

اثر روشهای مختلف تعیین عامل شکل چاهک بر نتایج اندازه گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش گلف

محمود مشعل^{۱*}، حامد سهرابی^۲، مریم وراوی پور^۱ و قاسم زارعی^۴

(E-mail: mmashal@ut.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۰ - تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۴)

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)، یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است و تخمین آن در مطالعات آب و خاک اهمیت زیادی دارد. روشهای اندازه گیری K_s به دو روش صحرایی و آزمایشگاهی انجام می‌شود. نفوذسنج گلف یکی از روشهای صحرایی نفوذسنج با بار ثابت است که هدایت هیدرولیکی اشباع صحرایی (k_{fs}) را در بالای سطح ایستابی اندازه گیری می‌کند. یک پارامتر مهم در محاسبه (k_{fs}) ضریب شکل چاهک (C) است که به گرادیان فشار جریان آب در خاک بستگی دارد. حل‌های تحلیلی تقریبی مانند حل پورشه، حل گلور و حل منبع نیمه برای آن ارائه شده است. حل عددی آن به صورت تفاضل محدود با روشهای عددی صورت گرفته و توسط زولفانگ ژانگ و همکاران معادلات کاربردی برای آن ارائه شده است. بسط تئوری جریان را تابع هدایت هیدرولیکی (k_{fs}) و پتانسیل ماتریک خاک (\dot{O}_m) می‌داند که با آزمایش در دو عمق مختلف در یک چاهک هر دو پارامتر محاسبه می‌شوند. یکی از محدودیت‌های این روش، نتایج منفی و غیرقابل قبولی است که در بعضی از جواب‌ها مشاهده می‌شود. از این رو، آنالیزهای تک عمقی ریچاردز، تک عمقی لاپلاس و تک عمقی رگرسیون پایه‌ای ریچاردز ارائه شده است. در این تحقیق، پس از انجام آزمایش‌های مختلف با دستگاه گلف در دو عمق آب H_1 و H_2 (کمترین مقدار H_1 پنج و بیشترین مقدار H_2 ۲۰ سانتی‌متر) در ۱۸ چاهک با شعاع سه و عمق ۶۰ سانتی‌متر در شبکه‌ای مربعی به فواصل یک متری و در یک خاک لومی آنالیزهای دو عمقی و تک عمقی گلف با روشهای حل مختلف برای تعیین ضریب چاهک (C) به انجام رسید و هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای خاک (K_{fs}) محاسبه شد. نتایج نشان داد چنانچه در آنالیز دو عمقی گلف برای محاسبه هدایت هیدرولیکی از ضریب C با حل عددی استفاده شود، نتایج کمترین انحراف از مرکز را دارند. در این روش، به ترتیب استفاده از راه‌حل‌های پورشه، فشاری، یک‌طرفه، عددی و گلور بیشترین نتایج معتبر را در آزمایش دو عمقی ایجاد می‌کنند. آنالیز رگرسیون پایه‌ای ریچاردز با حل عددی C نزدیکترین نتیجه به روش دو عمقی را دارا بود. همچنین، مناسب‌ترین روش حل ضریب چاهک در آنالیز تک عمقی لاپلاس، ریچاردز و رگرسیون ریچاردز به ترتیب روشهای یک‌طرفه، گلور و عددی هستند.

کلمات کلیدی: آنالیزهای گلف، روشهای حل ضریب چاهک، نفوذسنج گلف، هدایت هیدرولیکی اشباع

۱ - استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران - ایران (نویسنده مسئول مکاتبه*)

۲ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران - ایران

۳ - استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران - ایران

۴ - استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی، البرز - ایران

مقدمه

ماتریک \bar{O}_m به دست می‌آید. نتایج روش دوعمقی گلف در خاک‌های همگن رضایت‌بخش است اما در مواردی که خاک‌ها مطبق باشند، درصد زیادی از نتایج منفی و غیرمنطقی خواهند شد و باید از آنها صرف‌نظر نمود (۱۱). محققین با اشاره به این موضوع که در خاک‌های مطبق درصد زیادی از مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و پتانسیل ماتریک منفی و غیرمنطقی می‌باشد به بررسی تأثیر افزایش عمق استغراق ثانویه بر جواب‌های منفی و غیرمنطقی پرداختند (۳). نتایج آنها نشان داد که برای مقادیر نسبت عمق استغراق ثانویه به اولیه H_2/H_1 بزرگتر از دو، تقریباً ۷۰ درصد از نتایج منطقی شده، درحالی‌که در نسبت‌های H_2/H_1 کوچک‌تر از دو، ۳۵ درصد از آزمایش‌ها جواب‌های منطقی را ارائه داده‌اند (۳). از تحقیقات انجام شده می‌توان فهمید که نتایج منفی روش گلف همچنان به عنوان یک محدودیت این روش باقی است.

ضریب شکل چاهک (C) یکی از پارامترهایی است که در معادله نفوذسنج گلف تأثیر به‌سزایی دارد. برای محاسبه C راه‌حل‌های مختلفی ارائه شده است. تأثیر روشهای مختلف حل C در جواب آنالیزهای گلف قابل توجه است. مدل‌های موجود حل C به سه گروه حل‌های تحلیلی با حذف اثر کاپیلاری روش گلور (۱۵، ۲۳ و ۲۵)، حل‌های تحلیلی با شرایط مرزی تخمینی و احتساب اثر کاپیلاری (۱۱ و ۱۵) و حل‌های عددی با شرایط مرزی صحیح با یا بدون احتساب اثر کاپیلاری قابل تقسیم‌اند (۱۶ و ۲۵).

نوع راه حل C که آنالیز دوعمقی گلف با آن راه‌حل نتایج منفی کمتر و مقدار انحراف از مرکز آن کمتر از سایر روشها باشد، از نظر عملی مورد توجه است. همچنین یک راه‌حل C که با آن نتایج آنالیزهای تک‌عمقی به نتیجه دو عمقی نزدیکتر باشد، به عنوان روش مناسب در آنالیزهای

