

مروری بر رویکردهای مختلف در مدل سازی تحلیلی منحنی نگه داشت آب - خاک

علی گل آقائی درزی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حامد صادقی* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰
درزی ۲-۳۷، شماره ۱/۳، ص. ۱۱۱-۱۲۳، (مروزی)

منحنی نگه داشت آب - خاک رابطه‌ی میان رطوبت خاک و مکش را تبیین می‌کند و کاربرد زیادی در مسائلی از قبیل پیش‌بینی مقاومت برشی یا تحلیل جریان دوفازه و پایداری شیروانی‌ها دارد. دسته‌ی منحنی‌های نگه داشت برای یک خاک با پارامترهای حالت مشخص، به دو منحنی مرزی خشک‌شدگی و تر شدگی محاط شده است و در نتیجه، مشخصه‌بندی این دو منحنی و متعاقباً پدیده‌ی هیستریزیس هیدرولیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. اندازه‌گیری مستقیم منحنی نگه داشت نیازمند تجهیزات پیشرفته و تخصص بالاست و خروجی آزمایش‌ها به صورت گسسته و محدود است که امکان استفاده‌ی مستقیم از آن در شبیه‌سازی‌های عددی را سلب و مدل‌سازی تحلیل را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. بنابراین هدف اصلی این مقاله، مروری جامع بر رویکردهای مختلف مدل‌سازی تحلیلی موجود و طبقه‌بندی آنها در قالب هفت گروه است. پس از ارائه‌ی چارچوب نظری هر رویکرد و بحث بر روی نقاط قوت و ضعف آن، چالش‌های پیش روی مدل‌سازی در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: منحنی نگه داشت آب - خاک، منحنی خشک‌شدگی، منحنی تر شدگی، هیستریزیس هیدرولیکی، مدل‌سازی تحلیلی.

ali.golaghaei@student.sharif.edu
hsadeghi@sharif.edu

۱. مقدمه و بیان مسئله

منحنی نگه داشت آب - خاک (SWRC)^۱ رابطه‌ی میان میزان رطوبت خاک (برحسب درصد رطوبت وزنی w ، مقدار رطوبت حجمی θ یا درجه‌ی اشباع S_r) و مکش را بیان می‌کند.^[۱] در متون فنی نام‌های مختلفی برای این ویژگی هیدرومکانیکی همچون منحنی مشخصه‌ی آب - خاک^۲ (SWCC)، منحنی مکش خاک و منحنی نگه داشت رطوبت به کار رفته است. در حالی که مفهوم فیزیکی همه‌ی این عبارات یکسان و حاکی از توانایی نگه داشت رطوبت توسط یک محیط متخلخل در طیف پتانسیل آبی ممکن است. منحنی‌های نگه داشت آب - خاک برای یک گروه پارامتر حالت مشخص، به دو منحنی مرزی و اصلی خشک‌شدگی و ترشدگی محدود شده و بنابراین یک سطح حالت است. در مسیر خشک‌شدگی منحنی‌های نگه داشت با افزایش مکش، رطوبت نظیر آن کاهش و برعکس در مسیرهای ترشدگی با کاهش مکش، رطوبت خاک افزایش می‌یابد. به اختلاف میان رفتار نگه داشت در مسیر منحنی‌های ترشدگی و خشک‌شدگی هیستریزیس گفته می‌شود که در لغت به معنای تأخیر است و می‌توان از نظر فیزیکی ثابت کرد که در یک مکش معین، رطوبت خاک در مسیر خشک‌شدگی همواره بیش از مقدار نظیر در مسیر ترشدگی است.^[۲]

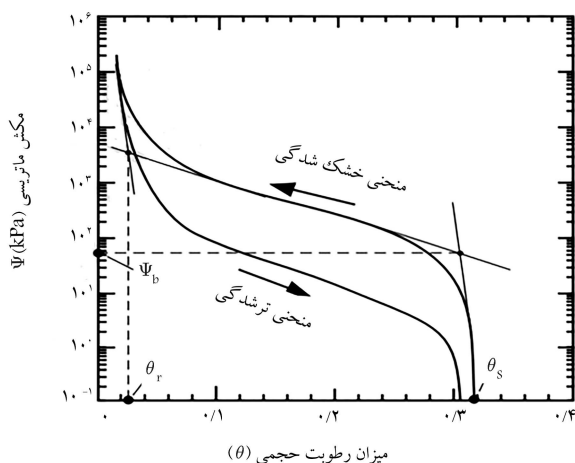
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۷/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۲۱، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۷.

DOI:10.24200/J30.2021.56932.2870

منحنی نگه داشت آب - خاک، یکی از بنیادی‌ترین مفاهیم مکانیک خاک‌های غیراشباع است و نقش کلیدی در تحلیل جریان‌های دوفازه در خاک دارد. از جمله کاربردهای آن در حوزه‌ی علوم مهندسی محیط زیست، هیدروژئولوژی و ژئوتکنیک می‌توان به مواردی همچون بررسی پایداری شیروانی‌ها و سدهای خاکی، پیش‌بینی تابع هدایت هیدرولیکی، جریان‌های زیرسطحی، رواناب‌ها، تغییرات حجمی و مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع اشاره کرد.^[۱]

روش‌های آزمایشگاهی قادر به اندازه‌گیری مستقیم منحنی نگه داشت آب - خاک هستند ولی اندازه‌گیری‌ها، گسسته و محدود است. برای کاربرد داده‌های آزمایشگاهی در پیش‌بینی پدیده‌های مبتنی بر جریان لازم است که نقاط گسسته‌ی نگه داشت به شکل یک تابع ریاضی پیوسته بیان شوند. از سوی دیگر، اندازه‌گیری مستقیم معمولاً فرایندی نیازمند به تخصص بالا و پرهزینه است. با توجه به پیچیدگی‌ها و هزینه‌های بالای نمونه‌گیری، انتقال و آماده‌سازی نمونه‌های دست‌نخورده و مشکلات عدیده‌ی توأم با پیچیدگی دستگاه‌های خاص آزمایشگاهی، معمولاً داده‌های اندازه‌گیری محدودی وجود دارد. همچنین، بیشتر این داده‌ها قادر به تعیین و ثبت اثرات پیچیده‌ی تنش و تغییر حجم محتمل در شرایط برجا نیستند. به عبارت دیگر، اندازه‌گیری‌های مبتنی بر روش مستقیم، تنها بخش کوچکی از منحنی نگه داشت آب - خاک در امتداد مسیر خشک‌شدگی یا ترشدگی را پوشش می‌دهند. بنابراین نیاز به روش‌های جایگزین برای اندازه‌گیری‌های مستقیم منحنی نگه داشت آب - خاک همواره احساس می‌شود.^[۱]



شکل ۱. شمای کلی منحنی نگهداشت آب - خاک و پارامترهای مرسوم آن [۲].

چارچوب‌های کلی این مدل‌ها هستند. در ادامه به معرفی چند مدل تحلیلی معروف در این حوزه پرداخته می‌شود.

معادله‌ی پیشنهادی بروکس و کوری [۵] یکی از اولین رویکردهای مدل‌سازی منحنی نگهداشت آب - خاک به شمار می‌رود. بر اساس مشاهدات انجام شده روی مجموعه‌ی بزرگی از مقادیر مکش و درصد رطوبت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، یک رابطه‌ی توانی دو قسمتی پیشنهاد شد که در آن شاخص توزیع اندازه‌ی حفره‌ها λ نیز وارد شده است تا به نحوی اثر دانه‌بندی خاک لحاظ شود. این مدل در مقدار ورود هوا ناپیوسته است و مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود.

$$S_e = \begin{cases} 1 & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi \geq \psi_b \end{cases} \quad (1)$$

که در این رابطه، S_e درجه‌ی اشباع مؤثر است که با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود. در رابطه‌ی ۲، S معرف درجه‌ی اشباع نمونه و S_r درجه‌ی اشباع نمونه در حالت پسماند است.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2)$$

باید توجه شود که این مدل در مکش‌های بالا که متناظر با مقادیر کمتر از رطوبت پسماند است، کاربرد خود را از دست می‌دهد. همچنین نبود یک نقطه‌ی عطف در این مدل معمولاً منجر به تعریف ضعیف و ناقص منحنی نگهداشت آب - خاک در گستره‌ی وسیعی از مقادیر مکش می‌شود. گسستگی تابع ریاضی در مقدار ورود هوا به یک ناپیوستگی تیز در تابع هدایت هیدرولیکی منجر خواهد شد که این پدیده، سبب ناپایداری عددی در مدل‌سازی جریان سیال در نزدیکی شرایط اشباع می‌شود. [۲]

ون‌گنوختن [۶] یک مدل سه‌پارامتری پیوسته با حل تحلیلی برای منحنی نگهداشت آب - خاک به صورت رابطه‌ی ۳ ارائه داده است.

$$S_e = [1 + (a \psi)^n]^{-m} \quad (3)$$

که در این رابطه، a ، n و m پارامترهای مدل‌اند. فرم ریاضی مدل ون‌گنوختن دارای یک نقطه‌ی عطف است. در مقایسه با مدل بروکس و کوری، این مدل در محدوده‌ی وسیعی از مقادیر مکش انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و فرم S وارونه‌ی این گونه منحنی‌ها را بهتر به تصویر می‌کشد. در این مدل، در مقدار ورود هوا انتقال آرام‌تری

تاکنون رویکردهای بسیاری برای بیان ریاضی (مانند برازش) یا پیش‌بینی منحنی نگهداشت آب - خاک پیشنهاد شده است که یکی از مهم‌ترین آنها، مدل‌سازی تحلیلی است. در روش مدل‌سازی تحلیلی، با استفاده از پارامترهای مؤثر در ظرفیت نگهداشت آب در خاک، توابعی ارائه داده می‌شود که می‌تواند رفتار نگهداشت را در طیف گسترده‌ی تغییرات مکش به خوبی نشان دهد. مزیت مهم استفاده از مدل‌سازی تحلیلی قابلیت آن در حل معادله‌ی ریچارد در شرایط دو فاز جریان سیال است. به عبارت دیگر، از مدل‌های تحلیلی می‌توان برای مدل‌سازی عددی در نرم‌افزارها و کدهای پژوهشی حل جریان در مسائل مهندسی مختلفی استفاده کرد. تاکنون مدل‌های تحلیلی بسیاری برای منحنی نگهداشت ارائه شده‌اند که به طور کلی این مدل‌ها را می‌توان در هفت گروه طبقه‌بندی کرد که در بخش‌های آتی به آن پرداخته می‌شود.

