Archive of SID

مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۰۷-۱۱۵ (یادداشت فنی)

Research Note

اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر در محل قرارگیری خط فریاتیک و پایداری سدهای باطله (مطالعه‌ی موردی: سد باطله‌ی مس سرچشمه)

علی پاک* (استاد)
نیکو عظیمی حسنی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

این نوشتار به بررسی پایداری سازه‌های خاکی تحت تأثیر اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر می‌پردازد. اندرکنش خاک ـ اتمسفر در قالب پدیده‌های مختلف بر محل سطح فریاتیک در بدنه‌ی سازه‌های خاکی نظیر سدهای باطله و وضعیت پایداری آنها تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، پس از شناسایی مکانیزم‌ها و استخراج روابط حاکم بر آنها، تغییرات تراز خط فریاتیک در بدنه‌ی سازه‌های خاکی تعیین و پایداری این سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد هر چه عوامل اتمسفریک به تغییر بیشتری در محل خط فریاتیک منجر شوند، وضعیت پایداری سازه بیشتر دست‌خوش تغییر خواهد شد. در میان عوامل مطالعه‌شده در این پژوهش، میزان تأثیر پدیده‌های موئینگی و تبخیر در پایداری بیشتر بوده است. در انتهای نوشتار، تأثیر شرایط اتمسفریک و اندرکنش خاک ـ اتمسفر در پایداری سد باطله‌ی معدن مس سرچشمه‌ی کرمان مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: سد باطله، خط فریاتیک، پایداری، اندرکنش خاک ـ اتمسفر، موئینگی.

pak@sharif.edu
nikooazimi@yahoo.com

۱. مقدمه

محل تراز سطح آزاد آب در بدنه‌ی سازه‌های خاکی نظیر سدهای باطله، که در اصطلاح خط فریاتیک نامیده می‌شود، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پایداری سازه‌های مذکور است. عوامل متعددی باعث ایجاد تغییر در تراز خط فریاتیک می‌شوند، که در آن میان می‌توان به اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر در قالب پدیده‌هایی چون بارش، رواناب، جذب گیاهی، تبخیر و تعرق، و اثرات اندرکنشی خاک‌های غیراشباع و اتمسفر در قالب پدیده‌ی موئینگی اشاره کرد.[۱]

اندرکنش خاک ـ اتمسفر از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. بررسی نحوه‌ی اندرکنش خاک با محیط پیرامون آن، برای اولین بار در سال ۱۹۵۸ مورد توجه قرار گرفته است.[۲] سپس در سال‌های ۱۹۶۷،[۳] و ۱۹۹۰،[۴] تا حدی به موضوع ذکرشده پرداخته شده و برخی جنبه‌های آن مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه در گذشته، پدیده‌های مؤثر در این چرخه هر یک به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است (به‌عنوان مثال پدیده‌ی تبخیر از خاک توسط مهندسان کشاورزی مطالعه و روابط متعددی برای آن ارائه شده است)،[۵-۷] اما مطالعات جامع و گسترده در این زمینه برای اولین بار در پژوهشی در سال ۱۹۹۷،[۸] صورت گرفته و نتایج آن در سی و هفتمین سخنرانی سالانه‌ی رانکین لاکچر[۱] منتشر شده است. در نوشتار مذکور، مهم‌ترین عوامل مؤثر در اندرکنش خاک ـ اتمسفر مورد بررسی قرار گرفته و به ارائه‌ی روابط کمّی برای تعیین آنها پرداخته شده است. پس از آن، موضوع ذکرشده مورد توجه بیشتری قرار گرفته و در پژوهش‌های متعددی،[۹و۱۰] به بررسی دقیق‌تر آن پرداخته شده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۸،[۱۱] اثرات اتمسفریک در قالب انرژی خورشیدی در پایداری سدهای باطله بررسی شده است. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۱،[۱۲] نیز به بررسی اثرات تغییر مکش در خاک ناشی از بارندگی شدید در پایداری سدهای باطله پرداخته شده است. برخی دیگر از پژوهشگران به بررسی این اثرات در پایداری سدهای باطله به‌صورت جنبی پرداخته‌اند.[۱۳و۱۴] اما هنوز به مطالعات بیشتری در این زمینه نیاز است. به ویژه در مبحث خاک‌های غیراشباع علاوه بر اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر، باید اثرات اندرکنشی خاک‌های غیراشباع و اتمسفر، که مهم‌ترین آن پدیده‌ی موئینگی است، نیز لحاظ شود.

اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر تاکنون به‌ندرت در تحلیل و طراحی‌های مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. در این نوشتار با لحاظ‌کردن عوامل مختلف ناشی از اثرات اندرکنش خاک و اتمسفر نظیر بارش، جذب گیاهی، رواناب، تبخیر و تعرق، و موئینگی، الگوریتم جدیدی برای لحاظ‌کردن اثر این عوامل در محل قرارگیری خط فریاتیک و پایداری سدهای باطله ارائه شده است.

در این پژوهش، ابتدا مکانیزم‌ها و روابط تئوریک موجود برای تعیین اندرکنش

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۴/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۱/۱۲، پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۲۱.

www.SID.ir

Archive of SID

خاک ـ اتمسفر ارائه و براساس آنها، مقادیر کمّی جابه‌جایی خط فریاتیک تحت تأثیر عوامل ذکرشده تعیین شده است. در ادامه، کار به منظور صحت‌سنجی مدل ارائه‌شده، سد باطله‌ی معدن نیکلِ Pedro Sotto Alloa درکشور کوبا و سد باطله‌ی معدن رویِ Aitik درکشور سوئد مدل‌سازی شده و پس از به‌دست‌آمدن نتایج مناسب، مدل‌سازی عددی سد باطله‌ی معدن مس سرچشمه با لحاظ‌کردن عوامل ذکرشده انجام شده و پایداری سد در اثر جابه‌جایی تراز فریاتیک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. روابط تئوری حاکم بر مسئله

همان‌گونه که ذکر شده است، اندرکنش خاک ـ اتمسفر در قالب پدیده‌هایی چون بارش[۲]، رواناب[۳]، جذب گیاهی[۴]، تبخیر و تعرق[۵] قابل بررسی است. شکل ۱، نمایی کلی از مجموعه‌ی این عوامل را نشان می‌دهد. با تعیین مقادیر کمّی پدیده‌های ذکرشده و براساس رابطه‌ی عمومی ۱، می‌توان میزان نفوذ آب[۶] در خاک و به تبع آن تغییر در تراز خط فریاتیک را تعیین کرد.[۸]

(تبخیر و تعرق + رواناب + جذب گیاهی) - بارش = نفوذ

$$I = P - (A + Q + E) \qquad (۱)$$

میزان بارش (P) در هر ناحیه را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم و یا به کمک داده‌های هواشناسی تعیین کرد. این تذکر لازم است که بارش‌ها طبیعتاً ماهیتی تصادفی دارند و در ماه‌های مختلف سال و همچنین در سال‌های مختلف متفاوتند.