هدایت هیدرولیکی اشباع صحرائی در مطالعات و طراحی زمینه‌های کشاورزی، محیط زیست و ژئوتکنیکی کاربرد دارد. کاربردهایی مانند طراحی برای میادین نشت از مخازن سپتیک، برآورد نشت، پشته آب زیرزمینی در اراضی خاکریزی شده، مخازن و کانال‌ها و طراحی‌های زهکشی اراضی دارد (۱۸). روش نفوذسنج بار ثابت برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع صحرائی خاک‌های غیراشباع برای سال‌های متمادی به‌کار گرفته می‌شود. این روش بر مبنای جریان ثابت تحت بار هیدرولیکی ثابت بسط یافته است (۲۵). مدل‌های ریاضی نیز برای تعیین پارامترهای مشخصه یک آب‌خانه بسته در مقیاس میدانی (مانند هدایت هیدرولیکی، ضریب جذبی و احتمالاً فاکتور نشت) با آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت ارائه شده است (۷ و ۸). نفوذسنج گلف با توسعه روش نفوذسنج با بار ثابت، در دانشگاه گلف کانادا ابداع شد و سپس این روش به وسیله دیگر محققین تکامل یافت (۹ و ۱۵). نفوذسنج گلف یکی از روش‌های صحرائی برای اندازه‌گیری برخی از مهمترین خصوصیات هیدرولیکی خاک است که اندازه، توزیع و پیوستگی منافذ را به کمیت درمی‌آورد (۶). در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع دستیابی به اعتمادپذیر بودن و مفید بودن روش‌های صحرائی و آزمایشگاهی از مقایسه بین برآوردهای حاصل از روشهای مختلف میسر است (۵). از آنجا که عوامل متفاوتی روی نتایج یک روش معین اثر می‌گذارد، لذا این مقایسه برای خاک‌ها و شرایط مختلف گرایش‌ها و روندهای متفاوتی را آشکار می‌سازند (۱۵). بنابراین احتساب عوامل مؤثر در هدایت هیدرولیکی ضرورتاً بر منابعی چون تغییرپذیری داده‌ها متکی می‌باشد که افزایش اطمینان به نتایج مقایسه بین روش‌ها را به دنبال دارد (۵).

از طریق تحلیل دوعمقی ریچاردز، در روش گلف دو فاکتور هدایت اشباع صحرائی K_{fs} و پتانسیل جریان

مشعل و همکاران: اثر روشهای مختلف تعیین عامل شکل چاهک بر نتایج ...

$$Q_t = \pi K_{fs} \left[-2a \int_0^H \frac{\partial \psi_p}{\partial r} \Big|_{r=a} dz + 2 \int_0^a \frac{\partial \psi_p}{\partial z} \Big|_{z=0} r dr + a^2 \right] \quad (4)$$

با جای گذاری شکل بدون بعد متغیرها به صورت:

$$\psi_p = \frac{\Psi_p}{H}; r^* = \frac{r}{a}; z^* = \frac{z}{H} \quad (5)$$

و حل معادله برای K_{fs} :

$$K_{fs} = \frac{Q_t}{2\pi a^2 \left[-\int_0^1 \frac{\partial \psi_p^*}{\partial r^*} \Big|_{r^*=1} dz^* + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \int_0^1 \frac{\partial \psi_p^*}{\partial z^*} \Big|_{z^*=0} r^* dr^* + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right]} \quad (6)$$

باتوجه به این که مخرج کسر برای نسبت معین H/a

ثابت است، می توان نوشت:

$$K_{fs} = \frac{CQ_t}{2\pi a^2 \left[1 + \frac{C}{2} \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right]} \quad (7)$$

که در آن:

$$C = \frac{1}{\left[-\int_0^1 \frac{\partial \psi_p}{\partial r} \Big|_{r=1} dz^* + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \int_0^1 \frac{\partial \psi_p}{\partial z} \Big|_{z=0} r^* dr^* \right]} \quad (8)$$

در روابط فوق، C ضریب شکل چاهک می باشد.

براساس بسط تئوری جریان در چاهک نفوذسنج با بار ثابت، جریان تابعی از هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه (K_{fs}) و پتانسیل ماتریک خاک ($\dot{\theta}_m$) است که ($\dot{\theta}_m$) کاپیلارپته خاک یا توانایی خاک در جذب رطوبت را مشخص می کند (۱۰). بنابراین، دبی ورودی به خاک (Q_f) به بار فشاری اولیه خاک غیراشباع نیز بستگی دارد

و معادله زیر برای آن ارائه شده است (۱۶):

$$Q_t = 2\pi a^2 \left[\frac{1}{C^*} + \frac{K_{fs}}{2} \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right] \quad (9)$$

که C^* از رابطه زیر حاصل می شود:

$$C^* = \frac{HC}{Hk_{fs} + \phi m} \quad (10)$$

($\dot{\theta}_m$) برابر با مساحت زیر منحنی تغییرات هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک $K(\psi)$ نسبت به بار فشاری خاک غیراشباع ϕ است.

تک عمقی انتخاب می شود. برای تضمین دقت بیشتر در محاسبه هدایت هیدرولیکی، لازم است این روشها با هم مقایسه شده و راه حل C مناسب انتخاب شود.

مواد و روشها

مبانی تئوری

جریان خروجی ماندگار از یک چاهک در یک محیط متخلخل صلب، همگن و ایزوتروپ و به صورت نیمه نامحدود و در حالت اشباع را می توان به صورت عبارتی از شارهای ناشی از فشار و ثقل در نظر گرفت. شار معمولاً انتگرال یک کمیت برداری 'چگالی شار' یا شدت شار' روی یک سطح محدود است که یک کمیت اسکالر می باشد.

خروج آب از چاهک توسط شار ناشی از فشار در جهت شعاعی از طریق دیواره و توسط شار ناشی از فشار در جهت قائم از طریق کف و شار ناشی از ثقل از طریق کف صورت می گیرد که به صورت زیر ارائه می شوند (۱۶):

$$\bar{v}_{rp} = -k_{fs} \frac{\partial \psi_p}{\partial r} \Big|_{r=a} \quad \text{شدت شار فشاری شعاعی} \quad (1)$$

$$\bar{v}_{zp} = -k_{fs} \frac{\partial \psi_p}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad \text{شدت شار فشاری عمودی} \quad (2)$$

$$\bar{v}_g = k \frac{\partial \psi_z}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad \text{شدت شار فشاری ثقلی} \quad (3)$$

در این رابطه ها، ψ_p بار فشاری موجود در خلل و فرج خاک (L)، ψ_z بار ثقلی نسبت به کف چاهک (L)، \bar{v}_{rp} و \bar{v}_{zp} به ترتیب مؤلفه های سرعت فشاری در جهت شعاعی و عمودی (L/T)، r فاصله شعاعی از مرکز چاهک و ψ_z بار ثقلی نسبت به کف چاهک (L) می باشد.

برای کل جریان خروجی از کف و جداره چاهک می توان نوشت (۱۶):

$$k_{fs} = \frac{cQ_t}{2\pi H^2 + c\pi a^2 + \frac{2\pi H}{\alpha^*}} \quad (19)$$

همچنین، ϕ_m برابر خواهد بود با:

$$\phi_m = \frac{cQ_t}{(2\pi H^2 + c\pi a^2)\alpha^* + 2\pi H} \quad (20)$$

در این رابطه، $\phi_m = \frac{k_{fs}}{\alpha^*}$ است.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، معادلات (۱۹) و

(۲۰) هر کدام دارای دو مجهول هستند که برای تعیین آنها بایستی هم‌زمان دو معادله به‌وسیله دو عمق استغراق آب در یک چاهک و یا یک عمق استغراق آب در دو چاهک با قطرهای مختلف و یا ترکیبی از این دو روش تشکیل داد.