۲. پارامترهای اصلی منحنی نگهداشت آب - خاک

قبل از معرفی مدل‌های تحلیلی نگهداشت آب - خاک، لازم است تا پارامترهای کلی منحنی نگهداشت آب - خاک که در پیشینه‌ی مدل‌ها استفاده می‌شود، معرفی شود. به طور کلی، این پارامترها شامل مجموعه‌ی از نقاط ثابت مربوط به درصد رطوبت یا مکش در شرایط مشخص (مانند اشباع کامل، درجه اشباع پسماند و مقدار ورود هوا) هستند که به کمک دو یا چند ثابت برازشی می‌توان شکل کلی منحنی نگهداشت آب - خاک را بین این نقاط ثابت به دست آورد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، محور قائم منحنی نگهداشت آب - خاک (یا در بعضی مراجع، محور افقی) بر حسب مکش کل یا ساختاری تعریف می‌شود. مکش کل از تجمیع دو مؤلفه‌ی مکش اسمزی و مکش ساختاری به دست می‌آید. مکش اسمزی ناشی از حضور نمک‌های حل شده در آب و مکش ماتریسی طبق تعریف به اختلاف میان فشار هوامنفذی و فشار آب‌منفذی گفته می‌شود که به طور کلی ناشی از آثار ترکیبی موئینگی و جذب سطحی است و همواره مقادیر مثبت می‌گیرد. این مکش معمولاً با عبارت ψ و بر حسب واحد فشار بیان می‌شود. میزان آب حجمی^۳ اشباع (θ_s) بیان‌گر نقطه‌ی است که همه‌ی حفرات موجود در ماتریس خاک پر از آب باشد که مطابق شکل ۱ متناظر با ابتدای شاخه‌ی خشک‌شدگی منحنی نگهداشت آب - خاک است. مقدار ورود هوا^۴ (ψb) متناظر با مقدار مکشی روی شاخه‌ی خشک‌شدگی منحنی نگهداشت آب - خاک است که هوا، برای اولین بار شروع به وارد شدن به بزرگترین حفره‌های خاک می‌کند و فرایند غیراشباع شدن آغاز می‌شود. میزان رطوبت پسماند^۵ (θ_r) نشان‌دهنده‌ی آغاز ناپیوستگی در فاز آب است و برای بیرون راندن آب اضافی از حفرات خاک نیاز به افزایش قابل توجه مکش است. برای به دست آوردن مقدار ورود هوا و درجه‌ی اشباع پسماند، می‌توان از ترسیم خطوط مماس از دو سمت انحنای منحنی نگه‌داشت و پیدا کردن محل تلاقی آن مطابق شکل ۱ استفاده کرد. [۲]

۱.۲. مدل‌های کلاسیک منحنی نگهداشت آب - خاک

مدل‌های کلاسیک فقط قادر به پیش‌بینی شکل کلی منحنی نگهداشتند و توانایی بررسی عوامل مؤثر بر رفتار منحنی نگهداشت آب - خاک همانند اثرات تغییر حجمی، هیستریزیس هیدرولیکی و بسیاری دیگر از عوامل را ندارند. وجه تسمیه‌ی «کلاسیک» در این مقاله از آن جهت است که بسیاری از مدل‌های پیشرفته، مبتنی بر

که در این رابطه، $f_t(Inr)$ تابع چگالی اندازه‌ی حفرات خاک پس از تغییرشکل یا بارگذاری و $f_s(Inr)$ تابع چگالی اندازه‌ی حفرات خاک قبل از تغییرشکل یا بارگذاری است. هو و همکاران با استفاده از معادله‌ی ونگنوختن^[۶] رابطه‌ی منحنی نگه‌داشت آب - خاک را به صورت معادله‌ی زیر پیشنهاد دادند

$$S_e = \left[1 + \left(\frac{a\psi}{\chi} \right)^n \right]^{-m} \quad (۹)$$

با توجه به رابطه‌ی ۹ می‌توان مشاهده کرد که منحنی نگه‌داشت آب - خاک فقط به ضریب مقیاس جابه‌جایی افقی یعنی χ وابسته است و مستقل از ضریب مقیاس قائم η است. همچنین با توجه به این‌که در اثر بارگذاری هیدرومکانیکی، نسبت تخلخل خاک نیز تغییر می‌یابد، می‌توان بین نسبت تخلخل خاک و ضریب مقیاس افقی، رابطه‌ی همانند رابطه‌ی ۱۰ نوشت:

$$\frac{1}{\chi} = \exp [k_p (e - e_0)] \quad (۱۰)$$

که در این رابطه e_0 نسبت تخلخل اولیه، e نسبت تخلخل خاک پس از تغییرشکل و k_p ضریب تناسب است. در نهایت مدل تحلیلی منحنی نگه‌داشت آب - خاک هو و همکاران برای دو شاخه‌ی خشک‌شدگی و ترشدگی را می‌توان در رابطه‌ی ۱۱ مشاهده کرد. در این رابطه، پارامترهای β_d و β_w بیان‌گر مقادیر ورود هوا و خروج هوا به ترتیب در شاخه‌های خشک‌شدگی و ترشدگی منحنی نگه‌داشت آب - خاک می‌باشند. ضعف این مدل در این است که در مکش‌های بالا به خوبی نمی‌تواند رفتار نگه‌داشت آب - خاک را نشان دهد پس از ضریب اصلاحی ارائه شده در رابطه‌ی ۷، در این رویکرد نیز معمولاً استفاده می‌شود.

$$S_e = \begin{cases} \{ 1 + [\beta_d \exp(k_p e) \psi]^n \}^{-m} & \text{شاخه خشک‌شدگی} \\ \{ 1 + [\beta_w \exp(k_p e) \psi]^n \}^{-m} & \text{شاخه ترشدگی} \end{cases} \quad (۱۱)$$

آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه از جمله آزمایش‌هایی است که توسط آن می‌توان به تابع چگالی اندازه‌ی حفرات خاک پی برد. اما باید توجه کرد که یکی از محدودیت‌های این آزمایش در این است که به دلیل غیریکنواختی در توزیع اندازه‌ی حفرات خاک، تابع چگالی اندازه‌ی حفرات اندازه‌گیری شده همان تابع چگالی اندازه‌ی حفرات واقعی خاک نیست. از این رو چن و همکاران^[۸] در مدل تحلیلی خود به بررسی اثرات غیریکنواختی در تابع چگالی اندازه‌ی حفرات خاک پرداختند. در این مدل به طور کلی حفرات موجود در خاک به سه صورت ایده‌آل‌سازی شدند. در حالت اول، به طور کلی حفرات خاک یکنواخت فرض می‌شوند. اما در حالت دوم، حفرات کوچک‌تر خاک توسط حفرات بزرگ‌تر محصور می‌شوند و با توجه به این‌که در شاخه ترشدگی منحنی نگه‌داشت آب - خاک، ابتدا حفرات کوچک از آب پر می‌شوند، این گروه از حفرات کوچک محصور شده در خاک، خالی از آب باقی می‌مانند. به طور مشابه در حالت سوم، حفرات بزرگ‌تر خاک توسط حفرات کوچک‌تر محصور می‌شوند که این پدیده موجب این می‌شود که در شاخه‌ی خشک‌شدگی منحنی نگه‌داشت آب - خاک، با این‌که ابتدا حفرات بزرگ‌تر با پیشرفت مکش خشک می‌شوند، اما این حفرات بزرگ‌تر محصور شده همچنان پر از آب باقی بمانند. حال با این توضیحات می‌توان تابع چگالی اندازه‌ی حفرات خاک را به صورت معادله‌ی زیر تعریف کرد:^[۹]

$$f(\log(r)) = \frac{d\theta_w}{d\log(r)} \quad (۱۲)$$

رخ می‌دهد و مدل‌سازی برای مکش‌های این ناحیه مؤثرتر انجام خواهد شد. ضریب مکش در مدل ونگنوختن a می‌تواند بر حسب واحد فشار یعنی کیلوپاسکال یا متر ارتفاع بیان شود و به طور کلی این پارامتر با مقدار ورود هوا در ارتباط است. پارامتر n به توزیع اندازه‌ی حفرات خاک و پارامتر m نیز به تقارن کلی منحنی مرتبط است. پارامتر m غالباً با یک تابع معکوس همانند روابط ۴ و ۵ به پارامتر n مرتبط می‌شود.^[۷]

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (۴)$$

$$m = 1 - \frac{1}{2n} \quad (۵)$$

هر دو محدودیت فوق که بر روی پارامتر m اعمال می‌شود، انعطاف‌پذیری مدل ونگنوختن را کاهش می‌دهد اما آن را بسیار ساده‌تر می‌کند.^[۱]

فردلانند و زینگ^[۸]، با در نظر گرفتن توزیع اندازه‌ی حفرات خاک، مدلی مشابه با مدل ونگنوختن به فرم رابطه‌ی ۶ ارائه داده‌اند.

$$\theta = C(\psi) \theta_s \left[\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right) \right]^{-m} \quad (۶)$$

در این رابطه n ، a و m پارامترهای مدل هستند. e ثابت لگاریتم طبیعی و $C(\psi)$ فاکتور اصلاحی است که باعث می‌شود مقدار مکش نظیر درصد رطوبت صفر، مقدار نظری $10^6 kPa$ را به خود گیرد که در نتیجه معادله‌ی آن به فرم رابطه ۷ در می‌آید. فردلانند و زینگ روش گرافیکی معرفی کرده‌اند که می‌توان به کمک آن، سه پارامتر (a, n, m) را با توجه به موقعیت نقاط عطف منحنی نگه‌داشت، تخمین زد.^[۱]

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right] \quad (۷)$$

۲.۲. مدل‌های مبتنی بر تغییرات توزیع اندازه‌ی حفرات

هو و همکاران^[۱] مدل تحلیلی برای در نظر گرفتن تغییرات منحنی نگه‌داشت آب - خاک، در خاک‌های تغییرشکل‌پذیر ارائه دادند. مدل ارائه شده از مفهوم تابع چگالی اندازه‌ی حفرات (PSD) استفاده کرده است و رفتار نگه‌داشت خاک‌ها را در تغییرشکل‌های حاصل از بارگذاری هیدرومکانیکی تخمین می‌زند. تابع چگالی اندازه‌ی حفرات خاک را می‌توان به صورت تابع $f(Inr)$ بیان کرد که $f(Inr)dInr$ بیان‌گر حجم حفرات خاک در واحد حجم خاک در بازه‌ی شعاعی $(Inr, Inr + dInr)$ است.

هو و همکاران با توجه به نتایج آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه (MIP) ^۷ روی خاک‌های رسی از نقاط مختلف جهان دریافتند که تابع چگالی اندازه‌ی حفرات به دست آمده تحت بارگذاری‌های هیدرومکانیکی به طور کلی شکل اولیه‌ی خود را حفظ کرده است و فقط در راستای افقی و قائم تغییراتی در آن به وجود می‌آید. از این رو از دو ضریب χ و η به ترتیب برای اعمال تغییرات در راستای افقی و قائم منحنی PSD اولیه استفاده شده است. در نتیجه، تابع چگالی اندازه‌ی حفرات خاک تغییرشکل‌یافته تحت اثر بارگذاری هیدرومکانیکی را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۸ نوشت:

$$f_t(\ln r) = \eta f_s(\ln r + \ln \chi) = \eta f_s(\ln r\chi) \quad (۸)$$

۳.۲. مدل های مبتنی بر تغییرات نسبت تخلخل

در این گروه از مدل ها، عمدتاً میزان تغییر شکل خاک ها در فرایند خشک شدن و ترشدگی منحنی نگه داشت آب - خاک، با بررسی نحوه تغییرات در نسبت تخلخل نمونه سنجیده می شوند. پس سعی بر این است که علاوه بر پارامترهای مکش و درصد رطوبت، اثرات نسبت تخلخل نیز در رفتار نگهداشت خاک دیده شود. در ادامه به بررسی برخی از مدل های معروف در این بخش پرداخته خواهد شد.

گالیپولی و همکاران^[۱۱] توانستند مدل ون گنوختن^[۶] را به گونه ای اصلاح کنند که اثرات تغییر نسبت تخلخل نیز در این مدل لحاظ شود. بدین منظور کافی است تا به جای ضریب مکش در مدل ون گنوختن، عبارت $a = e^{\gamma/\omega}$ جایگزین شود. γ و ω پارامترهای جدید معادله ای اصلاح شده هستند که باید همانند پارامترهای m و n از نتایج آزمایش منحنی نگهداشت آب - خاک محاسبه شوند. در ادامه، گالیپولی^[۱۱] با تعریف سطوح اصلی خشک شدن و ترشدگی، مدل منحنی نگهداشت آب - خاک را به صورت رابطه ی ۱۶ ارائه داد.

$$S_r = \left[1 + \left(\psi e^{\frac{1}{\lambda_{s,i}} / \omega_i} \right)^{\frac{\lambda_{s,i}}{m_i}} \right]^{-m_i} \quad (16)$$

که در این رابطه اندیس i بیانگر این است که معادله می تواند در هر دو صفحه ای اصلی خشک شدن و ترشدگی صدق کند. پارامتر $\lambda_{s,i}$ ، بیانگر شیب مجانب منحنی در صفحه ای مکش - درجه ای اشباع (در مختصات نیمه لگاریتمی) زمانی که نسبت تخلخل خاک برابر یک است، تعریف می شود. گالیپولی و همکاران^[۱۱] در سال ۲۰۱۵ با تعریف پارامتر مکش اصلاحی (\bar{S}) مطابق رابطه ی ۱۷، توانستند فرم سه بعدی معادله ی ۱۶ را در صفحه ای مکش - درجه ای اشباع - نسبت تخلخل، به صورت دوبعدی بنویسند.

$$\bar{S} = \psi e^{\frac{1}{\lambda_{s,i}}} \quad (17)$$

در رابطه ی ۱۷، زمانی که پارامتر مکش اصلاح شده افزایش یابد، مسیرهای خشک شدن و ترشدگی و وقتی که این پارامتر کاهش یابد، مسیرهای ترشدگی منحنی نگهداشت آب - خاک نشان داده می شود. در نهایت با توجه به فرضیات ارائه شده، گالیپولی و همکاران^[۱۱] توانستند ناحیه ای محدودی برای منحنی نگهداشت آب - خاک ارائه دهند که تمام مسیرهای بارگذاری موجود در داخل این ناحیه ای محدود شده مورد پذیرش و قابل دسترسی است. برای یافتن معادلات منحنی های نگهداشت پویشی که در داخل این نواحی محدود شده وجود دارند، فرض شده است که تغییرات درجه ای اشباع نسبت به مکش اصلاح شده در تمام مسیرهای خشک شدن و ترشدگی منحنی نگهداشت آب - خاک، متناسب با تغییرات درجه ای اشباع نسبت به مکش اصلاح شده در سطوح اصلی خشک شدن و ترشدگی است که این موضوع در رابطه ی ۱۸ نشان داده شده است.

$$\left(\frac{dS_r}{d\bar{S}} \right)_i = \left(\frac{\bar{S}}{\bar{S}_i} \right)^{\beta_i} \left(\frac{dS_r}{d\bar{S}} \right)_{M_i} \quad (18)$$

در رابطه ی ۱۸، β_i پارامتر مدل است و \bar{S}_i بیانگر تصویر مکش اصلاح شده در سطوح اصلی ترشدگی یا خشک شدن است. در نتیجه با انتگرال گیری از رابطه ی فوق می توان معادله تمام منحنی های نگهداشت پویشی را به دست آورد.