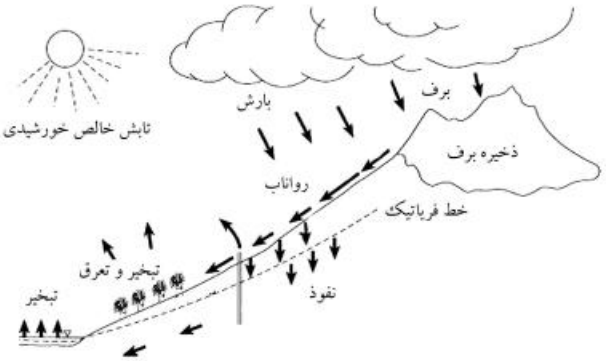
بخشی از بارش‌های جوی (P) در قالب رواناب در سطح زمین جریان می‌یابد. مقدار رواناب براساس داده‌های مربوط به بارش در محل مورد مطالعه، و به کمک مدل هیدرولوژیکی SCS (۱۹۵۷)[۱۵] با استفاده از رابطه‌ی ۲ قابل اندازه‌گیری است:

$$Q = \frac{(P - ۰/۲S)^۲}{(P + ۰/۸S)} \qquad (۲)$$

که در آن، Q مقدار رواناب، P میزان بارش، و S بیشینه‌ی پتانسیل نگه‌داری آب توسط خاک برحسب میلی‌متر است. S با استفاده از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$S = \frac{۲۵۴۰۰}{CN} - ۲۵۴ \qquad (۳)$$

که در آن، CN معرف شماره‌ی منحنی[۷] و پارامتری بدون بُعد بین صفر تا ۱۰۰ است، که با توجه به کاربری زمین، نوع خاک، و شرایط هیدرولوژیکی محلی به دست می‌آید.[۱۰]



شکل ۱. اجزاء مختلف توازن آب وخاک.[۸]

برای تعیین میزان جذب آب از طریق گیاهان، روابط مختلفی ارائه شده است. این کمّیت به عوامل گوناگونی چون نوع و تراکم پوشش گیاهی، وضعیت ریشه‌ی گیاهان، عمر گیاهان ناحیه، آب و هوای منطقه، و... بستگی دارد، به طوری که درنظرگرفتن کلیه‌ی عوامل مذکور مستلزم به کارگیری روابط پیچیده‌یی است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۷،[۸] میزان جذب گیاهی برای ناحیه‌یی با پوشش گیاهی متوسط برابر ۰/۱ میلی‌متر در روز در نظر گرفته شده است.

برای تعیین میزان تبخیر و تعرق روابط تجربی متعددی ارائه شده است،[۱۶-۱۸] که دقت نسبتاً بالایی دارند. میزان تبخیر را می‌توان به کمک رابطه‌ی Penman (رابطه‌ی ۴) تعیین کرد:

$$E_p = \frac{\Delta R_n/\lambda + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \qquad (۴)$$

که در آن، E_p پتانسیل تبخیر بر حسب میلی‌متر، Δ شیب نمودار فشار بخار اشباع بر حسب دما، R_n تابش ورودی خالص خورشید، λ گرمای نهان برای تبخیر آب بر حسب J/kg، γ ثابت Psychrometric و برابر ۶۶ Pa/°C و E_a تبخیر ظاهری است، که از رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید:

$$E_a = ۰/۱۶۵(e_{sat} - e_a)(۰/۸ + \frac{u_۲}{۱۰۰}) \qquad (۵)$$

که در آن، e_{sat} فشار بخار اشباع در هوا (mbar)؛ e_a فشار بخار واقعی در هوا (mbar)؛ و $u_۲$ سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (km/day) است. با توجه به اینکه واحدهای Δ و γ برابر Pa/°C است، اگر واحد R_n برابر J/m^۲ در روز و λ واحد J/kg داشته باشد، واحد E_p برابر kg/m^۲ و یا با فرض چگالی آب، ۱۰۰۰kg/m^۳ معادل mm/day خواهد بود.[۱۶]

برای تعیین R_n در ابتدا میزان R_A، تابش خالص ورودی در بالای اتمسفر به کمک رابطه‌ی ۶ تعیین می‌شود:

$$R_A = S.(۱ - \alpha)(\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta) \qquad (۶)$$

که در آن، R_A تابش خالص ورودی دربالای اتمسفر، $S.$ ثابت خورشیدی (W/m^۲) ۱۳۸۰، α آلبیدوی انعکاس پوشش گیاهی است، که مقدار آن در بازه‌ی ۰/۳ تا ۰/۵ تغییر می‌کند،[۸] φ عرض جغرافیایی نقطه‌ی موردنظر و δ زاویه‌ی انحراف تابش خورشید در این نقطه است، که از صفر تا ۲۳/۵ درجه متغیر است. انرژی تابش خورشید در سطح زمین R_i، بر حسب R_A قابل محاسبه است و از رابطه‌ی ۷ به‌دست می‌آید:

$$R_i/R_A = ۰/۰۹ + ۰/۱۷C \qquad (۷)$$

که در آن، C میزان ابرناکی[۸] منطقه‌ی مورد مطالعه است، که با اندازه‌گیری سهم پوشیده از ابر در مساحتی مشخص تعیین می‌شود. پس از تعیین C، میزان انرژی خالص جذب‌شده‌ی خورشید (R_n)، را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۸ تعیین کرد:

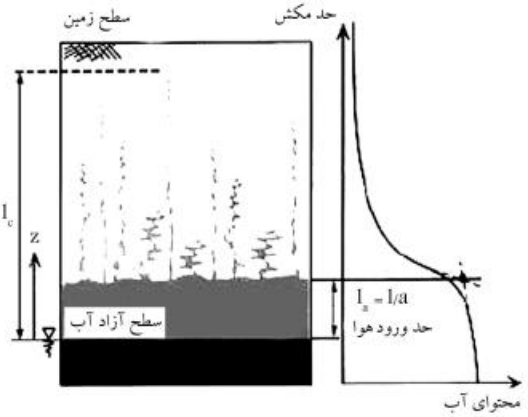
$$R_n = R_i(۱ - \beta) \qquad (۸)$$

که در آن، β آلبیدوی انعکاس سطح است.[۱۹]

بدین ترتیب مقادیر هر یک از پدیده‌های غالب در اندرکنش خاک ـ اتمسفر تعیین می‌شود. اما از آنجا که در محدوده‌ی بالای خط فریاتیک، مصالح خاکی در حالت غیراشباع هستند، پدیده‌ی موئینگی نیز تأثیر به‌سزایی در تغییر تراز خط فریاتیک خواهد داشت. براساس مطالعات انجام‌شده‌یی در سال ۲۰۰۴،[۲۰] ارتفاع

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. ناحیه‌ی موئینه برای پروفیلی از خاک.[۱۷]

جبهه‌ی موئینگی متناسب با مقدار مکش ورود هوا[۹] در منحنی نگه‌داشت آب ـ خاک (WRC)[۱۰] برای خاک‌های غیراشباع است (شکل ۲).

لذا با تعیین مقادیر مکش متناظر با ورود هوا از منحنی نگه‌داشت آب ـ خاک، برای خاک مورد مطالعه می‌توان ارتفاع ناحیه‌ی موئینه و به دنبال آن تغییر تراز خط فریاتیک را تعیین کرد.[۲۱]

ممکن است در مواردی نیز امکان دسترسی مستقیم به منحنی نگه‌داشت آب ـ خاک برای مصالح خاکی مورد مطالعه مقدور نباشد. در این شرایط می‌توان با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک، منحنی نگه‌داشت آب ـ خاک را تعیین کرد.

در برخی پژوهش‌ها،[۲۲-۲۳] مدل‌هایی بدین منظور ارائه شده و در تمامی آن‌ها از رابطه‌ی فردلند و زینگ (۱۹۹۴)،[۲۵] به‌صورت رابطه‌ی ۹ استفاده شده است:

$$S(\%) = [1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{h_r})}{\ln(1 + \frac{1000000}{h_r})}](\frac{1}{\{\ln[e + (\frac{\psi}{a_f})^{b_f}\}^{c_f}}) \qquad (۹)$$

که در آن، S درجه اشباع، a_f پارامتری وابسته به میزان مکش، b_f پارامتری وابسته به میزان نرخ غیر اشباع‌شدن خاک، c_f پارامتری وابسته به میزان انحنای نمودار در مقادیر بالای مکش، و h_r پارامتر ثابت معرف مکش خاک در رطوبت نسبی باقیمانده‌ی خاک است.[۲۵]

برای تعیین مقادیر پارامترهای a_f، b_f، c_f و h_r با کمک منحنی دانه‌بندی خاک و حدود اتربرگ می‌توان مدل‌های مذکور را به کار برد.

