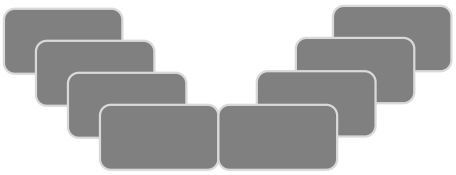
فصل پنجم



نفوذ

فصل پنجم
نفوذ

۵- نفوذ

۵-۱- مقدمه

نفوذ، پدیده ورود آب به داخل خاک است و یکی از پارامترهای پیچیده تأثیرگذار بر پروسه آبیاری سطحی است. این پارامتر نه فقط بر جریان آب به داخل خاک و شدت آن، بلکه بر میزان رواناب سطحی نیز تأثیر می‌گذارد. عموماً میزان شدت نفوذ و نفوذ تجمعی به‌داخل یک خاک با شرایط اولیه‌ی خاک خشک، به‌وسیله‌ی رابطه‌ی بین زمان مانداب در سطح خاک و عمق آب بیان می‌شود.

۵-۲- مدل‌های نفوذ

هنگامی‌که آب روی خاک قرار می‌گیرد، ابتدا لایه‌ی سطحی آن اشباع می‌شود و سپس جریانی پیستونی شکل از آب در خاک برقرار می‌شود؛ یعنی اینکه پس از اشباع شدن سطح خاک، رطوبت به صورت پیستونی به‌سمت اعماق لایهٔ خاک حرکت می‌کند. و مرز بین قسمت خیس شده و خشک کاملاً متمایز است. فصل مشترک بین دو قسمت را جبهه‌ی رطوبتی[1] گویند. حرکت آب در این جبهه از طریق منافذ خاک و براساس قانون دارسی صورت می‌گیرد؛ اما معادله‌ی دارسی نمی‌تواند

1.Wetting front

مقدار نفوذ و سرعت نفوذ در هر لحظه را نشان دهد؛ در صورتی که آنچه در زراعت و آبیاری اهمیت دارد این‌است که در یک مدت مشخص، چقدر آب در خاک نفوذ کرده و یا سرعت نفوذ در هر لحظه چقدر بوده است. برای این‌منظور معادلات متعدد که توصیف کننده وضعیت‌های فوق باشد، ارائه شده است. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا[1] در سال ۱۹۹۸ در مطالعه‌ی خود معادلات نفوذ را در سه گروه طبقه‌بندی کرد. این سه گروه شامل:

۱. مدل‌های تجربی؛

۲. مدل گرین- امپت؛

۳. حل عددی مدل ریچاردز است.

در تقسیم‌بندی دیگری که ارائه شده آن‌ها را به چهار گروه تقسیم کرده‌اند:

۱. معادلاتی که براساس حل عددی معادله‌ی عمومی یک بعدی جریان در محیط متخلخل به‌دست آمده است مانند: معادله‌ی ریچاردز؛

۲. حل عددی معادله‌ی ریچاردز مانند: فلیپ؛

۳. مدل‌هایی با بنیان فیزیکی مانند: گرین- امپت؛

۴. روابط تجربی مانند: کوستیاکف، هورتون، لوئیز، اداره‌ی کشاورزی ایالات متحده.

معادلات دسته اول آن‌هایی هستند که بر حل یک بعدی معادله‌ی دارسی در جریان تک فاز، معروف به معادله‌ی ریچاردز بنا شده‌اند. فرض بر این‌است که پتانسیل کل، مجموع پتانسیل ثقلی و موئینه‌ای است. در این شرایط، معادله‌ی عمومی جریان به‌شرح زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k(\theta)\left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right)\right] \qquad (۱-۵)$$

که در آن:

θ میزان رطوبت حجمی (درصد)؛

h پتانسیل موئینگی (سانتیمتر)؛

k هدایت هیدرولیکی (سانتیمتر بر ساعت)؛

z فاصله‌ی عمودی از سطح خاک (مثبت به‌طرف پایین) (سانتیمتر)؛

1. United State Environmental Protection Agency (USEPA)

t زمان (ساعت) است.

معادلات دسته اول به‌جز در بعضی حالات ویژه منجر بـه راه‌حـل‌هـای تحلیلـی نشـده و بایـد باروش‌های حل عددی ارزیابی شوند. محققین زیادی با فرضیات خود اقدام به حل معادلـه ریچـاردز کرده‌اند ولی این راه‌حل‌ها فقط در شرایط درنظر گرفته شده صادق هستند و حل کاملی برای مسـئله نیستند.

در میان معادلات نفوذ, معادلاتی که دارای دو خصوصیت سادگی و کمتـرین پـارامتر باشـند در آبیاری سطحی توسعه‌ی زیادی پیدا کرده‌اند که از آن جمله می توان بـه معادلـه کوسـتیاکف–لـوئیز اشاره کرد. مزایا و محدودیت‌های به‌کارگیری هریک از این معـادلات و نیـز مبـانی تئوریـک آن‌هـا به‌طـور مفصـل در منـابع مختلـف آمـده اسـت. از آنجـا کـه در تحقیـق حاضـر از معادلـه‌ی نفـوذ کوستیاکف–لوئیز استفاده شده است؛ لذا مروری بر آن و تاریخچه آن صورت می‌گیرد.

۵-۲-۱-مدل‌های تجربی

۵-۲-۱-۱-روش کوستیاکف

از اولین معادلات نفوذ، مدل تجربی کوستیاکف است که امروزه زیاد استفاده مـی‌شـود. فیلیـپ معتقد است که این معادله، نفوذ واقعی و تئوریک را برای زمان‌های کوتاه تـا متوسـط، بسـیار خـوب بیان می‌کند. فرم معادله به‌صورت زیر است:

$$I = kat^{a-1} \qquad (۲-۵)$$

که در آن:

I سرعت نفوذ لحظه‌ای (مترمکعب در دقیقه در واحد طول)،

t فرصت زمان نفوذ(دقیقه)،

a و k پارامترهای تجربی حاصل از آزمایشات نفوذ برروی خاک موردنظر هستند و به نوع خاک بستگی دارند.

این معادله دو ایراد اساسی دارد: اولاً نمی‌توان آن را برای شرایط مختلف مزرعـه کـه تـأثیرات عمیقی بر نفوذ دارند (نظیر میزان رطوبت اولیه) اصلاح و تعدیل کرد. ثانیاً سرعت نفـوذ تخمـین زده شده در زمان طولانی به صفر نزدیک می‌شود که صحیح نیست. البته ایـن معادلـه بـرای دوره‌هـای

زمانی کوتاه نتایج رضایت‌بخشی در پی دارد. منظور از زمان کوتاه یعنی حدود چند ساعت کـه عمـلاً در آبیاری مطرح است؛ لذا این معادله در طراحی سیستم آبیاری کاربرد زیادی دارد. اگـر از معادلـه‌ی فوق انتگرال گرفته شود و مقدار ثابت انتگرال‌گیری معادل صفر فرض شود، معادلـه‌ی میـزان نفـوذ تجمعی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$Z = kt^a \qquad (۳-۵)$$

که در آن: Z نفوذ تجمعی (مترمکعب در واحد طول) است.

