Manas, D., Bandopadhyay, P. K., Chakravarty, A., Pal, S., & Bhattacharya, A. (2014). Effect of foliar application of humic acid, zinc and bo-ron on biochemical changes related to productivity of pungent pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plant Science*, 2(1), 53 – 66. doi:10.5897/AJPS2014.1155.

Mindari, W., Sasongko, P. E., Kusuma, Z., Syekhfani, S., & Aini, N. (2018,). Efficiency of various sources and doses of humic acid on physical and chemical properties of saline soil and growth and yield of rice. *The 9th International Conference on Global Resource Conservation (ICGRC) and AJI from Ritsumeikan University.* AIP Conf. Proc. 2019, 030001-1–030001-8; https://doi.org/10.1063/1.5061854.

Nahar, S., Sahoo, L. & Tanti, B. (2018). Screening of drought tolerant rice through morphophysiological and biochemical approaches. *Biotechnology Agriculture*, 17, 1878-2001. doi:10.1016/j.bcab.2018.06.002.

Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and. Biochem*istry, 34, 1527 1536. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8.

Nelson, D. W. & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, SSSA and ASA, Madison, WI. PP. 961-1010. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34.

Norazian, M. H., Nurul Asyiqin, Y., Amirah Fareeza, Y., Nurul Nasyitah, M. R. & Rashidi, O. (2019). Carotenoids of capsicum fruits: Pigment profile and health-promoting functional attributes. Antioxidants 8(10): 469. https://doi.org/10.3390%2Fantiox8100469. PMID: 31600964; PMCID: PMC6827103. (In Persian).

Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F. S. & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United.States. Department. of Agricultre. 939p.

Palma, J. M., Teran, F., Contreras-Ruiz, A., Rodriguez-Ruiz, M. & Corpas, F. J. (2020). Antioxidant profile of pepper (*Capsicum annuum* L.) fruits containing diverse levels of capsaicinoids. Antioxidants 9(9), 878. https://doi.org/10.3390/antiox9090878.

Paradikovic, N., Vinkovic, T., Vinkovic-Vrcek, I., Zuntar, I., Bojic, M. & Medic-Saric, M. (2011). Effect of natural biostimulants on yield and nutritional quality: An example of sweet yellow pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *Journal of the Science of Food Agriculture*, 91(12), 2146-2152. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.4431. https://doi.org/10.1002/jsfa.4431

Pascual, S. D., Ruggiero, C., & Barbieri. G. (2003). Physiological Responses of Pepper to Salinity and Drought. JASHS January 2003 vol. 128 no. 1 48-54. http://dx.doi.org/10.21273/JASHS.128.1.0048

Pourmansour, S., Razzaghi, F., Sepaskhah, A., & Moosavi, A. (2019). Wheat growth and yield investigation under different levels of biochar and deficit irrigation under greenhouse conditions, *Journal of and water irrigation*, 9(1), 15-28. doi: 10.22059/jwim.2019.278053.665.

Safari, Z. S., Ding, P., Juju Nakasha, J. & Yusof, S. F. (2020). Combining chitosan and vanillin to retain postharvest quality of tomato fruit during ambient temperature storage. *Coatings*, 10(12), 1222. https://doi.org/10.3390/coatings. (In Persian).

Safian, M., Motaghian, H., & Hosseinpur, A. (2020). Effects of sugarcane residue biochar and P fertilizer on P availability and its fractions in a calcareous clay loam soil .*15 th Iranian Soil Science Congress*.

Saif El-Deen, U. M., Ezzat A. S., & El-Morsy, A. H. A. (2011). Effect of phosphorus fertilizer rates andsalinity. Asian, *Journal of. Crop Science*, 1(2), 87-95.

Sardans, J., Penuelas, J., & Estiarte, M. (2006). Warming and drought alter soil phosphatase activity and soil P availability in a Mediterranean shrubland. *Plant and Soil*. 289, 227-238. doi:10.1007/s11104-006-9131-2.

Sarir, M., Durrani, M, I., & Mian, I. A. (2006). Effect of the source and rate of humic acid on phosphorus transformations. *Environmental*, 1 (1): 29-31.

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2, 587.

Shen, Y., Lin, H., Gao, W., & Li, M. (2020). The effects of humic acid urea and polyaspartic acid urea on reducing nitrogen loss compared with urea. *Journal of Science. Food Agriculture*, 100, 4425–4432. https://doi.org/10.1002/jsfa.10482.

Sheng, G. S., Fang-fang &. Tong, Z. (2014). Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol*). Catena*, 114: 17-44.doi:10.1016/j.catena.2013.10.014.

Tabatabai, M. A. (1982). Soil enzymes. PP. 539-579. IN: A. C. page (Ed.). Methods of soil analysis.Part 2. Am. Soc. Agron., Madison, WI, USA.

Tabatabai, M. A., & Bremner, J. M. (1969). Use of p-nitrophenylphosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1, 301-307.

Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L., & Hernandez, M. T. (2006). Use of organic amendment asa strategy for saline soil remediation; influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 1413-1421.

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil Acidity. In: sparks, D. L. (Ed). Methods of soil analysis. Part 3-Chemical Methods. *Soil Science*, Madison, WI. No. 5. pp: 475-490.

Tisdoll, M & Adem. H.H. (1986). Effect of type of seedbed, type of irrigation, and a mulch on seeding emergence, growth and yield of maize (Zea mays). *Ausraliant Journal of Experimental Agric*ulture, 26, 197-200.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38. p://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.

