

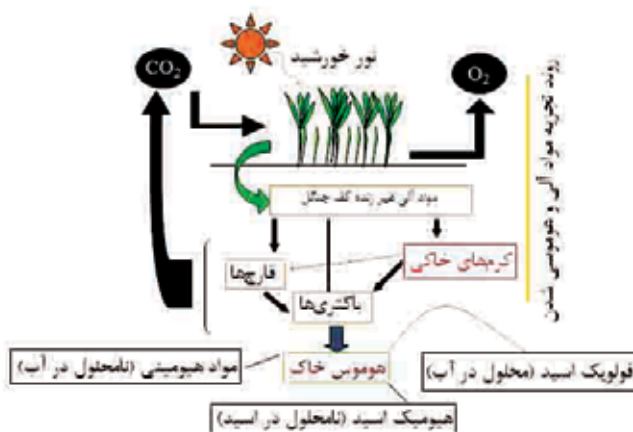


سیستم‌های هوموس جنگلی: شناسایی، طبقه‌بندی و نقش آن‌ها در ذخیره‌سازی کربن خاک

محمد بیرانوند^{۱*}

مقدمه

ماده آلی، به‌عنوان جزء حیاتی خاک سطحی، نقشی تعیین‌کننده در پایداری ساختار، ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و حاصلخیزی خاک ایفا می‌کند (Zanella, Bayranvand et al., 2018; Ponge et al., 2014; et al., 2019). هوموس که از تجمع و تجزیه بقایای گیاهی (مانند برگ و چوب) در افق‌های سطحی تشکیل می‌شود، فرایند معدنی‌شدن و چرخه عناصر غذایی را مدیریت می‌کند و مخزنی مهم برای کربن محسوب می‌شود (Bayranvand et al., 2017; Kosunen et al., 2026). ترکیب شیمیایی متفاوت لاش‌برگ گونه‌های مختلف گیاهی، نرخ آزادسازی مواد مغذی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ساختار بستر جنگل را متمایز می‌سازد (Chertov & Nadporozhs-, Thomas et al., 2018; al., 2025). اشکال هوموس (نظیر مول، مودر، مور، آمفی و تانجل) الگوهای مرفولوژیکی از تعامل مواد آلی و معدنی هستند که به‌عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی سلامت اکوسیستم و پویایی زیست‌بوم خاکی شناخته می‌شوند (Wachendorf et al., 2019; Zanella et al., 2023). این اشکال با فراهم‌سازی بستری برای فعالیت میکروبی، تعدیل دما، هوادهی و تسهیل ریشه‌دوانی، به‌طور مستقیم بر باروری و حفظ رطوبت خاک تأثیر می‌گذارند (Trap et al., 2013; Yakovenko et al., 2025; Bayranvand et al., 2021). باتوجه‌به نقش هوموس در چرخه جهانی کربن و حفظ تنوع زیستی، طبقه‌بندی دقیق این فرم‌ها برای درک دقیق عملکردهای اکوسیستمی ضروری است (Bayranvand et al., 2018; Waez-Mousavi, 2018).



شکل ۱- تعامل عوامل مختلف در شکل‌گیری هوموس خاکی

تاریخچه مطالعه هوموس

تاریخچه طبقه‌بندی هوموس به قرن نوزدهم و تحقیقات مولر (۱۸۸۴، ۱۸۸۹) بازمی‌گردد، درواقع مطالعات او منجر به توسعه سیستم‌های استاندارد شد و بسیاری از سیستم‌های کانادایی و اروپایی از مفاهیم او الهام گرفتند (Green et al., 1993; Zanella et al., 2019; Ponge et al., 2014). مولر (۱۸۸۶) همچنین هوموس مول و تورف را شناسایی کرد و سپس Brethes و همکاران (۱۹۹۵) طبقه‌بندی جامعی ارائه دادند. با نیاز به رویکرد جهانی، سیستمی واحد در سال ۲۰۰۵ در ایتالیا

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران. پست الکترونیک: m.bayranvand@gmail.com



تدوین شد که تانجل و آمفی را نیز دربرمی‌گرفت (Zanel-*et al.*, 2009). تحقیقات اخیر Zanelle و همکاران (۲۰۱۹، ۲۰۱۳) و دیگران (Ponge، Jabiol *et al.*, 2013) (۲۰۱۹، ۲۰۱۴) منجر به طبقه‌بندی‌های جدیدی شده است، اما سیستم اروپایی Zanelle و همکاران (۲۰۱۹) معروف به هوموسیکا به دلیل کاربرد جهانی برجسته شده است.

