پیش‌بینی منحنی مشخصه آب- خاک ماسه بادی تثبیت‌شده با پلیمر SBR و باکتری باسیلوس پاسته اوری در منطقه جبل‌کندی

فرزانه دوزالی جوشین، کاظم بدو*؛
دانشگاه ارومیه، گروه مهندسی عمران
محسن برین؛ دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی، گروه خاک‌شناسی
حسین سلطانی جیقه؛
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، گروه مهندسی عمران،

تاریخ: دریافت ۹٦/۱۰/۰۹ پذیرش ۹۷/۰۹/۰۵

چکیده

یکی از مهم‌ترین داده‌های کاربردی در مکانیک خاک غیراشباع، منحنی مشخصه آب- خاک (SWCC) است. این منحنی به شکل تابع سیگموید است و رابطهٔ بین درصد رطوبت حجمی (Θ) و یا درصد رطوبت وزنی (w) را با مکش کالبدی خاک مشخص می‌کند و در حالت کاهش درصد رطوبت با افزایش مکش، شاخه خشک‌شدگی و در حالت افزایش درصد رطوبت با کاهش مکش، شاخه ترشدگی خاک را نشان می‌دهد. در این پژوهشتأثیر دو نوع تثبیت‌کنندهٔ پلیمر SBR و میکروارگانیسم باسیلوس پاسته اوری روی منحنی مشخصه آب- خاک ماسهٔ بادی منطقه جبل کندی، کانون ریزگرد غرب دریاچهٔ ارومیه ارزیابی شده است. درصدهای مواد تثبیت کننده ۵-۱۰ و ۱۵ بودند. نتایج این پژوهش بیان می‌کند که با افزایش درصد مواد تثبیت کننده، شیب منحنی مشخصه از شکل تک‌مدل به‌صورت دو مدل تبدیل می‌شود. به‌علاوه مقدار ورود هوا و مقدار آب باقی‌مانده با افزایش درصد مواد تثبیت کننده افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب می‌شود. شکل دو مدل منحنی مشخصه آب- خاک، حضور دو سطح اندازهٔ حفره‌ها، به‌نام ماکرو و میکرو حفره‌های را بیان می‌کند. برای ۱۰ و ۱۵ درصد از مواد تثبیت‌کننده، ماکرو حفره‌های گستره

*نویسنده مسئول k.badv@urmia.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

وسیعی از منحنی مشخصه از ۰/۵ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که منحنی مشخصه ماسه تثبیت شده با پلیمر و میکروارگانیسم به‌شدت به بافت و توزیع اندازه حفره‌های ماسه تثبیت‌شده وابسته است و در نتیجهتأثیر مهمی روی ویژگی‌های هیدرولیکی آن دارد. هم‌چنین میزان نگه‌داشت آب در خاک و افزایش مکش در تثبیت نمونه با پلیمر چشم‌گیرتر از تثبیت با میکروارگانیسم است.

واژه‌های کلیدی: خاک غیراشباع، مکش، پلیمرSBR، ماسه بادی، باکتری باسیلوس پاسته اوری.

مقدمه

بررسی رفتار خاک در شرایط مختلف، نیازمند آگاهی بر تغییر رفتار خاک در حالت‌های مختلف است. اصول مکانیک خاک کلاسیک برای خاک‌های اشباع ارائه شده و تعمیم این اصول برای خاک‌های غیراشباع مستلزم بررسی رفتار تغییر حجم خاک، مقاومت برشی و رفتار هیدرولیکی خاک با تغییرات میزان اشباع‌شدگی است [۱]. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینه بررسی خاک‌های غیراشباع انجام شده و نتایج و مدل‌های معتبری نیز به‌دست آمده است. در برخی از مدل‌های ارائه شده، نکات مبهم و اشکالاتی از قبیل نبود تطابق بین داده‌های آزمایشگاهی و تجربی و نیز ناهماهنگی بین مدل‌های ارائه شده برای حالت اشباع نشده با حالت اشباع شده خاک مشاهده شده که نیاز به بررسی بیش‌تر این موضوع را نشان می‌دهد [۲].

درک چگونگی رفتار این نوع خاک‌ها برای انجام عملیات طراحی و اجرایی بسیار مهم است. محدودیت در توجیه رفتار مکانیکی خاک‌های غیراشباع بر اساس معادلات تنش مؤثر، شبیه به آن‌چه که بیشاب و دولاند [۳] پیشنهاد کرده‌اند، منجر به ارائه روش‌های مختلفی برای مدل کردن رفتار این خاک‌ها شده است. صرف‌نظر از روش پذیرفته‌شده برای مدل کردن رفتار این خاک‌ها (روش تنش مؤثر و یا روش وضعیت متغیرهای غیروابسته)، مکش در این خاک‌ها نقش اساسی را ایفا می‌کند. وجود فشار هوای مثبت و یا برابر صفر و فشار آب حفره‌ای منفی در خاک‌های غیراشباع سبب مثبت شدن تفاضل این دو فشار در این خاک‌ها (که اصطلاحاً مکش ساختاری نامیده می‌شود) شده، در حالی که این عبارت در خاک‌های اشباع همواره منفی است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

در مکانیک خاک غیراشباع به رابطهٔ بین مقدار آب حفره‌ای و مکش خاک، که به‌صورت یک یا چند منحنی (بسته به تعداد مسیرهای مکش) قابل رسم و نمایش است، منحنی مشخصه آب- خاک گفته می‌شود. منحنی مشخصه آب- خاک در مسائل آب و خاک، مانند آبیاری و زهکشی، حفاظت خاک و حرکت مواد آلاینده در خاک اهمیت زیادی دارد [٤]. این منحنی از مهم‌ترین منحنی‌های کاربردی در مکانیک خاک غیراشباع است، به‌طوری‌که از نظر اهمیت با منحنی تحکیم در خاک‌های اشباع قابل مقایسه است. در طول سالیان متمادی از روش‌ها و وسایل متعددی برای تعیین مکش خاک‌های غیراشباع استفاده شده است. هر کدام از این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی در زمینهٔ بازهٔ مکش اعمالی، زمان به تعادل رسیدن و هزینهٔ آن است. بنابراین برای عملی بودن اندازه‌گیری مکش باید از روشی که هم ارزان باشد و هم بتوان به‌کمک آن بازه مشخص و کاملی از مکش‌ها را در برگیرد، استفاده کرد [۵].

منحنی مشخصه آب- خاک، توزیع اندازهٔ منافذ خاک را نشان می‌دهد و درجهٔ تراکم و تخلخل خاک نیز در شکل این منحنی مؤثر است. آریا و پاریس (۱۹۸۱) با معرفی مدلی، امکان پیش‌بینی منحنی مشخصه آب- خاک را از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری آن فراهم ساختند [٦]. در مدل مذکور منحنی دانه‌بندی خاک به قسمت‌های مختلف تقسیم شده و سپس با استفاده از چگالی ظاهری و روابط جرمی و حجمی خاک و صعود موئینگی، مقادیر رطوبت و مکش در قسمت‌های مختلف منحنی دانه‌بندی به‌دست می‌آمد و بنابراین منحنی مشخصه آب- خاک قابل رسم بود.

حق شناس و بیگی (۱۳۸۹) اثر زئولیت میانه بر نگه‌داشت آب در دو بافت لوم رسی و شنی را بررسی کردند [۷]. نتایج نشان داد که افزودن بیش‌تر زئولیت باعث افزایش پاسخ به‌ویژه در بافت شنی می‌شود. جوهری و همکاران (۱۳۹۰) منحنی مشخصه آب- خاک را با روش آماری پیش‌بینی کردند [۸]. حق‌وردی و همکاران (۱۳۹۰) روش‌های مختلف هوش مصنوعی در مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک را در خاک‌های شمال و شمال شرق ایران مقایسه کردند [۹]. دشت بزرگ و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی اثر نوع ماده جاذب آب بر ظرفیت نگه‌داری آب- خاک پرداختند [۱۰]. مواد جاذب آب طبیعی و مصنوعی شامل کود پوسیده گاوی (۱۵ گرم در کیلوگرم خاک) و سوپر جاذب پلیمری طراوت (۲ گرم در کیلوگرم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

خاک) در دو بافت شنی لومی و لومی رسی بررسی شد. به‌طورکلی میزان ظرفیت نگه‌داشت رطوبت خاک در هر بافت، با کاربرد مواد جاذب آب نسبت به شاهد افزایش یافت. نتایج نشان داد که اثر پلیمر در افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک به مراتب بیش‌تر از کود بود که دلیل آن خاصیت آب‌دوستی و جذب بیش از حد آببه‌وسیلهٔ پلیمر بود.