مجموعه‌ی روابط به‌کاررفته در مدل‌های مذکور در پیوست این نوشتار ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر

مجموعه‌ی عوامل مربوط به اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر و اثرات تغییر رطوبت در خاک‌های غیراشباع، که در تراز سطح فریاتیک و به دنبال آن در پایداری سازه‌های خاکی تأثیرگذار هستند، مطابق شکل ۳ در قالب یک مدل مفهومی جمع‌آوری شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ۴ عامل اصلی: بارش، تبخیر، رواناب، و جذب گیاهی در شاخه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و روابط کمّی مناسب برای تعیین آنها ارائه و در انتهای کار نیز اثر پدیده‌ی موئینگی، که عامل تأثیرگذار در اندرکنش خاک‌های غیراشباع و اتمسفر است، لحاظ شده است.

به منظور بررسی میزان تأثیر مجموعه‌ی عوامل ذکرشده، یک برنامه‌ی رایانه‌یی تهیه شده است، که با استفاده از روابط ارائه‌شده در بخش ۲ و با دریافت داده‌های ورودی در هر مورد مطالعاتی، میزان جابه‌جایی تراز سطح فریاتیک را محاسبه می‌کند. از خروجی برنامه‌ی تهیه‌شده برای تحلیل پایداری سازه‌های خاکی به طور اعم و پایداری سدهای باطله‌ی معادن، که موضوع این پژوهش است، می‌توان به‌طور اخص استفاده کرد. این روند برای تحلیل اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر و ارزیابی پایداری چند سد باطله مثل سد باطله‌ی معدن نیکل Pedro Sotto Alloa درکشور کوبا و سد باطله‌ی معدن روی Aitik درکشور سوئد مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است، که نتایج آن در پژوهشی در سال ۲۰۱۳،[۲۶] ارائه شده است. در نوشتار حاضر، کاربرد روش پیشنهادی درخصوص پایداری سد باطله‌ی معدن مس سرچشمه‌ی کرمان ارائه شده است.

۴. بررسی اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر در تحلیل پایداری سد باطله‌ی معدن مس سرچشمه‌ی کرمان

به منظور نشان‌دادن اعتبار و کارآیی الگوریتم پیشنهادی و ارزیابی اثر تغییر سطح فریاتیک در پایداری سدهای خاکی، سد باطله‌ی در دست احداث معدن مس سرچشمه‌ی کرمان مورد توجه قرار گرفته است. این سد در نزدیکی شهر رفسنجان واقع بوده و مهم‌ترین و بزرگ‌ترین سد باطله‌ی ایران است. سد باطله‌ی اصلی مس سرچشمه، یک سد خاکی با هسته‌ی رسی است، که ۷۵ متر ارتفاع و ۱۲۰ میلیون مترمکعب حجم ذخیره دارد. با پُرشدن مخزن سد در سال ۱۳۷۷، مخزن به دو بخش مجزای آب و باطله تقسیم شده است. بخش باطله‌ها نیز خود به خلیج‌ها یا سلول‌هایی برای انباشت باطله‌ها تقسیم شده است. خاکریزهای جداکننده‌ی این خلیج‌ها به‌صورت بالارو افزایش ارتفاع می‌یابد و دپوی باطله‌ها در آن صورت می‌گیرد. ترفیع سد باطله در جبهه‌ی شمال شرقی این سد باطله به کمک ساخت خاکریزهایی به روش بالارو مد نظر است.[۲۷و۲۸]

در این پژوهش از نرم‌افزار Plaxis Ver.8 برای تحلیل‌های عددی استفاده شده و با توجه به طول زیاد سد باطله، تحلیل‌های انجام‌شده به‌صورت دوبُعدی و با فرض کرنش مسطح صورت گرفته است. فرایند ترفیع سد در ۸ مرحله پیش‌بینی شده است، به صورتی که در هر مرحله، خاکریزی به ارتفاع ۵ متر بر روی رسوبات قبلی احداث می‌شود.

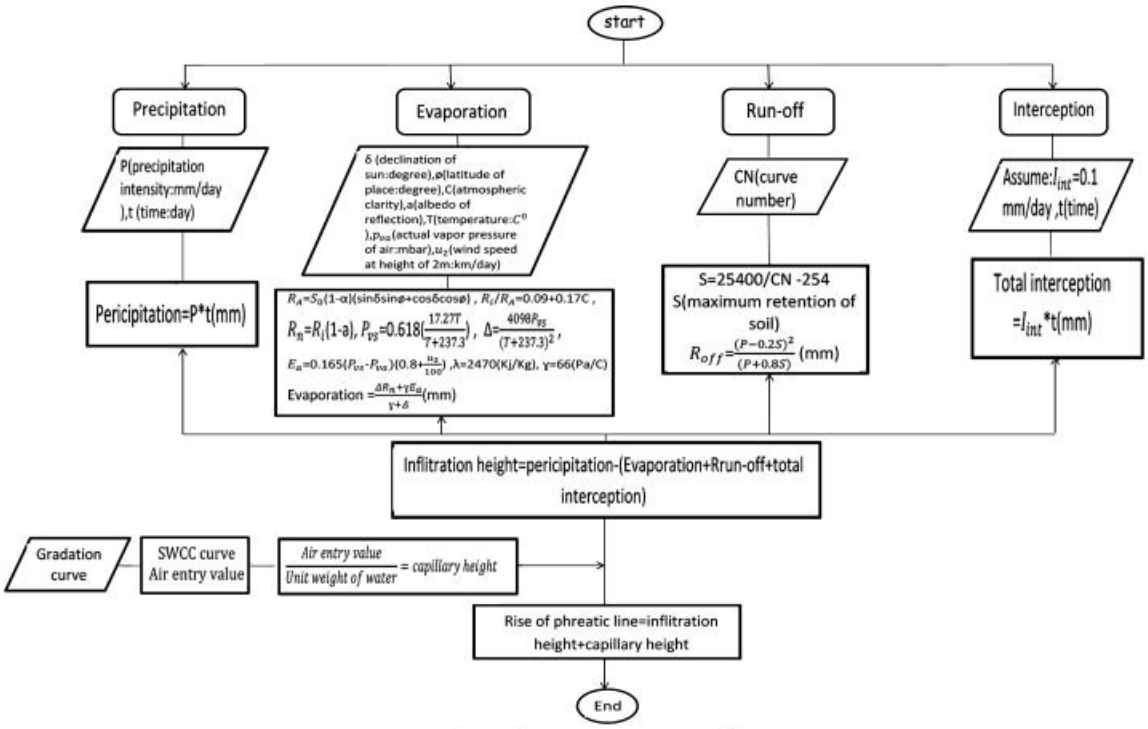
مدل رفتاری خاک سخت‌شونده، مدل مناسبی برای مدل‌کردن رفتار باطله‌ها است، زیرا نتایج حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری انجام‌شده بر روی مصالح باطله، تطابق خوبی را با مدل رفتاری خاک سخت‌شونده نشان می‌دهد.

نمونه‌یی از مقایسه‌ی نتایج آزمایش سه محوری و داده‌های حاصل از رفتار مدل‌سازی‌شده به کمک مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به ازاء مقادیر مختلف تنش همه‌جانبه برای خاک با وزن مشخص در شکل ۴ ارائه شده است.