ساختار شیمیایی هوموس و اجزای آن

مواد آلی به دو دسته مواد آلی تازه و مواد هوموسی تقسیم می‌شوند، مواد هوموسی خود شامل اسیدهومیک (محلول در باز، نامحلول در اسید)، اسیدفولیک (محلول در هر دو) و مواد هومین (نامحلول در هر دو) است، این ترکیبات دارای مشخصات شیمیایی ثابتی نیستند و قابلیت تبدیل به یکدیگر را دارند (Zanelle، Ponge *et al.*, 2014) (et al., 2018).

مشخصه‌های ریختی افق‌های آلی و آلی- معدنی هوموس

افق‌های آلی خاک (OL، OF، OH) که به دلیل محتوای کربن آلی بیش از ۲۰ درصد وزن خشک و ضخامت مشخص (حداقل ۳ میلی‌متر) شناخته می‌شوند، بستر اصلی چرخه عناصر غذایی در سطح خاک هستند. این افق‌ها براساس میزان تجزیه مواد آلی و فعالیت بیولوژیکی تفکیک شده‌اند و مرز میان آن‌ها (بسیار سریع تا تدریجی) ابزاری کلیدی در طبقه‌بندی فرم‌های هوموس محسوب می‌شود (Zanelle *et al.*, 2019؛ Ponge *et al.*, 2014؛ et al., 2011). افق OL اغلب از بقایای گیاهی تازه (برگ و چوب) با کمترین میزان

هوموس (>۱۰ درصد) تشکیل شده است و به زیرواحدهای OLn (جدید) و OLv (قدیمی) تقسیم می‌شود. افق OF نشان‌دهنده مرحله تخمیر ناقص با ۱۰ تا ۷۰ درصد مواد هومیکی است که دو وضعیت متمایز را نشان می‌دهد: در افق OFzo، فعالیت شدید جانوران خاک‌زی (به‌ویژه کرم‌های خاکی) منجر به تجزیه سریع می‌شود، درحالی‌که افق OFnoz تحت سلطه قارچ‌هاست و معمولاً در شرایط محیطی محدودکننده (pH پایین)، اقلیم سرد یا خشک مشاهده می‌شود (Zanelle *et al.*, 2011؛ Zanelle *et al.*, 2013؛ Jabiol *et al.*, 2013). در نهایت، افق OH با تجزیه پیشرفته و تجمع بیش از ۷۰ درصد مواد هومیکی، رنگ‌های تیره و فعالیت زیستی بالا مشخص می‌شود (Yakovenko *et al.*, 2025؛ Ponge *et al.*, 2014).

افق‌های A براساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی می‌شوند و به دو دسته اصلی زئوجنیک (Azo) با فعالیت بیولوژیکی بالا و نون- زئوجنیک (Anoz) با فعالیت بیولوژیکی کم تقسیم می‌شوند. افق‌های زئوجنیک شامل maA، meA و miA هستند که براساس عواملی چون اندازه خاک‌دانه‌ها، میزان فضولات کرم خاکی و pH متمایز می‌شوند. افق‌های نون- زئوجنیک نیز شامل sGA و mSA هستند که با ویژگی‌هایی مانند بافت، هوادهی، چسبندگی و میزان مواد آلی و pH شناخته می‌شوند. برای طبقه‌بندی دقیق‌تر، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی توصیه می‌شود (Zanelle *et al.*, 2011؛ Jabiol *et al.*, 2013؛ Zanelle *et al.*, 2019).

معرفی طبقه‌بندی کانادایی

در اکوسیستم‌های جنگلی بریتیش کلمبیا، سیستم طبقه‌بندی هوموس



شکل ۲- نیم‌رخ پروفیل هوموس جنگلی و لایه‌های قابل تشخیص

نشان می‌دهد و سطح دوم این طبقه‌بندی را در بخش‌های خاکی و نیمه‌خاکی به تصویر می‌کشد. در این طبقه‌بندی، فرم‌های تروفوم و هیستوفرم به گروه‌های متعددی گسترش یافته‌اند و فرم تروفوم در سمت چپ نمودار قرار گرفته است (Zanella et al., 2019).

