

$$FC = 28(\text{volume \%})$$

$$PWP = 12 (\text{volume \%})$$

$$RAW = (MAD)(D_{rz})(FC - PWP)/100$$

$$RAW = (0.65)(180)(28 - 12)/100$$

$$RAW = 18.72 \text{ cm}$$

لذا در عمق توسعه ریشه ۱۸/۷۲ سانتی متر آب بصورت سهل الوصول می تواند ذخیره شود.

اگر آبیاری را زمانی انجام دهیم که رطوبت خاک به θ_{RAW} برسد در این صورت گیاه فقط از رطوبت سهل الوصول استفاده می کند در چنین شرایطی گفته می شود که آبیاری بصورت کامل (full irrigation) صورت گرفته است اما اگر اجازه دهیم رطوبت خاک از حد θ_{RAW} کمتر شود و گیاه برای دریافت رطوبت از خاک انرژی بیشتری مصرف کند در این صورت گفته می شود کم آبیاری (deficit irrigation) اعمال شده است. انتخاب این که کدام روش آبیاری به صلاح خواهد بود نیاز به تجزیه و تحلیل اقتصادی و مقایسه مقدار محصول در مقابل آب مصرفی خواهد داشت.

نفوذ آب در خاک

سرعت وارد شدن آب به خاک یا به عبارت دیگر سرعت نفوذ از پارامترهای بسیار مهم در طراحی آبیاری است. برحسب تعریف آب وارد شده به داخل خاک را نفوذ گویند. مقدار آبی که در یک دوره زمانی مشخص (مثلاً یک ساعت، یک شبانه روز...) در خاک نفوذ می کند، نفوذ تجمعی (accumulated infiltration) و میانگین سرعت وارد شده آب به داخل خاک را طی یک دوره زمانی، متوسط سرعت نفوذ (average infiltration rate) و سرعت نفوذ آب به داخل خاک را در هر لحظه از زمان را سرعت نفوذ لحظه‌ای (instantaneous infiltration rate) در آن زمان گویند. در نفوذ آب عمدتاً حرکت عمودی آب به داخل خاک مورد نظر می باشد و اگر همانند آنچه در شیارها و جوی و پشته ها و یا آبیاری قطره‌ای مشاهده می شود، آب علاوه بر حرکت عمودی، در جهات جانبی نیز نفوذ نماید، به جای واژه نفوذ (infiltration) از واژه نفوذ جانبی یا نشت (intake) استفاده میشود.

مکانیسم نفوذ

ورود آب به داخل خاک در نتیجه تاثیر توأم نیروهای ثقلی و موینگی صورت می گیرد. نیروی ثقل فقط در جهت قائم عمل می کند. اما نیروی موینگی در ابتدا که خاک خشک بود و منافذ موین خالی از آب است، هم در جهت عمودی و هم جهات افقی عمل می کند ولی بتدریج که منافذ از آب اشباع شد تنها نیروی ثقل دخالت کرده و جریان نفوذ عمدتاً قائم می باشد. به همین دلیل سرعت نفوذ در ابتدای وارد شدن آب به سطح خاک زیاد و سپس بتدریج تقلیل یافته و به مقدار ثابتی که فقط نتیجه عمل نیروی ثقل است می رسد. بنابراین مقدار آبی که در زمین نفوذ می کند، صرف نظر از وضعیت سطح خاک به صورت تجمعی

نسبت به زمان افزایش می یابد. نفوذ آب در خاک به عوامل مانند بافت و ساختمان خاک، پوشش گیاهی، شیب زمین و از همه مهم تر قابلیت پراکندگی ذرات سطحی خاک بستگی دارد. اگر لایه سطحی خاک حاوی مقدار زیادی یون قابل تبادل سدیم باشد، پس از مرطوب شدن باعث پراکندگی ذرات خاک شده و جلو نفوذ آب را سد می کند. لذا نفوذ آب به داخل خاک در لایه های رسی و سیلتی بسیار اندک است.