رمضانی و همکاران (۱۳۹۲) منحنی مشخصه رطوبتی خاک را با استفاده از اندازه‌گیری ۲ نقطه‌ای برآورد کردند [۱۱]. نمونه‌های خاک از بانک اطلاعاتی ایران و بلژیک جمع‌آوری شده و از مدل رزتا برای تعیین منحنی نگه‌داشت آب- خاک استفاده شد. بابایان و همکاران (۱۳۹۳) عملکرد توابع انتقالی طیفی پارامتریک و نقطه‌ای را برای برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک بررسی کردند [۱۲]. بایرام و ابراهیمی (۱۳۹٤) تأثیر نوع خاک و وضعیت تراکم بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک را در خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی بررسی کردند که نتایج نشان‌دهنده تأثیر نوع خاک و افزایش رس و پلاستیسته بر میزان نگه‌داشت آب بود [۱۳]. هم چنین بر اساس نتایج نوع خاک، رطوبت و شرایط تراکم موجب افزایش اثر تراکم و هم‌چنین افزایش تراکم به‌طور میانگین موجب افزایش مقدار آب نگه‌داری شده در خاک و تغییر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک شد. در مجموع منحنی مشخصه رطوبتی به‌طور معنی‌داری با افزایش تراکم تغییر کرد.

رحیم صفاری و همکاران (۱۳۹٤) تغییرات منحنی نگهداشت آب- خاک را در خاک رسی تثبیت شده با باکتری باسیلوس اسفاریکوس بررسی کرده و در بارهٔ میزان تأثیر غلظت باکتری روی منحنی نگه‌داشت آب- خاک را بحث کردند [۱٤]. طبق نتایج با افزودن مقداری باکتری و برای یک درصد رطوبت معین میزان مکش کل و مکش ماتریک افزایش پیدا می‌کرد. جهانشاهی و همکاران (۱۳۹٦) در نمونه خاک رسی و ماسه‌ای تثبیت شده با آهک هیدراته، مکش ماتریک را تعیین کردند [۱۵]. طبق نتایج، مکش ماتریک نمونه‌های رسی حدود ۱۱ برابر نمونه‌های ماسه‌ای به‌دست آمده و تغییرات آهک نیز موجب تشدید این شرایط شده است.

در این تحقیق برای اولین بار از محیط کشتی صنعتی عصاره خیسانده ذرت برای کشت باکتری باسیلوس پاسته اوری استفاده شده است. هر دو ماده به‌کار برده شده برای تثبیت ماسه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

بادی منطقه جبل‌کندی، باکتری باسیلوس پاسته اوری و پلیمر SBR، از مواد نوین برای تثبیت ماسه‌های بادی و تخمین منحنی نگه‌داشت آب- خاک است. مزیت این تحقیق نسبت به کارهای گذشته، ارزان، کاربردی و دوستدار محیط زیست بودن این مصالح تثبیت (پلیمر استایرن بوتادین رابر و رسوب میکروبی کربنات کلسیم) است که حتی بعد از تجزیه آسیبی به محیط زیست نمی‌رسانند. هم‌چنین مقاومت این مصالح تثبیت نسبت به رطوبت از دیگر علت‌های استفاده از این مصالح برای تثبیت ماسه بادی است. روشی هم که برای تخمین منحنی نگه‌داشت آب- خاک ماسه بادی تثبیت شده استفاده شده (روش فیلتر کاغذی) نسبت به سایر روش‌های تخمین منحنی نگه‌داشت آب- خاک در تحقیقات گذشته، آسان، ساده و کاربردی است. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق هم با روش فیلتر کاغذی و با مصالح تثبیت به‌کار گرفته شده قابل قبول است.

یکی از راهکارهای استفاده بهینه از منابع آب و حفظ آن استفاده از اصلاح‌کننده‌های مصنوعی پلیمری است. اخیرا استفاده از میکروارگانیسم‌ها نیز در زمینه تثبیت خاک و در راستای بررسی منحنی مشخصه آب- خاک رایج شده است. شروع تحقیقات علمی در دنیا روی پلیمرها مربوط به دهۀ ۱۹۸۰ میلادی است. پس از شناخت تأثیر این مواد روی خصوصیات خاک و رشد گیاهان، تولید تجاری و انبوه آن در برخی کشورها از اوایل دهۀ ۱۹۹۰ میلادی آغاز و حدود سال ۲۰۰۰ میلادی اغلب کشورها به‌خصوص مناطق خشکی نظیر آفریقا، آمریکای جنوبی، خاورمیانه نسبت به آن شناخت بیش‌تری پیدا کردند. استفاده از پلیمرها به‌عنوان ماده افزودنی به خاک در ایران دارای سابقه چندانی نیست و پژوهش‌هایی در سال‌های اخیر آغاز شده است [۱٦]. استفاده از میکروارگانیسم‌ها نیز مربوط به یک دهه اخیر است و خصوصاً در زمینۀ بررسی منحنی نگه‌داشت آب- خاک تحقیقات چندانی انجام نشده است [۱۷].

در این مقاله اثر تثبیت پلیمر رزین مایع SBR و باکتری باسیلوس پاسته اوری بر منحنی مشخصه آب- خاک ماسه بادی منطقه جبل کندی ارومیه بررسی شده است. برای این منظور در ابتدا آزمایش‌های شناسایی روی خاک مورد نظر انجام شده، سپس با استفاده از آزمایش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

فیلتر کاغذی، میزان مکش ماتریک در حالت بدون تثبیت و تثبیت شده با باکتری و پلیمر، اندازه‌گیری و منحنی‌های مشخصه آب- خاک به‌دست آمده است.

منحنی مشخصه آب- خاک و عوامل مؤثر بر شکل این منحنی

چنان‌چه رابطهٔ بین مکش آب- خاک و درصد رطوبت خاک به‌صورت نمودار رسم شود، منحنی مشخصه آب- خاک به‌دست می‌آید. اگرچه شکل کلی منحنی مشخصه آب- خاک برای تمام خاک‌ها به‌صورت یک منحنی سیگموئیدی است اما خاک‌های مختلف منحنی‌های مشخصه متفاوتی دارند و شکل این منحنی نسبت به زمان و مکان متغیر است. عوامل مختلفی در تغییر وضعیت نقاطی از منحنی مانند درصد رطوبت اشباع، درصد رطوبت باقی‌مانده، محدودهٔ مویینگی و نهایتاً تغییرات درصد رطوبت در محدودهٔ تغییرات مکش تأثیرگذار هستند. از جمله عوامل مؤثر بر منحنی مشخصه آب- خاک می‌توان به پدیدهٔ پسماند، بافت و ساختمان خاک، تخلخل، شکل خلل و فرج خاک (ضریب اعوجاج)، تراکم خاک، درجه حرارت و املاح موجود در خاک اشاره کرد.

خاک‌های مختلف بر حسب دانه‌بندی با افزایش میزان مکش، تغییرات درصد رطوبتی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. هرچه مقدار رس خاک بیش‌تر باشد مقدار رطوبت موجود در مکش معین بیش‌تر است. تغییرات شیب منحنی در خاک‌های رسی تدریجی است اما در خاک‌های شنی به‌دلیل وجود خلل و فرج ناگهانی است. منحنی مشخصه آب- خاک نه تنها با بافت خاک تغییر می‌کند بلکه نسبت به ساختمان خاک هم متغیر است. در یک خاک با ساختمان خوب تقریباً تمام اندازه‌های منافذ وجود دارد اما در خاک‌هایی که ساختمان آن‌ها تخریب شده است، منافذ درشت از بین رفته‌اند. از این‌رو، در وضعیت اول رطوبت خاک در طیف وسیعی از نیروهای مکشی نگه‌داری می‌شود، حال آن‌که در وضعیت دوم آب با نیروی قوی‌تری در خاک نگه‌داشته می‌شود. منحنی مشخصه آب- خاک در مکش‌های کم، به‌طور عمده تابع ساختمان خاک است اما در مکش‌های شدید تحت تأثیر بافت خاک قرار می‌گیرد [۱۸].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

روش‌های موجود برای تعیین منحنی مشخصه آب- خاک

تعیین منحنی مشخصه آب- خاک از طریق روش‌های مستقیم و غیرمستقیم است. هرکدام از این روش‌ها محاسن و معایب خاص خود را دارد. در روش‌های مستقیم، مکش نمونه خاک مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود و یا این‌که با اعمال فشار هوای معین بر نمونه و فرصت‌دهی به‌آن به‌منظور رسیدن به‌حالت تعادل، مکش یا پتانسیل ساختاری خاک اندازه‌گیری می‌شود. از جمله روش‌های مستقیم آزمایشگاهی می‌توان به دستگاه صفحات فشاری، سانتریفوژهای دورسریع، سایکرومتر ترموکوپل و دستگاه صفحه مکش اشاره کرد [۱۹]. در روش‌های غیرمستقیم، ویژگی‌های دیریافت خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک مانند بافت، مقادیر رس، سیلت و شن، چگالی ظاهری، درصد مواد آلی خاک و... تخمین زده می‌شوند. منحنی مشخصه آب- خاک از جمله خصوصیات دیریافت خاک است. بیش‌تر روش‌های غیرمستقیم بر خلاف روش‌های مستقیم چندان وقت‌گیر و پرهزینه نیستند، اما به سادگی هم قابل تعمیم به شرایطی غیر از شرایط استخراج نیستند. مهم‌ترین روش‌های غیرمستقیم شامل مدل‌های تجربی و توابع انتقالی است که رایج‌ترین روش غیرمستقیم مدل‌های تجربی روش فیلتر کاغذی است. علت استفاده از روش فیلتر کاغذی آن است که مفیدترین و ساده‌ترین روش اندازه‌گیری مکش است و تنها روشی است که همهٔ مقادیر مکش خاک به‌وسیلهٔ آن قابل اندازه‌گیری است [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]، [۲٤].