شناسایی و تقسیم‌بندی فرم‌های هوموس خاک‌زی

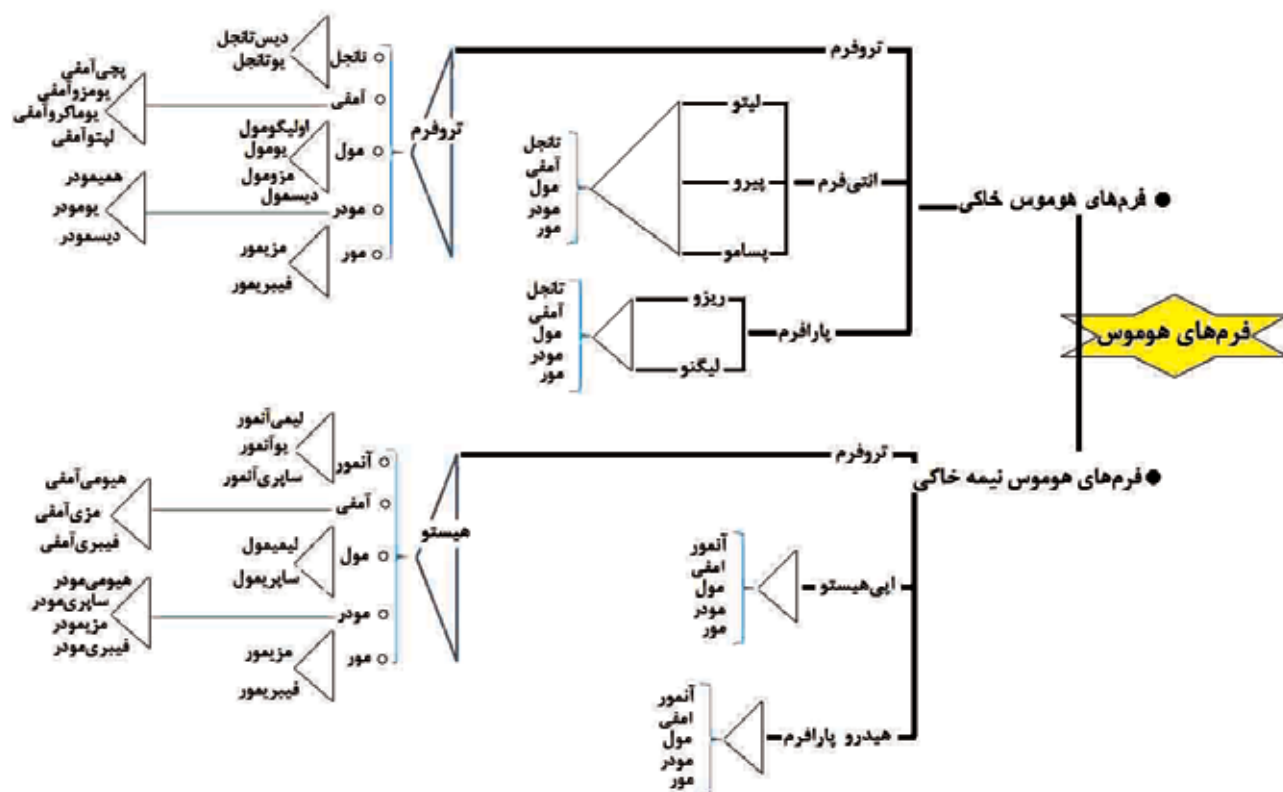
شناسایی فرم‌های هوموس به‌عنوان شاخص‌های عملکردی اکوسیستم، براساس استقرار در محیط و ویژگی‌های مرفولوژیکی انجام می‌شود. این فرم‌ها در سه گروه کلی تروفوم، انتی‌فرم و پارافرم دسته‌بندی می‌شوند. تروفورها که تحت تأثیر اقلیم و پوشش گیاهی قرار دارند و بر بسترهای غیرسخت مستقرند، فراوان‌ترین گروه در جنگل‌های معتدله با زهکشی مناسب هستند و شامل پنج فرم اصلی مول، مودر، مور، آمفی و تانجل می‌شوند (Zanella et al., 2019). در مقابل، انتی‌فرم‌ها به دلیل قرارگیری بر مواد اولیه سخت و ضخامت اندک افق‌های آلی و آلی-معدنی و پارافرم‌ها به دلیل شرایط شبه‌ماندابی ناشی از بقایای چوبی و ریشه‌ای، در اکوسیستم‌های جنگلی کلاسیک کمتر مشاهده می‌شوند (Ponge et al., 2012; Ascher et al., 2012).