اگر دو عمق استغراق H_1 و H_2 در یک چاهک موجود باشد در نتیجه دو شدت جریان Q_1 و Q_2 به‌دست می‌آید. با توجه به این که k_{fs} ، α^* و ϕ_m برای هر دو معادله ثابت هستند، می‌توان با حذف α^* مقدار k_{fs} را به صورت زیر به‌دست آورد (۱۶):

$$k_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (21)$$

$$G_2 = \frac{H_1 c_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 c_1 - H_2 c_1)]} \quad (22)$$

$$G_1 = G_2 \left(\frac{H_2 c_1}{H_1 c_2} \right) \quad (23)$$

به‌دلیل جواب‌های منفی و غیرمنطقی در روش دو عمقی، روش استغراق تک عمقی پیشنهاد شده است که مقدار k_{fs} با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$k_s = \frac{CQ}{2\pi H^2 + C\pi H^2 + \frac{2\pi H}{\alpha}} \quad (24)$$

در این رابطه، k_s تخمین آنالیز تک عمقی ریچاردز از مقدار k_{fs} است (۹). براساس نتایج به‌دست آمده، برای بیشتر خاک‌ها مقدار α^* در حدود ۱۰ تا ۱۲ مناسب است (۹ و ۱۵).

مطابق تحقیقات انجام شده، در آنالیز لاپلاس خود با فرض این که کاپیلاریته خاک صفر است و در نتیجه α^*

$$\phi_m = \int_0^{\phi_1} k(\psi) d\psi \quad (11)$$

برای به‌دست آوردن $k(\phi)$ رابطه زیر ارائه شده است (۱۰):

$$k(\psi) = k_{fs} \exp(\alpha\psi) \quad (12)$$

که در آن، مقدار α به نوع خاک بستگی دارد و به‌وسیله رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\phi_m = \int_0^{\phi_1} k_{fs} e^{\alpha\psi} d\psi = \frac{k_{fs}}{\alpha(1 - e^{-\alpha\phi_1})}$$

$$\phi \leq 0; 0 < \alpha \leq \infty \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{k_{fs} - k_i}{\phi_m} \quad (14)$$

در این رابطه، K_i هدایت هیدرولیکی خاک در رطوبت اولیه ($\phi = \phi_i$) است. اگر نسبت به k_{fs} کوچک باشد (که معمولاً در خاک‌های با ظرفیت مزرعه یا خشک‌تر صادق است)، خواهیم داشت (۱۶):

$$k_i \ll k_{fs} \quad \alpha \cong \frac{k_{fs}}{\phi_m} = \alpha^* \quad (15)$$

که α^* تخمینی از α است. در نتیجه هدایت هیدرولیکی

اشباع صحرائی (k_{fs}) به صورت زیر خواهد بود:

$$k_{fs} = \frac{cQ_t - 2\pi H\phi_m}{2\pi H^2 + c\pi a^2} \quad (16)$$

معادلات نفوذسنج گلف

اگر دبی خروجی از نفوذسنج گلف در حالت کلی به صورت زیر نوشته می‌شود (۹):

$$Q = ak_{fs} + B\phi_m \quad (17)$$

قسمت اول، سمت راست معادله مربوط به جزء اشباع جریان خروجی از چاهک و قسمت دوم، مربوط به جزء غیراشباع یا جریان کاپیلاری است (۱۶). در این معادله، A و B به‌ترتیب عبارتند از:

$$A = \frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2$$

$$B = \frac{2\pi H}{C} \quad (18)$$

که C پارامتر بدون بعد ضریب شکل چاهک است که بستگی به نسبت H/a دارد. در نتیجه مقدار K_{fs} برابر است با:

حل عمومی جریان فشاری از حل معادله لاپلاس در مختصات کروی برای جریان خروجی از چاهک به درون یک محیط متخلخل، ایزوتروپ و همگن در حالت ماندگار به دست می آید. معادله لاپلاس به صورت زیر نوشته می شود (۱۶):

$$\nabla^2 \varphi_p = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(\rho^2 \psi'_p)}{\partial \rho} \right] \quad (28)$$

در این رابطه، ρ شعاع از مبدأ مختصات، $\psi'_p(\rho)$ بار فشاری، مشتق بار فشاری و ∇^2 عملگر دایورژانس است. معادله (۲۸) با شرایط مرزی زیر به راحتی قابل حل است:

$$\rho = a \Rightarrow \varphi_p = \varphi_{p2} \quad (28)$$

$$\rho \rightarrow \infty \Rightarrow \varphi_p \rightarrow 0 \quad (29)$$

که در نتیجه خواهیم داشت:

$$\varphi_p = \frac{q}{4\pi k_{fs} \rho} \quad (30)$$

در این رابطه، q قدرت یک منبع نقطه‌ای در جریان فشاری است. معادله (۲۸) توزیع بار فشاری $\varphi_p(\rho)$ را در اطراف یک منبع نقطه‌ای به قدرت (q) در محدوده مختصات کروی نشان می دهد. با تبدیل به مختصات استوانه‌ای داریم:

$$\varphi_p = \frac{q}{4\pi k_{fs} \rho} \times \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} \quad (31)$$

در این رابطه، z ارتفاع کف چاهک و h تغییرات ارتفاع آب از منبای z می باشد.

جریان ثابت خروجی از چاهک را می توان توسط یک سری پیوسته منبع نقطه‌ای با قدرت های متفاوت حول محور چاه مرتب شده اند، تخمین زد، بدین معنی که چاهک (و جریان ثابت از آن) را در واقع با یک منبع خطی دارای طول و قدرت توزیعی متنهای جایگزین می کنیم. واضح است که می توان منبع خطی با طول های متفاوت و مکان های متفاوت در راستای محور چاهک و با توزیع های متفاوت قدرت منبع در نظر گرفت. علاوه بر

حذف می گردد (۱۴). هدایت هیدرولیکی را به صورت زیر قابل محاسبه دانستند:

$$K_L = \frac{CQ}{(2\pi H^2 + C\pi H^2)} \quad (25)$$

در این رابطه، k_L تخمین لاپلاس از k_{fs} است.

برای رفع جواب های منفی روش دو عمقی نفوذسنج گلف، آنالیز تک عمقی لاپلاس و رگرسیون پایه ای ریچاردز را ارائه شد (۱۷). در آنالیز تک عمقی رگرسیون پایه ای ریچاردز، رابطه زیر را ارائه کردند:

$$k_R = \beta k_L^0 \quad (26)$$

در این معادله، k_R تخمین رگرسیون پایه ای ریچاردز از مقدار k_{fs} بوده و در آن β و ω پارامترهای بدون بعد هستند که از طریق روابط رگرسیون حداقل مربعات بین k_L و k_{fs} به دست می آیند.

راه حل های تحلیلی تقریبی برای به دست آوردن مقدار C

مسئله مهم در تعیین ضریب چاهک برآورد گرادیان ها می باشد و تفاوت حل ها از اینجا ناشی می شود. در ادامه، چند راه حل برای تعیین ضریب چاهک شرح داده شده است.