مکش خاک

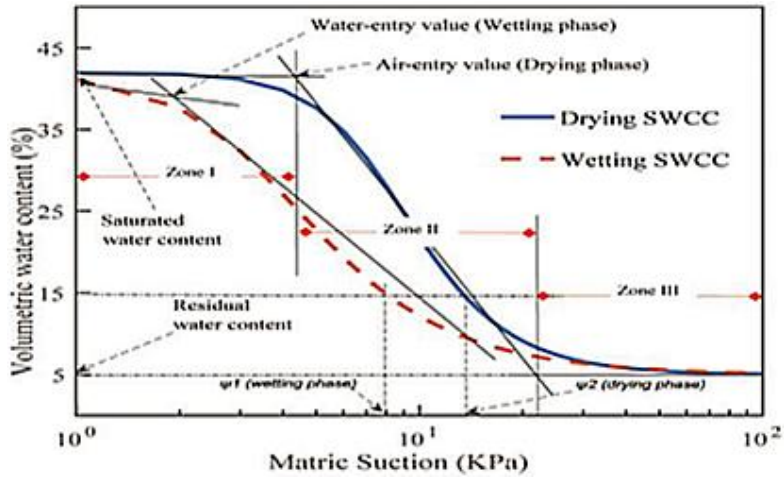
نظریه مکش در خاک با بررسی اندرکنش بین رفتار گیاهان، آب و خاک پدید آمده است. رفتار خاک‌های غیراشباع به‌میزان زیادی به مقدار مکش درون آن وابسته است. در مکانیک خاک غیراشباع حالت انرژی آزاد آب درون خاک را مکش می‌نامند. در تعریف رایج، مکش کل حاصل جمع مکش بافتی و مکش اسمزی است. اگر مکش اسمزی وجود نداشته باشد، چشم‌پوشی از وسیله یا روش اندازه‌گیری، مکش کل برابر با مکش بافتی است. به‌طورکلی سهم پتانسیل اسمزی در مقایسه با پتانسیل بافتی قابل چشم‌پوشی است [۲۵]. مکش بافتی خاک به‌صورت رابطهٔ (۱) تعریف می شود.

$$s = u_a - u_w \tag{۱}$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

که در آن s مکش بافتی درون خاک است. هم‌چنین u_w و u_a به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ فشار آب حفره‌ای و فشار هوای حفره‌ای است. در شکل ۱ منحنی مشخصه استاندارد ماسه نشان داده شده است.



شکل۱. منحنی مشخصه استاندارد ماسه و ویژگی‌های آن در دو حالت خشک و مرطوب [۲۵]

روش فیلتر کاغذی

روش فیلتر کاغذی ابتدا در سال ۱۹۲۰ در اروپا و در سال ۱۹۳۷ به‌وسیلهٔ گاردنر در آمریکا استفاده شد. فاوست و جرج (۱۹٦۷)، مک کوین و میلر (۱۹٦۸)، الخفاف و هنکس (۱۹۷٤)، مک‌کین (۱۹۸۰)، همبلین (۱۹۸۱)، چاندلر و گویرز (۱۹۸٦)، هوستن و همکاران (۱۹۹٤) و سواربیک (۱۹۹۵) از جمله افرادی بودند که از روش فیلترکاغذی برای اندازه‌گیری مقدار مکش کل و میزان رطوبت نسبی درون خاک استفاده کردند [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]، [۲٤]، [۲۵]، [۲٦]. این روش یکی از روش‌های غیرمستقیم برای تعیین نیروی مکش خاک است و به دو صورت تماس مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در روش تماس غیرمستقیم، از یک سه‌پایهٔ پلاستیکی برای جدا کردن فیلتر کاغذی از نمونه خاک استفاده می‌شود. در این حالت از سمت نمونه خاک، جریان ذرات بخار آب به‌سمت فیلتر کاغذی تا زمان رسیدن به تعادل رطوبتی برقرار است. این روش برای تعیین مکش کلی خاک کاربرد دارد. در روش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

تماس مستقیم از سه فیلتر کاغذی استفاده می‌شود؛ و با استفاده از فیلتر میانی میزان مکش اندازه‌گیری می‌شود و دو فیلتر دیگر از فیلتر میانی در برابر ذرات ریز و چسبنده خاک محافظت می‌کنند تا ذرات خاک به فیلتر میانی چسبیده نشوند. این روش برای تعیین مکش بافتی خاک کاربرد دارد. روش استفاده شده برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی در این تحقیق تماس مستتقیم با سه فیلتر کاغذی واتمن شمارهٔ ٤٢ هست زیرا که خاک مورد نظر از نوع ماسه‌ای و دارای فشار اسمزی ناچیز است و مکش ماتریک خاک بیش‌تر مد نظر است.

اگرچه تعیین مکش خاک با روش صفحه فشاری متداول‌تر است ولی نسبت به‌روش فیلتر کاغذی، بسیار پرهزینه‌تر است. از طرفی در روش صفحه فشار بازه تغییرات مکش (با توجه به توان صفحات فشار که از ۱۰–۱۵۰۰ کیلوپاسکال است) نسبت به‌روش فیلتر کاغذی محدودتر است. بیش‌ترین مقدار مکشی را که می‌توان در روش صفحه فشار اندازه‌گیری کرد، ۱۵۰۰ کیلوپاسکال است. اما در روش فیلتر کاغذی با توجه به کالیبراسیون‌ها و فرمول‌های متفاوتی که ارائه شده است؛ که این کالیبراسیون و فرمول‌ها رابطهٔ بین رطوبت فیلتر کاغذی و مکش خاک را نشان می‌دهند، می‌توان مقادیر مکشی بیش‌تری را تعیین کرد [۱۹]، [۲۷].

تجهیزات لازم در تعیین مکش خاک با روش فیلتر کاغذی شامل ترازوی دقیق با دقت یک‌ده هزارم گرم، کاغذ صافی واتمن شماره ٤٢ و گرم‌خانه با دمای ۱۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. فیلترهای کاغذی داخل نمونه‌های خاک مورد آزمایش طبق روشی که بیان شد، قرار گرفته و نمونه‌های خاک به‌مدت زمان لازم برای رسیدن به‌تعادل رطوبتی با فیلترهای کاغذی، در محیطی با دمای ثابت قرار داده می‌شوند. بعد از رسیدن به تعادل رطوبتی، فیلترهای کاغذی از نمونه‌های خاک خارج شده و با سرعت وزن می‌شوند و به این ترتیب میزان رطوبت جذب شده به‌وسیلهٔ فیلترهای کاغذی محاسبه می‌شود. مکش بافتی نمونه خاک مرطوب معادل مکش بافتی کاغذ صافی است. پس از رسیدن به تعادل رطوبتی، مکش بافتی کاغذ صافی براساس استاندارد ASTM D 5298-92 با استفاده از روابط (۲) و (۳) به‌دست می‌آید [۲۷]:

$$\begin{cases} \log s_{(kpa)} = 5.327 - 0.0779\,w & w \le 45.3\% \quad (۲) \\ \log s_{(kpa)} = 2.412 - 0.0135w & w \ge 45.3\% \quad (۳) \end{cases}$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

که در آن s مکش بافتی کاغذ صافی برحسب کیلوپاسکال و w درصد رطوبت فیلتر کاغذی است. بازه زمانی لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی در روش فیلتر کاغذی در مقادیر مکشی کم‌تر از ۳۰۰۰۰ کیلوپاسکال در جدول ۱ ارائه شده است. بازهٔ زمانی لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی در هر مقداری از مکش، طبق استاندارد ASTM D5298-92 هفت روز است. چنان‌چه بازهٔ زمانی بیش از هفت روز باشد، نتایج مطلوب‌تری به‌دست می‌آید.

جدول ۱. زمان لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی [۲۷]

مدت زمان لازم	بیش از ۳۰ روز	۳۰ روز	۱۵ روز	۷ روز
مکش کل (kPa)	۰ -۱۰۰	۱۰۰ -۲۵۰	۲۵۰ -۱۰۰۰	۱۰۰۰ -۳۰۰۰۰

مواد و روش‌ها

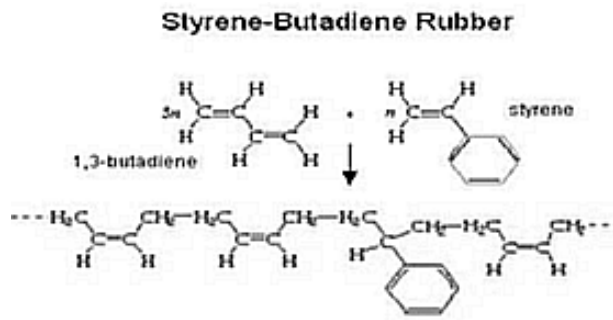
مشخصات پلیمر مایع رزین استایرن بوتادین رابر (SBR[1])

