

مطالعات معادله‌های به دست آمده اختلاف معنی داری ندارند، در حالی که نادیده گرفتن هوای محبوس اختلاف به دست آمده را معنی دار می‌نماید.  
 واژه‌های کلیدی: سطح ایستابی کم عمق، ظرفیت ذخیره آب در خاک، هوای محبوس

## برآورد ظرفیت ذخیره آب در خاک سیلتی لوم با سطح ایستابی کم عمق

شیده شمس<sup>۱</sup> و علی رضا سپاسخواه<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۸۶/۲/۲ تاریخ پذیرش: ۸۷/۹/۲۷

### مقدمه

در یک تعریف بسیار کلی خاک کالبد‌های طبیعی متشکل از مجموعه‌ای از خاک‌های انفرادی سازمان یافته با ویژگی‌های خاک‌رخ متمایز است که حاصل اثرهای مشترک فعالیت‌های اقلیمی و زیستی دگرگون شده با پستی و بلندی است که در طی زمان روی مواد مادری عمل می‌نماید. حال اگر این دانه‌ها از مواد طبیعی تشکیل شده باشند خاک را طبیعی و اگر از مواد مصنوعی تشکیل شده باشند، آن را مصنوعی گویند. هر خاک زراعی باید قابلیت نگهداری و ذخیره آب را داشته باشد. مقدار آب موجود در هر واحد جرم یا حجم خاک خشک را رطوبت خاک گویند. دانستن مقدار رطوبت خاک به سه دلیل عمده و اساسی زیر دارای اهمیت است:

۱. آگاهی از مقدار رطوبت موجود در خاک و دیگر ویژگی‌های آن اجازه می‌دهد تا به تاثیر آب در رشد گیاه پی برد.
  ۲. با اندازه‌گیری متوالی و مستمر مقدار رطوبت در نیم‌رخ خاک می‌توان مقدار تبخیر-تعرق که از مهم‌ترین بخش تلفات آب در چرخه‌ی هیدرولوژی به شمار می‌رود را تعیین کرد.
  ۳. معلوم بودن مقدار رطوبت موجود در خاک جهت محاسبه‌ی مقدار آب مورد نیاز به صورت آبیاری یا بارندگی و عمقی که مقدار معینی آب می‌تواند نفوذ کند، ضرورت دارد.
- همچنین دانستن مقدار رطوبت آب در خاک پیش از بارندگی، مقدار ضریب هدایت آبی خاک و نیز میزان آبی که خاک تا مرحله‌ی اشباع کامل می‌تواند در خود ذخیره نماید تا حد بسیار زیادی وقوع سیل را قابل پیش‌بینی می‌نماید. هم‌چنین می‌توان مقدار رواناب احتمالی تولید شده را نیز به دست آورد. در این صورت پیش از آن که سیل و عواملی نظیر آن خسارات زیادی ایجاد نماید، می‌توان در رفع آن کوشش به عمل آورد.

مقدار رطوبت تنها بیان‌کننده‌ی مقدار آب موجود در خاک است، اما پتانسیل آب در خاک، توان انجام کار توسط آب را بیان می‌دارد. به بیان دیگر اساس تمامی فرآیندهای آب و خاک پتانسیل

### چکیده

در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیک و کشاورزی برآورد میزان آبی که خاک می‌تواند در خود ذخیره نماید تا سطح ایستابی آن به سطح زمین برسد، یعنی ظرفیت ذخیره آب در خاک (SWSC)، دارای اهمیت است. در این بررسی مقدار SWSC به صورت تابعی چند جمله‌ای از عمق سطح ایستابی برای خاک سری کوی اساتید (سیلتی لوم) در حوضه آبریز باجگاه به دو روش نظری و تجربی برآورد و با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین، تاثیر میزان هوای محبوس بر SWSC در هر دو روش بررسی شد. چهار سطح ایستابی به عمق‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه شبیه‌سازی شد همچنین رطوبت خاک در اعماق گوناگون ستون خاک اندازه‌گیری و سپس میزان SWSC در اعماق ایستابی گوناگون تعیین گردید. با روش رگرسیون از SWSC‌های به دست آمده و عمق سطح ایستابی، ضرایب تجربی معادله‌ی یاد شده بدست آمد. مقادیر ظرفیت ذخیره‌ی آب در خاک به روش‌های نظری و تجربی به روش رگرسیون خطی با هم مقایسه شد. ضرایب تعیین به دست آمده برای دو حالت با در نظر گرفتن هوای محبوس (۰/۹۶) و بدون در نظر گرفتن هوای محبوس (۰/۹۹) خط و تقاطع محور عمودی، نشان‌دهنده‌ی نزدیکی داده‌های تجربی و نظری برای حالت در نظر گرفتن هوای محبوس است. نتایج بیانگر تاثیر قابل توجه هوای محبوس بر میزان ظرفیت ذخیره‌ی آب در خاک بود (۲۱٪ از تخلخل خاک مورد مطالعه). بنابراین منظور نمودن این مقدار در محاسبات ضروری است. تاثیر کاهنده‌ی صعود موینگی در معادله به دست آمده، گنجانیده شده است. در مقایسه‌ی آماری با در نظر گرفتن هوای محبوس در

۱- نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی،

دانشگاه شیراز، بخش آبیاری shamsshideh@yahoo.com

۲- استاد بخش آبیاری، دانشگاه شیراز، بخش آبیاری sepa@shirazu.ac.ir

آب در خاک است. یکی از مهمترین اجزای پتانسیل آب در خاک پتانسیل ماتریک، است که توسط آن مشخص می شود آب با چه نیرویی در خاک نگهداری شده و چگونه از نقطه ای به نقطه ای دیگر قابل جا به جا شدن است. البته باید توجه داشت که رطوبت و پتانسیل خاک وابسته به یکدیگر بوده و شناسایی رابطه ی آنها یکی از ابزارهای مهم در مدیریت آبیاری و بهره برداری از خاک است.

پتانسیل ماتریک رابطه ای مستقیم با رطوبت آب در خاک دارد. با افزایش رطوبت خاک پتانسیل ماتریک افزایش پیدا می کند و با کاهش رطوبت کاهش می یابد. رابطه ای که بین مکش ماتریک و رطوبت خاک موجود است به منحنی رطوبتی خاک موسوم است. در واقع منحنی خصوصیات رطوبتی رابطه ای است بین پتانسیل آب خاک و درصد رطوبت آن.

ظرفیت ذخیره آب در خاک<sup>۱</sup> (SWSC)، عمق آب مورد نیاز برای رسانیدن سطح ایستابی کم عمق به سطح زمین می باشد. دانستن مقدار SWSC، برای بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی از جمله محاسبه رواناب سطحی دارای اهمیت است [۱۳].