۵-۲-۱-۲-روش کوستیاکف-لوئیز

سادگی معادله‌ی کوستیاکف و سهولت یافتن ضرایب آن سبب کاربرد وسیع این معادله در اکثـر تحقیقات و مطالعات است و تا زمانی صادق است که سرعت نفوذ کمتـر از ضـریب آبگـذری اشـباع خاک باشد. اگر ضریب ثابتی به معادله‌ی فوق اضافه شود، عیب دوم معادله‌ی مذکور رفع می‌شـود و در این‌صورت معادله به‌صورت زیر در می‌آید که آن را معادله‌ی کوستیاکف-لوئیز می‌نامند:

$$Z = Kt^a + f_0 t \qquad (۴-۵)$$

$$I = Kat^{a-1} + f_0 \qquad (۵-۵)$$

f_0 مقدار سرعت نفوذ نهایی یا سرعت نفوذ پایه خاک[1](مترمکعب بر متر بر دقیقه) است. مشکلی که در این معادله وجود دارد این‌است که یک ضریب ثابت (f_0) بیشتر از معادله‌ی ۵-۳ دارد؛ بنابراین کالیبره کردن آن با اطلاعات مزرعه‌ای و یا استفاده در مـدل‌هـای تخمینـی مشـکل اسـت. پـس از لگاریتم گرفتن از داده‌های مربوط به نفوذ تجمعی و زمان، در بعضی موارد، این مقادیر در امتداد یک خط راست قرار می‌گیرند و نشان می‌دهد که معادله‌ی کوستیاکف مدل خوبی برای داده‌هاست. مقدار نفوذ تجمعی با افزایش زمان، افزایش می‌یابد ولی سرعت نفوذ با زمان، کاهش می‌یابد، به طوری که سرعت نفوذ متوسط (متوسط سرعت نفوذ از ابتدای نفوذ تـا زمـان t) بیشـتر از مقـدار سـرعت نفـوذ لحظه‌ای زمان t است.

1. Soil basic infiltration rate (f_0)

با استفاده از معادله (۵-۳) و فرض اینکه سرعت نفوذ نهایی زمانی اتفاق می‌افتد که تغییرات سرعت نفوذ لحظه‌ای در زمان، کمتر و یا حداقل مساوی یک‌دهم شدت نفوذ لحظه‌ای باشد، در این صورت زمان تقریبی که سرعت نفوذ به‌حد نهایی می‌رسد از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$t_b = 600\ (1\text{-}a) \qquad (۶\text{-}۵)$$

t_b زمانی (دقیقه) است که سرعت نفوذ، به‌حد نهایی خود می‌رسد.

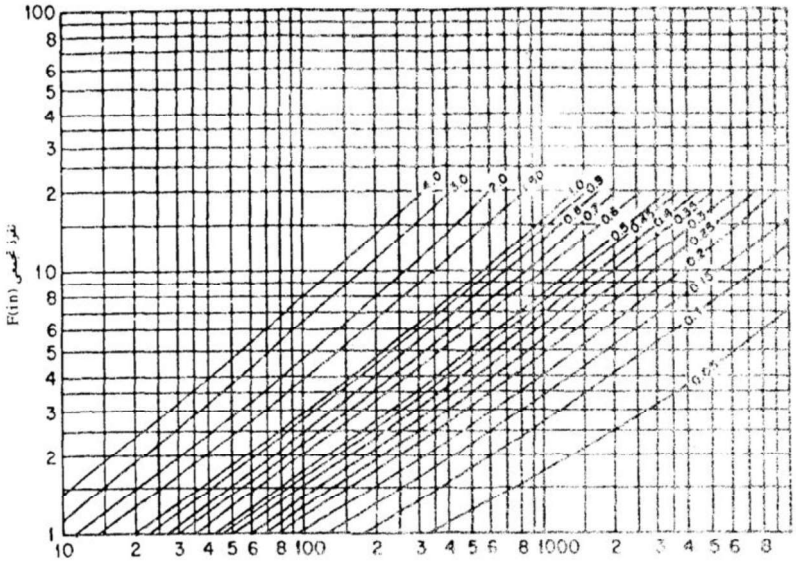
۵-۲-۱-۳-روش اداره‌ی حفاظت خاک آمریکا (SCS)

کارشناسان سازمان حفاظت خاک آمریکا براساس معادله‌ی کوستیاکف، آزمایش‌های زیادی در مزارع انجام دادند که درنهایت منجر به روشی در محاسبه‌ی نفوذ شد که به معادله‌ی سازمان حفاظت خاک(SCS) معروف است.

$$Z = a(t)^b + c \qquad (۷\text{-}۵)$$

این معادله تقریباً مانند معادله‌ی کوستیاکف است که ضریب c به آن اضافه شده است. در این معادله z و t به‌ترتیب نفوذ تجمعی و زمان هستند. ضرایب a و b به‌نوع خاک وابسته است. البته a بسته به اینکه مقدار نفوذ برحسب اینچ یا سانتیمتر محاسبه شود، متفاوت است؛ اما b فقط به نوع خاک بستگی دارد. سازمان حفاظت خاک آمریکا مطابق شکل ۵-۱، تعدادی منحنی شماره‌دار ارائه کرده است که رابطه‌ی لگاریتمی نفوذ تجمعی و زمان را برای خاک‌های مختلف نشان می‌دهد. برای پیدا کردن ضرایب معادله SCS ابتدا باید نتایج آزمایشات صحرایی راروی این نمودار آورد تا مشخص شود نتایج به‌دست آمده با کدام یک از منحنی‌ها بیشترین مطابقت را دارد. بدین ترتیب که مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از نمودار، شماره‌ی منحنی نفوذ به‌دست می‌آید. با داشتن شمارهٔ منحنی و استفاده از جدول ۵-۱ می‌توان مقادیر a وb رابه‌دست آورد. لازم به ذکر است که شماره‌ی نوشته شده روی منحنی نفوذ، تقریباً برابر با سرعت نفوذ نهایی برحسب اینچ در ساعت است که به آن خانواده نفوذ[1] نیز گفته می‌شود.