طبقه‌بندی تروفورها بر مبنای توالی افق‌های OF ، OH ، A ، OL و فعالیت بیولوژیکی (به‌ویژه کرم‌های خاکی) به شرح زیر است:
۱- مول (Mull): شاخص آن فقدان لایه OH ، وجود افق A از نوع

براساس ویژگی‌های مرفولوژیکی مانند ضخامت، ترکیب، فیزی بودن، رنگ افق‌ها، همچنین فلورا و فون بنا شده است. این سیستم شامل ۳ رده و ۱۶ گروه است که هر گروه براساس ویژگی‌های پروفیل فرم هوموس و ترتیب افق‌های اصلی و فرعی تعریف می‌شود. رده‌ها باوجود افق F یا A متمایز می‌شوند و تفاوت‌های عمده در نوع و مقدار تجزیه را بازتاب می‌دهند (Green et al., 1993).

معرفی طبقه‌بندی‌های جدید اروپایی

طبقه‌بندی اروپایی فرم‌های هوموس، یک نظام مرفولوژیکی-عملکردی است که به‌عنوان مرجع جهانی برای شناسایی فرم‌های هوموس عمل می‌کند (Ponge et al., 2013; Jabiol et al., 2013). این نظام که بازتاب‌دهنده دانش پژوهشگران اروپایی درباره انواع هوموس خاکی و نیمه‌خاکی است، بر پایه ۶ رده اصلی و ۳۱ گروه هوموس تدوین شده است (Zanella et al., 2011; et al., 2018). در اکوسیستم‌های مختلف، با افزایش فعالیت‌های بیولوژیکی، ضخامت فرم‌های هوموس کاهش می‌یابد. فرم‌های هوموس مول، مودر، آمفی و مور هم در محیط‌های خاکی و هم نیمه‌خاکی یافت می‌شوند، درحالی‌که فرم تانجل تنها در اکوسیستم‌های خاکی و فرم آنمور فقط در اکوسیستم‌های نیمه‌خاکی وجود دارد (Zanella et al., 2019; Jabiol et al., 2013). شکل ۳، طبقه‌بندی فرم‌های هوموس را براساس طبقه‌بندی محققان اروپایی



شکل ۳- طبقه‌بندی فرم‌های هوموس بر مبنای طبقه‌بندی محققان اروپایی



بیوماکرو (با فعالیت بالای کرم‌های خاکی) و لایه انتقالی بسیار نازک (>3 میلی‌متر) با pH حداقل ۵ است.

۲- مودر (Moder): با وجود لایه OH، نبود لایه‌های بیوماکرو در افق A، لایه انتقالی ضخیم‌تر (≤ 5 میلی‌متر) و (pH اسیدی‌تر) در لایه Ah کمتر از ۵ متمایز می‌شود.

۳- آمفی (Amphi): فرمی حدواسط که با حضور هم‌زمان افق‌های OH و A ضخامت A بیشتر از نصف OH، نفوذپذیری پایین و حضور کرم‌های خاکی با pH لایه $A \geq 5$ تعریف می‌شود.

۴- مور (Mor): فرمی با تجزیه بسیار کند است که فقدان فعالیت کرم‌های خاکی، افق OFnoz ضخیم، لایه H بسیار حجیم و pH به نسبت اسیدی از ویژگی‌های بارز آن است.

۵- تانجل (Tangel): فرم هوموسی است که در اقلیم‌های سرد و با تجزیه پایین شکل می‌گیرد. مجموع ضخامت لایه‌های OFzo و OH باید بیش از ۵ سانتی‌متر باشد، لایه A نازک‌تر از لایه H و pH آن ≤ 5 است. وجود سنگ آهک سخت در زیرپروفیل انتظار می‌رود.