نخستین آزمایش ها روی سطح ایستابی کم عمق توسط می بوم [۱۲] و دوک [۸] انجام گردید. گیلهام [۱۰] و عبدل و گیلهام [۳] بالا آمدن سریع سطح ایستابی را با افزایش مقدار ناچیزی آب به رطوبت زیاد خاک در اثر صعود مویینگی نسبت دادند. دوک [۸] معادله ای را برای اندازه گیری صعود مویینه بر اساس بازده ویژه (نسبت عمق آب اضافه شده به تغییرات سطح ایستابی) در سطوح ایستابی کم عمق ارائه نمود. گریسمر و گیت [۱۱] و سپاسخواه و همکاران [۱۹] با در نظر گرفتن تأثیر خاک های گوناگون معادله ی ساده ی زیر را پیشنهاد کرده اند:

$$q_u = \alpha - bD \quad (1)$$

که در آن  $q_u$  نسبت بین سهم آب زیر زمینی ( $G_c$ ) به تبخیر-تعرق (ET) واقعی است که به صورت  $q_u = \frac{G_c}{ET}$  می باشد.

متغیر  $D$  در این معادله عمق سطح ایستابی می باشد. ضرایب ۳ و  $b$  در این معادله ضرایب تجربی وابسته به ویژگی های هیدرولیکی خاک هستند. ضریب ۴ بسته به نوع خاک و گیاه بین ۰/۳۶ و ۰/۷ و متغیر است [۲۰].  $b$  ضریبی نسبتاً ثابت است که با توجه به نوع خاک در محدوده ی ۰/۱۷ تا ۰/۲ در نوسان است [۲۰ و ۱۱]. که به خوبی می توان وابستگی بالا آمدن آب از سطح ایستابی  $G_c$  را به عمق سطح ایستابی ملاحظه نمود. میزان بالا آمدن آب در اثر نیروی مویینگی به عامل های گوناگونی از جمله عمق سطح ایستابی، رطوبت، قطر ذرات خاک، میزان تبخیر-تعرق و عمق ریشه گیاه

1- Soil Water Storage Capacity

بستگی دارد.

در صورت بارندگی های زیاد و هم چنین نزدیک بودن سفره آب زیرزمینی به سطح زمین، سطح ایستابی بالا می آید. با وجود این که آب زیرزمینی در مناطقی با سطح ایستابی عمیق تأثیر کمی بر روی رطوبت خاک دارد، در مناطقی با سطوح ایستابی کم عمق آب زیرزمینی می تواند به عنوان منبع مهم آب در خاک در نظر گرفته شود. مطالعات انجام شده توسط چن و هو [۵] نشان می دهد که رطوبت خاک در عمق یک متری در نیمرخ خاک هایی با سطح ایستابی کم عمق، ۲۱٪ بیشتر از خاک هایی بدون سطح ایستابی می باشد.

بالا بودن سطح ایستابی ممکن است برای رشد گیاه مضر یا مفید باشد که بستگی به کیفیت آب، بافت خاک، غلظت املاح و عمق سطح ایستابی دارد. در مناطقی با سطح ایستابی کم عمق، حرکت رو به بالای آب به علت صعود مویینگی از سطح ایستابی به طرف منطقه ی ریشه گیاه از منابع مهم آب در منطقه ریشه است. ریتما [۱۷]، دورنبوس و پروت [۷] و SCS [۱۸] توسط مدل های شبیه سازی شده برای میزان صعود مویینگی اعدادی را گزارش داده اند. محدوده این اعداد بین ۰/۵ تا  $8 \text{ mm d}^{-1}$  متغیر می باشد [۱۶]، که بسته به جنس خاک و عمق سطح ایستابی متفاوت است. عمق سطح ایستابی، ویژگی های مویینگی نیمرخ خاک، قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر، ویژگی های آبیگری ریشه و میزان رطوبت آب خاک از جمله عوامل مؤثر بر روی صعود مویینه می باشند. به همین علت مطالعه بر روی صعود مویینگی به راحتی امکان پذیر نمی باشد.

ریس [۱۵] مدل UPFLOW را برای برآورد میزان صعود مویینه طراحی نمود. به کمک این مدل به سادگی می توان میزان صعود مویینگی برای خاک های گوناگون را بدست آورد. در صورت بالا بودن سطح ایستابی گیاه می تواند مقداری از آب مورد نیاز خود را از راه نیروی کاپیلاری از سطح ایستابی تأمین نماید که این خود در امر صرفه جویی در مصرف آب دارای اهمیت می باشد. گریسمر و گیت [۱۱] گزارش کرده اند که در مناطق خشک سطح ایستابی می تواند ۶۰-۷۰٪ از نیاز آبی گیاهان را برطرف سازد.

این نکته را نباید نادیده گرفت که بالا آمدن بیش از اندازه سطح ایستابی باعث بروز مشکلاتی خواهد شد که از آن جمله می توان به خفگی سیستم ریشه اشاره نمود. عمق سطح ایستابی باید به گونه ای باشد که گیاه قادر به تأمین هوای مورد نیاز خود بوده و از طرف دیگر دچار کمبود آب نگردد. همچنین در صورت بالا بودن سطح ایستابی در یک منطقه، در هنگام بارندگی های طولانی سطح ایستابی به سرعت به سطح زمین نزدیک شده و باعث ایجاد رواناب می گردد که در این صورت خسارات زیادی به خاک و گیاهان زراعی آن منطقه وارد می آید.

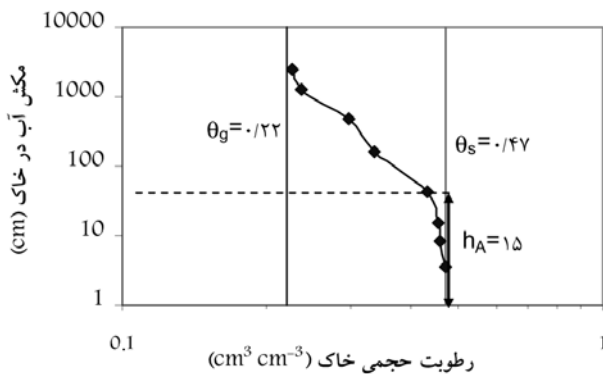
4- Soil Conservation Service of the USDA

که در آن :

$\theta(z)$ : رطوبت خاک در عمق  $z$  متری بالای سطح ایستایی  $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ :  $\theta_s$ : رطوبت اشباع  $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ :  $\theta_g$ : نگهداشت ویژه  $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ :  $h_A$ : مکش ورود هوا  $(m)$  و  $\lambda$ : شاخص توزیع اندازه ذرات می باشند.

از آنجایی که برآورد پارامترهای موجود در معادله بروکز و کوری [۴] به سادگی صورت پذیراست لذا در این پژوهش برای محاسبه ظرفیت ذخیره آب خاک از مدل بروکز و کوری [۴] استفاده شده است.

پارامترهای معادله ی بروکز و کوری [۴] را به راحتی می توان از روی داده های اندازه گیری شده منحنی مشخصه ی رطوبت خاک به دست آورد. شکل ۱ [۱] داده های اندازه گیری شده منحنی مشخصه آب خاک را برای خاک به کار رفته در این پژوهش نشان می دهد.



