



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources



## Determination of new soil hydromorphic index (SHI) using micromorphological data for aquic soils in the north of Iran

Alireza Raheb<sup>\*1</sup>, Ahmad Heidari<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [araheb@ut.ac.ir](mailto:araheb@ut.ac.ir)

2. Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [ahaidari@ut.ac.ir](mailto:ahaidari@ut.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Full Length Research Paper

#### Article history:

Received: 11.13.2021

Revised: 05.15.2022

Accepted: 05.22.2022

#### Keywords:

Aquic condition,  
Hydromorphic index,  
Image analysis,  
Micromorphological  
properties

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Microscopic techniques provide invaluable information about soil genesis and also physicochemical and morphological properties of undisturbed natural soil structure. Determination of micromorphological indices is an advanced method of quantifying soil properties and increasing the accuracy of morphological and micromorphological studies. At present, there are no quantitative criteria in the American soil classification system to determine the classification of soils with an aquic moisture regime or with aquic conditions; so that there is no distinction between saturated soils and their reduction due to high groundwater and soils which saturation and reduction due to water infiltration from the soil surface is temporarily saturated only in the upper horizons. To prevent this problem, the general purpose of this research is to use micromorphology and image analysis in order to manage soil resources through the correct identification of soils with aquic conditions. In addition to the specific purpose, a new hydromorphic index (SHI) for soil evolution in aquic conditions based on micromorphological features was proposed.

**Materials and Methods:** To do this research and determine the micromorphological index of soil hydromorphic properties, after preparing intact samples from different horizons of the studied profiles (six control pedons with aquic conditions from northern Iran), their thin sections were prepared. In the following, thin sections were prepared and analyzed using a polarizing microscope. To determine the soil hydromorphic index (SHI) for aquic soils the following steps were then performed in the following order: 1-Preparation of thin sections, 2-Study of the micromorphological properties, 3-Preparation of necessary images, 4- Image analysis and quantification of micromorphological parameters, 5- Score attributes between 0 and 100 points and 6-Calculation of soil hydromorphic index (SHI).

**Results:** The obtained hydromorphic index was correlated with microstructure, fine soil materials, birefringence fabric, organic materials, hydromorphic features and mineral alteration. This index can be useful for correlation of soils with aquic horizons formed on different landscape units. The results showed that the hydromorphic index varied from very high values in paddy soils under aquic moisture regime to very low values in non-paddy soils under kiwifruit cultivation. In paddy soils under aquic moisture regime, SHI values increased with soil depth and its maximum was seen in deeper horizons, whereas in non-paddy soils, the relationship between SHI and soil depth was unclear.

---

**Conclusion:** The defined hydromorphic index in soils under aquic moisture regime was more than 0.35 and in the soil taxonomy keys were in the aquic soils class. In contrast, soils with a hydromorphic index of less than 0.35 are found in soils that have only aquic conditions. Finally, many of the problems that exist in the American Soil Classification System in distinguishing soils with aquic moisture regime from soils with aquic conditions can be solved by determining the hydromorphic index.

---

Cite this article: Raheb, Alireza, Heidari, Ahmad. 2022. Determination of new soil hydromorphic index (SHI) using micromorphological data for aquic soils in the north of Iran. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12 (3), 49-70.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.19680.2046

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## تعیین شاخص جدید هیدرومورفیک خاک (SHI) با استفاده از داده‌های میکرومورفولوژیکی برای خاک‌های اکوتیک در شمال ایران

علیرضا راهب<sup>۱\*</sup>، احمد حیدری<sup>۲</sup>۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [araheb@ut.ac.ir](mailto:araheb@ut.ac.ir)۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [ahaidari@ut.ac.ir](mailto:ahaidari@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: مطالعه ساختار دست‌نخورده و طبیعی خاک با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپی اطلاعات ارزشمندی را در مورد خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی خاک و نحوه تشکیل خاک در اختیار می‌گذارد. تعیین شاخص‌های میکرومورفولوژیکی روشی پیشرفته برای کمی کردن خصوصیات خاک و افزایش دقت و درستی نتایج مطالعات مورفولوژیکی و میکرومورفولوژیکی است. در حال حاضر برای تعیین طبقه‌بندی خاک‌های دارای رژیم رطوبتی اکوتیک یا دارای شرایط اکوتیک در سامانه آمریکایی طبقه‌بندی خاک معیارهای کمی ارائه نشده است؛ به طوری که تفاوتی بین خاک‌های اشباع که احیا آن‌ها ناشی از آب زیرزمینی بالا می‌باشد و خاک‌هایی که اشباع و احیا آن‌ها در اثر نفوذ آب از سطح خاک به‌طور موقت بوده و اشباع تنها در افق‌های فوقانی دیده می‌شود، وجود ندارد. برای رفع این مشکل، هدف کلی از این پژوهش استفاده از علم میکرومورفولوژی و نرم‌افزارهای تخصصی آنالیز تصویر در راستای مدیریت پایدار منابع خاک از طریق شناسایی صحیح خاک‌های دارای شرایط اکوتیک می‌باشد. علاوه بر این هدف اختصاصی نیز تعریف یک شاخص هیدرومورفیک جدید (SHI) برای ارزیابی وضعیت تحول خاک در شرایط اکوتیک بر اساس ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی خاک است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱	
واژه‌های کلیدی: آنالیز تصویر، خصوصیات میکرومورفولوژیکی، شاخص هیدرومورفیک، شرایط اکوتیک	
	<b>مواد و روش‌ها:</b> برای انجام پژوهش و تعیین شاخص میکرومورفولوژیکی خصوصیات هیدرومورفیک خاک، پس از تهیه نمونه‌های دست‌نخورده (شش خاک‌رخ شاهد دارای شرایط اکوتیک از شمال ایران)، مقاطع نازک آن‌ها تهیه شد. مطالعه و تجزیه و تحلیل مقاطع نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان صورت پذیرفت. در مرحله بعد برای تعیین شاخص هیدرومورفیک برای خاک‌های دارای شرایط اکوتیک به ترتیب مراحل زیر صورت پذیرفت: ۱- تهیه مقاطع نازک، ۲- مطالعه خصوصیات میکروسکوپی، ۳- تصویربرداری از مقاطع نازک،

---

۴- آنالیز تصویر و کمی کردن پارامترهای میکرومورفولوژی، ۵- نمره‌دهی به خصوصیات بین ۰ تا ۱۰۰ امتیاز و ۶- محاسبه شاخص هیدرومورفیک خاک.

**یافته‌ها:** شاخص هیدرومورفیک به دست آمده با ساختمان میکروسکوپی، مواد نرم خاک، b-فابریک، مواد آلی، عوارض هیدرومورفیک و تغییر شکل کانی‌ها ارتباط داشت. این شاخص می‌تواند برای طبقه‌بندی خاک‌های دارای رژیم رطوبتی اکوتیک یا شرایط اکوتیک در واحدهای مختلف زمین‌نما مفید باشد. نتایج نشان داد که شاخص هیدرومورفیک از مقادیر بسیار زیاد در خاک‌های شالیزاری با رژیم رطوبتی اکوتیک تا مقادیر بسیار کم در خاک‌های غیرشالیزاری تحت کشت کیوی متغیر بود. در خاک‌های شالیزاری دارای رژیم رطوبتی اکوتیک مقادیر SHI با عمق خاک افزایش نشان داد و حداکثر آن در افق‌های عمیق‌تر دیده شد، در حالی‌که در خاک‌های غیرشالیزاری رابطه بین SHI با عمق خاک نامشخص بود.

**نتیجه‌گیری:** شاخص هیدرومورفیک تعریف شده در خاک‌های دارای رژیم رطوبتی اکوتیک بیش‌تر از ۰/۳۵ بود و در کلید رده‌بندی در کلاس خاک‌های اکوتیک قرار گرفتند. در مقابل خاک‌های دارای شاخص هیدرومورفیک کم‌تر از ۰/۳۵ در خاک‌هایی دیده شدند که تنها دارای شرایط اکوتیک بودند. بسیاری از مشکلاتی که در سامانه طبقه‌بندی آمریکایی خاک در تفکیک خاک‌های دارای رژیم رطوبتی اکوتیک از خاک‌های دارای شرایط اکوتیک وجود دارد، با تعیین شاخص هیدرومورفیک قابل حل خواهد بود.

---

استناد: راهب، علیرضا، حیدری، احمد (۱۴۰۱). تعیین شاخص جدید هیدرومورفیک خاک (SHI) با استفاده از داده‌های میکرومورفولوژیکی برای خاک‌های اکوتیک در شمال ایران. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۲ (۳)، ۴۹-۷۰.