1. Intake family (IF)



شکل ۵-۱- منحنی شماره‌دار نفوذ برای استفاده درروش scs

جدول ۵-۱- ضرایب معادله‌ی نفوذ SCS برای خانواده‌های نفوذ مختلف (زمان-دقیقه و نفوذ تجمعی-سانتیمتر)

شماره منحنی نفوذ	a(cm)	b	c
۰/۰۵	۰/۰۵۳۳	۰/۶۱۸	۰/۶۹۸۵
۰/۱۰	۰/۰۶۱۹	۰/۶۶۱	۰/۶۹۸۵
۰/۱۵	۰/۰۷۰۱	۰/۶۸۳	۰/۶۹۸۵
۰/۲۰	۰/۰۷۷۱	۰/۶۹۹	۰/۶۹۸۵
۰/۲۵	۰/۰۸۵۳	۰/۷۱۱	۰/۶۹۸۵
۰/۳۰	۰/۰۹۲۵	۰/۷۲۰	۰/۶۹۸۵
۰/۳۵	۰/۰۹۹۶	۰/۷۲۹	۰/۶۹۸۵
۰/۴۰	۰/۱۰۶۴	۰/۷۳۶	۰/۶۹۸۵
۰/۴۵	۰/۱۱۳۰	۰/۷۴۲	۰/۶۹۸۵
۰/۵۰	۰/۱۱۹۶	۰/۷۸۴	۰/۶۹۸۵
۰/۶۰	۰/۱۳۲۱	۰/۷۵۷	۰/۶۹۸۵
۰/۷۰	۰/۱۴۴۳	۰/۷۶۶	۰/۶۹۸۵
۰/۸۰	۰/۱۵۶۰	۰/۷۷۳	۰/۶۹۸۵
۰/۹۰	۰/۱۶۷۴	۰/۷۷۹	۰/۶۹۸۵
۱/۰۰	۰/۱۷۸۶	۰/۷۸۵	۰/۶۹۸۵
۱/۵۰	۰/۲۲۸۳	۰/۷۹۹	۰/۶۹۸۵
۲/۰۰	۰/۲۷۵۳	۰/۸۰۸	۰/۶۹۸۵

۵-۲-۲-مدل‌های فیزیکی

اولین گام در استخراج معادلات نفوذ، استفاده از قوانین و روابط اثبات شده همانند قانون بقای جرم (معادله‌ی ریچاردز در شکل پخشیدگی) و قانون بقای انرژی (قانون دارسی) و تلفیق آن‌ها و دستیابی به یک‌سری معادلات ریاضی، مانند معادله‌ی فیلیپ وگرین امپت است. مهم‌ترین حُسن این معادلات این است که بر اساس قوانین فیزیکی وضع شده‌اند و با دانستن برخی خصوصیات فیزیکی خاک معادله‌ی نفوذ قابل تعیین است؛ ولی نبود دقت کافی در این معادلات مهم‌ترین نقص آن‌ها می‌باشد که حاصل ساده‌سازی شرایط فیزیکی و ایده‌آل و نیز یکنواخت فرض کردن محیط خاک است.

۵-۲-۲-۱-معادله فیلیپ

معادله‌ی فیلیپ براساس حل عددی معادله‌ی ریچاردز به‌دست آمده و به صورت زیر است:

$$I = S_P (t)^{0/5} + A_P (t) \qquad (۸-۵)$$

که در آن:

I عمق آب نفوذ یافته از شروع نفوذ (سانتیمتر)؛

t زمان نفوذ (دقیقه)؛

S_p ضریب ثابت مربوط به جذب آب (سانتیمتر بر جذر دقیقه)؛

A_p ضریب ثابت مربوط به آبگذری (سانتیمتربرثانیه) است.

در اوایل فرآیند نفوذ، ضریب ثابت جذب آب غالب است ولی در اواخر نفوذ، ضریب ثابت آبگذری غالب می‌شود. ضریب ثابت آبگذری تقریباً مساوی ضریب هدایت هیدرولیکی خاک است. تجربه نشان داده است که معادله‌ی فیلیپ برای دوره‌های طولانی یعنی بیش از چند ساعت نتایج بهتری می‌دهد. به عبارت دیگر معادله‌ی فیلیپ بر این اصل استوار است که نفوذ، تحت تأثیر مشترک شیب مکش و شیب ثقلی صورت می‌گیرد. به‌تدریج که جبهه‌ی رطوبت فاصله‌ی بیشتری را طی می‌کند، از شیب مکش کاسته می‌شود و نفوذ عمدتاً در اثر ثقل انجام می‌شود؛ زیرا اختلاف پتانسیل بین خاک خشک و خاک اشباع سطحی، به فاصله‌ی بیشتری تقسیم شده و مقدار آن به سمت صفر می‌رود و در نهایت شدت جریان با هدایت هیدرولیکی خاک برابر می‌شود.

۵-۳- روش‌های تعیین نفوذ

محققان مختلف درطی سال‌های متمادی، روش‌های مختلفی را برای تخمین مقدار نفوذ آب به‌کار برده‌اند. در بررسی فراگیری توسط آ. پی. آی[۱]، نحوه تخمین نفوذ به ۱۳ گروه به شرح زیر تقسیم شده است:

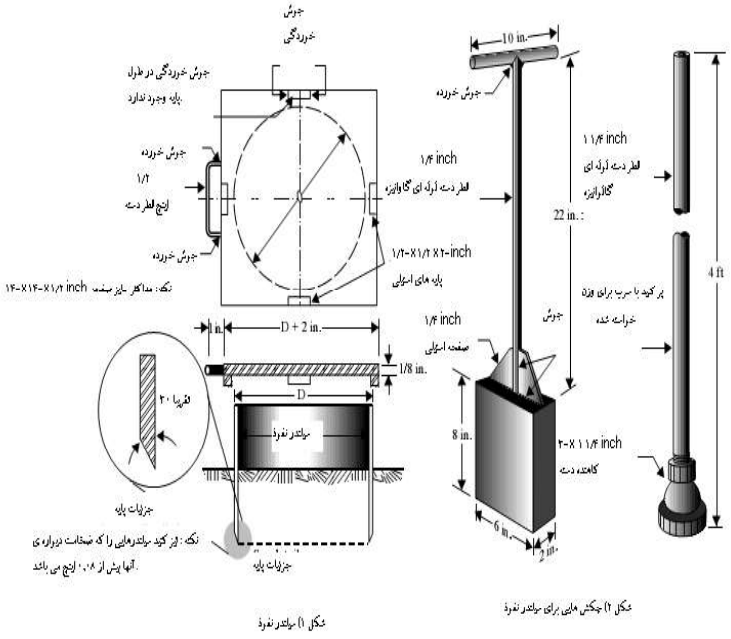
۱. تکنیک بیلان آب-خاک[۲]
۲. اندازه‌گیری لایسیمتری[۳]
۳. روش شدت جریان دارسی[۴]
۴. روش شدت جریان صفر[۵]
۵. روش دمای خاک[۶]
۶. روش الکترومغناطیس[۷]
۷. روش خروجی حوزه‌ی آب زیرزمینی[۸]
۸. نوسانات تراز آب[۹]
۹. اندازه‌گیری دبی جریان[۱۰]
۱۰. ردیاب‌های شیمیایی و ایزوتوپ‌ها[۱۱]
۱۱. بیلان جرم کلراید[۱۲]
۱۲- مدل‌های بیلان آب[۱۳]
۱۳. مدل‌های عددی براساس معادله‌ی ریچاردز[۱۴]