شکل ۱- منحنی مشخصه ی آب در خاک سری کوی اساتید

همان گونه که ملاحظه می شود پارامترهای  $\theta_s$ ،  $\theta_g$  و  $h_A$  در شکل نشان داده شده است. برای به دست آوردن پارامتر  $\lambda$  به روش زیر عمل می شود:

معادله ۲-الف را می توان به صورت زیر نوشت:

$$y = mx \quad (3)$$

که در آن:

$$y = \ln\left(\frac{\theta(z) - \theta_g}{\theta_s - \theta_g}\right) \quad (4)$$

$$x = \ln\left(\frac{z}{h_A}\right) \quad (5)$$

شیب خط  $(m)$  نیز همان  $-\lambda$  می باشد. برای به دست آوردن  $-\lambda$  در یک دستگاه مختصات  $y = \ln\left(\frac{\theta(z) - \theta_g}{\theta_s - \theta_g}\right)$  را بر حسب  $\ln\left(\frac{z}{h_A}\right)$  رسم نموده و با روش رگرسیون خطی (با لحاظ عرض از مبدأ صفر) شیب برازش داده شده به دست می آید.

نیروی کاپیلاری باعث بالا آمدن آب از سطح ایستایی به سطح زمین می شود که در نتیجه باعث کاهش ظرفیت ذخیره آب در خاک می گردد. افزون بر صعود مویینه وجود هوای فشرده در خاک نیز بر کاهش ظرفیت ذخیره آب در خاک مؤثر است. روی هم رفته هنگامی که سطح ایستایی بالا می آید، برخی از منافذ خاک بسته به اندازه خلل و فرج خاک زودتر از منافذ دیگر پر می شوند. چگونگی پر شدن منافذ منجر به محبوس شدن مقداری هوا در زیر سطح ایستایی می گردد (هوای محبوس). هوای محبوس در زیر سطح ایستایی قابلیت عبور از منافذ پر آب اطراف خود و در نتیجه رسیدن به سطح زمین را ندارند. هوای فشرده موجود در خاک به مدت چند روز و یا حتی چند هفته در خاک باقی می ماند تا زمانی که حباب های هوا در توده خاک از هم پاشیده و پخش گردد [۹ و ۱۴].

فایر و هیل [۹] نشان دادند که میزان هوای محبوس در زیر سطح ایستایی میزان ذخیره آب در خاک را کاهش خواهد داد. آن ها برای رسانیدن سطح ایستایی به سطح زمین آب را با سرعت نفوذ  $12/6 \text{ mmh}^{-1}$  به زمین اضافه نمودند. مطالعات آن ها نشان داد که در خاک لومی شنی وجود هوای محبوس باعث می شود که سطح ایستایی با سرعت بیشتری نسبت به خاک هایی بدون هوای محبوس به سطح زمین نزدیک شود.

ویلسون و همکاران [۲۱] نشان دادند که میزان هوای محبوس در یک خاک ماسه ای-لومی ۱۵٪ تخلخل را به خود اختصاص می دهد. همچنین کنستانس و همکاران [۶] میزان هوای محبوس برای یک خاک medium Olempic sand را ۱۹٪ تخلخل خاک بدست آوردند.

#### مواد و روش ها

در این پژوهش میزان SWSC در چهار عمق گوناگون سطح ایستایی در خاک لومی کوی اساتید دانشگاه شیراز (باجگاه) به دو روش نظری و عملی بدست آمده و معادله های مربوطه تعیین گردید. از اهداف مورد نظر در این پژوهش می توان به موردهای زیر اشاره نمود:

۱. معرفی معادله SWSC بر حسب عمق سطح ایستایی.
۲. محاسبه میزان تاثیر هوای محبوس بر مقدار SWSC.
۳. مقایسه معادله به دست آمده برای تعیین مقدار SWSC از دو روش نظری و عملی.

#### تئوری آزمایش

در معادله پیشنهاد شده توسط بروکز و کوری [۴] منحنی مشخصه رطوبتی خاک در خاک همگن به صورت زیر است:

$$\theta = \left(\frac{\theta(z) - \theta_g}{\theta_s - \theta_g}\right) = \left(\frac{z}{h_A}\right)^{-\lambda}, \text{ for } z > h_A \quad (\text{الف-۲})$$

$$\theta = \theta_s \quad \text{for } z \leq h_A \quad (\text{ب-۲})$$

## ظرفیت ذخیره‌ی آب خاک

ظرفیت ذخیره‌ی آب در خاک SWSC عمق آبی است که با نفوذ آب در خاک سطح ایستایی کم عمق به سطح خاک می‌رسد. معادله‌ی SWSC را می‌توان برحسب تابعی از عمق سطح ایستایی و ویژگی‌های فیزیکی خاک به دست آورد [۱۳]. بیشترین عمق آبی که یک خاک می‌تواند جذب کند تا به گونه‌ی کامل اشباع گردد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SWSC(d) = \int_0^d (\theta_s - \theta(z)) dz \quad (۶)$$

که در آن،  $SWSC(d)$ ، نیمرخ ذخیره‌ی آب، مقدار آبی که خاک می‌تواند در خود ذخیره نماید تا سطح ایستایی آن به سطح زمین برسد ( $m$ ) و  $d$ ، فاصله از سطح خاک تا سطح ایستایی ( $m$ ) است. با جای گذاری معادله‌ی ۲ در معادله‌ی ۶ خواهیم داشت:

$$SWSC(d) = (\theta_s - \theta_g) \left\{ (d - h_A) - \frac{h_A}{1-\lambda} \left[ \left( \frac{d}{h_A} \right)^{1-\lambda} - 1 \right] \right\}$$

(۷-الف)

$$SWSC(d) = 0 \quad d \leq h_A \quad (۷-ب)$$

که در آن ها،  $(\theta_s - \theta_g)$ : تخلخل قابل زه کشی می باشد.

معادله‌ی ۷ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

(۸)

$$SWSC(d) = \left\{ -(\theta_s - \theta_g) \left( \frac{h_A}{(1-\lambda)h_A^{1-\lambda}} \right) \right\} d^{1-\lambda} + (\theta_s - \theta_g)d + \left\{ -(\theta_s - \theta_g)h_A + (\theta_s - \theta_g) \frac{h_A}{1-\lambda} \right\}$$

معادله ۸ را می‌توان به صورت معادله‌ی چند جمله‌ای زیر خلاصه کرد:

$$SWSC(d) = Ad^B + Cd + D \quad (۹-الف)$$

در معادله‌ی ۹ پارامترهای  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $D$  به ترتیب برابرند با:

(۹-ب)

$$A = -(\theta_s - \theta_g) \left( \frac{h_A}{(1-\lambda)h_A^{1-\lambda}} \right)$$

(۹-ج)

(۹-د)

$$D = (\theta_s - \theta_g) \frac{h_A}{1-\lambda} - (\theta_s - \theta_g)h_A \quad (۹-ه)$$