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.19680.2046



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

خاک‌های اراضی خیس از جنبه‌های مختلفی دارای اهمیت هستند که از آن جمله می‌توان قابلیت ذخیره بالای آب در خاک و جلوگیری از هدررفت آن، کاهش خطرات فرسایش و حاصلخیزی ذاتی نسبتاً خوب آن‌ها اشاره نمود (۱ و ۲). خاک‌های اراضی خیس یا هیدریک<sup>۱</sup>، خاک‌هایی هستند که در شرایط غرقاب زمین‌های باتلاقی تشکیل می‌شوند. خاک‌های هیدریک معمولاً تحت عنوان خاک‌هایی شناخته می‌شوند که تحت شرایط اشباع، در مناطق سیل‌گیر و غرقاب در طی زمان ایجاد می‌شوند (۳ و ۴).

خاک‌های موجود در اراضی خیس حدود ده درصد (۷۲۰ میلیون هکتار) از خاک‌های سطح زمین را تشکیل می‌دهند. به‌طورکلی خاک‌های اراضی خیس را از نظر گسترش جغرافیایی به دو دسته نواحی حاره‌ای و غیرحاره تقسیم می‌کنند. مناطق وسیعی از کانادا، آلاسکا، روسیه، آمریکا و آرژانتین جزء خاک‌های هیدرومورفیک غیرحاره‌ای هستند و عمدتاً زیر کشت برنج و پنبه قرار دارند. اراضی خیس نواحی حاره‌ای عمدتاً در جنوب و جنوب شرقی آسیا، آمریکای جنوبی و آفریقای مرکزی مثل ونزوئلا، برزیل، سریلانکا، چین، مالزی، و اندونزی واقع شده‌اند و محصول عمده و اصلی این اراضی برنج می‌باشد (۵ و ۶). خاک‌های هیدرومورفیک در ایران نیز بیش‌تر در نواحی مرطوب و نیمه‌مرطوب سواحل دریای خزر یافت شده و به ترتیب استان‌های گیلان، مازندران و آذربایجان غربی بیش‌ترین وسعت این خاک‌ها را دارا می‌باشند (۷).

رژیم رطوبتی اکوتیک که در طبقه‌بندی خاک استفاده می‌شود، مربوط به خاک‌هایی است که با آب اشباع شده و از نظر شیمیایی احیا شده‌اند، به‌طوری‌که آب خاک فاقد اکسیژن محلول است (۸). شرایط

اکوتیک بر اساس سه معیار تعریف می‌شود که باید به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار بگیرند: اشباع، احیا (کاهش) و ویژگی‌های اکسید و احیایی. در گذشته رژیم رطوبتی اکوتیک را برای همه رده‌های خاک قابل‌استفاده فرض می‌کردند و یکی از پرکاربردترین رژیم‌های رطوبتی در طبقه‌بندی خاک بود. با گذشت زمان مشخص شد که این رژیم رطوبتی به‌طور دقیق تعریف نشده و شناسایی صریح آن در مزرعه دشوار بوده است (۹).

لیندبو (۱۹۹۷) نمونه‌های متعددی از خاک‌هایی را مورد بررسی قرار داد که ممکن است هیدریک باشند اما با هیچ‌یک از شاخص‌های خاک‌های هیدریک موجود در کلید رده‌بندی خاک مطابقت ندارند (۱۰). به عنوان مثال بل و ریچاردسون (۱۹۹۷) مشکلات مربوط به تعریف مورفولوژی خاک مربوط به شرایط اکسید و احیای فصلی در مالی‌سول‌ها را مورد مطالعه و گزارش نمودند که در ۳۰ سانتی‌متر روبین، وجود مناطق احیا شده معمولاً به دلیل محتوای بالای مواد آلی و تجمع آن است (۱۱). علاوه بر این کوهل و همکاران (۱۹۹۷) در موارد مختلف در مورد شناسایی و تعریف خاک هیدریک در خاک‌های شنی بحث کردند. آن‌ها احتمالاً به این دلیل که این خاک‌ها حاوی مقدار کمی آهن هستند، ویژگی‌های اکسید و احیا بسیار کمی را در خاک‌های شنی مشاهده نمودند (۱۲). این شرایط و مثال‌ها نمونه‌ای از نیاز به تغییر مداوم در تعاریف شاخص‌های خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد (۱۳). به همین دلیل و با توجه به این مشکلات لزوم انجام پژوهش‌های بیش‌تر در زمینه تدوین و فرموله کردن شاخص‌های ویژه برای این خاک‌ها اجتناب‌ناپذیر است.

دانش میکرومورفولوژی با استفاده از تکنیک‌های مختلف می‌تواند اطلاعات بسیار زیادی را در ارتباط با شرایط محیطی مؤثر بر فرآیندهای خاک‌سازی، مواد

ایجاد شده است، مورد استفاده قرار داد (۲۴). مگالدی و تالینی (۲۰۰۰) شاخص میکرومورفولوژیکی (شاخص توسعه میکرومورفولوژیکی خاک - MISODI<sup>۳</sup>) را برای پالئوسول‌ها پیشنهاد کردند. در این شاخص برخی خصوصیات میکرومورفولوژی مثل ساختمان میکروسکوپی، b- فابریک، پوشش‌ها، گرهک‌ها و درجه هوازگی و تغییرشکل ذرات معدنی جهت بیان نمودن درجه توسعه خاک و مدت زمان فرآیندهای پیدایشی مورد استفاده قرار گرفت. هر خصوصیت به‌وسیله یک نمره‌دهی ساده که بیانگر درجه توسعه آن‌ها بود، به صورت کمی درآمد. حاصل جمع نمرات در این شاخص در محدوده بین ۰ تا ۲۸ بوده که با افزایش درجه هوازگی خاک افزایش می‌یابد (۲۶).

خرمالی و همکاران (۲۰۰۳) شاخص میکرومورفولوژی را برای تکامل خاک‌های آهکی در شرایط خشک و نیمه‌خشک ایران پیشنهاد دادند. این شاخص به پارامترهایی مثل اکسیدهای آهن آزاد، شاخص رنگ، شاخص تجمع رس و نسبت اسمکتایت به مجموع کلرایت و ایلیت بستگی داشته و براساس آن‌ها تعیین گردید. این شاخص برای ارتباط بین خاک‌های دارای افق آرچیلیک تشکیل شده بر روی مواد مادری آهکی در واحدهای زمین‌نمای مختلف بسیار مفید می‌باشد. همبستگی ضعیف بین MISODI محاسبه شده برای خاک‌های آهکی جنوب ایران و سایر پارامترهای مدنظر نشان می‌دهد که باید این شاخص برای خاک‌های آهکی دارای افق آرچیلیک در شرایط خشک و نیمه‌خشک اصلاح گردد. به همین دلیل شاخص میکرومورفولوژیکی MISECA<sup>۴</sup> را برای ارزیابی افق‌های آرچیلیک در یک محیط به شدت آهکی استفاده نمودند و بیان نمودند که شاخص MISECA می‌تواند به روش مشابه با مگالدی و

مادری و فعالیت‌های تحقیقاتی در اختیار پژوهش‌گران قرار دهد (۱۴). این دانش در کنار مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بسیاری از مشکلات پیچیده تشکیل و طبقه‌بندی خاک را پاسخ‌گو بوده و روشی مطمئن برای شناسایی فرآیندهای خاک‌سازی می‌باشد (۱۵). آنالیزهای کمی فابریک خاک محور اساسی پژوهش‌های تشکیل و طبقه‌بندی خاک است و کلیدی را برای تفسیر خصوصیات خاک برای مدیریت آن فراهم می‌کند (۱۶). استفاده از تصویر و تکنیک‌های پردازش تصویر فرصت‌های جدیدی را برای آنالیزهای کمی در میکرومورفولوژی خاک فراهم می‌کند (۱۷ و ۱۸).

حالت غرقاب و ایجاد شرایط اکوتیک از طریق تغییر در مقدار مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی می‌تواند بر مشخصه‌های میکرومورفولوژیک هم‌چون نوع حفرات، ساختمان میکروسکوپی، b- فابریک و فرم‌های پوشش رسی و آهن اثر بگذارند (۱۹). وجود سخت‌دانه‌های دارای مرزهای مشخص و پوشش‌ها<sup>۱</sup> یا پوشش‌های زیرسطحی<sup>۲</sup> با مرزهای پخشیده آهن و منگنز به‌عنوان مهم‌ترین عارضه میکروسکوپی مشاهده شده در اراضی شالیزاری گزارش شده است (۱۹، ۲۰، ۲۱).