اگر منحنی تغییرات نفوذ تجمعی نسبت به زمان را ترسیم کنیم منحنی نفوذ تجمعی دست می آید. چنانچه عمق آب نفوذ یافته را با حرف i و زمان را با حرف t نشان دهیم سرعت نفوذ (di/dt) که همان شیب منحنی نفوذ تجمعی باشد نسبت به زمان بطور مرتب کاهش پیدا می کند. یعنی بتدریج که آب در خاک نفوذ می کند از سرعت نفوذ کاسته می شود. سرعت نفوذ لحظه ای، را نباید با متوسط سرعت نفوذ اشتباه کرد. اگر مقدار عمق آب نفوذ یافته در لحظه t_0 برابر i_0 و در لحظه t برابر i_t باشد متوسط سرعت نفوذ برابر است با:

$$\frac{i_t - i_0}{T - T_0} = \text{متوسط سرعت نفوذ}$$

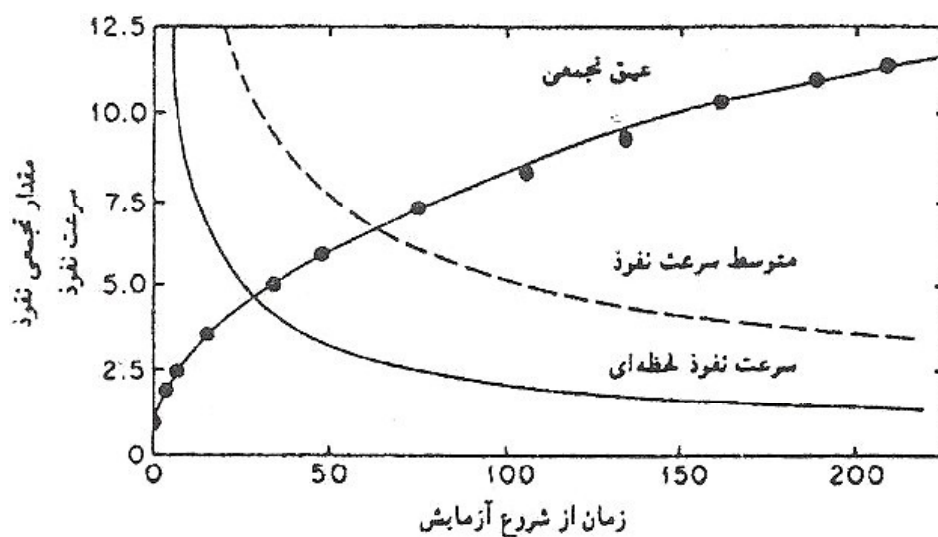
اما سرعت نفوذ لحظه ای برابر است با متوسط سرعت نفوذ در صورتی که $T - T_0$ به سمت صفر میل کند، بنابراین سه نمایه تعریف شده برای نفوذ عبارتند از :

$$\text{سرعت نفوذ لحظه ای} = \frac{di}{dt}$$

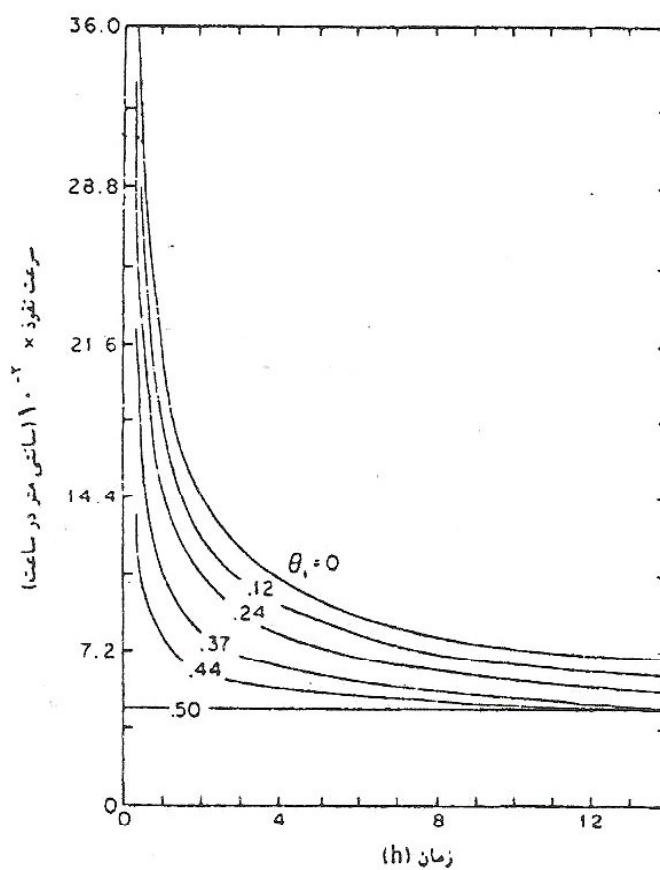
$$\text{متوسط سرعت نفوذ} = \frac{i_t - i_0}{T - T_0}$$

