

فصل چهارم

نفوذ

۴-۱ نفوذ (Infiltration)

- ✓ قسمتی از نزولات جوی بعد از رسیدن به سطح زمین به داخل خاک نفوذ می‌کنند بنابراین نفوذ، ورود آب از سطح خاک به داخل آن است.
- ✓ نفوذ تحت تأثیر نیروی ثقل انجام می‌شود اما عمل لوله‌های موئین (*Capillary Force*) را باید در نظر گرفت. نیروی ثقل در جهت عمود به سطح افق (قائم) و نیروی لوله‌های موئین در تمامی جهات از جمله عمود بر سطح عمل می‌نماید.
- ✓ در ابتدا که خاک خشک است و منافذ موئین خالی از آب است، نیروی ثقل و نیروی موئینگی توأماً با هم عمل می‌کنند بنابراین سرعت نفوذ زیاد است اما به تدریج که لوله‌های موئین از آب اشباع شد فقط نیروی ثقل اثرگذار بوده و جریان نفوذ تقریباً عمودی است بنابراین سرعت نفوذ به تدریج کم شده و نهایتاً ثابت می‌گردد.

نفوذ آب در خاک از دو جهت قابل بررسی است:

الف - شدت نفوذ

ارتفاع آب وارد شده در خاک بر واحد زمان را شدت نفوذ می‌نامند که معمولاً بر حسب mm/hr بیان می‌شود تا با شدت بارندگی متجانس باشد. این پارامتر نقش مؤثری در محاسبه مقدار و توزیع رواناب سطحی دارد مثلاً در صورت بیشتر بودن شدت نفوذ آب در خاک از شدت بارندگی، رواناب سطحی تشکیل نخواهد شد.

ب - مقدار نفوذ

حجم آب نفوذ یافته به داخل خاک است.

۲-۴ عوامل مؤثر در نفوذ

✓ **کیفیت سطح:** سطوحی که در تماس با نزولات جوی هستند به دو دسته سطوح غیر قابل نفوذ (سطوح سنگی یا از رس متراکم پوشیده) و سطوح نفوذپذیر (خاک‌های سنگلاخی، شنی، ماسه‌ای) تقسیم می‌شوند. در سطوح غیر قابل نفوذ، عمل نفوذ انجام نمی‌شود. مقدار نفوذ نیز در سطوح نفوذپذیر بستگی به توزیع منافذ، تخلخل، اندازه ذرات و ... دارد.

✓ **نوع و درصد پوشش گیاهی:** وجود گیاهان به عنوان پوششی در روی خاک از برخورد مستقیم قطره‌های باران با سطح خاک جلوگیری نموده و در نتیجه از در هم ریختن منافذ خاک و فشرده شدن آن جلوگیری می‌کند همچنین با ایجاد اصطکاک در مقابل جریان آب موجب کاهش سرعت آن می‌شود و نتیجتاً فرصت بیشتری برای نفوذ در خاک به وجود می‌آید. ریشه گیاهان تخلخل خاک را افزایش می‌دهد و موجب بالارفتن میزان نفوذ می‌شود.

✓ **تأثیر خصوصیات سیال:** عواملی نظیر حل املاح و درجه حرارت که لزجت (ویسکوزیته) آب را تغییر می‌دهند در مقدار نفوذ مؤثرند. در خاکهای قلیایی و نمکی، باران مقداری از نمک‌ها را در خود حل می‌کند، این محلول در هنگام نفوذ سبب ریزش ذرات خاک می‌شود. حل املاح در