راه حل پورشه: با ثابت گرفتن گرادیان ها در معادله و قرار دادن فرم اولیه گرادیان ها برابر واحد این راه حل به صورت زیر است:

$$C = \frac{1}{\left(\frac{a}{H}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{a}{H}\right)^2} \quad (27)$$

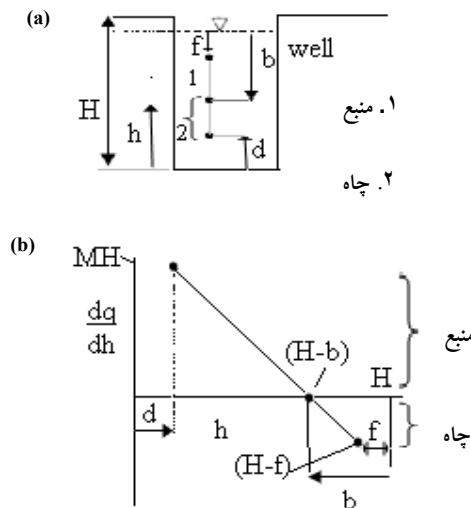
در این معادله، a شعاع چاهک و H ارتفاع ثابت آب در چاهک است.

راه حل فشاری: در این راه حل، گرادیان های فشاری در معادله کلی ضریب چاهک (C) به طور تقریب با گرادیان های به دست آمده از 'منبع های خطی' مختلف با توزیع های 'قدرت منبع' متفاوت تخمین زده می شود. دبی خروجی از واحد طول قائم بر نقطه منبع (Source) را قدرت منبع گویند.

قدرت منبع خطی را تخمین زد نشان می‌دهد (توجه کنید dq/dh یک تابع خطی از h است و بنابراین q یک تابع درجه دو از h است). مقادیر ثابت b ، d و f طول و مکان منبع (Source) و چاه (Sink) را تعیین می‌کنند.

این می‌توان از چاه‌های خطی به همراه منبع‌های خطی و شرایط مرزی مختلف استفاده کرد (۱۶).

شکل (۱) طریقی که از آن بتوان جریان ثابت خروجی از یک چاهک را در یک توزیع درجه دو از



شکل ۱ - تخمین جریان ثابت خروجی از چاهک به وسیله یک منبع خطی - چاه خطی به وجود آمده از توزیع منبع درجه ۲ (۱۵)

تبدیل‌های زیر جهت بدون بعد کردن پارامترها استفاده گردد:

$$h^* = \frac{h}{H}, b^* = \frac{b}{H}, d^* = \frac{d}{H}, f^* = \frac{f}{H} \quad (34)$$

در این رابطه، b ، d و h طول و موقعیت نقاط منبع و چاه هستند (شکل ۱).

f و b ارتفاع آب از روی سطح آب به طرف پایین و d ارتفاع آب از کف چاهک به طرف بالا اندازه‌گیری می‌شود.

با حل دیفرانسیلی معادله (۳۰)، با محاسبه $\partial \psi^* / \partial z^*$ و $\psi^* p / \partial r^*$ و اغماض از جریان ثقلی نسبت به فشاری و قرار دادن در معادله (۸)، برای C خواهیم داشت:

همان‌طورکه از شکل (۱-۲) برمی‌آید چاه خطی نیز یک توزیع قدرت درجه دو دارد. این شکل توسط رابطه زیر تشریح می‌شود:

$$dq = \frac{MH}{[(H-b)-d]} [(H-b)-h] dh \quad (32)$$

پارامتر M با انتگرال‌گیری از معادله بالا به شکل زیر به دست می‌آید:

$$M = \frac{2Q_p [(H-b)-d]}{H [2(H-b)(H-b)-d] - 2(H-b)(H-f) + (H-f)^2 + d^2} \quad (33)$$

در این رابطه، Q_p کل جریان خروجی (جریان فشاری) از سیستم منبع خطی - چاه خطی است.

$$C = \frac{(1-b^*) \left[\sinh^{-1} \left(\frac{H(1-f^*)}{a} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Hd}{a} \right) \right] - \sqrt{\left(\frac{a}{H} \right)^2 + (1-f^*)} + \sqrt{\left(\frac{a}{H} \right)^2 + d^*}}{2(1-b^*) [(1-b^*)-d] - 2(1-b^*)(1-f^*) + (1-f^*)^2 + (d^*)^2} \quad (35)$$

حل گلور

حل گلور یک حالت خاص از راه حل فشاری برای یک توزیع درجه دو قدرت منبع است. برای این حل فرض می‌گردد $f^* = b^* = d^* = 0$ است که مربوط به یک منبع خطی از کف چاهک تا سطح آب و بدون چاه خطی است (۱۵). حل گلور که هم‌ارز معادله (۲۶) است، به صورت زیر می‌باشد:

$$c = \sinh^{-1} \left(\frac{H}{a} \right) - \sqrt{\left(\frac{a}{H} \right)^2 + 1} + \left(\frac{a}{H} \right) \quad (36)$$

چنانچه مقدار H از a خیلی بزرگتر باشد ($H \geq 4a$),

معادله بالا به شکل زیر ساده می‌شود:

$$c = \sinh^{-1} \left(\frac{H}{a} \right) - 1 \quad (37)$$

راه حل منبع یک‌طرفه یا منبع نیمه

یک حالت ویژه دیگر از حل عمومی برای توزیع درجه دو قدرت منبع با دقتی بیشتر از حل گلور ارائه شده است (۱۵). برای این حل $b^* = f^* = 1/2$ و $d^* = 0$ فرض شده است که مربوط به منبع خطی از کف چاهک تا نیمه عمق آب چاهک و بدون گرداب (چاه) است. مقدار C مربوط به حل منبع نیمه به شکل زیر است:

$$c = 4 \left[\frac{1}{2} \sinh^{-1} \left(\frac{H}{2a} \right) - \sqrt{\left(\frac{a}{H} \right)^2 + \frac{1}{4}} + \left(\frac{a}{H} \right) \right] \quad (38)$$

راه حل عددی

توزیع گرادیان‌ها در معادله (۸) را می‌توان توسط حل عددی توزیع بار فشاری جریان در شرایط ماندگار در یک حوزه استوانه‌ای حول چاهک نیز به‌دست آورد. جریان فشاری را می‌توان توسط معادله لاپلاس بدون بعد استوانه‌ای به شکل زیر تشریح کرد:

$$\frac{1}{r^*} \left(\frac{H}{a} \right)^2 \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial \psi_p^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{\partial \psi_p^*}{\partial z^*} \right) = 0 \quad (39)$$

با اخذ شرایط مرزی و تبدیل به تفاضل محدود مرکزی پنج نقطه‌ای و با روش تکرار معادله بالا حل شد (۱۵). سه معادله جهت به‌دست آوردن ضریب چاهک ارائه شده است که با نمودارهای ارائه شده توسط رینولدز و همکاران تطابق کامل داشته و به‌صورت زیر هستند (۲۴):