در زیر سطح ایستایی به علت اشباع بودن خاک و جایگزینی آب در تمامی خلل و فرج می‌توان رطوبت خاک را معادل تخلخل خاک دانست. بلافاصله بر روی سطح ایستایی نیز خاک تا فاصله‌ی معینی

از آن که بستگی به شعاع بزرگ‌ترین خلل و فرج دارد، هنوز در حالت اشباع بوده و این فاصله به حاشیه‌ی موینگی<sup>۱</sup> موسوم است. با فاصله گرفتن از سطح ایستایی ابتدا خلل و فرج درشت و سپس خلل و فرج ریز از آب خالی شده و در نتیجه رطوبت موجود در خاک کاهش می‌یابد. در موردهایی که خاک همگن نیست، وجود لایه‌های گوناگون با ویژگی‌های متفاوت، این اصل را برهم زده و کاهش رطوبت به صورت تابعی از فاصله سطح ایستایی اتفاق نمی‌افتد. وجود حاشیه‌ی مویینه‌ای سبب می‌شود که سطح ایستایی در خاک به صورت حد فاصلی بین خاک اشباع و غیر اشباع کاملاً مشخص نباشد.

در معادله‌ی ۹-الف تاثیر حاشیه‌ی موینگی بر میزان ظرفیت ذخیره آب در خاک گنجانیده شده است. این معادله برای سطوح ایستایی کم عمق صادق است. در صورتی که قرار باشد برای سطوح ایستایی عمیق معادله‌ای ارائه شود، این معادله به صورت خط مستقیمی در می‌آید که شیب آن برابر با تخلخل قابل زه کشی،  $D.P$ ، است.

اگر از تأثیر حاشیه موینگی بر  $SWSC$  صرف نظر گردد، میزان ظرفیت ذخیره آب در خاک از حاصلضرب عمق سطح ایستایی،  $d$ ، در میزان تخلخل قابل زه کشی،  $D.P$ ، مقدار  $SWSC$  به صورت زیر بدست آورده می‌شود:

$$SWSC(d) = d \times D.P \quad (۱۰)$$

با مقایسه‌ی معادله‌های ۹-الف و ۱۰ می‌توان ملاحظه نمود که معادله ۱۰ دومین بخش از معادله‌ی ۹-الف،  $Cd = (\theta_s - \theta_g)d$ ، می‌باشد. قسمت‌های اول و سوم این معادله،  $Ad^B$  و  $D$ ، بیانگر تأثیر صعود مویینه بر میزان ظرفیت ذخیره آب در خاک است [۱۳].

مقدار  $SWSC$  با توجه به حاشیه‌ی موینگی و نیز میزان هوای محبوس در خاک کاهش می‌یابد. در معادله ۱۰-الف کاهش میزان  $SWSC$  در اثر حاشیه‌ی موینگی گنجانیده شده است، اما تأثیر هوای محبوس در آن مشخص نمی‌باشد. در صورتی که قرار باشد از میزان هوای فشرده صرف نظر گردد به جای  $\theta_s$  در معادله میزان تخلخل کل خاک قرار داده می‌شود، اما در صورت منظور کردن میزان هوای فشرده در محاسبات، برای رطوبت اشباع خاک مقدار رطوبت  $\theta_s$  به دست آمده در آزمایش و یا تخلخل منهای حجم هوای محبوس در خاک، قرار داده می‌شود [۱۳].

برای محاسبه‌ی مقدار ظرفیت ذخیره آب به روش عددی می‌توان معادله‌ی ۷ را به صورت زیر نوشت:

$$SWSC(d) = \sum_{i=1}^n ((\theta_{si} - \theta_i) + (\theta_{si} - \theta_{i+1})) \frac{\Delta z_i}{2} \quad (۱۱)$$

که در آن،  $\theta_i$ ، رطوبت خاک در عمق  $(m \cdot m^{-1})_i$ ،  $\theta_{si}$ ، رطوبت اشباع خاک  $(m \cdot m^{-1})_{i+1}$ ، رطوبت خاک در عمق  $(m \cdot m^{-1})_{i+1}$ ،

1- Capillary Fringe

و  $\Delta z_i$ : اندازه گام مکانی (m) می باشد.

معادله ی ۶ در واقع معادله ی ۱۱ می باشد با این تفاوت که فواصل در آن بسیار کوچک در نظر گرفته شده است.

### روش آزمایش

این آزمایش بر روی خاک سری کوی اساتید واقع در دانشکده کشاورزی شیراز، حوضه آبریز باجگاه، انجام پذیرفته است. منطقه باجگاه در ۱۶ کیلومتری شمال شرقی شیراز در ارتفاع ۱۸۱۰ متری از سطح دریا واقع شده است. عرض جغرافیایی این منطقه ۲۹ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی آن ۵۲ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی می باشد [۲]. در جدول ۱ [۲۰] ویژگی های خاک مورد مطالعه ارائه شده است. برای داده برداری چهار ستون خاک در آزمایشگاه با سطوح ایستابی به اعماق ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی متری شبیه سازی شد. نمونه های مورد نظر در استوانه هایی از جنس P.V.C به قطر ۱۱ سانتی متر تهیه گردید.

خاک افق سطحی (۲۰-۰ سانتی متری) پس از عبور از الک ۲ میلی متری در استوانه ها ریخته شد. پس از اشباع و نشست خاک چگالی ظاهری خاک در ستون های خاک تعیین گردید. با میانگین گیری از چگالی های ظاهری به دست آمده چگالی ظاهری متوسط خاک به دست آمد ( $1/15 \text{ g cm}^{-3}$ ) سپس به منظور اشباع نمودن ستون های خاک مورد مطالعه به تدریج از بالا به خاک آب اضافه شد تا خاک به گونه کامل اشباع و آب از لوله زه کش خارج شد. برای اطمینان کامل از اشباع شدن خاک اضافه کردن آب به خاک پس از اشباع شدن ظاهری به مدت دو روز ادامه یافت تا خاک به گونه کامل اشباع گردید. پس از اشباع کامل خاک، به منظور جلوگیری از تبخیر آب از سطح خاک، سطح رویین استوانه ها با پلاستیک کاملاً پوشانده شد. لذا آب ثقلی تنها از راه لوله زه کش تعبیه شده در پایین استوانه های خاک در اعماق ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی متری خارج شد. پس از زه کشی کامل خاک (۲۴ ساعت پس از زمانی که هیچ گونه آبی از زه کش خارج نگردید) ستون خاک به فاصله های ۱۰ سانتی متری تقسیم و رطوبت موجود در هر بخش تا محل سطح ایستابی (خاک اشباع) به گونه جداگانه به روش وزنی تعیین و نیم رخ های رطوبتی در سطوح ایستابی با اعماق گوناگون رسم گردید. پس از به دست آوردن نیم رخ رطوبت خاک برای سطوح ایستابی گوناگون، میزان کمبود آب برای رسیدن به حالت اشباع، SWSC، محاسبه گردید.

### جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک سری کوی اساتید

تجزیه مکانیکی		تجزیه شیمیایی			
رس	سیلت	شن	ماده آلی	کربنات کلسیم	گچ
۲۳%	۵۰%	۲۷%	۲/۲%	۲۸/۱%	۰/۱۵%

در حالت اشباع تمام خلل و فرج موجود در خاک از آب پر نمی شوند، بلکه تعدادی از منفذهای موجود در خاک خالی باقی می ماند که در خود هوا را حبس می نمایند. این هوای محبوس در خاک پس از گذشت زمان نسبتاً طولانی تری به تدریج و به آرامی از خاک خارج می شود. بنابراین در این پژوهش محاسبات به دو قسمت تقسیم شد.

۱- انجام محاسبات با در نظر گرفتن هوای محبوس.

۲- بدون در نظر گرفتن هوای محبوس.

برای به دست آوردن SWSC در شرایط هوای محبوس به روش عددی در معادله ۱۱ به جای  $\theta_{si}$  همان رطوبت اشباعی قرار داده شد که در آزمایش به دست آمده است. در صورت نادیده گرفتن هوای محبوس به جای  $\theta_{si}$ ، میزان تخلخل خاک جایگزین گردید، با در نظر گرفتن چگالی ظاهری خاک، (تخلخل خاک مورد مطالعه ۵۷ درصد می باشد). برای محاسبه SWSC به روش نظری از معادله ۱۰ استفاده شده است. در این حالت نیز در صورت نادیده گرفتن هوای محبوس در خاک به جای  $\theta_s$  همان تخلخل خاک قرار داده می شود و در صورت در نظر گرفتن هوای محبوس رطوبت اشباع اندازه گیری شده در آزمایشگاه به عنوان  $\theta_s$  قرار داده شود.

پس از به دست آوردن SWSC برای سطوح ایستابی در اعماق گوناگون در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن هوای محبوس، نتایج بدست آمده در نموداری رسم گردید. همچنین بین مقادیر به دست آمده برای SWSC و عمق سطح ایستابی رگرسیون چند متغیره زده شد تا معادله ای تجربی شبیه به معادله  $SWSC(d) = Ad^B + Cd + D$  به دست آید. همچنین معادله های ۹-الف تا ۹-ه از راه اصول نظری در هر دو حالت گفته شده بدست آمد. در نهایت معادله های تجربی و نظری بدست آمده با یکدیگر مقایسه گردید.

### نتایج

بر اساس آزمایش های انجام شده میزان رطوبت خاک در اعماق گوناگون با سطوح ایستابی متفاوت در شکل های ۲ تا ۵ آورده شده است. برای هر سطح ایستابی نموداری ارائه شده است که یکی مربوط به در نظر گرفتن هوای محبوس (رطوبت اشباع برابر است با میزان رطوبت اندازه گیری شده) و دیگری مربوط به در نظر نگرفتن هوای محبوس (رطوبت اشباع برابر میزان تخلخل کل خاک) می باشد.

جدول ۲ نشان دهنده میزان رطوبت های اندازه گیری شده در زیر سطح ایستابی (رطوبت اشباع) برای سطوح ایستابی متفاوت است. همچنین در این جدول درصد هوای محبوس در خاک ارائه شده است. لازم به ذکر است که میزان هوای محبوس در خاک از تفاضل رطوبت اشباع خاک و تخلخل خاک بدست آورده شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش ها نشان داد که در نظر گرفتن هوای محبوس به منظور تعیین ظرفیت ذخیره آب در خاک به میزان شایان توجهی ظرفیت ذخیره آب خاک را کاهش می دهد (در

حدود ۲۱٪ از حجم تخلخل خاک).

جدول ۲- رطوبت اشباع خاک اندازه گیری شده در آزمایشگاه

عمق سطح ایستابی (cm)	رطوبت حجمی اشباع (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	هوای محبوس در خاک (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
۳۰	۰/۴۴	۰/۲۳
۶۰	۰/۴۳	۰/۲۰
۹۰	۰/۴۷	۰/۱۶
۱۲۰	۰/۴۲	۰/۲۵

محبوس می باشند. همچنین رگرسیون خطی بین این مقادیر نیز بر روی نمودار رسم شده است. هر چقدر که معادله ی خط رگرسیون به خط ۱:۱ نزدیکتر باشد نشان دهنده ی دقت بیشتر آزمایش ها می باشد. معادله ی خط به دست آمده بین دو حالت تجربی و نظری با خط ۱:۱ به کمک آزمون F مقایسه شد. تفاوت بین میزان ظرفیت ذخیره ی آب در خاک به دست آمده به دو روش نظری و تجربی هنگامی که هوای محبوس در محاسبات در نظر گرفته می شود، در سطح معنی داری ۵٪، معنی دار نبوده و داده ها از لحاظ آماری یکسان می باشند. در صورت نادیده گرفتن هوای محبوس تفاوت معنی داری بین داده های به دست آمده از روش نظری و تجربی وجود دارد، که نشان دهنده ی تفاوت میان دو روش در این حالت می باشد.

در نهایت به کمک نرم افزار SPSS از داده های به دست آمده بین SWSC و ارتفاع سطح ایستابی رگرسیون چند متغیره زده شد و پارامترهای معادله مورد نظر به صورت زیر به دست آمد:

معادله های مربوط به روش تجربی عبارت اند از:

با محاسبه هوای محبوس:

$$SWSC(d) = -0/17d^{0/40} + 0/21d + 0/06 \quad (13)$$

$$R^2 = 0/9445$$

بدون محاسبه هوای محبوس:

$$SWSC(d) = -0/19d^{0/40} + 0/26d + 0/06 \quad (14)$$

$$R^2 = 0/9656$$

$R^2$  به دست آمده برای این معادله ها بسیار بالا بوده و نشان دهنده ی نزدیکی زیاد داده ها با معادله ی خط رگرسیون می باشد.

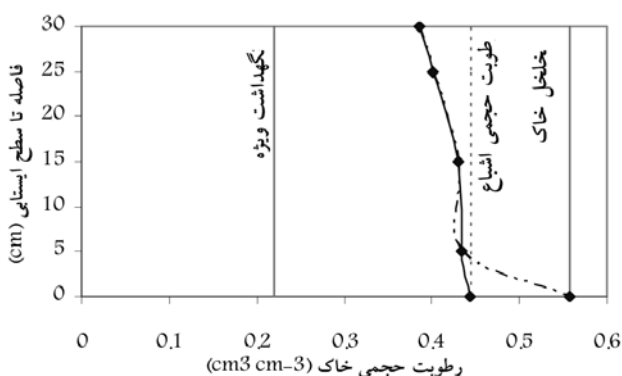
همچنین معادله های به دست آمده توسط روش نظری نیز به قرار زیر می باشد:

با محاسبه هوای محبوس:

$$SWSC(d) = -0/18d^{0/4} + 0/22d + 0/05 \quad (15)$$

بدون محاسبه ی هوای محبوس:

$$SWSC(d) = -0/20d^{0/4} + 0/25d + 0/06 \quad (16)$$



شکل ۲- تغییرات رطوبت خاک در ارتفاع گوناگون از سطح ایستابی ۳۰ سانتی متری، با و بدون محاسبه ی هوای محبوس

سپس برای سطوح ایستابی گوناگون به کمک روش تجربی میزان SWSC در دو حالت با و بدون محاسبه ی هوای محبوس به دست آورده شد. همچنین نمودار مربوط به SWSC و ارتفاع سطح ایستابی در دو حالت با و بدون محاسبه ی محبوس در شکل (۶) آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود میزان SWSC با محاسبه هوای محبوس به مراتب کمتر از میزان SWSC بدون محاسبه هوای محبوس است.