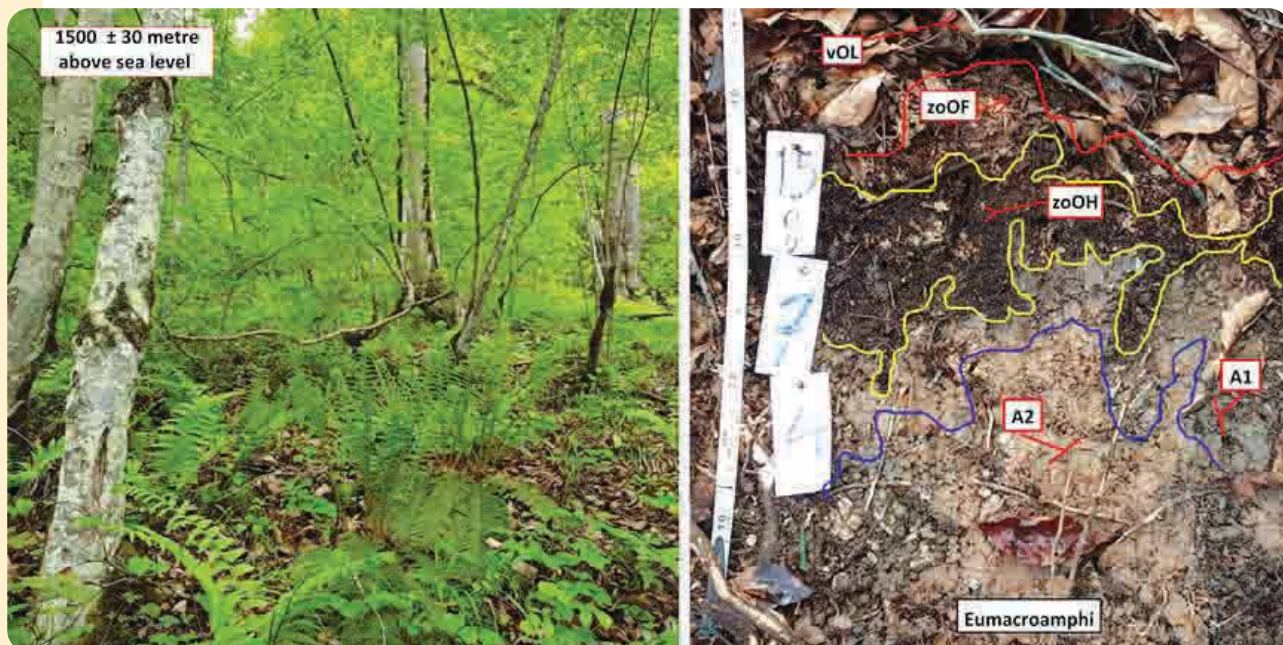
این طبقه‌بندی مرفولوژیکی، ابزاری دقیق برای تحلیل دینامیک ماده آلی، نرخ تجزیه و سلامت اکوسیستم‌های جنگلی فراهم می‌آورد.

سوابق تحقیق در خارج و داخل کشور

مطالعات نشان می‌دهند، فرم‌های هوموس، که شاخص مهمی برای ارزیابی کیفیت خاک و ذخیره‌سازی کربن هستند (Ascher et al., 2012)، تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله تیپ درختی، مواد گیاهی، اقلیم، خصوصیات خاک و فعالیت زیستی قرار دارند. مطالعات در جنگل‌های مختلف، اثرهای متفاوتی را از گونه‌های درختی بر ذخیره کربن نشان داده‌اند، برای مثال، بلوط کربن بیشتری نسبت به راش ذخیره می‌کند (Schulp et al., 2008) و در جنگل‌های