1. American petroleum institute (API)
2. Soil-water balance
3. Lysimeter measurements
4. Darcy flux method
5. Plane of zero flux method
6. Soil temperature method
7. Electromagnetic method
8. Ground-water basin outflow method
9. Water-level fluctuations
10. Stream gauging
11. Chemical tracers and isotopes
12. Chloride mass balance
13. Water balance models
14. Numerical models based on the Richards equation

۵-۳-۱-روش‌های موضعی

۵-۳-۱-۱-روش استوانه مضاعف (هیس و همکاران ۱۹۵۶)

در اکثر مراجع، روش استوانه‌ی مضاعف[1] به عنوان پایه روش‌ها در محاسبه‌ی نفوذ به‌کار گرفته شده و روش‌های انجام آن نیز آمده است. این روش اولین بار توسط هیس و همکاران (۱۹۵۶) ارائه شد. به دلیل شباهت فرآیند نفوذ در این‌روش با آبیاری نواری و کرتی، این روش شاید مناسب‌ترین روش برای تخمین نفوذ به صورت موضعی در این دو شیوه‌ی آبیاری باشد؛ ولی به‌دلیل تفاوت ساختاری این روش با فرآیند نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، این روش کمتر در جویچه استفاده شده و در عوض روش‌های دیگری بسط داده شده است. درهرحال دستورالعمل اجرائی آن در مراجع (انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی) به‌طور کامل آمده است.



شکل ۵-۲- تجهیزات آزمایش نفوذ به‌روش استوانه

1. Double rings method

۵-۳-۱-۲-روش نفوذسنج جویچه مسدود(بوندورانت ۱۹۵۷)

در برخی از روش‌های اندازه‌گیری نفوذ مانند نفوذسنج استوانه‌ای وایست آبی، شرایط هندسی شکل جویچه را در نظر نمی‌گیرند. درحالی‌که نفوذ در جویچه از محیط خیس شده صورت می‌گیرد، یعنی بخش عمده‌ای از کل آب نفوذی، به جای حرکت عمودی، در جهت جانبی و از دیواره‌های جویچه عبور می‌کند. بوندورانت (۱۹۵۷) با درک این مسئله نوعی نفوذسنج جویچه‌ای ابداع کرد که به نام روش نفوذسنج جویچه‌ی مسدود به‌کار می‌رود. در این روش قطعه‌ای از جویچه (۱ تا ۲ متر) انتخاب می‌شود و میزان حجم آب ورودی و خروجی به این قطعه، اندازه‌گیری می‌شود. با معین بودن حجم‌ها، میزان نفوذ، مشابه روش استوانه‌ی مضاعف قابل محاسبه است. اگرچه این‌روش ضعف‌های روش استوانه نفوذ را ندارد ولی نفوذ را به طور موضعی اندازه‌گیری می‌کند؛ لذا تعمیم آن برای کل طول جویچه صحیح نیست. درصورتی‌که هدف اندازه‌گیری مکانی[1] نفوذ باشد، این بهترین روش است و عمدتاً برای اندازه‌گیری نفوذ نهایی(f_0) به‌کار میرود. الیوت و واکر (۱۹۸۲)، هشت آزمایش در خاک لومی- رسی و پانزده آزمایش در خاک لوم انجام دادند. میزان f_0 در هر خاک به‌شدت تغییر می‌کرد، که آن‌ها به کوتاه بودن طول جویچه مسدود شده و اثرات کناره‌ی جویچه نسبت دادند. تغییرات f_0 در روش جویچه مسدود، سبب شد که این اطلاعات در ارزیابی استفاده نشود.

۵-۳-۲-روش‌های متوسط نفوذ

۵-۳-۲-۱-روش ورودی- خروجی (واکر و اسکوجربو)[2]

این‌روش برای تعیین سرعت نفوذ پایه خاک به‌کار می‌رود. در این‌روش تمام طول جویچه به‌عنوان یک نفوذسنج درنظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود در اواخر آبیاری خاک به سرعت نفوذ پایه رسیده است. در این‌روش میزان دبی ورودی و خروجی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن این مشخصات می‌توان میزان نفوذ در واحد طول جویچه را مطابق معادله‌ی زیر تعیین کرد (واکر و اسکوجربو، ۱۹۸۷).

$$f_0=\frac{Qin-Qout}{L} \qquad (۹-۵)$$

1. Spatial
2. Inflow–outflow method

که در آن:

Qin دبی ورودی جویچه (مترمکعب در دقیقه)؛

Qoutدبی خروجی از جویچه(متر مکعب در دقیقه)؛

L طول جویچه (متر) است؛

۵-۳-۲-۲-روش دو نقطه‌ای[1] (الیوت و واکر ۱۹۸۲)

الیوت- واکر (۱۹۸۲) با استفاده از نفوذسنج‌های استوانه‌ای و جویچه مسدود شده تعداد بی‌شماری اندازه‌گیری سرعت نفوذ انجام دادند. این اطلاعات نتوانست به‌خوبی پیشروی واقعی آب در جویچه یا پیش‌بینی حجم پایاب را نشان دهد؛ بنابراین نتیجه گرفته شد که مؤثرترین روش ارزیابی بر پایه اندازه‌گیری سرعت پیشروی، سطح مقطع هیدرولیکی و حجم پایاب است. سپس با استفاده از این اطلاعات و محاسبات موازنه‌ی حجم، می‌توان رابطه‌ی متوسط نفوذ در جویچه را نتیجه گرفت. معادله‌ی نفوذ مورد استفاده در محاسبات موازنه حجم، معادله‌ی کوستیاکف- لوئیز است. در این‌روش ابتدا مقدار f_0 معادله‌ی کوستیاکف-لوئیز با روش ورودی-خروجی به‌دست می‌آید. در روش پیشنهادی الیوت-واکر (۱۹۸۲) به‌صورت معادلات زیر است. رابطه‌ی نهایی زیر بین سانت پیشروی و زمان پیشروی در نظر گرفته شده است.

$$x = \mathrm{p}t_x^r \qquad (۱۰-۵)$$

که در آن:

x فاصله پیشروی از ابتدای جویچه (متر)؛

t_x زمان پیشروی تا نقطه x (دقیقه)؛

r وp ضرایب تجربی معادله‌ی پیشروی است.

برای تعیین ضریب r در معادله‌ی نهایی پیشروی از روش دونقطه‌ای استفاده می شود. همانطور که در رابطه ۵-۱۱ مشاهده می شود T ۰/۵ L زمان پیشروی تا نصف جویچه (دقیقه) و TL زمان پیشروی تا انتهای جویچه (دقیقه) است. با جانشینی ضریب r به‌دست آمده از رابطه ۵-۱۱ در رابطه ۵-۱۰ ضریب P مطابق رابطه ۵-۱۲ قابل محاسبه است.