ناراتینو^[۱۲] با توسعه ای مدل معروف ون گنوختن^[۶] به بررسی اثرات تغییر نسبت تخلخل بر رفتار نگهداشت آب در خاک های تغییر شکل پذیر پرداخته است. با بررسی رفتار نگهداشت خاک های رسی بازسازی شده در این پژوهش مشاهده می شود که

که منظور از θ_w میزان رطوبت حجمی خاک در شرایطی است که همه ی حرقات با شعاع کمتر یا مساوی r از آب پر شده اند. چن و همکاران برای در نظر گرفتن اثرات غیریکنواختی در خاک، ضریبی به نام P_r معرفی کرده اند که مطابق رابطه ی ۱۳ به دست آمده است و به معنای نسبت حرقات کوچک تر از شعاع r به کل حرقات موجود در خاک است. با جایگذاری رابطه ی ۱۳ در رابطه ی ۱۴ می توان سهم حرقات بزرگ تر خاک را که توسط حرقات ریزتر محصور شده اند و در حین خشک شدن نمی توانند زهکشی شوند به دست آورد، در رابطه ی ۱۴ پارامتر n بیانگر تعداد حرقات متصل به یک حفره ی موجود در خاک معرفی می شود.

$$P_r = \frac{\int_{\log(r_{\min})}^{\log(r)} F(\log(r)) d\log(r)}{\int_{\log(r_{\min})}^{\log(r_{\max})} F(\log(r)) d\log(r)} \quad (13)$$

در رابطه ی ۱۳ عبارت $F(\log(r))$ در واقع همان تابع چگالی اندازه ی حرقات واقعی خاک است که متفاوت از مقدار اندازه گیری شده توسط آزمایش تخلخل سنجی نفوذ جیوه یعنی $f(\log(r))$ است.

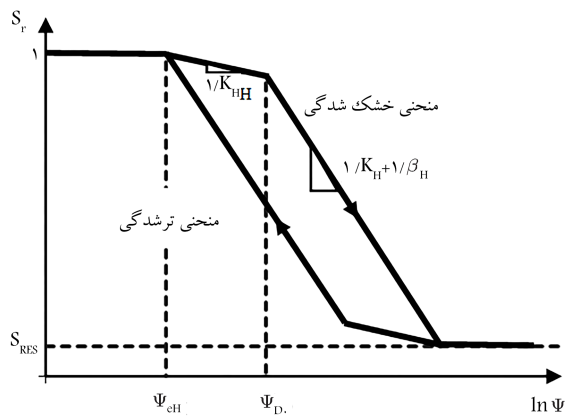
$$a = (1 - P_r) P_r^n \quad (14)$$

در نتیجه، میزان رطوبت حجمی آب زهکشی شده در شاخه ی خشک شدن منحنی نگهداشت به صورت رابطه ی ۱۵ بیان می شود:

$$\theta_i = \int_{\log(r)}^{\log(r_{\max})} F(\log(r)) d\log(r) - a \int_{\log(r_{\min})}^{\log(r_{\max})} F(\log(r)) d\log(r) \quad (15)$$

همچنین به طور مشابه، می توان رابطه یی برای شاخه ی ترشدگی منحنی نگهداشت آب - خاک نیز به دست آورد.

یکی از مشکلات روش های آزمایشگاهی به دست آوردن منحنی نگهداشت آب - خاک، زمان بردن این آزمایش ها است. سان و همکاران^[۱] با رویکرد خلاقانه ای توانستند به کمک انجام تعداد محدودی آزمایش تخلخل سنجی نفوذ جیوه، مدلی تحلیلی برای منحنی نگهداشت ارائه دهند که تاحدودی این مشکل را رفع می کند. در این پژوهش با بررسی نتایج آزمایش های تخلخل سنجی نفوذ جیوه و منحنی نگهداشت، می توان فهمید که در نسبت تخلخل های حداقل خاک، نتایج این دو گروه از آزمایش ها مطابقت قابل قبولی با هم دیگر دارد. پس با تعریف سطح مبنا برای حالتی که نسبت تخلخل خاک به کمترین میزان خود می رسد (یا تغییرات حجمی خاک تقریباً در این نسبت تخلخل قابل صرف نظر کردن می شود) و انجام تعداد محدودی آزمایش تخلخل سنجی نفوذ جیوه در نسبت تخلخل های مختلف، می توان تابعی در فضای سه بعدی، نسبت تخلخل - درجه اشباع - مکش، به دست آورد که قادر است تغییرات در ظرفیت نگهداشت آب در خاک برای شاخه ی خشک شدن منحنی نگهداشت خاک های تغییر شکل پذیر را بررسی کند. اما مشکل این رویکرد در پرهزینه بودن آزمایش تخلخل سنجی نفوذ جیوه و همچنین بررسی نکردن پدیده ی هیستریزس هیدرولیکی است.



شکل ۲. مدل الاستوپلاستیک منحنی نگهداشت آب - خاک. [۱۴]

$$dS_r^p = \frac{d\psi}{\beta_H \psi_D} \operatorname{sign} \left(\ln \left(\frac{\psi}{\psi_D} \right) + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\psi_{D_0}}{\psi_{eH}} \right) \right) \frac{\partial f}{\partial \psi} \quad (23)$$

که β_H ضریب فشردگی بخش خمیری درجه‌ی اشباع است و به صورت زیر می‌توان آن را محاسبه کرد:

$$\ln \left(\frac{\psi_D}{\psi_{D_0}} \right) = \beta_H S_r^p \quad (24)$$

در این مدل، مکش متناظر با مقدار ورود هوا به صورت تابعی از حجم اسکلت خاک معرفی می‌شود. پس در خاک‌های تغییر شکل پذیر می‌توان تغییرات این مقدار مکش را با در نظر گرفتن تغییرات حجمی نمونه، مطابق رابطه‌ی ۲۵ به دست آورد.

$$\psi_{eH} = \psi_e + \pi_H \varepsilon_v \quad (25)$$

در رابطه‌ی فوق، π_H پارامتر مربوط به نوع خاک، ψ_e مقدار ورود هوای مرجع و ε_v کرنش حجمی نمونه تعریف می‌شود. در نتیجه با یک رویکرد خلاقانه، نوٹ و لالوئی موفق شده‌اند مدل تحلیلی مناسبی برای خاک‌های تغییر شکل پذیر ارائه دهند.

۵.۲. مدل‌های مبتنی بر ریزساختار خاک

در خاک‌های رسی متراکم شده، حفرات موجود در خاک را می‌توان به دو گروه حفرات بین دانه‌یی^۸ یا درشت‌حفرات و حفرات درون‌دانه‌یی^۹ یا ریزحفرات تقسیم کرد، که نقش مهمی در رفتار نگهداشت آب - خاک دارند. دیودون و همکاران [۱۵] با در نظر گرفتن موثبتگی به عنوان فرایند غالب نگه‌داشت آب در حفرات بین‌دانه‌یی و جذب به عنوان فرایند غالب نگهداشت آب در حفرات درون‌دانه‌یی، مدلی برای بررسی رفتار نگهداشت آب در خاک‌های رسی متراکم شده ارائه دادند. خصوصیات قسمت ریزحفرات خاک مستقل از تراکم است؛ پس در بارگذاری‌های هیدرومکانیکی ثابت فرض می‌شود؛ اما این موضوع در رابطه با درشت‌حفرات خاک صادق نیست و حجم و اندازه‌ی حفرات بین‌دانه‌یی تغییر می‌یابد.

در این مدل، درجه‌ی اشباع را می‌توان به صورت مجموعی از درجات اشباع مربوط به ریزحفرات (S_{rm}) و درشت‌حفرات (S_{rM}) خاک، مطابق رابطه‌ی ۲۶ نوشت. منظور از e_w نسبت حجم آب منفذی به حجم دانه‌های خاک است که از دو بخش مربوط به ریزحفرات (e_{wm}) و درشت‌حفرات (e_{wM}) تشکیل می‌شود.

$$S_r = \frac{e_w}{e} = \frac{e_{wm}}{e} S_{rm} + \frac{e_{wM}}{e} S_{rM} \quad (26)$$

در مکش‌های متناظر با مقدار ورود هوا و بیشتر از آن، نسبت آب موجود در نمونه (e_w) مستقل از نسبت تخلخل نمونه رفتار می‌کند. به طور مشابه برای نمونه‌های متراکم شده رسی نیز در مکش‌هایی که درشت‌حفرات خاک از آب خالی شده‌اند، نسبت آب موجود مستقل از نسبت تخلخل است. علاوه بر نتایج فوق مشاهده شده است که منحنی‌های خشک‌شدگی و ترشدگی اصلی در هر دو نوع نمونه بازسازی شده و متراکم شده وابسته به نسبت تخلخل‌اند به طوری که نمونه‌های با نسبت تخلخل کمتر عمدتاً دارای درجه‌ی اشباع بیشتری و مکش متناظر با مقدار ورود هوای بیشتری هستند. همچنین می‌توان به این نکته اشاره کرد که رفتار منحنی‌های اصلی خشک‌شدگی و ترشدگی مستقل از نوع بارگذاری هیدرولیکی و مکانیکی است. با توجه به مشاهدات فوق، تاراتینو مدل تحلیلی نگهداشت آب - خاک را مطابق رابطه‌ی ۱۹ پیشنهاد داده است که در این رابطه، a ، b و n پارامترهای مدل‌اند. این رابطه برای هر دو شاخه‌ی خشک‌شدگی و ترشدگی منحنی نگهداشت برقرار است. محدودیت اصلی مدل تحلیلی تاراتینو، در عدم بررسی رفتار نگهداشت خاک‌های رسی با پلاستیسیته‌ی بالا و خاک‌های درشت‌دانه با درصد ریزدانه‌ی کم می‌باشد.

$$(S_r) = \left\{ 1 + \left[\left(\frac{e}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \psi \right]^n \right\}^{-\frac{b}{n}} \quad (19)$$

۴.۲. مدل‌های مبتنی بر سطح تسلیم

نوٹ و لالوئی [۱۴] با استفاده از مفاهیم مدل رفتاری الاستوپلاستیک، سطح تسلیمی برای منحنی نگه‌داشت آب - خاک معرفی کرده‌اند که از مفهوم سخت‌شوندگی کیشماتیکی برای تمایز بین شاخه‌ی خشک‌شدگی و ترشدگی (هیستریزیس هیدرولیکی) استفاده می‌کند. همچنین، تغییرات جزئی درجه‌ی اشباع به دو صورت کشسانی و خمیری مطابق رابطه‌ی ۲۰ تعریف می‌شود.

$$dS_r = dS_r^e + dS_r^p \quad (20)$$

تغییرات جزئی درجه‌ی اشباع کشسانی را می‌توان با توجه به شکل ۲ و با استفاده از رابطه‌ی ۲۱ محاسبه کرد.

$$dS_r^e = \frac{d\psi}{K_H \times (\psi / \psi_{eH})} \quad (21)$$

که منظور از ψ_{eH} مکش متناظر با مقدار ورود هوا و K_H مشخصه‌ی مدول کشسانی خاک است. با توجه به شکل ۲ زمانی که مقادیر مکش کمتر از ψ_{eH} باشد، درجه‌ی اشباع خاک برابر یک می‌شود. پس مقادیر درجه‌ی اشباع کشسانی در مکش‌های بین ψ_{eH} و مکش پسماند رخ می‌دهد، که این موضوع نشان‌دهنده‌ی وجود یک سطح تسلیم در خاک است. معادله‌ی این سطح تسلیم را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۲۲ بیان کرد.

$$f = \left\| \ln(\psi) - \ln(\psi_D) + \frac{1}{\gamma} [\ln(\psi_{D_0}) - \ln(\psi_{eH})] \right\| - \frac{1}{\gamma} [\ln(\psi_{D_0}) - \ln(\psi_{eH})] \quad (22)$$

که در این رابطه، ψ_D مکش متناظر با تسلیم شاخه‌ی خشک‌شدگی خاک تعریف می‌شود و تعبیری مشابه با تنش پیش‌تحکیمی دارد. همچنین باید اشاره کرد که با افزایش در مکش تسلیم مرجع (ψ_{D_0})، این مقدار هم تغییر می‌کند. قانون جریان متناظر با سطح تسلیم کنونی را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۲۳ تعریف کرد.