برای به دست آوردن مقدار SWSC به روش نظری از معادله ی ۹ استفاده شد. در ابتدا پارامترهای معادله ی ۹ به کمک منحنی مشخصه آب خاک به دست می آید. پارامترهای مورد نیاز این معادله عبارتند از  $\theta_s$ ،  $\theta_g$ ،  $h_A$  و  $\lambda$  که با توجه به منحنی مشخصه آب خاک (شکل ۱) به ترتیب برابر است با  $0/47 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ،  $0/22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  و  $0/15 \text{ m}$  و  $0/6$ .

بنابراین معادله ی منحنی مشخصه ی آب خاک (معادله ی ۶) به صورت زیر در می آید:

$$\left( \frac{\theta(z) - 0.22}{0.47 - 0.22} \right) = \left( \frac{z}{0.15} \right)^{-0.6} \quad (12-الف)$$

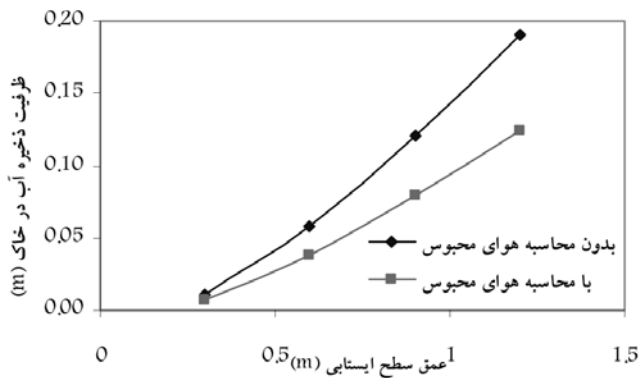
(۱۲-ب)

$$\theta(z) = 0.25 \times \left( \frac{z}{0.15} \right)^{-0.6} + 0.22$$

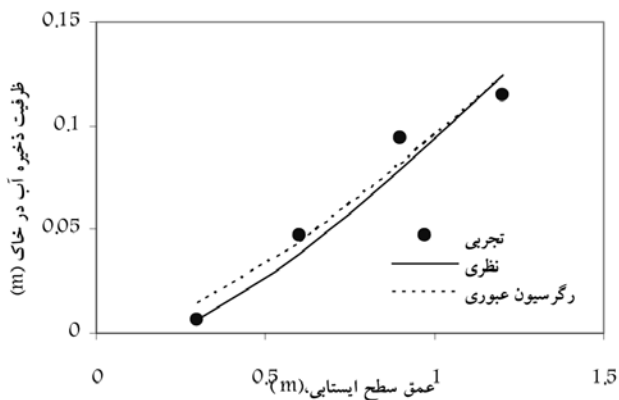
که در آن  $\theta(z)$  رطوبت خاک ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) در عمق  $z$  متری از سطح ایستابی می باشد.

در شکل (۷) مقادیر SWSC به دست آمده به روش نظری برای هر دو حالت نشان داده شده است. می توان ملاحظه نمود که مقدار SWSC هنگامی که هوای محبوس در نظر گرفته نمی شود بیشتر از زمانی است که هوای حبس شده در خاک در محاسبات لحاظ می گردد.

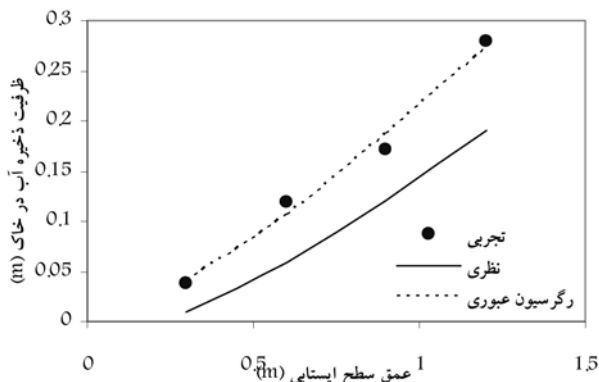
در شکل های (۸) و (۹) نمودارهای به دست آمده از دو روش نظری و تجربی به ترتیب در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن هوای محبوس با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین، خط رگرسیون عبوری بر روی نتایج تجربی بدست آمده نیز ارایه گردیده است. شکل های (۱۰) و (۱۱) نشان دهنده ی تغییرات SWSC بدست آمده به روش تجربی و نظری در دو حالت با و بدون محاسبه ی هوای



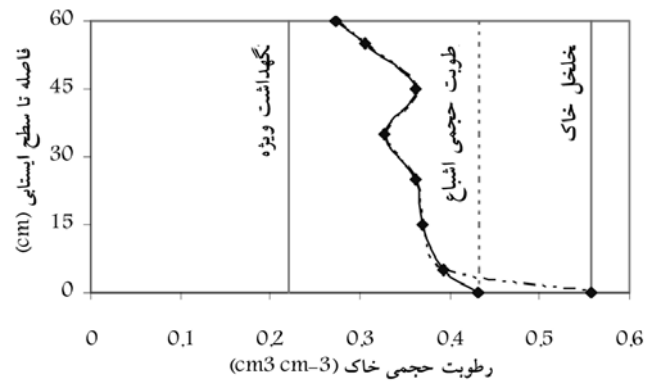
شکل ۷- میزان SWSC خاک با سطوح ایستایی متفاوت در دو حالت با و بدون محاسبه هوای محبوس به روش نظری



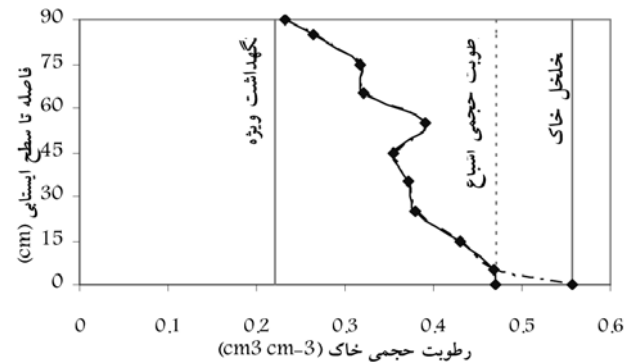
شکل ۸- مقایسه ی میزان SWSC خاک با سطوح ایستایی متفاوت با محاسبه ی هوای محبوس با دو روش نظری و تجربی