1. Two point method

$$r = \frac{ln\left(\frac{t_{0.5L}}{t_L}\right)}{ln(0.5)} \quad (۱۱-۵)$$

$$p = \frac{t_L}{L^r} \quad (۱۲-۵)$$

با جای‌گذاری معادله‌ی پیشروی و معادله‌ی نفوذ کوستیاکف- لوئیز در معادله‌ی لوئیز- میلن، معادله ۲-۲۳، معادله‌ی بیلان حجم به‌صورت زیر خلاصه خواهد شد.

$$Q_0 t = \sigma_y A_0 x + \sigma_z K t^a x + \frac{f_0 t x}{1+r} \quad (۱۳-۵)$$

که در آن:

Q_0 دبی ورودی (متر مکعب در دقیقه)؛

σ_y ضریب ذخیره سطحی (این ضریب بین ۰/۸ تا ۰/۷ و معمولاً ۰/۷۷ در نظر گرفته می‌شود)؛

A_0 سطح مقطع جریان در ابتدای جویچه (مترمربع)؛

σ_Z ضریب ذخیره زیر سطحی است.

به منظور تعیین ضریب ذخیره زیر سطحی از معادله‌ی۵-۱۳ استفاده می‌شود.

$$\sigma_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+a)(1+r)} \quad (۱۴-۵)$$

در این رابطه r توان معادله نهایی پیشروی و a توان معادله‌ی نفوذ کوستیاکف- لوئیز است که قبلاً شرح داده شده است.

برای تعیین سطح مقطع جریان در ابتدای جویچه نیز از معادلات زیر استفاده می‌شود. در اولین قدم رابطه نهایی بین سطح مقطع، محیط خیس شده و عمق آب به صورت معادلات (۵-۱۵) و (۵-۱۶) لحاظ شده است.

$$A = \sigma_1 \, y^{\sigma_2} \quad (۱۵-۵)$$

در این رابطه A سطح مقطع جریان (مترمربع)، y عمق آب (متر) است. σ_1 و σ_2 ضرایب تجربی شکل سطح جریان هستند که با روش مقطع‌سنجی در ارتفاع‌های y و $y_{./۵}$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\delta_2 = \frac{\mathrm{Ln}(\frac{A_{0/5}}{A})}{\mathrm{Ln}(0/5)} \quad (۱۶-۵)$$

در رابطه (۵-۱۶)، $A_{0/5}$ سطح مقطع جریان در ارتفاع $y_{0/5}$ است. مقدار σ_1 نیز با جانشینی سطح مقطع جریان و y در رابطه (۵-۱۵) قابل محاسبه است.

$$\delta_1 = \frac{A}{y^{\delta 2}} \quad (۵-۱۷)$$

علاوه بر این، بین محیط خیس شده و عمق آب نیز رابطه نهایی (۵-۱۸) در نظر گرفته شده است.

$$WP = \gamma_1 \, y^{\gamma 2} \quad (۵-۱۸)$$

در این رابطه، WP محیط خیس شده (متر)، y عمق آب (متر) و σ_1 و σ_2 ضرایب تجربی محیط هستند که با اندازه‌گیری محیط در دو ارتفاع y و $y_{0/5}$ و از طریق رابطه (۵-۱۹) قابل محاسبه است.

$$\gamma_2 = \frac{\mathrm{Ln}(\frac{WP_{0/5}}{WP})}{\mathrm{Ln}(0/5)} \quad (۵-۱۹)$$

در این رابطه، $WP_{0/5}$، محیط خیس شده در ارتفاع $y_{0/5}$ است.

$$\gamma_1 = \frac{\mathrm{WP}}{y^{\delta 2}} \quad (۵-۲۰)$$

پس از تعیین ضرایب σ_1 و σ_2 γ_1 و γ_2 ، در سطح مقطع جریان با رابطه (۵-۲۱) قابل محاسبه است.

$$A_0 = C_1 \left[\frac{Q_0 \times n}{60 \times S^{0/5}}\right]^{C_2} \quad (۵-۲۱)$$

در این رابطه Q_0 دبی ورودی (مترمکعب در دقیقه در واحد عرضی)، n ضریب زبری مانینگ و S شیب مزرعه است. ضرایب C_1 و C_2 نیز با استفاده از پارامترهای تعیین شده قبلی و روابط (۵-۲۲) و (۵-۲۳) قابل محاسبه است.

$$c_2 = \frac{3\gamma_2}{5\gamma_2 - \quad 2\gamma_2} \quad (۵-۲۲)$$

$$C_1 = \delta_1 \left(\frac{\gamma^{0/67}}{\delta^{1/67}}\right)^{C_2} \quad (۵-۲۳)$$

ضریب مانینگ در معادله‌ی فوق از جدول زیر به دست می‌آید:

جدول ۵-۲-میزان ضریب مانینگ در معادله‌ی بیلان حجم در آبیاری سطحی (مصطفی‌زاده و موسوی، ۱۳۸۵)

ردیف	نوع خاک	ضریب مانینگn
۱	خاک نرم و آبیاری شده	۰/۰۲
۲	خاک تازه شخم خورده	۰/۰۴
۳	رشد متراکم گیاه	۰/۱۵

پس از محاسبه سطح مقطع جریان (A_0) و زمان پیشروی تا انتهای جویچه (TL) و زمان پیشروی تا نصف جویچه ($T_{.5}L$) مقادیر V_L و $V_{0.5L}$ مطابق معادلات زیر محاسبه می‌شود.

$$V_L = \frac{Q_0 t_L}{L} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_L}{1+r} \qquad (۲۴-۵)$$

$$V_{0.5L} = \frac{2Q_0 t_{0.5L}}{L} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_{0.5L}}{1+r} \qquad (۲۵-۵)$$

و نهایتاً با استفاده از معادلات زیر ضرایب a و k معادله‌ی نفوذ کوستیاکف- لوئیز به دست می‌آید.

$$a = \frac{Ln\left(\frac{V_L}{V_{0.5L}}\right)}{Ln\left(\frac{t_L}{t_{0.5L}}\right)} \qquad (۲۶-۵)$$

$$k = \frac{V_L}{\sigma_z t_L^a} \qquad (۲۷-۵)$$

مثال:

در یک سیستم آبیاری جویچه‌ای، دبی ورودی ۰/۱۰ مترمکعب در دقیقه، دبی خروجی ۰/۰۷۳۲ مترمکعب در دقیقه است. در صورتی‌که ضرایب سطح مقطع به شرح زیر باشد و داده‌برداری در مسیر پیشروی نیز مطابق جدول انجام شده باشد، ضرایب تابع نفوذ را با استفاده از روش دونقطه‌ای الیوت- داکر محاسبه کنید؟