شود، می‌توان فرم تغییرات جزئی درجه‌ی اشباع خاک را به شکل رابطه‌ی ۳۱ نوشت.

$$\zeta = \frac{e_a}{e} \quad (30)$$

$$\begin{cases} dS_r = \zeta dS_r^a + (1 - \zeta) dS_r^c + (dS_r^a - dS_r^c) d\zeta \\ dS_r^c = dS_r^{ce} + dS_r^{cp} \\ dS_r^a = dS_r^{ae} + dS_r^{ap} \end{cases} \quad (31)$$

در این روابط، اندیس a به معنای جذب و اندیس c به معنای موئینگی و اندیس‌های e و p به ترتیب به معنای کشسانی و خمیری‌اند.

ژو و پنگ [۱۸] مدل تحلیلی برای منحنی نگهداشت آب - خاک ارائه دادند که اثرات تنش خالص بر ساختار خاک را در نظر می‌گیرد. معمولاً در اکثر مدل‌های تحلیلی، تأثیرات تنش خالص فقط در پارامتر نسبت تخلخل لحاظ می‌شود در حالی که می‌توان مواردی یافت که نمونه‌های خاک با این‌که دارای نسبت تخلخل مشابهی هستند، ظرفیت نگهداشت مختلفی دارند. این موضوع به علت تغییراتی است که در ساختار حفرات تحت اثر تنش وارده به وجود آمده است. منظور از ساختار حفرات، توزیع اندازه‌ی حفرات خاک، شکل حفرات خاک و جهت‌گیری آنهاست. با توجه به این‌که محدودی کشسانی خاک بسیار ناچیز است، می‌توان فهمید که حتی در تنش‌های ناچیز هم، خاک دچار تغییرشکل‌های خمیری می‌شود. در محدوده‌ی تغییرشکل‌های خمیری به طور کلی ساختار حفرات خاک تغییر می‌یابد و به تبع آن وضعیت نگه‌داشت آب نیز تغییر خواهد یافت. ژو و پنگ با بررسی نتایج آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه روی نمونه‌های تحکیم‌یافته تحت مقادیر تنش مختلف، دریافتند که در حین تحکیم، درشت‌حفرات خاک به میزان قابل توجهی تغییر می‌یابند اما توزیع ریزحفرات تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در نتیجه می‌توان نسبت تخلخل خاک را به صورت مجموعی از نسبت تخلخل مربوط به ریزحفرات (e_m) و نسبت تخلخل مربوط به درشت‌حفرات (e_M) دانست. بر این اساس می‌توان متغیر حالت مربوط به ساختار خاک را به صورت رابطه‌ی ۳۲ تعریف کرد.

$$\zeta_m = \frac{e_m}{e} \quad (32)$$

در اثر اعمال تنش، با توجه به این‌که نسبت تخلخل مربوط به ریزحفرات خاک ثابت مانده است ولی نسبت تخلخل کل، کاهش می‌یابد، می‌توان فهمید که پارامتر فوق در اثر اعمال تنش، افزایش خواهد یافت. همچنین خاک‌های با ریزحفرات بیشتر، دارای مکش متناظر با مقدار ورود هوای بیشتر و درصد رطوبت بیشتری خواهند بود. این اثر را می‌توان در پارامتر مربوط به مقدار ورود هوا در مدل ونگونختن [۶] به صورت رابطه‌ی ۳۳ در نظر گرفت.

$$a = m_r e^{-m_r \left(\frac{\zeta_m}{\zeta_m^{ref}} \right)^{mm}} \quad (33)$$

که در این رابطه‌ی ζ_m^{ref} مربوط به شرایطی است که تنش خالص برابر صفر باشد. برای به دست آوردن پارامتر ζ_m ، ژو و پنگ رابطه‌ی نیمه‌تجربی با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی به صورت زیر ارائه دادند.

$$\frac{\zeta_m}{\zeta_m^{ref}} = \left(1 + \frac{p'}{p_{atm}} \right)^b \quad (34)$$

که در این رابطه p' فشار مؤثر میانگین، p_{atm} فشار اتمسفر و b پارامتر مدل است. در نتیجه با رابطه‌ی ۳۴ می‌توان اثرات تنش خالص بر ساختار حفرات خاک را در منحنی نگهداشت آب - خاک در نظر گرفت اما برای به دست آوردن اثرات تنش

با فرض برقراری تعادل ترمودینامیکی بین ریزحفرات و درشت‌حفرات خاک، در محدوده‌ی ریزحفرات، می‌توان نسبت آب منفذی را با استفاده از معادله‌ی دوینین [۱۶] به صورت رابطه‌ی ۲۷ نوشت:

$$e_{wm} = e_m \exp \{ -[C_{ads} s]^{n_{ads}} \} \quad (27)$$

در رابطه‌ی فوق، C_{ads} و n_{ads} ثابت‌های مصالح هستند که پارامتر اول، کنترل‌کننده‌ی انحنای منحنی نگهداشت در مکش‌های بالا و پارامتر دوم، کنترل‌کننده‌ی مکش متناظر با مقدار ورود هوا در ریزحفرات خاک است. برای بررسی بخش درشت‌حفرات خاک نیز می‌توان از رابطه‌ی ونگونختن [۶] استفاده کرد. به کمک این رابطه، نسبت آب منفذی موجود در درشت‌حفرات خاک با استفاده از رابطه‌ی ۲۶ به دست می‌آید.

$$e_{wM} = (e - e_m) \left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right]^{-m} \quad (28)$$

ریزحفرات موجود در خاک بتونیت به میزان قابل توجهی وابسته به درصد رطوبت‌اند. در چرخه‌های خشک‌شدگی و ترشدگی منحنی نگهداشت آب - خاک، ریزحفرات خاک و به تبع آن e_m دچار تغییرات می‌شوند. این تغییرات ساختاری را می‌توان توسط رابطه‌ی ۲۹ به دست آورد.

$$e_m = \beta_0 e_w^2 + \beta_1 e_w + e_{m0} \quad (29)$$

که در رابطه‌ی ۲۹، e_{m0} نسبت تخلخل مربوط به ریزحفرات خاک برای مصالح خشک است و β_0 و β_1 پارامترهایی هستند که پتانسیل تورم دانه‌ها را مشخص می‌کنند. در نتیجه، مدل ارائه شده توسط دیودون و همکاران با سه دسته پارامتر، قادر به مدل‌سازی منحنی نگهداشت آب - خاک مربوط به رس‌های متراکم شده است.

چیائو و همکاران [۱۷] یک مدل الاستوپلاستیک برای خاک‌های مختلف ارائه دادند که دو سازوکار اصلی نگه‌داشت آب در خاک یعنی موئینگی و جذب را در نظر می‌گیرد و ارتباط بین این دو سازوکار را از طریق پارامتری به نام عامل نسبیّت، در خاک‌های مختلف برقرار می‌کند. بر اساس این مدل، حفرات خاک را می‌توان به دو صورت حفرات مربعی شکل (نسبتاً بزرگ) و حفرات شکاف‌شکل (کوچک) تقسیم کرد. با در نظر گرفتن این دو گروه از حفرات در خاک، می‌توان دریافت که در یک شرایط هیدرولیکی معین، اهمیت نسبی هر یک از دو سازوکار نگهداشت آب در خاک، به هندسه‌ی حفرات خاک وابسته است.

چیائو و همکاران با رویکردی مشابه با روش نوث و لالوئی [۱۴]، یک مدل الاستوپلاستیک مشابه شکل ۲ ارائه داده‌اند که برای هر سازوکار نگهداشت، بخش الاستیک مدل بیان‌گر تغییرات برگشت‌پذیر درجه‌ی اشباع است و نشان‌دهنده‌ی رفتار تمام منحنی‌های نگهداشت واقع در ناحیه‌ی محدود شده توسط منحنی‌های اصلی خشک‌شدگی و ترشدگی است. بخش الاستوپلاستیک مدل بیان‌گر تغییرات برگشت‌ناپذیر درجه‌ی اشباع است و نشان‌دهنده‌ی رفتار منحنی‌های اصلی است که در واقع مرزهای ناحیه‌ی محدود شده را تشکیل می‌دهند. همچنین در این مدل، از رابطه‌ی سخت‌شوندگی کینماتیکی به منظور بررسی رفتار هیستریزس هیدرولیکی در منحنی نگهداشت آب - خاک استفاده می‌شود.

چنانچه عامل نسبیّت برای منحنی نگهداشت، مطابق رابطه‌ی ۳۰ به صورت نسبت تخلخل مربوط به سازوکار جذب (e_a) به نسبت تخلخل کل خاک تعریف

نظر گرفتن آب موجود در ریزحفرات خاک بتونیت ارائه داده‌اند. به طور کلی درصد رطوبت مربوط به ریزحفرات خاک را می‌توان توسط رابطه‌ی ۴۰ به دست آورد.

$$w_m = w_{mC} + \Delta w_{mO} \quad (40)$$

در این رابطه w_{mC} سهمی از درصد رطوبت است که مربوط به ریزحفرات است و به فرایند کریستاله شدن مربوط می‌شود. برای به دست آوردن این پارامتر می‌توان از رابطه‌ی ۴۱ استفاده کرد که در این رابطه، A مدول ثابت هامکر است که توسط اد و ترولر^[۲۳] توصیف شده است، ψ_m مکش ریزساختاری، S_s سطح مخصوص رس و ρw_m چگالی آب جذب سطحی در ریزحفرات خاک است که از چگالی آب آزاد کمی بیشتر است.

$$w_{mC} = \sqrt{\frac{A}{\rho \pi \psi_m}} S_s \rho w_m \quad (41)$$

همچنین در رابطه‌ی ۴۰ عبارت Δw_{mO} مربوط به اثرات تورم اسمزی (یا تورم لایه‌ی آب دوگانه) است که در مکش‌های کم اتفاق می‌افتد. برای محاسبه‌ی این عبارت می‌توان از رابطه‌ی ۴۲ استفاده کرد که در این رابطه، B پارامتر مصالح، ψ_{mO} مکش مربوط به بخش ریزحفرات خاک است که در آن تورم اسمزی، فرایند غالب است و P_{ATM} فشار اتمسفر است.

$$\Delta w_{mO} = -B Ln \left(\frac{\psi_m + P_{ATM}}{\psi_{mO} + P_{ATM}} \right) \quad (42)$$

در نتیجه با محاسبه‌ی درصد رطوبت مربوط به ریزحفرات خاک با توجه به رابطه‌ی ۴۰، نسبت تخلخل مربوط به ریزحفرات خاک را می‌توان به کمک رابطه‌ی ۴۳ به دست آورد.

$$e_m = G_s w_m \quad (43)$$

به طور کلی استفاده از روابط فوق فقط زمانی می‌تواند کارساز باشد که اطلاعات کافی از خاک مورد نظر در دسترس باشد.