کو-پلیمر استایرن و بوتادین پلیمری متداول با کارایی‌های زیاد و بالاست و پرمصرف‌ترین لاستیک دنیا است که به‌علت دارا بودن مواد اولیه ارزان و فراوان دارای قیمت مناسبی است و به همین دلیل، بیش‌ترین حجم تولید را نیز در صنعت لاستیک به‌خود اختصاص داده است. بالغ بر ۷۰ درصد SBR تولیدی در صنعت تایرسازی به‌ویژه آج تایر، ۱۵درصد در قطعات مکانیکی و حدود ۱۰ درصد به شکل شیرابه (لاتکس) مصرف می‌شود. این پلیمر دارای دمای انتقال شیشه‌ای بسیار متفاوت و منحصر به‌فرد، غیرسمی و سازگار با محیط زیست است. زمانی که درجه حرارت واقعی محیط بیش‌تر از دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر باشد، انعطاف‌پذیر می‌شود و در صورتی که درجهٔ حرارت واقعی نسبت به دمای محیط کم‌تر باشد امکان سفت و شکننده شدن را دارد. رزین SBR بر پایهٔ حلال آب و دی‌متیل فرمامید است. این رزین از شرکت پایا رزین اصفهان به‌صورت آماده (محلول) تهیه شد. در حالت محلول پلیمریزاسیون یونی است، محصول این روش دارای خطیت زیاد، انعطاف زیاد و مقاومت سایشی و پارگی بالا در مقابل تنش‌های دینامیکی است. دانسیته این پلیمر۰/۹۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. ساختار شیمیایی این رزین حلقوی-خطی (آلیفاتیک-آروماتیک) است. از جمله مشخصه‌های دیگر این پلیمر می‌توان به مقاومت سایشی و خستگی بالا اشاره کرد. از جمله مزایای SBR

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

می‌توان به ارزان بودن، مقاومت در برابر آب، مقاومت در برابر اسید و الکل اشاره کرد. SBR[1]ها خواصی مانند مقاومت فرسایشی عالی، مقاومت در برابر سایش، انعطاف‌پذیری در دماهای کم، مقاومت در برابر ترک خوردگی، مقاومت در برابر حرارت و مقاومت به ضربه دارند. مقدار متوسط مقاومت فروروی طبق استاندارد ASTM D 2573 در نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر برابر با ۷۶ کیلوپاسکال است در حالی که مقاومت فروروی نمونه تثبیت نشده ۱۵ کیلوپاسکال است. این امر نشان‌دهندهٔ افزایش بیش از ۵ برابری مقاومت فروروی نمونه خاک در اثر استفاده از تثبیت با پلیمر است. پلیمر استفاده شده برای تثبیت در صورت تجزیه شدن هم به استایرن و بوتادین و رابر تبدیل می‌شود که دوباره خاصیت پلیمری دارند و به‌عنوان تثبیت‌کننده پلیمری عمل می‌کنند. در شکل ۲ فرمول شیمیایی استایرن بوتادین رابر نشان داده شده است [۲۸]. این پلیمر آب‌دوست است که قابلیت نگه‌دارندگی آب را در ساختار خود داشته و در حالت مرطوب کاملا الاستیک است. pH پلیمر در مخلوط با ماسه در حدود ۸ است. به‌دلیل روان بودن، ویسکوزیته پایین، قابلیت پمپ شدن دارد که از ویژگی‌های مثبت آن است. هنگام مرطوب شدن، پلیمر به‌صورت اسفنج عمل کرده و امکان نفوذ آب به لایه‌های پایین‌تر فراهم می‌شود.



شکل ۲. فرمول شیمیایی استایرن بوتادین رابر [۲۸]

1.Styrene- Butadiene Rubber

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

مشخصات میکروارگانیسم استفاده شده

در سال‌های اخیر فناوری بیولوژیکی سبز و سازگار با محیط‌زیست با نام رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP[1]) به‌عنوان روش به‌سازی خاک توسعه داده شده است. در فناوری رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم از باکتری باسیلوس پاسته اوری[2] به‌عنوان باکتری تولیدکننده اوره آز استفاده می‌شود. ژن باکتری از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری ایران[3] خریداری شد. مقدار متوسط مقاومت فروروی طبق استاندارد ASTM D 2573 در نمونه‌های تثبیت شده با فناوری رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم برابر با ۵۸ کیلوپاسکال است در حالی که مقاومت فروروی نمونه تثبیت نشده ۱۵ کیلوپاسکال است. این امر نشان‌دهندهٔ افزایش بیش از ۳ برابری مقاومت فروروی نمونه خاک در اثر استفاده از تثبیت فناوری رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم است. در اثر تجزیهٔ نمونه تثبیت‌شده با فناوری رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم، یون کلسیم آزاد می‌شود که می‌تواند دوباره در حضور باکتری‌های دارای فعالیت اوره‌آزی تولید رسوب کربنات‌کلسیم کند. کشت باکتری و فرآیند آزمایش تعیین مکش خاک در آزمایشگاه بیوتکنولوژی دانشکده کشاورزی و آزمایشگاه ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشکدهٔ فنی دانشگاه ارومیه انجام شد. کشت اولیه باکتری در محیط استاندارد با ترکیب ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر و ۱۰ گرم بر لیتر سولفات آمونیوم با pH برابر ۸ در یک شیکر انکوباتور با ۱۲۰ دور در دقیقه، تحت شرایط هوازی انجام شد. در ادامه برای تولید حجم بیش‌تر محلول باکتری، از محیط کشت صنعتی عصاره خیسانده ذرت تهیه شده از شرکت شهر صنعتی البرز استفاده شد. محلول سیمانتاسیون نیز شامل کلریدکلسیم و اوره بود. دمای انجام همهٔ آزمایش‌ها حدود ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد بود.

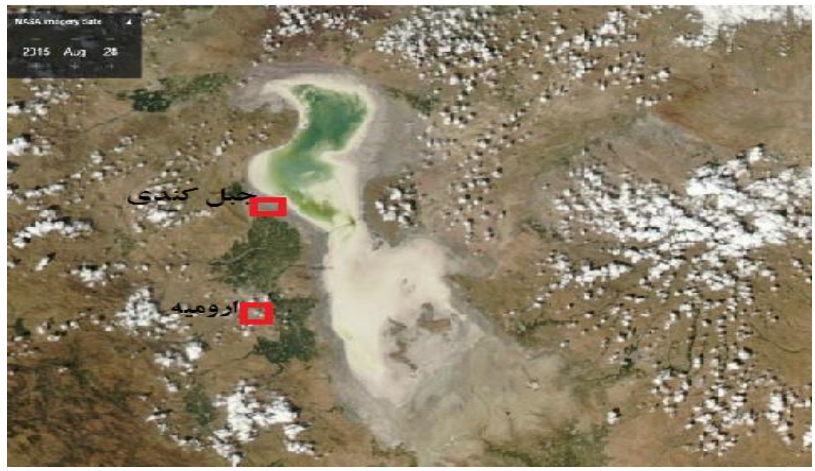
توصیف منطقه و ترکیب شیمیایی ماسه بادی مورد آزمایش

منطقه بررسی شده، محدودهٔ ۲ هزار هکتاری بستر خشک دریاچهٔ ارومیه است که در غرب دریاچه و در محور ارومیه- سلماس در نزدیکی روستای جبل کندی قرار دارد. در شکل ۳ موقعیت منطقه جبل‌کندی نشان داده شده است.

1. Microbial Induced Carbonate Precipitation
2. Sporosarcina pasteurii PTCC 1645
3. Persian Type Culture Collection

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

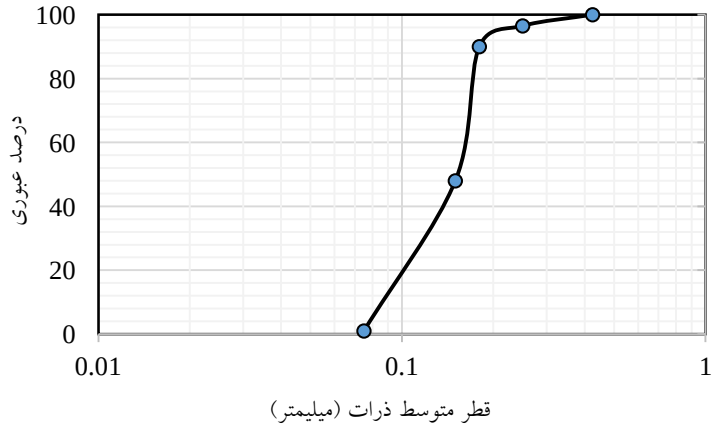
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]



شکل ۳. موقعیت روستای جبل کندی شهرستان ارومیه

مشخصات فیزیکی خاک آزمایش شده

دانه‌بندی به‌روش خشک طبق استاندارد ASTM D 422 نوع خاک منطقه را ماسه بددانه‌بندی شده SP تعیین کرد. در شکل ٤ منحنی دانه‌بندی نشان داده شده است.



شکل ٤. منحنی دانه‌بندی خاک آزمایش شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

آزمایش‌ها در آزمایشگاه ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشکدهٔ فنی و آزمایشگاه خاک دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه انجام شد. درصد تخلخل نمونه‌های برجا برابر ۰/۵ و چگالی نسبی ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب طبق استاندارد ASTM D 4254 به‌دست آمد. مطابق با استاندارد ASTM D 854-87 چگالی ویژه ذرات جامد خاک برابر ۲/۷۹ و رطوبت برجا برابر ۲/۵ درصد طبق استاندارد ASTM D 2216 اندازه‌گیری شد.