S = ۰/۰۰۷

n = ۰/۰۴

γ_2 = ۰/۸۱

γ_1 = ۲/۵۳

σ_2 = ۱/۵۶

σ_1 = ۰/۸۹

فاصله از ابتدا (متر)	زمان پیشروی (دقیقه)
۰	۰
۵۰	۸
۱۲۰	۲۱
۱۷۰	۳۲
۲۲۰	۵۷

قدم اول محاسبه ضرایب C_1 وC_2 جهت تعیین سطح مقطع جریان است:

$$c_2 = \frac{3\delta_2}{5\delta_2 - 2\gamma_2} = \frac{3\times 1/56}{5\times 1/56 - 2\times 0/81} = \frac{4/68}{7/8 - 1/62} = 0/757$$

$$c_1 = \delta_1 \left[\frac{\gamma_1^{0/67}}{\delta_1^{1/67}}\right]^{C_2} \rightarrow c_1 = 0/89 \left[\frac{(2/53)^{0/67}}{(0/89)^{1/67}}\right]^{0/757} = 1/65$$

$$A_0 = c_1 \left[\frac{Q_0 \times n}{60 \times S^{0/5}}\right]^{C_2} \rightarrow A = 1/65 \left[\frac{0/1\times 0/04}{60\times\sqrt{0/007}}\right]^{0/757} = 7/44 \times 10^{-3}_{m^2}$$

$$x = Pt^r \rightarrow r = \frac{\mathrm{Ln}(\frac{x_{0/5L}}{xL})}{\mathrm{Ln}(0/5)} \rightarrow r = \frac{Ln(\frac{120}{220})}{Ln(\frac{21}{57})} = \frac{-0/606}{-0/998} = 0/607$$

$$f_0 = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{L} = \frac{0/10 - 0/0732}{220} = 1/218 \times 10^{-4}\ {}^{m^3}/_{min}/L$$

$$V_L = \frac{0/1\times 57}{220} - 0/77 \times 7/44 \times 10^{-3} - \frac{1/218\times 10^{-4}\times 57}{1+0/607} \rightarrow V_L = 0/0158\ m^3$$

$$a = \frac{\mathrm{Ln}(\frac{VL}{V_{0/5}L})}{\mathrm{Ln}(\frac{TL}{T_{0/5}L})} \rightarrow a = \frac{Ln(\frac{0/0158}{0/0116})}{Ln(\frac{57}{21})} = \frac{0/309}{0/998} = 0/309$$

$$\delta_z = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} = \frac{0/309+0/607(1-0/309)+1}{1/309\times 1/607} = 0/821$$

$$k = \frac{\sqrt{L}}{\delta_z T_L^a} = \frac{0/0158}{0/821(57)^{0/309}} = 5/51 \times 10^{-3}$$

۵-۳-۲-۳-روش تخمینی

سرعت نفوذ پایه در این روش با دانستن نوع بافت خاک، با استفاده از منابع مختلف به‌دست می‌آید.

۵-۳-۲-٤-روش یک نقطه‌ای (شپارد و همکاران ۱۹۹۳)

شپارد و همکاران (۱۹۹۳) روش‌های مختلف اندازه‌گیری نفوذ را در خاک‌های با بافت مختلف در ایالت کالیفرنیای آمریکا مقایسه کردند. این روش‌ها شامل اندازه‌گیری عمق آب به‌کار رفته، نوترون‌متری، نفوذسنجی، فیلیپ- فارل و یک نقطه‌ای بود. مقایسه‌ی نتایج کار نشان می‌دهد که روش نوترون‌متری و روش نفوذ سنجی روش‌های مناسبی نیستند و روش‌های یک نقطه‌ای و فیلیپ-فارل برای اندازه‌گیری نفوذ، دقت زیادی دارند. شپارد و همکاران با استفاده از مدل بیلان حجمی (معادله۵-۱۲)، روش یک نقطه‌ای را برای محاسبه ضرایب نفوذ معادله‌ی فلیپ ارائه کردند.

$$Q_{in}t = \sigma_y x(t) + \int_0^x Z(t - t_s)ds \qquad (۲۸-۵)$$

$$Z = S_p t^{0.5} + A_p t \qquad (۲۹-۵)$$

S_p و A_p به‌ترتیب ضرایب ثابت جذب و آبگذری در معادله‌ی نفوذ فلیپ هستند.

۵-۳-۲-۵-روش دو نقطه‌ای (اسکالوپی و همکاران ۱۹۹۵)

اساس این روش بر پایه استفاده از داده‌های مرحله‌ی پیشروی و داده‌های مرحله‌ی ذخیره استوار است. در این روش، محاسبات همانند روش الیوت و واکر است؛ اما علاوه بر دو جزء نفوذ و ذخیره‌ی سطحی در داخل جویچه، شامل جزء رواناب خروجی نیز هست. که پس از پایان مرحله‌ی پیشروی، هیدروگراف خروجی و حجم ذخیره با فاصله‌های زمانی کوتاه قرائت و مقدار حجمی هر یک در هر گره زمانی محاسبه می‌شود؛ لذا معادله‌ی بیلان حجم به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$V_L = \frac{Q_{in}t_i}{L} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_i}{1+r} - V_{ri} \qquad (۳۰-۵)$$

که در آن:

i اندیس مربوط به فاصله‌ی زمان‌های جزئی؛

V_{ri} حجم آب خروجی از جویچه در هر گره زمانی است و سایر عوامل قبلاً توضیح داده شده است. همچنین در این‌روش محاسباتی، عامل مقدار آب ذخیره شده در سطح جویچه، به‌روش

مستقیم اندازه‌گیری سطح مقطع جریان در ایستگاه‌های به فاصله ۱۰ متر به‌دست می‌آید. نتایج اسکالوپی و همکاران (۱۹۹۵) نشان داده که دقت نتایج روش اندازه‌گیری مبتنی بر استفاده از داده‌های فاز پیشروی و روش مبتنی‌بر استفاده از داده‌های فازهای پیشروی به علاوه‌ی فاز ذخیره تقریباً یکسان است و مزیت روش پیشروی، ساده‌تر بودن آن است.

۵-۳-۲-۶-روش صحیح و خطا (والیانتز ۲۰۰۱)

این روش توسط والیانتز بر پایه‌ی به‌دست آوردن ضرایب معادله‌ی نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا[1] توسعه داده شده است. اساس این روش نیز برمبنای بیلان حجم استوار است. و فقط معادله‌ی نفوذ به‌کار گرفته شده با دو روش یک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای تفاوت دارد. معادله‌ی نفوذ به‌کار رفته در این روش، معادله‌ی نفوذ SCS به شکل معادله‌ی زیر است.

$$Z = a't^{b'} + 0.7 \qquad (۳۱-۵)$$

a', b' ضرایب معادله‌ی نفوذ SCS هستند.