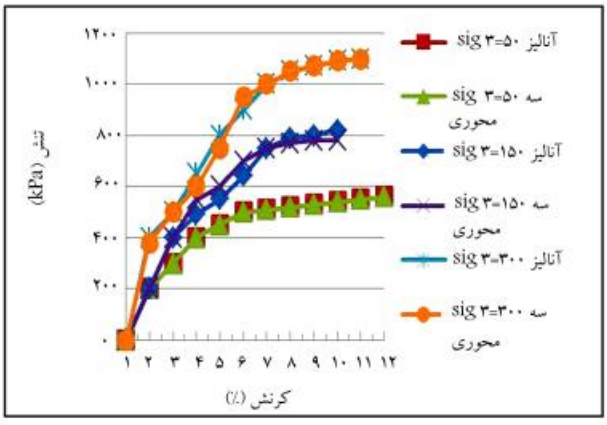
مدل خاک سخت‌شونده، یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار خاک است. این مدل برای شبیه‌سازی رفتار انواع مختلفی از خاک‌ها به‌کار می‌رود، که در آن برخلاف مدل کشسان‌خمیری کامل، سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی ثابت نیست و با گسترش کرنش‌های خمیری این سطح تسلیم بزرگ‌تر می‌شود. تفاوت اساسی مدل سخت‌شونده با مدل موهر ـ کولمب در این است که در مدل سخت‌شونده مدول سختی تابع تنش است، یعنی سختی ـ با افزایش فشار خاک افزایش می‌یابد. به همین دلیل از این مدل برای مدل‌سازی رفتار سدهای باطله استفاده شده است. میزان وابستگی سختی به مسیر تنش با توان m مشخص می‌شود. به‌عنوان مثال

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. روند تغییرات تراز خط فریاتیک.

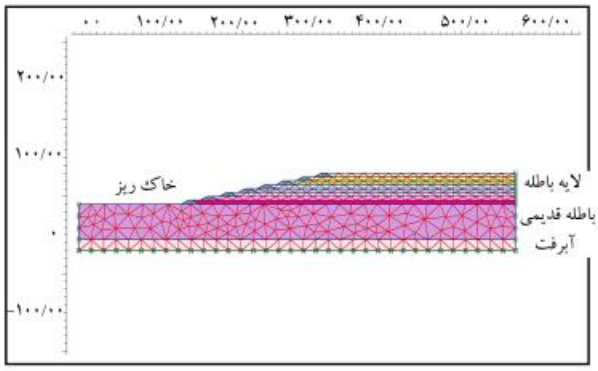


شکل ۴. نمونه‌یی از مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های سه‌محوری با رفتار مدل‌سازی‌شده با مدل خاک سخت‌شونده‌ی مصالح باطله ($\gamma_d = ۱/۹$).

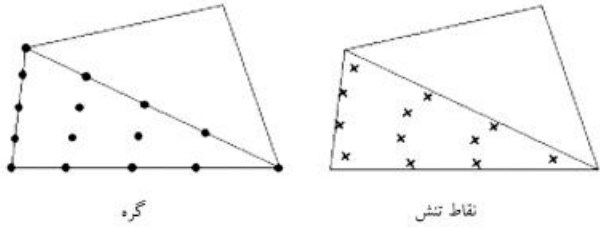
برای شبیه‌سازی وابستگی لگاریتمی به تنش در رس‌های نرم، پارامتر m برابر ۱ انتخاب می‌شود. این پارامتر برای سیلت و ماسه‌های نرو‌ژ برابر ۰/۵ گزارش شده است (Janbu، ۱۹۶۳)، در مدل‌سازی بر روی باطله‌های معدن مس سرچشمه نیز $m = ۰/۵$ فرض شده است.[۲۹]

این مدل تغییرات کرنش محوری را با تنش انحرافی به‌صورت هذلولی فرض می‌کند. در این مدل R_f نسبت شکست است، که همواره کوچک‌تر از ۱ است و به‌عنوان پیش‌فرض در نرم‌افزار برابر ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. E_{50}^{ref} سختی سکانتی در ۵۰٪ مقاومت نهایی (q_f) در بارگذاری در فشار مبنا هستند.

شکل ۵، مقطع و مش FEM سد باطله را برای هشتمین مرحله‌ی ترفیع نشان می‌دهد. در این مقطع تعداد ۱۲۸۶ المان مثلثی ۱۵ گره‌یی در مدل‌سازی اجزاء محدود سد به‌کار رفته است.



شکل ۵. مقطع و مش در نظر گرفته‌شده برای تجزیه و تحلیل سد باطله‌ی سرچشمه.[۲۶]



شکل ۶. گره و نقاط تنش در المان ۱۵ گره‌یی.[۲۹]

شکل ۶، محل قرارگیری گره‌ها و نقاط تنش را در المان ۱۵ گره‌یی نشان می‌دهد. در نرم‌افزار Plaxis امکان انتخاب المان‌های ۶ و یا ۱۵ گره‌یی برای کاربر وجود دارد، که در این میان المان ۱۵ گره‌یی با امکان درون‌یابی از مرتبه‌ی ۴ و استفاده از ۱۲ نقطه‌ی گوسی (نقاط تنش) برای انتگرال‌گیری عددی، دقیق‌تر است و در مسائل پیچیده، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. به ویژه در مسائل غیرمتقارن توصیه می‌شود که از المان‌های ۱۵ گره‌یی استفاده شود.[۲۹]

www.SID.ir

Archive of SID

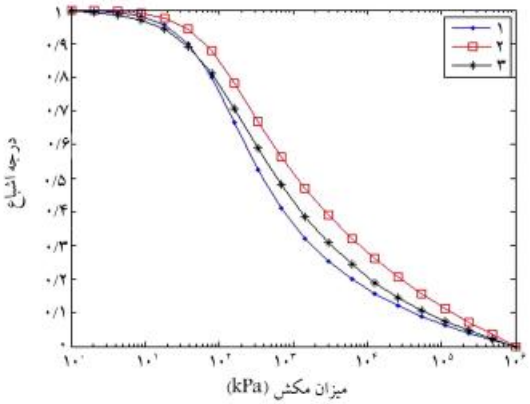
جدول ۱. پارامترهای به‌کاررفته در تجزیه و تحلیل سد باطله‌ی سرچشمه،[۲۶]

مصالح	γ_{wet}	k_x (m/day)	k_y (m/day)	c' (kPa)	φ'	E_{50}^{ref} (kPa)	R_f	M
باطله‌ی ۱	۱۹٫۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰۱	۷٫۵	۲۶	۱۰۰۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی ۲	۱۹٫۴	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۰۷۵	۷٫۵	۲۶٫۵	۱۰۵۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی ۳	۱۹٫۸	۰٫۰۱	۰٫۰۰۰۵	۷٫۵	۲۷	۱۱۰۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی ۴	۲۰٫۲	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۰۲۵	۷٫۵	۲۷٫۵	۱۱۵۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی ۵	۲۰٫۶	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰۱	۷٫۵	۲۸	۱۲۰۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی ۶	۲۱٫۰	۰٫۰۰۱۵	۰٫۰۰۰۰۷۵	۷٫۵	۲۸٫۵	۱۲۵۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی ۷	۲۱٫۴	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۵	۷٫۵	۲۹	۱۳۰۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی ۸	۲۱٫۸	۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۰۰۲۵	۷٫۵	۲۹٫۵	۱۳۵۰۰	۰٫۹	۰٫۵
باطله‌ی قدیمی	۲۲	۰٫۰۰۰۲	۰٫۰۰۰۰۱	۷٫۵	۳۱	۱۴۰۰۰	۰٫۹	۰٫۵
خاکریز	۲۱	۱	۱	۳۰	۳۶	۳۵۰۰۰	۰٫۹	۰٫۵
آبرفت	۲۰	۰٫۱۷۳	۰٫۰۱۷	۱۰	۳۴	۵۰۰۰۰	۰٫۹	۰٫۵