در حال حاضر مطالعات اندکی بر روی شاخص‌های میکرومورفولوژیکی و هیدرومورفیک خاک‌های سراسر جهان انجام شده است که نمونه‌ای از آن‌ها می‌توان به مطالعات دورونسورو (۱۹۹۴)، مگالدی و تالینی (۲۰۰۰)، خرمالی و همکاران (۲۰۰۵)، چپلوت و همکاران (۲۰۰۰) و (۲۰۰۴) و ودیانیتسکی (۲۰۰۷) اشاره نمود (۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷). دورونسورو (۱۹۹۴) شاخص‌های میکرومورفولوژیکی را برای ارزیابی میزان تکامل خاک که بر اساس ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی

3- Micromorphological Soil Development Index  
4- Micromorphological Index of Soil Evolution in highly Calcareous arid to semiarid Conditions

1- Coating  
2- Hypo-coating

کاربری کشت برنج و باغ کیوی) با متوسط بارندگی سالیانه منطقه حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر و متوسط سالیانه دمای هوا ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد و با مواد مادری مشابه از نوع رسوبات دریایی و آبرفتی انجام پذیرفت. باغ کیوی فروت احداثی قدمتی حدود ۳۰ سال داشت که در مجاورت اراضی شالیزاری واقع می‌باشند و طبق مصاحبه به عمل آمده از کشاورزان منطقه، قبل از احداث این باغ، کل منطقه زیر کشت برنج قرار داشته است. ولی با کشت اصولی نهال کیوی که با احداث زهکش‌های عمیق و لایروبی سالانه آن‌ها همراه بوده، به تدریج خاک تحت کشت از شرایط غرقاب خارج شده و شرایط اکسید و احیایی بسیار متفاوتی نسبت به خاک‌های زیر کشت برنج و تحت شرایط غرقاب ناشی از لایه گل‌خراب بروز داد. براین اساس رژیم حرارتی خاک در منطقه مورد مطالعه ترمیک و رژیم رطوبتی یودیک تعیین گردید هرچند در بخش عمده منطقه مورد مطالعه به واسطه بالا بودن سطح آب زیرزمینی و ایجاد شرایط احیا، رژیم رطوبتی خاک اکوییک می‌باشد (۲۹).

**آنالیز خصوصیات میکرومورفولوژیکی:** به منظور مطالعه عوارض اکسید احیایی و تخلخل در خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از جعبه کوپینا تعداد ۱۵ نمونه دست‌نخورده از دیواره پروفیل‌ها تهیه گردید. نمونه‌ها هوا خشک و با مخلوط مناسبی از رزین پلی‌استر، استون و سخت‌کننده و کاتالیست، تحت شرایط خلا نسبی تلقیح شدند (۳۰). پس از سخت شدن و برش بر روی اسلایدهای شیشه‌ای چسبانیده شده و با کمک دستگاه برش و سنباده با درجات مختلف تا حد ۳۰ میکرون نازک گردیدند. مقاطع نازک تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان Olympus (BX51) در دو حالت نور پلاریزان صفحه‌ای (PPL<sup>۱</sup>) و مقاطع (XPL<sup>۲</sup>) مورد بررسی قرار گرفتند و براساس

تالینی (۲۰۰۰) برای برقرای ارتباط بین سن افق‌های آرچیلک تشکیل یافته در اقلیم‌ها، توپوگرافی و سایر فاکتورهای خاکسازي و درجه تکامل خاک استفاده گردد. مقدار شاخص با افزایش درجه توسعه خاک بین ۰ الی ۲۴ متغیر بود و هرچه این شاخص بزرگ‌تر باشد درجه توسعه‌یافتگی و تکامل خاک بیش‌تر خواهد بود (۲۸).

چاپلوت و همکاران (۲۰۰۰) حساسیت روش‌های پیش‌بینی شرایط هیدرومورفی خاک را با توجه به وضوح اطلاعات توپوگرافی (DEM) و داده‌های اضافی خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (۲۲). علاوه بر این چاپلوت و همکاران (۲۰۰۴) شاخص هیدرومورفیک (HI) را با استفاده از توپوگرافی سطح با مدلی که از توپوگرافی زیر سطح استفاده می‌کند، پیشنهاد نمودند (۲۳). و دیانیتسکی (۲۰۰۷) نیز یک شاخص جدید هیدرومورفیسم خاک را بر اساس روش استخراج پی در پی آهن پیشنهاد کرد. اما در تمام مطالعات صورت گرفته شاخص هیدرومورفیک خاک براساس خصوصیات میکرومورفولوژیکی در جهان پیشنهاد نشده است (۲۷).

این شرایط و مثال‌ها نمونه‌ای از نیاز به تغییر مداوم در تعاریف شاخص‌های خاک‌های مذکور را نشان می‌دهد (۱۳). بنابراین با توجه به این مشکلات لزوم انجام پژوهش‌های بیش‌تر در زمینه تدوین و فرموله کردن شاخص‌های ویژه برای این خاک‌ها اجتناب‌ناپذیر است. به همین دلیل هدف از مطالعه حاضر تشریح ویژگی‌های هیدرومورفیک خاک و ارائه شاخص جدید هیدرومورفیک خاک (Soil Hydromorphic Index=SHI) براساس ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی در خاک‌های اکوییک است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** این مطالعه در اراضی ایستگاه تحقیقات برنج کشور واقع در استان مازندران (با دو

1- Plane polarized light

2- Cross polarized light

۲- نرمال‌سازی نمرات هر ویژگی بین ۰ تا ۱. این مراحل برای محاسبه شاخص میکرومورفولوژیک افق‌ها و خصوصیات مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور شاخص مربوط به هر بخش از ویژگی بر ارزش کل شاخص‌های خصوصیات شش‌گانه تقسیم می‌گردد.

۳- تعیین شاخص میکرومورفولوژیک برای هر پارامتر. شاخص میکرومورفولوژیک برای هر پارامتر برابر با نمرات نرمال شده خواهد بود.

۴- تعیین شاخص میکرومورفولوژیک برای هر خصوصیت. شاخص میکرومورفولوژیک برای هر خصوصیت برابر با نمرات نرمال شده خواهد بود که از جمع کردن شاخص‌های میکرومورفولوژی هر پارامتر حاصل می‌شود.

۵- تعیین شاخص میکرومورفولوژیک برای هر افق. شاخص میکرومورفولوژی برای هر افق برابر با جمع نمرات نرمال شده هر خصوصیت تقسیم بر تعداد خصوصیات خواهد بود.

۶- تعیین شاخص میکرومورفولوژیک برای هر پروفیل. شاخص میکرومورفولوژیک برای هر خاک برابر با جمع حاصل‌ضرب شاخص میکرومورفولوژیک هر افق در ضخامت همان افق تقسیم بر مجموع ضخامت افق‌های مورد بررسی (ضخامت مؤثر) خواهد بود.

در پایان شاخص هیدرومورفیک میکرومورفولوژیکی برای خاک‌های دارای شرایط اکوتیک (SHI) با استفاده از رابطه‌های زیر تعیین گردید.

واژگان حیدری و صاحب جلال (۲۰۱۱) تشریح و برای تفسیر نتایج از استوپس و همکاران (۲۰۱۰) استفاده شد (۱۴، ۱۵، ۳۱).

**روش تعیین شاخص هیدرومورفیک خاک (SHI):**  
برای انجام پژوهش و تعیین شاخص هیدرومورفیک، با استفاده از خصوصیات میکرومورفولوژیکی شاخص هیدرومورفیک برای خاک‌های دارای شرایط اکوتیک مراحل زیر به ترتیب صورت پذیرفت (شکل ۱):

۱- تهیه مقاطع نازک، ۲- مطالعه خصوصیات میکرومورفولوژی، ۳- تهیه عکس‌های مورد نیاز، ۴- آنالیز تصویر و کمی کردن پارامترهای میکرومورفولوژی، ۵- نمره‌دهی به خصوصیات بین ۰ تا ۱۰۰ امتیاز و ۶- محاسبه و تعیین شاخص میکرومورفولوژی. در مرحله بعد ۶ پارامتر میکرومورفولوژی که هر کدام شامل چند بخش بود (۱۷ خصوصیت مختلف)، برای محاسبه شاخص هیدرومورفیک خاک مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار گرفت:

۱- ساختمان میکروسکوپی (نوع، درجه تکامل، نوع و سهم حفرات غالب)، ۲- مواد نرم خاک (رنگ و فراوانی ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرون متر)، ۳- b- فابریک (نوع b- فابریک)، ۴- مواد آلی (درجه تغییرشکل و فراوانی)، ۵- عوارض هیدرومورفیک (نوع و ویژگی‌های مختلف رنگ و فراوانی) و ۶- تغییرشکل کانی‌ها (فراوانی کوارتز و فلدسپار).