خاک شنی

$$c = \left(\frac{H/a}{2.074 + 0.093 H/a} \right)^{0.754} \quad (40)$$

$$c = \left(\frac{H/a}{1.992 + 0.091 H/a} \right)^{0.683} \quad (41)$$

$$c = \left(\frac{H/a}{2.101 + 0.118 H/a} \right)^{0.655} \quad (42)$$

منطقه مورد مطالعه

در منطقه مورد آزمایش (مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران واقع در شهرستان پاکدشت)، نمونه‌هایی از خاک این مزرعه انتخاب و با روش هیدرومتری درصد مواد تشکیل‌دهنده آنها مشخص شد. این نمونه‌ها به‌طور کاملاً تصادفی و بدون تکرار از اعماق ۳۰ تا ۷۰ سانتی‌متر از چاهک‌های شماره دو، سه، شش، ۱۱، ۱۴ و ۱۸ انتخاب شده‌اند. سپس با استفاده از مثلث بافت خاک، لومی تشخیص داده شد (رس ۱۴، سیلت ۴۱ و شن ۴۵ درصد). آزمایش‌های گلف به وسیله دستگاه نفوذسنج گلف k_1 ۲۸۰۰ انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها تعداد ۱۸ چاهک به صورت شبکه منظم مربعی شکل با فواصل یک در یک متر و به عمق ۶۰ و شعاع سه سانتی‌متر حفر شدند. باتوجه به این‌که ضریب چاهک به خصوصیات چاهک از جمله عمق آن وابسته است، جهت بارزتر شدن اثر ضریب چاهک از هفت عمق متفاوت پنج، هفت، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ سانتی‌متر در هر چاهک استفاده شد. اندازه‌گیری دبی خروجی از نفوذسنج در هفت مرحله به شرح زیر انجام شد: در هر چاهک دبی ثابت خروجی از نفوذسنج تحت بار ثابت آبی (H_1) برابر پنج سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری دبی تا زمانی ادامه داشت که افت سطح آب در چهار فاصله زمانی متوالی دو دقیقه‌ای مساوی شود. در مرحله دوم، لوله هوا دو سانتی‌متر بالا کشیده شد تا سطح آب به (H_2) برابر هفت سانتی‌متر برسد و مقدار دبی ثابت خروجی یادداشت گردید. در مرحله سوم، لوله هوا سه سانتی‌متر بالاتر کشیده شد تا سطح آب از هفت به ۱۰ سانتی‌متر برسد و مقدار دبی خروجی قرائت شد. به همین ترتیب، آزمایش در چاهک اول با بالا کشیدن لوله هوا در چهار مرحله

با افزایش نسبت H_2/H_1 ، نوسان K_{fs} کمتر می‌شود و این می‌تواند به دلیل کاهش نوسانات ΔC در شکل (۳) باشد. همچنین ترتیب قرار گرفتن نمودارها در شکل (۲) (به لحاظ بیشتر بودن مقدار) می‌تواند به دلیل ترتیب قرار گرفتن نمودارهای شکل (۳) باشد.

در جدول (۱)، تعداد نتایج مثبت K_{fs} در ۱۸ تکرار نشان داده شده است. جدول (۱) نشان می‌دهد که چنانچه در حل K_{fs} از C با روش پورشه استفاده شود، بیشترین تعداد نتایج مثبت نسبت به سایر روشهای حل C به دست می‌آید. این جدول نشان می‌دهد، تعداد نتایج مثبت K_{fs} به دست آمده با سایر روشهای حل C به صورت زیر است: یک‌طرفه < عددی < گلور < فشاری. ترتیب بزرگی C با روشهای مختلف حل به صورت: فشاری < پورشه < یک‌طرفه < عددی < گلور است و این نشان می‌دهد با افزایش C تعداد نتایج مثبت بیشتر می‌شود. البته لازم به ذکر است روش حل فشاری از این قاعده پیروی نمی‌کند. همچنین در همه روشها با افزایش نسبت H_2/H_1 تعداد نتایج مثبت بیشتر می‌شود.

دیگر برای اعماق ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها، هدایت هیدرولیکی اشباع صحرایی خاک (K_{fs})، به روش آنالیز دوعمقی گلف و آنالیزهای تک عمقی محاسبه گردید.

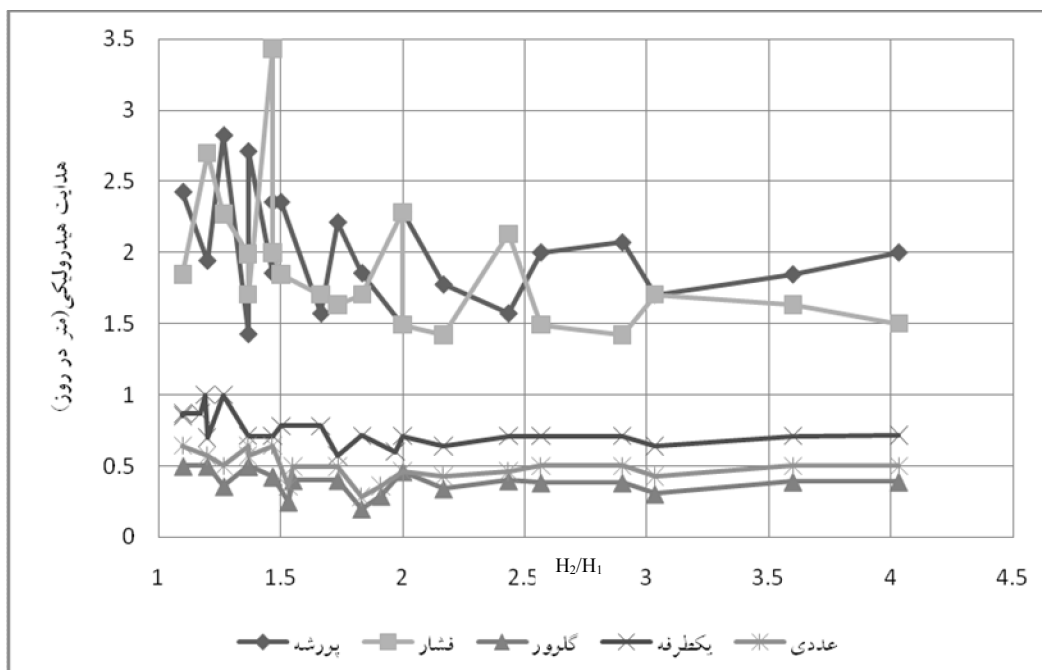
نتایج و بحث

آنالیز دوعمقی گلف، به علت فرضی نبودن α^* و بلکه محاسبه α دارای دقت قابل اعتمادتری نسبت به سایر آنالیزهای گلف است (۹). به همین دلیل، چنانچه راه‌کارهایی در جهت کاهش نتایج منفی گلف ارائه شود، در گسترش و استفاده مفید از این دستگاه گام مؤثری برداشته خواهد شد.