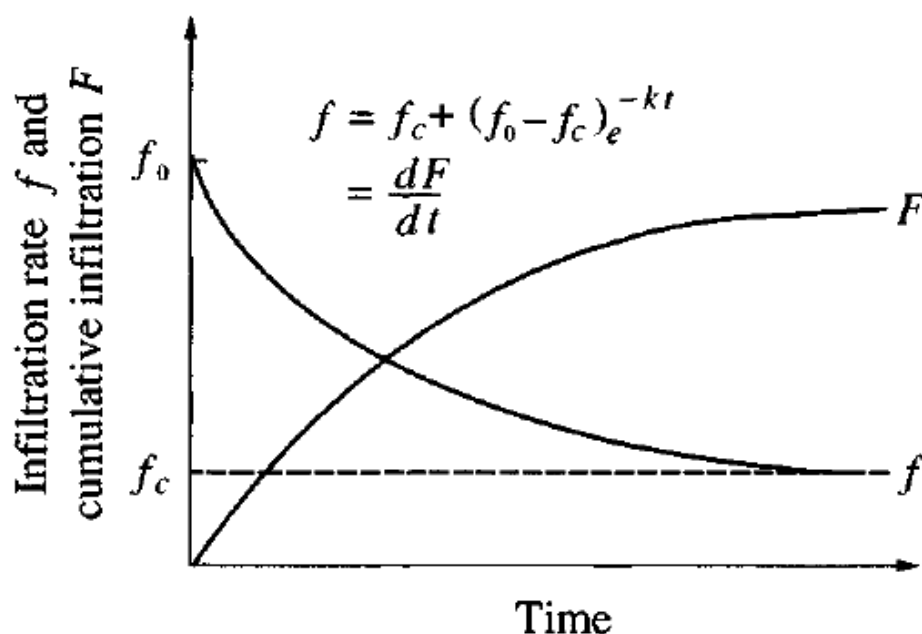
آب و کاهش درجه حرارت سبب افزایش ویسکوزیته آب شده و در نتیجه کاهش حرکت سیال در مجاری خاک را موجب خواهد شد.

✓ شیب زمین

✓ شدت و مدت بارندگی

۳-۴ منحنی تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان

سرعت نفوذ در ابتدا به علت خشک بودن خاک و پایین بودن درصد رطوبت، زیاد است سپس این سرعت تقلیل پیدا نموده و نهایتاً ثابت می‌گردد.



شکل ۴-۱ منحنی تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان

سرعت اولیه نفوذ را با f_0 و سرعت نهایی نفوذ را با f_c نمایش می‌دهند. به f_c ظرفیت نفوذ نیز گفته می‌شود. ظرفیت نفوذ بر شدت رواناب مؤثر است.

۴-۴ معادله نفوذ هورتون

مطالعات انجام شده توسط هورتون (HORTON, 1940) نشان داد که منحنی تغییرات سرعت نفوذ بر حسب زمان، معادله‌ای به شکل زیر دارد:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt}$$

در این رابطه،

f : سرعت نفوذ در هر لحظه

f_0 : حداکثر سرعت نفوذ اولیه (سرعت اولیه نفوذ)

f_c : سرعت نهایی نفوذ یا ظرفیت نهایی

k : عاملی است که بستگی به شرایط خاک و سایر عوامل مؤثر در نفوذ و حرکت آب در خاک دارد و نرخ کاهش سرعت نفوذ را بیان می‌کند.

t : زمان از شروع نفوذ می باشد.

برای محاسبه k ، معادله هورتون را به بدین صورت می‌توان نوشت:

$$f - f_c = (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

$$\log(f - f_c) = \log[(f_0 - f_c)e^{-kt}] = \log(f_0 - f_c) - kt \log e$$

$$t = \frac{\log(f_0 - f_c) - \log(f - f_c)}{k \log e}$$

$$t = \frac{-1}{k \log e} \log(f - f_c) + \frac{1}{k \log e} \log(f_0 - f_c)$$

چنانچه رابطه فوق به صورت معادله خطی $t = aX + b$ در نظر گرفته شود:

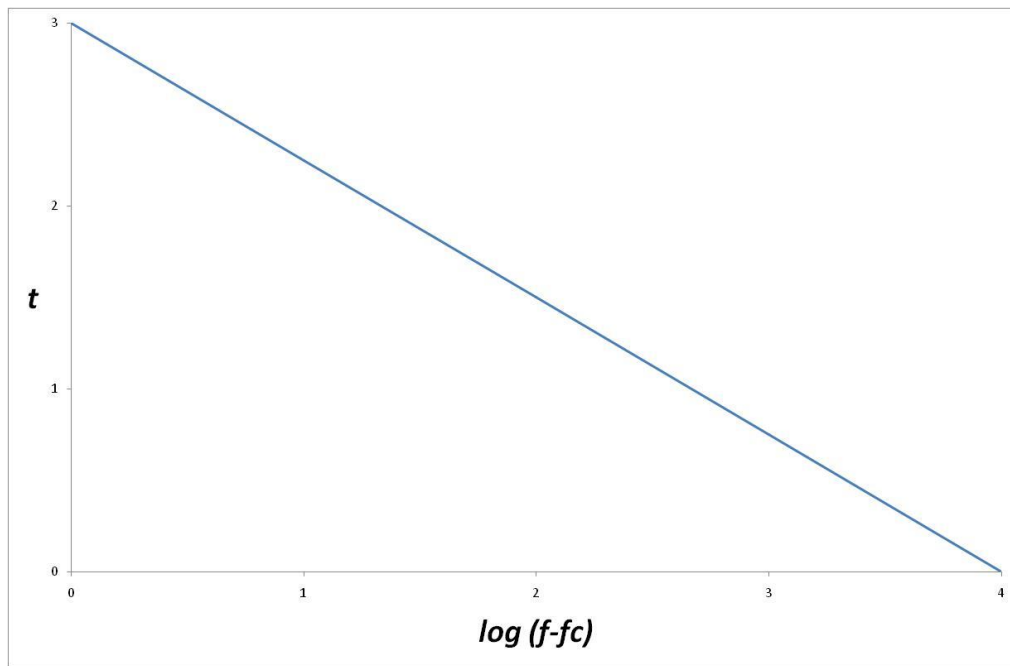
$$a = \frac{-1}{k \log e}$$

$$b = \frac{1}{k \log e} \log(f_0 - f_c)$$

$$X = \log(f - f_c)$$

اگر t نسبت به $\log(f - f_c)$ در یک دستگاه محور مختصات قائم رسم گردد خط مستقیمی با شیب a

به دست می‌آید.



پس از تعیین شیب خط، مقدار k از رابطه زیر بدست می آید:

$$a = \frac{-1}{k \log e} = \frac{-1}{0.4343k} = \frac{-2.3}{k} \rightarrow k = \frac{-2.3}{a}$$

بنابراین با مشخص بودن سرعت نفوذ در دو زمان مختلف و معلوم بودن مقدار f_c می توان خط فوق را ترسیم و مقدار k را بدست آورده و در نهایت معادله سرعت نفوذ را تعیین نمود.

با انتگرالگیری از معادله هورتون می توان مقدار F یا حجم آب نفوذی را در طول زمان t بدست آورد:

$$f - f_c = (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

$$F = \int_0^t f dt = f_c t + \frac{-(f_0 - f_c)}{k} e^{-kt} + C$$

$$t = 0 \rightarrow F = 0 \rightarrow \frac{-(f_0 - f_c)}{k} + C = 0 \rightarrow C = \frac{(f_0 - f_c)}{k}$$

$$F = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (1 - e^{-kt})$$

۲- مدل تلفات اولیه و ثابت^۱

این روش بر مبنای ثابت بودن ماکزیمم پتانسیل نرخ تلفات بارش f_c در طول یک بارش بنا شده

است. لذا اگر p_t مقدار بارش در بازه زمانی Δt باشد، بارش مازاد در این بازه زمانی برابر خواهد بود با:

$$Pe_t = \begin{cases} p_t - f_c, & \text{if } p_t > f_c \\ 0, & p_t \leq f_c \end{cases}$$

مقدار تلفات یا نفوذ اولیه I_a برای لحاظ کردن برگاب و ذخیره سطحی به مدل اضافه شده است. این تلفات قبل از شروع رواناب رخ می دهد. تا وقتی که مجموع بارش بیشتر از نفوذ اولیه نباشد هیچ روانابی رخ نمی دهد. لذا خواهیم داشت:

$$Pe_t = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum P_i < I_a \\ p_t - f_c, & \text{if } \sum P_i > I_a, p_t > f_c \\ 0 & \text{if } \sum P_i > I_a, p_t < f_c \end{cases}$$

در واقع این روش شامل یک پارامتر که معرف مشخصات خاک حوضه است و یک شرط اولیه که

معرف شرایط پیشین آن است می باشد.