چک، نوئل بیشترین مواد آلی و راش کمترین مقدار را دارد (Fabi-ane et al., 2009). نوع هوموس نیز با فلور گیاهی مرتبط است (Svensson et al., 2022)، گونه‌های ازت‌دوست با مول و گونه‌های اسیددوست با مودر همراه هستند (Bayranvand et al., 2017, 2015). با افزایش سن درختان، تنوع میکروبی افزایش و نوع هوموس از مول به مودر تغییر می‌کند (Trab et al., 2011). در مقیاس بزرگ، اقلیم و زمین‌شناسی نقش غالب‌تری نسبت به پوشش درختی دارند (Ponge et al., 2014). در شمال ایران، فرم‌های هوموس تحت تأثیر نوع جنگل، ترکیب گونه‌ای و توپوگرافی قرار دارند، فرم‌های مول و مودر در جنگل‌های راش شایع هستند و هوموس مول بازگشت سریع عناصر را نشان می‌دهد (Waez-Mousavi & Habashi, 2012). ارتفاع، عامل مهمی در پراکنش هوموس است و فرم‌های مول و آمفی فراوانی بیشتری دارند، که با حاصلخیزی بالاتر خاک (نیترژن، pH، زیست‌توده میکروبی) همراه است (Bayranvand et al., 2017, 2018, 2021). این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن عوامل مختلف برای مدیریت فرم‌های هوموس و کربن خاک تأکید دارند (Zanella et al., 2019; Kukul's et al., 2020).

معرفی لایه‌ها: nOL: لاش‌برگ‌های تازه افتاده، VOL: لاش‌برگ‌های قدیمی بین یک ماه تا سه ماه، zoOF: لاش‌برگ‌های قطعه‌قطعه‌شده با فعالیت موجودات خاکی (مواد هیومیکی کمتر از ۷۰ درصد حجم لایه، zoOH: لایه تیره هوموسی‌شده (مواد هیومیکی بیشتر از ۷۰ درصد حجم لایه با حضور موجودات زنده)، Transition O/A: لایه انتقال بین لایه‌های آلی و معدنی، maA: لایه آلی - معدنی



شکل ۴- نیم‌رخ فرم هوموس ایوپیجی آمفی در رانشستان‌های شمال ایران (Bayranvand et al., 2021)

جدول ۱- طبقه‌بندی فرم‌های هوموس و مشخصات آن‌ها در طول گرادیان ارتفاعی جنگل‌های شمال ایران (Bayranvand et al., 2021)

لایه‌های تشخیص	سیستم‌ها و فرم‌های هوموس شناسایی و طبقه‌بندی شده در گرادیان ارتفاعی شمال ایران									
	Mull			Rhizo Mull			Amphi			
	Eu	Meso	Oligo	Rhizo Mesomull	Rhizo Oligomull	Rhizo Dysmull	Lepto	Eumacro	Eumeso	Pachy
nOL	disc pock								disc pock	disc pock
vOL		disc pock		disc pock						
zoOF			disc pock		disc pock					
zoOH							1mm ≥	mm 1 ≤	mm 3 >	mm 3 ≤
Transition O/A	3 > mm	3 > mm	3 > mm	mm 3 >	mm 3 >	mm 3 >	5 > mm	mm 5 >	mm 5 ≤	mm 5 ≤
maA										
meA			or							
rhiA										

تعاملات پیچیده بیولوژیکی و اکولوژیکی هستند. ترکیب این فرم‌ها شامل بقایای گیاهی، جانوری و مولکول‌های آلی است که بسته به شرایط محیطی و زمان تکامل می‌یابند. نتایج نشان می‌دهند، با افزایش عمق پروفیل خاک، میزان کربن آلی و نسبت کربن به نیتروژن کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که افق‌های سطحی (OL، OF) غنی از مواد تازه و افق‌های عمیق‌تر (OH، A) حاوی مواد تجزیه‌شده پایدارتر هستند. درنهایت، نرخ تجزیه بیولوژیکی در لایه‌های سطحی، تعیین‌کننده توازن کربن و میزان انتشار آن به اتمسفر است، بنابراین، شناخت دقیق‌تر این سیستم‌ها برای مدیریت پایدار کربن خاک ضروری است.