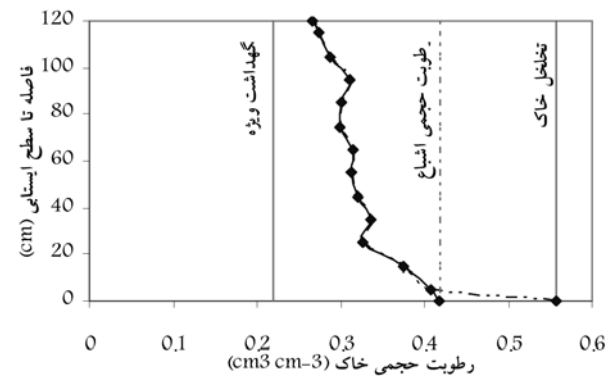
شکل ۹- مقایسه میزان SWSC با سطوح ایستایی متفاوت بدون محاسبه ی هوای محبوس با دو روش نظری و تجربی



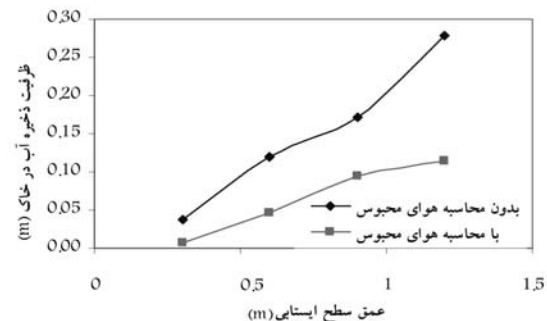
شکل ۳- تغییرات رطوبت خاک در ارتفاع گوناگون از سطح ایستایی ۶۰ سانتی متری، با و بدون محاسبه ی هوای محبوس



شکل ۴- تغییرات رطوبت خاک در ارتفاع گوناگون از سطح ایستایی ۹۰ سانتی متری، با و بدون محاسبه هوای محبوس



شکل ۵- تغییرات رطوبت خاک در ارتفاع گوناگون از سطح ایستایی ۱۲۰ سانتی متری، با و بدون محاسبه ی هوای محبوس



شکل ۶- میزان SWSC خاک با سطوح ایستایی متفاوت در دو حالت با و بدون محاسبه هوای محبوس به روش تجربی

این خلل و فرج ها باقی مانده و راهی برای جایگزین شدن با آب ندارد که این خود باعث می شود حجم آب موجود در خاک در حالت اشباع کمتر از حجم خالی بین ذرات خاک گردد. هوای محبوس در بین خلل و فرج خاک به تدریج در طی زمان از خاک خارج می شوند. در برآورد میزان ظرفیت آب در خاک در بالای سطح ایستابی در صورت نادیده گرفتن این دو مورد میزان آب برآورد شده بیشتر از حد حقیقی خود خواهد بود. بنابراین در انجام محاسبات به این موارد بایستی دقت کافی مبذول داشت. در صورت در نظر نگرفتن هوای محبوس  $\theta_s$  موجود در معادله همان میزان تخلخل خاک می باشد، اما اگر قرار باشد میزان هوای محبوس در محاسبات وارد شود برای یافتن  $\theta_s$  باید حجم هوای محبوس را از حجم تخلخل خاک کسر نمود که این مقدار همان رطوبت اشباعی است که در آزمایشگاه به دست می آید.

### نتیجه گیری و پیشنهادها

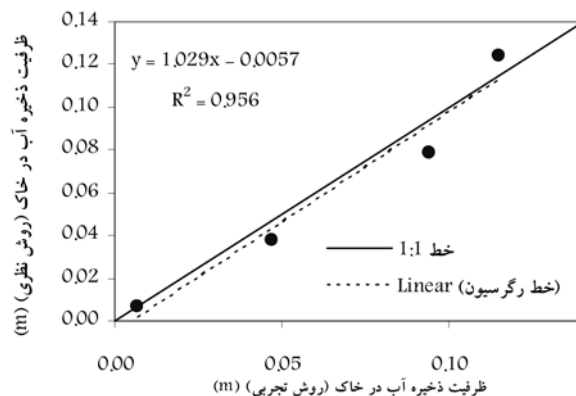
نتایج این پژوهش نشان داد که روی هم رفته استفاده از روش نظری برای برآورد میزان SWSC خاک برای مناطقی با سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین مناسب است. با استفاده از عوامل فیزیکی خاک از قبیل رطوبت اشباع، مکش ورود هوا، نگهداشت ویژه و رطوبت خاک می توان SWSC را برآورد کرد. این برآورد در شرایط با و بدون هوای محبوس هم عملی است.

پس از احداث سد در هر منطقه سطح ایستابی در پایین دست سد به سطح زمین نزدیک می شود. بهتر است پیش از احداث هر سد میزان ظرفیت ذخیره آب در خاک آن منطقه بررسی شود تا احتمال بروز سیلاب های ناگهانی تعیین شود و تمهیدات لازم برای جلوگیری از آن در نظر گرفته شود.

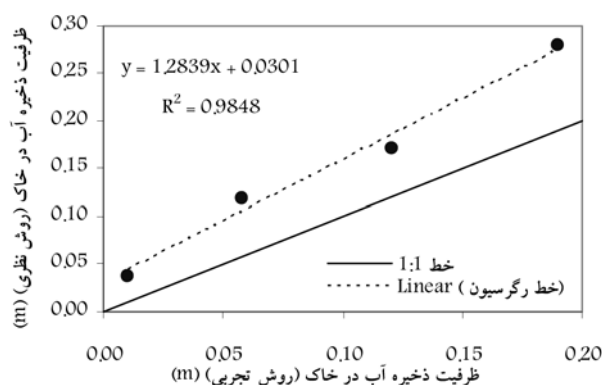
استفاده از این روش برای مناطق پر باران مانند دامنه های شمالی البرز با وجود سرعت نفوذ زیاد آب در خاک نیز ضروری به نظر می رسد. در این مناطق سطح ایستابی بالا بوده و در اثر بارندگی های فراوان خاک می تواند به سرعت اشباع گردد. بنابراین دانستن میزان ظرفیت ذخیره آب در خاک این گونه مناطق به منظور پیش بینی وقوع سیلاب می تواند مؤثر واقع شود.

امکان حبس شدن هوا در خاک های سنگین رسی بیشتر از خاک های سبک و شنی می باشد. به دلیل حبس شدن هوای بیشتر در این گونه خاک ها، خاک با سرعت بیشتری اشباع می گردد. این امر می تواند باعث بروز خسارات بیشتری در این مناطق گردد. بنابراین بهتر است که این بررسی در چنین خاک هایی، مانند کوشک فارس، نیز انجام شود.

در مطالعات هیدرولوژیک، برآورد میزان SWSC برای گروه بندی خاک از لحاظ سرعت نفوذ و تعیین دبی حداکثر سیلاب در حوضه آبخیز ضروری به نظر می رسد. زیرا در طراحی سرریزها، بندهای خاکی یا سایر سازه های آبی تعیین دبی طرح از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.