با توجه به اینکه در سمت چپ و راست مقطع موردنظر از سد باطله، مصالح باطله قرار دارد، حرکت افقی در این دو مرز بسته شده است، اما بر حرکت قائم قیدی اعمال نشده است. علاوه بر آن این دو مرز نفوذناپذیر فرض شده‌اند که با توجه به نفوذپذیری بسیار پایین باطله‌ها (در مرزها) این فرض منطقی است. در مرز پایینی آبرفت قرار دارد، که ضخامت آن در بحرانی‌ترین مقطع در حدود ۱۴ متر است. نفوذپذیر بودن این لایه تأثیر چندانی در پایداری سد به ویژه در ارتفاعات کمتر سد باطله (ارتفاع کمتر از ۲۵ متر) نخواهد داشت، چرا که در اثر نفوذپذیری پایین باطله‌ها، تحکیم و زائل‌شدن فشارهای آب حفره‌یی به کُندی صورت می‌گیرد. با احداث خاکریزها در هر مرحله به دلیل وزن لایه‌های جدیدالاحداث و نیز فرایند تحکیم، که در طی زمان اتفاق می‌افتد، ویژگی‌های مقاومتی لایه‌های باطله‌ی پایین‌تر بهبود می‌یابد. جدول ۱، مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی به کاررفته را برای مصالح مختلف سد باطله نشان می‌دهد، که در آن φ' و c' به‌ترتیب پارامترهای مقاومتی زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی و k_x و k_y به ترتیب ضرایب نفوذپذیری خاک در جهت‌های افقی و قائم بر حسب متر بر روز و γ_w وزن مخصوص خاک مرطوب بر حسب KN/m^3 هستند.

با توجه به اطلاعات هواشناسی به‌دست‌آمده از سازمان هواشناسی کشور، بحرانی‌ترین بارش در محدوده‌ی سد و در طی ۵ سال گذشته، در سال ۲۰۰۹ روی داده است. لذا از اطلاعات سال ۲۰۰۹، برای انجام تحلیل‌های پایداری استفاده شده است. در سال مذکور میزان بارش برابر ۸۲٫۷ میلی‌متر بوده است. در کنار بارش، دبی ورودی رودخانه‌هایی که در حوضه‌ی آبریز این سد باطله قرار دارند نیز منجر به آورد سیلاب به پشت سد می‌شود. دبی رودخانه‌ی شور در سال ۲۰۰۹ برابر ۱۰٫۲ میلیون مترمکعب بوده است، که با تقسیم آن به مساحت دریاچه، که معادل ۷٫۳ کیلومتر مربع است، تغییری معادل ۱۳۲۵٫۹۸ میلی‌متر در تراز آب سد ایجاد می‌شود. همچنین به منظور بررسی بحرانی‌ترین شرایط، سیلابی با دوره‌ی بازگشت ۵۰ ساله در نظر گرفته شده است، که حجمی معادل ۱۴٫۱ میلیون مترمکعب را وارد دریاچه و تغییری معادل ۱۹۳۶٫۸۱ میلی‌متر را در محل خط فریاتیک ایجاد می‌کند. پس از انجام محاسبات موردنیاز برای تعیین میزان تبخیر، با استفاده از پارامترهای ورودی مناسب که در شاخه‌ی ۲ در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تبخیر سالانه‌یی معادل ۲۰۲٫۷۲ میلی‌متر برآورد شده است.

میزان رواناب نیز با توجه به محاسبات انجام‌شده در موئینگی در شاخه‌ی ۳



شکل ۷. منحنی WRC رسم‌شده با مدل‌های مختلف (نمودار ۱، مدل Zapata (۱۹۹۹)، نمودار ۲، مدل Witczak (۲۰۰۶)، نمودار ۳، مدل Tores Hernandez (۲۰۱۰)).

نمودار شکل ۳ برابر ۲۹٫۴ میلی‌متر و میزان جذب گیاهی در طول سال با فرض مقدار متوسط ۰٫۱ میلی‌متر در روز (شاخه‌ی ۴ نمودار شکل ۳) در حدود ۳۶٫۶ میلی‌متر است. به منظور تعیین ارتفاع موثینه در ناحیه‌ی غیراشباع از بدنه‌ی سد باطله لازم است منحنی نگه‌داشت آب ـ خاک با کمک روش‌های ذکرشده، از منحنی دانه‌بندی مصالح باطله استخراج شود. شکل ۷، این منحنی را براساس ۳ روش ذکرشده در پیوست نشان می‌دهد.

براساس نمودارهای ذکرشده در شکل ۷، میزان مکش متناظر با ورود هوا برای مواد باطله تقریباً برابر ۲۰ کیلوپاسکال است، که با تقسیم آن به وزن مخصوص آب، ارتفاع ناحیه‌ی موئینه معادل ۲۰۳۰ میلی‌متر تعیین شده است. با اعمال مجموعه‌ی اثرات ذکرشده و با فرض شرایط بحرانی در طول یک سال، تراز خط فریاتیک به اندازه‌ی ۵۱۰۶ میلی‌متر تغییر می‌یابد. در جدول ۲، عوامل مؤثر در جابه‌جایی سطح آزاد آب و مقادیر مربوط به هر یک ارائه شده است.

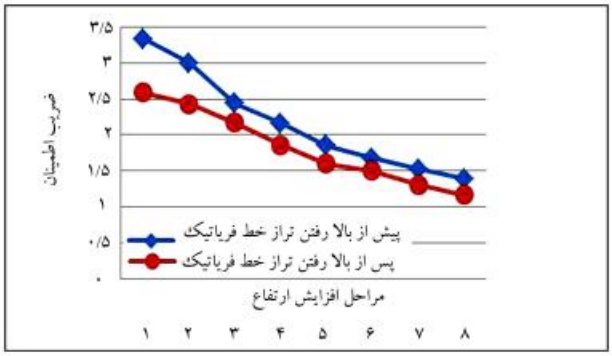
در تحلیل‌های پایداری سد، در هر مرحله از ترفیع سد باطله، ضریب اطمینان پایداری برای محل اولیه‌ی خط فریاتیک در بدنه‌ی سد محاسبه شده است. در مرحله‌ی بعد به منظور بررسی اثرات جابه‌جایی تراز فریاتیک، پس از جابه‌جایی محل خط فریاتیک به میزان محاسبه‌شده براساس داده‌های هواشناسی و به کمک برنامه‌ی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. عوامل مؤثر در جابه‌جایی تراز فریاتیک و مقادیر نظیر آن.

عوامل مؤثر در جابه‌جایی سطح آزاد آب	میزان جابه‌جایی تراز فریاتیک (میلی‌متر)
بارش	۸۲٫۷
دبی رودخانه‌ی شور	۱۳۲۵٫۹۸
سیلاب	۱۹۳۶٫۸۱
تبخیر سطحی	۲۰۲٫۷۲
رواناب	۲۹٫۴۰
جذب گیاهی	۳۶٫۶
موئینگی	۲۰۳۰



شکل ۸. نمودار تغییرات ضرایب اطمینان به ازاء مراحل مختلف ساخت خاکریز.

تهیه‌شده (معادل ۵۱۰۶ میلی‌متر)، مجدداً تحلیل پایداری انجام و ضرایب اطمینان برای هر مرحله تعیین شده است. شکل ۸، تغییرات ضرایب اطمینان را برای مراحل مختلف ساخت سد باطله نمایش می‌دهد.