بعد از بررسی خصوصیات شش‌گانه میکرومورفولوژی برای محاسبه شاخص میکرومورفولوژیکی هیدرومورفیک مراحل زیر صورت پذیرفت:

۱- نمره‌دهی برای پارامترهای مختلف هر خصوصیت (توصیف و کمی‌کردن خصوصیات منتخب میکرومورفولوژیک در خاک)

$$HHI = \frac{\sum(\sum A/\sum B)}{N} \quad (1)$$

$$SHI = \frac{(HHI1 \times T1) + (HHI2 \times T2) + \dots + (HHIn \times Tn)}{D} \quad (2)$$



۱- ساختمان میکروسکوپی در خاک‌های دارای شرایط اکوئیک اغلب به صورت توده‌ای می‌باشد و براساس آن حداکثر ارزش به این نوع ساختمان اختصاص داده شد،  
 ۲- بخش نرم خاک نیز شامل ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرون متر می‌باشد و ۳- پوشش‌ها نیز شامل پوشش، پوشش زیر سطحی و پوشش در امتداد سطح آهن با ضخامت‌ها و فراوانی‌های مختلف بوده که در نتیجه تغییرات شرایط محیطی و اقلیمی حاصل می‌گردد. در نهایت با مجموع این ارزش‌ها شاخصی به دست می‌آید که به آن شاخص SHI گویند. جدول ۱ خصوصیات شش‌گانه محاسبه شاخص هیدرومورفیک و نمرات اختصاص داده شده به آن‌ها را برای خاک نشان می‌دهد.

که در آن‌ها به ترتیب، HHI1, HHI2, HHI<sub>n</sub> شاخص هیدرومورفیک هر افق، A مجموع شاخص‌های پارامترهای هر خصوصیت، B مجموع حداکثر استانداردهای شاخص‌های پارامترهای هر خصوصیت، N تعداد پارامترهای میکرومورفولوژی بررسی شده، T1, T2, T<sub>n</sub> ضخامت هر افق و D عمق مؤثر بررسی شده هر پروفیل می‌باشد.  
 چگونگی نمره‌دهی درجه هیدرومورفیک بر پایه نظریات دورونسورو (۱۹۹۴)، مگالدی و تالینی (۲۰۰۰) و خرمالی و همکاران (۲۰۰۳) با در نظر گرفتن شرایط زیر انجام گردید (۲۶، ۲۴ و ۲۸):



شکل ۱- مراحل تعیین شاخص هیدرومورفیک (SHI) در نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 1. Steps of determining soil hydromorphic index in the studied samples.

جدول ۱- نمره‌دهی پارامترهای مختلف میکرومورفولوژی برای تعیین شاخص هیدرومورفیک.

**Table 1. Micromorphological characteristics and their ratings to calculate SHL.**

ارزش (Rate)	پارامترهای میکرومورفولوژی (Micromorphological characteristics)
<b>۱. ساختمان میکروسکوپی (1. Microstructure)</b>	
<b>الف- نوع (A: Types)</b>	
10	دارای ساختمان: مکعبی، منشوری (Pedal: blocky, prismatic)
20	دارای ساختمان: دانه‌ای، کرامبی (Pedal: granular, crumb)
30	دارای ساختمان: صفحه‌ای (Pedal: platy)
40	فاقد ساختمان: ساختمان ذرات در اندازه شن، ذرات متصل، ذرات پوسته‌ای، به همراه ریزخاکدانه‌ها، به همراه کانال‌ها Apedal. Sand size grain structures: bridge grains, pellicular grains, with microaggregates, with channels
50	فاقد ساختمان: وگی، اسفنجی، کانالی، حجره‌ای، وزیکولی، درزها، ترک، توده‌ای Apedal: vughy, spongy, channel, chamber, vesicular, fissure, crack, massive
<b>ب- درجه تکامل (B: Grade of pedality)</b>	
0	شدیداً تکامل یافته (Strongly developed)
10	تکامل متوسط (Moderately developed)
30	تکامل ضعیف (Weakly developed)
50	فاقد تکامل (Apedal)
<b>ج- نوع حفرات (C: Void types)</b>	
0	حفرات آرایشی ساده (Simple packing)
5	حفرات آرایشی مرکب (Compound packing)
10	کانالی، حجره‌ای، وزیکولی (Channels, chambers, vesicles)
20	وگی، صفحه‌ای (Vughs, planes)
<b>د- سهم حفرات غالب (D: Void proportions)</b>	
5	1-5%
10	5-15%
20	15-30%
30	> 30%
<b>۲. مواد نرم (کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر) (2. Fine material &lt; 10µm)</b>	
<b>الف- درصد فراوانی مواد نرم (A: Percent of fine materials)</b>	
10	1-5%
20	5-10%
30	10-20%
40	20-30%
50	30-40%
60	40-50%
70	50-60%
80	60-70%
90	70-80%
100	>80%
<b>ب- رنگ زمینه خاک (هیو) (B: Soil Matrix Colour -Hue)</b>	
10	5YR
20	7.5YR
30	10YR
40	2.5 Y
50	5Y
50	10 R

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

۳. بی فابریک (C: Birefringence fabric)	
الف- نوع (A: Types)	
0	تفکیک نشده (Undifferentiated)
10	لکه‌ای منقوطه‌ای، خرده بلوری (Stipple speckled, crystallitic)
20	لکه‌ای موزائیکی، تک محور (Mosaic speckled, monostriated)
۴. مواد آلی (4. Organic materials)	
الف- درجه هوازگی (A: Degree of alteration)	
10	متوسط (Moderate)
30	ضعیف (Weak)
ب- درصد فراوانی مواد آلی (B: Percent of organic materials)	
10	1-5%
20	5-15%
30	15-30%
40	> 30%
ج- مواد دفعی جانوران (C: Excrements)	
10	> 10%
20	1-10%
30	<1%
۵. عوارض هیدرومورفیک (5. Hydromorphic features)	
الف- انواع تجمعات اکسیدی (A: Types of Redox Concentration)	
10	گرهک‌ها و پوشش‌های آهن و منگنز با وضوح ضعیف (Nodules and coatings of Fe/Mn weakly impregnated)
30	گرهک‌ها و پوشش‌های آهن و منگنز با وضوح قوی (Nodules and coatings of Fe/Mn strongly impregnated)
ب- انواع تجمعات احیایی (B: Types of Redox Depletion)	
10	مانتل‌های احیایی (Depletion mottles)
30	زمینه‌های احیایی (Depletion matrices)
ج- رنگ عوارض اکسید و احیایی (C: Redoximorphic features colour)	
10	5YR
20	7.5YR
30	10YR
40	2.5 Y
50	5Y
50	10 R
د- فراوانی گرهک‌ها و پوشش‌ها (D: Nodules and coatings Proportions)	
5	< 1%
10	1-15%
20	15-30%
30	30-60%
40	> 60%
ه- فراوانی عوارض احیایی (E: Depletion domains Proportions)	
10	1-15%
20	15-30%
30	30-50%
40	> 50%

ادامه جدول ۱-

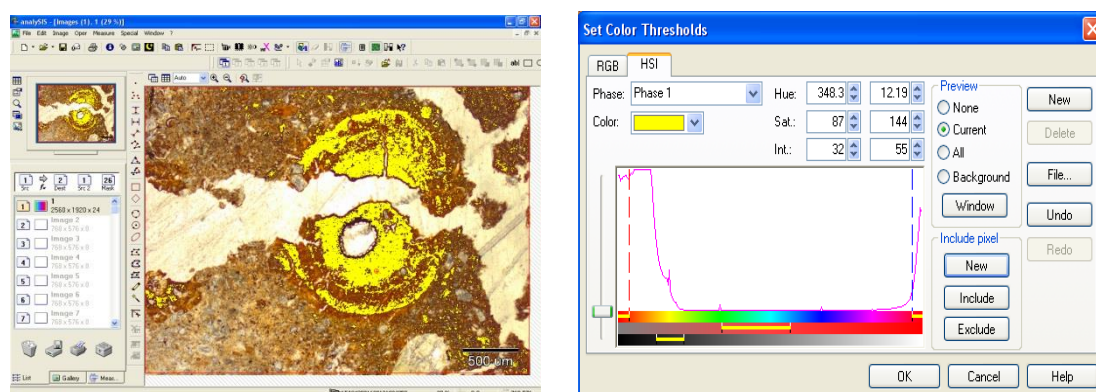
Continue Table 1.

۶. هوازگی مواد معدنی (6. Mineral alteration)

(A: Proportions of quartz) الف- درصد فراوانی کوارتز	
5	1-5%
10	5-10%
20	10-20%
30	20-30%
40	>30%
(B: Proportions of feldspars) ب- درصد فراوانی کوارتز	
5	1-5%
10	5-10%
20	10-20%
30	20-30%
40	>30%

فراوانی مواد نرم خاک، ۱۵ تصویر رقومی از هر مقطع تهیه شده و با استفاده از نرم افزار AnalySIS حد ۱۰ میکرومتر به عنوان معیار برای نمونه‌های مورد مطالعه تعیین و براساس آن کمی‌سازی فراوانی مواد نرم انجام پذیرفت. برای کمی نمودن شاخص رنگ مواد نرم و عوارض هیدرومورفیک نیز مراحل زیر صورت پذیرفت:

استفاده از آنالیز تصویر برای ارزش‌گذاری پارامترها: همان‌طور که اشاره گردید برای تعیین شاخص SHI، ارزش‌گذاری برای ۶ خصوصیت صورت پذیرفت. برای کمی نمودن برخی از این پارامترها از تکنیک‌ها و نرم‌افزارهای آنالیز تصویر بهره گرفتیم. از جمله این موارد می‌توان به رنگ و فراوانی مواد نرم خاک و رنگ عوارض هیدرومورفیک اشاره نمود. برای تعیین



شکل ۲- تعیین ارزش رنگ در متن خاک و عوارض میکرومورفولوژی براساس آنالیز تصویر.