$$I_t = \text{نفوذ تجمعی از لحظه صفر تا زمان } t$$

مفاهیم سرعت نفوذ لحظه ای متوسط سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی و تغییرات آن ها نسبت به زمان در شکل زیر نشان داده شده است. سرعت نفوذ آب به داخل خاک به درصد رطوبت اولیه خاک نیز بستگی دارد این موضوع در شکل بعدی نشان داده شده است. در این شکل سرعت نفوذ نسبت به زمان برای یک نوع خاک با ۶ رطوبت اولیه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، هرچه رطوبت اولیه خاک بیشتر باشد سرعت نهایی نفوذ آب به داخل خاک کاهش می یابد. این موضوع نشان می دهد که هنگامی که بارندگی روی خاک مرطوب می بارد میزان رواناب سطحی زیادتر از حالتی است که خاک در ابتدا خشک بوده است.



تیب منحنی‌های سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای نفوذ و نفوذ تجمعی



منحنیهای نفوذ به ازاء رطوبت‌های اولیه خاک

معادله های نفوذ

برای آنکه پدیده نفوذ بصورت نظری توصیف شود معادله های مختلفی ارائه شده است. تعداد این معادله ها نسبتاً زیاد است. که پاره ای از آن ها بسیار پیچیده اند بطوری که حل آن ها بدون استفاده از ماشینهای محاسب عملی نیست اما تعدادی معادله ساده نیز توسط متخصصان ارائه شده است. ما در این بخش تعدادی

از این معادله ها را که در طراحی سیستمهای آبیاری مورد استفاده داشته و تجربه نشان داده است که از دقت کافی برخوردارند به اختصار بحث میکنیم.

معادله کاستیاکوف (Kostiakov)

یکی از اولین معادله هایی که برای توصیف نفوذ آب به داخل خاک ارائه شده است معادله کاستیاکوف میباشد. این معادله به شرح زیر است:

$$i=c(t)^a$$

i = عمق آب نفوذ یافته (سانتی متر، cm) از شروع نفوذ

t = زمان نفوذ (از شروع)، دقیقه، min

c, a = ضرایب تجربی که به نوع خاک بستگی دارد

معادله کاستیاکوف برای دوره های زمانی کوتاه نتایج رضایت بخشی بدست می دهد. منظور از زمان کوتاه یعنی حدود چند ساعت که چون در سیستم های آبیاری سروکار با حدود همین چند ساعت است لذا این معادله در طراحی سیستم آبیاری کاربرد زیادی دارد. در واقع معادله کاستیاکوف فقط تا زمانی صادق است که هنوز در مراحل ابتدایی نفوذ آب در خاک هستیم. زیرا در صورتی که از این معادله مشتق گرفته شود تا سرعت نفوذ بدست آید توان t از یک کمتر شده $(1-a)$ و با افزایش t سرعت نفوذ به سمت صفر میل خواهد کرد که صحیح نمی باشد. برای رفع این مشکل معمولاً معادله اصلاح شده کاستیاکوف که بنام معادله کاستیاکوف-لوئیس (Kostiakov-Lewis) معروف است بکار برده میشود. این معادله به شکل زیر می باشد:

$$i=ct^a+f_0t$$

که در آن f_0 سرعت نهایی نفوذ آب در خاک (نفوذپذیری پایه) میباشد.