مطابق شکل ۸، پایداری سد باطله با هر مرحله از ساخت خاکریز جدید کاهش می‌یابد، به‌عبارت دیگر، پس از احداث خاکریزها در هر مرحله از ترفیع سد باطله‌ی بالارو، ضریب اطمینان کاهش قابل ملاحظه‌یی را نشان می‌دهد. در سد باطله‌ی معدن مس سرچشمه پس از ساخت اولین خاکریز، ضریب اطمینان معادل ۳٫۳۳۲ بوده و حال آنکه پس از ساخت هشتمین خاکریز در مرحله‌ی پایانی، ضریب اطمینان به ۱٫۳۹۴ کاهش یافته است. این اعداد مربوط به محاسبات معمول پایداری و بدون لحاظ‌کردن اثرات اتمسفریک در تحلیل‌هاست.

با بالارفتن تراز سطح فریاتیک در بدنه‌ی سد باطله به دلیل اثرات اندرکنش خاک ـ اتمسفر و پدیده‌ی موئینگی، ضرایب اطمینان کاهش می‌یابد. این تغییر به معنای بحرانی‌ترشدن وضعیت سد باطله پس از بالارفتن تراز خط فریاتیک است. بدیهی است که میزان تغییر در ضرایب اطمینان وابسته به میزان جابه‌جایی تراز خط فریاتیک است.

برای بررسی وضعیت پایداری سد باطله از معیار پایداری پیشنهادی «آیین‌نامه‌ی اروپا» استفاده شده است، که ضریب اطمینان ۱٫۵ را برای پایداری سد باطله در شرایط استاتیکی مناسب می‌داند و مقادیر کمتر از آن را به عنوان وضعیت بحرانی قلمداد می‌کند.[۱]

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در روند افزایش ارتفاع و ساخت خاکریزهای جدید، تا مرحله‌ی ۷، یعنی ساخت هفتمین خاکریز، وضعیت سد باطله پایدار است (ضریب اطمینان برابر ۱٫۵۳۲ است). اما در همین مرحله با تغییر در تراز خط فریاتیک، ضریب اطمینان به حد ۱٫۳۱۴ کاهش یافته است. این بدان معناست که در هفتمین مرحله از ترفیع سد باطله، وضعیت سد کماکان پایدار است؛ اما در صورت بروز شرایط بحرانی از نظر بارش و جابه‌جایی تراز خط فریاتیک، وضعیت سد ناایمن ارزیابی می‌شود. در مرحله‌ی هشتم ترفیع سد با کاهش ضرایب اطمینان، وضعیت سد باطله به لحاظ شرایط اتمسفریک بحرانی‌تر خواهد شد (ضریب اطمینان برای این حالت برابر ۱٫۳۹۴ است). لذا توصیه می‌شود تا حد امکان از ترفیع مرحله‌ی هشتم و ساخت آخرین خاکریز اجتناب شود، چرا که در این حالت در صورت بالارفتن تراز خط فریاتیک برای مرحله‌ی هشتم ترفیع سد، ضریب اطمینان ۱٫۱۴۷ می‌شود و سد در مرز ناپایداری قرار خواهد گرفت. همچنین در مرحله‌ی ۷، یعنی ساخت هفتمین خاکریز، نیز باید به شرایط آب و هوایی دقت لازم را کرد تا در صورت زیادترشدن مقادیر بارش، حجم سیلاب‌های ورودی و یا آب‌دهی رودخانه‌ی شور از مقادیر پیش‌بینی‌شده، که منجر به تغییر بیشتر در تراز خط فریاتیک می‌شود، تمهیدات لازم برای پایدارسازی سد اندیشیده شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، اهمیت لحاظ‌کردن اثرات اندرکنشی خاک ـ اتمسفر در تراز سطح فریاتیک در بدنه‌ی سازه‌های خاکی و پایداری آنها مورد بحث قرار گرفته است. عوامل مختلف اندرکنش خاک ـ اتمسفر چون بارش، جذب گیاهی، رواناب، تبخیر و تعرق، و نیز پدیده‌ی موئینگی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تراز خط فریاتیک هستند، که در قالب یک برنامه‌ی رایانه‌یی برای محاسبه‌ی مقادیر کمّی تغییر تراز سطح فریاتیک توسعه داده شده است.

همچنین چگونگی تعیین اثر تغییر رطوبت خاک در تراز آب موئینه در خاک‌های غیراشباع مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها، اثرات اندرکنشی خاک ـ اتمسفر در پایداری سازه‌های خاکی و به طور خاص پایداری سد باطله‌ی معدن مس سرچشمه‌ی کرمان بررسی شده است. نتایج این پژوهش را می‌توان به این صورت عنوان کرد:

۱. در میان عوامل بررسی‌شده، پدیده‌ی موئینگی، به ویژه در سدهای باطله با مصالح ریزدانه، بیشترین تأثیر را در جابه‌جایی تراز خط فریاتیک دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در مصالح ریزدانه، حدوداً ۵۰٪ از میزان جابه‌جایی تراز فریاتیک مربوط به پدیده‌ی موئینگی است.

۲. پدیده‌ی تبخیر به ویژه در مناطق با آب و هوای گرم و خشک، تغییرات قابل ملاحظه‌یی را در تراز خط فریاتیک در بدنه‌ی سدهای باطله ایجاد می‌کند. این پدیده در مناطقی با میزان تبخیر زیاد با پایین‌آوردن تراز خط فریاتیک، کمک به پایداری سدهای باطله می‌کند.

۳. براساس نوع پوشش گیاهی منطقه، به ویژه در مناطق با پوشش گیاهی ضعیف، بخش قابل ملاحظه‌یی از بارش می‌تواند به‌صورت رواناب روی سطح زمین جریان یابد، که در اثر آن تغییرات تراز خط فریاتیک نیز کاهش خواهد یافت، اما اثرات این پدیده‌ناچیز (حدوداً ۵٪) بوده و با توجه به پیچیدگی محاسبه‌ی آن، قابل صرف‌نظرکردن است.

۴. در هر مرحله از ترفیع سد باطله، اعمال تغییرات تراز خط فریاتیک منجر به تغییر در وضعیت پایداری سد باطله می‌شود. چنانچه مجموعه‌ی عوامل مؤثر منجر به بالارفتن تراز خط فریاتیک شود، وضعیت سد باطله ناپایدارتر و چنانچه مجموعه‌ی این عوامل منجر به کاهش تراز خط فریاتیک شود، سد به وضعیت پایدارتری خواهد رسید.

www.SID.ir

Archive of SID

پانوشت‌ها

1. rankin lecture
2. precipitation
3. run-off
4. interception
5. evapotranspiration
6. inflitration
7. curve number
8. clarity
9. air entry value
10. water retention curve

منابع (References)