در خاک‌های غیراشباع، منحنی نگهداشت خشک‌شدگی و ترشدگی، به دلیل پدیده‌ی هیستریزیس هیدرولیکی بر هم منطبق نمی‌شوند و به میزان قابل توجهی از هم فاصله دارند. علت هیستریزیس را می‌توان در دو سازوکار اصلی نگهداشت آب در خاک یعنی موئینگی و جذب سطحی جستجو کرد. به طور کلی مواردی که در سازوکار موئینگی سبب بروز این پدیده می‌شوند، عبارت‌اند از: اثر بتری جوهر، پدیده‌ی سالخورده‌گی خاک، اثرات هوای به دام افتاده، تغییرات در زاویه‌ی تماسی و اثرات بخار آب. همچنین در سازوکار جذب سطحی نیز می‌توان به مواردی همچون دما، میزان رس موجود در خاک و سطح مخصوص خاک اشاره کرد.^[۲۷-۲۴] ژائو و همکاران^[۲۷] با بررسی دو عامل اثر بتری جوهری و هوای به دام افتاده، توانستند اثرات پدیده‌ی هیستریزیس هیدرولیکی را در رفتار نگهداشت آب در خاک به دست آورند. اثر بتری جوهر به دلیل اشکال بی‌قاعده و اندازه‌های متفاوت حفرات به هم پیوسته خاک ایجاد می‌شود. در شرایطی که یک حفره‌ی بزرگ با شعاع R توسط حفرات کوچک‌تر با شعاع r احاطه یابند، فرایند خشک‌شدگی به شعاع r و فرایند ترشدگی به شعاع R وابسته خواهد بود.^[۲۷-۲۴] پس مقدار کاهش در پارامتر میزان رطوبت حجمی منحنی نگهداشت اولیه‌ی خاک به دلیل اثر بتری جوهر را می‌توان به کمک رابطه‌ی ۴۴ محاسبه کرد. در این رابطه $\Delta \theta_1$ تغییرات در میزان رطوبت حجمی، θ^d میزان رطوبت حجمی شاخه‌ی خشک‌شدگی خاک، θ_s^d میزان رطوبت حجمی در حالت اشباع، θ_m^d

خالص بر نسبت تخلخل خاک، می‌توان از رابطه‌ی معروف مدل رفتاری آلونسو و همکاران^[۱۹] به صورت زیر استفاده کرد.

$$de = -\alpha_p \frac{dp}{p_r + p} - \alpha_s \frac{dp}{p_{atm} + \psi} \quad (35)$$

در این رابطه p تنش خالص میانگین و p_r فشار مرجع است که معمولاً برابر با یک کیلو پاسکال فرض می‌شود. α_p بیان‌گر فشردگی خاک تحت اثر تنش خالص میانگین و α_s بیان‌گر فشردگی خاک تحت اثر مکش است. در نهایت با استفاده از روابط ۳۳ و ۳۵ و استفاده از مدل ون‌گنوختن می‌توان رابطه‌ی جدیدی برای منحنی نگهداشت آب - خاک ارائه کرد که علاوه بر در نظر گرفتن تغییرات نسبت تخلخل تحت اثر تنش خالص، اثرات تغییر در ساختار حفرات را نیز در نظر می‌گیرد. در این رابطه، γ پارامتر وجود دارد که از طریق آزمایش نگهداشت قابل محاسبه است. مزیت این مدل در این است که نیاز به انجام آزمایش‌هایی همچون تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه که چندان رایج نیست، نمی‌باشد.

بهارات و گپاک^[۲۰] در پژوهشی به بررسی شاخه‌ی خشک‌شدگی منحنی نگهداشت آب - خاک در نمونه‌های بتونیت در شرایط حجم ثابت پرداخته‌اند. مدل تحلیلی ارائه شده بر مبنای مدل کوچس^[۲۱] است که فقط برای خاک‌هایی که دارای تغییرات حجم ناچیزی هستند، کارایی دارد. با توجه به این مدل، رابطه‌ی میان درجه‌ی اشباع (S_e) و مکش برای سازوکار موئینگی در بتونیت به صورت رابطه‌ی ۳۶ تعریف می‌شود.

$$S_e = 1 - \left[\left(\frac{\psi_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{\psi_{co}}{\psi} \right)^2 \right] \quad (36)$$

که در این رابطه m پارامتر تجربی و ψ_{co} مکش معادل موئینگی است که بر اساس رابطه‌ی اصلاح شده‌ی یانگ - لاپلاس به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\psi_{co} = T_s \cos \alpha \frac{\rho_s S_s}{e} \quad (37)$$

در این رابطه، T_s کشش سطحی آب، α زاویه‌ی تماس بین آب و سطح ذرات خاک، ρ_s چگالی دانه‌های جامد خاک، S_s سطح مخصوص و e نسبت تخلخل است. درجه‌ی اشباع متناظر با فرایند جذب (S_a) نیز بر اساس تعادل دینامیکی درصد رطوبت نمونه در ناحیه‌ی جذب، مطابق رابطه‌ی ۳۸ تعریف می‌شود.

$$S_a = a_c C_h \frac{\left(\frac{\psi_{co}}{\psi_n} \right)^{\frac{1}{n}}}{e^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\psi_{co}}{\psi_n} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (38)$$

که در این رابطه a_c پارامتر تجربی این مدل، ψ_n پارامتر بی‌بعد ساز (برابر ۱kPa است) و C_h پارامتر مربوط به رابطه‌ی فردلاند و زینگ^[۸] است که در رابطه‌ی ۱۰ معرفی شده است. در نهایت درجه‌ی اشباع کل نمونه بتونیت در شرایط حجم ثابت در شاخه‌ی ترشدگی را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۳۹ به دست آورد.

$$S_r = S_e + S_a (1 - S_e) \quad (39)$$

به طور کلی ضعف اساسی این پژوهش عدم بررسی رفتار هیستریزیس نمونه‌های بتونیت است. همچنین از مدل ارائه شده نمی‌توان برای بررسی رفتار نمونه‌های بتونیت دانه‌ای که ظرفیت نگهداشت کمتری در حضور نمک دارند، استفاده کرد. ناواری و همکاران^[۲۱] با مشاهده‌ی این موضوع که بیشتر سهم نگهداشت آب در خاک بتونیت، مربوط به ریزحفرات خاک و سازوکار جذب است، رابطه‌ی برای در

میزان رطوبت حجمی متناظر با مکش نمونه قبل شروع فرایند ترشدگی تعریف می‌شود.

$$\Delta\theta_1 = [\theta_s^d - \theta^d] [\theta_s^d - \theta_m^d] \quad (44)$$

همچنین در رابطه با اثر هوای به دام افتاده در خاک باید توجه کرد که در مکش‌های کم، فاز هوا ناپیوسته و در مکش‌های بالا، فاز هوا پیوسته است و به طور کلی در فاز هوای پیوسته، میزان هوای به دام افتاده کمتر است. در نتیجه، منحنی خشک‌شدگی همواره درصد رطوبت بیشتری نسبت به منحنی ترشدگی دارد. [27، 28] در نهایت مقدار کاهش در پارامتر میزان رطوبت حجمی منحنی نگهداشت اولیه خاک به دلیل اثر هوای به دام افتاده را می‌توان به کمک رابطه ۴۵ محاسبه کرد. در این رابطه a ضریب اثر هوای به دام افتاده است و دارای محدوده‌ی ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ می‌باشد. همچنین α^d ، n^d و m^d پارامترهای مدل مربوط به شاخه‌ی خشک‌شدگی است.

$$\Delta\theta_2 = (1 - a) \theta_s^d \left[1 + (\alpha^d \psi)^{n^d} \right]^{-m^d} \quad (45)$$

در نهایت، با توجه به دو اثر فوق می‌توان مطابق رابطه‌ی ۴۶، منحنی ترشدگی اولیه‌ی خاک (θ^w) را از منحنی خشک‌شدگی اولیه‌ی خاک (θ^d) به دست آورد.

$$\theta^w = \theta^d - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2 \quad (46)$$

۶.۲. مدل‌های مربوط به محیط‌های چندفازه

در این بخش به معرفی مدل‌های تحلیلی منحنی نگهداشت آب - خاک در محیط‌های چندفازه پرداخته می‌شود. منظور از محیط‌های چندفازه این است که علاوه بر ذرات خاک، آب حفره‌یی و هوای حفره‌یی مواد دیگری نیز در ساختار خاک وجود دارد که بر رفتار نگهداشت خاک‌های مختلف تأثیرگذار است. در ادامه به این گروه از مدل‌ها پرداخته می‌شود.

ژو و چن [29] مدل تحلیلی برای خاک‌های بهسازی شده با زیست‌بسیار^{۱۰} ارائه داده‌اند. زیست‌بسیار به منظور کاهش نفوذپذیری خاک‌ها و در نتیجه کنترل مسیر جریان نفت در صنایع پتروشیمی کاربرد دارند. این مواد قادر به تغییر در ساختار حفرات خاک و در نتیجه رفتار نگهداشت آب در خاک هستند. باید توجه شود که زیست‌بسیار همانند خاک قادر به نگهداشت آب‌اند و عمدتاً با جذب آب متورم می‌شوند و تمایل به تغییر حجم خاک دارند. ولی میزان تورم زیست‌بسیار توسط ذرات خاک محدود می‌شود.

در این رویکرد، M_s جرم کل ذرات خاک، M_p جرم خشک زیست‌بسیار، $M_w(p)$ و $M_w(s)$ به ترتیب جرم آب موجود در بین ذرات خاک و زیست‌بسیار و جرم آب ذخیره شده در داخل زیست‌بسیار معرفی می‌شود. همچنین V_s حجم کل ذرات خاک، V_a حجم هوای حفره‌یی، V_p حجم کل زیست‌بسیار، $V_w(s)$ و $V_w(p)$ به ترتیب حجم آب موجود بین ذرات خاک و زیست‌بسیار و حجم آب ذخیره شده در داخل زیست‌بسیار معرفی می‌شود. برای به دست آوردن منحنی نگهداشت آب در این پژوهش فرضیاتی در نظر گرفته شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. نخست، زیست‌بسیار در هر محدوده‌یی از مکش، اشباع فرض می‌شوند. دوم، چگالی آب جذب شده توسط زیست‌بسیار با چگالی آب موجود در حفرات خاک یکسان است. سوم، در این مدل برای سهولت کار فقط از مکش ماتریسی استفاده

می‌شود. چهارم، غلظت زیست‌بسیار در داخل خاک ثابت فرض می‌شود و پنجم، تورم زیست‌بسیار در فرایند ترشدگی موجب افزایش حجم خاک می‌شود. البته باید اشاره کرد که مدل حاضر، قادر به در نظر گرفتن اندرکنش بین مواد بیوشیمیایی و لایه‌ی دوگانه رس نیست. با توجه به این فرضیات می‌توان مقدار نگهداشت آب توسط زیست‌بسیار را با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و زیست‌بسیار به دست آورد. پس می‌توان رابطه‌ی میان مکش و روابط وزنی - حجمی را به صورت زیر نوشت.

$$f_{w(p)} = \frac{M_w(p)}{M_p} = \frac{a}{1 + \psi^b} C_{in} \quad (47)$$

$$e_{w(p)} = \frac{V_w(p)}{V_s} = \left(\frac{M_p}{M_s} \right) \frac{a}{1 + \psi^b} G_s C_{in} \quad (48)$$

در این روابط، G_s چگالی دانه‌های خاک، a و b پارامترهای مدل و C_{in} ضریب اندرکنش بین دانه‌های خاک و زیست‌بسیار است که بر اساس رابطه‌ی ۴۹ به دست می‌آید.

$$C_{in} = \frac{1}{1 + \left(\left(\frac{M_p}{M_s} \right) \frac{a}{1 + \psi^b} G_s / e_0 \right)^c} \quad (49)$$

در رابطه‌ی ۴۹، C پارامتر مربوط به اندرکنش ذرات خاک و زیست‌بسیار است و همچنین e_0 نسبت تخلخل اولیه‌ی نمونه خاک یعنی زمانی که $e_{w(p)}$ صفر است، معرفی می‌شود. برای به دست آوردن مقدار نگهداشت آب در داخل حفرات خاک نیز می‌توان از رابطه‌ی ارائه شده توسط گالیولی و همکاران [10] استفاده کرد که در این مدل به صورت رابطه‌ی ۵۰ قابل‌بازنویسی است. که مقادیر مختلف m_i این رابطه، پارامترهای این مدل‌اند.

$$f_w(s) = \frac{M_w(s)}{M_s} = (1 + (\psi/m_r e^{-m_r}) m_r)^{-m_1} \frac{e}{G_s} \quad (50)$$

در نهایت رابطه‌ی میان درصد رطوبت و مکش برای خاک اصلاح شده با زیست‌بسیار را می‌توان به کمک رابطه‌ی ۵۱ به دست آورد.

$$w = \frac{f_w(s) + \left(\frac{M_p}{M_s} \right) f_w(p)}{1 + \left(\frac{M_p}{M_s} \right)} \quad (51)$$

در نتیجه می‌توان منحنی نگهداشت آب - خاک را با در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و زیست‌بسیار به دست آورد. باید یادآوری کرد که ضعف بزرگ مدل ژو و چن در این است که تغییرات در توزیع اندازه‌ی حفرات خاک و اندرکنش بین مواد بیوشیمیایی و لایه‌ی دوگانه ذرات خاک در این مدل لحاظ نشده است. به طور کلی می‌توان گفت که زیست‌بسیار سبب افزایش ظرفیت نگهداشت آب می‌شوند.