شکل ۱۰ - مقایسه میزان SWSC با سطوح ایستابی متفاوت با محاسبه ی هوای محبوس با دو روش نظری و تجربی (نمودار ۱:۱) و رگرسیون آن



شکل ۱۱ - مقایسه میزان SWSC با سطوح ایستابی متفاوت بدون محاسبه ی هوای محبوس با دو روش نظری و تجربی (نمودار ۱:۱) و رگرسیون آن

### بحث

ذکر یک نکته در ابتدا ضروری می باشد. با توجه به منحنی های مشخصه رطوبتی انتظار این است که با افزایش عمق از سطح خاک و نزدیک شدن به سطح ایستابی رطوبت خاک مستمرا افزایش یابد، ولی همچنان که در شکل های (۳) تا (۵) ملاحظه می شود این انتظار برآورده نشده است و در برخی اعماق خاک رطوبت خاک کاهش یافته است. دلیل این امر را می توان نایکخواخت بودن خاک در طول استوانه خاک دانست.

در یک نیمرخ خاک به دلیل وجود حاشیه موینگی به راحتی نمی توان مرز بین منطقه اشباع و غیر اشباع را مشخص نمود. در بالای سطح ایستابی مقداری آب توسط خاصیت موینگی به بالا صعود می کند و این باعث می شود که مرز دقیقی را نتوان برای سطح ایستابی در نظر گرفت.

همچنین، هنگامی که آب وارد خاک می شود به گونه منظم تمام خلل و فرج ها را پر نمی کند، بلکه ابتدا منافذ بزرگ را پر کرده و سپس وارد فضاهای خالی کوچکتر می شود. بنابراین مقداری هوا در



(Amsterdam).67. 307-324.

11- Grismer, M.E., and Gates, T.K. 1988. Estimating saline water table contribution to crop water use. Calif. Agric. 42, 23-24.

12- Meyboom, P. 1967. Ground water studies in the assiniboine river drainage basin, II, Hydrology characteristics of phreatophytic vegetation in south-central saskatchewan. Geol. Surv. Can. Bull. 139:64.

13- Nachabe, M., Masek, C., and Obeysekera, J. 2004. Observation and modeling of profile soil water storage above a shallow water table. Soil Sci. Am. J. 68:719-724.

14- Peck, A.J. 1969. Entrapment, stability, and persistence of air bubbles in soil water. Aust. J. Soil Res. 7. 79-90.

15- Raes, D. 2002. UPFLOW- Water movement in a soil profile from a shallow water table to the topsoil, Reference Manual. Leuven, Belgium.

16- Raes, D., and Deproost, P. 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. Agric. Water Manage. 62. 79-91.

17- Rijtema, P.F. 1969. Soil moisture forecasting, Nota 513. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, The Netherlands.

18- SCS. 1993. Irrigation water requirement, National Engineering Handbook, vol. 623. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington, USA (Chapter 3).

19- Sepaskhah, A.R., Kanooni, A. and Ghasemi, M.M. 2003. Estimating water table contribution to corn and sorghum water use. Agric. Water Manage. 58. 67-79.

20- Sepaskhah, A.R., and Karimi-Goghary, Sh. 2005. Shallow groundwater contribution to pistachio water use. Agric. Water Manage. 72: 69-80.

21- Wilson, B.N., Clack, D.C. and Young, R.A. 1982. A comparison of three infiltration model. Trans. ASAE. 25. 349-356.

روش برآورد SWSC در امور زهکشی برای مثال در معادله های جریان های ناماندگار مانند معادله ی گلاور-دام که در آن تغییرات سطح ایستابی در مدت زمان ویژه ای مورد نظر است، می تواند مؤثر واقع شود و با افزایش یا کاهش فاصله زهکش ها هزینه های اجرایی را کاهش و یا افزایش دهد.

#### منابع

۱- سپاسخواه، ع. و رضایی، ح. ۱۳۷۱. خلاصه مقالات سومین کنگره علوم خاک ایران. ۱۵-۱۸ شهریور ۱۳۷۱. کرج، ایران. ص ۳۴.

۲- صلحی، م. ۱۳۶۷. مطالعه ژنتیک، مورفولوژی، فیزیکوشیمیایی و طبقه بندی خاک های منطقه باجگاه در استان فارس. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.

3- Abdul, A.S., and Gilham, R.W. 1989. Field studies of the effects of the capillary fringe on streamflow generation. J. Hydrol. (Amsterdam). 112. 1-18.

4- Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper no. 3. Colorado State University. Fort Collins. Colorado.

5- Chen, X., and Hu, Q. 2004. Groundwater influences on soil moisture and surface evaporation. J. Hydrol. 297. 285-300.

6- Constantz, J., Herkelrath, W.N. and Mutphy, F. 1988. Air encapsulation during infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J. 52. 10-16.

7- Doorenbos, J., and Prut, W.O. 1977. Crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage No. 24. Rome, Italy.

8- Duke, H.R. 1972. Capillary properties of soil influence upon specific yeild. Trans. ASAE. 688-699.

9- Fayer, M.J., and Hillel, M. 1986. Air encapsulation: I. Measurement in a field soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 50. 568-572.

10- Gillham, R.W., 1984. The capillary fringe and it's effect on water-table response. J. Hydrol.

*Abstract***Determination of Soil Water Storage Capacity in a Silty Loam Soil with Shallow Water Table**Sh. Shams<sup>1</sup> and A.R. Sepaskhah<sup>2</sup>

In many hydrologic and agricultural researches, the amount of water requirement to raise a shallow water table to the soil surface, i.e., soil water storage capacity (SWSC), is important. In this research, the amount of SWSC was measured and estimated. Then, relationship between SWSC and groundwater depth were obtained as a polynomial function for Kuye-Asatid soil (silty loam) using theoretical and experimental methods. Also the effect of encapsulated air on SWSC is investigated in both methods. Four water table depths of 30, 60, 90 and 120 cm were simulated in laboratory, and soil water contents at different depths were measured and the amount of SWSC was calculated under different water table depths. Regression analysis was used to obtain the relationships between SWSC and water table depth for the experimental data. The amounts of soil water storage capacity in both experimental and theoretical methods are compared using linear regression. The values of the coefficient of determination  $R^2$  for cases encapsulated and without encapsulated air were 0.96 and 0.99, respectively. Further, the values of slope and intercept of linear relationship indicated that the data obtained with encapsulated air are close to the results of theoretical approach. The results show the amount of encapsulated air in soil water storage capacity is about 21% of soil porosity. Therefore, it should be considered in SWSC calculation. The proposed equation accommodates the reduction effect of the capillary fringe on SWSC. By statistical comparison the proposed function for case of encapsulated air is similar to theoretical equation, but in case of without encapsulated air condition, they are not similar.

**Keywords:** *Shallow Water Table, Soil Water Storage Capacity, Encapsulated Air.*

1- MSc. student of agro meteorology. Irrigation department, college of agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, sh.shams@gmail.com

2- Professor of Irrigation department-college of agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, sepas@shirazu.ac.ir