مشخصات شیمیایی خاک آزمایش شده

سوسپانسیون آب مقطر و خاک با نسبت یک به یک تهیه و با استفاده از شیکر حدود ۲۰ دقیقه تکان داده شد. مواد نامحلول ته‌نشین شده و قسمتی که بالای بشر به‌صورت محلول بود، از کاغذ صافی عبور داده و عصاره‌گیری شد و از این عصاره pH، EC و املاح موجود در خاک تعیین شد. هر چه غلظت یون‌ها در محلول خاک بیش‌تر باشد هدایت الکتریکی (EC) آن نیز بیش‌تر است. واحد EC زیمنس و میزان شوری خاک را تعیین می‌کند. لگاریتم منفی غلظت یون‌ها در محلول pH است. برای تعیین pH از استاندارد STM D 4972-01 استفاده شد. مقادیر EC و pH خاک در جدول ۲ آمده است. در جدول‌های ۳ و ٤ نیز مشخصات پلیمر و میکروارگانیسم استفاده شده برای تثبیت خاک و درصد آن‌ها و نیز نحوهٔ تزریق آن‌ها داخل خاک بیان شده است.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک استفاده شده

EC (ms/cm)	pH
۰/۹۲	۷/۹۵
غیرشور	قلیایی ضعیف

جدول۳. جزییات مربوط به تهیه محلول پلیمر SBR

ماده تثبیت	غلظت امولسیون پلیمر	درصد تزریق	نرخ تزریق
پلیمر SBR	۲۰ گرم در لیتر	۵- ۱۰- ۱۵ درصد وزن خشک	پاششی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

جدول ٤. جزییات مربوط به تهیهٔ محلول به‌وسیلهٔ فناوری MICP

نوع محلول	درصد تزریق	نرخ تزریق	توضیحات
باکتری	۲/۵– ۵– ۷/۵ درصد وزن خشک	پاششی	OD=1/5-2/5
محلول سیمانتاسیون	۲/۵– ۵– ۷/۵ درصد وزن خشک	پاششی	۱مولار اوره و ۱ مولار کلرید کلسیم

نحوهٔ تهیه و آزمایش نمونه‌های خاک

در این تحقیق برای تثبیت نمونه‌ها یک‌بار از فناوری MICP و باردیگر از پلیمر مایع رزین SBR استفاده شد. تثبیت نمونه‌ها به‌وسیلهٔ پلیمر مطابق با شرایط جدول ۳ انجام شد. هم‌چنین تثبیت نمونه‌ها به‌وسیلهٔ فناوری MICP با استفاده از شرایط جدول ٤ صورت گرفت. بعد از تثبیت نمونه‌ها برای آماده‌سازی آن‌ها برای انجام آزمایش تعیین منحنی مکش– رطوبت، خاک مورد نظر با درصد رطوبت‌های ۱۲ و ١٤ و ١٦ و ۱۸ و ۲۰ و ۲۲ و ٢٤ تهیه و سپس نمونه‌ها در ظروف دربسته‌ای که بتواند رطوبت را ثابت نگه دارد به‌مدت ٢٤ ساعت قرار گرفت. بعد از گذشت ٢٤ ساعت، خاک مرطوب در قالب به‌صورت استاتیکی متراکم شد.

تراکم نمونه‌ها براساس وزن مخصوص برجای خاک که ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و با توجه به حجم ثابت قالب (۱۰×۱۰×۲ سانتی‌متر) انجام شد و نمونه در دو سطح بالا و پایین قالب کاملاً صیقل داده شد. پس از متراکم‌سازی، نمونه‌ها را دوباره در ظروف دربسته‌ای که بتواند رطوبت را ثابت نگه دارد، قرار داده سپس برای اطمینان بیش‌تر چند لایه سلفون دور ظرف پیچیده سپس درون پلاستیک‌های زیپ‌دار به‌مدت ٤ روز نگه‌داری شد. بعد از گذشت ٤ روز نوبت به قرار دادن فیلترهای کاغذی (برای انجام این آزمایش از فیلتر کاغذی (Whatman No 42) استفاده شد) روی نمونه‌ها شد که برای این منظور طبق استاندارد ASTM D5298 سه فیلتر در زیر نمونه برای اندازه‌گیری مکش ماتریک، یک رینگ روی نمونه متراکم شده و دو فیلتر روی رینگ برای اندازه‌گیری مکش کل قرار گرفت. پس از قرار دادن فیلترها، نمونه‌ها را دوباره در ظروف دربسته‌ای که بتواند رطوبت را ثابت نگه دارد قرار داده، سپس به‌مدت ٤٥ روز در داخل دسیکاتورهایی که بتوانند رطوبت را در خود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

ثابت نگه دارند قرار گرفتند. طبق استاندارد ASTM D 5298 این آزمایش در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. پس از گذشت ٤۵ روز نمونه‌ها را از داخل دسیکاتور درآورده سپس با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۰۰۱گرم توزین شد. برای این منظور دو فیلتر که روی رینگ قرار دارند (برای مکش کل) در ابتدا وزن می‌شوند و سپس فیلتر وسط از سه فیلتر زیرین (برای مکش ماتریک) توزین شد. بعد از وزن کردن فیلترهای مرطوب، فیلترهای مربوط به هر نمونه درون یک ظرف آلومینیومی قرار داده شد و به‌مدت ۲٤ ساعت درون گرم‌خانه با دمای ۱۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از گذشت ۲٤ ساعت فیلترها از گرم‌خانه خارج شده و دوباره وزن و درصد رطوبت هر کدام از فیلترها به‌دست آمد. پس از به‌دست آوردن میزان درصد رطوبت هر یک از فیلترها با توجه به روابط ۲ و ۳ بیان شده در بخش‌های قبلی طبق استاندارد ASTM D 5298 میزان مکش در هر درصد رطوبت اندازه‌گیری و با توجه به مکش‌های به‌دست آمده منحنی مشخصه آب- خاک رسم شد. هم‌چنین برای اشباع نمونه‌ها بعد از تهیه نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای معین از مواد تثبیت کننده، درون ظرفی از آب برای اشباع‌سازی قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری مکش از شاخه خشک‌شدگی منحنی مکش و از روش فیلتر کاغذی و روابط ۲ و ۳ استفاده شد. در شکل۵ تجهیزات مربوط به آزمایش فیلتر کاغذی برای به‌دست آوردن مکش نمونه‌ها نشان داده شده است.

شکل۵. سمت راست، نمونه‌های اشباع درون ظرف و سمت چپ، تجهیزات مربوط به آزمایش فیلتر کاغذی برای تخمین آزمایش مکش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

نتایج و بحث

نتایج آزمایش تعیین مکش (منحنی مشخصه آب- خاک)

برای تعیین منحنی مشخصه آب- خاک، نمونه‌های خاک با تراکم برجای خاک منطقه جبل کندی بازسازی شدند و فیلترهای کاغذی مانند روشی که شرح داده شد، در داخل نمونه‌ها قرار گرفتند و به‌مدت ٤٥ روز برای رسیدن به تعادل رطوبتی در محیطی با دمای ثابت، نگه‌داری شدند. برای کاهش خطا، سه گروه مشابه از نمونه‌های خاک بازسازی شدند. در هر گروه، هفت نمونه با وزن مخصوص یک‌سان و میزان رطوبت متفاوت وجود داشت. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، بهترین منحنی که نشان‌دهندهٔ رفتار مکشی خاک بود، رسم شد. شکل ٦ منحنی مشخصه آب- خاک را در شرایط تثبیت شده با پلیمر با درصدهای مختلف ۵-۱۰- ۱۵ و نیز نمونه شاهد تثبیت نشده را نشان می‌دهد. در شکل ۷ نیز منحنی مشخصه آب- خاک در شرایط تثبیت شده با فناوری MICP با همان درصدهای ۵- ۱۰ و ۱۵ (درصد باکتری و محلول سیمانتاسیون مساوی است و مثلاً منظور از ۱۰ درصد تزریق، ۵ درصد باکتری و ۵ درصد سیمانتاسیون است) را نشان می‌دهد. در شکل ۸ منحنی مکش- درجه اشباع نمونه خاک تثبیت نشده در شرایط تخلخل مختلف رسم شده است. در شکل ۹ منحنی مکش- درجه اشباع خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت شده با پلیمر و خاک تثبیت شده با فناوری MICP در یک تخلخل یک‌سان برابر ۰/۵ به‌دست آمده است.

با بررسی نمودارها مشخص می‌شود که با افزودن تثبیت کننده‌ها به خاک، میزان مکش خاک افزایش می‌یابد؛ به‌طورکلی علت افزایش مکش پس از اضافه کردن میکروارگانیسم نسبت به حالت بدون میکروارگانیسم را می‌توان به رسوب کلسیتی ناشی از فعالیت باکتری‌ها نسبت داد که فعالیت این باکتری‌ها باعث کاهش فضای حفره‌های بین ذرات خاک می‌شود و در نتیجه میزان مکش افزایش می‌یابد. افزایش مکش خاک در اثر تثبیت با پلیمر فوق‌العاده زیاد است که این امر نیز کاهش چشم‌گیر خلل و فرج خاک در اثر تثبیت با پلیمر و در نتیجه افزایش قابل توجه مکش خاک را نشان می‌دهد.