1. Vick, S.G., *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*, 2nd edition, BiTech Publishers Ltd, Canada, ISBN 0-921095-12-0 (1990).
2. Rolt, L.T.C., *Thomas Telford,* Harmondsworth, Penguin Press (1958).
3. Burland, J.B. and Ridley, A. "The importance of suction in soil mechanics", *Proc. 12th South-East Asian Conf.,* Soil Mech. Found. Engng., Kuala Lampur 2, pp. 27-49 (1996).
4. Rahardjo, H. and Fredlund, D.G., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, New York Wiley (1990).
5. Penman, H.L. "Vegetation and hydrology", Technical Communication NO.53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, United Kingdom (1963).
6. Hillel, D., *Applications of Soils Physics,* Academic Press, New York, USA (1980).
7. Shuttleworth, W.J. "Evaporation models in hydrology", In: Schmugg TJ and Andre JC (eds.), Land Surface Evaporation, Springer-Verlag, New York, USA, pp. 93-120 (1990).
8. Blight, G.E. "Interaction between the atmosphere and the earth", (37th Rankin Lecture), *Geotechnique,* London, **47**(4), pp. 715-767 (1997).
9. Gens, A., Guimaraes, L.M., Sanchez, M. and Sheng, D. "Developments in modelling the generalised behaviour of unsaturated soils", In Unsaturated soils: Advances in geo-engineering (eds D. G. Toll et al.), pp. 53-61, London: Taylor & Francis (2010).
10. Zandrian, M.T., Olecop, L.A., Rodriguez, R. and Zabala, F. "The role of capillary water in the stability of tailing dams", *Engineering Geology,* **105**(1-2), pp. 108-118 (2009).
11. Osouli, A. and Pak, A. "Effects of solar energy on the mechanical properties of tailings in tailings dams", Geo-Congress, New Orleans, Louisiana, United States, pp. 605-612 (2008).
12. Chen, R., Zhang, B., Lei, W. and Luo, W. "Response of soil suction to heavy rainfalls in a tailings dam", *Advanced Materials Research*, **250-253**, pp. 1681-1685 (2011).
13. Wang, G., Kong, X., Yang, C. and Ren, Z. "Study on the slope stability of typical super high tailings dam using centerline method", *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, **6**(3), pp. 697-702 (2014).
14. Droitsch, D., *Huge Ponds Hold Tar Sands Sludge and Great Risks,* switchboard (2014). nrdc.org/blogs/ddroitsch/huge_ponds_hold_tar_sands_slud.html.
15. SCS, *National Engineering Handbook*, Section 4: Hydrology, USDA Soil Conservation Service (1957).
16. Penman, H.L. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass", *Proc. R. Soc., London, Ser. A,* **193**(1032), pp. 120-146 (1948).
17. Turc, L. "Relation between the precipitations, evaporation and storage", *Ann. Agron.,* **5**, pp. 491-596 (1954).
18. Thornthwaite, C.W. "A re-examination of the concept and measurement of potential transpiration", In The Measurement of Potential Evapo-Transpiration (ed. J. R. Mather), pp. 200-209, Seabrook, NJ: Publications in Climatology (1954).
19. Blight, G.E. "Measuring evaporation from soil surfaces for environmental and geotechnical purposes", *Water S.A.*, **28**(4), pp. 381-394 (2002).
20. Lu, N. and Likos, W. "Rate of capillary rise in soils", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE,* **130**(6), pp. 646-650 (2004).
21. Aghajani, H.F., Soroush, A. and Shourjeh, P.T. "An improved solution to capillary rise of water in soils", *International Journal of Civil Engineering*, **9**(4) pp. 257-281 (2011).
22. Zapata, C.E. "Uncertainty in soil–water characteristic curve and impacts on unsaturated shear strength predictions", Ph. D. Dissertation, Arizona State University, Tempe, United States (1999).
23. Witczak, M.W., Zapata, C.E. and Houston, W.N., *Models Incorporated into the Current Enhanced Integrated Climatic Model: NCHRP 9-23. Project Findings and Additional Changes after Version 0.7*, Final Report. Project NCHRP 1-40D, Inter Team Technical Report, Arizona State University (2006).
24. Gustavo T.H. "Estimating soil-water characteristic curve using grain size analysis and plasticity index", Masters Thesis, Arizona State University (2011).
25. Fredlund, D.G. and Xing, A. "Equations for the soil–water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**(3), pp. 521-532 (1994).
26. Azimi Hassani, N. "Evaluation of the effect of phreatic line on stability of upstream tailings dams", M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Engineering Sharif University of Technology (2013).

www.SID.ir

Archive of SID

29. Plaxis 2D, ver. 8, Reference Manual (2012).

30. Rezaee Seraji, M. "Evaluation of behaviour and stability of tailings dams considering method of construction", Msc's Thesis, Amirkabir University of Technology (2006).

27. Mahab Ghods, Report of Evaluation of Safety and Stability of Sarcheshmeh Dam (1989).

28. Bandab, Report of Studies on Increasing Elevation of Sarcheshm Dam (1990).

پیوست

روش‌های تعیین منحنی نگه‌داشت آب ـ خاک (WRC) با استفاده از منحنی دانه‌بندی:

پیوست ۱. مدل Zapata (۱۹۹۹)

خاک‌ها به ۲ دسته‌ی خمیری و غیرخمیری تقسیم‌بندی می‌شوند. برای تعیین خاک‌های خمیری و غیرخمیری، از درصد عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ و حدود اتربرگ مانند نشان خمیری PI (plasticity index) استفاده و پارامتر جدیدی به نام نشان خمیری وزن‌دار wPI (weighted plasticity index) (رابطه‌ی پ ۱) معرفی شده است:

$$\mathrm{wPI} = \frac{\mathrm{P_{200}} * \mathrm{PI}}{100} \qquad (\text{پ } ۱)$$

که در آن، wPI نشان خمیری وزن‌دار، PI نشان خمیری بر حسب درصد، و P_{200} درصد عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ است. مقدار wPI برای خاک‌های خمیری (خاک‌های ریزدانه‌ی نرم)، مثبت و برای خاک‌های غیرخمیری (خاک‌های دانه‌یی) حدوداً صفر است. بدین ترتیب با تعیین نوع خاک می‌توان از مدل مناسب برای آن استفاده کرد.

روابط ارائه‌شده مدل Zapata (۱۹۹۹) برای تعیین پارامترهای منحنی WRC برای خاک‌های خمیری به این شرح است (روابط پ ۲ الی پ ۵):

$$a_f = \frac{۰/۰۰۳۶۴(\mathrm{wPI})^{۲/۳۵} + ۴(\mathrm{wPI}) + ۱۱}{۶/۸۹۵} \qquad (\text{پ } ۲)$$

$$\frac{b_f}{c_f} = -۲/۳۱۳(\mathrm{wPI})^{۰/۱۲} + ۵ \qquad (\text{پ } ۳)$$

$$c_f = ۰/۰۵۱۴(\mathrm{wPI})^{۰/۲۶۵} + ۰/۵ \qquad (\text{پ } ۴)$$

$$\frac{h_r}{a_f} = ۳۲/۴۴e^{۰/۰۱۸۶(\mathrm{wPI})} \qquad (\text{پ } ۵)$$

این مقادیر برای خاک‌های غیرخمیری عبارت‌اند از (روابط پ ۶ الی پ ۹):

$$a_f = \frac{۰/۸۶۲۷(D_{60})^{-۰/۷۵۱}}{۶/۸۹۵} \qquad (\text{پ } ۶)$$

$$b_f = ۷/۵ \qquad (\text{پ } ۷)$$

$$c_f = ۰/۱۷۷۲\ln(D_{60}) + ۰/۷۷۳۴ \qquad (\text{پ } ۸)$$

$$\frac{h_r}{a_f} = \frac{۱}{D_{60} + e^{-۲}} \qquad (\text{پ } ۹)$$

که در آن‌ها، D_{60} اندازه‌ی قطر دانه‌یی است که ۶۰٪ ذرات خاک از آن کوچک‌تر هستند. بررسی نتایج حاصل از مدل Zapata و مقایسه‌ی آن با منحنی‌های موجود نشان می‌دهد که این مدل دقت نسبتاً خوبی در تعیین منحنی WRC دارد.[۲۲]