در خاکهای اشباع مقدار نفوذ اولیه به صفر می رسد و با خشک شدن خاک مقدار آن افزایش می یابد، تا به

مقدار حداکثر بارشی که منجر به هیچ بارش مازادی نمیشود برسد. این حداکثر مقدار به زمین حوضه،

کاربری اراضی، نوع خاک و ... وابسته است. این مقدار برای مناطق جنگلی به ۱۰ الی ۲۰ درصد بارش و

در مناطق شهری به ۰/۱ الی ۰/۲ اینچ می رسد.

نرخ تلفات ثابت را می توان بعنوان ظرفیت نفوذ نهایی خاک تعریف کرد.^۲ برخی مراجع جدول زیر را

برای این پارامتر برای انواع هیدولوژیکی خاک پیشنهاد نموده است.

^۱ initial and constant loss model

^۲ SCS1986 and Skaggs and Khaleel 1982

Table 11. SCS soil groups and infiltration (loss) rates (SCS, 1986; Skaggs and Khaleel, 1982)

Soil Group	Description	Range of Loss Rates (in/hr)
A	Deep sand, deep loess, aggregated silts	0.30-0.45
B	Shallow loess, sandy loam	0.15-0.30
C	Clay loams, shallow sandy loam, soils low in organic content, and soils usually high in clay	0.05-0.15
D	Soils that swell significantly when wet, heavy plastic clays, and certain saline soils	0.00-0.05

۳- روش گرین امپت^۳

این روش یک مدل مفهومی برای مدلسازی نفوذ آب در خاک است. بر این اساس میتوان گفت انتقال آب در درون خاک و ظرفیت نفوذ آب در خاک با معادله ریچارد قابل تبیین است. معادله ریچارد از قانون داریسی^۴ برای خاکهای غیراشباع و قانون بقای جرم بدست می آید.

بدین ترتیب مقدار نفوذ یا تلفات در هر بازه زمانی از رابطه زیر بدست می آید:

$$f_t = K \left[\frac{1 + (\phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right]$$

که در آن:

f_t : میزان افت در زمان t

K : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

$\phi - \theta_i$: کاهش حجمی رطوبت خاک (خشکی حجمی خاک) ° آب اولیه موجود در خاک منهای تخلخل

می باشد. در شرایط خاک اشباع $\phi = \theta_i$ و در شرایط خاک کاملاً خشک $\theta_i = 0$ می باشد.

S_f : مکش خاک در جبهه رطوبتی خاک

F_t : افت یا نفوذ تجمعی

همانطور که گفته شد این روش شامل نفوذ اولیه نیز می باشد. این شرایط اولیه مبین ماندابهای سطحی می

باشد که در غیر اینصورت در مدل گنجانده نمی شد.

تخمین پارامترهای مدل:

³ Green ampt

⁴ Em1110-2-1417

⁵ Volume Moisture Deficit

تلفات اولیه خاک^۶: این پارامتر وابسته به نوع خاک بوده و مشابه نفوذ اولیه^۷ در روش SCS قابل تخمین است.

هدایت هیدرولیکی^۸: جدول زیر مقدار این پارامتر را بر حسب نوع خاک نشان می دهد.

مکش در جبهه رطوبتی خاک: تابعی از توزیع اندازه منافذ خاک می باشد که خود تابعی از نوع خاک است و در جدول زیر مقادیر آن ارائه شده است.