از آن‌جاکه منحنی نگه‌داشت آب- خاک برای تعیین بسیاری از رفتار خاک‌های غیراشباع که از آن جمله می‌توان به نفوذپذیری، مقاومت برشی و تغییر حجم اشاره کرد، بنابراین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

بررسی منحنی نگه‌داشت آب- خاک ناشی از فعالیت بیولوژیکی باکتری‌ها و نیز پلیمرها اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده قابل مشاهده است که با افزودن تثبیت‌کننده‌ها میزان مکش نسبت به حالتی که خاک تثبیت نشده است، افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، در اثر تثبیت خاک مقاومت برشی آن افزایش می‌یابد، که این افزایش می‌تواند در اثر دو عامل باشد که عامل اول افزایش چسبندگی ناشی از فعالیت باکتری‌ها و ایجاد رسوب کلسیت بین ذرات خاک در حالت تثبیت با میکروارگانیسم و پیوندهای بین آنیون‌های پلیمرها با کاتیون‌های ماسه در حالت استفاده از پلیمر است. عامل دومی که در این تحقیق بررسی شد تغییرات مکش است که در اثر تثبیت خاک چنان‌که در قسمت‌های قبل بیان شد، این عامل می‌تواند باعث افزایش مقادیر مکش در مقادیر ثابت درصد رطوبت شود. با توجه به آن‌که مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع به‌طور مستقیم تابعی از میزان مکش موجود در خاک است، بنابراین عامل دوم باعث افزایش میزان مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع می‌شود.

منحنی مشخصه آب- خاک برای نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر و نیز نمونه‌های تثبیت‌شده با میکروارگانیسم در شکل‌های ۵ و ٦ انتقال تدریجی از منحنی مشخصه تک مدل به منحنی مشخصه دو مدل را با افزایش درصد تثبیت کننده‌ها نشان می‌دهد. منحنی مشخصه تک مدل با داشتن دو خم در منحنی که بیان‌گر مقدار ورود هوا و آب باقی‌مانده است، مشخص می‌شود. مقدار ورود هوا به‌عنوان مکش ماتریک تعریف می‌شود که در آن هوا شروع به ورود به خلل و فرج خاک می‌کند. مقدار آب باقی‌مانده به‌عنوان مقدار آبی تعریف می‌شود که فراتر از آن مقدار چشم‌گیری کاهش در مقدار آب وجود ندارد. منحنی مشخصه دو مدل با داشتن ٤ خم مشخص: دو مقدار ورود هوا و دو مقدار آب باقی‌مانده مشخص می‌شود. برای مقدار تثبیت کننده برابر ۵ درصد و کم‌تر، منحنی مشخصه به‌صورت تک مدل است. با افزایش مقدار تثبیت کننده بیش‌تر از ۵ درصد منحنی به‌صورت دو مدل در می‌آید. با توجه به شکل‌های ٦ و ۷ مشاهده می‌شود که مقدار آب باقی‌مانده با افزایش مقدار تثبیت کننده‌ها افزایش می‌یابد. به‌علاوه مقدار ورود هوا نیز با افزایش درصد تثبیت کننده‌ها افزایش می‌یابد. این مشاهدات به‌علت وجود اندازه حفره‌های کوچک‌تر توسعه یافته در اثر پر شدن خلل و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

فرج دانه‌های ماسه با مواد تثبیت‌کننده است. منحنی مشخصه دو مدل به‌طور معمول برای خاک‌های با توزیع اندازه ذرات تهی به‌علاوه خاک‌هایی که شامل دو سطح اندازه حفره‌های ماکرو و میکرو هستند، مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش میزان مواد تثبیت کننده منجر به تشکیل میکروحفره‌های در ماسه تثبیت شده با پلیمر و نیز ماسه تثبیت شده با میکروارگانیسم، شده است. قسمت منحنی مشخصه متناظر با اندازهٔ ماکرو حفره‌های بین مکش ساختاری حدود ۰/۵ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال است در حالی‌که قسمت منحنی مشخصه متناظر با اندازهٔ حفره‌های میکرو مابین مکش ماتریک بین ۲۰۰ تا حدود ۱۰۰۰ کیلوپاسکال قرار دارد. خاک‌های مختلف، منحنی‌های مشخصه متفاوتی دارند. برای خاک‌های رسی و ماسه‌ای با مقادیر یک‌سان رطوبت، مکش ماتریک خاک‌های رسی بسیار بزرگ‌تر از خاک‌های ماسه‌ای است زیرا هر چه ذرات رس کوچک‌تر می‌شوند، سطح ویژه آن‌ها افزایش می‌یابد، تعداد حفره‌های میکرو افزایش می‌یابد. به‌علاوه ترکیب مواد معدنی خاک نیزتأثیر زیادی روی منحنی مشخصه آن دارد، برای خاک با مواد معدنی هیدروفیل قوی، مکش ماتریک به‌طور اجتناب‌ناپذیری بزرگ‌تر است. بنابراین در منحنی‌های مشخصه مقدار آب باقی‌مانده بیش‌تر و شیب منحنی ملایم است.

با بررسی منحنی‌های مکش–رطوبت مشاهده شد که با تثبیت خاک با پلیمر و میکروارگانیسم میزان درصد رطوبت وزنی خاک نسبت به شاهد در تمام دامنه‌های منحنی رطوبتی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت. از بررسی کلی منحنی‌های مکش– رطوبت خاک‌ها هم‌چنین نتیجه می‌شود که در مکش‌های کم (صفر تا ۱۰۰ کیلوپاسکال) مقدار چشم‌گیری از رطوبت جذب شده به‌وسیلهٔ مواد جاذب آب آزاد می‌شود. بنابراین بیش‌ترین رطوبتی که در این مواد ذخیره می‌شود با تولید فشار اسمزی و مکش کم به‌وسیلهٔ گیاه قابل استفاده است. با توجه به این که مقدار چشم‌گیری از رطوبت در مکش‌های کم آزاد می شود، ولی مقایسه مقادیر رطوبتی باقی‌مانده در مکش‌های بالا (۱۰۰ تا ۱۰۰۰کیلوپاسکال) در منحنی‌ها نشان داد که میزان آزادسازی رطوبت از مواد جاذب آب به خاک کاهش یافته است. با این وجود مقایسهٔ میان میزان رطوبت این محدوده از مکش با شاهد نشان می‌دهد که اختلاف رطوبت باقی‌مانده نسبت به نمونه شاهد با افزودن مواد جاذب نیز قابل توجه است. اگرچه در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

مکش‌های کم میزانچشم‌گیری از رطوبت جذب شده به‌وسیلهٔ مواد جاذب آزاد می‌شود اما در مکش‌های بالا میزان آزادسازی رطوبت از مواد جاذب به خاک کاهش می‌یابد.

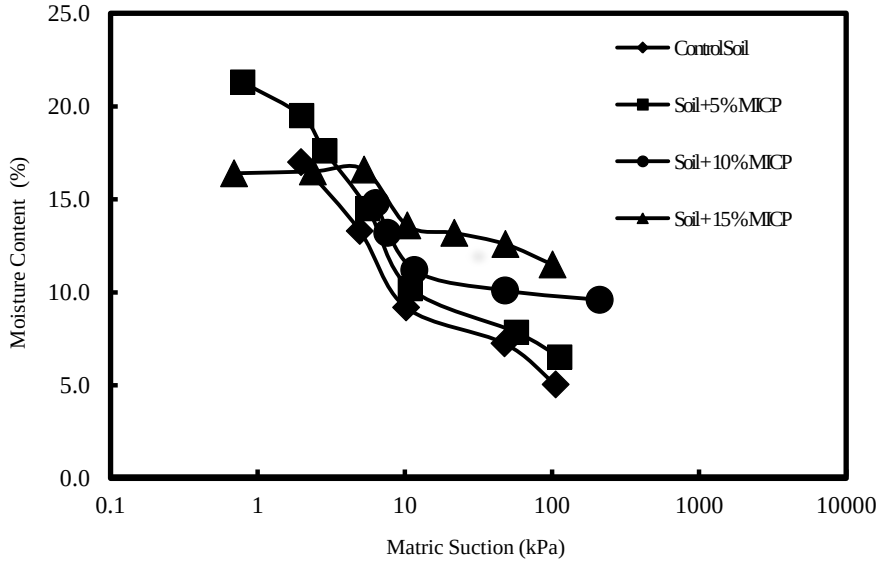
درجهٔ اشباع به‌آرامی از اشباع در مکش صفر به مقادیر کم میزان رطوبت با افزایش مکش ماتریک کاهش می‌یابد. تغییر مقدار رطوبت در اثر تحکیم نمونه خاک با مواد تثبیت شده (پلیمر و میکروارگانیزم) است. فضاهای متخلخل تا زمان رسیدن مقدار ورود هوا، اشباع باقی می‌مانند. مقدار ورود هوا، مقدار مکش ماتریکی است که در آن بزرگ‌ترین حفره شروع به زهکشی شدن می‌کند. مقدار ورود هوا حدود درجهٔ اشباع ۰/۸۵ با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ هست. مقدار رطوبت حالا با سرعت بیش‌تری در اثر خالی شدن حفره‌های خاک کاهش می‌یابد. مقدار آب باقی‌مانده وقتی افزایش در مکش ماتریک تغییر مهمی در مقدار رطوبت حجمی تولید نمی‌کند، اتفاق می‌افتد. در این نقطه، هوا وارد تمام فضاهای متخلخل مواد شده و آب باقی‌مانده عمدتاً در تماس سطح دانه به دانه قرار می‌گیرد. مقدار آب باقی‌مانده با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ حدود درجه اشباع ۵ درصد هست.