Figure 2. Determination of color value in soil matrix and micromorphological features based on image analysis.

با افزایش عمق و ایجاد شرایط غرقاب کامل (ناشی از وجود آب زیرزمینی بالا) در نمونه‌های مورد مطالعه تحت کشت برنج، مقدار حفرات کانالی و انشعابات آن‌ها به دلیل عمق کم ریشه‌های شالی و عدم وجود فعالیت بیولوژیکی شدید در اثر غرقاب سطحی و سطح آب بالا کاهش می‌یابد، در حالی که فراوانی این نوع حفرات در نمونه‌های مورد مطالعه تحت کشت درخت کیوی با افزایش عمق تغییری نکرده و گویای نفوذ بیش‌تر ریشه کیوی در خاک و فعالیت بیولوژیکی و شرایط زهکشی مناسب‌تر می‌باشد. حفرات صفحه‌ای<sup>۱</sup> در خاک‌رخ‌های شالیزاری قابل رویت هستند که ناشی از انقباض خاک و کاهش رطوبت پس از دوره خیسی طولانی است.

b- فابریک غالب مشاهده شده در کاربری شالیزاری لکه‌ای<sup>۲</sup> و نواری<sup>۳</sup> بوده و در کاربری زیر کشت کیوی اکثراً لکه‌ای و نامتماز<sup>۴</sup> می‌باشد. پوشش، پوشش‌های زیر سطحی و در امتداد سطح آهن در تمام خاک‌رخ‌ها مشاهده گردید ولی فراوانی آن در اطراف حفرات و در امتداد مسیر ریشه در باغ‌های کیوی بسیار بیش‌تر بوده در حالی که پوشش زیر سطحی آهن در اطراف گرهک‌های کربناته نیز در کاربری شالیزاری مشاهده گردید. از طرف دیگر مشاهده اندک پوشش‌های رسی نیز در افق‌های Bt و Btg خاک‌های مورد مطالعه اشاره به احتمال پوشیده شدن رس‌ها توسط ترکیبات آهن دارد. مناطق خاکستری حاصل از تخلیه آهن در کنار تجمعات مختلف ترکیبات آهن نیز از ویژگی‌های بارز کاربری شالیزاری در مقایسه با کاربری غیرشالیزاری است که اشاره به وضعیت زهکشی نامناسب در شالیزارها در نتیجه گل‌خرابی، اشباع از سطح و سطح آب زیرزمینی بالا دارد. برخی از خصوصیات میکرومورفولوژی خاک‌های مورد مطالعه به اختصار در جدول ۲ آمده است.

- 1- Planar voids
- 2- Speckled b-fabric
- 3- Strial b-fabric
- 4- Undifferentiated b-fabric

در مرحله اول هیوهای مربوط به دفترچه رنگ (Hue= 5YR, 7.5YR, 10YR, 2.5Y, 5Y, 10R) که برای کمی نمودن استفاده شد، با استفاده از نرم‌افزار AnalySIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و محدوده‌های رنگ آن‌ها براساس هیو (بین صفر تا ۳۶۰) برای سه حالت حداکثر والیو دفترچه رنگ مانسل، حداقل والیو دفترچه رنگ مانسل و حداکثر کرومای دفترچه رنگ مانسل تعیین شد. چگونگی تعیین رنگ در آنالیز تصویر در شکل ۲ آمده است. در مرحله دوم بین اعداد به‌دست آمده در مرحله قبل با هیوهای دفترچه رنگ ارتباط برقرار شد. به عبارت دیگر نتایج کمی نمودن رنگ حاصل از آنالیز تصویر معادل نتایج تشخیص رنگ حاصل از مطالعات میکرومورفولوژی و صحرائی گردید.

### نتایج و بحث

نمونه خاک‌های مورد مطالعه طبق طبقه‌بندی آمریکایی در کلاس‌های Udipsamments, Endoaquepts و Eutrudepts قرار گرفتند. ویژگی‌های مورفولوژیکی و میکرومورفولوژیکی در خاک‌های شالیزاری و غیرشالیزاری مورد مطالعه به‌طور قابل‌توجهی متفاوت بود. شرایط آنتراکوئیک و گل‌خرابی سطح زیر کشت برنج از یک طرف و سطح بالای آب زیرزمینی باعث ایجاد ویژگی‌های خاصی در این خاک‌ها شده است.

**خصوصیات میکرومورفولوژیکی:** رژیم‌های رطوبتی یودیک و اکوئیک و/یا وجود شرایط اکوئیک در اعماق کم‌تر از ۵۰ سانتی‌متر، منجر به تشکیل ویژگی‌های اکسید و احیایی و اشکال مختلف شیمیایی و مورفولوژیکی آهن و منگنز شده است. خاک‌های شالیزاری اکثراً فاقد ساختمان (توده‌ای) بوده و ساختمان میکروسکوپی مشاهده شده در آن‌ها مکعبی زاویه‌دار و نیمه‌زاویه‌دار با درجه تفکیک متوسط تا ضعیف می‌باشد ولی در کاربری زیرکشت کیوی ساختمان میکروسکوپی مکعبی با تفکیک متوسط تا خوب و ساختمان میکروسکوپی کانالی تشخیص داده شد (جدول ۲).

جدول ۲- برخی خصوصیات میکرومورفولوژیک مقاطع نازک مورد مطالعه.

**Table 2. Some micromorphological properties of studied thin sections.**

رنگ زمینه (Matrix Color)	عوارض خاکساخت (Pedofeatures)	بی‌فابریک (b- fabric)	بقایای آلی (Organic Residue)	الگوی توزیع نسبی (c/f <sub>10μ</sub> ) c/f related distribution pattern	حفرات (Void)	درجه تکامل خاکدانه‌ها (Developed agg. Grade)	خاکدانه (Aggregate)	ساختمان میکروسکوپی (Microscopic Structure)	افق/عمق (cm) Horizon/ Depth (cm)
<b>P(1) paddy-Fine-loamy, mixed, active, thermic, Typic Endoaquepts</b> (شالیزار) ۱ خاکرخ شماره									
2.5YR5/3	c.Fe, h.c.Fe, c.k, dep	ssp	r, s (1-2%)	po(40/60)	chn, pn, chm	-	Ap	Mass.	Bg (80-90)
<b>P(2) paddy-Fine, smectitic, thermic, Typic Endoaquepts</b> (شالیزار) ۲ خاکرخ شماره									
2.5YR4/3	c.Fe	ssp	r, s (5%)	po(25/75)	pn, chn	M to W	Ab	Mass. ch.s	Ap (5-10)
10YR4/3	c.Fe, c.k, dep	pos	r (2-3%)	po(20/80)	chn, pn, chm, vu	M to W	Ab	Mass ch.s	Btg1 (35-45)
6YR6/8	c.Fe, h.c.Fe, q.c.Fe, c.c, c.k, dep	ssp	r (2%)	po, gif(20/80)	chn, pn, ve, chm	-	Ap	Mass.	Btg2 (75-85)
<b>P(3) paddy-Fine-loamy, smectitic, thermic, Mollic Endoaquepts</b> (شالیزار) ۳ خاکرخ شماره									
7.5YR6/8	c.Fe, h.c.Fe, c.k, dep	ssp	r, s (5-10%)	po(25/75)	chn, chm, pn	W	Ap.Ab	Mass. ch.s	Ap (10-15)
2.5Y5/0	c.Fe, h.c.Fe, c.k, dep	ssp	r (3-5%)	po,cm(60/40)	chn, pln, vu	-	Ap	Mass.	2Bg2 (55-65)
<b>P(4) paddy-Fine, mixed, active, thermic, Mollic Endoaquepts</b> (شالیزار) ۴ خاکرخ شماره									
7.5YR5/8	c.Fe, h.c.Fe	ssp	r, s (5%)	po,gif(35/65)	chn, chm, pn	M to W	Ab	Mass. ch.s	Ap (6-12)
7.5YR6/8	c.Fe, h.c.Fe, c.k, dep	ssp	r, s (2-3%)	po(25/75)	chn, pn, chm, vu	M to W	Ab	Mass. ch.s	Btg1 (28-35)
2.5Y5/2	c.Fe, q.c.Fe, h.c.Fe, c.k, dep	ssp, st	r (1-2%)	po(15/85)	chn, pn	-	Ap	Mass.	3Bg2 (85-95)
<b>P(5) paddy-Fine, mixed, active, thermic, Fluvaquentic Endoaquepts</b> (شالیزار) ۵ خاکرخ شماره									
7.5YR6/8	c.Fe, q.c.Fe, h.c.Fe, c.k, dep	ssp	r, s (3-5%)	po(40/60)	chn, chm, pn	M to W	Ab	Mass. ch.s	Ap (8-15)
10YR5/3	c.Fe, h.c.Fe, c.k	ssp	r, s (3-5%)	Po,cm(60/40)	chn, chm, pn	W	Ab	Mass. ch.s	Bg1 (25-35)
10YR5/6	c.Fe, h.c.Fe, c.k	ssp	r (2-3%)	Po,cm(60/40)	chn, chm, pn	-	Ap	Mass.	Bg2 (60-70)
<b>P(6) non-paddy(kiwi orchard)-Fine-loamy, mixed, superactive, thermic, Fluvaquentic Endoaquepts</b> (غیرشالیزار-باغ کیوی) ۶ خاکرخ شماره									
7.5YR5/6	c.Fe, h.c.Fe	ssp, und	r (5-10%)	po(45/55)	chn, chm, pn	M	Sb	ch.s, abs	Ap (4-10)
7.5YR5/6	c.Fe, q.c.Fe, h.c.Fe, mp.c.Fe	ssp, st, und	r (15-20%)	po(40/60)	pn, chn, chm	M to S	Sb	Abs	Bg1 (15-22)
7.5YR5/6	c.Fe, q.c.Fe, h.c.Fe	ssp, und	r (10-15%)	po(40/60)	chn, pn, chm	M	Sb	ch.s, abs	Bg2 (32-40)
<b>P(7) non-paddy(kiwi orchard)-Fine-loamy, vermiculitic, thermic, Oxiaquic Eutrudepts</b> (غیرشالیزار-باغ کیوی) ۷ خاکرخ شماره									
10YR6/8	c.c, c.Fe, h.c.Fe,	ssp	r (3-5%)	po(35/65)	pn, chn, chm, vu	M	Sb	ch.s, abs	Btg1 (38-45)