Table 12. Texture class estimates (Rawls, et al., 1982)

Texture Class	Porosity, ϕ (cm ³ /cm)	Hydraulic conductivity, θ , saturated (cm/hr)	Wetting front suction (cm)
Sand	0.437	21.00	10.6
Loamy sand	0.437	6.11	14.2
Sandy loam	0.453	2.59	22.2
Loam	0.463	1.32	31.5
Silt loam	0.501	0.68	40.4
Sandy clay loam	0.398	0.43	44.9
Clay loam	0.464	0.23	44.6
Silty clay loam	0.471	0.15	58.1
Sandy clay	0.430	0.12	63.6
Silty clay	0.479	0.09	64.7
Clay	0.475	0.06	71.4

۴- روش SCS

در روشی که اداره حفاظت خاک ایالات متحد (SCS) برای محاسبه تلفات بارندگی ارائه کرده، براساس نوع و بافت خاک و کاربری اراضی، عددی با نام شماره منحنی رواناب (CN) برای هر حوزه تعیین می-گردد و متعاقب آن تلفات بارندگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1-4)$$

⁶ Initial Loss

⁷ Initial Abstraction

⁸ Hydraulic conductivity

که در آن S حداکثر میزان ذخیره القوه بر حسب میلیمتر و CN عدد منحنی رواناب حوزه و بدون بعد است. در این روش، تلفات اولیه که مربوط به تلفات بارندگی پیش از جاری شدن رواناب می‌باشد، به مقدار $0.2 \times S$ در نظر گرفته می‌شود. این تلفات را می‌توان مشتمل بر ذخیره موقت در ناهمواری‌ها، تبخیر، نفوذ اولیه آب باران در خاک و بخشی از باران دانست که در روی شاخ و برگ گیاهان و نظایر آن محبوس شده، به سطح زمین نمی‌رسند. در برخی موارد در حوزه‌های شهری برای تلفات اولیه، بجای $S \times 0.2$ از $0.1 \times S$ استفاده شده است. همچنین تحقیقاتی که در برخی جوامع صنعتی بر روی میزان تلفات در اراضی شهری انجام شده، نشان داده است که برای این نواحی، تلفات اولیه ناشی از جذب سطحی باران بر روی سطوح مختلف که بخشی از تلفات اولیه می‌باشد را می‌توان بین 0.5 تا 2.5 میلیمتر در نظر گرفت. [۶۵]

۴-۵ اندازه‌گیری نفوذ

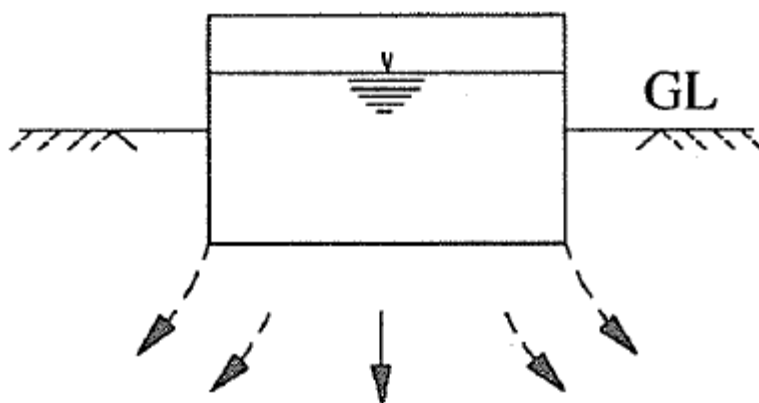
برای اندازه‌گیری میزان نفوذ از دو روش استفاده می‌شود:

✓ استفاده از نفوذسنج

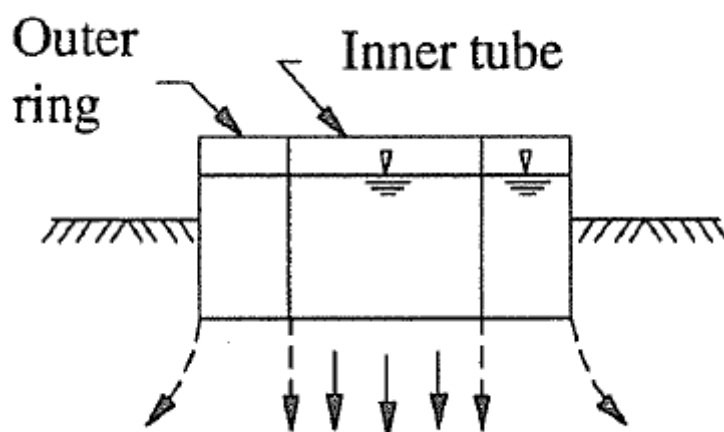
✓ استفاده از شبیه‌ساز بارش

الف) استفاده از نفوذسنج

- دستگاه نفوذسنج معمولی از لوله‌ای به قطر ۳۰ و ارتفاع ۶۰ سانتیمتر تشکیل شده است. این لوله تا حدود ۵۰ سانتیمتر در خاک کوبیده می‌شود. سپس به ارتفاع ۵ سانتیمتر درون آن آب ریخته می‌شود. با شروع پدیده نفوذ سطح آب شروع به پایین رفتن می‌نماید. با اضافه کردن مرتب آب، سطح آب ثابت نگه داشته می‌شود. در فواصل زمانی مختلف حجم آبی که اضافه می‌شود یادداشت می‌گردد. با توجه به سطح مقطع لوله، ارتفاع نفوذ در زمانهای مختلف به دست می‌آید. آزمایش را به مدت ۲ تا ۳ ساعت ادامه داده تا سرعت نفوذ ثابت شود.



- معمولاً برای جلوگیری از انتشار مواد کلوئیدی سطح خاک و گل آلود شدن، یک توری فلزی نازک در سطح خاک قرار می‌دهند.
- مهم‌ترین ایرادی که روش یاد شده دارد، این است که آب نفوذ یافته در خروجی لوله پخش شده و در واقع سطح لوله نمی‌تواند نماینده سطحی باشد که نفوذ در آن اتفاق می‌افتد. برای رفع این مشکل از دو لوله (استوانه) هم مرکز استفاده می‌شود. در این حالت بین دو استوانه و استوانه داخلی آب ریخته شده و سطح آب ثابت نگه داشته می‌شود اما اندازه‌گیری‌ها فقط در مورد استوانه داخلی انجام می‌شود. قطر استوانه خارجی ۶۰ سانتیمتر است.
- به دلیل عدم برخورد قطرات باران به طور مستقیم به سطح خاک و وجود ارتفاع آب روی خاک، نفوذ اندازه‌گیری شده می‌تواند تا ۲ برابر مقدار واقعی آن در طبیعت باشد. استفاده از روش دو استوانه به واقعیت نزدیک‌تر است. در طبیعت، تراوش در محدوده وسیعی اتفاق می‌افتد لوله خارجی تراوش جانبی را از بین برده و باعث حرکت عمودی آب می‌گردد.