۵-۳-۲-۷-روش بهینه‌سازی (مک کلیمونت و اسمیت ۲۰۰۱)

این روش توسط مک کلیمونت و اسمیت در دانشگاه کوئینزلند جنوبی (استرالیا) برای محاسبه‌ی ضرایب نفوذ معادله‌ی کوستیاکف-لوئیز توسعه داده شده است. اساس این‌روش برخلاف مدل‌های گذشته که از مفاهیم هیدرولیکی و یا بیلان حجم استفاده می‌کردند از مفاهیم ریاضی استفاده می‌کند. با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی[2] ضرایب نفوذ آن‌قدر تغییر می‌کند تا منحنی پیشروی حاصل، با داده‌های مشاهده‌ای برابر شود.

در پیوست یک، اطلاعات مربوط به نرم‌افزار Infilt آمده است.

1. SCS
2. Optimization technique

۵-۳-۲-۸-روش فاز پیشروی-ذخیره (خالد و اسمیت، ۲۰۰۶)

این روش بر پایه‌ی تخمین خصوصیات نفوذ خاک با استفاده از داده‌های پیشروی است. در این روش از نوعی فاکتور قیاسی[1] برای پیش‌بینی خصوصیات نفوذ در هر جویچه استفاده شده است. فاکتور قیاسی مورد استفاده در این‌روش بر پایه روش بیلان حجمی استخراج شده و به صورت زیر است:

$$F = \frac{Q_0 T - \delta_y A_0 x}{\delta_z k T^a x + \frac{f_0 x t}{1+r}} \qquad (۳۲-۵)$$

که در آن:

Q_0 دبی ورودی (مترمکعب بر دقیقه)؛

A_0 سطح مقطع جویچه (مترمربع)؛

a, k, f_0 ضرایب نفوذ در جویچه؛

σ_y فاکتور شکل پروفیل سطحی برابر با ۰/۷۷ لحاظ شده است؛

σ_z فاکتور شکل زیر سطحی است که از رابطه‌ی (۵-۱۴) به‌دست می‌آید

از ترکیب این فاکتور با رابطه‌ی نفوذ کوستیاکف-لوییز معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$I_s = F(k.t^a + f_0.t) \qquad (۳۳-۵)$$

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که منحنی‌های نفوذ به‌دست آمده با این روش به منحنی‌های نفوذ مشاهده‌ای بسیار نزدیک است.

۵-٤- بررسی وضعیت نفوذ

۵-٤-۱- آبیاری یک در میان

کمبود آب و خشکسالی در مناطق خشک ایران پدیده‌ی تازه‌ای نیست بلکه این موضوع از زمان‌های قدیم گریبان‌گیر مردم این دیار بوده است. در گذشته مقدار آب موجود جوابگوی تولید محصولات کشاورزی برای تأمین غذای جمعیت کم آن زمان بوده؛ اما در حال حاضر رشد سریع

1. Scaling factor

جمعیت و نیاز به تولید بیشتر، باعث شده است که کمبود آب بیشتر احساس شود؛ لذا برای افزایش تولیدات کشاورزی، راهی جز افزایش کارآیی مصرف آب نیست. یکی از روش‌هایی که می‌تواند مصرف آب را کم کند استفاده از روش آبیاری جویچه‌ای یک در میان است. روش آبیاری جویچه‌ای معمولی که در آن تمام جویچه‌ها آبیاری می‌شود، از راندمان آبیاری پایین‌تری برخوردار است به خصوص در آبیاری‌های اولیه که رشد گیاه کم است. طی این دوره به دلیل عدم توسعه کافی ریشه‌ها در خاک برای جذب حداکثر آب و نیز عدم توسعه کافی اندام هوایی برای کاهش تبخیر سطحی خاک، مقداری از آب آبیاری در هر نوبت، به صورت نفوذ عمقی و تبخیر از سطح خاک تلف شده و از دسترس گیاه خارج می‌شود؛ بنابراین به نظر می‌رسد اجرای روش‌های بهینه مصرف آب بتواند بدون کاهش قابل ملاحظه‌ی عملکرد، از تلفات آب بکاهد. آبیاری جویچه‌ای یک در میان به علت کم کردن سطح مرطوب خاک، منجر به کاهش تبخیر می‌شود و از طرفی به علت دارا بودن پتانسیل بیشتر برای نفوذ جانبی از نفوذ عمقی نیز به مقدار قابل ملاحظه‌ای جلوگیری می‌کند. استون و همکاران (۱۹۸۲) نشان دادند که کاهش تبخیر در آبیاری جویچه‌ای یک در میان ممکن است ناشی از کاهش مقدار سطح مرطوب باشد. آن‌ها همچنین ابراز داشتند، آبیاری جویچه‌ای یک در میان در خاک‌هایی با بافت متوسط تا سنگین کاربرد دارد. تحقیقات دیگر نشان داده است که در آبیاری جویچه‌ای یک در میان بر روی چغندرقند و ذرت عملکرد بالاتری نسبت به روش معمولی حاصل می شود. در تحقیقی که توسط سپاسخواه و کامکارحقیقی (۱۳۷۰) در مورد روش آبیاری جویچه ای یک در میان بر روی چغندرقند انجام گرفت تأثیر متقابل آبیاری جویچه ای معمولی و یک در میان بر روی چغندرقند با دوره‌های آبیاری ۶ و۱۰و ۱۴ روز بر عملکرد ریشه و میزان مصرف آب بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که آبیاری نشتی یک در میان با دور۶ روزه قادر است با مصرف کمتر آب آبیاری، محصولی برابر با آبیاری جویچه‌ای با دور ۱۰ و با مصرف بیشتر تولید کند.

آبیاری سطحی نسبت به آبیاری تحت فشار، انرژی و هزینه‌ی کمتری نیاز دارد و در عین‌حال سعی شده است از شیوه‌های خاص آبیاری برای افزایش راندمان در آن استفاده شود. یکی از این روش‌ها آبیاری یک درمیان است که باعث کاهش نفوذ عمقی و افزایش راندمان کاربرد می‌شود. در آبیاری یک درمیان، نیمی از جویچه‌ها خشک باقی می‌ماند و این امر باعث می‌شود که حرکت افقی جریان تأثیر بیشتری در نفوذ داشته باشد. بنابراین پارامترهای معادله‌ی نفوذ در این حالت با آبیاری

معمولی جویچه‌ها متفاوت است. این تفاوت ممکن‌است باعث تغییر منحنی پیشروی در این حالت آبیاری نسبت به آبیاری معمولی شود. براساس تحقیقات سپاسخواه و چمن‌آباد(۲۰۰۲) رابطه‌ی بین نفوذ و شدت جریان در این نوع آبیاری خطی نیست و به صورت زیر است:

$$Z = (kt^a + f_0 t)Q_{in}^{\gamma} \qquad (۳۴-۵)$$

که توان γ مقداری قراردادی است. در این تحقیق سعی شده است تا پارامترهای معادله‌ی نفوذ شرح داده شده در بالا در ازای شدت جریان‌های ورودی مختلف و در دو حالت استفاده از داده‌های پیشروی (روش۱) و استفاده از داده‌های پیشروی و ذخیره (روش ۲)، برای آبیاری یک درمیان و آبیاری معمولی جویچه‌ها محاسبه شده و مقایسه‌ها انجام شود. نتایج به‌دست آمده در جدول ۵-۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۵-۳- پارامترهای معادله‌ی کوستیاکف-لوئیز برای تیمارهای مختلف آبیاری