شکل (۲) مقدار K_{fs} به دست آمده از آنالیز دو عمقی با پنج روش حل C را نشان می‌دهد. محور افقی این شکل نسبت H_2/H_1 و محور عمودی در آن از میانگین‌گیری K_{fs} در ۱۸ چاهک مورد آزمایش به دست آمده است. به این معنی که در هر یک از روشها، در هر نسبت H_2/H_1 ، از تمامی K_{fs} های ۱۸ چاهک میانگین گرفته شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است،

جدول ۱ - تعداد نتایج مثبت K_{fs} برای نسبت‌های مختلف H_2/H_1 و پنج روش متفاوت حل C

H_2/H_1	پورشه	فشار	گلور	یک‌طرفه	عددی
۱/۱	۱۸	۱۳	۱۶	۱۶	۱۴
۱/۲	۱۷	۱۲	۱۰	۱۵	۱۵
۱/۲	۱۸	۱۶	۱۷	۱۷	۱۷
۱/۳	۱۷	۱۳	۱۴	۱۷	۱۵
۱/۳	۱۸	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
۱/۴	۱۸	۱۴	۱۸	۱۸	۱۵
۱/۴	۱۸	۱۴	۱۶	۱۷	۱۴
۱/۵	۱۸	۱۴	۱۴	۱۸	۱۷
۱/۵	۱۸	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
۱/۷	۱۸	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
۱/۷	۱۸	۱۵	۱۶	۱۷	۱۶
۱/۸	۱۸	۱۷	۱۷	۱۸	۱۸
۲/۰	۱۸	۱۶	۱۷	۱۸	۱۶
۲/۰	۱۸	۱۷	۱۷	۱۸	۱۸
۲/۱	۱۸	۱۷	۱۷	۱۸	۱۸
۲/۴	۱۸	۱۶	۱۷	۱۷	۱۷
۲/۶	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
۲/۹	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
۳/۰	۱۸	۱۷	۱۸	۱۸	۱۸
۳/۶	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
۴/۰	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
جمع	۳۷۶	۳۳۴	۳۴۷	۳۶۵	۳۵۱



شکل ۲ - میانگین مقدار محاسبه شده K_{fs} برای ۱۸ چاهک در نسبت‌های متفاوت H_2/H_1 با روشهای حل مختلف C

خاک‌های رسوبی است که ناشی از تغییرات دانه‌بندی و ساختمان خاک است. بنابراین قابل توصیه است در اندازه‌گیری صحرایی به جای صرف زمان بیشتر برای افزایش دقت تعداد نقاط اندازه‌گیری را افزایش داد.

بررسی اثر C در آنالیزهای تک عمقی

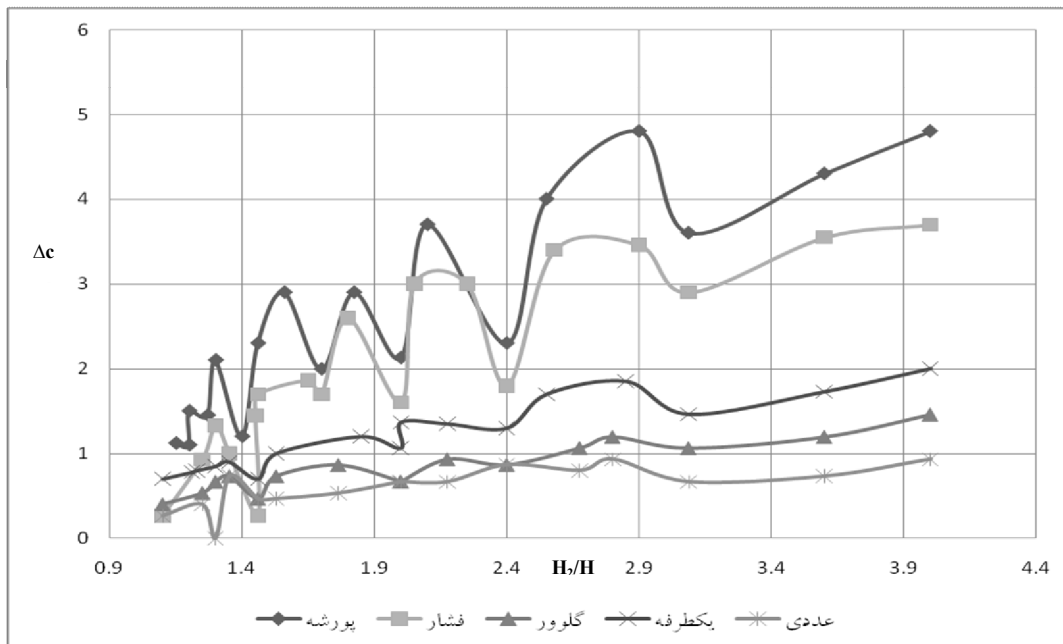
شاخص‌های آماری هدایت هیدرولیکی آنالیزهای تک عمقی محاسبه شده از روش‌های مختلف حل C، با استفاده از نرم افزار SAS به دست آمد.

مقایسه پارامترهای آماری نشان می‌دهد که آنالیز لاپلاس با حل C منبع یک طرفه، ریچاردز با حل C گلور و رگرسیون ریچاردز با حل C عددی، کمترین انحراف از مرکز را دارند. به همین دلیل، در هر عمقی مقدار هدایت هیدرولیکی به دست آمده از این روشها، به واقعیت نزدیک تر بوده و احتمال اشتباه بودن آن کاهش می‌یابد (جدول ۳).

شاخص‌های آماری هدایت هیدرولیکی (میانگین، انحراف معیار، واریانس، ضریب تغییرات و ضریب چولگی) دو عمقی گلف با روشهای مختلف حل C در جدول (۲) ارائه شده‌اند. در این قسمت، از نرم‌افزار SAS استفاده شده است. مقدار انحراف از مرکز K_{fs} ، با روش پورشه، بیشتر و با روش عددی کمتر از سایر روشها است. به همین دلیل، روش عددی با وجود این‌که تعداد مقادیر مثبت آن کمتر از روش پورشه است، لیکن در محاسبه K_{fs} مناسب‌تر است، زیرا در یک طرح اجرایی با یک آزمایش چنانچه از راه‌حل پورشه استفاده شود، ممکن است نتیجه با مقدار واقعی هدایت هیدرولیکی اختلاف زیادی داشته باشد، لیکن در روش عددی C چنین نیست. در یک قطعه کوچک هدایت هیدرولیکی در نقاط نزدیک به هم تفاوت محسوسی دارند، به طوری‌که ضریب تغییرات در حدود ۲۰ درصد می‌باشد (جدول ۲). این نکته ناشی از طبیعت