مکش ماتریک بیان‌گر توازن نیروهای مؤثر در امتداد سطح آب- هوا در یک محیط متخلخل است و تفاوت بین فشار هوا و فشار آب حفره‌ای است. انحنای مقعر رابطهٔ آب- هوا به طرف اشکال فشار بیش‌تر است، زیرا نیروهای چسبندگی بین مولکول‌های آب در رابطه آب- هوا در تمام جهت‌ها مساوی نیست. این مشابه با حباب هست که فشار داخلی بزرگ‌تر از فشار خارجی است. شعاع این انحنا می‌تواند برای ارتباط اختلاف فشار در امتداد سطح منحنی به کشش سطحی استفاده شود. توزیع اندازه ذرات غیریکنواخت در خاک سبب پسماند در منحنی مشخصه آب- خاک در مسیر خشک شدگی- مرطوب شدگی می‌شود. در مقدار آب ثابت و وقتی زهکش ممانعت می‌شود، مکش فقط تابع دما و ساختار منافذ است.

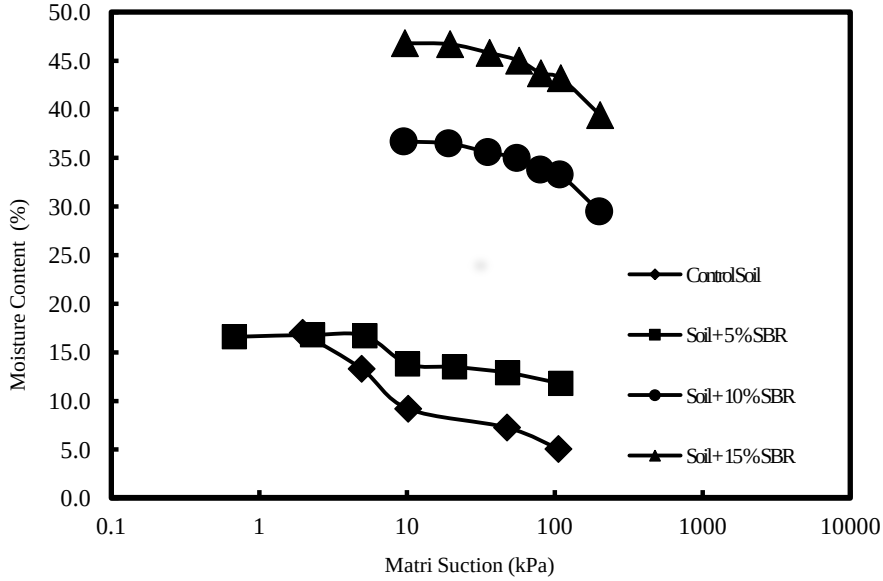
در خاک غیراشباع، رابطهٔ آب- هوا و آب- جذب جامد در حفره‌های خاک در یک سطح میکرو ساختار اتفاق می‌افتد. اگرچه رفتار آب تحت فشار منفی بالا وتأثیر هلالی هر دو در یک سطح میکرو ساختار اتفاق می‌افتد، بنابراین نقش غالبی به میکرو ساختار می‌دهد. توزیع آب بین نمونه‌های غیراشباع، رفتارهای مکانیکی متفاوتی در اثر درجه اشباع مختلف مشخصات خاک می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]



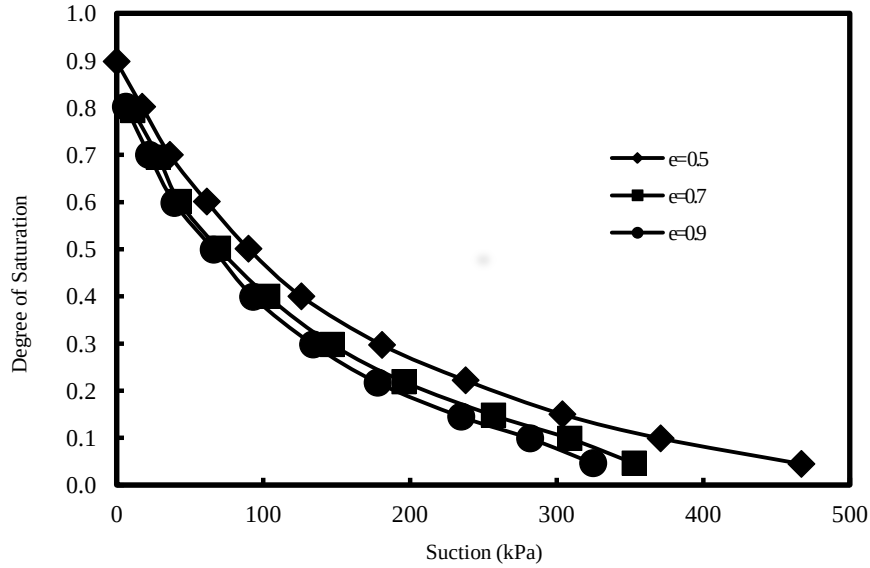
شکل ٦. منحنی‌های مکش- رطوبت خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف به‌وسیلهٔ فناوری MICP



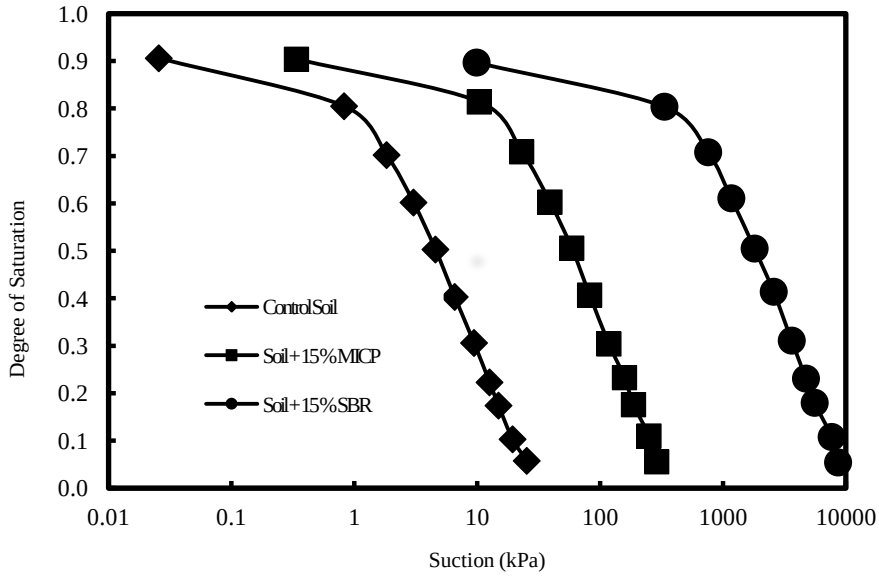
شکل ۷. منحنی‌های مکش- رطوبت خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف پلیمر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]



شکل ۸. منحنی‌های مکش- درجه اشباع خاک تثبیت نشده با تخلخل‌های مختلف



شکل ۹. منحنی‌های مکش- درجه اشباع خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت شده به‌وسیلهٔ فناوری MICP و پلیمر با تخلخل یک‌سان (e) برابر ۰/۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر دو نوع تثبیت کننده پلیمر SBR و میکروارگانیسم باسیلوس پاسته اوره روی منحنی مشخصه آب- خاک ماسه بادی منطقه جبل کندی، کانون ریزگرد غرب دریاچهٔ ارومیه ارزیابی شده است. درصدهای مواد تثبیت کننده ۵-۱۰ و ۱۵ درصد بودند. نتایج این پژوهش بیان می‌کند که با افزایش درصد مواد تثبیت کننده، شیب منحنی مشخصه از شکل تک مدل به شکل دو مدل تبدیل می‌شود. به‌علاوه مقدار ورود هوا و مقدار آب باقی‌مانده با افزایش درصد مواد تثبیت کننده افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب می‌شود. شکل دو مدل منحنی مشخصه آب- خاک، حضور دو سطح اندازه حفره‌های؛ به اسم ماکر و میکرو حفره‌های را بیان می‌کند. برای ۱۰ و ۱۵ درصد از مواد تثبیت کننده، ماکرو حفره‌های گستره وسیعی از منحنی مشخصه از ۰/۵ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال را بیان می‌کند. بنابراین نتیجه می‌شود که منحنی مشخصه ماسه تثبیت شده با پلیمر و فناوری رسوب میکروبی کربنات کلسیم به‌شدت به بافت و توزیع اندازه حفره‌های ماسه تثبیت شده وابسته است و در نتیجه تأثیر مهمی روی ویژگی‌های هیدرولیکی آن دارد. منحنی مشخصه آب- خاک در حالت کاهش درصد رطوبت با افزایش مکش، شاخه خشک کردن خاک و در حالت افزایش درصد رطوبت خاک با کاهش مکش، شاخه ترشدن خاک را نشان می‌دهد. اگر چه شکل کلی منحنی مشخصه آب- خاک برای تمام خاک‌ها بفرم تابع سیگموئید است ولی عوامل مختلفی در تغییر وضعیت نقاطی از منحنی مانند درصد رطوبت اشباع، درصد رطوبت باقی‌مانده، محدوده مویینگی و نهایتاً تغییرات درصد رطوبت در محدودهٔ تغییرات مکش تأثیرگذار است. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل این منحنی نوع خاک و درصد رطوبت است، به‌طوری‌که هر چه خاک ریزدانه‌تر باشد دارای محدودهٔ مویینگی و هم‌چنین مکش متناظر با رطوبت باقی‌مانده بزرگ‌تری است. هم‌چنین افت درصد رطوبت با افزایش مکش با شدت کم‌تری صورت می‌پذیرد. نوع تثبیت کننده خاک نیز در تغییرات مکش خاک بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق هر دو تثبیت کننده فناوری رسوب کربنات‌کلسیم و پلیمر موجب افزایش مکش خاک شدند ولی تأثیر تثبیت‌کنندهٔ پلیمری در افزایش مکش خاک بسیار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

چشم‌گیر بود. طبق نتایج مکش ماتریک بسیار متاثر از درجه اشباع است و با کاهش درجه اشباع، مکش افزایش می‌یابد.