منابع

- بیرانوند، م.، اکبری‌نیا، م.، صالحی‌جوزانی، غ.ر.، قره‌چایی، ج. و کوچ، ی.، ۱۳۹۸. تغییرپذیری اشکال هوموس در رابطه با عوامل اکولوژیکی پوشش گیاهی و خاک در طبقات مختلف ارتفاعی. مجله جنگل ایران، ۱۱ (۳): ۳۴۶-۳۳۵.
- بیرانوند، م.، اکبری‌نیا، م.، صالحی‌جوزانی، غ.ر.، قره‌چایی، ج. و کوچ، ی.، ۱۴۰۰. ارزیابی شاخص هوموس (Humus Index) در رابطه با متغیرهای پوشش جنگلی و گرادیان ارتفاعی. بوم‌شناسی جنگل‌های ایران، ۹ (۱۸): ۱۶۹-۱۷۸.
- Ascher, J., Sartori, G., Graefe, U., Thornton, B., Ceccherini, M.T., Pietramellara, G. and Egli, M., 2012. Are humus forms, mesofauna and microflora in subalpine forest soils sensitive to thermal conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 48: 709-725.
- Bayranvand, M., 2015. Analysis of Morpho-Functional Structure of Humus Forms in Relation to Tree Ecological Groups. The of M. Sc. in forest science. Tarbiat Modares University, 153.
- Bayranvand, M., Akbarinia, M., Salehi Jouzani, G., Gharechahi, J. and Alberti, G., 2021. Dynamics of humus forms and soil characteristics along a forest altitudinal gradient in Hyrcanian forest. *iForest* 14: 26-33.
- Bayranvand, M., Kooch, Y. and Alberti, G., 2018. Classification

با ساختار ماکرو یا خاک‌دانه‌های درشت (خاک‌دانه‌ها بیشتر از ۴ میلی‌متر از همدیگر فاصله دارند، خانه‌های خالی و بدون رنگ یعنی عدم حضور لایه، disc pock: لایه‌های با ضخامت کم و ناپیوسته، خانه‌های با رنگ کامل یعنی لایه به‌طور پیوسته و ضخیم وجود دارد.

هوموس و نقش آن‌ها در ذخیره‌سازی کربن خاک‌های جنگلی

در خاک‌های جنگلی، فرم‌های هوموس نقش حیاتی در کیفیت، حاصلخیزی و ذخیره‌سازی کربن دارند (Kukulş et al., 2020). این فرم‌ها که بیانگر درجات مختلف تجزیه و انباشت مواد آلی هستند (WANG, 2026)، شامل طیفی از مول (تجزیه کامل و پایدار) تا مور (تجزیه ناقص و کمتر پایدار) می‌شوند، که فرم مودر حالت بینابین این دو را نشان می‌دهد (Trap et al., Vesterdal et al., 2008؛ Bayranvand et al., 2019؛ 2013). تشکیل این فرم‌ها تحت تأثیر عواملی چون پوشش گیاهی، اقلیم، فعالیت بیولوژیکی و توپوگرافی است و به تولید مقادیر قابل‌توجهی ماده آلی از بقایای گیاهی و جانوری منجر می‌شود (Bayranvand et al., Gael et al., 2020؛ 2021). توانایی هوموس در تبدیل کربن اتمسفری به ترکیبات آلی پایدار، آن را به مخزنی بزرگ برای کربن تبدیل می‌کند و مانع انتشار آن به اتمسفر می‌شود (Kukulş et al., 2020). بنابراین، مدیریت پایدار جنگل با حفظ تنوع فرم‌های هوموس و فعالیت‌های بیولوژیکی، به افزایش ترسیب کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند و درک این دینامیک‌ها برای پیش‌بینی واکنش اکوسیستم‌ها به تغییرات اقلیمی ضروری است (Kosunen et al., 2026؛ WANG, 2026).