Method of calculation	*Irrigation treatment*	*Irrigation number*	*Infiltration parameters*			*Coefficient of determination*
			k	*a*	*γ*	*(R_2)*
I (Advancing stage only)	Ordinary	First	0·0014	0·55	0·0	0·86
		Next	0·0012	0·64	0·63	0·89
	Every-other	First	0·0014	0·55	0·67	0·96
		Next	0·0020	0·39	0·17	0·94
II (Advancing and storage stages)	Ordinary	First	0·0012	0·56	0·0	0·98
		Next	0·0017	0·41	0·23	0·96
	Every-other	First	0·0017	0·54	0·17	0·91
		Next	0·0025	0·36	0·29	0·95

مشاهده می‌شود که معادله‌ی نفوذ برای اولین آبیاری معمولی و در دو روش ۱و۲ به شدت جریان ورودی بستگی ندارد و تقریباً یکسان است. با این وجود در اولین آبیاری و در روش یکی در میان، معادله‌ی نفوذ به شدت جریان ورودی بستگی دارد که اشاره به شدت نفوذ بالا در آبیاری یک در میان دارد. بنابراین عمق آب و محیط خیس شده در آبیاری یکی در میان کمتر است. توان γ برای محاسبه‌ی پارامترهای نفوذ، در روش ۲ کمتر از روش ۱ است. همچنین مقدار نفوذ تجمعی برای روش آبیاری یک درمیان بیشتر از نفوذ درحالت آبیاری معمولی است. در عین حال نتایج

به‌دست آمده نشان داد که استفاده از داده‌های پیشروی و ذخیره در تخمین پارامترهای نفوذ، مناسب‌تر از استفاده از داده‌های پیشروی است.

۵-٤-۲- آبیاری غلام گردشی

برای استفاده‌ی بهینه از آب در آبیاری و افزایش راندمان، ضروری است که پارامترهای معادله‌ی نفوذ که نقش اساسی در ارزیابی و طراحی سیستم‌های آبیاری دارند، با دقت زیاد تخمین زده شوند. آبیاری غلام گردشی یکی از روش‌های سنتی آبیاری جویچه‌ای در ایران است. با این که هنوز مطالعات جامعی پیرامون عملکرد هیدرولیکی این سیستم صورت نگرفته ولی زیاد بودن راندمان آبیاری این روش آبیاری در مزارع شیب‌دار به طور تجربی اثبات شده است. به منظور ارزیابی، طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم آبیاری سطحی در مرحله‌ی اول نیاز به تعیین معادله‌ی نفوذ است. در تحقیق انجام شده توسط کفایتی و همکاران (۱۳۸۴) پارامترهای معادله‌ی نفوذ کوستیاکف و کوستیاکف-لوئیز با روش موازنه حجم و تعیین حجم ذخیره سطحی و زیر سطحی تعیین شد. برای تعیین خصوصیات نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، با استفاده از فلوم در ابتدا و انتهای جویچه، حجم جریان ورودی و خروجی محاشبه شده و با استفاده از معادله‌ی بیلان حجمی، حجم ذخیره‌ی سطحی و حجم نفوذ کرده محاسبه شد.

$$V_{in} = V_{ss} + V_{\inf} + V_{out} \quad (۳۵-۵)$$

$$V_{\inf} = V_{in} - (V_{out} + V_{ss}) \quad (۳۶-۵)$$

که در آن:

V_{in} حجم ورودی به جویچه (مترمکعب)؛

V_{ss} حجم ذخیره سطحی (مترمکعب)؛

V_{inf} حجم نفوذ کرده (مترمکعب)؛

V_{out} حجم آب خروجی است.

حجم جریان ورودی برابر با مساحت زیر هیدروگراف ورودی و حجم جریان خروجی برابر با مساحت زیر هیدروگراف خروجی است.

ذخیره سطحی از مقدار صفر در ابتدای آبیاری شروع می شود و پس از مدتی که آب از نقطه خروجی سیستم خارج شد تقریباً به مقدار حداکثر خود می‌رسد. از این زمان به بعد مقدار ذخیره‌ی

سطحی را می‌توان تقریباً ثابت فرض کرد. در زمان قطع آبیاری، ذخیره‌ی سطحی مازاد بر نفوذ به تدریج از سیستم خارج می‌شود و به مقدار صفر می‌رسد. حجم ذخیره‌ی سطحی در زمانی که مقدار آن ثابت است به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$V_{ss} = V_{out}(T_{cutoff} - T_{end}) + V_{\inf}(T_{cutoff} - T_{end}) \qquad (۳۷-۵)$$

$V_{OUT}(T_{cutoff}T_{end})$ حجم آب خارج شده در نقطه خروجی از زمان قطع جریان تا زمانی که دبی در نقطه خروجی صفر می‌شود بر حسب مترمکعب است که با استفاده از قانون ذوزنقه در این بازه زمانی محاسبه می‌شود.

$V_{inf}(T_{cutoff}T_{end})$حجم آب نفوذ کرده از زمان قطع جریان تا زمانی که دبی در نقطه خروجی صفر می‌شود بر حسب مترمکعب که با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$V_{\inf(t_{cut}-t_{end})} = \frac{(T_{cutoff} - T_{end}).f_0}{2} \qquad (۳۸-۵)$$

که در آن:

T_{cutoff} زمان قطع جریان آب از زمان شروع آبیاری(دقیقه)؛

T_{end} زمان قطع رواناب در نقطه خروجی از زمان شروع آبیاری(دقیقه) است.

پس از محاسبه حجم جریان ورودی، حجم جریان خروجی و ذخیره ی سطحی، نهایتاً با استفاده از رابطه‌ی ۵-۳۶ حجم آب نفوذی برای زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود که بر حسب مترمکعب خواهد بود. با تقسیم حجم نفوذ کرده بر کل طول جویچه، حجم آب نفوذی بر حسب مترمکعب بر متر به دست می‌آید.

با داشتن مقادیر حجم آب نفوذی و مدت زمان تماس آب با خاک و با استفاده از نرم‌افزار curve، expert و یا نرم‌افزار excel می‌توان ضرایب معادلات نفوذ کوستیاکف و کوستیاکف-لوئیز را محاسبه کرد. محاسبه‌ی مقادیرحجم نفوذی محاسبه شده با ضرایب تخمین زده شده و مقادیر محاسباتی حقیقی، نشان می‌دهد که استفاده از معادله‌ی توازن حجم به‌خوبی می‌تواند ضرایب معادله‌ی نفوذ در روش آبیاری گردشی را تخمین بزند.