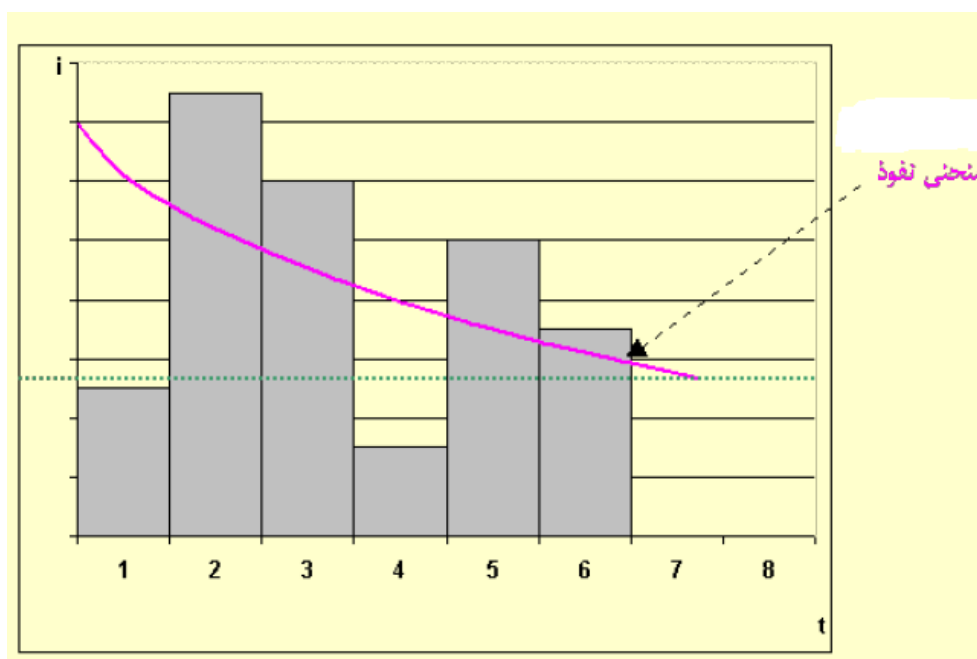


ب) استفاده از شبیه‌ساز بارش

در این روش آب با شدتی مشخص بر روی یک قطعه آزمایشی پاشیده می‌شود. قطعه مورد آزمایش در حدود ۲ متر عرض و ۴ متر طول دارد (البته ابعاد ۰,۳ متر در ۰,۷۵ متری نیز وجود دارد). عمل پاشیدن آب بر روی قطعه مورد آزمایش با استفاده از نازل‌ها که در ارتفاع ۲ متری قرار دارند بطور یکنواخت و به مدت ۲ تا ۳ ساعت ادامه می‌یابد. در انتهای قطعه، محلی برای جمع‌آوری رواناب سطحی حاصله در نظر گرفته می‌شود. جمع‌آوری رواناب سطحی و اندازه‌گیری آن تا باقی ماندن جریان ادامه می‌یابد. سپس با استفاده از اختلاف بین بارش ایجاد شده و رواناب جمع‌آوری شده، میزان نفوذ محاسبه می‌شود.

۴-۶ استفاده از منحنی‌های نفوذ

با مقایسه منحنی‌های نفوذ و شدت بارندگی در زمان‌های مختلف می‌توان ارتفاع رواناب حاصله را به دست آورد. با رسم این دو منحنی در یک دستگاه محور مختصات همانند شکل ذیل خواهیم داشت.



✓ در نقاطی که منحنی بارندگی، بالاتر از منحنی نفوذ قرار گیرد شدت بارش بیش از نفوذ بوده و مازاد آن به صورت رواناب در سطح زمین جاری می‌شود.

✓ در نقاطی که منحنی بارش زیر منحنی نفوذ قرار گیرد تمامی بارندگی در زمین نفوذ کرده و روانابی وجود نخواهد داشت.

۴-۷ شاخص‌های نفوذ

در عمل به دلیل بزرگی مساحت حوضه‌های آبریز و تغییرات نوع و جنس خاک‌ها و شرایط فیزیکی حاکم بر حوضه‌ها، میزان نفوذ در بخش‌های مختلف حوضه متفاوت است. در این حوضه‌ها بهتر است از میانگین میزان نفوذ استفاده شود. بکارگیری میانگین میزان نفوذ به صورت ضرایب ساده‌ای به نام شاخص‌های نفوذ می‌باشد. مقدار شاخص نفوذ در طول مدت بارندگی ثابت است. شاخص‌های مهمی که در هیدرولوژی کاربرد دارند ϕ و w هستند.

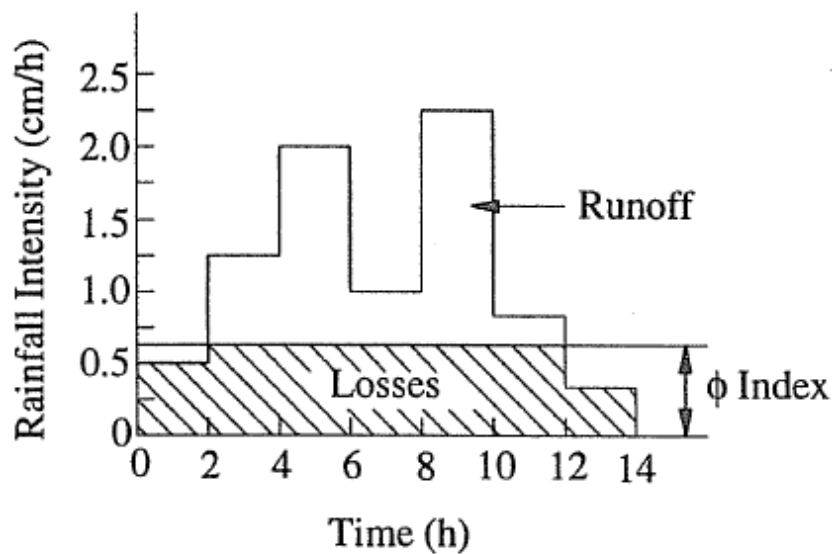
۴-۷-۱ شاخص ϕ (ϕ Index)