Wang, F., Tang, Y. A., Zhang, P. C., & Coffie, J. N. (2013). Effects of various organic materialon soil aggregate stabilityand soil microbiological properties on the Loess Plateau of China. *Plant Soil Environ*, 59.162-168. doi:10.17221/702/2012-PSE.

Zhang, Y., Zhu, G., Yin, L., Ma,L., Xu, C., & Chen, H. (2022).Optimal soil water content and temperature sensitivity differ among heterotrophic and autotrophic respiration from oasis agrecosystems. *Geoderma*, 425,116071. https://doi.org/10.1016/j.*Geoderma*.2022.116071.

Zhen, Z., Liu, H., Wang, N., Guo, L., Meng, J., Ding, N., Wu, G. & Jiang, G. (2014). Effects of manure compost application on soil microbial community diversity and soil micro environments in a temperate cropland in china. *Plos one*, 9 (10), e108555. https://doi.org/10.1371/.0108555.

Zhu, J., Li, M., & Whelan, M. (2018). Phosohorus activators contribute to legacy phosohorus availability in agricultural sois: a review. *Science of the total environment*, 612, 522-537. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095.

Investigating the application of humic acid and irrigation levels on some physical, chemical, and biological properties of the soil under bell pepper cultivation

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Humic substances are formed through the mineralization of plant and animal residues and through the biological activities of microorganisms. The humic acid (coloured recalcitrant organic compounds) application increases the soil porosity and the water use efficiency and reduces the moisture stress conditions for plant growth (Hal et al. 2021). Humic substances directly and indirectly have significant effects on plant growth. It also improves water and nutrient absorption (Moghbeli and Arvin, 2014). Humic substances are eco-friendly and they reduce the application of chemical fertilizers. On the other hand, drought is one of the most important abiotic stress factors that have a negative effect on the growth, metabolism, and performance of plants (Bhati et al. 2015). The first reaction of a plant to drought stress is growth reduction, during drought stress. This research aims to determine the effect of different amounts of humic acid to reduce the destructive effects of deficit irrigation on bell pepper production in greenhouse conditions.

Materials and Methods

A factorial-based experiment in a randomized complete design was carried out with three levels of humic-acid (0 (HA_0), 2 (HA_{20}), and 4 (HA_{40}) g per pot) and four irrigation levels (60 (L_{60}), 80 (L_{80}), 100 (L_{100}), 120 (L_{120}), (percent of soil moisture depletion) with three replications in the research greenhouse of Payam Noor Bojnourd University. To prepare the pots, the soil sample was passed through a 2 mm sieve and humic was added to the soil sample according to the experimental treatments. Two bell pepper seedlings were transferred to each pot and all pots were irrigated according to the experimental treatments. Eighty days after cultivation, plants were harvested and soil samples were air dried. Soil texture, soil pH, electrical conductivity (ECe), soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, soil urease, acidic and alkaline phosphatase, and soil microbial respiration were determined by conventional methods.

Results and Discussion

The aggregate stability (AS) increased with the increase of humic acid application and the irrigation level up to (L_{100}) and then decreased at the irrigation level of 120% (L_{120}) .The highest AS was observed in the $L_{100}H_{40}$ treatment, which was 2.04 percent higher than the $L_{60}HA_0$ treatment. In contrast, the maximum value of the aggregate destruction percentage (PAD) was observed in the $L_{60}HA_0$ treatment compared to the $L_{100}HA_{40}$ treatment. By increasing the amount of humic acid application and increasing the irrigation levels (up to L_{80}), the soil urease activity and alkaline and acid phosphatase increased and then their values decreased at L_{100} and L_{120} treatment, however, the activity of these enzymes was not significantly different. The highest soil urease and alkaline and acid phosphatase was observed with 678.98 (µg NH4+-N g-1 dry soil 2h-1, 845.54 and 30.671g-1 dry soil h-1) µg PNP) in L_{80} HA_0 treatment which were respectively 5.9, 2.8 and 6 times higher than the $L_{60}HA_0$) treatment. Based on the results, with increasing the humic acid application and the increase in irrigation levels up to L_{100}, respiration rates increased and then decreased in L_{120}, however, microbial activity and respiration in L_{80} and L_{100} were not significantly different. Therefore, the highest amount of respiration (3.77-2.74) was observed in $L_{100}HA_{40}$, which was on average 2.5 times higher than the $L_{60}HA_0$ treatment. Also, the comparison of the main effect of humic acid on total soil nitrogen concentration showed that due to the use of humic acid in the soil, the concentration of total soil nitrogen increased significantly. The results also showed the positive effect of the humic acid application on the soil's available phosphorus concentration. Thus, at all levels of irrigation water, the concentration of soil available phosphorus in the treatments containing humic acid was significantly higher than in the treatment without humic acid. Also, available potassium increased in treatments containing humic acid. These results can be attributed to the relatively high concentration of potassium in humic acid (25.7 mg/kg) by adding humic acid to the soil.

Conclusion

The highest activity of soil urease, alkaline and acid phosphatase enzymes was observed in the $L_{80}H_{40}$ treatment. Nevertheless, the amount of moisture required for maximum stability of soil accumulation (AS) and minimum PAD was obtained in the L_{100} treatment. In general, better absorption of nutrients and plant growth and crop production were observed in HA_{40} treatment with an 80% soil moisture level. It seems that the use of humic acid can be very effective in reducing the water requirement and it helps to improve the activity of microorganisms and increase the soil stability indexes.

Keywords: Alkaline and Acid Phosphatase Enzymes, Soil Urease, Aggregate Stability, Soil Enzyme Activity.