نتایج نشان داد که اثر پلیمر در افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک به مراتب بیش‌تر از فناوری رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم است که دلیل آن خاصیت آب‌دوستی و جذب بیش از حد آب به‌وسیلهٔ پلیمر هست. با توجه به نتایج حاصل از خاک مورد آزمایش و با در نظر گرفتن این نکته که خاک‌های با بافت سنگین و نسبتاً سنگین از میزان تخلخل مویین بالا و ظرفیت نگه‌داری آب زیادی برخوردارند، افزودن تثبیت‌کننده به این‌گونه خاک‌ها نه تنها تغییر زیادی در میزان تخلخل تهویه‌ای آن‌ها ایجاد نمی‌کند بلکه مصرف زیاد تثبیت‌کننده باعث افزایش بیش‌تر تخلخل مویین در این خاک‌ها نیز می‌شود که به‌نوبه خود می‌تواند مشکلاتی را ایجاد کند ولی در خاک‌های با بافت سبک که از نظر تخلخل تهویه‌ای و وضعیت زهکشی مشکل عمده‌ای ندارند، افزودن تثبیت‌کننده و کاربرد مقادیر زیاد آن‌ها باعث افزایش تخلخل مویین می‌شود. خاک‌های سبک‌بافت به این دلیل که دارای خلل و فرج بسیار درشت و تخلخل تهویه‌ای بسیار زیادی هستند، میزان نگه‌داری رطوبت در این خاک‌ها بسیار کم است و آب به سرعت از دسترس گیاه خارج می‌شود. همین امر باعث شده تا این خاک‌ها به لحاظ زراعی نامناسب محسوب شوند. بنابراین استفاده از تثبیت‌کننده‌ها در بافت سبک این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان از این خاک‌ها برای کشت گیاهان زراعی و کارهای گلخانه‌ای به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک بهره گرفت.

منابع

1. Frydman S., Baker R., "Theoretical soil-water characteristic curves based on adsorption, cavitation, and a double porosity model", International Journal of Geomechanical Engineering, Vol. 9. No. 6 (2009) 250-257.
2. Alonso E. E., Gens A., josa A., "A constitutive model for partially saturated soils", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 8. No. 40 (1990) 405-430.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

3. Bishop A. W., Blight G. E., "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 7. No. 13 (1963) 177-197.

4. Yang H., Rahardjo H., Leong E.C., Fredlund D.G., "Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7. No. 41 (2004) 908-920.

5. Rawls W. J., Gish T. J., Brakensiek D. L., "Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics", Journal of Soil Science, Vol. 8. No. 16 (1991) 213- 234.

6. Arya L. M., Paris J. F., "A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data", Journal of Soil Science, Vol. 45. No. 6 (1981) 1023–1030.

۷. حق‌شناس گرگابی م.، بیگی هرچگانی ح.، "اثر زئولیت میانه بر ظرفیت نگه‌داری آب و ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی دو بافت خاک شنی و لوم رسی"، مجلهٔ پژوهش آب ایران، جلد هفتم، شمارهٔ ٦ (۱۳۸۹) ۳۵-٤۲.

۸. حق‌وردی ا.، قهرمان ب.، جلینی م.، خشنود یزدی ع. ا.، عرب ز.، "مقایسهٔ روش‌های مختلف هوش مصنوعی در مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک مطالعهٔ موردی: شمال و شمال شرق ایران"، مجلهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد هجدهم، شمارهٔ ۲ (۱۳۹۰) ٦۵-۸٤.

۹. دشت بزرگ ع.، صیاد غ. ع.، کاظمی نژاد ا.، "بررسی اثر نوع ماده جاذب آب بر ظرفیت نگه‌داری آب خاک"، مجلهٔ علمی کشاورزی، جلد سی و پنجم، شمارهٔ ٤ (۱۳۹۱) ۳۳-۳۸.

۱۰. رمضانی م.، صالحی خشک رودی ش.، لیاقت ع.، غلامی سفید کوهی م. ع.، "برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری ۲ نقطه‌ای"، مجلهٔ پژوهش آب در کشاورزی، جلد بیست و هفتم، شمارهٔ ۳ (۱۳۹۲) ۳۵-٤۳.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

۱۱. بابائیان ا.، همایی م.، نوروزی ع. ا.، "عملکرد توابع انتقالی طیفی پارامتریک و نقطه ای برای برآورد منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک"، مجلهٔ تحقیقات آب و خاک ایران، جلد چهل و پنجم، شمارهٔ ٤ (۱۳۹۳) ٤۷۵-٤۹۰.

۱۲. بایرام م.، ابراهیمی ا.، "تأثیر نوع خاک و وضعیت تراکم بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک"، نشریهٔ حفاظت منابع آب و خاک، جلد نهم، شمارهٔ ٤ (۱۳۹٤) ٦٥-۷۷.

۱۳. جهانشاهی ر.، قاسمی م.، توفیق و.، "ارزیابی تأثیر شرایط غیراشباع بر مشخصات مکانیکی خاک‌های تثبیت شده با آهک هیدراته"، مجلهٔ مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، جلد هفتم، شمارهٔ ۹ (۱۳۹٦) ۲۳-۳۸.

۱٤. صفاری ر. حبیب آگهی ق. نیکویی ا. نیازی ع.، "تأثیر تثبیت بیولوژیکی خاک بر منحنی نگه‌داشت آب- خاک»، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران"، دانشکدهٔ، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز (۱۳۹٤).

۱۵. جوهری ع. فرخ نژاد س. جوکار ع.، "پیش‌بینی منحنی مشخصه آب- خاک با استفاده از روش آماری"، ششمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران"، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان (۱۳۹۰).

16. Choudhary M. I., Shalaby A. A., Al-Omran A. M., "Water holding capacity and evaporation of calcareous soils as affected by four synthetic polymers", Communications in Soil Science and Plant Analysis, Vol.6. No. 66 (1995) 350-355.

17. Ivanov V., Chu J., "Applications of Microorganisms to Geotechnical Engineering for Bioclogging and Biocementation of Soil In-situ," Review in Environmental Science and Biotechnology, Vol. 7. No.3 (2008) 139-153.

18. Vanapalli S. K., Fredlund D. G., Pufahl, D. E., "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 49. No. 2 (1999) 143-159.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

19. "ASTM Standard D 6836-02, Test Methods for Determination of the Soil-Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge Annual Book of ASTM Standards", Vol. 4. No. 8 (2003).

20. Houston S. L., Houston W. N., Wagner A., "Laboratory filter paper suction measurements", Geotechnical Testing Journal, Vol. 17. No. 3 (1994) 185-194.

21. Gupta S.C., Larson W.E., "Estimating of soil- water rention characteristics from particle size disturbition", Organic matter percent, and bulk density, Water Resources Research Journal, Vol. 15. No. 6 (1979) 1633-1635.

22. Fredlund D.G., Sheng D., Zaho J., "Estimation of soil suction from the soil water characteristic curve", Can. Geotech, Vol. 48. No. 4 (2011) 186–198.

23. Johari A., Habibagahib G., Ghahramanib A., "Prediction of SWCC using artificial intelligent systems: A comparative study", Scientia Iranica, Vol. 18. No. 5 (2011) 1002–1008.

24. Garg A., Garg A., Tai K., Barontini S., Stokes A., "A computational intelligence-based genetic programming approach for the simulation of soil water retention curves", Transp. Porous Media, Vol. 103. No. 3 (2014) 497–513.

25. Fredlund D. G., Rahardjo H., "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", New York: John Wiley & Sons, Inc, (1993).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]

26. Gardner R., "A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range", Soil Science, vol. 43. No. 3 (1937) 277-283.

27. ASTM D5298-92, "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper", American Society of Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Vol. 15. No. 9 (1992) 156–161.

28. Kiatkamjornwong S., "Super absorbent polymer and super absorbent polymer composites", Journal of Scienceasia, Vol. 33. No. 1 (2007) 39-43.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.5.2]