جدول ۲ - برآورد پارامترهای آماری مقادیر K_{fs} محاسبه شده با روش های حل C متفاوت

روشهای حل ضریب چاهک					پارامتر آماری
عددی	یک طرفه	گلور	فشار	پورشه	
۰/۵۳۱	۰/۷۰۱	۰/۴۲۹	۱/۷۹۲	۱/۹۷	میانگین (متر در روز)
۰/۰۹۰	۰/۱۰۱	۰/۰۹۳	۰/۵۰۴	۰/۴۰	انحراف معیار (متر در روز)
۰/۰۰۸	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۲۵۴	۰/۱۶	واریانس
۱۷/۴۰۰	۱۴/۳۴۰	۲۱/۶۷۰	۲۸/۱۰۰	۲۰/۳۴	ضریب تغییرات (%)
۰/۸۱۰	۰/۹۲۰	۰/۸۸۰	۲/۲۷۰	۰/۵۲	ضریب چولگی



شکل ۳ - مقدار $\Delta C = C_2 - C_1$ برای روشهای مختلف حل C به ازای نسبت های متفاوت H_2/H_1

جدول ۳ - شاخص های آماری تعیین K_{fs} از روشهای مختلف حل C

پارامتر آماری	رگرسیون با حل c عددی	ریچاردز با حل c گلور	لاپلاس با حل c یک طرفه
میانگین (متر در روز)	۰/۵۹	۰/۲۸	۰/۴۷
انحراف معیار (متر در روز)	۰/۰۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۵
واریانس	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶۵
ضریب تغییرات (%)	۶/۸۴	۰/۵	۵/۴
ضریب چولگی	۰/۷۲	۰/۰۴	۰/۷۲

مشعل و همکاران: اثر روشهای مختلف تعیین عامل شکل چاهک بر نتایج ...

مقایسه نتایج آنالیزهای تک عمقی با دو عمقی

روش دو عمقی باتوجه به تئوری کامل تر جریان یک روش پایه است که به خوبی در خاکهای همگن و بدون ساختار جواب می دهد، اما به علت وجود لایه های مختلف خاک و همچنین ترکها و حفره های موجود در خاک که منجر به کاهش یا افزایش دبی می شود، درصد بالایی از مقادیر K_{fs} منفی می شود که غیر منطقی است و باید از آنها صرف نظر کرد (۲۰ و ۲۱).

لذا به دلیل وجود جواب های منفی در آنالیز دو عمقی، استفاده از آنالیزهای تک عمقی مناسب به نظر می رسد، زیرا امکان دارد با وجود صرف وقت زیاد جواب منفی به دست آید. بنابراین، استفاده از آنالیزی که جواب منفی نداشته و نتیجه آنها به آنالیز دو عمقی نزدیک باشند، می تواند کارایی نفوذسنج گلف را بیشتر کند.

در این قسمت جهت مقایسه نتایج، میانگین نتایج آنالیزهای تک عمقی با معیار آزمون دانکن، با آنالیز دو

عمقی گلف مقایسه شده اند (جدول ۴). آنالیز ریچاردز با روش حل منبع یک طرفه C و آنالیزهای لاپلاس و رگرسیون ریچاردز با روشهای حل گلور و عددی C، تفاوت معنی داری با آنالیز دو عمقی ندارند (جدول ۵). جدول (۵) نشان می دهد که آنالیز رگرسیون ریچاردز با روش حل عددی C، کمترین مقدار انحراف از مرکز را دارد. به همین دلیل، با استفاده از این آنالیز علاوه بر این که نتیجه محاسبات مربوط به مقدار عددی هدایت هیدرولیکی خاک منفی نخواهد شد، بلکه مقدار تخمین زده شده به واقعیت بسیار نزدیک می شود. نتایج حاصله از دیگر تحقیقات نیز مؤید این نتایج است (۴ و ۱۲). در این تحقیق، میانگین آنالیز دو عمقی از آنالیز لاپلاس بیشتر است که با برخی نتایج مخالف است (۱ و ۲). یکی از دلایل این نتیجه می تواند منفی بودن بسیاری از نتایج پتانسیل ماتریک در این تحقیق باشد.

جدول ۴ - مقایسه K حاصله از آنالیزهای تک عمقی با روش مبناء (دو عمقی گلف با حل عددی C)

تک عمقی	ریچاردز				لاپلاس				رگرسیون ریچاردز			
	عدد	یک طرفه	گلور	فشار	عدد	یک طرفه	گلور	فشار	عدد	یک طرفه	گلور	فشار
n.s	s	n.s	s	s	n.s	s	n.s	s	s	s	s	s

n.s: معنی دار نبودن، s: معنی دار بودن

جدول ۵ - پارامترهای آماری آنالیزهای تک عمقی که با آنالیزهای دو عمقی اختلاف معنی داری ندارند.

آنالیز تک عمقی	ریچاردز		لاپلاس		رگرسیون ریچاردز	
	یک طرفه	گلور	گلور	عدد	گلور	عدد
روش حل ضریب چاهک	۰/۳۸	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۵	۰/۴۷
میانگین (متر در روز)	۰/۰۷	۰/۰۷۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۳۶	۰/۰۲۵
انحراف معیار (متر در روز)	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶۵
پارامتر آماری	۱۹/۲۹	۱۷/۲۰	۱۵/۲۲	۱۵/۲۲	۷/۳۰	۵/۴۰
ضریب تغییرات (%)	۰	۱/۴۶	۱/۹۳	۱/۹۳	۰/۷۲	۰/۷۲
ضریب چولگی						

نتیجه‌گیری

همچنین با افزایش مقدار C تعداد نتایج مثبت بیشتر می‌شود که باعث بهبود نتایج در این نوع خاک شده است و باید تأثیر این روش در خاک‌هایی با بافت مختلف بررسی شود. آنالیز دو عمقی گلف با حل عددی C کمترین انحراف از مرکز را دارد. همچنین، آنالیزهای تک عمقی لاپلاس، ریچاردز و رگرسیون ریچاردز به ترتیب با روشهای حل یک طرفه، گلور و عددی، کمترین مقدار انحراف از مرکز را دارند و مناسب‌ترین آنالیز تک عمقی، آنالیز رگرسیون پایه‌ای ریچاردز است.

روش نفوذسنج گلف به دلیل داشتن مبانی تئوریک قوی، روشی مناسب در تعیین هدایت هیدرولیکی خاک‌ها است. یکی از محدودیت‌های این روش، داشتن نتایج منفی و غیرمنطقی در بعضی از جواب‌ها است که منجر به هدر رفتن هزینه و زمان در انجام آزمایشات می‌شود. در آنالیز دو عمقی، چنانچه از روش حل پورشه برای تعیین C استفاده شود و نیز آزمایشات در نسبت‌های بالای H_2/H_1 انجام گردد، تعداد نتایج مثبت به حداکثر می‌رسد.