معادله سازمان حفاظت خاک امریکا (Soil Conservation Service)

کارشناسان سازمان حفاظت خاک امریکا براساس معادله کوستیاکوف آزمایشهای زیادی در مزارع انجام دادند که نهایتاً منجر به روشی در محاسبه نفوذ گردید که به معادله سازمان حفاظت خاک (SCS) معروف است. این معادله عبارتست از:

$$i=a(t)^b+c$$

بطوری که مشاهده میشود این معادله تقریباً مشابه معادله کوستیاکوف می باشد با این تفاوت که ضریب c به آن اضافه شده است. در این معادله i و t به ترتیب نفوذ تجمعی و زمان می باشد. ضرایب a و b مربوط به نوع خاک میباشند برای پیدا کردن ضرایب معادله SCS ابتدا باید سرعت نفوذ نهایی را بر حسب اینچ در ساعت (شماره منحنی) مشخص نمود حال از روی جدول زیر میتوان مقادیر a و b را بدست آورد.

در معادله SCS، i بر حسب سانتیمتر و t بر حسب دقیقه است. پس از مشخص شدن شماره منحنی (سرعت نفوذ نهایی بر حسب اینچ در ساعت) از جدول زیر مقدار a از ستون دوم و مقدار b از ستون آخر جدول قرائت میشود. ضریب c ثابت بوده و مقدار آن برای حالتی که i بر حسب سانتیمتر باشد ۰/۶۹۸۵ می-باشد.

بر حسب تعریف سرعت نهایی نفوذ زمانی است که در آن تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان ناچیز باشد و بصورت کمی تغییرات آن در مدت یک ساعت نسبت به ساعت قبل از ۵٪ تجاوز نکند.

پارامترهای محاسبه نفوذ تجمعی با روش SCS

شماره منحنی	a (cm)	b
0.05	0.0533	0.618
0.10	0.620	0.6610
0.15	0.0701	0.6834
0.20	0.0771	0.6988
0.25	0.853	0.7107
0.30	0.0925	0.7204
0.35	0.0996	0.7285
0.40	0.1064	0.7356
0.45	0.1130	0.7419
0.50	0.1196	0.7475
0.60	0.1321	0.7572
0.70	0.1443	0.7656
0.80	0.1560	0.7728
0.90	0.1674	0.7792
1.00	0.1768	0.785
1.50	0.2283	0.799
2.00	0.2753	0.808
3.00	0.3650	0.816
4.00	0.4445	0.823

نتایج نشان داده است که کاربرد معادله SCS در طراحی سیستم های آبیاری بخصوص آبیاری سطحی بسیار رضایت بخش است .

اندازه گیری نفوذ

نفوذ آب به داخل خاک را میتوان به روش های مختلفی اندازه گیری کرد، انتخاب روش بسته به این است که بخواهیم چه سیستم آبیاری را پیاده کنیم مثلاً اگر قرار باشد نفوذپذیری را برای طراحی سیستم آبیاری بارانی تعیین نماییم روشی را که برمیگزینیم متفاوت از حالتی خواهد بود که بخواهیم سیستم آبیاری کرتی یا نواری را پیاده کنیم. دلیل این امر آن است که سیستم های مختلف آبیاری سطح زمین را به حالت های گوناگون تغییر میدهد و تغییر سطح زمین به مقدار قابل توجهی بر نفوذ آب موثر خواهد بود. در هر حال

صرف نظر از نوع روش می‌بایست اندازه گیری نفوذ در مزرعه انجام شود زیرا اندازه گیری های آزمایشگاهی نتایج قابل اعتمادی را بدست نمیدهند.

در آبیاری کرتی و نواری و گاهی اوقات آبیاری جوی پشته ای ، معمولاً از حلقه های ساده یا مضاعف استفاده میشود. این حلقه ها به حلقه های نفوذ معروف میباشند. در هر دو حالت عمق آب نفوذ یافته نسبت به زمان اندازه گیری میشود تا براساس آن بتوان ضرایب معادله کوستیاکوف را بدست آورد. سپس مطابق مثالی که در زیر آورده میشود نفوذپذیری خاک سنجیده می شود. برای آنکه اثر نفوذ جانبی آب و شرایط مرزی را به حداقل برسانیم توصیه می شود بجای یک حلقه ساده از حلقه های مضاعف استفاده شود تا فشار آب در حد فاصل دو حلقه باعث شود که نفوذ آب در حلقه داخلی بطور عمودی صورت گیرد. برای این اندازه گیری معمولاً ۱۵ تا ۱۶۰ دقیقه وقت لازم است.