\* ساختمان میکروسکوپی (Microscopic structure): Mass توده‌ای (Massive) abs بلوکی زاویه‌دار (angular blocky)، ch.s کانالی (channel) - خاکدانه (Aggregate): Ap فاقد خاکدانه (apedal)، Ab بلوکی زاویه دار (angular blocky)، Sb بلوکی نیمه زاویه‌دار (subangular blocky) - درجه تکامل خاکدانه (Developed agg. Grade): W ضعیف (Weak)، M متوسط (Moderate)، S قوی (Strong) - حفرات (Voids): Chn کانالی (Channel)، chm حجره‌ای (Chamber)، pn صفحه‌ای (Planar)، vu وگی (Vugh)، ve وزیکولی (vesicular) - الگوی توزیع نسبی ذرات (c/f related distribution pattern): po پورفیریکی (porphyric)، cm مونیک درشت (coarse monic)، gif گیفیریکی (gefuric) - بقایای آلی (Organic Residue): r ریشه (root)، s ساقه (stem) - بی‌فابریک (b-Fabric): ssp لکه‌ای منقوطه‌ای (stipple Speckled)، pos خطی حفره محور (porostriated)، st خطی (strial)، und نامتمایز (Undifferentiated) - عوارض خاکساخت (pedofeatures): c.Fe پوشش آهن (Fe coating)، h.c.Fe پوشش زیر سطحی آهن (Fe hypo-coating)، q.c.Fe پوشش در امتداد سطح آهن (Fe quasi-coating)، mp.c.Fe کفه نازک آهن (Fe micro pan)، dep احیا آهن (Fe depletion)، c.k پوشش کربناته (carbonate coating)

نمونه‌های دارای شرایط اکوتیک نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست آمده در نمونه‌های شالیزاری با افزایش عمق در افق‌های پایین‌تر مقدار این شاخص افزایش می‌یابد. در حالی‌که در نمونه‌های تحت کشت کیوی به‌علت وجود شرایط زهکشی مناسب‌تر و عدم گلخرابی و اشباع سطحی مقدار شاخص SHI با افزایش عمق تغییر چندانی نکرده و کم‌تر از نمونه‌های شالیزاری می‌باشد. بیش‌ترین مقدار شاخص SHI مربوط به افق 3Bg2 پروفیل شماره ۵ با مقدار ۰/۶۴ و کم‌ترین مقدار این شاخص نیز مربوط به افق Bg2 پروفیل ۸ با مقدار ۰/۳۴ می‌باشد (جدول ۴). نتایج مشاهدات صحرائی نیز بیانگر نتایج فوق است، به‌گونه‌ای که در پروفیل شماره ۵ زیر کشت برنج رنگ خاکستری که نشان‌دهنده حالت احیایی در خاک است، غالبیت دارد. به‌طورکلی با توجه به نتایج به‌دست آمده با بهبود شرایط زهکشی در خاک‌ها مقدار شاخص میکرومورفولوژیکی هیدرومورفیک کاهش یافته و با نامساعد شدن شرایط زهکشی، این شاخص افزایش می‌یابد.

شاخص هیدرومورفیک خاک برای خاک‌های مورد مطالعه: مطالعات و گزارش‌های مختلف نشان داد که خاک‌های هیدریک شرح داده شده بر اساس شاخص‌های موجود در خاک‌های هیدریک قابل شناسایی نیست و نمونه‌های متعددی از خاک مورد بحث قرار گرفته است که ممکن است هیدریک بوده ولی هیچ‌یک از شاخص‌های خاک هیدریک که در حال حاضر موجود است را نداشته باشد. درجه کیفی رطوبت خاک می‌تواند به وسیله کلاس‌های زهکشی خاک و با کلاس‌های طبقه‌بندی خاک توصیف گردد که بر روی رطوبت خاک مؤثر است (۸). در برخی از این کلاس‌ها، رطوبت به صورت قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت است و یک شاخص عددی می‌تواند اطلاعات بیش‌تر در مورد رطوبت خاک ارائه دهد. به‌علت ارتباط بسیار نزدیک توپوگرافی و حالت اشباع خاک، برخی از خصوصیات مورفولوژیکی برای برآورد تغییرات مکانی خاک‌های متأثر از رطوبت مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۳).

جدول ۳ چگونگی محاسبه و تعیین شاخص میکرومورفولوژیکی هیدرومورفی را برای برخی

جدول ۳- محاسبه شاخص های میکرومورفولوژیکی خاک در مراحل مختلف.

Table 3. Calculation of soil micromorphological indices in different stages.

P8		P7		P6		P5		P4		P3		P2		P1		خارخ (Profile) (Horizon)	
Bgl	Bg2	Bgl	Apg	Bg	Apg	3Bg2	Bgl	Apg	Bgl	Apg	2Bg2	Apg	Bg2	Bgl	Apg		Bg
45	12	12	100	40	16	38	17	110	35	14	75	20	100	60	12	105	عمق مینا (cm) (Basal depth)(cm)
12	18	15	60	24	16	21	17	35	21	14	35	20	40	35	12	35	ضخامت (Horizon thickness)(cm)
(Quantified properties) کمی خصوصیات																	
۱- ساختمان میکروسکوپی (Microstructure)																	
10	10	10	50	40	40	10	10	50	40	40	50	40	50	40	40	50	نوع (Type)
10	10	10	50	30	10	30	10	50	10	10	50	30	50	10	10	30	درجه تکامل (Pedality grade)
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20	10	10	10	10	10	نوع حفرات (Void types)
30	20	20	30	20	30	20	30	10	20	30	10	20	20	20	20	20	سهم حفرات غالب (Void proportions)
۲- مواد نرم (Fine material < 10µm)																	
80	70	70	60	50	70	80	90	100	90	80	60	90	100	100	90	70	درصد فراوانی مواد نرم (Percent of fine materials)
30	20	20	30	30	20	30	20	40	20	20	50	20	30	30	10	40	رنگ زمینه خاک (هیر) (Soil Matrix Colour-Hue)
۳- بی فابریک (birefringence fabric)																	
10	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	30	10	10	نوع بی فابریک (Type of b-fabric)
۴- مواد آلی (Organic materials)																	
10	10	10	10	10	5	5	5	5	5	10	10	5	10	10	5	30	درجه هوازگی (Degree of alteration)
10	20	30	20	10	10	10	20	10	10	20	10	20	10	10	20	10	درصد فراوانی مواد آلی (Percent of organic materials)
30	30	30	30	20	20	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	مواد دفعی جانوران (Excrements)
۵- عوارض هیدرومورفیک (Hydromorphic features)																	
10	30	30	30	30	30	30	30	30	10	10	30	10	30	10	10	10	انواع تجمعات اکسیدی (Types of Redox Concentration)
10	0	0	30	30	10	0	0	30	10	0	30	0	30	30	0	30	انواع تجمعات احیایی (Types of Redox Depletion)
20	30	30	40	40	30	50	40	50	30	30	50	30	50	20	40	50	رنگ عوارض اکسید و احیایی (Redoximorphic features colour)
20	20	30	30	20	20	20	20	20	10	10	20	10	20	10	10	20	فراوانی گرهکها و پوششها (Nodules and coatings Proportions)
10	10	10	20	20	10	0	0	20	10	0	10	0	20	10	10	30	فراوانی عوارض احیایی (Depletion domains Proportions)



ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	شاخص (Profile)
5	5	5	5	5	5	5	5	۶- هوازگی مواد معدنی (Mineral alteration)
10	5	5	5	5	5	5	5	درصد فراوانی کوارتز (Proportions of quartz)
								درصد فراوانی کوارتز (Proportions of feldspars)
شاخص هیدرومورفیک (Hydromorphic indices)								
0.4	0.33	0.4	0.87	0.6	0.67	0.8	0.53	۱- ساختمان میکروسکوپی (Microstructure)
0.62	0.56	0.5	0.5	0.62	0.56	0.87	0.81	۲- مواد نرم (Fine material < 10µm)
0.2	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	۳- بی فابریک (birefringence fabric)
0.5	0.6	0.7	0.6	0.4	0.4	0.35	0.5	۴- مواد آلی (Organic materials)
0.26	0.47	0.53	0.74	0.74	0.74	0.37	0.42	۵- عوارض هیدرومورفیک (Hydromorphic features)
0.19	0.12	0.12	0.19	0.44	0.12	0.62	0.31	۶- هوازگی مواد معدنی (Mineral alteration)

ارزش اختصاص یافته به آن طبق جدول ۱، عدد ۵۰ خواهد بود. به همین ترتیب برای سایر خصوصیات ۱۷ گانه ارزش گذاری انجام شد.

**مرحله دوم:** در این مرحله شاخص هیدرومورفیک هر افق براساس رابطه ۱ تعیین گردید. علاوه بر این نرمال سازی ارزش های اختصاص یافته بین صفر و یک نیز با استفاده از این معادله صورت پذیرفت (به طور مثال در مورد پارامتر ساختمان میکروسکوپی بر طبق جدول ۱، مجموع حداکثر ارزش برای ۴ خصوصیت آن برابر با ۱۵۰ است (نوع ساختمان=۵۰، درجه تکامل ساختمان=۵۰، نوع حفرات=۲۰ و سهم حفرات غالب=۳۰). به طور مثال مجموع ارزش گذاری اختصاص یافته به پارامتر ساختمان میکروسکوپی برای افق  $Btg_2$  خاکرخ شماره ۲ برابر با ۱۳۰ بود که اگر بر مبنای حداکثر ارزش ۱۵۰ بیان گردد، ارزش گذاری ها بین صفر و یک نرمال خواهد شد (۰/۸۷). شاخص هیدرومورفیک افق  $Btg_2$  خاکرخ شماره ۲ به صورت زیر محاسبه شد.

$$HHI (Btg_2, P2) = [(130/150)+(130/160)+(10/50)+(50/100)+(150/190)+(25/80)] / 6 = 0.58$$

از خاکرخ، شاخص هیدرومورفیک خاک محاسبه شد. به طور مثال در مورد خاکرخ شماره ۲ مراحل به صورت زیر انجام گردید.

$$SHI (P2) = [(0.42*12)+(0.51*35)+(0.58*40)] / 88 = 0.52$$

افزایش می یابد. در حالی که در نمونه های تحت کشت کیوی به علت وجود شرایط زهکشی مناسب تر و عدم گل خرابی و اشباع سطحی مقدار شاخص SHI با افزایش عمق تغییر چندانی نکرده و کم تر از نمونه های

در برخی از این کلاس ها، رطوبت به صورت قابل ملاحظه ای متفاوت است و یک شاخص عددی می تواند اطلاعات بیش تر در مورد رطوبت خاک ارائه دهد. به علت ارتباط بسیار نزدیک توپوگرافی و حالت اشباع خاک، برخی از خصوصیات مورفولوژیکی برای برآورد تغییرات مکانی خاک های متأثر از رطوبت مورد استفاده قرار می گیرد (۲۳).

جدول ۳ چگونگی محاسبه و تعیین شاخص میکرومورفولوژیکی هیدرومورفی را برای برخی نمونه های دارای شرایط اکوتیک نشان می دهد. با توجه به حجم زیاد محاسبات برای درک بهتر مطلب، مقدار شاخص هیدرومورفیک برای خاکرخ شماره ۲ به طور کامل و مرحله به مرحله صورت پذیرفت:

**مرحله اول:** با توجه به نتایج مطالعات و آنالیز میکروسکوپی جدول ۲ و با در نظر گرفتن نمره های جدول ۱، خصوصیات مختلف مربوط به پارامترهای ۶ گانه ارزش گذاری شدند. به طور مثال در افق  $Btg_2$  خاکرخ شماره ۲ با توجه به این که نوع ساختمان میکروسکوپی غالب از نوع توده ای بود،

برای سایر افق ها نیز بر همین اساس شاخص هیدرومورفیک تعیین گردید.

**مرحله سوم:** در این مرحله با استفاده از رابطه ۲ و با در نظر گرفتن عمق هر افق و عمق مؤثر مطالعه شده

برای سایر خاکرخ ها نیز بر همین اساس شاخص هیدرومورفیک تعیین گردید.

طبق نتایج به دست آمده در نمونه های شالیزاری با افزایش عمق در افق های پایین تر مقدار این شاخص

خاکستری که نشان‌دهنده حالت احیایی در خاک است، غالبیت دارد. به‌طورکلی با توجه به نتایج به‌دست آمده با بهبود شرایط زهکشی در خاک‌ها مقدار شاخص میکرومورفولوژیکی هیدرومورفیک کاهش یافته و با نامساعد شدن شرایط زهکشی این شاخص افزایش می‌یابد.

شالیزاری می‌باشد. بیش‌ترین مقدار شاخص SHI مربوط به افق 3Bg2 پروفیل شماره ۵ با مقدار ۰/۶۴ و کم‌ترین مقدار این شاخص نیز مربوط به افق Bg2 پروفیل ۸ با مقدار ۰/۳۴ می‌باشد (جدول ۴). نتایج مشاهدات صحرایی نیز بیانگر نتایج فوق است، به‌گونه‌ای که در پروفیل شماره ۵ زیر کشت برنج رنگ

جدول ۴- شاخص هیدرومورفیک خاک (SHI) برای افق‌ها و خاک‌رخ‌های مطالعه شده.

Table 4. Soil Hydromorphic Index (SHI) for the studied horizons and profiles.

شاخص هیدرومورفیک خاک Soil Hydromorphic Index-SHI	شاخص هیدرومورفیک افق Horizon Hydromorphic Index-HHI	افق horizon	خاک‌رخ pedon
-	0.56	Bg	1
0.52	0.42	Apg	2
	0.51	Btg1	
	0.58	Btg2	3
0.53	0.45	Apg	
	0.58	2Bg2	4
0.55	0.52	Apg	
	0.42	Btg1	5
0.48	0.64	3Bg2	
	0.48	Apg	6
0.47	0.49	Bg	
	0.39	Apg	7
0.35	0.49	Bg1	
	0.48	Bg2	8
	0.36	Ap	
	0.37	Bg1	
	0.34	Bg2	
-	0.36	Btg1	

آب زیرزمین بالا) و خاک‌هایی که در آن تنها افق‌های فوقانی به طور موقت اشباع از آب شده وجود ندارد و خاک‌های هیدریک شرح داده شده بر اساس شاخص‌های موجود در خاک‌های هیدریک قابل‌شناسایی نیست. به همین دلیل برای تجدیدنظر در تعریف رژیم

### نتیجه‌گیری کلی

طبقه‌بندی خاک در حال حاضر با استفاده از رژیم رطوبتی اکوتیک در روش‌های طبقه‌بندی مختلف، گاهی مبهم است. به‌طوری‌که هیچ تفاوتی بین خاک‌های اشباع و کاهش یافته (خاک‌های لجنی دارای

به احتمال زیاد جز خاک‌های دارای شرایط اکوتیک بوده و در کلید رده‌بندی می‌توان در قسمت مربوط به خاک‌های اکوتیک در جستجوی طبقه‌بندی مناسب برای آن بود. در مقابل در صورتی که شاخص هیدرومورفیک تعریف شده کم‌تر از ۰/۳۵ باشد بسیاری از مشکلاتی که در طبقه‌بندی و تشخیص خاک‌های اکوتیک و شرایط اکوتیک وجود داشت، قابل حل خواهد بود و در طبقه‌بندی آن‌ها رفع ابهام خواهد شد. در پایان می‌توان بیان نمود که شاخص SHI، یک شاخص بسیار ساده و کاربردی برای ارزیابی میزان تکامل حاصل از خاک‌های مورد مطالعه و تشخیص صحیح شرایط اکوتیک بود. به اعتقاد نویسندگان این شاخص هیدرومورفیک می‌تواند به همان اندازه برای خاک‌های توسعه یافته تحت عوامل مختلف تشکیل نیز مفید باشد. کمی کردن خواص میکرومورفولوژیکی مورد استفاده برای محاسبه شاخص میکرومورفولوژیکی ممکن است برای شرایط خاص به تغییرات خاصی نیاز داشته باشد. لازم به ذکر است که برای افزایش دقت این شاخص (SHI) نیاز به مطالعات گسترده‌تری با نمونه‌های بیشتر و در شرایط مختلف است و این مطالعه نقطه شروع استفاده از شاخص می‌باشد.