شاخص ϕ عبارتست از مقدار متوسط تلفات آب در طول بارندگی به نحوی که تمامی بارندگی اضافی بالاتر از این شاخص به رواناب تبدیل می‌شود. در حقیقت شاخص ϕ نمایانگر تاثیر توام نفوذ، برگاب، نگهداشت سطحی (چالاب) است.

$$\phi = \frac{P - Q}{t_r} = \frac{inf + s + int}{t_r}$$

P : ارتفاع بارندگی Q : ارتفاع رواناب inf : نفوذ s : نگهداشت سطحی

int : برگاب t_r : زمان بارش مازاد (مدت زمانی است که شدت بارندگی بیشتر از شدت میانگین تلفات یا شاخص ϕ است).



از آنجایی که مقدار تبخیر و تعرق در طول مدت بارندگی ناچیز است، بنابراین مقدار آن عموماً به عنوان تلفات بارندگی در طول مدت بارش مطرح نمی‌گردد.

✓ طریقه ترسیم

۱) ابتدا می‌بایست هایتوگراف و هیدروگراف بارندگی موجود باشد. هایتوگراف منحنی است که تغییرات شدت بارندگی نسبت به زمان را نشان می‌دهد بنابراین سطح زیر آن برابر با ارتفاع

بارندگی است. هیدروگراف منحنی است که تغییرات دبی رواناب نسبت به زمان را نشان می‌دهد بنابراین سطح زیر آن برابر با حجم رواناب است.

(۲) با استفاده از هایتوگراف بارندگی و مقادیر فرضی شاخص ϕ ، مقدار رواناب را محاسبه نموده و منحنی تغییرات ارتفاع رواناب نسبت به مقادیر ϕ در یکدستگاه محور مختصات رسم می‌گردد.

(۳) با استفاده از هیدروگراف، حجم کل رواناب بدست آمده و با تقسیم آن بر سطح حوضه، ارتفاع رواناب محاسبه می‌شود. با انتقال این ارتفاع به منحنی ترسیم شده در مرحله ۲، شاخص ϕ بدست می‌آید.

۴-۷-۱ شاخص w (w Index)

شاخص w عبارتست از متوسط شدت نفوذ در هنگامی که شدت بارندگی از ظرفیت نفوذ بیشتر است. در واقع شاخص w همان شاخص ϕ است با این تفاوت که نگهداشت سطحی (چالاب) و برگاب را شامل نمی‌شود.

$$w = \frac{F}{t_r} = \frac{P - Q - s - int}{t_r}$$

در این رابطه:

F : مقدار کل نفوذ P : مقدار کل بارندگی Q : رواناب سطحی s : نگهداشت سطحی

int : برگاب t_r : مدت زمانی است که شدت بارندگی از شدت متوسط نفوذ (w) بیشتر است.

✓ در شرایطی که خاک کاملاً مرطوب است و یا مقدار نفوذ به حداقل خود رسیده است (f_c)

چنانچه از نگهداشت سطحی هم صرفنظر شود دو شاخص ϕ و w با هم مساوی بوده و در این

حالت بر حسب تعریف، w را بصورت w_{min} نشان می‌دهند.

✓ هنگامی که از w_{min} استفاده شود حداکثر سیلاب بدست می‌آید. چرا؟

✓ در یک بارندگی متوسط (طولانی نباشد) با شدت بارش غیریکنواخت، مقدار شاخص ϕ همواره

کمی بزرگتر از مقدار شاخص w است.