نتیجه‌گیری

فرم‌های هوموس به‌عنوان مخازن حیاتی کربن آلی خاک، حاصل



- organic carbon storage in Chernozems of the low-intensity land use of steppe zone of Ukraine. *Geoderma Regional*, e00988.
- Zanella, A., Jabiol, B., Ponge, J. F., Sartori, G., De, Waal, R., Van Delft, B. and Englisch M., 2011. A European morpho-functional classification of humus forms. *Geoderma*, 164: 138 -145.
- Zanella, A., Jabiol, B., Ponge, J.F., Sartori, G., De Waal, R., Van Delft, B. and Brêthes A., 2009. Toward European humus forms reference base. *Studi Trentini di Scienze Naturali*, 85: 145-151.
- Zanella, A., Katzensteiner, K., Ponge, J.F., Jabiol, B., Sartori, G., Kolb, E., Le Bayon, R.C., Aubert, M., Ascher-Jenuill, J., Englisch, M. and Hager, H., 2019. TerrHum: an iOS application for classifying terrestrial humipedons and some considerations about soil classification. *Soil Science Society of America Journal*, 83 (1): 42-48.
- Zanella, A., Ponge, J.F., Jabiol, B., Sartori, G., Kolb, E., Le Bayon, R.C., Gobat, J.M., Aubert, M., De Waal, R., Van Delft, B. and Vacca, A., 2018. Humusica 1, article 5: Terrestrial humus systems and forms—Keys of classification of humus systems and forms. *Applied Soil Ecology*, 122: 75-86.
- of humus forms in Caspian Hyrcanian mixed forests ecoregion (Iran): Comparison between two classification methods. *Catena*, 165:390-397.
- Bayranvand, M., Kooch, Y., Hosseini, S.M. and Alberti, G., 2017. Humus forms in relation to altitude and forest type in the Northern mountainous regions of Iran. *Forest ecology and management*, 385: 78-86.
- Chertov, O.G. and Nadporozhskaya, M.A., 2018. Humus forms in forest soils: concepts and classifications. *Eurasian Soil Science*, 51(10): 1142-1153.
- Gael, M.O.R., Neil-Yohan, M. and Michel, M.M., 2022. Tropical Soil Humus. In *Humus and Humic Substances-Recent Advances*. IntechOpen.
- Green, R.N., Trowbridge, R.L. and Klinka, K., 1993. Towards a taxonomic classification of humus forms. *Forest Science*, 39 (Supplement 28), a0001-z0002.
- Jabiol, B., Zanella, A., Ponge, J.F., Sartori, G., Englisch, M., Van Delft, B., de Waal, R. and Le Bayon, R.C., 2013. A proposal for including humus forms in the World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO). *Geoderma*, 192: 286-294.
- Kosunen, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P. and Karhu, K., 2026. Effects of *Ips typographus* (L.) and sanitation logging disturbance on organic matter decomposition and carbon in the humus layer in boreal *Picea abies* (L.) H. Karst. stands. *Annals of Forest Science*, 83(1): 10.
- Kukuļs, I., Nikodemus, O., Kasparinskis, R. and Žigūre, Z., 2020. Humus forms, carbon stock and properties of soil organic matter in forests formed on dry mineral soils in Latvia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 69(2).
- Ponge, J.F., Sartori, G., Garlato, A., Ungaro, F., Zanella, A., Jabiol, B. and Obber, S., 2014. The impact of parent material, climate, soil type and vegetation on Venetian forest humus forms: a direct gradient approach. *Geoderma*, 226: 290-299.
- Svensson, T., Redon, P. O., Thiry, Y., Montelius, M. and Bastviken, D., 2022. Chlorination of soil organic matter: The role of humus type and land use. *Science of the Total Environment*, 806: 150478.
- Thomas, F., Becker, C., Petzold, R., Schmidt, K., Scholten, T. and Werban, U., 2025. Integrated framework for assessment and spatial prediction of humus layer properties of forest soils. *Discover Soil*, 2(1): 49.
- Trap, J., Hättenschwiler, S., Gattin, I. and Aubert, M., 2013. Forest ageing: An unexpected driver of beech leaf litter quality variability in European forests with strong consequences on soil processes. *Forest Ecology and Management*, 302: 338-345.
- Wachendorf, C., Frank, T., Broll, G., Beylich, A. and Milbert, G., 2023. A concept for a consolidated humus form description—an updated version of German humus form systematics. *International Journal of Plant Biology*, 14(3): 658-686.
- Waez-Mousavi, S.M. and Habashi, H., 2012. Evaluating humus forms variation in an unmanaged mixed beech forest using two different classification methods. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 5: 272-275.
- Waez-Mousavi, S.M., 2018. Humus systems in the Caspian Hyrcanian temperate forests. *Applied Soil Ecology* 123: 664-667.
- WANG, K., 2026. Long-term tillage and straw returning practices enhance soil humus composition, carbon sequestration, and ecological-economic benefits. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 50(2): 242-261.
- Yakovenko, V., Gorban, V., Kotovych, O., Didur, O. and Poleva, J., 2025. Humus forms, earthworm bioturbation and soil