پنگ و همکاران [30] یک مدل تحلیلی نوین با در نظر گرفتن اثرات ریشه‌ی گیاهان ارائه داده‌اند. ریشه گیاهان به دلیل اشغال کردن حفرات موجود در خاک و به تبع آن تغییرات در اندازه‌ی حفرات، موجب تغییرات در ساختار خاک می‌شود و در نتیجه وضعیت نگهداشت آب در خاک‌های مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پس با در نظر گرفتن اثرات ریشه‌ی گیاهان می‌توان نسبت تخلخل خاک را به صورت رابطه‌ی ۵۲ نوشت.

$$e = \frac{e_0 - R_v (1 + e_0)}{1 + R_v (1 + e_0)} \quad (52)$$

همچنین در مدت زمان نسبتاً طولانی که جریان گذرا تقریباً از بین رفته و شرایط تعادل ایجاد شده است (یعنی دیگر مابقی از جاذب هدر نمی‌رود) می‌توان رابطه‌ی ۵۴ را به صورت رابطه‌ی زیر نوشت.

$$U_e = \frac{A\varphi P_c}{gm_s} \quad (55)$$

در نتیجه اختلاف دو رابطه‌ی ۵۴ و ۵۵ بیان‌گر میزان کل هدر رفت مایع از جاذب است که به صورت رابطه‌ی زیر بیان می‌شود.

$$U_L = U_s - U_e \quad (56)$$

در نهایت، ظرفیت جذب را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت.

$$U_t = U_L \exp(-Kt) + U_e \quad (57)$$

که در این رابطه، پارامتر K را اصطلاحاً ضریب کمان می‌نامند که توسط رابطه‌ی ۵۸ تعریف می‌شود.

$$K = \frac{k\rho g}{\mu H} \quad (58)$$

۳. مقایسه‌ی عملکرد برخی از مهم‌ترین مدل‌ها

در این بخش به مقایسه‌ی عملکرد برخی از مهم‌ترین مدل‌های نگهداشت مربوط به گروه‌های معرفی شده در بخش قبل پرداخته می‌شود. برای نیل به این هدف، از مدل معروف ون‌گوختن^[۶] به عنوان مبنا برای مقایسه‌ی عملکرد سایر مدل‌ها استفاده می‌شود؛ زیرا این مدل در متون فنی بسیار استفاده شده و از مقبولیت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های کلاسیک برخوردار است. گروه دوم مدل‌ها مبتنی بر تغییرات توزیع اندازه‌ی حفرات است که غالباً بر انجام آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه استوار است. برای مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های این گروه، مطابق شکل ۳ برای یک نمونه خاک رسی موسوم به بوم‌کلی^[۲۴] از مدل‌های هو و همکاران^[۲] و مدل چن و همکاران^[۹] استفاده شده است. خاک مورد مطالعه دارای نسبت تخلخل اولیه‌ی $e_0 = 0.59$ است که برای مدل‌های اشاره شده با استفاده از روابط ۳، ۱۱ و ۱۵ می‌توان پارامترهای مورد نظر را مطابق جدول ۱ به دست آورد. در این جدول باید اشاره کرد که α_s قابلیت فشرددگی خاک تحت اثر مکش است که در رابطه‌ی ۳۵ معرفی شده است و K یک پارامتر رفتاری است که بسته به نوع خاک از آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه به دست می‌آید که توسط چن و همکاران^[۹] برای کالیبراسیون مدل استفاده شده است. با توجه به شکل ۳، به وضوح مشخص است که مدل هو و همکاران^[۲] از دقت بالاتری نسبت به مدل چن و همکاران^[۹] برخوردار است. علت این موضوع مربوط به محدودیت‌های آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه است. این آزمایش به دلیل محدودیت کمیته و بیشینه اعمال فشار نمی‌تواند به خوبی توزیع اندازه‌ی حفرات بسیار ریز یا درشت خاک را در نظر بگیرد که این موضوع منجر به آن می‌شود که نسبت تخلخل به دست آمده از این آزمایش همواره کمتر از نسبت تخلخل اصلی نمونه باشد.^[۲۵، ۲۶] پس مدل چن و همکاران^[۹] که فقط با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه منحنی نگهداشت را پیش‌بینی می‌کند، کمی با مقدار اندازه‌گیری شده اختلاف دارد، اما این در حالی است که در مدل هو و همکاران^[۲]، از نتایج آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه و تغییرات حجمی نمونه در حین خشک‌شدگی نمونه استفاده شده است که ضمن بررسی اثرات بارگذاری

در این رابطه R_v نسبت حجمی ریشه‌ی گیاهان است که طبق تعریف برابر با حجم کل ریشه‌ی گیاهان به واحد حجم خاک است و e_0 نسبت تخلخل زمین‌های بدون پوشش گیاهی است. با استفاده از رابطه‌ی ۵۲ و مدل گالیپولی و همکاران^[۱۰]، می‌توان مدل تحلیلی نگهداشت آب در زمین‌های دارای پوشش گیاهی را با در نظر گرفتن اثرات ریشه‌ی گیاهان به دست آورد. نتایج مدل حاضر نشان می‌دهد که ریشه‌ی گیاهان، موجب افزایش مقدار ورود هوا می‌شود، اما نرخ دفع آب در شاخه‌ی خشک‌شدگی تغییرات ناچیزی دارد. همچنین ظرفیت نگهداشت آب به میزان ناچیزی افزایش می‌یابد. از جمله ضعف‌های مدل حاضر این است که تغییرات در ریزساختار خاک در حین فرایند خشک‌شدگی و ترشدگی در این مدل لحاظ نمی‌شود و فقط برای خاک‌هایی همچون سیلت و ماسه که دارای پلاستیسیته‌ی کمی هستند، مناسب است.

۷.۲. مدل‌های مربوط به نگهداشت جاذب‌ها

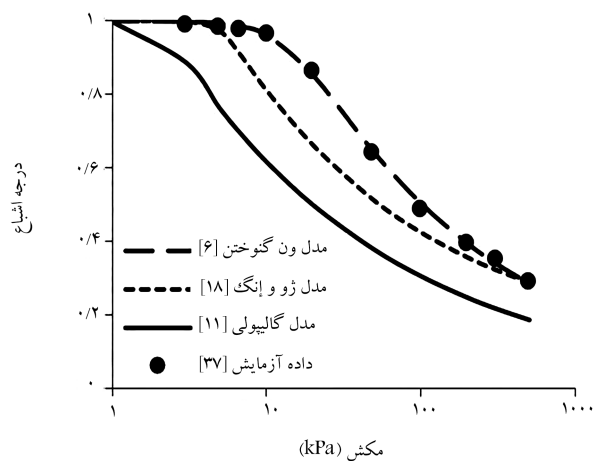
بارزگان و همکاران^[۲۱]، مدل تحلیلی برای نگهداشت طیف گسترده‌ی مایعات یا جذب‌شونده^[۱۱] در انواع گوناگون جاذب‌ها^[۱۲] ارائه دادند، به طوری که در ۶۳ ترکیب جاذب و جذب‌شونده مدل مورد نظر صحت‌سنجی شده است. جاذب‌ها مصالحی هستند که توانایی قابل توجهی در جذب برخی از مایعات دارند و عموماً از آنها برای جذب نفت و سایر مواد خطرناک از روی سطح آب استفاده می‌شود. در نتیجه مدل مذکور، از لحاظ مرتفع ساختن نگرانی‌های زیست‌محیطی بسیار کارآمد است.^[۲۲، ۲۳] برای محاسبه‌ی ظرفیت جذب یا نگهداشت در جاذب‌های مختلف می‌توان از آزمایش جذب استفاده کرد. در این آزمایش در مرحله‌ی اول، وزن جاذب خشک اندازه‌گیری می‌شود. سپس در مرحله دوم، جاذب را در داخل مایع مورد نظر غوطه‌ور می‌سازند تا زمانی که جاذب به حد اشباع خود برسد. در مرحله سوم، جاذب از محیط مایع خارج می‌شود اما در حین این مرحله، مقداری از مایع جذب شده تحت گرانش خارج می‌شود. در ابتدا میزان هدر رفت مایع از سطح جاذب با نرخ زیادی صورت می‌گیرد، اما با گذر زمان شرایط تعادلی حاکم می‌شود و دیگر مایعی از جاذب خارج نخواهد شد (مرحله‌ی چهارم). برای محاسبه‌ی میزان مایع از دست رفته در این حالت گذرا می‌توان فرض کرد که مایع به صورت یک‌بعدی و فقط در راستای قائم از جاذب خارج می‌شود و همچنین نیروی مؤثر در هدررفت مایع، نیروی ناشی از وزن است.

چنانچه H ارتفاع اولیه‌ی مایع موجود در داخل جاذب باشد و نفوذپذیری ذاتی و فشار موئینگی ثابت فرض شوند، می‌توان مقدار ارتفاع مایع درون جاذب در زمان‌های مختلف را به صورت زیر نوشت.

$$z(t) = \left(H - \frac{P_c}{\rho g} \right) \exp \left(- \left(\frac{k\rho g}{\mu H} \right) t \right) + \left(\frac{P_c}{\rho g} \right) \quad (53)$$

در رابطه‌ی ۵۳، P_c فشار موئینگی، ρ چگالی سیال جذب شده، k ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی جاذب، μ ویسکوزیته‌ی سیال و g شتاب گرانش زمین است. در نتیجه، می‌توان ظرفیت جذب که طبق تعریف برابر است با نسبت جرم آب جذب شده به جرم قسمت جامد (m_s) را در هر لحظه توسط رابطه‌ی ۵۴ به دست آورد. در این رابطه، φ بیان‌گر حجم حفرات موجود در جاذب به حجم کل جاذب و A سطح مقطع جاذب است.

$$U_s = \frac{\rho A \varphi H}{m_s} \quad (54)$$



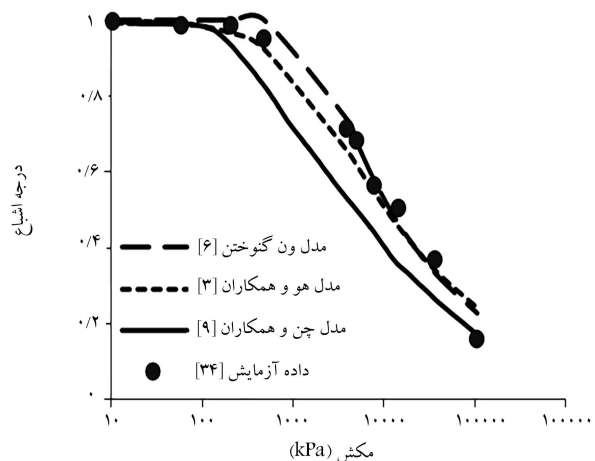
شکل ۴. مقایسه‌ی مدل‌های ون‌گنوختن [۶]، ژو و پنگ [۱۸] و گالیپولی [۱۱] برای خاک ماسه‌ی سیلتی [۳۷] در آزمایش خشک‌شدگی. [۱۸]