منابع مورد استفاده

۱. درزی ع، شقاقی م، یاری ع. و پهلوان ر (۱۳۸۶) ارزیابی روش چاهک وارونه و آنالیزهای پرماتر گلف به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های لومی. علوم کشاورزی ایران ۳۸(۱): ۸۵-۹۲
۲. کشکولی ح. ع، ابن جلال ر. و مختاران ر (۱۳۸۵) ارزیابی آنالیزهای تک عمقی پرماتر گلف برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع در بالای سطح ایستابی در یک خاک با بافت متوسط. علمی کشاورزی ۲۹(۳): ۱۰-۱.
۳. شقاقی م، مشعل م. و زارعی ق (۱۳۸۶) اثر افزایش عمق استغراق ثانویه در بهبود دقت اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با روش دو عمقی گلف. تحقیقات مهندسی کشاورزی ۸(۱): ۱۳۶-۱۲۵.
۴. قبادیان ر. و محمدی ک (۱۳۸۸) ارزیابی آنالیزهای تک عمقی و دو عمقی پرماتر گلف در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع بالای سطح ایستابی در یک خاک لوم. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
5. Bagarello V (1997) Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph Permeameter. Geoderma 80: 169-180.
6. Bagarello V and Giordano G (1999) Comparison of Procedures to estimate Steady Flow Rate in Field Measurement of Saturated Hydraulic Conductivity by the Guelph Permeameter Method. Agric. Eng. Res. 74: 63-71. Article No. Jaer. 1999.0437, available online at <http://www.idealibrary.com>
7. Cassiani G (1998) A new method for the interpretation of the constant-head well permeameter. Hydrology 210: 11-20.
8. Chang YC and Yeh HD (2009) New solutions to the constant-head test performed at a partially penetrating well. Hydrology 369: 90-97.
9. Elrick DE, Reynolds WD and TAN KA (1989) Hydraulic conductivity measurement in the unsaturated zone using improved well analysis. Ground Water Mointoing Rev. 9: 184-193.
10. Gardner WR (1958) Some steady-state Solution of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. Soil Sci. 85: 228-232.
11. Philip JR (1985) Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil. Water Resource Res. 21: 1025-1033.
12. Regardo CM and Muñoz-Carpena R (2003) Estimating the saturated hydraulic conductivity in a spatially variable soil with different permeameters:

- a stochastic Kozeny-Carman relation. *Soil and Tillage Research* 77(2): 189-202.
- 13 . Reynolds WD and Elrick DE (1985) In situ measurement of saturated hydraulic conductivity sorptivity parameter using Guelph Permeameter. *Soil Sci.* 140(4): 292-302.
- 14 . Reynolds WD, Vieira SR and Topp GC (1992) An assessment of the single head analysis for the constant head well permeameter. *Can. J. Soil Sci.* 72: 489-501.
- 15 . Reynolds WD, Elrick D and Topp JC (1983) A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.* 136: 250-268.
- 16 . Reynolds WD, Elrick DE and Clothier BE (1985) The constant head well permeameter effect on unsaturated flow. *Soil Sci.* 139 (2): 172-180.
- 17 . Reynolds WD and Zebchuk WD (1996) Hydraulic conductivity in a clay soil: Two measurement techniques and spatial characterization, *Soil. Sci. Soc. Am.* 60: 1679-1685.
- 18 . Rodgers M and Mulqueen J (2006) Field-saturated hydraulic conductivity of unsaturated soils from falling-head well tests. *Agricultural Water Management* 79: 160.
- 19 . Scotter DB, Clothier BE and Harper ER (1982) Measuring saturated hydraulic conductivity and capillarity using twin ring. *Aust. Soil Res.* 20: 623-639.
- 20 . Viera SR, Reynoldsand WD and Topp GC (1988) Spatial varibility of Hydraulic properties in a high structured clay soil. *Proc. Symp. Validation of flow and Transport models for unsaturated zone.* Ruidoso, NM.
- 21 . Wilson GV, Alfonsi JM and Jardine PM (1989) Spatial variability of saturated hydraulic conductivity of the subsoil of the forested watersheds. *Soil Sci. Soc. Am.* 53: 679-685.
- 22 . Yari a, Shaghaghi M, Darzi A and Pahlavan R (2006) The best method of Guelph analyses for measuring loamy soils saturated hydraulic Conductivity. *Applied Sciences* 6(12): 2657-2661.
- 23 . Zangar CN (1953) Theory and problems of water percolation. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Eng. Monogr. No. 8. Denver, CO.
- 24 . Zhuanfang F, Zhang P, Groenevelt H and Gary Parkin W (1998) The well-shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter. *Soil and Tillage Research* 49: 219-221.
- 25 . Xiang J (1994) Improvements in evaluating constant-head permeameter test data. *Hydrology* 162: 77-97.

Effect of different well shape factor determination methods on saturated hydraulic conductivity results in Guelph Permeameter analysis

M. Mashal^{*1}, H. Sohrabi², M. Varavypour¹ and Gh. Zarei³

(E-mail: mmashal@ut.ac.ir)

Abstract

Saturated hydraulic conductivity (K_s) is one of the most important physical features of soil that have wide usage in soil and water science. Measuring K_s carries on laboratory and field. Guelph permeameter (GP) method is one of the field measuring method for determining field saturated hydraulic conductivity (K_{fs}) above the ground water table. Well-shape-factor (C) is one important parameter needed to calculate K_{fs} , which related to pressure gradient of flow through the soil around the borehole. Several approximated analytical solution are presented to determine C, such as Porchet solution, Glover solution, half-source (Reynolds *et. al.*) solution. Numerical solution is obtained using finite difference by Reynolds *et. al.* (1985) and applied formulae fitted them by Zhang *et. al.* (1998). Developed theory of flow out a borehole corresponds the flow to hydraulic conductivity (K_{fs}) and soil matrix potential (ϕ_m) which can be obtained by measuring outflow in two different ponding depth in single hole. One of the restrictions of this method is the negative results that may be seen in some cases. In this research, the GP experiments were down in 18 holes of 3 cm radius and 60 cm depth in a loamy soil with different ponding head (H), (maximum and minimum H was 5 and 20 cm, respectively). Then the field saturated hydraulic conductivity (K_{fs}) was determined by two head analysis of GP, Richards, Laplace and Regression analysis with different solution methods for well shape factor (C). Results showed that if the Porchet method was used for C factor calculation, negative results have been minimized and other methods for the C calculation (Glover, Numerical and Half-Source) have been produced low to high negative results for (K_{fs}), respectively. According to this study, the increasing of ratio of H_2 to H_1 will be caused a large number of (K_{fs}) values to be positive and also there were no significant differences between their means. In the Richards, Laplace and Regression analyses, the Glover, Numerical and Half-Source solution of C had the least deviation of mean, respectively. Analyses of Regression model with Numerical Solution of C has the nearest results with two head analysis.

Keywords: Guelph analysis, Guelph permeameter, Saturated hydraulic conductivity, Well shapes factor solutions

1 - Assistant Professor, Department of Irrigation & Drainage Eng., College of Aboureihan, Univ. of Tehran, Tehran - Iran
(Corresponding Author*)

2 - M.Sc. Former Student, Department of Irrigation & Drainage Eng., College of Aboureihan, Univ. of Tehran, Tehran - Iran

3 - Assistant Professor, Institute of Soil and Water Research, Alborz - Tehran