رطوبتی اکوتیک، شاخص هیدرومورفیک جدید خاک پیشنهاد شده است. میکرومورفولوژی سهم به‌سزایی در توسعه تعریف شرایط اکوتیک داشته است. بسیاری از ویژگی‌های اکسید و احیایی جدید که تعریف شده است، توسط میکرومورفولوژیست‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. شواهد گویای آن است که این ویژگی‌ها به سرعت توسط خاکشناسان برای استفاده فوری پذیرفته خواهد شد. شاخص جدید هیدرومورفیک خاک (SHI) برای ارزیابی افق‌های اکوتیک و شرایط اکوتیک بر اساس ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی شامل ساختمان میکروسکوپی، مواد نرم، بی‌فابریک، مواد آلی، ویژگی‌های هیدرومورفیک و هوازگی مواد معدنی است. با استفاده از این شاخص، می‌توان افق‌های دارای شرایط اکوتیک منطقه را از ضعیف تا خوب طبقه‌بندی کرد و مشکلات مربوط به تعریف این اصطلاح در طبقه‌بندی خاک برطرف نمود. براساس شاخص هیدرومورفیک معرفی شده در این پژوهش و تعداد نمونه‌ها و پروفیل‌های مطالعه شده، می‌توان نتیجه کار را به صورت زیر بیان نمود:

SHI > 0.35                      Aquic soils   
 SHI < 0.35                      Aquic soils

به عبارت دیگر در صورتی که شاخص هیدرومورفیک تعریف شده بیش‌تر از ۰/۳۵ باشد خاک مورد مطالعه

## منابع

1. Dorney, J., Savage, R., Tiner, R.W., and Adamus, P. (Eds.). 2018. Wetland and stream rapid assessments: Development, validation, and application. Academic Press. 564p.
2. Keddy, P.A. 2010. Wetland ecology: principles and conservation. Cambridge university press. 614p.
3. Hong, H., Fang, Q., Cheng, L., Wang, C. and Churchman, G.J. 2016. Microorganism-induced weathering of clay minerals in a hydromorphic soil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 184: 272-288.
4. Hurt, G.W. 2005. Hydric Soils, P 212-217, In: D., Hillel (ed), *Encyclopedia of soils in the environment*. Vol. 2. Academic Press; Columbia University New York.
5. Davidson, N.C., Fluet-Chouinard, E., and Finlayson, C.M. 2018. Global extent and distribution of wetlands: trends and issues. *Marine and Freshwater Research*. 69: 4. 620-627.

6. Guthrie, R.L. 1985. Characterization and classification wetland soils in relation to food production. P 11-22, In: United States. Soil Management Support Services, and Philippines. Bureau of Soils (ed) wetland soils-Characterization, classification and utilization. Manil, Philippines, IRRI.
7. Torabi Golsefidi, H. 2001. Genesis, classification and land suitability evaluation of wetland soils for irrigated rice in Eastern Guilan province. Ph.D. Thesis, College of Agriculture, Isfahan University of Technology. 460p. (In Persian)
8. Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture. 12<sup>nd</sup> Ed. NRCS. 372p.
9. Bouma, J. 1983. Hydrology and soil genesis of soils with aquic moisture regimes. En: Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions. P 253-281, In: L.P. Wilding; N.E. Smeck, and G.F. Hall. (eds.) Elsevier. Amsterdam.
10. Lindbo, D. 1997. Entisols: Fluvents and fluvaquents: Problems recognizing aquic and hydric conditions in young, flood plain soils. P 133-152, In: M.J. Vepraskas and S.W. Sprecher (eds.) Aquic conditions and hydric soils: The problem soils. SSSA Spec. Publ. 50. SSSA, Madison, WI.
11. Bell, J.C., and Richardson, J.L. 1997. Aquic conditions and hydric soil indicators for Aquolls and Albolls. P 23-40, In: M.J. Vepraskas and S.W. Sprecher (eds.) Aquic conditions and hydric soils: The problem soils. SSSA Spec. Publ. 50. SSSA, Madison, WI.
12. Kuehl, R.J., Comerford, N.B., and Brown, R.B. 1997. Aquods and Psammaquents: Problems in hydric soil identification. P 41-59, In: M.J. Vepraskas and S.W. Sprecher (eds.) Aquic conditions and hydric soils: The problem soils. SSSA Spec. Publ. 50. SSSA, Madison, WI.
13. Clausnitzer, D., Huddleston, J.H., Horn, E., Keller, M., and Leet, C. 2003. Hydric soils in a southeastern Oregon vernal pool. Soil Science Society of America Journal. 67: 3. 951-960.
14. Stoops, G., Marcelino, V., and Mees, F. 2010. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths, SSSA. Madison, WI, 752p.
15. Heidari, A., and Sahebjalal, E. 2011. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith thin Section, (by Stoops, G), University of Tehran Press. 278p. (Translated in Persian)
16. Aydemir, S., Keskin, S., and Drees, L. R. 2004. Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques. Geoderma. 119: 1-2. 1-8.
17. O'Donnell, T., Goyne, K.W., Miles, R.J., Baffaut, C., Anderson, S.H., and Sudduth, K.A. 2010. Identification and quantification of soil redoximorphic features by digital image processing. Geoderma. 157: 86-96.
18. O'Donnell, T., Goyne, K.W., Miles, R.J., Baffaut, C., Anderson, S.H., and Sudduth, K.A. 2011. Determination of representative elementary areas for soil redoximorphic features identified by digital image processing. Geoderma. 161: 138-146.
19. Yurong, H., Chengmin, H., Xiangming, X., Yanqiang, W., and Xiubin, H. 2008. Micromorphological Features of Paleo-Stagnic-Anthrosols at Archaeological Site of Sanxingdui, China. Journal of Mountain Science. 5: 358-366.
20. Raheb, A.R., and Heidari, A. 2012. Investigating the soil properties affected by land use change of paddy rice to kiwi plantation in some soils of Tonekabon County, Northern Iran. Journal of Soil Management and Sustainable. 2: 2. 1-26. (In Persian)
21. Raheb, A.R. 2012. Image Analysis and investigation of micromorphological and mineralogical properties of paddy and non-paddy soils. M.Sc. Thesis, College of Agriculture, University of Tehran, Iran. 184p. (In Persian)
22. Chaplot, V., Walter, C., and Curmi, P. 2000. Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. Geoderma. 97: 405-422.

23. Chaplot, V., Walter, C., Curmi, P., Lagacherie, P., and Kinge, D. 2004. Using the topography of the saprolite upper boundary to improve the spatial prediction of the soil hydromorphic index. *Geoderma*. 123: 343-354.
24. Dorronsoro, C. 1994. Micromorphological index for the evaluation of soil evolution in central Spain. *Geoderma*. 61: 237-250.
25. Khormali, F. 2005. Application of image analysis and microscopic methods for estimation of porosity and gypsum in Gypsiferous soils. 9<sup>th</sup> Iranian Soil Science congress, Karaj. (In Persian)
26. Magaldi, D., and Tallini, M. 2000. A micromorphological index of soil development for Quaternary geology research. *Catena*. 41: 261-276.
27. Vodyanitskii, Y.N. 2007. New Soil Hydromorphism Index Based on State of Iron. *Russian Agricultural Sciences*. 33: 4. 250-253.
28. Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S. and Stoops, G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*. 53: 273-301.
29. Newhall, F., and Berdanier, C.R. 1996. Calculation of soil moisture regimes from the climatic record. Natural Resources Conservation Service, Soil Survey Investigation Report, No. 46. 13p.
30. Murphy, C.P. 1986. Thin Section Preparation of Soils and Sediments. A B Academic Publ., Berkhamsted. 149p.
31. Stoops, G. 2003. Guideline for analysis and description of soil and regolith thin sections, SSSA. Madison, WI, 184p.