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌های ون‌گنوختن [۶]، ژو و پنگ [۱۸] و گالیپولی [۱۱] برای خاک ماسه‌ی سیلتی. [۳۷]

مدل	گروه مدل	پارامترهای مدل
ون‌گنوختن [۶]	اول	m: ۰/۰۲۴ n: ۱۴/۹۲ a: $۵/۸۹ \times ۱۰^{-۴}$
ژو و پنگ [۱۸]	پنجم	m: ۰/۰۴ n: ۷/۶۰ m_{τ} : ۰/۳۰ m_{τ} : ۰/۵۴ m_m : ۰/۵۰ α_s : ۰/۰۴ α_p : ۰/۰۱۸
گالیپولی [۱۱]	سوم	λ_s : ۰/۳۰ m: ۰/۰۴ ω : ۰/۳۰

نسبت به مدل‌های مبتنی بر ریزساختار خاک، دارای دقت کمتری هستند و علت این موضوع به تغییرات ساختار خاک در حین بارگذاری هیدرومکانیکی مربوط می‌شود که به طور خاص نسبت تخلخل نمی‌تواند معرف این ویژگی باشد. [۱۸] پس در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر تغییرات نسبت تخلخل، مدل‌های مبتنی بر ساختار خاک ارجحیت دارند و نتایج قابل قبولی برای طیف گسترده‌ی از خاک‌ها را ارائه می‌دهند. مشابه حالت قبل، می‌توان مشاهده کرد که مدل ون‌گنوختن [۶] به خوبی می‌تواند داده‌های به دست آمده از این آزمایش را برازش دهد که این نشان از توانایی بالای این مدل در مدل‌سازی منحنی نگهداشت دارد.

یکی از خصوصیات قابل توجه خاک‌ها، در تفاوت رفتار آنها در قبل و پس از تسلیم حین بارگذاری هیدرومکانیکی است. این موضوع در مدل‌سازی منحنی نگهداشت با عنوان مدل‌های مبتنی بر سطح تسلیم که در گروه چهارم مدل‌های بخش دوم معرفی شده‌اند، لحاظ می‌شود. یکی از مدل‌های مربوط به این گروه، مدل نوٹ و لالوئی [۱۴] است که البته فقط برای خاک‌های درشت دانه قابل بررسی است



شکل ۳. مقایسه‌ی مدل‌های ون‌گنوختن [۶]، هو و همکاران [۳] و چن و همکاران [۹] برای خاک رسی بوم‌کلی [۳۴] در آزمایش خشک‌شدگی. [۳]

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌های ون‌گنوختن [۶]، هو و همکاران [۳] و چن و همکاران [۹] برای خاک رسی بوم‌کلی. [۳۴]

مدل	گروه مدل	پارامترهای مدل
ون‌گنوختن [۶]	اول	m: ۰/۰۲۴ n: ۱۴/۹۲ a: $۵/۸۹ \times ۱۰^{-۴}$
هو و همکاران [۳]	دوم	m: ۰/۳۷ n: ۰/۶۲ k_p : ۶/۶۸ β_d : $۱/۳۷ \times ۱۰^{-۵}$
چن و همکاران [۹]	دوم	e_0 : ۰/۵۹ α_s : ۰/۰۵ K: ۱۳/۶۰

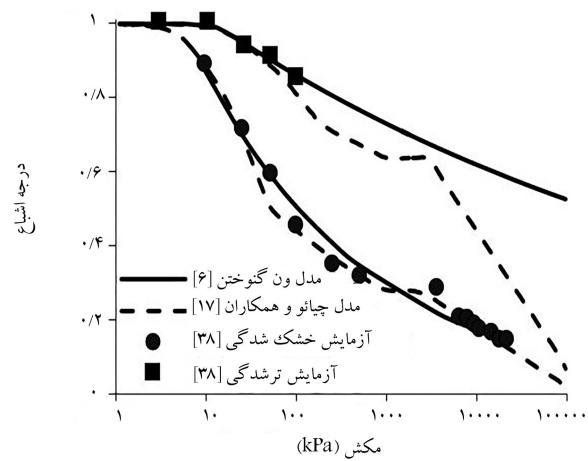
مکانیکی، محدودیت‌های آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه را نیز رفع کرده است و نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. علاوه بر دو مدل فوق، می‌توان مشاهده کرد که مدل ون‌گنوختن [۶] به خوبی می‌تواند بر نتایج آزمایش برازش پیدا کند و دارای انعطاف‌پذیری مناسب و دقت بسیار بالایی است. البته در حوالی مکش ورود هوا، مقادیر بیش از ۱ را پیش‌بینی می‌کند که غیرواقعی است و با ماهیت رفتار فیزیکی سنخیتی ندارد.

در گروه سوم مدل‌های نگهداشت معرفی شده در بخش دوم این پژوهش، به مدل‌های مبتنی بر تغییرات نسبت تخلخل پرداخته شده است. عملکرد این مدل‌ها معمولاً در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر ریزساختار خاک که در گروه پنجم معرفی شده‌اند، بررسی می‌شود که نمونه‌ی از آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

بدین منظور از یک نوع خاک ماسه‌ی سیلتی که در پژوهش لی و همکاران [۳۷] گزارش شده است، برای مقایسه‌ی عملکرد سه مدل ون‌گنوختن [۶]، ژو و پنگ [۱۸] و گالیپولی [۱۱] استفاده شده است. پارامترهای موجود در این سه مدل که به ترتیب در روابط ۳، ۳۵ و ۱۶ معرفی شده‌اند، در جدول ۲ خلاصه و گزارش شده است. با توجه به شکل فوق، مشاهده می‌شود که مدل‌های مبتنی بر تغییرات نسبت تخلخل،

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌های ون‌گنوختن [۶]، چپائو و همکاران [۱۷] برای خاک بنتونیت ماسه‌یی. [۳۸]

مدل	گروه مدل	پارامترهای مدل
ون‌گنوختن [۶] (خشک‌شدگی)	اول	m ۰/۰۳ n ۷/۲۸ a ۰/۱۸
ون‌گنوختن [۶] (ترشدگی)	اول	m ۰/۰۱ n ۵/۸۴ a ۰/۰۸۱
$S^a D^0$	۳	
K^a	۴۰	
β^a	۴/۴۴	
α^a	۰/۸۰	
چپائو و همکاران [۱۷] چهارم و پنجم		$S^c D^0$ ۰/۰۱ K^c ۳۰ β^c ۳/۳۳ α^c ۰/۳۰ a ۱/۱۱ b ۰/۲۰



شکل ۵. مقایسه‌ی مدل‌های ون‌گنوختن [۶] و چپائو و همکاران [۱۷] برای خاک بنتونیت ماسه‌یی [۳۸] در آزمایش خشک‌شدگی و ترشدگی. [۱۷]

و جامعیت چندانی ندارد؛ زیرا قادر به در نظر گرفتن تغییرات ساختار خاک حین بارگذاری هیدرومکانیکی نیست. یکی دیگر از مدل‌های توانمند در این گروه، مدل چپائو و همکاران [۱۷] است که در بخش مدل‌های مبتنی بر ریزساختار به آن اشاره شده است و در واقع توسعه یافته‌ی مدل نوث و لالوئی است که علاوه بر خاک‌های درشت دانه، توانایی بررسی رفتار خاک‌های ریزدانه را نیز داراست و با بررسی تغییرات ریزساختار خاک، معمولاً نتایج دقیقی ارائه می‌دهد که نمونه‌ی از آن در شکل ۵ آورده شده است.

در شکل ۵، از یک نمونه خاک بنتونیت ماسه‌یی [۳۸] با وزن مخصوص ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای بررسی عملکرد مدل استفاده شده است. پارامترهای این مدل را که در رابطه ۳۱ معرفی شده‌اند، می‌توان در جدول ۳ مشاهده کرد (در رابطه با نحوه‌ی به دست آوردن و آشنایی با این پارامترها می‌توان به مرجع [۱۷] مراجعه کرد). با توجه به شکل ۵، می‌توان دید که مدل چپائو و همکاران [۱۷] با دقت قابل قبولی توانایی پیش‌بینی رفتار هیستریزس خاک مورد نظر را داراست. باید اشاره کرد که در شاخه‌ی ترشدگی، تعداد داده‌های کمی برای این نوع خاک موجود است. این موضوع سبب شده است که مدل ون‌گنوختن [۶] که در دو مورد قبیل با دقت بسیار خوبی توانست رفتار نگهداشت خاک را نشان دهد، در این نوع خاک رفتار واگرا و خلاف واقعیت را در محدوده‌ی مکش‌های بالا پیش‌بینی کند. علت این موضوع در این است که به طور کلی مدل‌های کلاسیک توانایی بررسی اثرات بارگذاری هیدرومکانیکی را ندارند و فقط مبتنی بر خروجی آزمایش هستند. با توجه به ماهیت برازشی مدل ون‌گنوختن [۶]، به همین دلیل در جدول ۳ برای دو شاخه‌ی خشک‌شدگی و ترشدگی پارامترهای مختلفی به دست می‌آید که باید به آن توجه کرد.

در گروه ششم و هفتم مدل‌های نگهداشت که در بخش دوم به آن اشاره شده است به ترتیب برای محیط‌های چندفازی و جاذب‌ها کارایی دارند و با توجه به نوع مسئله باید انتخاب و به کار گرفته شوند. در بخش بعد به برخی از نتایج محوری این پژوهش پرداخته خواهد شد و در نهایت برای انتخاب صحیح مدل‌های مناسب برای بررسی رفتار نگه‌داشت، پیشنهادهایی ارائه خواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به مروری اجمالی اهم رویکردهای مدل‌سازی تحلیلی منحنی نگهداشت

آب - خاک پرداخته شد. به طور کلی، مدل‌هایی را که تاکنون ارائه شده‌اند، می‌توان در هفت گروه طبقه‌بندی کرد که مزایای نسبی هر گروه شرح داده شد. تمام رویکردهای ذکر شده با وجود مزایای منحصر به فردی که دارند، دارای نقاط ضعف اساسی هستند که باید در پژوهش‌های آتی به آن توجه شود. گروه اول از مدل‌های تحلیلی، مدل‌های کلاسیک هستند که فقط قادر به برازش شکل کلی منحنی نگهداشتند و توانایی در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر خصوصیات نگهداشت همچون تغییرات نسبت تخلخل، هیستریزس هیدرولیکی و تنش خالص را ندارند. در گروه دوم از مدل‌های تحلیلی، عمدتاً به بررسی تغییرات در توزیع اندازه‌ی حفرات خاک پرداخته شد. بنابراین پیش‌نیاز این مدل‌ها، انجام آزمایش‌های پیشرفته ریزساختاری مثل آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه است. این آزمایش با این‌که مزایایی دارد، دارای محدودیت‌هایی در ارزیابی کل حفرات موجود در نمونه است که کارایی مدل را به ویژه در محدوده‌ی مکش‌های پایین و بالا با بحران مواجه می‌کند. گروه سوم از مدل‌های تحلیلی، به بررسی رفتار خاک‌های تغییرشکل‌پذیر می‌پردازند و تنها پارامتر تأثیرگذار بر تغییر شکل خاک را نسبت تخلخل در نظر می‌گیرند. به عبارت دیگر، قابلیت این مدل‌ها در لحاظ کردن اثرات مهم ریزساختار بر منحنی نگه‌داشت در نسبت‌های تخلخل یکسان زیر سؤال می‌رود. در گروه چهارم از مدل‌های تحلیلی که بر مبنای تعریف یک سطح تسلیم استوار است، معمولاً فرضیات ساده‌کننده‌ی بسیاری استفاده می‌شود و همچنین دارای مفاهیم نسبتاً دشواری هستند که نیاز به تخصص بالا دارند و در نتیجه صحت‌سنجی این مدل‌ها را معمولاً با مشکل مواجه می‌کنند که به تبع آن کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در گروه پنجم از مدل‌های تحلیلی، به مدل‌هایی پرداخته شده است که به بررسی ساختار خاک می‌پردازند. به طور کلی این گروه از مدل‌ها دقت نسبتاً بالایی نسبت به گروه‌های قبلی دارند ولی به دلیل تعداد پارامترهای بسیار این گروه از مدل‌ها و به تبع آن صحت‌سنجی نسبتاً دشوار آن کمتر در کارهای معمول استفاده می‌شود. در گروه ششم از مدل‌های

۲- به طور کلی مدل‌هایی که فقط مبتنی بر انجام آزمایش تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه هستند، نمی‌توانند رفتار نگهداشت را به خوبی توصیف کنند و بهتر است که نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش نگهداشت توأم استفاده شود. در نتیجه مدل هو و همکاران^[۲] یک مدل مناسب در این شرایط است که ضمن سهولت در کالیبراسیون دقت قابل قبولی دارد.