پیوست ۲. مدل MPEDG توسط Witczak (۲۰۰۶) ارائه شده است

از روش مشابهی مانند روش Zapata (۱۹۹۹) برای تعیین منحنی WRC استفاده می‌شود، با این تفاوت که در این مدل تعداد نمونه‌های زیادتری مورد آزمایش قرارگرفته و اطلاعات آنها در تعیین روابط به‌کار رفته است. علاوه بر آن نیاز به اصطلاحاتی در مدل قبلی وجود داشت. چراکه تغییر در حجم خاک در اثر اعمال مکش، اشتباهاتی را در منحنی WRC به ویژه در مقادیر بالای مکش (که تابع شدیداً نسبت به تغییرات چگالی حساس است) ایجاد می‌کرد. با درنظرگرفتن این مسئله Witczak (۲۰۰۶) با انجام اصلاحاتی، این روابط را برای پارامترهای منحنی WRC ارائه کرده است:

در این روش، برای تعیین پارامتر a_f در خاک‌های غیرخمیری از روابط پ ۱۰ الی پ ۱۳ استفاده می‌شود:

$$a_f = ۱/۱۴a - ۰/۵ \qquad (\text{پ } ۱۰)$$

$$a = -۲/۷۹ - ۱۴/۱۱\log(D_{20}) - ۱/۹ * ۱۰^{-۶}P_{200}^{۲/۲۲} + ۷\log(D_{20}) + ۰/۰۵۵D_{100} \qquad (\text{پ } ۱۱)$$

$$D_{100} = ۱۰^{[\frac{۲۰}{m_۱} + \log(D_{60})]} \qquad (\text{پ } ۲۲)$$

$$m_۱ = \frac{۳۰}{[\log(D_{10}) - \log(D_{60})]} \qquad (\text{پ } ۱۳)$$

که در آن‌ها، D_x اندازه‌ی قطر ذره‌یی است که x درصد ذرات از آن کوچک‌تر هستند، P_{200} درصد عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ است. برای b_f نیز می‌توان از روابط پ ۱۴ الی پ ۱۷ استفاده کرد:

$$b_f = ۰/۹۳۶b - ۳/۸ \qquad (\text{پ } ۱۴)$$

$$b = \{۵/۳۹ - ۰/۲۹\ln[P_{200}(\frac{D_{10}}{D_{100}})] + ۳D_{0}^{۰/۵۷} + ۰/۰۲۱P_{200}^{۱/۱۹}\}m_۱^{۰/۱} \qquad (\text{پ } ۱۵)$$

$$D_0 = ۱۰^{[\frac{۳۰}{m_۲} + \log D_{20}]} \qquad (\text{پ } ۱۶)$$

$$m_۲ = \frac{۲۰}{[\log(D_{20}) - \log(D_{10})]} \qquad (\text{پ } ۱۷)$$

همچنین برای پارامتر C_f می‌توان از روابط پ ۱۸ و پ ۱۹ استفاده کرد:

$$c_f = ۰/۲۶e^{۰/۷۵۸c} + ۱/۴D_{10} \qquad (\text{پ } ۱۸)$$

$$c = \log(m_۲^{۱/۱۵}) - (۱ - \frac{۱}{b_f}) \qquad (\text{پ } ۱۹)$$

در اینجا مقدار h_r برابر ۱۰۰ فرض می‌شود. در روابط مذکور چنانچه $a_f < ۱$ باشد، آن‌گاه: $a_f = ۲/۲۵P_{200}^{۰/۵} + ۵$، همچنین مقدار b_f همواره باید بین ۰/۳ تا ۴ باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

برای خاک‌های خمیری، رابطه‌ی ارائه‌شده توسط Witczak (۲۰۰۶) به شکل روابط پ ۲۰ الی پ ۲۳ است:

$$a_f = ۳۲/۸۳۵\{\ln(\text{wPI})\} + ۳۲/۴۳۸ \quad (پ ۲۰)$$

$$b_f = ۱/۴۲۱(\text{wPI})^{-۰/۲۱۸۵} \quad (پ ۲۱)$$

$$c_f = -۰/۲۱۴۵\{\ln(\text{wPI})\} + ۰/۷۱۴۵ \quad (پ ۲۲)$$

$$h_r = ۵۰۰ \quad (پ ۲۳)$$

چنانچه $a_f < ۵$ باشد، $a_f = ۵$ در نظر گرفته می‌شود. از طرفی چنانچه $c_f < ۰/۰۱$ باشد، مقدار $c_f = ۰/۰۳$ برای آن در نظرگرفته می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که این مدل نیز با دقت نسبتاً بالایی منحنی WRC را پیش‌بینی می‌کند، علاوه بر آن تا حد زیادی مشکلات ناشی از تغییر حجم در مکش‌های بالا در آن بر طرف شده است.[۲۲]

پیوست ۳. مدل Hernandez (۲۰۱۰)

پارامترهای منحنی WRC به‌عنوان متغیرهای غیروابسته در نظرگرفته می‌شود. هر یک از پارامترها با تجزیه و تحلیل‌های همبستگی استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار می‌گیرند و درنهایت بهترین مدل برای معرفی WRC ارائه می‌شود. در اینجا از پارامتر کمکی GI (group index)، یعنی شاخص گروهی، استفاده شده است، که از رابطه‌ی پ ۲۴ تعیین می‌شود:

$$GI = (P_{۲۰۰} - ۳۵)[۰/۲ + ۰/۰۰۵(LL - ۴۰)] + ۰/۰۱(P_{۲۰۰} - ۱۵)(\text{PI} - ۱۰) \quad (پ ۲۴)$$

که در آن، PI شاخص خمیری بر حسب درصد، $P_{۲۰۰}$ درصد عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ و LL (liquid limit) (حد روانی) است. بر همین اساس این مدل برای خاک‌های خمیری روابط پ ۲۵ الی پ ۲۸ را ارائه کرده است:

$$a_f = ۱۰^{(۰/۶۹ - \frac{۲/۷}{۱+e^{۲-۰/۱۴GI}})} \quad (پ ۲۵)$$

$$b_f = \left(\frac{۰/۷۸}{۱ + e^{۶/۷۵ - ۰/۱۹GI}}\right) \quad (پ ۲۶)$$

$$c_f = ۰/۰۳ + ۰/۶۲e^{(-۰/۸۲(\log a_f - ۰/۵۷)^۲)} \quad (پ ۲۷)$$

$$h_r = ۴۹۴ + \frac{۶۶۰}{۱ + e^{(۲ - ۰/۱۹GI)}} \quad (پ ۲۸)$$

و برای خاک‌های غیرخمیری از روابط پ ۲۹ الی پ ۳۲ استفاده می‌شود:

$$a_f = -۹۶۷/۲۱D_{۱۰}^۲ + ۲۱۸/۳۷D_{۱۰} - ۲/۷ \quad (پ ۲۹)$$

$$b_f = ۱۰^{(-۰/۰۰۷۵a_f^۳ + ۰/۱۱۳۳a_f^۲ - ۰/۳۵۷۷a_f + ۰/۳۰۶۱)} \quad (پ ۳۰)$$

$$c_f = ۰/۰۰۵۸a_f^۳ - ۰/۰۹۳۳a_f^۲ + ۰/۴۰۶۹a_f + ۰/۳۴۸۱ \quad (پ ۳۱)$$

$$h_r = ۱۰۰ \quad (پ ۳۲)$$

روابط ارائه‌شده در مدل Hernandez (۲۰۱۰) در مقایسه با مدل‌های قبلی، دقت بالاتری دارند و تطبیق بسیار خوبی با منحنی‌های WRC آزمایشگاهی ارائه می‌دهند. لذا با داشتن منحنی دانه‌بندی و حدود اتربرگ برای هر خاکی می‌توان منحنی WRC آن را با کمک مدل‌های یادشده تعیین کرد.[۲۲]

www.SID.ir