مثال

در یک آزمایش نفوذ با حلقه های مضاعف نتایج زیر حاصل شده است:

- عمق نفوذ پس از ۶۰ دقیقه ۳/۵ سانتیمتر

- عمق نفوذ پس از ۱۸۰ دقیقه ۷/۶ دسانتیمتر

حساب کنید ضرایب معادله کوستیاکوف را برای خاک مورد آزمایش. همچنین حساب کنید پس از ۵ ساعت عمق آب نفوذ یافته چند سانتیمتر است و در این هنگام سرعت نفوذ چند سانتیمتر در ساعت است؟

حل:

معادله کاستیاکوف عبارت است از:

$$i=c(t)^a$$

از طرفین این معادله لگاریتم گرفته:

$$\text{Log } i = \text{log } c + a \text{ log } t$$

داده های بدست آمده از آزمایش (i و t) را در این معادله قرار میدهم:

$$\text{Log}(3.5) = \text{log } c + a \text{ log } (60\text{min})$$

$$0.5441 = \text{log } c + a (1.7782)$$

$$\text{Log } c = 0.5441 - 1.7782 a$$

درمورد داده های دوم:

$$\text{Log}(7.6\text{cm}) = \text{log } c + a \text{ log}(180\text{min})$$

$$0.8808 = \text{log } c + a(2.2553)$$

$$0.8808=[0.5441-(1.7782)a]+a(2.2553)$$

$$a=0.3367/0.4771$$

$$a=0.7058$$

حال از معادله قبل داریم:

$$\text{Log } c=0.5541-a(1.7782)$$

$$\text{Log } c=0.5441-0.7058(1.7782)$$

$$C=0.1946$$

مقدار نفوذ تجمعی پس از ۵ ساعت (۳۰۰) دقیقه برابر است با:

$$i_{300} = 0.1946(300)^{0.7058}$$

$$i_{300} = 10.9 \text{ cm}$$

سرعت نفوذ در زمان ۳۰۰ دقیقه از مشتق معادله کوستیاکوف بدست می آید:

$$i=c(t)^a$$

$$di/dt = a[c(t)^{a-1}]$$

$$di/dt = 0.7058[0.1946(300\text{min})^{0.7058-1}]$$

$$di/dt = 0.0256 \text{ cm/min} = 1054 \text{ cm/hr}$$

توجه داشته باشید که در مثال فوق ما فقط از داده های مربوط به دو نقطه استفاده کردیم و براساس آن ضرایب معادله کوستیاکوف را بدست آوردیم. حال آنکه معمولاً نفوذپذیری در چندین زمان اندازه گرفته می شود یعنی داده های مربوط به چند نقطه در اختیار می باشد. با توجه به شکل کلی معادله کوستیاکوف اگر بین داده های لگاریتم عمق نفوذ و لگاریتم زمان رگرسیون خطی برقرار کنیم یک خط مستقیم حاصل می شود که معادله آن بصورت زیر است:

$$\text{Log } i=\text{log } c+a \text{ log } t$$

شیب یا ضریب زاویه این خط a و عرض از مبدا برابر $\text{log } c$ است که بدین ترتیب ضرایب معادله کوستیاکوف بدست خواهد آمد. در عمل پس از اینکه داده های زمان و نفوذ روی کاغذ لگاریتمی آورده شد خط مستقیمی از بین نقاط برازش داده می شود و سپس عرض از مبدا و شیب آن با خط کش اندازه گیری می شود که همان ضرایب α و C خواهند بود. داده های حاصل از اندازه گیری نفوذ را می توان روی منحنی SCS نیز برازش داد تا منحنی مناسب آن مشخص گردد.