۳- با توجه به این‌که مدل‌هایی که فقط مبتنی بر تغییرات نسبت تخلخل خاک هستند، به خوبی نمی‌توانند رفتار نگهداشت را توصیف کنند، بهتر است تا در صورت موجود بودن داده‌های مربوط به تغییرات حجمی خاک در شرایط بارگذاری هیدرومکانیکی، از مدل ژو و پنگ^[۱۸] که اثرات ریزساختار را نیز در نظر می‌گیرد، استفاده کرد.

۴- در پروژه‌های حساس یا خاک‌هایی که داده‌های آزمایشی محدودی برای آن موجود است، بهتر است از مدل جامع چیاثو و همکاران^[۱۷] استفاده کرد که توانایی بررسی رفتار هیستریزس خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه را با دقت قابل قبولی دارد.

۵- در شرایطی که محیط‌های چندفازی حاکم بر مسئله باشند، بسته به شرایط خاک می‌توان از مدل‌های پنگ و همکاران^[۳۰] و ژو و چن^[۲۹]، به ترتیب به منظور بررسی اثرات ریشه‌ی گیاهان و بیولیمرها در خاک استفاده کرد.

۶- برای بررسی رفتار نگهداشت جاذب‌ها در طیف گسترده‌ی مسائل زیست‌محیطی می‌توان از مدل بازارگان و همکاران^[۳۱] با دقت قابل قبولی استفاده کرد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف در قالب پنجمین طرح فراخوان گرنت از برنامه‌ی پژوهشی تحت عنوان «ارزیابی آزمایشگاهی جریان دوفازه در محیط متخلخل و تغییرشکل‌پذیر» به شناسه‌ی گرنت G ۹۷۰۹۰۲ صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

پانویس‌ها

1. soil water retention curve
2. soil water characteristic curve
3. volumetric water content
4. air entry value
5. residual water content
6. pore size distribution
7. mercury intrusion porosimetry
8. inter-aggregate pore
9. intra-aggregate pore
10. biopolymers
11. sorbate
12. sorbents

منابع (References)

1. Sun, W.-J. and Cui, Y.-J. "Determining the soil-water retention curve using mercury intrusion porosimetry test in consideration of soil volume change," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**(5),

تحلیلی، به بررسی رفتار نگهداشت آب در محیط‌های چندفازی پرداخته شده است. عواملی مثل ریشه‌ی گیاهان، مواد زیست‌بپاری از جمله مواردی هستند که بر رفتار نگهداشت آب در خاک‌های مختلف تأثیرگذارند ولی معمولاً از اندرکنش پیچیده‌ی این فازهای جدید که دارای حیات و پاسخ به تغییرات محیطی هستند، صرف نظر می‌شود؛ در صورتی که لازم است این اثرات نیز در مدل‌سازی لحاظ شود. بالاخره در گروه هفتم از مدل‌های تحلیلی، به بررسی درشت مقیاس خصوصیات نگهداشت توسط محیط‌های متخلخل غیر از خاک پرداخته شده است که عمدتاً در مهندسی محیط زیست و پتروشیمی با رویکرد یافتن یا تولید مؤثرترین جاذب‌های نفتی کاربرد دارند. پرواضح است که در این مدل‌ها، هیچ یک از اثرات پیچیده‌ی تغییرات حجمی، تنش خالص و ریزساختار در نظر گرفته نمی‌شود. در نهایت، با توجه به نقاط قوت و ضعف مدل‌های تحلیلی موجود، به طور کلی مشاهده می‌شود که در کمتر مدلی به مواردی همچون مدل‌سازی پدیده‌ی هیستریزس هیدرولیکی، مدل‌سازی منحنی‌های پوشی نگهداشت، مدل‌سازی رفتار نگه‌داشت آب در خاک در مکش‌های بالا و در نهایت بررسی اثرات توأم موارد مختلف همچون تنش خالص، تغییرات نسبت تخلخل، تغییرات ریزساختار خاک در اثر بارگذاری هیدرومکانیکی و تغییرات دمایی پرداخته شده است که این موارد می‌تواند به عنوان افق‌های پژوهشی آینده در این زمینه مطرح شود. بر مبنای مباحث فوق، در پایان نیز می‌توان به مواردی به شرح زیر اشاره کرد که در انتخاب بهینه‌ی مدل‌های نگهداشت معرفی شده در بخش دوم می‌تواند کارساز باشد.

۱- از مدل‌های کلاسیک همچون مدل ون‌گنوختن^[۶]، می‌توان برای برآزش نتایج به دست آمده از آزمایش و درون‌یابی نتایج با دقت بسیار بالایی استفاده کرد. البته باید اشاره کرد که این مدل‌ها در محدوده‌ی مکش‌های بالا که نتایج آزمایشگاهی بسیار محدود است یا در شرایط متنوع بارگذاری هیدرومکانیکی و متفاوت با شرایط آزمایش، با خطاهای بسیاری همراه‌اند که باید به آن توجه کرد و در صورت نیاز از مدل‌های دیگر استفاده کرد.

pp.1070-1079 (2020).

2. Lu, N. and Likos, W. "Unsaturated Soil Mechanics, New York: Wiley", pp. 494-510 (2004).
3. Hu, R., Chen, Y., Liu, H. and et al. "A water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity model for deformable soils: consideration of the change in pore-size distribution", *Géotechnique*, **63**,16 pp. 1389-1405 (2013).
4. Chen, Y. "Soil-water retention curves derived as a function of soil dry density", *GeoHazards*, **11**, pp. 3-19 (2020).
5. Brooks, R. H. and Corey, A. T. "Hydraulic properties of porous media", *Colorado State University: Hydrology paper*, **24**(37) (1964).
6. van Genuchten, M.T. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, **44**5, pp. 892-898 (1980).
7. van Genuchten, M.T., Leij, F.J. and Yates, S.R. "The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils", *Riverside, California* 9250 1 (1991).

8. Fredlund D. and Xing, A. "Equations for the soil-water characteristic curve," *Canadian Geotechnical Journal*, **314**, pp. 521-532 (1994).
9. Cheng, Q., Ng, C. W. W., Zhou, C. and et al. "A new water retention model that considers pore non-uniformity and evolution of pore size distribution", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **78**, pp. 5055-5065, (2019).
10. Gallipoli, D., Wheeler, S.J. and Karstunen, M. "Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil", *Géotechnique*, **531**, pp. 105-112 (2003).
11. Gallipoli, D. "A hysteretic soil-water retention model accounting for cyclic variations of suction and void ratio", *Géotechnique*, **627**, pp. 605-616 (2012).
12. Gallipoli, D., Brund, A.W., onza, F.D' and et al "A bounding surface hysteretic water retention model for deformable soils", *Géotechnique*, **6510**, pp. 793-804, (2015).
13. Tarantino, A. "A water retention model for deformable soils", *Géotechnique*, **599**, pp. 751-762 (2009).
14. Nuth, M. and Laloui, L. "Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils", *Computers and Geotechnics*, **356**, pp. 835-844 (2008).
15. Dieudonne, A.-C., Vecchia, G.D. and Charlier, R. "A water retention model for compacted bentonites," *Canadian Geotechnical Journal*, **547**, pp. 915-925 (2016).
16. Dubinin, M.M. and Radushkevich, L.V. "Equation of the characteristic curve of activated charcoal", *Proceedings of the Academy of Sciences*, **55**, pp. 331-333 (1947).
17. Qiao, Y., Tuttolomondo, A., Lu, X. and et al. "A generalised water retention model with soil fabric evolution", *Geomechanics for Energy and the Environment*, **25**(100205) (2021).
18. Zhou, C. and Ng, C. W. W. "A new and simple stress-dependent water retention model for unsaturated soil", *Computers and Geotechnics*, **62**, pp. 216-222 (2014).
19. Alonso, E.E., GENS, A. and JOSA, A. "A constitutive model for partially saturated soils", *Geotechnique*, **403**, pp. 405-430, (1990).
20. Bharat, T.V. and Gapak, Y. "Soil water characteristic curves of bentonites in isochoric conditions during wetting: measurement and prediction", *Canadian Geotechnical Journal*, **58**(5), pp.711-721 (2021).
21. Kovács, G. "Seepage hydraulics", *Elsevier Science Publishers* (1981).
22. Navarro, V., Asensio, L., Morena, G.D. and et l. "Differentiated intra- and inter-aggregate water content models of mx-80 bentonite", *Applied Clay Science*, **118**, pp. 325-336 (2017).
23. Or, D. and Tuller, M. "Liquid retention and interfacial area in variably saturated porous media: upscaling from single-pore to sample-scale model", *Water Resources Research*, **35** 12, pp. 3591-3605 (1999).
24. Hillel, D. "Fundamentals of soil physics, New York: Academic Press Inc", pp. 413 (1980).
25. Masrouri, F. Bicalho, K. and Kawai, K "Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, **266**, pp. 691-704 (2008).
26. Goh, S., Rahardjo, H., and Leong, E. "Modification of triaxial apparatus for permeability measurement of unsaturated soils", *Soils Found*, **551**, pp. 63-73 (2015).
27. Zhao, Y., Wen, T. Shao, L. and et al. "Predicting hysteresis loops of the soil water characteristic curve from initial drying", *Soil Science Society of America Journal*, **84**(5), pp.1642-1649 (2020). (2020).
28. Orense, R. "Geotechnical hazards: nature, assessment and mitigation", *University of the Philippines Press, E. de los Santos St.*, U. P. Campus, Philippines (2003).
29. Zhou, C., So, P. and Chen, X. "A water retention model considering biopolymer-soil interactions", *Journal of Hydrology*, **586**(124874) (2020).
30. Ng, C. W. W., Ni, J. J., Leung, A.K. and et al. "A new and simple water retention model for root-permeated soils", *Geotechnique*, **61**, pp. 106-111 (2016).
31. Bazargan, A., Sadeghi, H., Garcia-Mayoral, R. and et al. "An unsteady state retention model for fluid desorption from sorbents", *Journal of Colloid and Interface Science*, **450**, pp. 127-134 (2015).
32. Saleem, J., Bazargan, A., Barford, J. and et al. "Superfast oil uptake using porous ultra-high molecular weight polyethylene sheets", *Polymers for Advanced Technologies*, **2510**, pp. 1181-1185 (2014).
33. Singh, V., Kendall, R.J., Hake, K. and et al. "Crude oil sorption by raw cotton", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **5218**, pp. 6277-6281 (2013).
34. Romero, E. "Characterisation and thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated Boom clay: An experimental study. PhD thesis", *Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain* (1999).
35. Ng, C. W. W., Sadeghi, H., Jafarzadeh, F. and et al "Effect of microstructure on shear strength and dilatancy of unsaturated loess at high suctions", *Canadian Geotechnical Journal*, **572**, pp. 221-235 (2020).
36. Ng, C. W. W., Sadeghi, H., Hossen, S.K.B. and et al. "Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess", *Canadian Geotechnical Journal*, **538**, pp. 1258-1269 (2016).
37. Lee, I.M., Sung, S.G. and Cho, G.C. "Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite", *Canadian Geotechnical Journal*, **422**, pp. 624-631, Apr (2005).
38. Manca, D., Ferrari, A. and L. Laloui, "Fabric evolution and the related swelling behaviour of a sand/bentonite mixture upon hydro-chemo-mechanical loadings", *Geotechnique*, **66**, pp. 41-57, Jan (2016).